

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

RECONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN QUE CONTIENEN GENERACIÓN DISTRIBUIDA HIDROELÉCTRICA, APLICANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN COLONIA DE HORMIGAS

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA EN DISTRIBUCIÓN**

RENÉ ALEXANDER PALACIOS OCHOA

DIRECTOR: DR. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

Quito, junio del 2020

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por René Alexander Palacios Ochoa, bajo mi supervisión.

DR. FABIÁN PÉREZ YAULI
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo René Alexander Palacios Ochoa, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

RENÉ ALEXANDER PALACIOS OCHOA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y a mi hermano.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco al Ing. Ricardo Dávila, Ing. Oscar Proaño, Ing. Mentor Poveda por las indicaciones técnicas y amable atención en la Empresa Eléctrica Quito. Agradezco al director del trabajo de titulación Dr. Fabián Pérez por las observaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Preguntas de investigación	3
1.2 Objetivo General	4
1.3 Objetivos Específicos	4
1.4 Alcance	4
1.5 Marco Teórico	6
1.5.1 Estado del arte	6
1.5.2 Algoritmo de colonia de hormigas	13
1.5.3 Modelación y simulación de redes de distribución con OpenDSS.....	16
1.5.4 Regulación del ARCONEL respecto a los niveles de Voltaje.....	32
2. METODOLOGÍA.....	33
2.1 Pasos generales de la metodología	34
2.1.1 Líneas de enlace y lazos de la red	34
2.1.2 Creación de la red en OpenDSS.....	35
2.1.3 Comando de los flujos de potencia desde MATLAB.....	35
2.1.4 Programar el algoritmo de colonia de hormigas.....	36
2.1.5 Pruebas de funcionamiento y resultados.....	36
2.2 Procesos para la programación del algoritmo de Colonia de Hormigas..	37
2.2.1 Programa principal del algoritmo de colonia de hormigas.....	37
2.2.2 Construcción de la red eléctrica de distribución.....	46
2.2.3 Determinación de la topología radial.....	47
2.2.4 Verificación del nivel de voltajes en los nodos	52
2.2.5 Verificación de las corrientes en las líneas.....	53
2.3 Validación del algoritmo sobre redes eléctricas estándar	54
2.3.1 Validación sobre la red estándar de 33 nodos.....	55
2.3.2 Validación sobre la red estándar de 69 nodos.....	58

2.3.3	Resumen de las fórmulas del Algoritmo de Colonia de Hormigas	62
2.4	Aplicación de la reconfiguración sobre la red IEEE de 34 nodos	63
2.4.1	Conformación de lazos para la red IEEE de 34 nodos	65
2.4.2	Matrices de feromona y visibilidad para la red local	67
2.4.3	Probabilidades de transición entre lazos para la red IEEE de 34 nodos	69
2.4.4	Vector de dispositivos de maniobra de la red IEEE de 34 nodos	70
2.5	Aplicación de la reconfiguración sobre la red local de 2894 nodos.....	70
2.5.1	Conformación de lazos para la red local de 2894 nodos	73
2.5.2	Matrices de feromona y visibilidad para la red local	76
2.5.3	Probabilidades de transición entre lazos para la red local	77
2.5.4	Vector de dispositivos de maniobra de la red local	78
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
3.1	Resultados	80
3.1.1	Resultados de la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida.....	86
3.1.2	Resultados de la red IEEE de 34 nodos con generación distribuida.....	96
3.1.3	Resultados de la red local de 2894 nodos sin generación distribuida	105
3.1.4	Resultados de la red local de 2894 nodos con generación distribuida.....	115
3.2	Discusión.....	124
3.2.1	Red IEEE de 34 nodos.....	124
3.2.2	Red local de 2894 nodos	128
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
4.1	Conclusiones.....	133
4.2	Recomendaciones.....	136
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
6.	ANEXOS.....	145
	ANEXO I.....	146
A1.1	Procedimiento para ejecutar los programas	146
	ANEXO II.....	151
A2.1	Programas de la red IEEE de 34 nodos	151
A2.1.1	Programa principal de la red IEEE de 34 nodos	151
A2.1.2	Programa para la simulación de la red ieee de 34 nodos sin reconfigurar la red	161
A2.1.3	Programa para la construcción de la red IEEE de 34 nodos	163
A2.1.4	Programa para la creación de tablas de voltaje, corrientes y potencias de la red IEEE de 34 nodos.....	173
A2.1.5	Programa para la verificación de voltajes en los nodos	180

A2.1.6 Programa para la verificación de corrientes en las líneas	181
ANEXO III.....	184
A3.1 Programas para la reconfiguración de la red de 2894 nodos	184
A3.1.1 Programa principal para la red de 2894 nodos.....	184
A3.1.2 Programa para la simulación de la red local de 2894 nodos sin reconfigurar la red..	194
A3.1.3 Programa para la construcción de la red local de 2894 nodos.....	197
A3.1.4 Función de verificación de que no existan líneas entre nodos en los cuales se ha creado los transformadores	202
A3.1.5 Programa para la creación de tablas de voltaje, corrientes y potencias de la red local de 2894 nodos.....	204
A3.1.6 Programa para la verificación de voltajes en los nodos	211
A3.1.7 Programa para la verificación de corrientes en las líneas	212
ANEXO IV	215
A4.1 Interfaz gráfica de la red IEEE de 34 nodos	215
A4.1.1 Programa de la interfaz gráfica de la red IEEE de 34 nodos	215
ANEXO V	221
A5.1 Interfaz gráfica de la red local de 2894 nodos	221
A5.1.1 Programa de la interfaz gráfica de la red local de 2894 nodos	221
ANEXO VI	227
A6.1 Resultados de la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida.....	227
A6.1.1 Resultados de potencia activa para la red IEEE de 34 nodos	228
A6.1.2 Resultados de corriente en las líneas de la red IEEE de 34 nodos.....	232
A6.1.3 Resultados de voltaje en los nodos de la red IEEE de 34 nodos	256
A6.2 Resultados de la red IEEE de 34 nodos con generación distribuida	280
A6.2.1 Resultados de potencia activa para la red IEEE de 34 nodos	281
A6.2.2 Resultados de corriente en las líneas de la red IEEE de 34 nodos.....	285
A6.1.3 Resultados de voltaje en los nodos de la red IEEE de 34 nodos	309
A6.3 Resultados de la red local de 2894 nodos sin generación distribuida	333
A6.3.1 Resultados de potencia activa para la red local de 2894 nodos.....	334
A6.3.2 Resultados de corriente en las líneas de la red de 2894 nodos.....	338
A6.3.3 Resultados de voltaje en los nodos de la red 2894 nodos.....	362
A6.4 Resultados de la red local de 2894 nodos con generación distribuida ...	380
A6.4.1 Resultados de potencia activa para la red local de 2894 nodos.....	381
A6.4.2 Resultados de corriente en las líneas de la red de 2894 nodos.....	385
A6.4.3 Resultados de voltaje en los nodos de la red 2894 nodos.....	409

ANEXO VII	426
A7.1 Programas para la reconfiguración de la red de 33 nodos	426
A7.1.1 Programa principal para la red de 33 nodos.....	426
A7.1.2 Programa para la construcción de la red de 33 nodos	435
A7.1.3 Programa para la creación de tablas de voltaje, corrientes y potencias de la red de 33 nodos.....	437
A7.1.4 Programa para la verificación de voltajes en los nodos	443
A7.1.5 Programa para la verificación de corrientes en las líneas	444
ANEXO VIII	447
A8.1 Programas para la reconfiguración de la red de 69 nodos	447
A8.1.1 Programa principal para la red de 69 nodos.....	447
A8.1.2 Programa para la construcción de la red de 69 nodos	455
A8.1.3 Programa para la creación de tablas de voltaje, corrientes y potencias de la red de 69 nodos.....	457
A8.1.4 Programa para la verificación de voltajes en los nodos	463
A8.1.5 Programa para la verificación de corrientes en las líneas	464

RESUMEN

Actualmente la tendencia de las investigaciones científicas publicadas para resolver problemas de optimización está dirigida a la utilización de algoritmos metaheurísticos, en este trabajo se ha seleccionado el algoritmo evolutivo de colonia de hormigas adaptándolo al problema eléctrico de reconfiguración de la topología de redes de distribución, para lo cual se realiza algunas modificaciones al algoritmo original. La metodología propuesta en este trabajo tiene la ventaja de siempre encontrar soluciones factibles considerando la topología radial de la red eléctrica de distribución. Las soluciones se generan luego de cumplir la restricción de topología radial por lo cual no es necesario realizar correcciones intermedias en el flujo del algoritmo como ocurre con otras metodologías

El objetivo de la reconfiguración de la red de distribución es minimizar las pérdidas de potencia activa, manteniendo un nivel de voltaje en las barras en un rango admisible, y la cargabilidad de las líneas. El algoritmo de reconfiguración de la red de distribución es probado sobre dos redes de distribución con y sin generación distribuida hidroeléctrica. Se analiza el efecto de la fuente de generación distribuida en la red, en cuanto a las pérdidas de potencia en las líneas, perfiles de voltaje en los nodos, y cargabilidad de las líneas. Se utiliza la generación distribuida hidroeléctrica por ser la fuente de energía eléctrica más utilizada en el Ecuador.

La reconfiguración de la topología de la red puede ser utilizada para fines de planificación de la red y para operación de la red, en este trabajo se presenta un análisis operativo para diferentes niveles de demanda durante un periodo de 24 horas. Para cada hora del día se realiza las pruebas de simulación de la red con y sin generación distribuida y luego se aplica el algoritmo de colonia de hormigas para obtener topologías radiales que mejoren las pérdidas en las líneas de la red.

Las dos redes de distribución que se utilizan en este trabajo son la red IEEE de 34 nodos y una red local. Para las simulaciones con generación distribuida de la red IEEE de 34 nodos, se utiliza dos generadores sincrónicos que se colocan en dos nodos de la red. Por otra parte, la red local tiene dos generadores hidroeléctricos conectados en un solo nodo de la red.

PALABRAS CLAVE: Algoritmo de colonia de hormigas, matrices de feromona y visibilidad, reconfiguración de la red de distribución eléctrica, reducción de pérdidas de potencia activa, topología radial.

ABSTRACT

Currently the trend of publishing scientific research to solve optimization problems is addressed to metaheuristic algorithms, in this work has been selected the evolutionary algorithm ant colony optimization, which is adapted to the electrical problem of distribution networks reconfiguration, for which some modifications has been realized on the original algorithm. The methodology proposed in this work has the advantage of always finding specific feasible solutions for the radial topology of the distribution grid. The solutions are produced after complying with the radial topology restriction, so it is not necessary to make intermediate corrections in the algorithm flow as other methodologies do.

The objective of the reconfiguration of the distribution network is to minimize the losses of active power lines, to keep a voltage level at the bars in a permissible range and loadability of the lines. The distribution network reconfiguration algorithm is tested on distribution networks with and without hydroelectric distributed generation. The effect of the distributed generation source in the network is analyzed in terms of power losses at the lines, voltage profiles at the nodes and loadability of the lines. The distributed hydroelectric generation is used due to it is the most utilized source of electrical energy in Ecuador.

The reconfiguration of the network topology can be used for network planning purposes and for network operation. This work presents an operational analysis for different levels of demand during a 24-hour period. For each hour of the day the simulation tests of the network are carried out with and without distributed generation and then the ant colony algorithm is applied to obtain radial topologies that improve losses in the network lines.

The two distribution networks used in this work are the 34-node IEEE network and a local network. For simulations with distributed generation of the 34-node IEEE network, two synchronous generators are used that are placed on two nodes of the network. On the other hand, the local network has two hydroelectric generators connected in a single node of the network.

KEYWORDS: Active power losses reduction, ant colony optimization, electrical distribution reconfiguration, pheromone and visibility matrices, radial network.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de demanda en redes de distribución eléctrica puede causar incremento de las pérdidas de potencia activa, niveles de voltaje en los nodos fuera del rango permisible, y sobrecarga en las líneas. Las pérdidas de potencia activa en las líneas, tienen un efecto directo en el costo de operación, los niveles de voltaje fuera del rango permisible pueden causar daños a los equipos conectados a la red, y en el caso de sobrecarga en las líneas se podrían activar las protecciones de la red.

En este trabajo se realiza la reconfiguración óptima de redes de distribución aplicando un algoritmo de colonia de hormigas adaptado a la solución de este problema. Mediante el algoritmo de colonia hormigas se encontrará una topología radial cuya función objetivo es minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas manteniendo un perfil de voltaje dentro de un rango permisible, y sin sobrecarga en las líneas. La formulación de este problema de optimización es:

Función objetivo: Minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas

$$\text{Minimizar} \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \right) \quad (1.1)$$

Restricciones:

1. Voltaje $V_{min} \leq V_j \leq V_{max}$ (1.2)

2. Corriente $I_i < I_{imax}$ (1.3)

3. Topología radial $T(N, B) \in G(N, B): B = N - 1$ (1.4)

Donde I_i es la corriente en la línea i de la red, R_i es la resistencia de la línea i .

V_j es el voltaje en el nodo j de la red. V_{min} y V_{max} son los límites de voltaje en los nodos.

I_{imax} es la capacidad máxima de corriente de la línea i .

N es el número de nodos de la red, B es el número de líneas. G es un grafo, T es un árbol, es decir un grafo que cumple con la ecuación (1.4) y en el cual no se forman ciclos o lazos..

Cumplir con la topología radial de la red significa que la red debe ser un grafo tipo árbol. En un árbol no existe nodos aislados, ni líneas desconectadas. En el capítulo 2 se presenta los procesos para desarrollar el algoritmo de colonia de hormigas que cumple la función objetivo y las restricciones indicadas en las ecuaciones (1.1) a (1.4).

En las redes de distribución se tiene diferentes niveles de demanda durante el día, y por lo tanto una topología de red fija no es óptima para la operación de la red. Para que la red de distribución funcione con el menor valor de pérdidas de potencia activa en las líneas, se necesitaría diferentes topologías de red según el nivel de demanda durante el día.

Para solucionar este problema se realiza la reconfiguración de la red de distribución a través del cambio de estado de sus dispositivos de maniobra, con la función objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas y sujeto a las restricciones de topología radial de la red, mantener los perfiles de voltajes dentro de un rango permisible y cargabilidad de las líneas. Se realizará reconfiguraciones de la red considerando curvas de demanda en los nodos para un periodo de 24 horas, para tener topologías de red con las menores pérdidas de potencia activa en las líneas, con lo cual se puede decidir si en determinadas horas del día es conveniente o no un cambio de topología.

En este trabajo de titulación se resuelve el problema de reconfiguración de una red de distribución cambiando el estado de los dispositivos de maniobra instalados en la misma, se elabora una metodología aplicable para cualquier red de distribución con y sin generación distribuida hidroeléctrica, utilizando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas, Ant Colony Optimization (ACO). Se analizan dos casos de estudio, con y sin generación distribuida hidroeléctrica, pues estos representan en su mayoría la realidad de las redes de distribución del Ecuador.

La reconfiguración de la red de distribución es un problema combinatorio, que aumenta su complejidad para redes de gran tamaño, lo cual incrementa en gran medida el esfuerzo computacional para resolver el problema. Por lo tanto, es necesario desarrollar un algoritmo que produzca una solución en un tiempo aceptable, lo cual se logra utilizando métodos metaheurísticos que encuentran un óptimo sin búsqueda exhaustiva.

Para cumplir con la condición de topología radial de la red de distribución se utiliza una metodología que siempre proporciona soluciones de reconfiguración con topologías radiales y en este trabajo es combinado con el algoritmo de colonia de hormigas.

Como parte del proceso de búsqueda de la topología con menores pérdidas de potencia, se requiere los cálculos de potencia en todas las líneas de la red, este cálculo se realiza mediante la herramienta de simulación de redes de distribución OpenDSS del *Electric Power Research Institute* EPRI. Los flujos de potencia en OpenDSS son controlados mediante la comunicación con MATLAB. En MATLAB se programa el algoritmo de colonia

de hormigas y todos los procesos necesarios para aplicarlo al problema de reconfiguración de la red de distribución eléctrica.

El algoritmo de colonia de hormigas presentado en este trabajo es adaptado al problema de reconfiguración de redes de distribución, y tiene una ventaja importante respecto a otros algoritmos encontrados en la literatura científica. La característica que aventaja al algoritmo propuesto es que siempre entrega soluciones factibles con topología radial y no es necesario realizar correcciones a las soluciones entregadas en ninguna parte del flujo del algoritmo. Adicionalmente la metodología para encontrar una topología radial puede ser implementada para redes de gran tamaño sin tener que aumentar la complejidad de los procesos que constituyen el algoritmo.

La metodología que se elabora en este trabajo se caracterizará por ser general, es decir podrá ser aplicada para la reconfiguración de cualquier red de distribución, con o sin generación distribuida hidroeléctrica. Sin embargo, para validar esta metodología, se utiliza la red de distribución IEEE de 34 nodos y una red real local que tiene 2894 nodos.

Se considera varios niveles de demanda en los nodos según curvas de demanda de 24 horas. Se aplica el algoritmo de colonia de hormigas para reconfigurar cada red, encontrando las topologías que reducen las pérdidas de potencia en las líneas, mantienen los perfiles de voltaje en un nivel admisible y eliminan o reducen las sobrecargas en las líneas. Las dos redes antes mencionadas, serán modificadas añadiendo en uno de sus nodos una fuente de energía hidroeléctrica, para estos casos también se aplicará diferentes niveles de demanda para las 24 horas del día.

1.1 Preguntas de investigación

¿Cómo desarrollar una metodología aplicando un algoritmo adaptado de colonia de hormigas para resolver el problema de reconfiguración de la topología de una red de distribución eléctrica?

¿Cómo implementar la programación de la reconfiguración de la red de distribución eléctrica con la función objetivo de reducir las pérdidas en las líneas y con las restricciones de topología radial de la red, voltaje en los nodos en un rango admisible y corriente en las líneas dentro de los límites de su capacidad?

¿Cuál es el impacto de la reconfiguración sobre la red de distribución IEEE de 34 nodos y sobre la red local respecto a las pérdidas de potencia en las líneas, corriente en las líneas y voltaje en los nodos?

¿Cuál es el impacto de la generación distribuida sobre la red IEEE de 34 nodos y sobre la red local respecto a las pérdidas de potencia en las líneas, corriente en las líneas y voltaje en los nodos?

1.2 Objetivo General

Desarrollar una metodología para la reconfiguración óptima de redes de distribución que contienen generación distribuida hidroeléctrica, aplicando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas para reducir las pérdidas de potencia en las líneas y cumplir con el nivel de voltaje permisible, radialidad y la cargabilidad en las líneas.

1.3 Objetivos Específicos

Desarrollar un algoritmo para la reconfiguración de redes de distribución, mediante el cambio de estado de los dispositivos de maniobra, utilizando un algoritmo de optimización de colonia de hormigas.

Programar en MATLAB el algoritmo de optimización de colonia de hormigas para la reconfiguración de redes de distribución con la función objetivo de reducir las pérdidas de potencia en las líneas, considerando como restricciones la radialidad, la cargabilidad, y los niveles de voltaje en los nodos dentro del rango permitido.

Desarrollar en MATLAB una rutina que enlace esta herramienta computacional con OpenDSS y que permita comandar desde MATLAB los flujos de potencia en OpenDSS.

Desarrollar en MATLAB una rutina que permita convertir la información de las bases de datos de la red real proporcionada por la Empresa Eléctrica Quito, al formato y código de OpenDSS.

Aplicar la metodología propuesta sobre las redes de distribución IEEE de 34 nodos y a la red real con generación distribuida hidroeléctrica proporcionada por la Empresa Eléctrica Quito, considerando diferentes niveles de demanda.

1.4 Alcance

En este trabajo se desarrollará una metodología para la reconfiguración de redes de distribución con y sin generación distribuida. La función objetivo del problema de optimización es minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas, y las restricciones son: los niveles de voltaje permisibles en los nodos, el límite de cargabilidad de las líneas y la radialidad de la red de distribución. Los rangos de voltajes permisibles en los nodos se

establecerán en base a la normativa vigente de ARCONEL para la Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución.

La metodología que se elaborará en este trabajo de titulación para la reconfiguración de una red de distribución se basa en un algoritmo de optimización de colonia de hormigas. Esta metodología podrá ser aplicada sobre cualquier red de distribución, sin embargo, en este trabajo será validada al aplicarla a dos casos de estudio: la red de distribución IEEE de 34 nodos, y a una red de distribución real proporcionada por la Empresa Eléctrica Quito. La red real contiene generación distribuida hidroeléctrica. Se utilizará energía hidroeléctrica por ser la tecnología más utilizada en el Ecuador. Para este trabajo se propone curvas de demanda para un periodo de 24 horas de operación de la red, y se analizarán posibles reconfiguraciones de la red para cada hora de modo de obtener las topologías con menores pérdidas de potencia activa en las líneas. En este trabajo se asume que la sección de red de distribución sobre la cual se aplica la metodología de reconfiguración está completamente automatizada, por lo tanto, las reconfiguraciones obtenidas podrían aplicarse cada hora.

Se programará en MATLAB el algoritmo de optimización de colonia de hormigas aplicándolo a la reconfiguración de redes de distribución. Cabe resaltar que en la actualidad MATLAB no tiene entre sus herramientas de optimización el algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas, por tal motivo es necesario programar completamente el algoritmo.

Considerando la gran cantidad de nodos que posee la red real con generación distribuida hidroeléctrica, la validación de la metodología propuesta se realizará únicamente sobre una sección de red delimitada por aproximadamente cien nodos. Para esto, se aplicará diferentes niveles de demanda en algunos nodos de la sección de la red real determinada y se realizará la reconfiguración considerando la reducción de pérdidas de potencia, adecuados niveles de voltaje y radialidad.

La ejecución del algoritmo de colonia de hormigas aplicado a la reconfiguración de redes de distribución requiere la simulación de flujos de potencia de la red, esto con el fin de obtener las pérdidas de potencia, niveles de voltaje en los nodos y cargabilidad de las líneas. De esta manera, la simulación de flujos de potencia se realizará en el software para redes de distribución OpenDSS. Para ello, se programará en MATLAB la comunicación con OpenDSS, de modo que los flujos de potencia que se ejecutan en OpenDSS serán comandados desde MATLAB.

Para modelar en OpenDSS la generación hidroeléctrica, se utilizará el modelo de un generador existente en dicho programa. Además, para los casos de estudio planteados se considerarán las redes de distribución con la ubicación de dispositivos de maniobra establecida, es decir, no se hará ubicación óptima de los dispositivos de maniobra, lo cual queda fuera del alcance de este trabajo.

1.5 Marco Teórico

El marco teórico de este documento está dividido en cuatro secciones. En la primera sección se describe el estado del arte relacionado al tema. En la segunda sección se describe el algoritmo de colonia de hormigas. En la tercera sección se presenta las principales características del software OpenDSS y como modelar redes de distribución. En la cuarta sección se presenta la normativa de ARCONEL respecto a los niveles de voltaje permitidos para redes de distribución eléctrica.

1.5.1 Estado del arte

La reducción de pérdidas en las líneas de una red de distribución se puede realizar mediante varios métodos como por ejemplo: mediante la inclusión de capacitores [1], balance de fases [2] y mediante la reconfiguración de la topología de la red.

La reconfiguración de la topología de la red de distribución eléctrica se realiza por varias razones, reducir las pérdidas de potencia activa en las líneas, mejorar el perfil de voltaje en los nodos y reducir la sobrecarga en las líneas. El ahorro de pérdidas de potencia activa en las líneas tiene relación directa sobre los costos de operación del sistema de distribución. El problema de reconfiguración de redes de distribución ha sido objeto de estudio desde hace varias décadas aplicando métodos de programación lineal y en los últimos 20 años se han incrementado las publicaciones sobre este tema aplicando algoritmos metaheurísticos. En [3] presenta uno de los primeros trabajos sobre reconfiguración de la topología de la red mediante un algoritmo heurístico que tiene como objetivo minimizar las pérdidas en las líneas de la red. La aplicación de esta técnica de optimización es realizada sobre una red de 33 nodos. A continuación, se presenta una descripción de algunos trabajos publicados sobre reconfiguración de redes de distribución mediante algoritmos metaheurísticos y al final de la sección se describe algunas publicaciones científicas sobre el algoritmo de colonia de hormigas.

Una de las primeras técnicas que se utilizó para reconfiguración de redes de distribución es templado simulado o enfriamiento simulado, se puede revisar algunos trabajos sobre

este tema en [4], [5], [6]. En [4] y [5] los autores presentan la técnica de optimización enfriamiento simulado, aplicado al problema de reconfiguración de una red de distribución para reducir pérdidas en las líneas y para balance de la carga en los nodos. La aplicación de este algoritmo es realizada sobre una red de 69 nodos. En [6] presenta el algoritmo de enfriamiento simulado modificado, para lo cual aplica un polinomio de enfriamiento con lo cual los resultados del algoritmo son encontrados en un menor tiempo de convergencia que con el algoritmo de enfriamiento simulado clásico.

Existen varios trabajos en los que se utiliza lógica difusa [7], [8], [9], [10], para resolver el problema de reconfiguración de redes, por ejemplo en [7] y [8] presenta un algoritmo de lógica difusa multiobjetivo reducir pérdidas, mejora de voltaje. En [9] se tiene un algoritmo que combina lógica difusa con redes neuronales de tres capas; el algoritmo es probado sobre dos redes estándar IEEE de 33 nodos y de 69 nodos, las ventajas principales de este método es que tiene un menor tiempo de ejecución para encontrar un mínimo de la función objetivo. En [10] presenta un algoritmo híbrido de lógica difusa y polinización de flores, en el cual aplica el algoritmo de polinización de flores para resolver el proceso de optimización y la parte de lógica difusa para mejorar la ejecución del algoritmo. Uno de los pocos trabajos en los que se aplica el algoritmo de polinización de flores se presenta en [11] para reconfigurar la red y para ubicación de capacitores con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia y mejorar el voltaje en los nodos. El algoritmo de polinización de flores es usado con más frecuencia para localización óptima de capacitores y unidades de generación distribuida.

Para reconfigurar la red de distribución existen algunas técnicas de algoritmos evolutivos, una de las más utilizadas comprende los algoritmos genéticos, entre varios artículos científicos sobre este tema se encuentran [12], [13], [14], [15]. En [12] presenta la aplicación de un algoritmo genético, la codificación de la red y la aplicación del algoritmo sobre una red de 33 nodos. En [13] presenta una descripción del algoritmo genético con clasificación no-dominante y los resultados al aplicarlo a las redes de distribución de 33 y 69 nodos. En [14] presenta una combinación de un algoritmo genético con lógica difusa, en este artículo el objetivo de la reconfiguración es maximizar la estabilidad de voltaje para determinados niveles de demanda. En [15] presenta la aplicación de un algoritmo genético para el problema de reconfiguración y adicionalmente presenta una técnica para mantener la topología radial de la red mediante algunas reglas basadas en teoría de grafos.

La aplicación de la técnica denominada evolución diferencial se puede encontrar en [16], [17], [18], [19]. En [16] utiliza la técnica de optimización llamada evolución diferencial para

resolver la reconfiguración de la red y también utiliza generación distribuida en la red, en esta técnica se debe ajustar los parámetros del algoritmo para la red específica sobre la cual se aplica. En [17] aplica un algoritmo que combina evolución diferencial con técnica de evolución diferencial con un algoritmo denominado simulación de crecimiento de plantas, la metodología es aplicada sobre una red estándar de 33 nodos y una red real de 83 nodos. En [18] presenta una descripción corta de la aplicación del algoritmo de evolución diferencial y los resultados de reducción de pérdidas de potencia en la red de 33 nodos. En [19] aplica la técnica de evolución diferencial sobre tres redes estándar de distribución, y compara con los casos base de las tres redes, la reducción de potencia total en las líneas y el nodo de menor caída de voltaje.

En [20] presenta un algoritmo evolutivo denominado por el autor optimización evolutiva con preservación de factibilidad, en este trabajo los flujos de potencia son realizados en OpenDSS y el algoritmo es probado sobre tres redes estándar de 33, 69 y 119 nodos; los resultados son comparados con otros métodos de reconfiguración de redes con lo cual prueba la efectividad del algoritmo.

Una de las técnicas más utilizadas para resolver problemas de optimización es el algoritmo búsqueda tabú o tabú search en inglés, en los trabajos publicados en [21], [22], [23], [24] se aplica este algoritmo para reconfigurar redes de distribución con la función objetivo de minimizar las pérdidas en las líneas. En [21] se aplica el algoritmo sobre dos redes estándar equilibradas de 69 y 119 nodos, en las cuales considera un escenario en el cual se aumenta la carga y se prueba la efectividad del algoritmo. En [23] aplica el algoritmo de búsqueda tabú adicionalmente considera información geográfica de la red. En [24] presenta un algoritmo basado en búsqueda tabú combinado con una operación de mutación con la finalidad de salir de mínimos locales.

Los algoritmos de optimización basados en el comportamiento de algunas especies de animales son aplicados a problemas de optimización de redes de distribución. Por ejemplo, el método de optimización cuckoo search algorithm se basa en el comportamiento de una especie de aves. Este algoritmo tiene la ventaja de tener pocos parámetros de ajuste, entre varios trabajos se puede encontrar el algoritmo cuckoo search en [25], [26], [27], [28]. En [25], [26] presentan la reconfiguración de redes de distribución considerando reducir pérdidas y mejorar en el perfil de voltaje. En [27] la reconfiguración de redes distribución es realizada considerando la localización de unidades de generación distribuida y presentan varios escenarios para el análisis de resultados. En [28] aplica este algoritmo

sobre redes estándar de 16, 33 y 69 nodos y compara los resultados en cuanto a reducción de potencia con otros métodos de reconfiguración de redes.

Uno de los algoritmos más utilizados para resolver el problema de reconfiguración de redes de distribución es el de optimización de enjambre de partículas, cuyo nombre en inglés es Particle Swarm Optimization. Algunos de los trabajos publicados sobre el algoritmo de enjambres se presentan en [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35]. En [29] encuentra la reconfiguración de la red y aplica el algoritmo en diferentes escenarios de reconfiguración con y sin unidades de generación distribuida. En [30] presenta un problema multiobjetivo, reducir las pérdidas de potencia en las líneas y mejorar el perfil de voltaje en los nodos. En [31] presenta un algoritmo de enjambre de partículas que ofrece acelerar el alcance del óptimo comparado con el algoritmo de enjambre clásico. En [32] y [33] presentan algoritmos de enjambre de partículas binario, que son aplicados sobre redes estándar de 33 y 69 nodos; estas redes son modeladas en OpenDss. En [34] utiliza el algoritmo de enjambre de partículas para la reconfiguración de redes con generación distribuida para diferentes modos de operación, como niveles de demanda y fluctuaciones en la generación distribuida. En [35] aplica un algoritmo de enjambre modificado a una red estándar de 33 nodos, en el cual reduce el tiempo de computación y obtiene una porcentaje de reducción de pérdidas de potencia mayor comparado con el algoritmo de enjambre clásico.

La aplicación de algoritmos basados en redes neuronales para reconfiguración de redes de distribución se pueden encontrar en [36], [37], [38], [39], [40], [41]. En [36] y [40] presentan el algoritmo de redes neuronales Hopfield, los autores aseguran obtener tiempos de ejecución menores que los obtenidos con algoritmos genéticos y de enjambre de partículas respectivamente. En [37] aplica un modelo de redes neuronales multicapa con aprendizaje de retro-propagación de error, el algoritmo es probado sobre una red de 52 nodos balanceada, el objetivo de la reconfiguración es obtener mejores condiciones de estabilidad de voltaje y reducir pérdidas de potencia. En [38] y [39] presentan un algoritmo de redes neuronales modificado, en [38] es aplicado sobre dos redes estándar de distribución de 16 y 33 nodos, en [39] utiliza una red estándar de 16 nodos. En [41] presenta un modelo de red neuronal cuyo entrenamiento se basa en inferencia difusa, las pruebas se realizan sobre una red estándar balanceada de 33 nodos. Los resultados son comparados con un algoritmo de enjambre, obteniendo menor tiempo de ejecución con redes neuronales, sin embargo, el algoritmo de enjambre obtiene mejores resultados de reducción de pérdidas de potencia de la red.

Entre los algoritmos inspirados en el comportamiento de ciertas especies se encuentra el algoritmo de optimización de ballenas, o en inglés Whale Optimization Algorithm el cual se basa en el comportamiento de las ballenas para la búsqueda de su presa. Este nuevo algoritmo se ha aplicado también al problema de reconfiguración de redes de distribución y se puede encontrar algunas publicaciones en [42], [43], [44]. En los artículos [42] y [43] se encuentra una descripción de la formulación del algoritmo, su aplicación en redes estándar balanceadas de 33, 69 y 119 nodos y una comparación de los resultados respecto a otros algoritmos. En [44] presenta un algoritmo de reconfiguración de redes de distribución en el que aplica una combinación del algoritmo de optimización de ballenas y del algoritmo de evolución diferencial; las pruebas de funcionamiento las realiza en las redes estándar de 33 nodos y de 69 nodos.

El algoritmo de forrajeo de bacterias o en inglés bacterial foraging algorithm aplicado al problema de reconfiguración de redes de distribución se puede encontrar en [45], [46], [47], [48]. En [45] presenta una combinación del algoritmo de forrajeo de bacterias y del algoritmo de enjambre de partículas, las pruebas del algoritmo son realizadas sobre la red estándar de 69 nodos. En [46], [47] y [48] presentan una explicación del funcionamiento del algoritmo, en [46] y [48] lo aplican sobre una red de 33 nodos y en [47] realiza las pruebas sobre redes de 16, 33 y 69 nodos. Los autores concluyen que este algoritmo es eficiente en términos de convergencia.

El algoritmo de simulación de crecimiento de plantas cuyo título en inglés es Plant Growth Simulation Algorithm es aplicado al problema de reconfiguración de redes de distribución en los artículos [49], [50], [51], [52]. En las publicaciones [49] y [50] se presentan los primeros trabajos sobre este algoritmo aplicado a reconfiguración de redes de distribución, en ambos trabajos presentan una explicación de la metodología, en [49] prueba la efectividad del algoritmo sobre la red estándar de 69 nodos, y en [50] sobre una red de 33 nodos. En [51] aplica este algoritmo sobre una pequeña red de 16 nodos y compara los resultados obtenidos respecto a un algoritmo genético. En [52] presenta la aplicación de este algoritmo sobre una red estándar de 33 nodos, realiza la reconfiguración de la red para varios escenarios con y sin generación distribuida. Los autores afirman que el algoritmo de simulación de crecimiento de plantas converge en pocas iteraciones.

El algoritmo de optimización de lobos grises o en inglés Grey Wolf Optimization Algorithm se basa en el comportamiento jerárquico de una especie de lobos para la caza, su aplicación al problema de reconfiguración de redes de distribución se encuentra en [53], [54], [55], [56], [57]. Este algoritmo es una de las técnicas de optimización más nuevas, se

basa en el comportamiento jerárquico de una especie de lobos para la caza. En [53] aplica este algoritmo sobre redes estándar de 33 y 69 nodos, compara los resultados con otros métodos como el algoritmo de enjambre de partículas en cuanto a reducción de pérdidas de potencia. En [54] presenta la reconfiguración de una red de distribución de 69 nodos equipada con generación distribuida, analiza escenarios de reconfiguración con y sin generación distribuida. En [55] presenta la reconfiguración de una red de distribución de 33 nodos con y sin generación distribuida, aplica dos algoritmos, el de optimización de lobos grises y el de enjambre de partículas; los resultados para varios escenarios son bastante similares en ambos algoritmos en cuanto a reducción de pérdidas de potencia de la red. En [56] presenta un algoritmo híbrido entre los algoritmos de enjambre de partículas y el de lobos grises, según el autor este método obtiene mejores resultados que la aplicación individual de cada algoritmo. En [57] aplica el algoritmo sobre la red estándar de 33 nodos, reduce pérdidas de potencia y mejora el perfil de voltaje en la red, en los resultados indican una pequeña mejora en la convergencia comparado con el algoritmo de enjambre de partículas.

En [58] presenta una revisión de la literatura sobre mejoras en la confiabilidad y reducción de pérdidas de potencia aplicando reconfiguración de la red de distribución.

El algoritmo de colonia de hormigas que se utiliza en este trabajo de titulación fue creado por Dorigo y publicado por primera vez en [59], el autor publicó un trabajo en el cual compara este algoritmo con otros métodos metaheurísticos para resolver el problema de optimización del vendedor viajero en [60]. Dorigo presenta algunas aplicaciones importantes de este algoritmo en [61]. El algoritmo de colonia de hormigas se aplica para resolver variedad de problemas de optimización, adaptándolo al campo de estudio correspondiente. En el campo de la distribución eléctrica permite resolver principalmente problemas de ubicación óptima de capacitores [62], [63], dimensionamiento óptimo de transformadores [64], ubicación óptima de compensadores estáticos de distribución [65], restauración del sistema de distribución y transferencia de carga entre alimentadores [66], ubicación óptima de unidades de generación distribuida [67], y reconfiguración óptima de redes, de este último existe gran cantidad de trabajos científicos y en la actualidad continúan las investigaciones sobre esta aplicación.

La reconfiguración de la topología de las redes de distribución aplicando el algoritmo de colonia de hormigas se puede encontrar en [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77]. En [68] presenta la descripción de la formulación del algoritmo de colonia de hormigas, y una comparación de los resultados respecto a otro métodos de reconfiguración

aplicados a una red de 33 nodos. En [69] presenta una variación del algoritmo de colonia de hormigas y compara los resultados obtenidos con el algoritmo de colonia de hormigas sin variación para una red de 33 nodos, obtiene un pequeño porcentaje de mejora en cuanto a pérdidas de potencia en la red.

En [70] presenta una metodología de reconfiguración de redes de distribución mediante un algoritmo de colonia de hormigas, el aporte principal de este trabajo es aplicar una metodología para conservar la topología radial de la red aplicando teoría de grafos, esta metodología se aplica con relativa facilidad para redes pequeñas, sin embargo, a medida que el tamaño de la red se incrementa, la aplicación de la metodología se vuelve más compleja y difícil de implementar. En [71] realiza la reconfiguración de redes de distribución aplicando un algoritmo ACO, en este trabajo presenta una metodología para mantener la topología radial de la red que es adecuada para cualquier tamaño de red. En [72] aplica un algoritmo ACO con la función objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas tratando de maximizar el perfil de voltaje en los nodos de la red. En [73] aplica la reconfiguración a la red de distribución IEEE de 13 nodos mediante ACO, a pesar de que la red aplicada es de pequeño tamaño presenta ciertas ideas importantes sobre la codificación de la hormiga y su recorrido a través de la red. En [74] presenta una variación del algoritmo de colonia de hormigas denominado algoritmo de optimización de colonia de hormigas hipercubo, en el cual se limita el rango de variación de feromona; en este trabajo realiza la reconfiguración de una red de 33 nodos con y sin generación distribuida. En [75] realiza la reconfiguración de una red de distribución de 33 nodos mediante tres variantes del algoritmo de colonia de hormigas, los resultados son los mismos en cuanto a reducción de pérdidas de potencia. En [76] realiza la reconfiguración de dos redes, la red estándar de 33 nodos y una red local real de 41 nodos, en este trabajo combina el algoritmo de colonia de hormigas con lógica difusa. En [77] presenta un algoritmo híbrido entre el algoritmo de colonia de hormigas y el de enjambre de partículas, en este trabajo realiza la reconfiguración de una red de 33 nodos en dos escenarios con y sin generación distribuida, compara los resultados con otro trabajo de reconfiguración para indicar su efectividad, sin embargo, no realiza una comparación con los algoritmos individuales.

Para la reconfiguración de una red de distribución el factor más importante a considerar es la topología radial del sistema, es por esto que en este trabajo la metodología propuesta se basa en cumplir esta condición para el recorrido de las hormigas a través de la red de distribución, por lo tanto, no existe la posibilidad de generar soluciones que no cumplan con la topología radial de la red. Esta es una diferencia fundamental respecto a otros

trabajos, en los cuales se encuentran soluciones no factibles en etapas intermedias de búsqueda de la solución [70], [71], [78], que requieren correcciones que se realizan como parte del algoritmo; mientras que en la metodología propuesta al cumplir primero con la condición de topología radial generada en base al propio algoritmo ACO, solo se generará soluciones factibles. Una solución es factible cuando la solución cumple con la restricción de topología radial y establece un flujo de corriente a todos los nodos de la red, por lo que no existen nodos aislados en la red. En [78] presenta una técnica para la selección de interruptores en la búsqueda metaheurística de la reconfiguración óptima de la red, esta técnica es aplicada sobre las redes estándar de distribución de 33 nodos y de 119 nodos. Mediante esta técnica retiene las partes correctas de una solución no factible, y corrige las partes de la solución no factible, de este modo las características básicas del proceso de optimización son conservadas en su mayor extensión y las partes incorrectas son reemplazadas.

1.5.2 Algoritmo de colonia de hormigas

El algoritmo de optimización de colonia de hormigas pertenece al campo de la inteligencia de enjambre, metaheurística e inteligencia computacional [79]. Este algoritmo se basa en el comportamiento real de las hormigas para conseguir alimento. Las hormigas viajan desde su nido hasta una fuente de alimento, la trayectoria inicial de la primera hormiga es aleatoria, y deja una sustancia química sobre el camino que sigue, esta sustancia química se denomina feromona y permite establecer un sistema de comunicación, que indica a la siguiente hormiga que camino ha seguido. Cada hormiga empieza su trayectoria desde el nido y se dirige hasta la fuente de comida, luego regresa al mismo nido llevando comida. Las hormigas que han realizado su recorrido por el camino más corto, invierten menos tiempo en regresar a su nido, por lo que la trayectoria más corta se acumula con feromona en mucho menor tiempo que las trayectorias más largas, de modo que luego de un determinado periodo de tiempo la mayor parte de hormigas tomará el camino más corto para su recorrido completo. El recorrido de cada hormiga en ir y volver desde el nido a la fuente de comida se denomina excursión de la hormiga. La feromona que secretan las hormigas sobre la trayectoria, se evapora luego de determinado tiempo, esto permite en cierto grado que las hormigas puedan explorar otras trayectorias, de tal manera que si las nuevas trayectorias son más cortas se acumulará feromona en ellas.

Para modelar el comportamiento de las hormigas mediante matemática, se utiliza una matriz de feromona que contiene un valor numérico proporcional a la cantidad de feromona que se encuentra entre dos nodos consecutivos. Cada elemento de la matriz de feromona

está direccionado por medio de un par ordenado, la primera componente indica el punto inicial o de partida de la hormiga y la segunda componente indica el punto final o de llegada de la hormiga.

Para que el comportamiento de las siguientes hormigas que inician su recorrido no quede determinado totalmente por la cantidad de feromona en una trayectoria, se utiliza en el algoritmo ACO un factor denominado de visibilidad el cual permite que la hormiga explore otras trayectorias. Los factores de visibilidad también están agrupados en una matriz denominada matriz de visibilidad o deseabilidad. De igual manera que la matriz de feromona, también se direcciona con un par ordenado, el primer elemento indica el punto de partida y el segundo elemento el punto de llegada de la hormiga.

La matriz de feromona se actualiza cada vez que una hormiga termina una excursión, mientras que la matriz de visibilidad es fija. Las hormigas deben decidir mediante una fórmula de probabilidad [80] que camino van tomar entre dos puntos consecutivos. Esta fórmula está dada por:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum (\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta})} \quad (1.5)$$

Donde, P_{ij} es la probabilidad de que la hormiga k seleccione la trayectoria desde el elemento i hacia el elemento j . Las probabilidades de solución se obtienen a partir de la probabilidad acumulada.

τ_{ij} es el valor de feromona correspondiente al camino que une los elementos i y j .

η_{ij} es el valor de visibilidad correspondiente al camino que une los elementos i y j .

α, β son los parámetros que controlan la influencia de la feromona y visibilidad respectivamente en la fórmula de probabilidad de la ecuación (1.5).

La hormiga recorre un camino entre dos nodos y deja feromona en dicho camino, lo cual se representa mediante un incremento de feromona dado por:

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{C_k} \quad (1.6)$$

Donde C_k es el costo del recorrido de la hormiga.

1.5.2.1 Problema del vendedor viajero

El algoritmo de colonia de hormigas fue desarrollado por Dorigo [59], y fue aplicado por primera vez para resolver el problema del vendedor viajero, el cual consiste en encontrar la menor distancia que debe recorrer un vendedor para visitar un grupo de ciudades, partiendo desde una ciudad específica y llegando al mismo punto de partida. Según el número de ciudades este problema de optimización puede dar una cantidad muy alta de posibilidades. Para el caso del problema del vendedor viajero los factores de feromona y de visibilidad de la ecuación 1.1 contienen los factores: Primero, elementos de la matriz de feromona inicial con valor uno en todos sus elementos, lo cual significa que inicialmente la feromona no tiene efecto en la ecuación de probabilidad, pues al inicio la hormiga no ha depositado feromona. Segundo, la matriz de visibilidad está formada por el inverso de las distancias entre cada ciudad, y estos valores se mantendrán fijos durante todo el recorrido de las hormigas, pues las distancias entre las ciudades son fijas. Por otra parte, la matriz de feromona se actualiza en cada excursión de la hormiga, el valor de incremento en el camino que recorre la hormiga está dado por la ecuación (1.6), que para el problema del vendedor viajero es el inverso de la distancia total que ha recorrido el viajero, pasando una sola vez por cada ciudad.

Los elementos de la matriz de visibilidad en el problema del vendedor viajero se calculan a partir del inverso de la distancia del camino que conecta dos nodos.

1.5.2.2 El problema de reconfiguración de la red de distribución

La reconfiguración de la red de distribución eléctrica consiste en encontrar una nueva topología de red en base al estado de los dispositivos de maniobra que permita encontrar una función objetivo cumpliendo con restricciones específicas. Para este trabajo la función objetivo es reducir las pérdidas de potencia activa en las líneas, y las restricciones son: topología radial de la red, niveles de voltaje permisibles y corriente máxima de las líneas.

Para el caso del problema de reconfiguración de la red, los factores de feromona y visibilidad de la ecuación (1.5) son: la matriz de feromona y la matriz de visibilidad. Para aplicar el algoritmo los elementos de la matriz de feromona tienen un valor inicial, que se define una sola vez en el algoritmo antes de que la hormiga inicie su excursión. Los elementos de la matriz de visibilidad se pueden definir de diferentes maneras: en base a la caída de voltaje entre los nodos, a la resistencia en las líneas, a las pérdidas de potencia. En este trabajo se utiliza las pérdidas de potencia en las líneas, ya que de este modo se tiene información de las líneas que causan mayores pérdidas de potencia activa y se puede

establecer los elementos que se desearía que no aparezcan en la nueva topología, dándole a estos elementos una mayor probabilidad.

En el problema de reconfiguración de la red, los incrementos de feromona son calculados en base al inverso de las pérdidas de potencia total en las líneas de la red, ecuación (1.7).

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{P_k} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i} \quad (1.7)$$

Donde P_k son las pérdidas de potencia totales en las líneas de la red, I_i es la corriente en la línea i , y R_i es la resistencia en la línea i .

1.5.3 Modelación y simulación de redes de distribución con OpenDSS

OpenDss es un software para simulación de sistemas eléctricos de distribución, sus siglas corresponden a Open Distribution System Simulator. OpenDSS ofrece herramientas para el estudio y análisis de redes de distribución, como por ejemplo: Análisis y planificación de redes de distribución, análisis de interconexión de sistemas de generación distribuida, carga anual y simulación de generación, simulación de sistemas fotovoltaicos, simulación de plantas eólicas, análisis de transformadores con configuraciones inusuales, simulación de sistemas de protección, modelación de almacenamiento, simulación de alimentadores con datos de medidores inteligentes, estimación de estados de distribución, análisis de distorsión armónica e inter armónica, simulaciones del impacto de los vehículos eléctricos, simulación en series de tiempo [81].

Las técnicas de modelación de las redes de distribución se clasifican en dos categorías: Sistema balanceado de una fase y sistema desbalanceado multifase. El modelo del sistema balanceado de una fase aproxima a la red desbalanceada con una red balanceada, mediante el equivalente de impedancias de secuencia. El sistema desbalanceado explícitamente modela las conexiones de una, dos o tres fases. [82]

En los Anexos II y III se presentan las rutinas programadas en MATLAB para la construcción de los elementos de las redes de distribución. A continuación, se describe la modelación en OpenDSS de los elementos de la red de distribución y la interfaz de comunicación con MATLAB.

1.5.3.1 Equivalente de Thévenin

Para crear una red de distribución en OpenDSS, siempre se debe inicializar el elemento "Circuit" el cual representa la barra de referencia del circuito. Es una barra que mantiene

los voltajes y ángulos de fase constantes. El equivalente de Thévenin puede representar la subestación vista por los alimentadores o un equivalente de red visto por la subestación. Los parámetros del equivalente de Thevenin de la barra slack o de referencia se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Parámetros del equivalente de Thevenin de un circuito.

Parámetro	Descripción
Bus1	Nombre de la barra. El elemento se conecta en esta barra.
basekv	Voltaje de línea nominal en kV
R0, R1	Resistencia de secuencia cero y positiva en ohmios
X0, X1	Reactancia de secuencia cero y positiva en ohmios
Pu	Valor por unidad del voltaje de la barra
Mvasc3	Potencia de cortocircuito trifásico en MVA
Mvasc1	Potencia de cortocircuito monofásico en MVA
X1R1	Relación X1 a R1, por defecto es 4
X0R0	Relación X0 a R0, por defecto es 3

Las relaciones R1X1 y X0R0 no se escriben en el código cuando se define explícitamente los valores de resistencias y reactancias.

El valor por defecto de la frecuencia es 60 Hz. La frecuencia de operación de la red se define al inicio mediante el código:

Set DefaultBaseFrequency=60

Para crear el elemento Circuit existen dos opciones de construcción del elemento, utilizando las potencias de cortocircuito monofásico y trifásico, y utilizando las resistencias y reactancias de secuencia positiva. En la Tabla 1.2 se presentan las expresiones algebraicas que utiliza OpenDss para realizar los cálculos.

Tabla 1.2 Expresiones algebraicas utilizadas en OpenDSS

$S_{sc1} = \sqrt{3} \cdot E_{AB} I_{sc1} = \frac{E_{AB}^2}{ \bar{Z}_s }$	(1.8)
$S_{sc3} = \sqrt{3} \cdot E_{AB} I_{sc3} = \frac{E_{AB}^2}{ \bar{Z}_1 }$	(1.9)
$3 \cdot \bar{Z}_s = \bar{Z}_0 + 2 \cdot \bar{Z}_1 = (R_0 + 2R_1) + j(X_0 + 2X_1)$	(1.10)
$Z_s^2 = R_s^2 + X_s^2$	(1.11)

$X_1 R_1 = \frac{X_1}{R_1}$	(1.12)
$X_0 R_0 = \frac{X_0}{R_0}$	(1.13)

Donde los parámetros que aparecen en las ecuaciones (1.8) a (1.13) son:

S_{sc1} es la potencia aparente de cortocircuito monofásico en MVA.

S_{sc3} es la potencia aparente de cortocircuito trifásico en MVA.

E_{AB} es el voltaje entre líneas.

I_{sc1}, I_{sc3} son las corrientes de cortocircuito monofásico y trifásico, respectivamente.

R_s, X_s, \bar{Z}_s son la resistencia, reactancia, e impedancia propia, respectivamente.

\bar{Z}_0, \bar{Z}_1 son las impedancias de secuencia cero y positiva, respectivamente.

$X_0 R_0, X_1 R_1$ son las relaciones entre la reactancia y resistencia de secuencia cero y positiva, respectivamente.

A continuación, se presentan dos ejemplos.

Ejemplo 1:

El código en OpenDss para crear una subestación de 13.8 kV con potencia de cortocircuito monofásica de 1000 MW y cortocircuito trifásico de 1000 MW es:

New Circuit.Subestación1 bus1=barra1 basekv=13.8 pu=1 mvasc3=1000 mvasc1=1000.

Los parámetros de la Tabla 1.3 son calculados en OpenDSS, los cuales son: las corrientes de cortocircuito, resistencias y reactancias de secuencia cero y positiva. Estos parámetros también han sido calculados analíticamente utilizando las ecuaciones (1.8) a (1.13).

Tabla 1.3 Valores calculados en OpenDss del ejemplo 1

Parámetro	Valor
$R_0 + jX_0$	0.060341 + j 0.18102 [Ω]
$R_1 + jX_1$	0.046188 + j 0.18475 [Ω]
I_{sc1}	41837 [A]
I_{sc3}	41837 [A]

Ejemplo 2

Mediante código en OpenDss se desea crear una subestación de 13.8 kV, en la cual se dispone de los datos de impedancia de secuencia cero y positiva, pero no se dispone de los datos de potencia de cortocircuito monofásica, ni trifásico, por lo cual estos datos serán calculados por OpenDSS al realizar un flujo de potencia.

New Circuit.Subest bus1 = Barra1 basekv = 13.8 pu = 1 r1 = 0.3 x1= 0.8 r0 = 0.2 x0= 0.6

En la Tabla 1.4 se presentan los parámetros calculados a partir de los datos del código anterior y con las ecuaciones (1.8) a (1.13).

Tabla 1.4 Valores calculados en OpenDss del ejemplo 2

Parámetro	Valor
S_{sc1}	244.06 [MW]
S_{sc3}	222.89 [MW]
I_{sc1}	10211 [A]
I_{sc3}	9325.2 [A]

Cuando se desea crear una barra infinita, es decir que no se afecte por las cargas de la red de distribución se utiliza valores elevados de potencia de cortocircuito.

1.5.3.2 Generador

El generador es un elemento de conversión de energía, en OpenDSS se define por su potencia activa o por su potencia aparente y su factor de potencia, como alternativa también se puede utilizar la potencia reactiva en lugar del factor de potencia. La utilización de los parámetros depende del modelo que se utilice para realizar los flujos de potencia. Los modelos de simulación del generador se presentan en la Tabla 1.5. Las especificaciones detalladas para el uso de cada modelo se encuentran en [81].

Tabla 1.5 Modelos del generador en OpenDss.

Modelo	Descripción
1	P, Q constantes. Se puede utilizar curva de despacho si se requiere.
2	Z constante.
3	P constante, V . En este caso los flujos de potencia son realizados con los voltajes como variables en lugar de P y Q.
4	P constante, Q fijo. P sigue el despacho, y Q siempre es fijo.
5	P constante, reactancia fija. P sigue el despacho y Q es calculada como si la reactancia fuera fija.
6	Modelo creado por el usuario.

7	P, Q constantes. Corriente limitada.
---	--------------------------------------

Se puede definir generadores especiales creándolos previamente en una biblioteca de OpenDSS y utilizando la opción 6 en los parámetros del objeto "Generator". Los generadores se asumen balanceados, pero en caso de simular un generador desbalanceado, se debe ingresar generadores por fase. En la Tabla 1.6 se presenta los parámetros principales para definir un generador en OpenDSS [81].

Tabla 1.6 Parámetros de un generador.

Parámetro	Descripción
Bus1	Nombre de la barra a la cual se conecta el generador.
KV	Voltaje de línea nominal en kV
KW	Potencia activa nominal del generador en kW
PF	Factor de potencia
KVAR	Potencia reactiva, si se especifica PF queda sin efecto.
Model	Modelo del generador, valor entre 1 y 7
Phases	Número de fases del generador
KVA o MVA	Potencia nominal de la máquina en [kVA] o [MVA]
Basefreq	Frecuencia del generador, por defecto es 60 [Hz]
Conn	Conexión Y o delta, por defecto es delta.

El código en OpenDSS para definir un generador de 800 kW, 13.8 kV, factor de potencia de 0.9 y modelo de generador PQ constante conectado a la barra 3 es:

New Generator.Generador1 bus=Barra3 KV=13.8 KW=800 PF=0.9 model=1

1.5.3.3 Transformador

En OpenDSS se puede modelar transformadores de cualquier tipo, la conexión por defecto es estrella-delta, el número de conductores por terminal es siempre uno más que el número de fases, el terminal extra corresponde al neutro. En la conexión delta el terminal neutro permanece abierto. Los principales parámetros que se utilizan para modelar un transformador se presentan en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7 Parámetros de un transformador.

Parámetro	Descripción
Phases	Número de fases, por defecto es 3.
Windings	Número de devanados, por defecto es 2.
XHL	Porcentaje de reactancia alto a bajo devanado 1 a 2.

Wdg	Devanado que tendrá los parámetros especificados
Bus	Nombre de la barra a la cual se conecta el terminal del devanado.
Conn	Tipo de conexión del devanado, estrella o delta.
KV	Voltaje nominal del devanado, línea a línea para trifásico.
Tap	Tap por unidad del devanado.
%R	Porcentaje de resistencia del devanado respecto a los kVA base.
%loadloss	Porcentaje de pérdidas a carga nominal
%noloadloss	Porcentaje de pérdidas en vacío con base a voltaje nominal.

Cuando se utiliza el parámetro %noloadloss se añade un ramal resistivo en paralelo con la inductancia de magnetización. Si no se utiliza, su valor por defecto es 0. A continuación, se presentan varios ejemplos de modelación de diferentes tipos de transformadores en OpenDSS.

Ejemplo 1

Modelación de un transformador trifásico estrella-estrella de 4 MVA, con voltaje en el devanado primario de 13.8 kV y en el secundario de 0.22 kV, con pérdidas a carga nominal de 0.4% y con pérdidas en vacío de 0.15%. Porcentaje de reactancia de 4%.

```
New transformer.Trafo1 xhl=4 %loadloss=0.4% %noloadloss=0.15
~wdg=1 bus=BarraA conn=wye KV=13.8 KVA=5000 tap=1
~wdg=2 bus=BarraB conn=wye KV=0.22 KVA=5000 tap=1.05
```

Ejemplo 2

Modelación de un transformador trifásico delta-estrella de 25 MVA, con voltaje en el devanado primario de 69 kV y en el secundario de 24.9 kV, con porcentaje de resistencia en los devanados de 0.0005% y con porcentaje de reactancia de 0.01%

```
New Transformer.Subestación Phases=3 Windings=2 Xhl=0.01
~wdg=1 bus=Barra1 conn=Delta kv=69 kva=25000 %r=0.0005
~wdg=2 bus=Barra2 conn=wye kv=24.9 kva=25000 %r=0.0005
```

1.5.3.4 Regulador

El regulador es un elemento de control que permite modificar el voltaje de un devanado del transformador bajo carga, sin interrumpir el servicio de la red. El regulador está formado por un autotransformador y un mecanismo de cambio de toma LTC, cuyas siglas en inglés corresponden a "load tap changer". El voltaje se modifica cambiando el tap del devanado serie del autotransformador. El regulador también puede ser utilizado para monitorear un elemento remoto. Los detalles del funcionamiento del regulador se pueden encontrar en

[83]. En OpenDSS los parámetros del regulador se configuran mediante el objeto RegControl que se presenta en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8 Parámetros del regulador.

Parámetro	Descripción
Transformer	Nombre del transformador al cual está conectado el regulador.
Winding	Número del devanado controlado 1 o 2.
Vreg	Voltaje de referencia del regulador en voltios. Por defecto es 120.
Band	Ancho de banda en voltios de la barra controlada. Por defecto es 3.
Ptatio	Relación de transformación que convierte el voltaje del devanado al voltaje del regulador. Por defecto es 60.
CTprim	Relación de transformación de corriente de la línea a la corriente del regulador.
R, X	Representan el efecto de la impedancia equivalente entre el regulador y el centro de carga, en voltios.
Bus	Nombre de la barra a ser controlada.
TapNum	Número que indica la posición del tap en el devanado. Este Número debe estar entre mintap y maxtap. Un regulador generalmente tiene 32 taps, de los cuales 16 arriba y 16 abajo de la posición neutral, la cual no se considera. Por defecto TapNum es 0.

En la Tabla 1.8 el nivel de voltaje del centro de carga, según la conexión del regulador en la red, se refiere al voltaje en el terminal de salida del regulador o al voltaje en una barra remota. Los valores de R y X están en voltios porque son el resultado de multiplicar los valores de impedancia del compensador en ohmios por la corriente en el secundario del regulador en amperios.

El compensador del regulador de voltaje tiene como objetivo replicar la caída de voltaje que existe entre el regulador y el centro de carga. Generalmente la entrada de voltaje al compensador es de 120 voltios.

Para la modelación del regulador se utiliza el objeto regcontrol de OpenDSS, se debe definir primero el transformador asociado al regulador. Los parámetros numtaps, mintap y maxtap son utilizados para definir los taps del transformador, la descripción de estos parámetros se presenta en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9 Parámetros del transformador asociado a un regulador.

Parámetro	Descripción
Numtaps	Número total de tomas entre Mintap y Maxtap. Por defecto es 32.
Mintap	Mínima toma en por unidad para el devanado. Por defecto es 0.9.
Maxtap	Máximo toma en por unidad para el devanado. Por defecto es 1.1

El número de taps es normalmente 32, lo cual permite modificar el voltaje en $\pm 10\%$. Por lo tanto, para un regulador de 120 V, el voltaje varía en un rango de ± 12 V. La diferencia de voltaje entre dos posiciones consecutivas del tap de un transformador de 120 V es:

$$\text{Diferencia de voltaje por tap} = \frac{\text{Diferencia de voltaje en 32 taps}}{32} = \frac{24 \text{ V}}{32} = 0.75 \text{ V}$$

$$\% \text{ de voltaje por tap} = \frac{\text{Porcentaje de variación de voltaje en 32 taps}}{32} = \frac{20\%}{32} = 0.625 \%$$

En un regulador estándar de 32 taps, se tiene 0.625% de variación de voltaje a la salida del transformador. Si el transformador es de 120 V, por un cambio de una posición del tap, el voltaje cambia 0.75 V.

Ejemplo 1

Regulador a 120 V, con un transformado de 5 MVA, 13.8 kV con la toma en la posición 15, el voltaje puede variar entre 0.9 y 1.1 por unidad.

```
New transformer.Trafo1 xhl=4 %loadloss=0.4% %noloadloss=0.15
~wdg=1 bus=BarraA conn=wye KV=13.8 KVA=5000
~wdg=2 bus=BarraB conn=wye KV=13.6 KVA=5000
~numtaps=15 mintap=0.9 maxtap=1.1
New regcontrol.Regulador transformer=Trafo1 winding=2 vreg=120 ptratio=115
```

Ejemplo 2

Regulador con compensador de 2 voltios para la resistencia y 1 voltio para la reactancia.

```
New regcontrol.Regulador transformer=Trafo winding=2 vreg=120 band=3
~ptratio=60 CTprim=300 R=2 X=1
```

Ejemplo 3

Si se requiere controlar el voltaje en una barra determinada se debe especificar el nombre de la barra en el parámetro bus.

```
New regcontrol.Regulador transformer=Trafo winding=2 vreg=120 band=3
~Bus=Barra20
```

1.5.3.5 Líneas

El modelo matemático de las líneas de la red de distribución de OpenDSS es el modelo “Pi” con capacitores shunt en los extremos de las líneas. Las líneas se las puede crear directamente en OpenDSS mediante el objeto “Line”. Las líneas están caracterizadas por sus impedancias, las cuales pueden ser descritas mediante sus componentes simétricas de secuencia o por las matrices de impedancia, las cuales tendrían que ser calculadas previamente para ser ingresadas en los parámetros del objeto “Line”.

En OpenDSS también existe dos alternativas adicionales para crear las líneas de la red de distribución: a) Crear un objeto denominado “LineCode”, para describir las características de una línea específica, el cual se utiliza en la red para crear líneas con esas características. b) Crear un objeto con la geometría de la línea, que contiene los datos para que OpenDSS calcule las impedancias de las líneas.

Cuando se describe específicamente la propiedad de geometría de la línea en el código, los otros parámetros no se consideran. Los parámetros principales para crear el objeto “Line” en OpenDSS se presentan en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10 Parámetros para crear una línea.

Parámetro	Descripción
Phases	Número de fases. Por defecto es 3.
Bus1	Nombre de la barra a la cual está conectado el primer terminal.
Bus2	Nombre de la barra a la cual está conectado el segundo terminal.
LineCode	Nombre del objeto LineCode que contiene la definición de impedancias, en caso de existir.
Length	Factor por el cual se multiplica los datos de impedancia.
R0, X0, R1, X1	Resistencia y reactancia de secuencia cero y positiva en ohmios por unidad de longitud.
C0, C1	Capacitancias de secuencia cero y positiva en nano faradios por unidad de longitud.
B0, B1	Susceptancias de secuencia cero y positiva en micro siemens por unidad de longitud. Opción alternativa a C0 y C1.
Rmatrix	Matriz de resistencias en ohmios por unidad de longitud.
Xmatrix	Matriz de reactancias en ohmios por unidad de longitud.
Cmatrix	Matriz de capacitancias en nano faradios por unidad de longitud.
Geometry	Nombre del objeto LineGeometry que contiene la geometría la línea, en caso de existir.
<i>BaseFreq</i>	Frecuencia de las impedancias descritas. Por defecto es 60 Hz

Los neutros deben ser declarados dentro del parámetro “phases”. Si no se ha definido previamente el objeto “LineCode”, se debe especificar las impedancias de línea directamente en el objeto “Line” como se indica en el ejemplo 1.

Ejemplo 1

Construcción de una línea conectada entre las barra A y B, cuya longitud es de 0.78 km utilizando componentes simétricas de secuencia.

```
New Line.L1 Phases=3 Bus1=A Bus2=B length=0.78 units=km
~r1=0.69559 x1=0.51756 r0=1.0873 x0=1.4738
```

Ejemplo 2

Construcción del objeto “LineCode” y del objeto “Line” de una línea monofásica a 2 hilos, frecuencia base de 50 Hz, con unidades de longitud en pies.

```
New linecode.L1fase nphases=2 BaseFreq=50 units=ft
~ rmatrix = [0.0793 | 0.0345 0.0872]
~ xmatrix = [0.5041 | 0.1850 0.2275]
```

```
New Line.L1 Phases=2 Bus1=A Bus2=B LineCode=L1fase Length=5000 units=ft
```

El parámetro “nphases” que aparece en el código del objeto “LineCode” especifica el número de fases, dentro de este parámetro debe estar especificado el neutro en caso de que exista, en este caso como la línea es monofásica nphases es 2. El formato de las matrices de resistencias y reactancias es de una matriz triangular inferior de dos filas.

Ejemplo 3

Construcción del objeto “LineCode” y del objeto “Line” para una línea trifásica a tres hilos.

```
New linecode.300 nphases=3 BaseFreq=60
~ rmatrix = [0.0866 | 0.0295 0.0880 | 0.0291 0.0299 0.0874]
~ xmatrix = [0.2041 | 0.0950 0.1985 | 0.0729 0.0802 0.2017]
~ cmatrix = [2.8517 | 0.9202 3.0046 | 0.3507 0.5850 2.7113]
New Line.L1 Phases=3 Bus1=800 Bus2=802 LineCode=300 Length=2 units=km
```

Las matrices son creadas como matrices triangulares inferiores de tres filas, las unidades de las matrices al no estar definidas en el objeto “LineCode” corresponden a las unidades utilizadas en el objeto “Line” en este caso ohmios por kilómetro.

1.5.3.6 Cargas

En OpenDSS las cargas se construyen mediante el objeto “Load”. Al definir las cargas trifásicas son consideradas balanceadas, si se requiere modelar cargas desbalanceadas es necesario definir tres cargas monofásicas. Las cargas se definen de tres maneras:

mediante potencia activa y factor de potencia, potencia activa y reactiva, potencia aparente y factor de potencia. Los parámetros de una carga se presentan en la Tabla 1.11.

Tabla 1.11 Parámetros para modelar una carga.

Parámetro	Descripción
Bus1	Nombre de la barra a la cual está conectada la carga.
Phases	Número de fases.
KV	Voltaje base para la carga.
KVA	Potencia aparente base total.
KW	Potencia activa nominal total.
KVAR	Potencia reactiva total.
FP	Factor de potencia nominal de la carga. Valor positivo es atraso.
Model	Número entero que indica el modelo de carga que se utiliza.
Conn	Tipo de conexión delta o triángulo. Por defecto triángulo.

Los modelos de carga en OpenDSS se especifican mediante el parámetro Model, que se presenta en la Tabla 1.12.

Tabla 1.12 Modelos de carga en OpenDss.

Modelo	Descripción
1	Potencia activa y reactiva constantes P, Q. Es el modelo por defecto.
2	Impedancia Z constante
3	Potencia activa constante y reactiva cuadrática.
4	La potencia activa y reactiva dependen de parámetros exponenciales.
5	Magnitud de corriente constante
6	Potencia activa constante y potencia reactiva fija al valor nominal.
7	Potencia activa constante y potencia reactiva cuadrática fija
8	ZIP, la potencia activa y reactiva son definidas como una combinación de potencia constante, corriente constante e impedancia constante.

Para los siguientes ejemplos se considera que las cargas están conectadas a continuación del transformador, según el tipo de carga se modifica en el código del transformador.

```
New transformer.Trafo1 xhl=4 %loadloss=0.4% %noloadloss=0.15
~wdg=1 bus=BarraA conn=wye KV=13.8 KVA=5000
~wdg=2 bus=BarraB conn=wye KV=0.22 KVA=5000
```

Ejemplo 1

Carga trifásica equilibrada conectada en estrella con tierra.

*New load.Carga1 phases=3 model=2 bus= BarraC KV=0.24 KW=80 KVAR=10
~conn=wye*

Ejemplo 2

Carga trifásica equilibrada conectada en estrella aislada.

*New load.Carga1 phases=3 model=2 bus= BarraC.1.2.3.4 KV=0.24 KW=80
~KVAR=10 conn=wye*

El terminal 4 de la barra corresponde al neutro y al ser una conexión de estrella aislada, el terminal no va conectado a nada.

Ejemplo 3

Carga trifásica equilibrada conectada en estrella aislada a 4 hilos, el cuarto hilo es el neutro. La carga está conectada inmediatamente después del transformador.

*New load.Carga1 phases=3 model=2 bus= BarraC.1.2.3.4 KV=0.24 KW=80
~KVAR=10 conn=wye*

Los terminales 1 al 3 de la barra corresponden a las tres fases y el terminal 4 de la barra corresponde al neutro y está conectado al terminal 4 del transformador, para lo cual el transformador debe tener el parámetro de la barra del secundario definido como: bus=barraB.1.2.3.4.

Ejemplo 4

Carga trifásica equilibrada conectada en delta.

*New load.Carga1 phases=3 model=2 bus= BarraC KV=0.24 KW=80 KVAR=10
~conn=delta*

Ejemplo 5

Carga entre dos fases

*New load.Carga1 phases=1 model=2 bus= BarraD.1.2 KV=0.24 KW=80 KVAR=10
~conn=delta*

En el código se puede notar que la carga está conectada en la "BarraD" entre los terminales 1 y 2, podría también conectarse entre los terminales 2 y 3 o entre 1 y 3. Adicionalmente en el parámetro "phases" el valor debe ser 1 y la conexión tipo delta.

Ejemplo 5

Carga monofásica referenciada a tierra

*New load.Carga1 phases=1 model=2 bus=BarraD.1.0 KV=0.120 KW=80
~KVAR=10 conn=wye*

La carga está conectada en la “BarraD” entre los terminales 1 y 0, podría estar conectada entre los terminales 2 y 0, o entre 3 y 0. El valor cero en el terminal se refiere a la tierra, y la conexión debe ser tipo estrella en la carga y en el transformador.

Ejemplo 6

Carga monofásica conectada entre fase y neutro.

```
New load.Carga1 phases=1 model=2 bus=BarraD.1.4 KV=0.120 KW=80  
~KVAR=10 conn=wye
```

La carga está conectada en la “BarraD” entre los terminales 1 y 4, podría estar conectada entre los terminales 2 y 4, o entre 3 y 4. El terminal 4 de la barra corresponde al neutro. El transformador debe tener el parámetro de la barra del secundario definido como: bus=barraB.1.2.3.4 para que esté modelado el neutro.

Ejemplo 7

Carga trifásica desequilibrada conexión estrella

```
New load.C1a phases=1 model=1 bus=BarraD.1 KV=0.120 KW=80 KVAR=5  
~conn=wye  
New load.C1b phases=1 model=1 bus=BarraD.2 KV=0.120 KW=80 KVAR=5  
~conn=wye  
New load.C1c phases=1 model=1 bus=BarraD.3 KV=0.120 KW=80 KVAR=5  
~conn=wye
```

Para modelar las cargas trifásicas desequilibradas se debe modelar individualmente cada fase de la carga. En la conexión triángulo la carga está entre fase y neutro.

Ejemplo 8

Carga trifásica desbalanceada conexión delta.

```
New Load.CargaA Bus1=BarraD.1.2 Phases=1 Conn=Delta Model=1 KV=0.22  
~kW=10 KVAR=5  
New Load.CargaB Bus1=BarraD.2.3 Phases=1 Conn=Delta Model=1 KV= 0.22  
~kW=10 KVAR=5  
New Load.CargaC Bus1=BarraD.3.1 Phases=1 Conn=Delta Model=1 KV= 0.22  
~kW=25 KVAR=10
```

La carga trifásica desbalanceada es modelada como tres cargas monofásicas. En la conexión delta cada carga monofásica está conectada entre dos terminales de la “BarraD”.

1.5.3.7 Capacitores

Los capacitores entregan energía a la red de distribución eléctrica, se conectan a la red mediante dos terminales entre dos barras de la red. La conexión por defecto del segundo

terminal es la referencia y el tipo de conexión es estrella. Los parámetros para modelar el objeto “Capacitor” se presentan en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13 Parámetros para modelar un capacitor.

Parámetro	Descripción
Bus1	Nombre de la barra a la cual se conecta el capacitor.
Bus 2	Nombre de la barra a la cual se conecta el segundo terminal, este parámetro se utiliza solo para conexión en serie.
Phases	Número de fases. Por defecto es 3.
KV	Voltaje nominal del capacitor línea a línea.
KVAR	Potencia activa total al voltaje nominal.
Conn	Tipo de conexión estrella o delta. Por defecto es estrella.
Cmatrix	Matriz de capacitancia en micro faradios, alternativa para definir el banco de capacitores.

Ejemplo 1

Capacitor de 22 kV y 10 MVAR en estrella, sin conexión a tierra.

New Capacitor.Cap Bus1=BarraA Bus2=BarraA.4.4.4 Phases=3 KVAR=10000 ~KV=13.8

El capacitor está conectado en la “BarraA” que se asigna en el Bus1, sin embargo, como la conexión es estrella sin conexión a tierra, se asigna en el Bus2 la misma “BarraA” el terminal 4 que indica el neutro para cada fase.

Ejemplo 2

Capacitor de 22 kV y 10 MVAR en estrella, con conexión a tierra.

New Capacitor.Cap Bus1=BarraA Phases=3 KVAR=10000 KV=13.8

En este caso no es necesario definir el Bus2, el cual por defecto está conectado a tierra.

Ejemplo 3

Capacitor de 4.16 kV y 5 MVAR conectado en delta.

New Capacitor.Cap Bus1=BarraA Phases=3 KVAR=10000 KV=13.8 Conn=delta

La conexión por de defecto es la conexión triángulo, por lo que se debe especificar en el código explícitamente la conexión delta.

1.5.3.8 Interfaz COM

Para tener acceso a las funcionalidades de OpenDSS mediante programas externos como Matlab, Python, Visual Basic, Java, etc., se utiliza la interfaz COM, cuyas siglas en inglés corresponden a Component Object Model, el cual es un objeto estándar de software que

permite la interacción entre procesos de software, que pueden ser ejecutados en diferentes programas, con diferente lenguaje e incluso en diferentes computadoras.

En este trabajo se utiliza el objeto COM para establecer la comunicación entre Matlab y OpenDSS. El objeto COM puede ser utilizado para construir la red de distribución, realizar flujos de potencia, modificar partes de la red y transferir los resultados a Matlab. Esto permite utilizar herramientas de programación de otros lenguajes que no están disponibles directamente en OpenDSS, debido a las propias limitaciones del programa, como por ejemplo simples estructuras de programación no están disponibles en OpenDSS y por lo tanto el uso de lenguajes de programación externos a OpenDSS facilita la implementación de algoritmos complejos de optimización. Por tal motivo mediante programas externos como Matlab se programa el algoritmo deseado y se utiliza OpenDSS para la modelación y simulación de la red de distribución.

Matlab no dispone de documentación de ayuda dentro del programa para acceder a las propiedades y métodos de OpenDSS, sin embargo, se puede encontrar información en la documentación del programa OpenDSS. Para iniciar la comunicación entre OpenDSS y MATLAB se debe instanciar la interfaz DSS Distribution System Simulator, para lo cual se crea un objeto del tipo OpenDSSEngine.DSS mediante el comando:

```
DSSobj = actxserver('OpenDSSEngine.DSS')
```

Una vez iniciado el programa, se declara las variables que permiten acceder a los métodos y propiedades de OpenDSS que se utilizarán en el programa, por ejemplo:

```
DSSText = DSSobj.Text;  
DSSCircuit=DSSobj.ActiveCircuit;  
DSSSolution=DSSCircuit.Solution;  
LOSSES=DSSCircuit.Losses;
```

En la Tabla 1.14 se presentan solo algunas de las clases que se dispone en OpenDSS para acceder a las características y ejecución de simulación del programa, estas clases permiten utilizar los recursos de OpenDSS desde MATLAB.

Tabla 1.14 Algunas clases de OpenDSS.

Clase	Descripción
DSS	Contiene entre otras, la propiedad ActiveCircuit y la función Start.
Solution	Contiene varias propiedades y métodos, dentro de esta clase se encuentra la función Solve().

Circuit	Contiene las propiedades para acceder a los nombres de las barras, magnitudes de voltaje, pérdidas en las líneas, interfaces de los elementos de la red.
Text	Retorna una interface para enviar comandos o recibir resultados.

En la Tabla 1.15 se presenta algunas propiedades y funciones de las clases más utilizadas para enviar comandos, crear, modificar y obtener los resultados de simulación de la red de distribución. Se puede encontrar una lista completa de las funciones y métodos en el módulo de desarrollo de programación de Excel.

Tabla 1.15 Clases y propiedades de OpenDSS.

Función, propiedad	Descripción
Start(0)	Función de la clase DSS. Retorna 1, si se ha iniciado exitosamente OpenDSS.
ActiveCircuit	Propiedad de la clase DSS. Retorna una interface del circuito activo.
Solve()	Función de la clase Solution. Ejecuta el flujo de potencia de la red de distribución.
SetActiveElement()	Función de la clase Circuit. Selecciona un elemento como activo de la red para habilitarlo o deshabilitarlo.
ActiveElement	Propiedad de la clase Circuit. Retorna una interface para el elemento activo de la red
Enable()	Función de la clase Circuit. Habilita un elemento de la red.
Disable()	Función de la clase Circuit. Deshabilita un elemento de la red.
Allbusnames	Propiedad de la clase Circuit. Retorna los nombres de todas las barras de la red.
LineLosses	Propiedad de la clase Circuit. Retorna las pérdidas totales de las líneas de la red.
AllBusVmag	Propiedad de la clase Circuit. Retorna las magnitudes de voltaje de todas las barras de la red.
Command	Propiedad de la clase Text. Permite enviar comandos a OpenDSS para crear, modificar, realizar mediciones en la red.
Result	Propiedad de la clase Text. Resultado del último comando.

En los Anexos II y III se presentan los programas desarrollados en MATLAB, en los programas principales se utiliza los comandos de comunicación con OpenDSS del ejemplo anterior.

Ejemplo 1

Inicialización de OpenDSS mediante MATLAB y compilación de un archivo “dss” que contiene la el código de construcción de la red.

```
DSSobj = actxserver('OpenDSSEngine.DSS');
```

```

if ~DSSobj.Start(0),
    disp('Unable to start the OpenDSS Engine')
end
DSSText = DSSobj.Text;
DSSText.command='Compile (Red_de_prueba.dss)';

```

El archivo “dss” puede ser creado directamente en OpenDSS o desde MATLAB.

Ejemplo 2

Creación de una línea desde MATLAB en OpenDSS.

```

DSSText.Command = "New Line.A3 Phases=3 Bus1=B8 Bus2=B9 LineCode=300
Length=40 units=kft";
DSSSolution.Solve();

```

Ejemplo 3

Abrir la línea A3 creada en el ejemplo anterior y cerrar una línea A4 que se asume para este ejemplo que se ha construido previamente y que se encuentra abierta.

```

DSSText.Command = "open line.A3 term=1";
DSSText.Command = "close line.A3 term=1";
DSSSolution.Solve();

```

Ejemplo 4

A través de MATLAB obtener los voltajes y potencias de todos los nodos de la red.

```

DSSText.Command = 'Show Voltage LL Nodes'
DSSText.Command = 'Show Power Elements';

```

El primer comando genera un archivo de texto con las magnitudes de voltaje entre líneas y el segundo comando un archivo de texto con las potencias aparente, activa y reactiva.

1.5.4 Regulación del ARCONEL respecto a los niveles de Voltaje

Según la resolución del ARCONEL se define como bajo voltaje a los valores de voltaje menores o iguales a 0.6 kV y medio voltaje a los valores mayores a 0.6 kV y menores o iguales a 40 kV. En el capítulo dos de la regulación del ARCONEL 053/18 se encuentra el índice de calidad de voltaje para un punto del sistema de distribución. Las variaciones de voltaje admitidas para bajo voltaje son de $\pm 8\%$ y para medio voltaje son de $\pm 6\%$. [84]

2. METODOLOGÍA

La red de distribución eléctrica es la parte más extensa del sistema eléctrico de potencia, y su operación normal produce pérdidas de potencia activa en las líneas [85], con la finalidad de reducir las pérdidas en las líneas en este trabajo se presenta una metodología de reconfiguración de la red aplicando un algoritmo adaptado de colonia de hormigas, con las restricciones de mantener la topología radial, voltaje admisible en los nodos y cargabilidad en las líneas. La metodología se basa en un análisis detallado del algoritmo ACO, el recorrido de la hormiga a través de la red, las restricciones de radialidad, voltaje y cargabilidad, la agrupación de tramos de red mediante lazos, el manejo de los recursos de simulación de OpenDSS y la programación en MATLAB.

La reconfiguración de la red distribución eléctrica que se realiza en este trabajo tiene la función objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas sujeto a restricciones de voltaje en los nodos, capacidad de corriente en las líneas y topología radial de la red, lo cual se indica en las ecuaciones (2.1) a (2.4).

Función objetivo: Minimizar las pérdidas de potencia activa en las líneas

$$\text{Minimizar} \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \right) \quad (2.1)$$

Restricciones:

1. Voltaje $V_{min} \leq V_j \leq V_{max}$ (2.2)

2. Corriente $I_i < I_{imax}$ (2.3)

3. Topología radial $T(N, B) \in G(N, B): B = N - 1$ (2.4)

Donde I_i es la corriente en la línea i de la red, R_i es la resistencia de la línea i .

V_j es el voltaje en el nodo j de la red. V_{min} y V_{max} son los límites de voltaje en los nodos.

I_{imax} es la capacidad máxima de corriente de la línea i .

N es el número de nodos de la red, B es el número de líneas. G es un grafo, T es un árbol, es decir un grafo que cumple con la ecuación (2.4) y en el cual no se forman ciclos o lazos.

Un grafo tipo árbol es una estructura radial, en la cual no existe nodos aislados, ni líneas desconectadas.

Para líneas de longitudes menores a 80 km, la cargabilidad de las líneas se determina por el límite térmico, el cual depende de la magnitud de corriente y del tiempo de duración [86].

Para líneas cortas, la cargabilidad está limitada por la capacidad máxima de conducción de corriente del conductor y no por la caída de voltaje o condiciones de estabilidad [87]. Las dos redes utilizadas en este trabajo tienen líneas con longitudes mucho menores a 80 km, por lo que se utiliza como límite de cargabilidad de las líneas la capacidad de corriente máxima de los conductores.

Este capítulo se divide en cinco secciones: en la primera sección se presentan los pasos generales de la metodología, la segunda sección se presentan los procesos para implementar la programación del algoritmo de colonia de hormigas, en la tercera sección se valida la metodología sobre dos redes de distribución, cuyos óptimos son conocidos y en las secciones cuarta y quinta se aplica la metodología de reconfiguración sobre las redes de distribución IEEE de 34 nodos y la red real local de 2894 nodos, respectivamente.

2.1 Pasos generales de la metodología

Para realizar la reconfiguración de la red de distribución aplicando el algoritmo ACO se realiza los siguientes pasos:

- a. Definir las líneas de enlace y los lazos de la red.
- b. Crear la red de distribución en el software OpenDSS.
- c. Comandar desde MATLAB los flujos de potencia de la red de distribución.
- d. Programar el algoritmo de colonia de hormigas.
- e. Pruebas de funcionamiento y resultados.

2.1.1 Líneas de enlace y lazos de la red

La red de distribución contiene nodos y ramales, a los cuales se les asigna un número decimal. Los ramales se encuentran entre dos nodos consecutivos y deben numerarse en orden ascendente. La numeración de los nodos podría ser opcional, sin embargo, la numeración facilita la programación del algoritmo de reconfiguración de la red. Para realizar la reconfiguración de la topología de la red se asume que cada línea de la red se puede habilitar y deshabilitar mediante el estado de los dispositivos de maniobra. Los dispositivos de maniobra que están normalmente abiertos, se denominan interruptores de enlace, los cuales para el caso base, antes de realizar la reconfiguración de la red, se encuentran deshabilitados.

La red de distribución se divide en lazos, el número de lazos es igual al número de interruptores de enlace. Cada lazo se identifica con un número decimal. Los lazos agrupan un número específico de dispositivos de maniobra, los cuales se definen por una sola vez y se mantienen fijos para la ejecución del programa. Una red con “n” lazos contiene “n” grupos de dispositivos de maniobra, lo cual abarca todas las líneas de la red que se pueden habilitar o deshabilitar. Los lazos adyacentes comparten uno o más dispositivos de maniobra, esto se debe de considerar en el algoritmo para no abrir elementos que pertenecen al mismo ramal y que causan aislamiento de nodos.

2.1.2 Creación de la red en OpenDSS

La red de distribución puede ser creada directamente en el software OpenDSS o también en algún lenguaje de programación que envíe los códigos a OpenDSS mediante la interface de comunicación COM. En este trabajo se utiliza MATLAB para crear la red de distribución en OpenDSS. Las redes de distribución que se utilizan en este trabajo tienen los siguientes elementos: barra slack, estaciones de transformación, líneas, cargas, y para el caso de la red IEEE de 34 nodos tiene capacitores y dos reguladores.

La construcción de los elementos de red se realiza mediante código en OpenDOS que es creado en MATLAB. En el capítulo anterior se presentaron varios ejemplos de construcción de los elementos de la red. Los programas desarrollados en MATLAB se encuentran en los apéndices de este trabajo.

2.1.3 Comando de los flujos de potencia desde MATLAB

MATLAB es un software para ingeniería con un entorno de desarrollo integrado y con un lenguaje de programación propio, en [88], [89] se puede encontrar teoría sobre aplicaciones de MATLAB en ingeniería y algunos ejemplos de programación. La comunicación entre MATLAB y OpenDSS es necesaria para construir la red de distribución si se opta por crear la red desde MATLAB y no directamente en OpenDSS, sin embargo, la comunicación entre estos dos programas se realiza fundamentalmente para ejecutar los flujos de potencia y modificar la topología de la red durante las etapas del algoritmo. En una población de hormigas con “n” miembros, se ejecutará “n” flujos de potencia. Con estos resultados se encuentra la mejor solución de la población de hormigas.

Una vez creada la red de distribución, se comprueba la correcta ejecución de los flujos de potencia en OpenDSS comandados desde MATLAB. También en esta parte del procedimiento se verifica que mediante comandos se pueda habilitar y deshabilitar algunas líneas de la red, y el acceso a los parámetros de voltaje y pérdidas de potencia de la red.

En los Anexos II y III se encuentran los programas principales para la reconfiguración de las redes de distribución mediante el algoritmo ACO, al inicio de cada programa se presenta la rutina que establece la comunicación de MATLAB con OpenDSS que permite tener control de la red de distribución a través de MATLAB.

2.1.4 Programar el algoritmo de colonia de hormigas

La programación del algoritmo de colonia de hormigas se realiza en MATLAB, la cual consta de varias etapas: definición de parámetros de entrada, control de los elementos de la red en OpenDSS, control de la topología de la red a través de comandos, flujos de potencia, acceso a los resultados del flujo de potencia y parámetros eléctricos de la red, programación del algoritmo de colonia de hormigas, programación de una técnica para mantener la topología radial de la red en base al algoritmo ACO, restricciones de voltaje en los nodos y cargabilidad en las líneas. Todos estos procesos y los diagramas de flujo para la programación de la metodología son explicados detalladamente en la segunda sección de este capítulo. En este trabajo se valida el algoritmo de reconfiguración en una red estándar de 33 nodos cuyo óptimo es conocido y se aplica el algoritmo para dos redes de distribución, la red IEEE de 34 nodos y una red real local de 2894 nodos proporcionada por la Empresa Eléctrica Quito.

2.1.5 Pruebas de funcionamiento y resultados

Las pruebas de funcionamiento son la última etapa de la metodología, en esta etapa se debe ajustar los parámetros de entrada al algoritmo: α , β , ρ , σ , descritos en la Tabla 2.1, y el número de hormigas y el número de iteraciones. Como se trata de un algoritmo heurístico se calibra estos parámetros experimentalmente. En la literatura sobre este tema se encuentra que el parámetro α es 1, β está entre 0 y 2, el factor de evaporización ρ está entre 3% y 6% y el factor de incremento de feromona global alrededor del 10%. Sin embargo, esos valores dependen de como se ha implementado el algoritmo, si ha sido modificado o adaptado para determinado problema de optimización. Por ejemplo, en los trabajos que se ajusta β con un valor de cero, significa que la hormiga no depende del factor de visibilidad y su recorrido se basa exclusivamente en el factor de feromona.

Los parámetros deben ser ajustados para cada red, no se puede realizar un ajuste general esperando que funcione para toda red, es aconsejable realizar un ajuste específico para obtener mejores resultados de la función objetivo.

Una vez ajustado los parámetros de entrada se establece varios escenarios de funcionamiento, para diferentes niveles de carga en la red, se analiza los resultados de

reducción de potencia y los niveles de voltaje en los nodos respecto al caso base. Este tema se analizará en detalle en el tercer capítulo.

2.2 Procesos para la programación del algoritmo de Colonia de Hormigas

La parte central de este trabajo es la creación de los procesos necesarios para la programación del algoritmo de colonia de hormigas para resolver el problema de reconfiguración de la red. Para desarrollar este algoritmo se ha analizado detalladamente la influencia de las variables de la ecuación (1.5) con el fin de determinar los parámetros eléctricos que se utilizan para calcular los factores de feromona y de visibilidad. Estos parámetros contienen la información que permite dar peso a la probabilidad de que la hormiga pase por una determinada trayectoria. Para cumplir con la función objetivo y las restricciones de radialidad, voltaje en los nodos y cargabilidad de las líneas, se ha desarrollado varios procesos de programación, los cuales están agrupados en cinco diagramas de flujo y se explican en las siguientes subsecciones.

- a. Diagrama de flujo principal del algoritmo de colonia de hormigas.
- b. Diagrama de flujo de construcción de la red.
- c. Diagrama de flujo para la determinación de la topología radial de la red.
- d. Diagrama de flujo de verificación de voltaje en los nodos.
- e. Diagrama de flujo de verificación de corrientes en las líneas.

Los procesos del diagrama de flujo para determinar la topología radial entregan un vector con los dispositivos de maniobra que se pueden abrir. Estos resultados son filtrados en los procesos de restricción de voltaje en los nodos y de cargabilidad de las líneas, lo cual se indica en el diagrama de flujo principal en la siguiente sección.

2.2.1 Programa principal del algoritmo de colonia de hormigas

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo del programa principal del algoritmo de colonia de hormigas, en este diagrama se observa los procesos para lograr la función objetivo de reducir las pérdidas de potencia en las líneas y los procesos para cumplir las restricciones de topología radial, voltaje permisible en los nodos, y cargabilidad de las líneas. A continuación, se describen los procesos del algoritmo del programa principal.

Proceso datos de entrada: En este proceso se utiliza los parámetros de la Tabla 2.1 α , β , ρ , σ , número de hormigas y número de iteraciones que se ejecuta el algoritmo. Estos parámetros una vez definidos son fijos, y establecen las probabilidades de las transiciones

de la hormiga entre lazos. Estos parámetros deben ser ajustados experimentalmente hasta obtener aquellos que encuentran la mejor solución para una red específica.

Tabla 2.1 Parámetros del algoritmo ACO.

Parámetro	Letra	Descripción
α	Alfa	Parámetro que controla la ponderación de la feromona
β	Beta	Parámetro que controla la ponderación de la visibilidad
ρ	Rho	Factor de evaporación de la feromona
σ	Sigma	Factor de incremento de la feromona global

Proceso de entrada de datos desde la interfaz gráfica: Este proceso permite recibir los datos para la simulación de la red y ejecución del algoritmo de reconfiguración. Se puede seleccionar el nivel de demanda, la hora de la curva de demanda y si la simulación se realiza con o sin generación distribuida.

Proceso de construcción de la red: Este proceso se ha desarrollado como una función que contiene sus respectivos subprocesos, lo cual se explica en la siguiente subsección

Proceso de pérdidas de potencia activa en las líneas, vectores de lazos, inicialización de las matrices de feromona y visibilidad: En este proceso se encuentran agrupados varios subprocesos: definición de los vectores que contienen los elementos de cada lazo de la red de distribución, ejecución de los flujos de potencia para determinar las pérdidas de potencia activa en las líneas, y la asignación de los elementos iniciales de las matrices de feromona y visibilidad. Las pérdidas de potencia totales de las líneas son la sumatoria de las pérdidas de cada línea de la red, como se presenta en la ecuación (2.5).

$$P = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (2.5)$$

La asignación de los valores de la matriz de visibilidad η_{ij} , se realiza mediante la ecuación (2.6). Este valor corresponde a las pérdidas de potencia en cada línea. Se normaliza este valor de modo que su máximo sea igual a uno. Estos valores son asignados una sola vez en el algoritmo, y su función es dar un camino alternativo a la búsqueda de soluciones de modo que la búsqueda no esté determinada totalmente por las matrices de feromona.

$$\eta_{ij} = \frac{I_i^2 R_i}{\text{Max}\{P_i\}}, \quad 0 < \eta_{ij} \leq 1 \quad (2.6)$$

Donde $\text{Max}\{P_i\}$ es la línea con mayor pérdida de potencia.

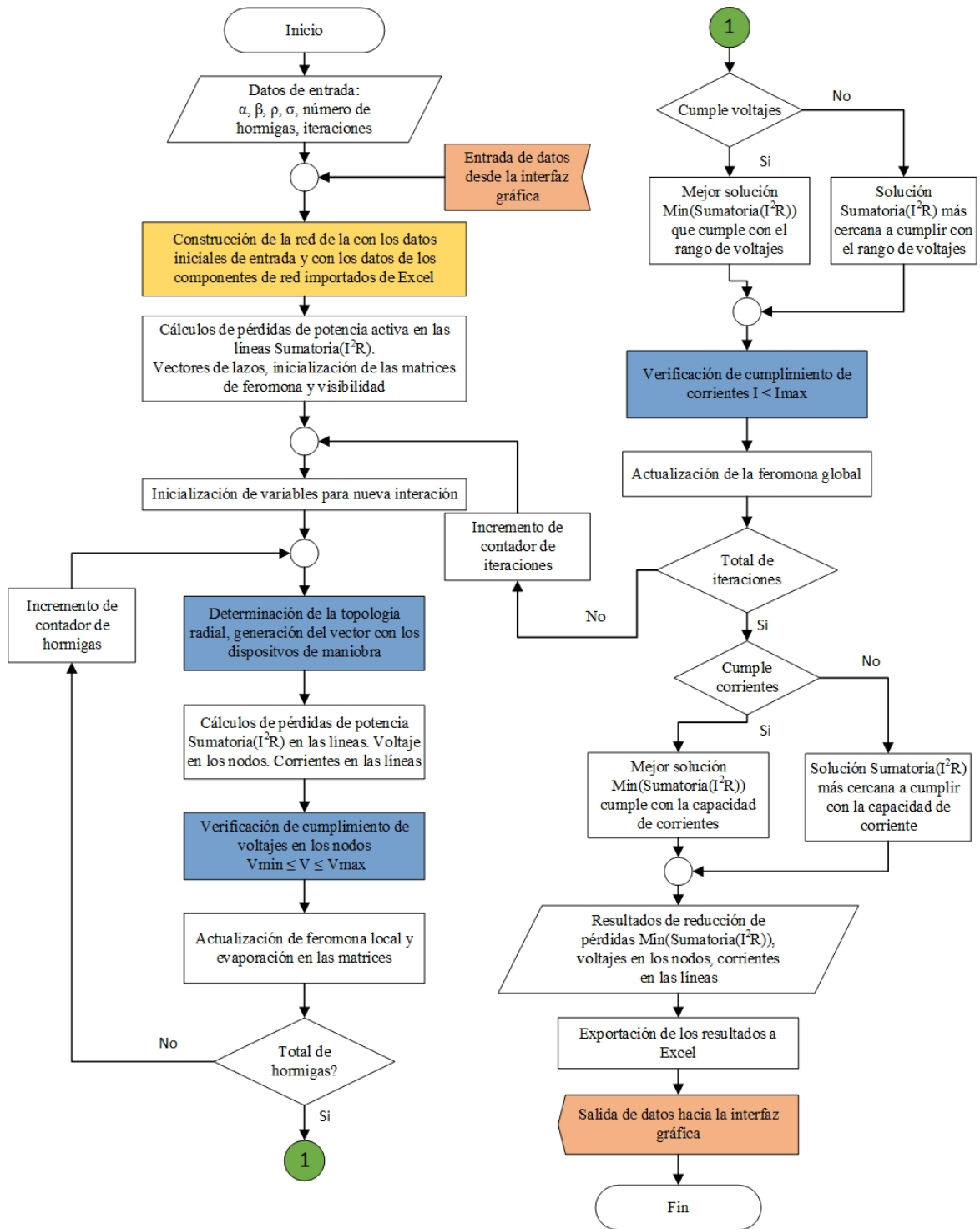


Fig. 2.1 Diagrama de flujo del programa principal del algoritmo ACO.

Como alternativa, también se puede realizar la asignación de los valores de la matriz de visibilidad η_{ij} , mediante la ecuación (2.7).

$$\eta_{ij} = \frac{R_i}{\text{Max}\{R_i\}}, \quad 0 < \eta_{ij} \leq 1 \quad (2.7)$$

Donde R_i es la resistencia de la línea i de la red de distribución eléctrica. Se normaliza este valor de modo que su máximo sea igual a uno, al dividir el valor de la resistencia de cada línea por el valor máximo de resistencia de las líneas de la red.

Por otra parte, se asigna valores constantes a las matrices de feromona iniciales como se indica en la ecuación (2.8), las matrices de feromona cambian cada vez que se encuentra un vector de dispositivos de maniobra.

$$\tau_{ij_inicial} = \tau_0, \quad \tau_0 > 0 \quad (2.8)$$

El número de matrices de feromona y de visibilidad es igual al número de transiciones entre lazos. Al inicio todas las hormigas están situadas en un punto de partida, y se dirigen a través de un camino imaginario hacia un elemento del primer lazo, luego a un elemento del segundo lazo, y así sucesivamente hasta llegar al último lazo de la red de distribución.

Cuando inicia el recorrido la primera hormiga, los elementos de la matriz de feromona tienen un valor numérico igual a un valor constante, generalmente igual a uno, luego estos elementos son actualizados a medida que las hormigas realizan su excursión. Por otra parte, los elementos de las matrices de visibilidad se determinan en base a las pérdidas de potencia del elemento del lazo al que la hormiga podría moverse. En esta parte del proceso se ejecuta flujos de potencia en OpenDSS para encontrar las pérdidas de potencia activa en todas las líneas de la red.

La matriz de visibilidad es fija, una vez definida no se altera, por lo que se aplica los mismos factores para todos los recorridos de las hormigas. Cada elemento de la matriz de visibilidad tiene un valor máximo de 1, esto debido a que se realiza una normalización con ese límite mediante la ecuación (2.6) o con la ecuación (2.7). El valor de un elemento de la matriz de visibilidad es proporcional a la pérdida de potencia en la línea a la cual la hormiga se traslada en una transición entre lazos. Por ejemplo, si la hormiga se encuentra en un interruptor del lazo 1, y se traslada hacia el elemento "15" que se encuentra en el lazo 2, el valor del elemento de la matriz corresponde a un factor normalizado proporcional a la pérdida de potencia en la línea "15".

Proceso de inicialización de variables para la nueva iteración: En este proceso se inicializa variables como las matrices de feromona, y se elimina el contenido de algunas variables para la nueva iteración.

Proceso de determinación de la topología radial: Este proceso entrega un vector con los dispositivos de maniobra que deben abrirse para obtener la nueva topología radial que

ha recorrido una hormiga en una excursión completa. Por la amplitud de este proceso, se explica en un diagrama de flujo separado en la siguiente subsección. Este proceso permite cumplir con la restricción de radialidad del algoritmo.

Proceso de flujo de potencia: En este proceso se ejecuta el flujo de potencia para la topología radial encontrada, este proceso se ejecuta cada vez que una hormiga termina una excursión a través de la red. El flujo de potencia es comandado por MATLAB y ejecutado en OpenDSS. Se encuentra las pérdidas de potencia en todas las líneas de la red, ecuación (2.5), que se reescribe a continuación $P = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i$, las corrientes en todas las líneas y los voltajes en todos los nodos.

Proceso de verificación de cumplimiento de voltajes en los nodos: En este proceso se verifica que la solución entregada por el recorrido de una hormiga cumpla con el rango de voltajes establecido, según la ecuación (2.9). En la siguiente subsección se presenta el diagrama de flujo de este proceso de programación.

$$Cumple_Voltajes = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \\ 0 & \text{si } V_j < V_{min} \vee V_j > V_{max} \end{cases} \quad (2.9)$$

Proceso de actualización de la feromona local: La actualización de la feromona local se conforma por dos partes: evaporación de la feromona, e incremento de la feromona. Las actualizaciones de feromona de las trayectorias se realizan en las matrices de feromona, las matrices de feromona contienen el nivel de feromona entre los caminos que conectan dos lazos consecutivos L_i y L_j .

La evaporación de la feromona se realiza cada vez que una hormiga ha terminado una excursión, la evaporación consiste en disminuir en un determinado porcentaje la cantidad de feromona de todos los elementos de las matrices de feromona, este porcentaje está entre el 3% y 10% según resultados experimentales.

La evaporación de la feromona [69] está dada por la ecuación (2.10):

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} \quad (2.10)$$

Donde ρ es el porcentaje de evaporación, τ_{ij} son los elementos de la matriz de feromona que se actualiza.

El incremento de feromona consiste en sumar un determinado valor únicamente a los elementos de las matrices de feromona correspondientes a la trayectoria que la hormiga ha recorrido, es decir a los elementos que corresponden al camino imaginario que conecta

dos dispositivos de maniobra de dos lazos consecutivos. La feromona local se actualiza cada vez que una hormiga ha terminado una excursión. El incremento de la feromona [66] está dado por la ecuación (2.11).

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i} \quad (2.11)$$

Donde $\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i$ son las pérdidas de potencia totales de las líneas de la red de distribución, y k es un factor experimental para controlar el nivel de incremento de feromona. La actualización de la feromona local está dada por la ecuación (2.12).

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i} \quad (2.12)$$

Por ejemplo, en una red de 5 lazos, al finalizar el recorrido por la red, la hormiga ha visitado los elementos [2, 5, 14, 20, 28]. Se realiza la evaporación de feromona en todos los elementos de las cinco matrices de feromona de las cinco transiciones entre lazos, y se incrementa la feromona solo en los elementos de las matrices por los cuales ha recorrido la hormiga como se indica en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ejemplo actualización de la feromona local en una red de 5 lazos

Trayectoria	Elemento del lazo	Matriz de Feromona	Lazos conectados
0 a 2	$2 \in L_1$	<i>Vector</i> $_{\tau_{01}}$	Punto de partida y L_1
2 a 5	$5 \in L_2$	<i>Matriz</i> $_{\tau_{12}}$	L_1 y L_2
5 a 14	$14 \in L_3$	<i>Matriz</i> $_{\tau_{23}}$	L_2 y L_3
14 a 20	$20 \in L_4$	<i>Matriz</i> $_{\tau_{34}}$	L_3 y L_4
20 a 28	$28 \in L_5$	<i>Matriz</i> $_{\tau_{45}}$	L_4 y L_5

El elemento 0 de la Tabla 2.2 es el punto de partida, por lo cual para el primer tramo que conecta el elemento 0 con los elementos del lazo L_1 , se utiliza un vector de feromona, mientras que para las trayectorias entre los otros lazos se utiliza matrices de feromona.

Bloque de decisión total de hormigas: En este bloque de decisión se examina el contador del número de hormigas. Si el contador de hormigas llega al número total de hormigas definido en el programa, el flujo del programa pasa al bloque de decisión de cumple voltajes, caso contrario se dirigen al proceso de contador de hormigas.

Proceso de contador de hormigas: En este proceso se incrementa en una unidad la variable del contador de hormigas hasta que se llegue al número máximo de hormigas.

Bloque de decisión cumple voltajes: Este bloque redirige el flujo de programación según si la solución encontrada hasta este punto cumple o no con la restricción de voltaje.

Proceso mejor solución que cumple con el rango de voltajes: Este proceso se ejecuta para las soluciones que cumplen el rango de voltaje establecido, el proceso encuentra la mejor solución considerando las menores pérdidas de potencia en las líneas, el resultado corresponde al mejor camino de la población de hormigas. El proceso entrega el vector de dispositivos de maniobra con la mejor solución para una iteración. La ecuación (2.13) es la mejor solución de pérdidas de potencia en las líneas y la ecuación (2.14) presenta los dispositivos de maniobra por lazo que se abren para obtener la solución.

$$P\acute{e}rdidas\ de\ potencia = Min \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \right), \quad V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \quad (2.13)$$

$$Dispositivos\ de\ maniobra = \{z_i \in L_i\}, \quad V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \quad (2.14)$$

Proceso solución más cercana a cumplir con el rango de voltajes: Este proceso se ejecuta si ninguna hormiga de la población cumple con el rango de voltajes establecido. En este caso se encuentra la solución de pérdidas de potencia en las líneas más cercana a cumplir con el rango de voltajes establecido, ecuación (2.15). El resultado de este proceso es el vector de dispositivos de maniobra, ecuación (2.16), con la solución más cercana a cumplir con el rango de voltajes establecido.

$$P\acute{e}rdidas\ de\ potencia = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i, \quad V_j < V_{min} \vee V_j > V_{max} \quad (2.15)$$

$$Dispositivos\ de\ maniobra = \{z_i \in L_i\}, \quad V_j < V_{min} \vee V_j > V_{max} \quad (2.16)$$

Proceso de verificación de cumplimiento de corrientes en las líneas: En este proceso se verifica que la solución cumpla con la capacidad máxima de corriente en las líneas, según la ecuación (2.17). En la siguiente subsección se presenta el diagrama de flujo de este proceso.

$$Cumple_Corrientes = \begin{cases} 1 & si \quad I_i \leq I_{max} \\ 0 & si \quad I_i > I_{max} \end{cases} \quad (2.17)$$

Proceso de actualización de la feromona global: En cada iteración del algoritmo, todas las hormigas realizan una excursión desde un punto de partida hasta un elemento del lazo final, atravesando todos los lazos de la red. En una excursión completa del grupo de hormigas, una de ellas obtiene el resultado con el menor valor de pérdidas de potencia. Se desea reforzar la cantidad de feromona sobre el camino que produjo el mejor resultado de

la iteración, para lo cual se agrega un valor de feromona adicional [24], este valor de feromona global se añade a los elementos de las matrices de feromona correspondientes al camino seguido. Por ejemplo, en una red de 5 lazos, si se obtiene las menores pérdidas de potencia en la trayectoria dada por el vector [4, 8, 15, 25, 30], los caminos que deben reforzarse se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Ejemplo incremento de la feromona global en una red de 5 lazos

Trayectoria	Elemento del lazo	Matriz de Feromona	Lazos conectados
0 a 4	$4 \in L_1$	τ_{01}	Punto de partida y L_1
4 a 8	$8 \in L_2$	τ_{12}	L_1 y L_2
8 a 15	$15 \in L_3$	τ_{23}	L_2 y L_3
15 a 25	$25 \in L_4$	τ_{34}	L_3 y L_4
25 a 30	$30 \in L_5$	τ_{45}	L_4 y L_5

El incremento de feromona global es el producto entre el factor σ y el incremento de feromona local. La feromona global se incrementa en las trayectorias que producen la mejor solución de la iteración, lo cual se realiza mediante la ecuación (2.18).

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sigma \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i} \quad (2.18)$$

El factor σ se determina experimentalmente, y está alrededor de 0.1. k es una constante.

Bloque de decisión de total de iteraciones: En este bloque se examina si se ha llegado al número máximo de iteraciones definida en el programa, en caso afirmativo se direcciona continúa al bloque de decisión de cumple corrientes, caso contrario se direcciona al proceso de incremento del contador de iteraciones.

Proceso de incremento de iteraciones: En este proceso se incrementa la variable que almacena el número de iteraciones.

Bloque de decisión cumple corrientes: Este bloque redirige el flujo de programación según si las soluciones encontradas para los mejores caminos de cada población cumplen o no con la restricción de corrientes.

Proceso mejor solución que cumple con capacidad de corrientes: Este proceso se ejecuta para las soluciones que cumplen con la capacidad de corrientes de las líneas, el proceso encuentra la mejor solución de pérdidas de potencia en las líneas, ecuación (2.19), que cumplen con la capacidad de corriente. El proceso entrega el vector de dispositivos de maniobra con la mejor solución del algoritmo de colonia de hormigas, ecuación (2.20).

$$\text{Pérdidas de potencia} = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \right), \quad \forall I_i < I_{max} \quad (2.19)$$

$$\text{Dispositivos de maniobra} = \{z_i \in L_i\}, \quad 1 < i \leq n, \quad \forall I_i < I_{max} \quad (2.20)$$

Donde I_i es la corriente que circula por la línea i , I_{max} es la capacidad de corriente máxima en la línea. z_i es el dispositivo de maniobra que pertenece al lazo L_i .

Proceso solución más cercana a cumplir con la capacidad de corriente en las líneas:

Este proceso se ejecuta si ninguna de las soluciones de las de las poblaciones de hormigas cumple con la capacidad de corriente de las líneas. En este caso se encuentra la solución de pérdidas de potencia en las líneas más cercana a cumplir con la capacidad de corriente en las líneas establecido, ecuación (2.21). El resultado de este proceso es el vector de dispositivos de maniobra, ecuación (2.22), con la solución más cercana a cumplir con el rango de voltajes establecido.

$$\text{Pérdidas de potencia} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i, \quad \text{si } \exists I_i > I_{max} \quad (2.21)$$

$$\text{Dispositivos de maniobra} = \{z_i \in L_i\}, \quad 1 < i \leq n, \quad \text{si } \exists I_i > I_{max} \quad (2.22)$$

Donde z_i es el dispositivo de maniobra que pertenece al lazo L_i .

Proceso tablas de resultados: En este proceso se agrupa en tablas los resultados de voltajes en los nodos y corrientes en las líneas de las soluciones entregadas. En este proceso se crea el formato para la presentación de resultados de voltajes, corrientes, potencias, y del vector de dispositivos de maniobra de la mejor solución del algoritmo.

Proceso exportación de resultados a Excel: En este proceso se exporta los resultados a tres archivos de Excel, el primero para los resultados de potencias y del vector de dispositivos de maniobra, el segundo para los voltajes en los nodos y el tercero para las corrientes en las líneas. Los resultados exportados corresponden a las topologías de la red antes y después de la reconfiguración.

Proceso de salida de datos hacia la interfaz gráfica: En este proceso de salida se presentan los resultados en la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB, en la cual se visualiza el vector de dispositivos de maniobra de la topología radial, las potencias en los en la subestación y generadores, las pérdidas de potencia totales en las líneas, y los perfiles de voltaje en los nodos. Estos resultados se presentan para la red antes y después de la reconfiguración.

2.2.2 Construcción de la red eléctrica de distribución

Para la construcción de la red se realiza los procesos que se presentan en la Figura 2.2.

Importación de datos de los componentes de red desde Excel: Se importa los datos de los componentes de la red que se encuentran en varios archivos de Excel por separado. Los datos son los parámetros de las líneas, cargas, transformadores.

Inicialización de la comunicación de OpenDSS con MATLAB: Este proceso establece la comunicación de MATLAB con OpenDSS, este proceso está contenido al inicio del programa principal del algoritmo de colonia de hormigas, que se presenta en los Anexos II y III para las dos redes de distribución.

Proceso de creación de los comandos para la creación de los componentes de red en OpenDSS: En este proceso se crea en MATLAB los comandos para la construcción de los componentes de red en OpenDSS. Los comandos son creados como cadenas de caracteres y se almacenan previamente en variables antes de enviarlos a OpenDSS.

Proceso de envío de los comandos a OpenDSS: Este proceso se ejecuta para crear cada uno de los componentes de red en OpenDSS.

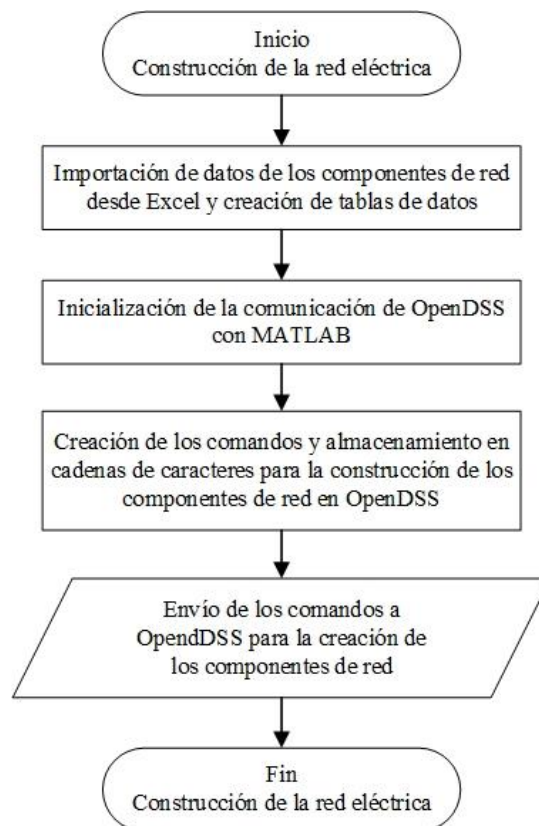


Fig. 2.2 Diagrama de flujo del proceso de construcción de la red

2.2.3 Determinación de la topología radial

Este proceso permite cumplir con la restricción de topología radial de la red, para lo cual se presenta una metodología que cumple con la ecuación (2.4).

Para que una solución sea factible debe tener topología radial, al aplicar la metodología de topología radial de la red se debe primero numerar sus componentes: nodos y ramales. Se define el número de lazos de la red de distribución mediante la ecuación (2.23). [35]

$$L = B - N + 1 \quad (2.23)$$

donde L es el número de lazos, B es el número de ramales, N es el número de nodos.

A la topología radial original se le añade dispositivos de maniobra de enlace denominados interruptores de enlace, con lo cual se forman los lazos de la red. La red base tiene topología radial por lo que constituye un grafo tipo árbol, por otra parte, los interruptores de enlace son el co-árbol del grafo. El número de lazos que se forman en la red es igual al número de interruptores de enlace. Al abrirse un dispositivo de maniobra en cada lazo de la red, se obtiene una topología radial. En la Figura 2.3a se presenta un ejemplo de una red radial que contiene 22 nodos y 21 ramales, a esta red se le añade 5 líneas de enlace por lo cual el número de ramales se incrementa a 26 y se forman 5 lazos en la red como se indica en la Figura 2.3b. El número de nodos es fijo, no se añade nodos a la red. Aplicando la fórmula de la ecuación 2.4 se obtiene 5 lazos para esta red.

$$L = B - N + 1 = 26 - 22 + 1 = 5$$

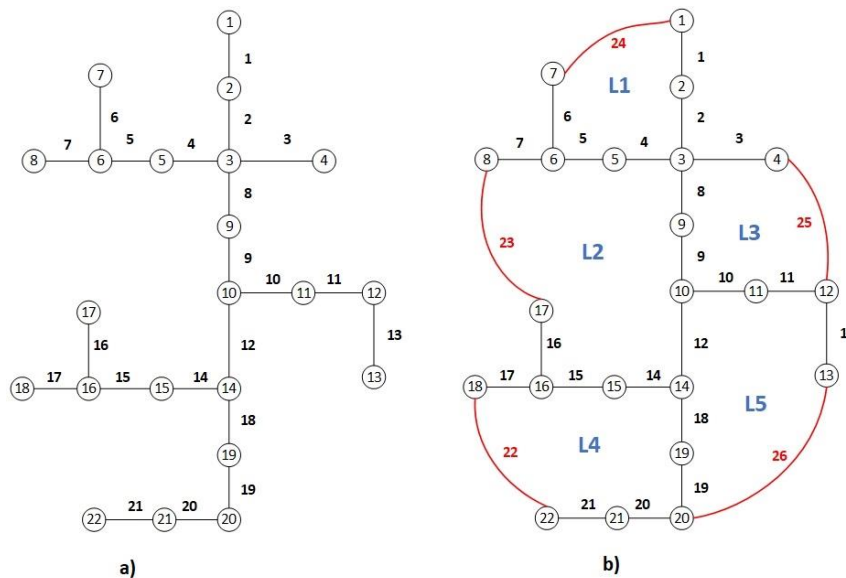


Fig. 2.3 Creación de lazos a partir de una red con topología radial.

El número de lazos de la red de distribución determina cuantos lugares visitará la hormiga. Una red de distribución que contiene “n” lazos, implica que la hormiga tendrá que atravesar “n” posiciones. En cada lazo se encuentra un determinado número de dispositivos de maniobra, el dispositivo de maniobra que seleccione la hormiga determina la línea que se abrirá. Existen diferentes metodologías respecto al camino que puede seguir la hormiga, por ejemplo en [70] la hormiga está restringida a moverse dentro de cada lazo, mientras que en este trabajo, la hormiga realiza su recorrido por todos los lazos, es decir los caminos posibles de cada hormiga cuando inicia su excursión comprenden toda la red. Sin embargo, una hormiga solo puede situarse sobre un elemento del lazo y luego pasar al siguiente elemento de otro lazo, una misma hormiga no puede visitar dos elementos de un lazo, salvo el caso de que uno de los dos elementos sea compartido por lazos adyacentes. En este trabajo se propone una metodología en la cual las hormigas recorren un camino imaginario que conecta los dispositivos de maniobra entre dos lazos adyacentes, lo que significa que la hormiga recorre el co-árbol del sistema de distribución y por lo tanto se puede determinar el árbol de la red, obteniéndose de esta manera la red de topología radial. En la sección de aplicación del algoritmo se presenta como recorre la hormiga la red a través de los lazos. El diagrama de flujo de la metodología para la generación de una topología radial se presenta en la Figura 2.4. Los programas en MATLAB para la determinación de la topología radial se encuentran en los Anexos II y III como parte del programa principal. A continuación, se explica los procesos de programación del diagrama de flujo para la determinación de la topología radial.

Proceso asignación de valores L_i : A los dispositivos de maniobra de la red se les asigna un número decimal único y a la red base con topología radial se le añade las líneas de enlace, de manera que cada línea de enlace cierre un lazo. Los lazos son creados analizando el diagrama de la red, y los dispositivos de maniobra de cada lazo son los elementos de los vectores L_i que son definidos en MATLAB en este proceso. El vector L_i contiene los elementos del lazo i de la red.

Proceso de transición desde el punto de partida: Las hormigas inician su trayectoria a través de la red desde un punto imaginario fuera de la red. Desde este punto una hormiga se dirige al primer lazo. En este proceso la hormiga debe seleccionar un elemento del primer lazo, vector L_1 , para lo cual se utiliza la fórmula de probabilidad de la ecuación (1.5), reescrita en la ecuación (2.24) para la reconfiguración de redes de distribución. El espacio de soluciones se almacena temporalmente en un vector L_vec . Solamente cuando la

hormiga inicia la excursión desde el punto de partida, el espacio de soluciones corresponde a todos los elementos del primer lazo.

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum (\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta)}, \quad \text{donde } \eta_{ij} = \frac{I_i^2 R_i}{\text{Max}\{P_i\}} \vee \eta_{ij} = \frac{R_i}{\text{Max}\{R_i\}} \quad 0 < \eta_{ij} \leq 1 \quad (2.24)$$

$\text{Max}\{P_i\}$ es la máxima pérdida de potencia de todas las líneas.

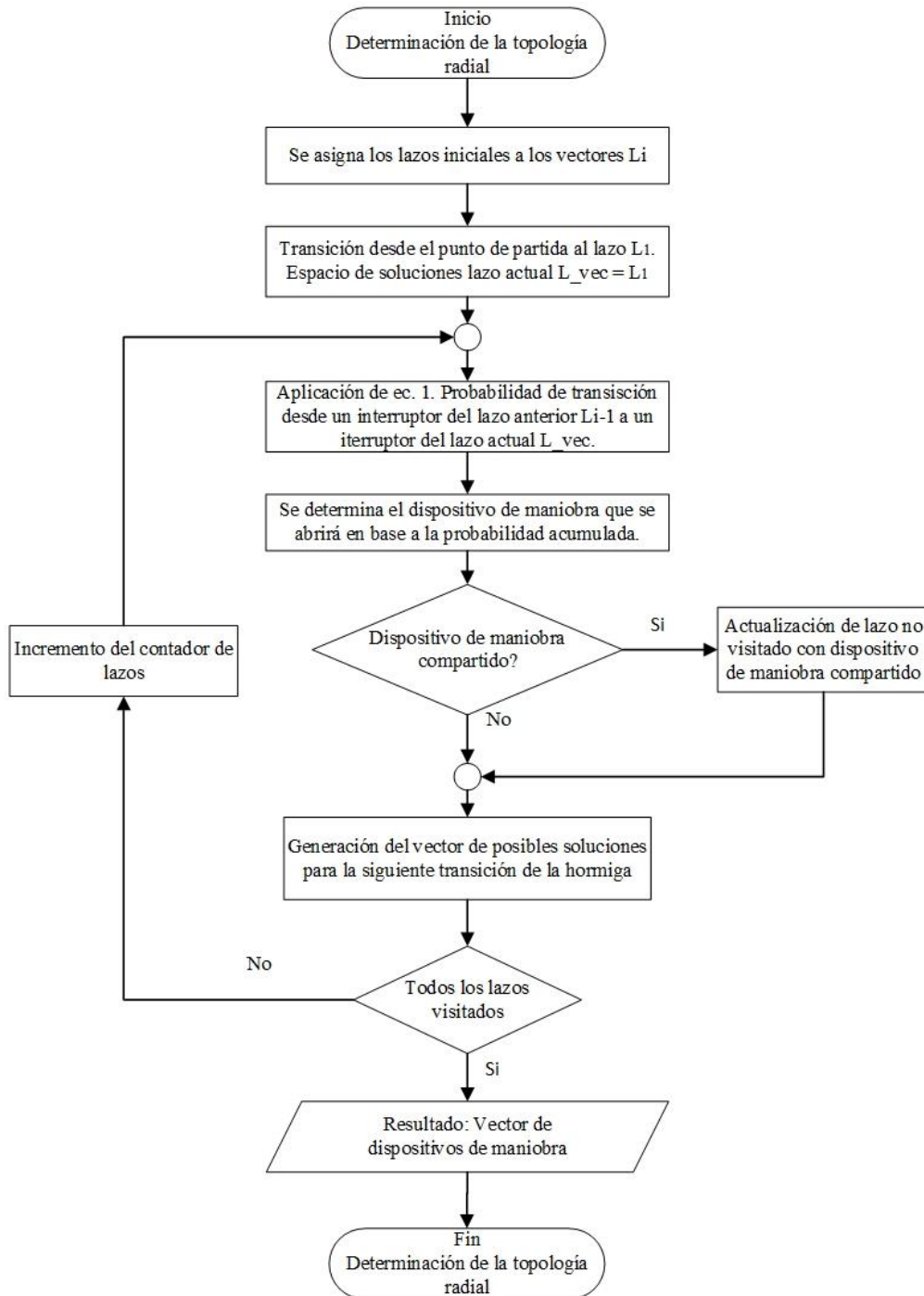


Fig. 2.4 Topología radial en base al algoritmo de colonia de hormigas.

Proceso de aplicación de la ecuación de probabilidad: Este proceso se ejecuta a medida que la hormiga transita entre lazos utilizando la ecuación (2.24). Cuando la hormiga se encuentra en un lazo y tiene que moverse hacia el próximo lazo, dispone solo de un determinado número de posibilidades de transición hacia el siguiente lazo. Los elementos del siguiente lazo que podría seleccionar la hormiga se encuentran almacenados temporalmente en el vector L_vec , cuyos elementos son un subconjunto de L_i y corresponde al espacio de soluciones posibles para esta transición entre lazos.

La diferencia entre este proceso y el anterior radica en que el espacio de soluciones para la primera transición es fijo, la hormiga puede elegir cualquier elemento del primer lazo, mientras que a partir de la segunda transición el espacio de soluciones es variable y depende de su trayectoria recorrida en los lazos anteriores. El espacio de soluciones para una transición específica se implementa de manera que a medida que la hormiga avanza solo pueda transitar por elementos de los lazos que generen una solución factible, es decir con topología radial.

Proceso de probabilidad acumulada: En el proceso anterior se ha obtenido las probabilidades de transición entre dos lazos consecutivos, con este conjunto de probabilidades se calcula un vector de probabilidades acumuladas para los posibles caminos de transición. Luego se genera un número aleatorio, el cual se compara con el conjunto de probabilidades acumuladas, y se selecciona la probabilidad acumulada que es inmediatamente mayor al número aleatorio generado. La probabilidad acumulada encontrada define el elemento del siguiente lazo sobre el cual transita la hormiga, este elemento corresponde al dispositivo de maniobra que debe abrirse.

Bloque de decisión: En el diagrama de flujo de la Figura 2.2 se tiene que el primer elemento de decisión se utiliza para determinar si el elemento de maniobra que ha sido seleccionado en el proceso anterior es compartido entre dos lazos. En caso afirmativo se debe actualizar los elementos del lazo que contiene el elemento compartido.

Proceso de actualización del lazo: Cuando un elemento que ha sido seleccionado por la hormiga es compartido con un lazo que aún no es visitado, el lazo no visitado debe ser actualizado. La actualización del lazo no visitado consiste en crear un nuevo lazo que contiene los elementos no compartidos de los dos lazos. Este nuevo lazo reemplaza al lazo no visitado. Por ejemplo, si la hormiga se sitúa en un elemento del lazo L_2 compartido con el lazo L_3 , se debe actualizar el lazo L_3 , los nuevos elementos de este lazo son todos los elementos no compartidos de ambos lazos. Si la hormiga se sitúa en un elemento que no es compartido entre L_2 y L_3 , no se actualiza el lazo el lazo L_3 . Esto se realiza con la

finalidad de que la hormiga no seleccione dos elementos en un mismo ramal, lo cual aislaría uno o más nodos. Este proceso se puede describir con las ecuaciones (2.25) a (2.27).

$$Int_LiLj = Vec_Li(i) \cap Vec_Li(p) \quad (2.25)$$

$$Union_Lij = Vec_Li(i) \cup Vec_Li(p) \quad (2.26)$$

$$Vec_Li = Union_Lij - Int_LiLj \quad (2.27)$$

Donde Vec_Li es el vector de lazos actualizados, Int_LiLj es el vector que almacena la intersección de dos lazos, $Union_Lij$ es un vector que almacena la unión entre dos lazos. En la ecuación (2.25) se realiza la intersección de los dos vectores, y en la ecuación (2.26) la unión de los dos vectores. En la ecuación (2.27) se genera el nuevo vector Vec_Li como la diferencia entre la unión y la intersección de los lazos.

Proceso de generación del vector de posibles soluciones para la siguiente transición: En este proceso se construye el vector $L_generar$ el cual contiene los elementos del lazo a los que puede transitar la hormiga manteniendo la topología radial. Para construir este vector se utiliza el vector L_vec el cual está conformado por la intersección de dos vectores: el primer vector corresponde al lazo actualizado Vec_Li , hacia el cual la hormiga se dirige y el segundo vector contiene los elementos iniciales del lazo Int_Lij , es decir el vector original con los elementos del lazo sin modificaciones. Para generar el espacio de posibles soluciones se encuentra el vector Int_LiLj mediante la ecuación (2.25), el cual está conformado por los elementos de los ramales de red ya visitados. Si un elemento de un ramal ha sido seleccionado en una visita previa de la hormiga, todos los elementos del ramal son elementos restringidos, para evitar aislar nodos, estos elementos restringidos están se almacenan en el vector Int_LiLj .

El espacio de soluciones está conformado por los elementos que pertenecen al vector L_vec y que no pertenecen al vector Int_LiLj . El resultado se almacena en el vector $L_generar$. El vector $L_generar$ contiene los elementos que pueden ser seleccionados para la visita del siguiente lazo. Las ecuaciones (2.28) y (2.29) describen estas operaciones.

$$L_vec = Vec_Li(i) \cap L_init(i) \quad (2.28)$$

$$L_generar = L_vec - Int_LiLj \quad (2.29)$$

Mediante la ecuación (2.28) se encuentra la intersección de los vectores de los lazos con elementos compartidos, este resultado se utiliza en la ecuación (2.29) para encontrar el vector $L_generar$ que contiene los posibles elementos del siguiente lazo que permiten generar soluciones factibles, es decir que cumplen con la topología radial de la red.

Bloque de decisión de transición de lazos: En este elemento de decisión se determina si la hormiga ha terminado su recorrido por todos los lazos, en caso afirmativo pasa al proceso de presentación de resultados. Si la hormiga no ha recorrido todos los lazos pasa al proceso de incremento del contador de lazos.

Proceso de incremento de contador de lazos: Este proceso dirige el flujo del algoritmo hacia el proceso de cálculo de probabilidad para la siguiente transición entre lazos e incrementa el contador de lazos hasta que la hormiga visite todos los lazos de la red.

Proceso de presentación de resultados: Este proceso agrupa en un vector los elementos de maniobra que deben abrirse para conformar la topología radial encontrada. La topología radial encontrada se utiliza para realizar la actualización de las matrices de feromona y continuar con la excursión de las siguientes hormigas.

2.2.4 Verificación del nivel de voltajes en los nodos

Como parte de los procesos para programar la restricción del nivel de voltajes en los nodos se verifica que los voltajes se encuentren dentro del rango establecido, para lo cual se implementa el diagrama de flujo de la Figura 2.5. La función de verificación del nivel de voltaje en los nodos es llamada en el programa principal para implementar la restricción de nivel de voltaje.

Proceso de importación de los resultados de voltajes en los nodos: Los resultados de los voltajes en los nodos antes y después de la reconfiguración de la red de distribución eléctrica son importados a MATLAB desde OpenDSS.

Proceso de extracción de los resultados de voltajes y almacenamiento en variables: Los datos de voltaje entregados por OpenDSS tienen un formato que debe adecuarse para que puedan ser utilizados en MATLAB. OpenDSS entrega en un solo arreglo de valores los voltajes sin separarlos por fase, por lo tanto, en este proceso se extrae los voltajes de cada fase y se los almacena en vectores.

Proceso de comparación de voltajes en los nodos: En este proceso se compara cada uno de los voltajes en los nodos con un rango definido, este proceso se ejecuta para la solución entregada por cada hormiga.

Proceso de resultado: Este proceso entrega como resultado el valor de uno, si todos los voltajes de los nodos de la red cumplen con el nivel de voltaje establecido, y el valor de cero si alguno de los voltajes en los nodos no cumple con el rango de voltaje.

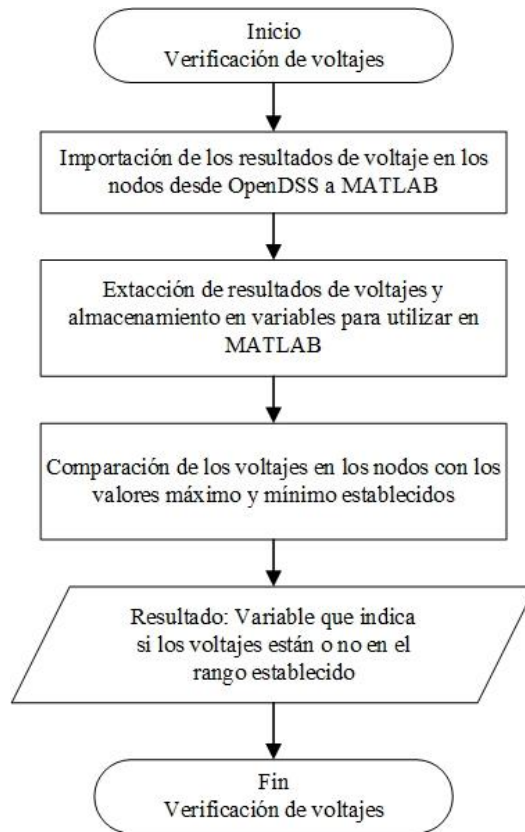


Fig. 2.5 Verificación de nivel de voltajes en los nodos.

2.2.5 Verificación de las corrientes en las líneas

Como parte de los procesos para programar la restricción de cargabilidad en las líneas de la red, se debe verificar que las corrientes en las líneas se encuentren dentro de su capacidad máxima de corriente, para lo cual se implementa el diagrama de flujo de la Figura 2.6. La función de verificación de las corrientes en las líneas es llamada en el programa principal para implementar la restricción de cargabilidad de las líneas.

Proceso de importación de los resultados de corrientes en las líneas: Los resultados de las corrientes en las líneas antes y después de la reconfiguración de la red de distribución eléctrica son importados a MATLAB desde OpenDSS.

Proceso de extracción de los resultados de corrientes en las líneas: Los datos de corrientes en las líneas entregados por OpenDSS tienen un formato que debe adecuarse para ser utilizado en MATLAB. OpenDSS entrega un arreglo de corrientes por cada línea de la red, este arreglo de corrientes tiene cuatro elementos si la línea es monofásica, ocho elementos si la línea es bifásica y doce elementos si la línea es trifásica. En este proceso

se identifica la fase de corriente de la línea y se extrae los datos de magnitud de corriente, se los ordena por fase y se los almacena en vectores.

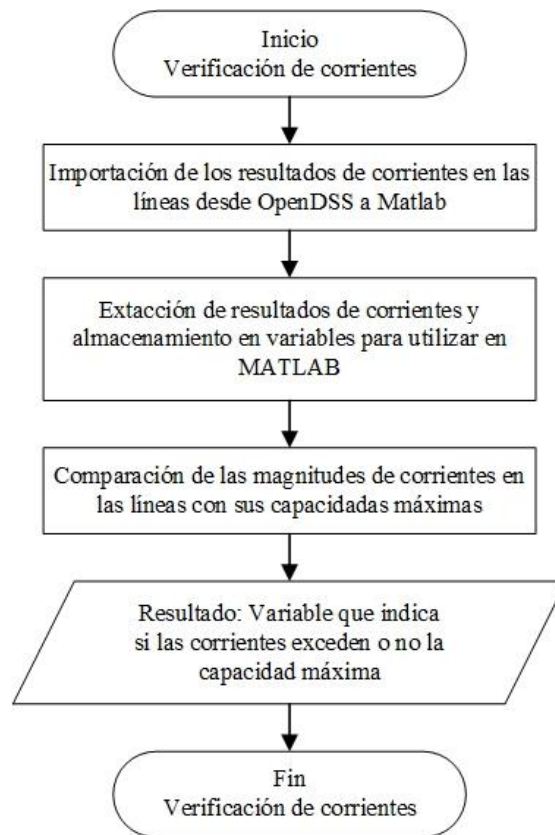


Fig. 2.6 Verificación de las corrientes en las líneas.

Proceso de comparación de corrientes en las líneas: En este proceso se compara cada uno de las magnitudes de corrientes en las líneas con su capacidad máxima, este proceso se ejecuta para cada iteración del programa.

Proceso de resultado: Este proceso entrega como resultado el valor de uno, si todas las corrientes en las líneas de la red no sobrepasan su capacidad máxima, y el valor de cero si alguna corriente sobrepasa la capacidad máxima de la línea.

2.3 Validación del algoritmo sobre redes eléctricas estándar

Como se presentó en el Capítulo 1 en la sección del estado del arte, la red estándar de 33 nodos y la red estándar de 69 nodos son utilizadas en varios trabajos publicados en artículos científicos para probar varios algoritmos de reconfiguración, son redes en las cuales sus óptimos de reconfiguración son conocidos. El óptimo de la reconfiguración está dado por las mínimas pérdidas de potencia activa en las líneas.

2.3.1 Validación sobre la red estándar de 33 nodos

En los artículos científicos sobre este tema presentan las pérdidas de potencia activa en las líneas de la red estándar de 33 nodos y los interruptores de maniobra que se abren en cada lazo de la red para la reconfiguración óptima.

Para validar el funcionamiento del algoritmo de colonia de hormigas, en este trabajo se utiliza la red estándar de 33 nodos, con la misma numeración de las líneas, nodos y lazos que se encuentran en los artículos con los que se compara. De esta manera se comprueba la efectividad del algoritmo desarrollado para encontrar el óptimo de la reconfiguración de la red. En la Figura 2.7 se presenta la red estándar de 33 nodos, en la Tabla 2.4 los datos de impedancia en las líneas y en la Tabla 2.5 la carga en los nodos de la red.

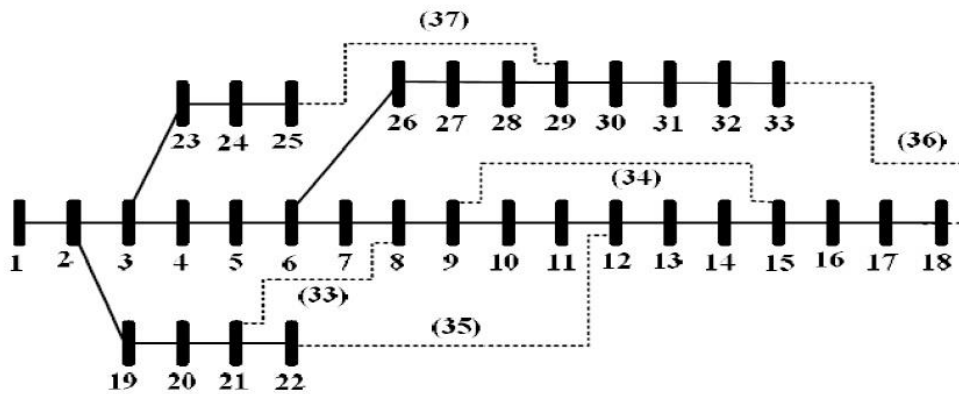


Fig. 2.7 Red estándar de 33 nodos. [90]

Tabla 2.4 Resistencia y reactancia de las líneas de la red estándar de 33 nodos. [3]

Línea	Nodo desde	Nodo hasta	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Línea	Nodo desde	Nodo hasta	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)
1	1	2	0.0922	0.047	20	20	21	0.4095	0.4784
2	2	3	0.493	0.2511	21	21	22	0.7089	0.9373
3	3	4	0.366	0.1864	22	3	23	0.4512	0.3083
4	4	5	0.3811	0.1941	23	23	24	0.898	0.7091
5	5	6	0.819	0.707	24	24	25	0.896	0.7011
6	6	7	0.1872	0.6188	25	6	26	0.203	0.1034
7	7	8	0.7114	0.2351	26	26	27	0.2842	0.1447
8	8	9	1.03	0.74	27	27	28	1.059	0.9337
9	9	10	1.044	0.74	28	28	29	0.8042	0.7006
10	10	11	0.1966	0.065	29	29	30	0.5075	0.2585
11	11	12	0.3744	0.1238	30	30	31	0.9744	0.963
12	12	13	1.468	1.155	31	31	32	0.3105	0.3619
13	13	14	0.5416	0.7129	32	32	33	0.341	0.5302

14	14	15	0.591	0.526	Líneas de enlace				
15	15	16	0.7463	0.545	33	21	8	2	2
16	16	17	1.289	1.721	34	9	15	2	2
17	17	18	0.732	0.574	35	12	22	2	2
18	2	19	0.164	0.1565	36	18	33	0.5	0.5
19	19	20	1.5042	1.3554	37	25	29	0.5	0.5

Tabla 2.5 Cargas en los nodos de la red estándar de 33 nodos. [3]

Nodo	KW	KVAR	Nodo	kW	kVAR	Nodo	kW	kVAR
1	0	0	12	60	35	23	90	50
2	100	60	13	60	35	24	420	200
3	90	40	14	120	80	25	420	200
4	120	80	15	60	10	26	60	25
5	60	30	16	60	20	27	60	25
6	60	20	17	60	20	28	60	20
7	200	100	18	90	40	29	120	70
8	200	100	19	90	40	30	200	600
9	60	20	20	90	40	31	150	70
10	60	20	21	90	40	32	210	100
11	45	30	22	90	40	33	60	40

En la Tabla 2.6 se presenta los lazos utilizados en la reconfiguración de la red estándar de 33 nodos, los cuales son los mismos lazos que se utilizan en varias publicaciones sobre el tema, lo que permite comparar los resultados obtenidos.

Tabla 2.6 Lazos de la red estándar de 33 nodos [90]

	Líneas por lazo
Lazo 1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 33
Lazo 2	8, 9, 10, 11, 21, 33, 35
Lazo 3	9, 10, 11, 12, 13, 14, 34
Lazo 4	3, 4, 5, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37
Lazo 5	6, 7, 8, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 15, 16, 17, 32, 34, 36

La red estándar de 33 nodos tiene pérdidas de potencia activa en las líneas de 202.66 (kW) antes de la reconfiguración. En la tabla 2.7 se presenta los diez mejores resultados de reducción de pérdidas de potencia en las líneas obtenidos al aplicar el algoritmo de colonia de hormigas sobre la red estándar de 33 nodos. El mejor resultado de la Tabla 2.7 que se encuentra en la primera fila de la tabla, corresponde al óptimo de esta red de distribución.

Tabla 2.7 Mejores resultados de la reconfiguración de la red de 33 nodos

Nro.	Líneas abiertas	Pérdidas en las líneas después de la reconfiguración
1	7, 9, 14, 37, 32	139.88 (kW)
2	7, 10, 14, 37, 32	140.61 (kW)
3	7, 10, 14, 28, 32	141.05 (kW)
4	7, 11, 14, 37, 32	141.50 (kW)
5	7, 9, 14, 37, 32	142.48 (kW)
6	7, 10, 14, 37, 36	142.99 (kW)
7	7, 9, 14, 28, 36	142.26 (kW)
8	7, 9, 13, 37, 32	143.42 (kW)
9	7, 11, 34, 28, 32	143.53 (kW)
10	7, 9, 14, 27, 32	143.65 (kW)

Los parámetros con los cuales se encuentra el óptimo de la red estándar de 33 nodos se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Parámetros del algoritmo de colonia de hormigas

Parámetro	Letra	Descripción
α	Alfa	1.15
β	Beta	0.005
ρ	Rho	0.005
σ	Sigma	10
iter	Iteraciones	20
ants	Nro. hormigas	33

Los resultados obtenidos en este trabajo y cinco publicaciones de la reconfiguración de la red estándar de 33 nodos se presentan en la Tabla 2.9. Las pérdidas de potencia activa en las líneas que se encuentran en artículos científicos son diferentes en un pequeño porcentaje debido a que cada autor utiliza una técnica o software de simulación diferentes, sin embargo, los dispositivos de maniobra abiertos para el óptimo de la reconfiguración son los mismos.

Como se indica en la Tabla 2.9 el resultado obtenido con el algoritmo de colonia de hormigas presentado en este trabajo es el óptimo de la reconfiguración de la red eléctrica de distribución de 33 nodos, con lo cual está validado el algoritmo desarrollado.

Tabla 2.9 Resultados de la reconfiguración de la red de 33 nodos por varios autores

Método	Líneas abiertas después de la reconfiguración	Pérdidas en las líneas	Pérdidas en las líneas simulación en OpenDSS
Algoritmo de Colonia de Hormigas de este trabajo	7, 9, 14, 37, 32	139.88 (kW)	139.88 (kW)
Cuckoo search algorithm [26]	7, 9, 14, 37, 32	138.87 (kW)	139.88 (kW)
Binary Particle Swarm Optimization [32]	7, 9, 14, 37, 32	137.08 (kW)	139.88 (kW)
Adaptive Shuffled Frogs Leaping Algorithm (ASFLA) [91]	7, 9, 14, 37, 32	139.98 (kW)	139.88 (kW)
Grey Wolf Optimizer y PSO [56]	7, 9, 14, 37, 32	139.55 (kW)	139.88 (kW)

2.3.2 Validación sobre la red estándar de 69 nodos

En esta sección se presenta la validación del algoritmo de colonia de hormigas sobre la red estándar de 69 nodos, para lo cual se presenta las pérdidas de potencia activa en las líneas de la red y los interruptores de maniobra que se abren en cada lazo de la red para la reconfiguración óptima.

En la Figura 2.8 se presenta la red estándar de 69 nodos, en la Tabla 2.10 los datos de impedancia en las líneas y en la Tabla 2.11 la carga en los nodos de la red.

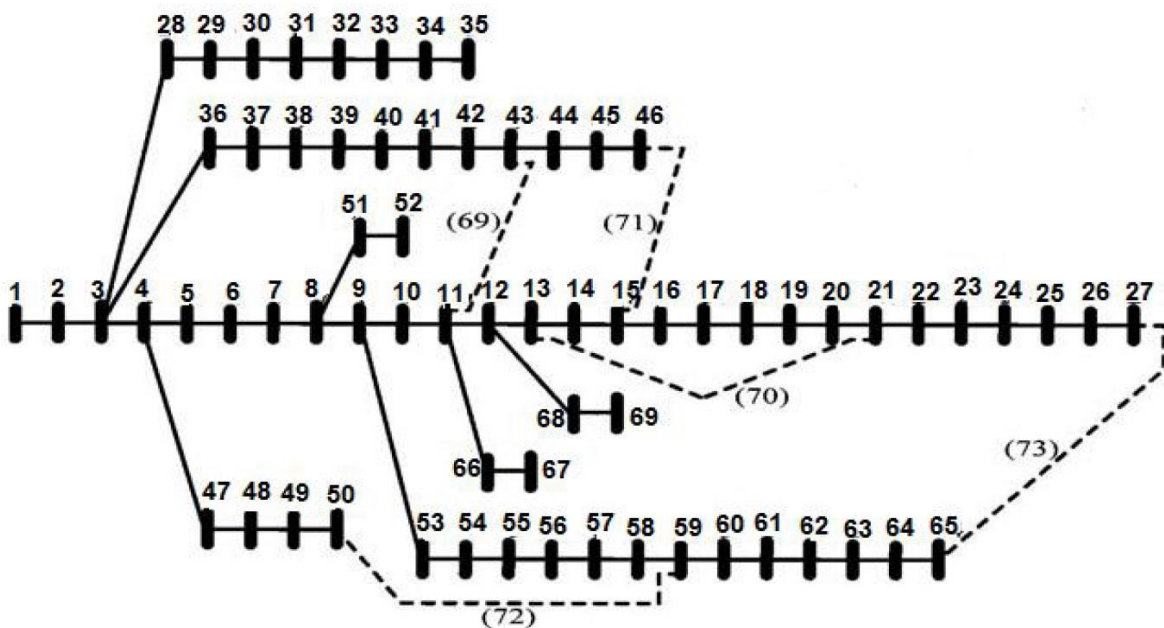


Fig. 2.8 Red estándar de 69 nodos. [13]

Para validar el funcionamiento del algoritmo de colonia de hormigas se utiliza la misma numeración de las líneas, nodos y lazos que se encuentran en los artículos con los que se compara. De esta manera se comprueba la efectividad del algoritmo desarrollado para encontrar el óptimo de la reconfiguración de la red

Tabla 2.10 Resistencia y reactancia de las líneas de la red estándar de 69 nodos. [92]

Línea	Nodo desde	Nodo hasta	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Línea	Nodo desde	Nodo hasta	Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)		
1	1	2	0.0005	0.0012	38	38	39	0.0304	0.0355		
2	2	3	0.0005	0.0012	39	39	40	0.0018	0.0021		
3	3	4	0.0015	0.0036	40	40	41	0.7283	0.8509		
4	4	5	0.0251	0.0294	41	41	42	0.3100	0.3623		
5	5	6	0.3660	0.1864	42	42	43	0.0410	0.0478		
6	6	7	0.3811	0.1941	43	43	44	0.0092	0.0116		
7	7	8	0.0922	0.0470	44	44	45	0.1089	0.1373		
8	8	9	0.0493	0.0251	45	45	46	0.0009	0.0012		
9	9	10	0.8190	0.2707	46	4	47	0.0034	0.0084		
10	10	11	0.1872	0.0619	47	47	48	0.0851	0.2083		
11	11	12	0.7114	0.2351	48	48	49	0.2898	0.7091		
12	12	13	1.0300	0.3400	49	49	50	0.0822	0.2011		
13	13	14	1.0440	0.3450	50	8	51	0.0928	0.0473		
14	14	15	1.0580	0.3496	51	51	52	0.3319	0.1114		
15	15	16	0.1966	0.0650	52	9	53	0.1740	0.0886		
16	16	17	0.3744	0.1238	53	53	54	0.2030	0.1034		
17	17	18	0.0047	0.0016	54	54	55	0.2842	0.1447		
18	18	19	0.3276	0.1083	55	55	56	0.2813	0.1433		
19	19	20	0.2106	0.0690	56	56	57	1.5900	0.5337		
20	20	21	0.3416	0.1129	57	57	58	0.7837	0.2630		
21	21	22	0.0140	0.0046	58	58	59	0.3042	0.1006		
22	22	23	0.1591	0.0526	59	59	60	0.3861	0.1172		
23	23	24	0.3463	0.1145	60	60	61	0.5075	0.2585		
24	24	25	0.7488	0.2475	61	61	62	0.0974	0.0496		
25	25	26	0.3089	0.1021	62	62	63	0.1450	0.0738		
26	26	27	0.1732	0.0572	63	63	64	0.7105	0.3619		
27	3	28	0.0044	0.0108	64	64	65	1.0410	0.5302		
28	28	29	0.0640	0.1565	65	11	66	0.2012	0.0611		
29	29	30	0.3978	0.1315	66	66	67	0.0047	0.0014		
30	30	31	0.0702	0.0232	67	12	68	0.7394	0.2444		
31	31	32	0.3510	0.1160	68	68	69	0.0047	0.0016		
32	32	33	0.8390	0.2816	Líneas de enlace						
33	33	34	1.7080	0.5646	69	11	43	0.5000	0.5000		
34	34	35	1.4740	0.4873	70	13	21	0.5000	0.5000		
35	3	36	0.0044	0.0108	71	15	46	1.0000	0.5000		
36	36	37	0.0640	0.1565	72	50	59	2.0000	1.0000		

37	37	38	0.1053	0.1230	73	27	65	1.0000	0.5000
----	----	----	--------	--------	----	----	----	--------	--------

Tabla 2.11 Cargas en los nodos de la red estándar de 69 nodos. [92]

Nodo	KW	KVAR	Nodo	kW	kVAR	Nodo	kW	kW	Nodo	kW	kW
2	0.00	0.00	19	0.00	0.00	36	26.00	18.55	53	4.35	3.50
3	0.00	0.00	20	1.00	0.60	37	26.00	18.55	54	26.40	19.00
4	0.00	0.00	21	114.00	81.00	38	0.00	0.00	55	24.00	17.20
5	0.00	0.00	22	5.00	3.50	39	24.00	17.00	56	0.00	0.00
6	2.60	2.20	23	0.00	0.00	40	24.00	17.00	57	0.00	0.00
7	40.40	30.00	24	28.00	20.00	41	1.20	1.00	58	0.00	0.00
8	75.00	54.00	25	0.00	0.00	42	0.00	0.00	59	100.00	72.00
9	30.00	22.00	26	14.00	10.00	43	6.00	4.30	60	0.00	0.00
10	28.00	19.00	27	14.00	10.00	44	0.00	0.00	61	1244.00	888.00
11	145.00	104.00	28	26.00	18.60	45	39.22	26.30	62	32.00	23.00
12	145.00	104.00	29	26.00	18.60	46	39.22	26.30	63	0.00	0.00
13	8.00	5.00	30	0.00	0.00	47	0.00	0.00	64	227.00	162.00
14	8.00	5.50	31	0.00	0.00	48	79.00	56.40	65	59.00	42.00
15	0.00	0.00	32	0.00	0.00	49	384.70	274.50	66	18.00	13.00
16	45.50	30.00	33	14.00	10.00	50	384.70	274.50	67	18.00	13.00
17	60.00	35.00	34	19.50	14.00	51	40.50	28.30	68	28.00	20.00
18	60.00	35.00	35	6.00	4.00	52	3.60	2.70	69	28.00	20.00

En la Tabla 2.12 se presenta los lazos utilizados en la reconfiguración de la red estándar de 69 nodos, los cuales son los mismos lazos que se utilizan en varias publicaciones sobre el tema, lo que permite comparar los resultados obtenidos.

Tabla 2.12 Lazos de la red estándar de 69 nodos. [13]

	Líneas por lazo
Lazo 1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 69, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42
Lazo 2	11, 12, 13, 14, 71, 43, 44, 45, 69
Lazo 3	4, 5, 6, 7, 8, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 72, 46, 47, 48, 49
Lazo 4	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 70
Lazo 5	9, 10, 11, 12, 70, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 73, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64

La red estándar de 69 nodos tiene pérdidas de potencia activa en las líneas de 224.52 (kW) antes de la reconfiguración. En la tabla 2.13 se presenta los diez mejores resultados de reducción de pérdidas de potencia en las líneas obtenidos al aplicar el algoritmo de colonia de hormigas sobre la red estándar de 69 nodos. El mejor resultado de la Tabla 2.13 corresponde al óptimo de esta red de distribución.

Tabla 2.13 Mejores resultados de la reconfiguración de la red de 69 nodos

Nro.	Líneas abiertas	Pérdidas en las líneas después de la reconfiguración
1	69, 14, 55, 70, 61	98.4070 (kW)
2	69, 14, 56, 70, 61	98.4115 (kW)
3	69, 14, 56, 70, 63	99.4138 (kW)
4	69, 14, 58, 70, 61	98.4227 (kW)
5	69, 13, 56, 70, 61	98.5061 (kW)
6	69, 13, 58, 70, 61	98.5140 (kW)
7	69, 12, 57, 70, 61	98.6328 (kW)
8	69, 14, 58, 70, 63	99.4269 (kW)
9	69, 14, 57, 70, 62	99.4500 (kW)
10	69, 12, 56, 70, 63	99.5843 (kW)

Los parámetros con los cuales se encuentra el óptimo de la red estándar de 69 nodos se presentan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Parámetros del algoritmo de colonia de hormigas

Parámetro	Letra	Descripción
α	Alfa	1.15
β	Beta	0.005
ρ	Rho	0.005
σ	Sigma	10
iter	Iteraciones	20
ants	Nro. hormigas	33

En la Tabla 2.15 se presenta los dos mejores resultados encontrados con el algoritmo de colonia de hormigas desarrollado en este trabajo y los resultados de cinco publicaciones de artículos científicos, para la reconfiguración óptima de la red estándar de 69 nodos. El resultado que se presenta en la fila uno de la Tabla 2.15 es el óptimo de la reconfiguración de la red encontrado en este trabajo y el resultado de la segunda fila también encontrado en este trabajo, coincide con los resultados de la reconfiguración óptima que se encuentran publicados en varios artículos científicos.

Las pérdidas de potencia activa en las líneas que se encuentran en artículos científicos son diferentes en un pequeño porcentaje, décimas de kW, debido a que cada autor utiliza un

software diferente para ejecutar los flujos de potencia, sin embargo, los dispositivos de maniobra abiertos para el óptimo de la reconfiguración son los mismos.

Tabla 2.15 Resultados de la reconfiguración de la red de 69 nodos por varios autores

Método	Líneas abiertas después de la reconfiguración	Pérdidas en las líneas	Pérdidas en las líneas simulación en OpenDSS
Algoritmo de Colonia de Hormigas	69, 14, 55, 70, 61	98.4070 (kW)	98.4070 (kW)
Algoritmo de Colonia de Hormigas	69, 14, 56, 70, 61	98.4189 (kW)	98.4146 (kW)
Grey Wolf Optimization [53]	69, 14, 56, 70, 61	99.6216 (kW)	98.4146 (kW)
Improved Binary Particle Swarm Optimization [32]	69, 14, 56, 70, 61	98.2800 (kW)	98.4146 (kW)
Cuckoo search algorithm [26]	69, 14, 57, 70, 61	98.5680 (kW)	98.4483 (kW)
Whale Optimization Algorithm [44]	69, 14, 58, 70, 61	98.5952 (kW)	98.4227 (kW)
Adaptive Shuffled Frogs Leaping Algorithm [93]	69, 14, 58, 70, 61	99.5800 (kW)	98.4227 (kW)

Como se indica en la Tabla 2.13 y en la Tabla 2.15 en este trabajo se obtiene los resultados del óptimo encontrados en artículos científicos sobre este tema. Adicionalmente, también se obtiene una reconfiguración que tiene pérdidas de potencia en las líneas ligeramente menor que las encontradas en las publicaciones actuales. Con este resultado se valida por segunda vez la efectividad del algoritmo para encontrar el óptimo de la reconfiguración de una red eléctrica de distribución.

2.3.3 Resumen de las fórmulas del Algoritmo de Colonia de Hormigas

En la tabla 2.16 se presenta las fórmulas que describen el algoritmo de colonia de hormigas que fueron presentadas en las secciones anteriores y sus correspondientes parámetros en el problema de reconfiguración de la red de distribución eléctrica.

Tabla 2.16 Fórmulas del Algoritmo de Colonia de Hormigas

Parámetro del algoritmo de colonia de hormigas	Fórmula	Aplicación en la red de distribución eléctrica
Probabilidad \mathcal{P}_{ij} de selección de la trayectoria	$\mathcal{P}_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum (\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta})}$	$\mathcal{P}_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum (\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta})}$

Valor numérico de la visibilidad entre dos nodos	$\eta_{ij} = \frac{1}{\text{distancia}}$	$\eta_{ij} = \frac{I_i^2 R_i}{\text{Max}\{P_i\}}, \quad \eta_{ij} = \frac{1}{R_i}$
Valor numérico de la feromona inicial entre dos puntos τ_{ij}	$\tau_{ij_inicial} = \tau_0, \quad \tau_0 > 0$	$\tau_{ij_inicial} = \tau_0, \quad \tau_0 > 0$
Incremento de feromona $\Delta\tau_{ij}$ k es un valor constante	$\Delta\tau_{ij} = \frac{k}{C_k}$	$\Delta\tau_{ij} = \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i}$
Evaporación de la feromona	$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$	$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$
Actualización de la feromona local	$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$	$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i}$
Actualización de la feromona global	$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sigma\Delta\tau_{ij}$	$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sigma \frac{k}{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i}$

Las fórmulas de cálculos de flujos de potencia, cálculos de pérdidas de potencia en las líneas, voltajes en los nodos y corriente en las líneas son realizados mediante el software OpenDSS. En caso de implementar los flujos de potencia sin utilizar un software de simulación de redes de distribución, se puede aplicar el método iterativo “*Ladder*”, en [83] presenta una descripción completa de este método. Sin embargo, para este trabajo uno de los objetivos específicos es aplicar OpenDSS.

2.4 Aplicación de la reconfiguración sobre la red IEEE de 34 nodos

La red de distribución IEEE de 34 nodos está localizada en Arizona, Estados Unidos, tiene un voltaje nominal de 24.9 kV que proviene de una subestación de transformación de 69 kV a 24.9 kV. Esta red contiene líneas monofásicas, trifásicas, bifásicas, cargas concentradas y distribuidas, tres capacitores, dos reguladores y un transformador de 24.9 kV a 4.16 kV. La red IEEE de 34 nodos es una red desbalanceada que tiene 32 líneas, de las cuales 24 son trifásicas y 8 monofásicas. La red contiene 6 cargas trifásicas concentradas en los nodos cuyos valores, tipo de modelo de carga y conexión se presentan en la Tabla 2.17. En el capítulo III se presenta la curva de demanda utilizada para las simulaciones de reconfiguración de la red.

Tabla 2.17 Cargas concentradas de la red IEEE de 34 nodos. [94]

Nodo	Modelo de carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105

848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Los modelos de carga son: PQ potencia activa y reactiva constantes, corriente constante, impedancia constante. Los tipos de conexión de las cargas son estrella y delta. Para modelar las cargas trifásicas en OpenDSS, se utiliza el modelo de tres cargas monofásicas, debido a que las cargas son desbalanceadas.

La Tabla 2.18 presenta las 19 cargas distribuidas y su modelo de carga de la red IEEE de 34 nodos. Para modelar en OpenDSS las cargas distribuidas se divide cada carga distribuida en las líneas en dos partes y se colocan en los extremos de las líneas.

Tabla 2.18 Cargas distribuidas de la red IEEE de 34 nodos. [94]

Nodo de Origen	Nodo de destino	Carga Modelo	Fase A		Fase B		Fase C	
			kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

Entre las 19 cargas distribuidas existen cargas trifásicas, bifásicas y monofásicas, con modelo de carga PQ, corriente constante e impedancia constante. Dispone de cargas con los dos tipos de conexión estrella y delta. La Figura 2.9 presenta el diagrama de la red IEEE de 34 nodos.

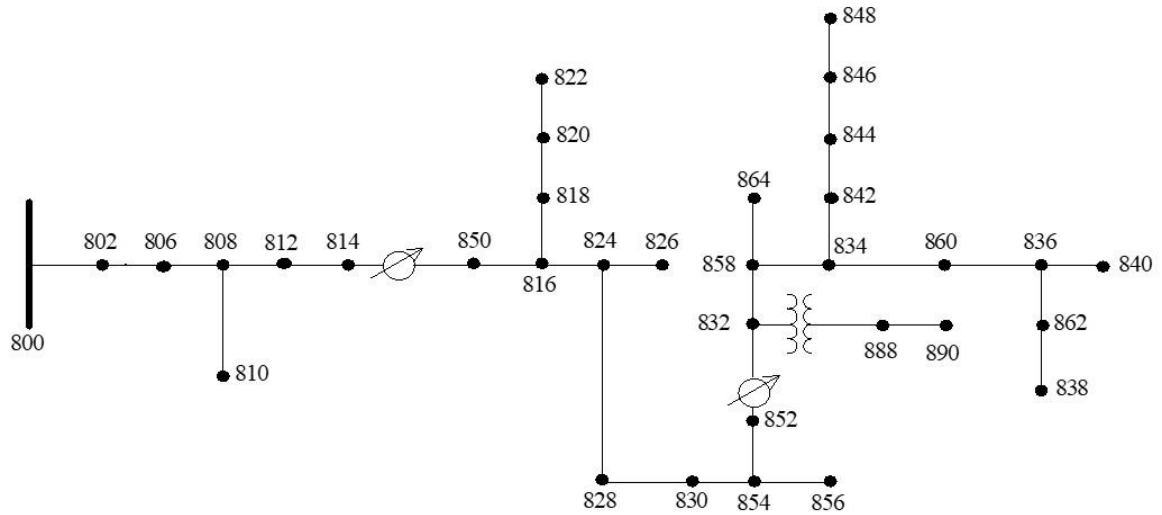


Fig. 2.9 Red IEEE de 34 nodos. [94]

2.4.1 Conformación de lazos para la red IEEE de 34 nodos

Para formar los lazos en la red se asigna una nueva numeración a los nodos y a los ramales de la red. La numeración de los ramales permite identificar las líneas de la red y por lo tanto a los dispositivos de maniobra que abren las líneas. Las líneas de enlace añadidas a la red IEEE de 34 nodos y la numeración utilizada para los ramales se indica en la Figura 2.10.

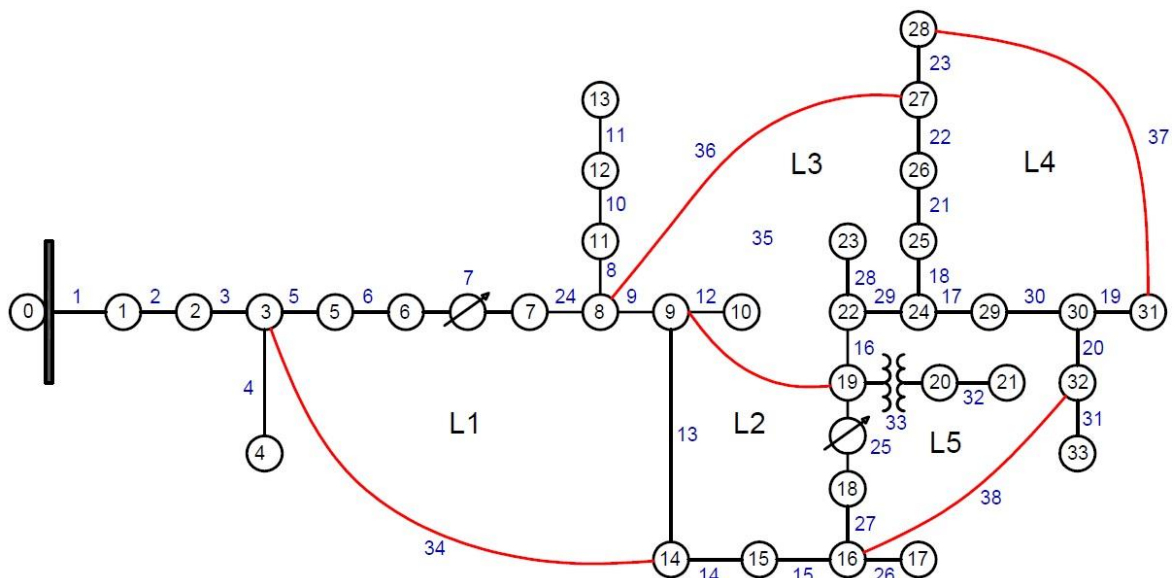


Fig. 2.10 Líneas de enlace para la red IEEE de 34 nodos.

Se han añadido cinco líneas de enlace, por lo que se forman cinco lazos. Todas las líneas de enlace son trifásicas y están conectadas a nodos que alimentan cargas trifásicas. Como se observa en la Figura 2.10, los lazos adyacentes comparten líneas. Las líneas de enlace

son: 34, 35, 36, 37 y 38. Todas las líneas que forman parte de los lazos pueden habilitarse y deshabilitarse mediante dispositivos de maniobra.

La Tabla 2.19 presenta los lazos de la red IEEE de 34 nodos con los elementos que representan los dispositivos de maniobra. No existen dispositivos de maniobra entre los nodos que se encuentran los reguladores y la estación de transformación, por lo tanto, estos tramos siempre están habilitados. Los elementos que no están dentro de los lazos no son tomados en cuenta en la reconfiguración de la red. Para la configuración de la red de la Figura 2.10, las líneas que no pertenecen a ningún lazo son: las líneas 1, 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12, 26, 31, los reguladores ubicados en los tramos 7, 25, y la estación de transformación ubicada en el tramo 33. Estos elementos forman parte de la red, pero al no pertenecer a los lazos, se consideran siempre habilitados.

Tabla 2.19. Dispositivos de maniobra en los lazos de la red IEEE34 nodos

Nro.	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5
1	5	13	35	19	27
2	6	14	16	30	16
3	24	15	29	17	29
4	13	27	18	18	17
5	34	35	21	21	30
6			22	22	20
7			36	23	38

La Figura 2.11, presenta el recorrido de la hormiga a través de los lazos de la red IEEE de 34 nodos. En esta figura se encuentran solo los ramales que se pueden abrir mediante un dispositivo de maniobra. Al iniciar la excursión las hormigas se sitúan en un punto de partida imaginario fuera de los lazos, y de este punto avanzan hacia el lazo L1, luego al segundo lazo L2 y así sucesivamente hasta llegar al último lazo L5.

En la Figura 2.11 se presenta un ejemplo del recorrido de la hormiga. La solución de la topología radial es el vector que contiene los dispositivos de maniobra que se deben abrir en cada lazo, el cual se presenta en la Tabla 2.20. Las pérdidas de potencia totales en las líneas para esta topología son 153.95 kW.

Tabla 2.20. Dispositivos de maniobra en los lazos de la red

Lazo	L1	L2	L3	L4	L5
Dispositivo de maniobra	9	27	29	19	20

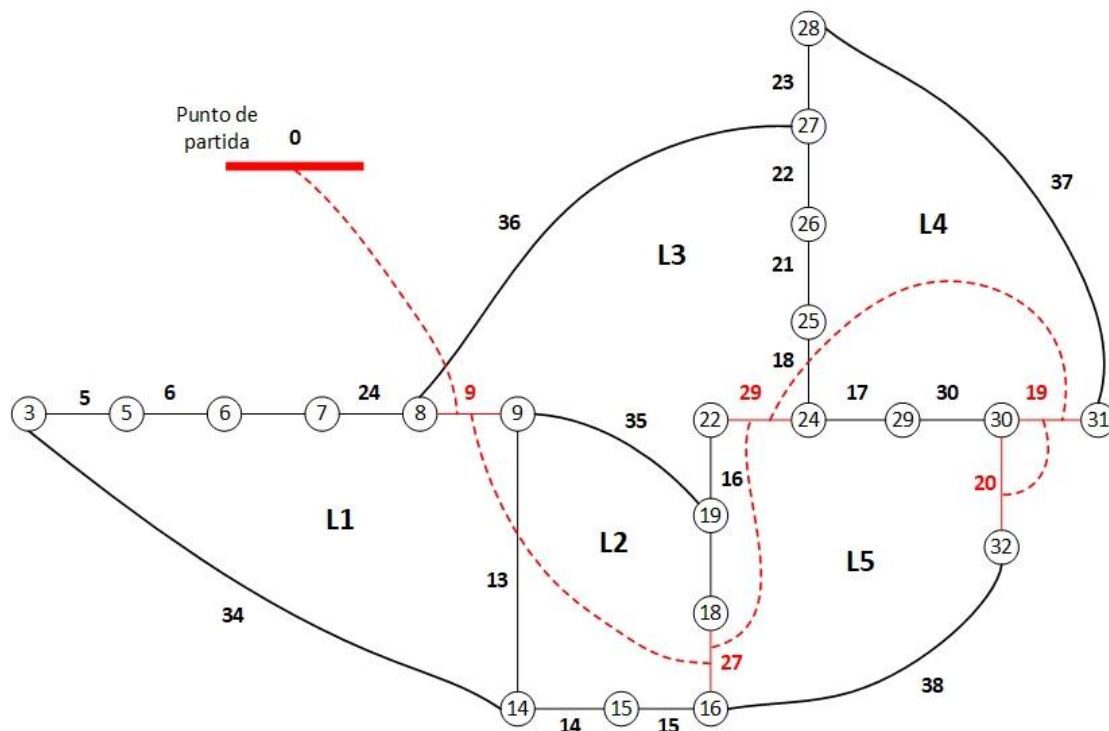


Fig. 2.11 Recorrido de la hormiga a través de los lazos.

2.4.2 Matrices de feromona y visibilidad para la red local

Se han definido cinco lazos para la red IEEE de 34 nodos, por lo tanto, se deben formar cinco matrices de transición de feromona y cinco matrices de visibilidad. En la Tabla 2.21 se presenta las dimensiones de las matrices.

La matriz de feromona 1 y la matriz de visibilidad 1 tienen dimensión 1×6 , estas dos matrices tienen información para la primera transición desde un punto imaginario hacia un elemento del lazo 1, las matrices de feromona y visibilidad contienen valores numéricos que se emplean en la ecuación de probabilidad (1.5), la cual determina el camino que la hormiga toma en cada transición entre lazos, por ejemplo, la hormiga elegirá el dispositivo de maniobra 24 del lazo 1, si este tiene la mayor probabilidad acumulada. Las matrices de feromona iniciales tienen un valor de 1 en todos sus elementos. Estos valores se actualizan en cada recorrido de la hormiga como se describe en la sección de actualización de feromona. Las dimensiones de las matrices de feromona y visibilidad se determinan según el tamaño de los dos lazos consecutivos entre los cuales transita la hormiga, por ejemplo, para la transición entre los lazos 3 y 4 la dimensión de las matrices es 7×8 , debido a que el lazo de origen tiene 7 elementos y el de destino tiene 8 elementos.

Tabla 2.21 Matrices de Feromona y visibilidad

Nro.	Transición	Matriz de feromona	Matriz de visibilidad	Dimensión Fila x columna
1	Inicio a lazo 1	τ_1	H_1	1x5
2	Lazo 1 a lazo 2	τ_2	H_2	5x5
3	Lazo 2 a lazo 3	τ_3	H_3	5x7
4	Lazo 3 a lazo 4	τ_4	H_4	7x8
5	Lazo 4 a lazo 5	τ_5	H_5	8x7

Para el cálculo de las matrices de visibilidad se utiliza las pérdidas de potencia activa en las líneas de la red que forman parte de los lazos. En el caso de la red IEEE de 34 nodos, todas las líneas contenidas en un lazo cerrado tienen asociado un dispositivo de maniobra que permite su activación. Se realiza un flujo de potencia en la red con el objetivo de encontrar las pérdidas de potencia activa en todas las líneas de la red que son parte de los lazos, se agrupa en un vector y se encuentra el valor máximo de pérdidas de potencia, este vector se normaliza de modo que el valor máximo sea uno y el resto una fracción proporcional al valor máximo, según se presentó en la ecuación (2.6). Con el vector normalizado de pérdidas de potencia se crea las cinco matrices de visibilidad colocando en sus columnas el valor correspondiente a la línea del lazo de llegada. Por ejemplo, la matriz uno de visibilidad tiene 5 elementos, cada posición de la matriz es llenada con el valor de pérdidas normalizado de potencia activa correspondiente a la línea que representa, así, el elemento uno de la matriz corresponde al dispositivo de maniobra 5, por lo tanto, se asigna a la posición uno de la matriz el factor normalizado de pérdidas de la línea 5, el elemento 2 de la matriz tiene el dispositivo de maniobra 6, por consiguiente allí ocupará el factor normalizado de pérdidas de la línea 6 y del mismo modo para el resto de elementos.

Para el caso de las matrices de visibilidad 2 a 5 que contienen varias filas, estas se llenan por columnas con el mismo valor del factor normalizado de pérdidas de potencia del elemento del lazo de llegada, por ejemplo, la matriz 3 de dimensión 5x7 tendrá en sus 7 columnas los valores de pérdidas de potencia correspondientes a las 7 líneas del lazo de llegada, en este caso el lazo número 3.

Las matrices de feromona y visibilidad son creadas automáticamente mediante programación en MATLAB, no se requiere crear las cinco matrices de feromona y visibilidad individualmente, para el caso de redes con un gran número de lazos facilita el tiempo de desarrollo del programa e implementación de la metodología.

2.4.3 Probabilidades de transición entre lazos para la red IEEE de 34 nodos

Las probabilidades de recorrido de la hormiga entre los elementos de dos lazos consecutivos se calculan mediante la ecuación (1.5) que se reescribe a continuación

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum (\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta})}$$

Para esta red se requiere cinco vectores de probabilidades, un vector para cada transición entre lazos. El primer vector de probabilidades es el de transición entre el punto de partida y el lazo uno, este vector es tiene un número de elementos fijo de 6, lo cual indica que la hormiga puede seleccionar cualquiera de los 6 dispositivos de maniobra del lazo 1, sin afectar la topología radial de la red. Por otra parte, los vectores de probabilidad del 2 al 5, tienen dimensión variable para cada excursión de una hormiga. A partir de la transición del lazo 1 al lazo 2, el camino de la hormiga depende del elemento seleccionado en el lazo 1, esto se debe a que se tiene que considerar la restricción de topología radial de la red. El número de elementos de los vectores de probabilidad dependen de los elementos de los lazos que previamente haya visitado la hormiga, por ejemplo, el número de elementos del vector de probabilidad 5, contiene las probabilidades de la hormiga de visitar los elementos factibles del lazo 5; los elementos factibles son los que conservan la topología radial de la red. En la Tabla 2.22 se indica los vectores de probabilidad para la transición entre lazos. Para cada excursión de una hormiga se calcula los vectores de probabilidad y los vectores de probabilidad acumulada, estos últimos también son de dimensión variable con excepción del vector de probabilidad acumulada 1 que tiene 5 elementos fijos.

Tabla 2.22 Probabilidad de transición entre lazos de la red IEEE de 34 nodos

Nro.	Transición	Vector de Probabilidad	Probabilidad Acumulada	Dimensión del vector	Dependencia de los lazos
1	Inicio a lazo 1	P_1	P_{acc1}	5	Independiente
2	Lazo 1 a lazo 2	P_2	P_{acc2}	Variable	L1
3	Lazo 2 a lazo 3	P_3	P_{acc3}	Variable	L1, L2
4	Lazo 3 a lazo 4	P_4	P_{acc4}	Variable	L1, L2, L3
5	Lazo 4 a lazo 5	P_5	P_{acc5}	Variable	L1, L2, L3, L4

El proceso para determinar los elementos de los lazos que cumplen la topología radial y que forma parte del vector de probabilidad se describe en la sección anterior.

2.4.4 Vector de dispositivos de maniobra de la red IEEE de 34 nodos

El vector de dispositivos de maniobra de la red IEEE de 34 nodos tiene 5 elementos, uno por cada lazo, estos elementos son encontrados basados en las probabilidades acumuladas de transición entre los elementos de los lazos.

El vector de dispositivos de maniobra indica las líneas que se deben deshabilitar para formar la topología radial, con lo cual se ejecuta el flujo de potencia y se actualiza las matrices de feromona local según la trayectoria de la hormiga, se incrementa la feromona en la columna de la matriz de transición que tiene la ubicación del elemento del lazo visitado, y se disminuye la feromona debido al factor de evaporización. Cuando toda la colonia ha terminado su recorrido se determina la trayectoria que produce la menor pérdida de potencia activa en la red y se actualiza la feromona global de la mejor trayectoria.

Los parámetros de ponderación de la fórmula de probabilidad (1.5) se pueden modificar mediante experimentación por prueba y error, no existe un valor general para estos parámetros pues el algoritmo de colonia de hormigas es heurístico y considerando que todas las redes son diferentes en sus características eléctricas, los parámetros de ponderación también son diferentes.

2.5 Aplicación de la reconfiguración sobre la red local de 2894 nodos

La red de distribución real local proporcionada por la Empresa Eléctrica Quito es la red conectada a la subestación de generación hidroeléctrica Los Chillos, la cual se clasifica como una central hidroeléctrica pequeña de acuerdo a su potencia. Según [95], las centrales hidroeléctricas pequeñas están en el rango de 10 kW a 30 MW, también suelen subclasificarse según la potencia en: micro hidroeléctricas de 10 kW a 100 kW, mini hidroeléctricas de 100 kW a 500 kW y pequeñas hidroeléctricas de 500 kW a 30 MW. En el capítulo III se presenta la curva de demanda utilizada para las simulaciones de reconfiguración de la red.

Los elementos componentes de la red se presentan en las Tablas 2.23 y 2.24 En la Tabla 2.23 se describe la cantidad de transformadores y líneas de la red. La cantidad total de líneas es de 2146, sin embargo, a esto se debe aumentar las líneas de enlace necesarias para formar los lazos en la red que permiten implementar el algoritmo de reconfiguración. Debido a los miles de elementos de la red no se presenta una lista detallada, sino solo las características principales de cada tipo de elemento.

Tabla 2.23 Subestación, transformadores y líneas de la red

Elemento	Cantidad	Descripción	Valor nominal
Subestación	1	Subestación SE26A	22.86 kV
Transformadores	479	Trifásicos: 99 Monofásicos fase A: 115 Monofásicos fase B: 111 Monofásicos fase C: 154	Trifásicos: 22.86/0.210 kV Monofásicos: 22.86/0.24/0.12 kV
Líneas monofásicas	1468	Fase A: 379 Fase B: 473 Fase C: 616	Trifásicos: 22.86/0.210 kV Monofásicos: 22.86/0.24/0.12 kV
Líneas bifásicas	153	Fases AB: 23 Fases AC: 21 Fases BC: 109	
Líneas trifásicas	794	Trifásicas ABC	
Total líneas	2416	Monofásicas, bifásicas y trifásicas	22.86 kV

Las líneas primarias se encuentran a 22.86 kV y los secundarios se encuentran a 0.21 kV para las líneas trifásicas y 0.24 kV para las líneas monofásicas. Los transformadores monofásicos son de fase partida, tienen dos tomas de 120 V. La subestación 26A es la barra slack de la red de distribución.

Tabla 2.24 Nodos, generadores y cargas totales por fase de la red

Elemento	Cantidad	Descripción	Voltaje nominal
Nodos	2894	Nodos fase A: 1432 Nodos fase B: 1610 Nodos fase C: 1794	22.86 kV, 13.2 kV, 0.127 kV, 0.12 kV
Generadores sincrónicos	2	Potencia activa: 890 kW Potencia reactiva: 750 kVAR	2.3 kV
Cargas fase A	214	Potencia activa: 1120.94 kW Potencia reactiva: 78.87 kVAR	13.2 kV, 0.127 kV, 0.12 kV
Cargas fase B	210	Potencia activa: 862.24 kW Potencia reactiva: 60.67 kVAR	13.2 kV, 0.127 kV, 0.12 kV
Cargas fase C	252	Potencia activa: 965.52 kW Potencia reactiva: 67.94 kVAR	13.2 kV, 0.127 kV, 0.12 kV

La carga total de la red es de 2948.7 kW, y se calcula sumando las potencias entregadas por la subestación, los dos generadores y restando las pérdidas en las líneas y en los transformadores. En la Tabla 2.25 se presenta las cargas totales por fase A, B y C, las

cuales comprenden cargas monofásicas y trifásicas. En la Tabla 2.25 se presenta las cargas agrupadas solo monofásicas y solo trifásicas.

Tabla 2.25 Cargas monofásicas y trifásicas de la red local

Carga	Cantidad	Potencia activa	Potencia reactiva	Voltaje nominal
Monofásicas A	116	535.69 kW	37.69 kVAR	0.24 kV, 0.12 kV.
Monofásicas B	112	445.05 kW	31.32 kVAR	0.24 kV, 0.12 kV.
Monofásicas C	154	604.06 kW	42.50 kVAR	0.24 kV, 0.12 kV.
Trifásicas	98	1363.90 kW	95.97 kVAR	22.86, 0.21/0.121 kV
Total	480	2948.7 kW	207.48 kVAR	22.86/13.2 kV, 0.24 kV, 0.21 kV

Los dos generadores sincrónicos de la central hidroeléctrica están conectados a las líneas por medio de un transformador trifásico conexión delta-delta de 22 kV/2.3 kV. La suma total de potencia activa de los generadores es de 1780 kW.

La cantidad de nodos de la red es 2894, sin embargo, solo 480 nodos tienen carga conectada en la red. Entre dos nodos de red siempre existe un componente de red, el cual para esta red puede ser una línea o un transformador. De las 480 cargas de la red, 478 cargas están a bajo voltaje, es decir en los secundarios de los transformadores y sólo dos cargas monofásicas se encuentran directamente en los primarios. La Figura 2.12 presenta el diagrama unifilar de la red local de 2894 nodos, se ha encerrados en círculos la ubicación de la subestación de transformación de la red 26A y la ubicación de los generadores de la central hidroeléctrica Los Chillos.

La red contiene 479 transformadores en total, 98 para las cargas trifásicas, 1 para los dos generadores sincrónicos y 380 para las cargas monofásicas.

La red real contiene varios miles de elementos, lo cual hace que sea imposible crear el código para cada uno de ellos individualmente, por lo tanto, para este trabajo se ha creado un programa en MATLAB que genere código en OpenDSS, lo cual permite modelar cualquier cantidad de elementos. Para realizar esto se ha construido bases de datos en Excel de las líneas, transformadores y cargas con las características eléctricas de los elementos. Estas bases de datos son leídas desde MATLAB y en base a éstas se crea los comandos de generación de código para OpenDSS mediante estructuras de programación.

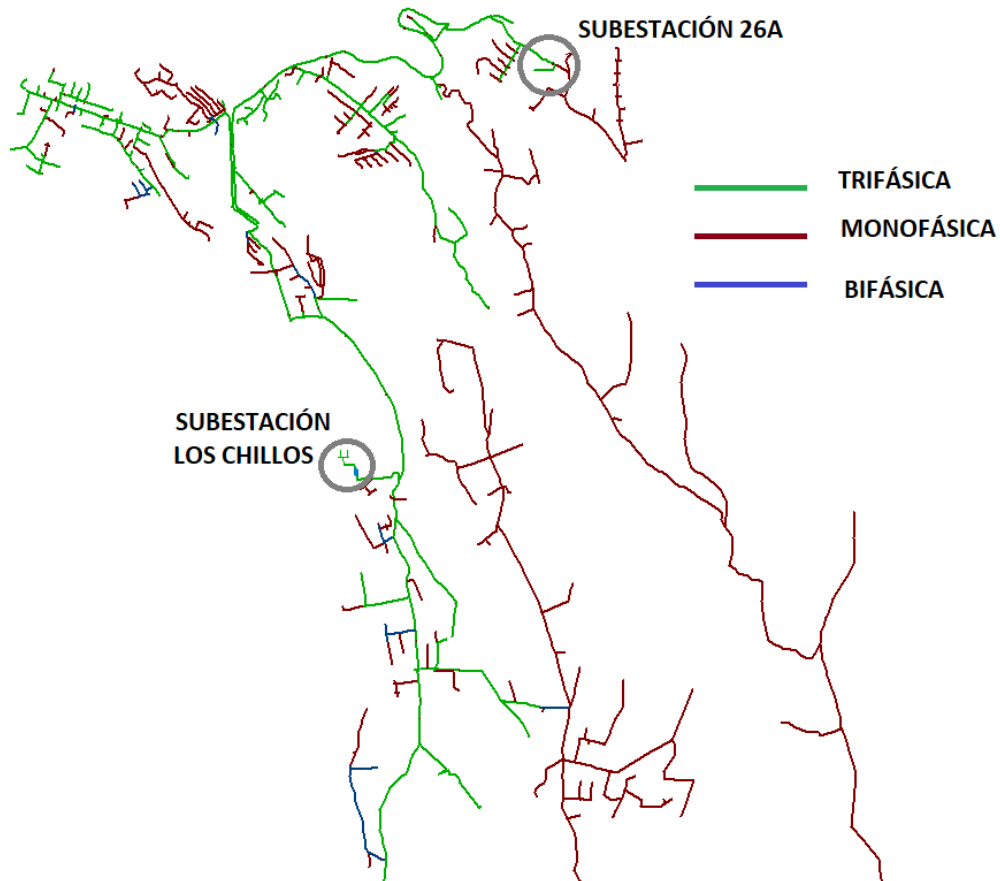


Fig. 2.12 Red real local de 2894 nodos.

Para generar el código de cada elemento se debe especificar varios parámetros, que diferencian la construcción de un elemento dentro de un mismo tipo lo cual aumenta la complejidad de la construcción de la red mediante programación. Por ejemplo, para construir una línea bifásica se debe especificar las fases de conexión, longitud, voltaje, nodos en sus terminales y características eléctricas de resistencias y reactancias.

2.5.1 Conformación de lazos para la red local de 2894 nodos

Para formar los lazos en la red local se asigna una nueva numeración a los ramales de la red. La red contiene 2416 líneas incluyendo líneas monofásicas, bifásicas y trifásicas, sin embargo, las líneas que se utilizan para formar los lazos deben ser trifásicas, con lo cual se dispone de 795 líneas que podrían ser parte de los lazos. Considerando esta gran cantidad de líneas se establece solo un grupo de líneas que puedan habilitarse y deshabilitarse mediante dispositivos de maniobra.

Las líneas de enlace se las crea en base al diagrama unifilar y la ubicación georreferenciada de la red. Para establecer las longitudes de las líneas de enlace se utiliza

las coordenadas de los nodos entre los cuales se encuentra las líneas. En la Tabla 2.26 se presenta los resultados de los cálculos de las longitudes de las líneas de enlace.

Tabla 2.26 Coordenadas y longitud de las líneas de enlace

Línea	Nro. de línea	X origen [Ω]	Y origen [Ω]	X destino [Ω]	Y destino [Ω]	Longitud [m]
Enlace 1	2417	784089	9962732	784947	9962506	887.2
Enlace 2	2418	784947	9962506	785598	9962378	663.8
Enlace 3	2419	785902	9962000	787186	9962803	1513.9
Enlace 4	2420	787186	9962803	787398	9963316	555.2
Enlace 5	2421	787398	9963316	787907	9963495	539.5
Enlace 6	2423	787812	9961510	786776	9961018	1147.1
Enlace 7	2424	784947	9962506	786644	9960152	2901.8
Enlace 8	2425	787491	9958663	787812	9961510	2865.6

Para las líneas de enlace se utiliza el conductor ACSR. 4/0, al igual que en las líneas primarias de mayor calibre. Las capacidades de corriente de los conductores de la red se detallan en el capítulo de resultados para verificar que no existe sobrecarga.

La numeración de los ramales permite identificar las líneas de la red y facilitan la programación del algoritmo de reconfiguración. Las líneas de enlace añadidas a la red local con su numeración se indica en la Figura 2.13. Se han añadido ocho líneas de enlace, por lo que se forman ocho lazos. Todas las líneas de enlace son trifásicas, su numeración es: 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423 y 2424. Todas las líneas que forman parte de los lazos pueden habilitarse y deshabilitarse mediante dispositivos de maniobra. Para esta red no se ha modificado el nombre de los nodos de la red, ni asignado una nueva numeración para los nodos.

La Tabla 2.27 presenta los ocho lazos que contiene la numeración de los dispositivos de maniobra. La ruta que encierra cada lazo tiene mayor cantidad de líneas que las que aparecen en los lazos, por lo tanto, sólo las líneas cuyos dispositivos de maniobra se encuentran en los lazos se pueden habilitar y deshabilitar en el algoritmo de reconfiguración, las líneas que no están dentro de los lazos están siempre habilitadas.

Para el proceso de asignar la numeración a los elementos de los lazos, se los almacena en columnas en un archivo de Excel con sus nombres originales y utilizando una rutina de programación se exporta a MATLAB estos elementos y se les asigna la misma numeración que se utilizó para las líneas. La cantidad de dispositivos de maniobra por lazo puede ser diferente en cada uno, según el tamaño de la sección de red.

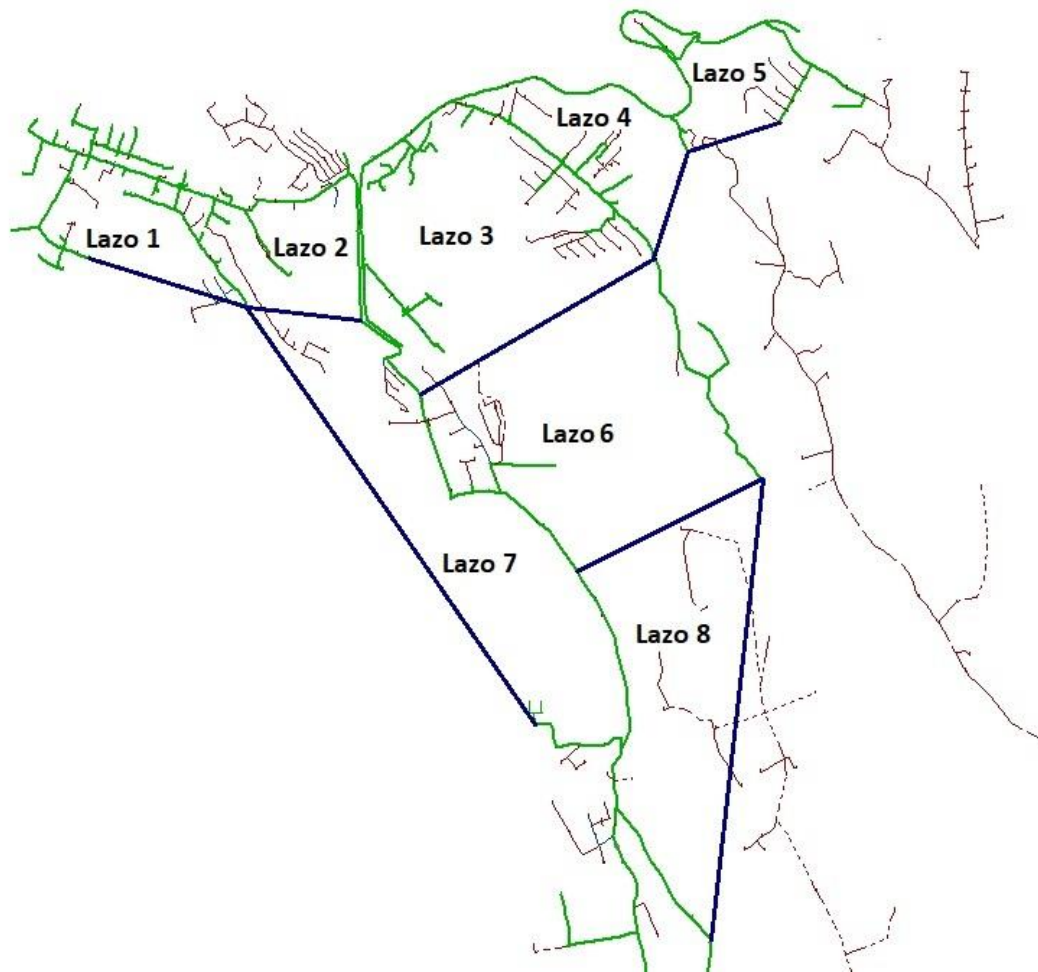


Fig. 2.13 Líneas de enlace de la red local.

Tabla 2.27 Dispositivos de maniobra en los lazos de la red local de 2894 nodos

Nro.	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5	Lazo 6	Lazo 7	Lazo 8
1	407	622	750	1980	2286	856	2418	2423
2	404	619	748	1975	2129	855	748	862
3	395	614	713	1921	47	848	750	867
4	392	603	709	1916	45	847	753	870
5	386	592	702	1914	44	761	754	900
6	381	568	107	56	16	754	761	906
7	371	335	102	51	13	753	847	909
8	361	273	63	49	2293	2419	848	913
9	344	239	1914	48	2298	1981	855	916
10	568	231	1916	2129	2302	1983	856	919
11	592	111	1921	2286	2421	1986	862	2424
12	603	702	1975	2420		1988	867	
13	614	709	1980			2422	870	
14	619	713	2419				874	

15	622	2418					881	
16	2417						2423	

2.5.2 Matrices de feromona y visibilidad para la red local

Las matrices de feromona y visibilidad son utilizadas para determinar la probabilidad de que una hormiga realice la transición entre elementos específicos de los lazos, para el caso de la red local de 2894 nodos, se ha construido ocho lazos, por lo tanto, se deben formar ocho matrices de transición de feromona y ocho matrices de visibilidad. En la Tabla 2.28 se presenta las dimensiones de las matrices.

Como se indica en la Tabla 2.28 la matriz de feromona 1 y la matriz de visibilidad 1 tienen dimensión 1x16, estas dos matrices son especiales, tienen información del inicio del recorrido de la hormiga. Inicialmente la hormiga se sitúa en un punto de partida y debe trasladarse hacia un elemento del lazo 1, las matrices de feromona y visibilidad contienen un valor numérico que es un factor para la probabilidad de la hormiga de tomar un determinado camino, por ejemplo, la hormiga elegirá el dispositivo de maniobra 371 del lazo 1, si este tiene la mayor probabilidad acumulada. Las matrices de feromona iniciales tienen un valor de 1 en todos sus elementos, luego estos valores cambian en cada recorrido de la hormiga como se ha explicado en las secciones anteriores. Las dimensiones de las matrices de feromona y visibilidad se determinan según el tamaño de los dos lazos consecutivos entre los cuales transita la hormiga, por ejemplo, para la transición entre los lazos 2 y 3 la dimensión de las matrices es 15x14, pues el lazo de origen tiene 15 elementos y el de destino tiene 14 elementos.

Tabla 2.28 Matrices de Feromona y visibilidad

Nro.	Transición	Matriz de feromona	Matriz de visibilidad	Dimensión Fila x columna
1	Inicio a lazo 1	τ_1	H_1	1x16
2	Lazo 1 a lazo 2	τ_2	H_2	16x15
3	Lazo 2 a lazo 3	τ_3	H_3	15x14
4	Lazo 3 a lazo 4	τ_4	H_4	14x12
5	Lazo 4 a lazo 5	τ_5	H_5	12x11
6	Lazo 5 a lazo 6	τ_6	H_6	11x13
7	Lazo 6 a lazo 7	τ_7	H_7	13x16
8	Lazo 7 a lazo 8	τ_8	H_8	16x11

Para el cálculo de las matrices de visibilidad se utiliza las pérdidas de potencia activa en las líneas de la red que forman parte de los lazos, lo cual se determina realizando los flujos de potencia. Una vez obtenido un vector con las pérdidas de potencia se encuentra el valor máximo de pérdidas de potencia y se normaliza el vector de pérdidas de potencia de modo que el valor máximo sea uno y el resto una fracción proporcional al valor máximo. Con este vector normalizado de pérdidas de potencia se llena las ocho matrices de visibilidad colocando en sus columnas el valor correspondiente a la línea representada en el lazo de llegada. Por ejemplo, la matriz uno de visibilidad tiene 16 elementos en una sola fila, cada elemento de la matriz es llenada con el valor de pérdidas normalizado de potencia activa correspondiente a la línea que representa, así, el elemento uno tiene el dispositivo de maniobra 407, por lo tanto, allí ocupará el factor normalizado de pérdidas de la línea 407, el elemento 2 tiene el dispositivo de maniobra 404, entonces allí ocupará el factor normalizado de pérdidas de la línea 404 y del mismo modo para el resto de elementos.

Para el caso de las matrices de visibilidad 2 a 8, las cuales contienen varias filas, estas se llenan por columnas con el mismo valor del factor normalizado de pérdidas de potencia del elemento del lazo de llegada, por ejemplo, la matriz 3 de dimensión 15x14 tendrá en sus 14 columnas los valores de pérdidas de potencia correspondientes a las 14 líneas del lazo de llegada, en este caso el lazo número 3.

Las matrices de feromona y visibilidad son creadas mediante programación, la rutina programada construye la cantidad de matrices necesarias automáticamente, es decir no se requiere crear ocho matrices de una en una. Esto facilita en gran medida la aplicación del algoritmo para redes de gran tamaño o redes que estén divididas en un número alto de lazos. Los lazos son ingresados en una hoja de Excel y con una rutina programada en MATLAB se construye el número de matrices de feromona y visibilidad que se necesita.

2.5.3 Probabilidades de transición entre lazos para la red local

Las probabilidades de recorrido de la hormiga entre los elementos de dos lazos consecutivos se calculan mediante la ecuación (1.5). Para esta red se requiere ocho vectores de probabilidades, un vector para cada transición entre lazos. En la Tabla 2.29 se indica los vectores de probabilidad para la transición entre lazos. El primer vector de probabilidades es el de transición entre el punto de partida y el lazo uno, este vector es el único que tiene un número de elementos fijo de 16, pues cuando la hormiga inicia su recorrido puede seleccionar cualquiera de los 16 dispositivos de maniobra del lazo 1, sin afectar la topología radial de la red. Sin embargo, los vectores de probabilidad del 2 al 8,

no son de dimensión fija, su número de elementos varía según el recorrido de la hormiga. A partir de la transición al lazo 2, la hormiga ya no puede seleccionar cualquier elemento de este lazo, sino que depende del elemento seleccionado en el lazo 1, esto se debe a la restricción de topología radial de la red.

Tabla 2.29 Probabilidad de transición entre lazos de la red local

Nro.	Transición	Vector de Probabilidad	Probabilidad Acumulada	Dimensión del vector	Dependencia de los lazos
1	Inicio a lazo 1	P_1	P_{acc1}	16	Independiente
2	Lazo 1 a lazo 2	P_2	P_{acc2}	Variable	L1
3	Lazo 2 a lazo 3	P_3	P_{acc3}	Variable	L1, L2
4	Lazo 3 a lazo 4	P_4	P_{acc4}	Variable	L1, L2, L3
5	Lazo 4 a lazo 5	P_5	P_{acc5}	Variable	L1, L2, L3, L4
6	Lazo 5 a lazo 6	P_6	P_{acc6}	Variable	L1, L2, L3, L4, L5
7	Lazo 6 a lazo 7	P_7	P_{acc7}	Variable	L1, L2, L3, L4, L5, L6
8	Lazo 7 a lazo 8	P_8	P_{acc8}	Variable	L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7

En las siguientes transiciones el número de elementos de los vectores de probabilidad depende de los dispositivos de maniobra que previamente haya seleccionado la hormiga, por ejemplo, el número de elementos del vector de probabilidad 8, indica las probabilidades que tiene la hormiga de visitar los elementos factibles del lazo 8; los elementos factibles son aquellos que no alteran la topología radial de la red y dependen de los elementos visitados en los 7 lazos anteriores. La dependencia del vector de probabilidad de los lazos anteriores se debe a los dispositivos de maniobra compartidos entre lazos adyacentes.

2.5.4 Vector de dispositivos de maniobra de la red local

Los elementos de cada lazo que tienen la mayor probabilidad acumulada forman el vector de los dispositivos de maniobra que se deben abrir, para esta red son 8, uno por cada lazo. En la Tabla 2.30 se presenta el vector de dispositivos de maniobra inicial, que indica las líneas de enlace abiertas antes de reconfigurar la red.

Tabla 2.30. Dispositivos de maniobra en los lazos de la red

Lazo	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Línea	2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424

Una vez encontrado el vector de dispositivos de maniobra, se deshabilita las líneas indicadas en el vector y se ejecuta el flujo de potencia para la topología encontrada. A continuación, se actualiza las matrices de feromona local según la trayectoria de la hormiga, únicamente 8 elementos de las matrices de feromona incrementan su valor de feromona, los otros elementos disminuyen su valor debido al factor de evaporización. Esto se repite para toda la colonia de hormigas, si por ejemplo se tiene 20 hormigas, se ejecutará 20 flujos de potencia uno por cada hormiga. Cuando toda la colonia ha terminado su recorrido se determina la trayectoria que produjo la menor pérdida de potencia en la red y se actualiza la feromona global, incrementando los elementos de las matrices de feromona que corresponden a la mejor trayectoria. Esto se repite el número de iteraciones definido al inicio del programa. Al final se selecciona la topología que produce las menores pérdidas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología de reconfiguración óptima de redes de distribución mediante el algoritmo de colonia de hormigas se ha aplicado sobre dos redes de distribución eléctrica, la red IEEE de 34 nodos y una red local real de 2894 nodos. Se ha realizado las simulaciones para 24 niveles de demanda correspondientes a las 24 horas del día. En este capítulo se presenta los resultados para cinco casos representativos de nivel de demanda 50%, 75%, 100%, 125% y 150% y en el Anexo VI se presenta los resultados de las simulaciones de las 24 horas del día. Para todos los niveles de demanda se incluye tablas de resultados e histogramas con los datos de potencia, voltajes y corrientes antes y después de la reconfiguración de las redes. Este capítulo se divide en dos partes: presentación de resultados de las dos redes utilizadas y discusión de los resultados.

3.1 Resultados

Los resultados de las simulaciones de las redes se presentan en cuatro secciones que comprenden: la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida, la red IEEE de 34 nodos con generación distribuida, la red local de 2894 nodos sin generación distribuida y la red local de 2894 nodos con generación distribuida. Los resultados en cada sección se agrupan en tablas de potencias, corrientes en las líneas y voltajes en los nodos para las redes con y sin generación distribuida. Las tablas de potencias de este capítulo contienen los resultados para los cinco niveles de demanda, sin embargo, en el Anexo VI se presenta los resultados completos para las 24 horas del día. Para el caso de las corrientes y voltajes se utiliza distribuciones de frecuencia por intervalos para facilitar el análisis debido a la gran cantidad de datos.

La cargabilidad de las líneas de potencia se basa en tres límites de carga: límite térmico, límite de caída de voltaje y límite de estabilidad. Para líneas de longitudes menores a 80 km, la cargabilidad es determinada por el límite térmico, el cual depende de la magnitud de corriente y del tiempo de duración [86]. Para líneas cortas, la cargabilidad está limitada por la capacidad máxima de conducción de corriente del conductor y no por la caída de voltaje o condiciones de estabilidad [87]. La línea de mayor longitud de la red IEEE de 34 nodos es de 14.68 km y de la red local de 2894 nodos es de 962 metros. Por lo tanto, se utiliza como límite de cargabilidad de las líneas la capacidad de corriente máxima de los conductores. En las tablas de resultados de las corrientes en las líneas que se presentan en las siguientes secciones, se ha calculado la carga de corriente de las líneas como los porcentajes de las corrientes en las líneas respecto a la capacidad de los conductores

utilizando la ecuación (3.1). Este porcentaje indica si existe o no sobrecarga de corriente en algunas líneas de la red.

$$\%I = \frac{\text{Corriente que circula por el conductor}}{\text{Capacidad máxima del conductor}} \times 100\% \quad (3.1)$$

En las tablas de corrientes se indican los límites superiores e inferiores de los intervalos de distribución de frecuencias para los porcentajes de las corrientes en las líneas. Las marcas de clase corresponden al valor medio de los intervalos.

En los histogramas de corrientes se presenta la cantidad de veces que se repite los porcentajes de corriente agrupados en intervalos, calculados con la ecuación 3.1

Las tablas de voltajes contienen las distribuciones de frecuencia para los niveles de voltaje en por unidad para todos los nodos de la red. En las tablas de voltaje los límites superior e inferior del intervalo de frecuencias son los valores en por unidad de los voltajes, y las marcas de clase son los valores medios de los intervalos. En los histogramas de voltaje se presenta la cantidad de veces que se repite un intervalo de voltajes.

No existen datos reales sobre las curvas de demanda diaria de las redes de distribución presentadas en este trabajo, por lo que se presenta niveles de demanda ficticios. El nivel de demanda de la red original se considera como la demanda promedio y en la curva de demanda corresponde al 100%.

Los niveles de demanda en todos los nodos de la red son multiplicados por un factor para disminuir o incrementar la demanda y simular los niveles correspondientes a un día laborable para el sector residencial.

Se define una demanda mínima del 50% y una demanda máxima del 150% respecto a la demanda promedio de la red original. Los datos de demanda propuestos para 24 horas se presentan en la Tabla 3.1 y la curva de demanda en la Figura 3.1

Tabla 3.1 Niveles de demanda para un periodo de 24 horas

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda %	65	52	50	55	60	75	80	90	100	102	104	106
Hora	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Demanda %	108	110	112	114	120	125	130	150	142	135	111	99

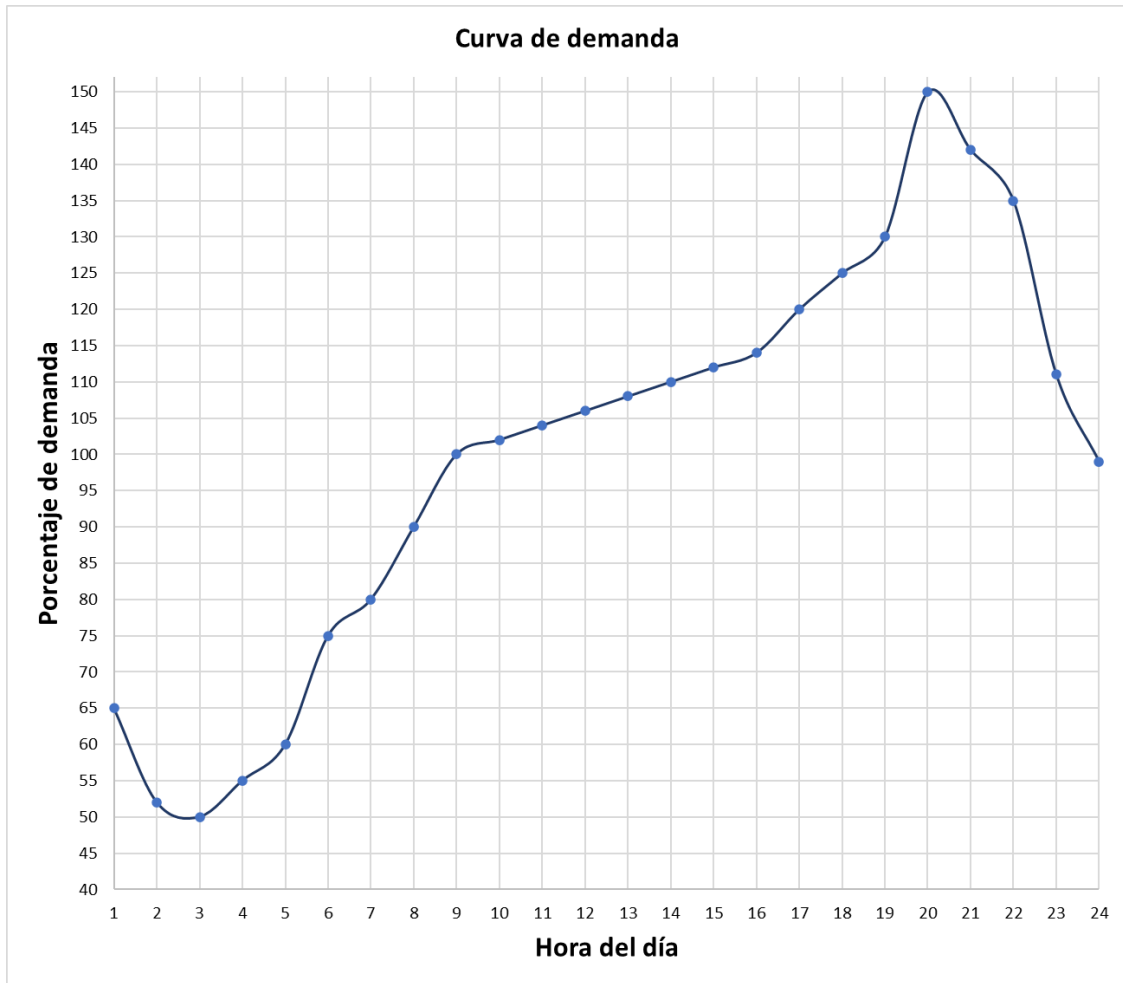


Fig. 3.1 Curva de demanda para 24 horas de un día laborable.

Para ambas redes de distribución se ha construido una interfaz gráfica que permite seleccionar varias opciones de simulación como se indica en la Figura 3.2. En los componentes menú lista de la interfaz gráfica se puede seleccionar el nivel de demanda y la hora a la que corresponde. Existen 24 opciones de nivel de demanda correspondientes a las 24 horas del día que se presentan en la tabla 3.1.

En la interfaz gráfica se puede seleccionar la hora del día, lo cual solo indica el número de la hoja de Excel en la cual se almacena los resultados. En el Anexo I se presenta el procedimiento para ejecutar los programas de reconfiguración de las redes de distribución eléctrica. En los Anexo IV se presenta el programa de la interfaz gráfica de la red IEEE de 34 nodos y en el Anexo V de la red real local de 2894 nodos.

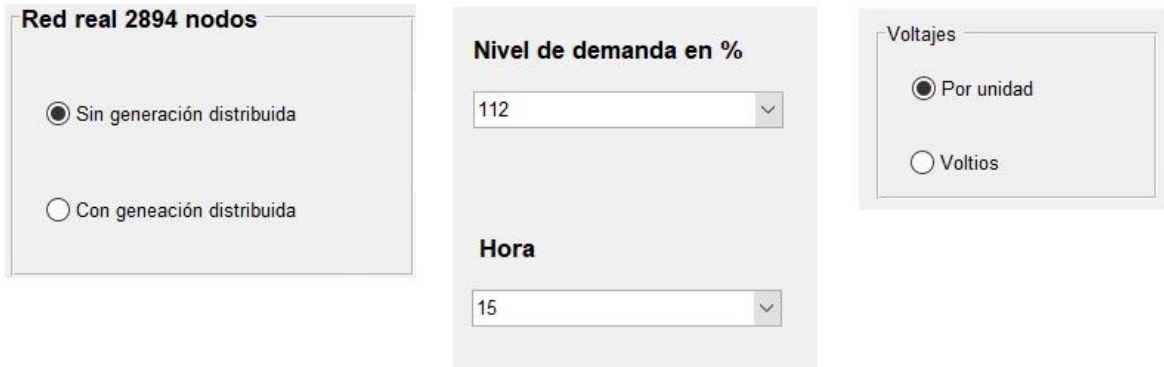


Fig. 3.2 Opciones de simulación

En la interfaz gráfica se puede elegir la simulación con y sin generación distribuida, seleccionar el nivel de demanda de la red y elegir si los resultados de voltaje en los nodos se presentan en valores por unidad o en voltios.

En la Figura 3.3 se presenta las líneas que se deshabilitan, en la primera fila se presenta las líneas deshabilitadas antes de la reconfiguración y la segunda fila después de la reconfiguración.

Inicial		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
1		2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424
Reconfigurada		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
1		2417	702	107	2286	47	753	870	2424

Fig. 3.3 Dispositivos de maniobra de las líneas que deben abrirse en la red.

En la Figura 3.4 se presenta los resultados de potencia activa entregada por la subestación de la red y por los dos generadores sincrónicos, las pérdidas de potencia activa en las líneas y en los transformadores, y la carga total de la red. En la primera fila de la Figura se encuentran los datos de potencia de la red sin reconfigurar y en la segunda fila los datos de la red reconfigurada. La carga total de la red se encuentra sumando la potencia de la subestación, de los generadores y restando las pérdidas en las líneas y transformadores; en el cuadro de resultados las pérdidas aparecen con signo negativo. En la tercera fila de la Figura 3.4 se presenta el porcentaje de ahorro de pérdidas en las líneas y en los transformadores respecto a la configuración inicial. En este caso se ha seleccionado la simulación con generación distribuida. Los resultados son entregados por OpenDSS a través de la comunicación con MATLAB.

		Pérdidas en [KW]			
Subestación	Generadores	Líneas	Transformadores	Carga total	
1298.68	1780	-14.7	-115.32	2948.68	
1294.32	1780	-10.66	-114.98	2948.68	
Porcentaje de reducción % después de reconfiguración		27.48	0.29	0	

Fig. 3.4 Resultados de potencia antes y después de la reconfiguración.

En la interfaz gráfica existe la opción de sólo simular la red y la opción de simular y reconfigurar la red. La opción de reconfiguración de la red toma más tiempo de ejecución del programa que la opción de simulación de la red sin reconfiguración.

En la Figura 3.5 se presentan los resultados de las corrientes en las tres fases de las líneas de la red antes y después de la reconfiguración, y la capacidad máxima de corriente en amperios que tienen los conductores.

Corrientes en las líneas en [A] al 100 % de demanda								
	Línea	I inicial A	I inicial B	I inicial C	Capacidad	I reconfig A	I reconfig B	I reconfig C
1	L1	58.3659	57.5633	70.6971	100.00	58.3409	57.3428	70.5841
2	L2	58.3389	55.1216	70.6694	357.00	51.6963	44.4524	49.3758
3	L3	58.2429	55.1056	70.6555	357.00	51.6110	44.4355	49.3594
4	L4	58.2295	55.0897	70.6417	357.00	51.5964	44.4186	49.3430
5	L5	58.2160	55.0738	70.6278	357.00	51.5818	44.4016	49.3267
6	L6	0.4744	0	0	183.28	0.4744	0	0
7	L7	57.9317	55.0578	70.6139	357.00	51.3441	44.3847	49.3103
8	L8	0.4216	0.4216	0.4216	170.00	0.4216	0.4216	0.4216
9	L9	57.6781	54.9150	70.3709	357.00	51.1322	44.3723	49.2043
10	L10	56.9443	54.2458	69.2148	357.00	1.1418	0.6839	1.3709
11	L11	0	0.3160	0	170.00	0	0.3160	0
12	L12	56.9306	54.1386	69.2007	357.00	1.1385	0.4845	1.3639
13	L13	56.9169	54.1224	69.1867	357.00	1.1356	0.4691	1.3571
14	L14	56.9032	54.1063	69.1726	357.00	1.1328	0.4537	1.3504

Fig. 3.5 Resultados de corriente y voltaje en los nodos.

En la Figura 3.6 se presenta los resultados de los voltajes en los nodos de la red en por unidad antes y después de la reconfiguración. La tabla desplegable de la Figura 3.6 permite revisar el voltaje de los 2894 nodos de la red local.

Voltajes en los nodos al 100 % de demanda							
	Nodo	V inicial A	V inicial B	V inicial C	V reconfig A	V reconfig B	V reconfig C
1	sourcebus	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	270732ms	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1065311ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1065310ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1295391ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	428821ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1067538ma	1.00			1.00		
8	20978ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	126421ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	20979ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	22932ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
12	140334ma		1.00			1.00	
13	16276ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14	145996ma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fig. 3.6 Resultados de corriente y voltaje en los nodos.

En la Figura 3.7 se presenta los mismos resultados de la Figura 3.6, con la diferencia de que los voltajes en los nodos están en voltios.

La interfaz gráfica tiene la finalidad de mejorar la visualización de los resultados presentándolos en una sola pantalla, sin embargo, para el análisis de resultados se exporta a Excel las Tablas de voltajes en los nodos y las corrientes en las líneas.

Voltajes en los nodos al 100 % de demanda							
	Nodo	V inicial A	V inicial B	V inicial C	V reconfig A	V reconfig B	V reconfig C
1	sourcebus	13199.94	13197.99	13197.09	13199.98	13197.93	13197.11
2	270732ms	13203.26	13202.22	13201.31	13203.30	13202.13	13201.32
3	1065311ma	13203.56	13202.55	13201.60	13203.58	13202.51	13201.58
4	1065310ma	13204.15	13203.22	13202.21	13204.14	13203.28	13202.11
5	1295391ma	13204.16	13203.24	13202.23	13204.16	13203.31	13202.13
6	428821ma	13205.63	13204.91	13203.72	13205.55	13205.23	13203.45
7	1067538ma	13205.63			13205.55		
8	20978ma	13207.66	13207.20	13205.79	13207.48	13207.86	13205.28
9	126421ma	13207.66	13207.20	13205.79	13207.48	13207.86	13205.28
10	20979ma	13209.59	13209.37	13207.76	13209.31	13210.35	13207.02
11	22932ma	13210.93	13210.91	13209.14	13209.31	13210.36	13207.02
12	140334ma		13210.91			13210.36	
13	16276ma	13211.69	13211.78	13209.91	13209.31	13210.37	13207.01
14	145996ma	13216.49	13217.30	13214.83	13209.31	13210.42	13206.98

Fig. 3.7 Resultados de corriente y voltaje en los nodos.

Para realizar la reconfiguración de las redes de distribución se debe ajustar los parámetros del algoritmo de colonia de hormigas: número de hormigas, número de iteraciones, parámetros de ponderación alfa y beta, porcentaje de evaporación y porcentaje de actualización de la feromona global. El ajuste de estos parámetros se realiza mediante prueba y error ejecutando el programa para varios valores. En la Tabla 3.2 se presenta los

valores de los parámetros utilizados para la reconfiguración de la red IEEE de 34 nodos y para la red local de 2894 nodos.

Tabla 3.2 Ajuste de parámetros del algoritmo de colonia de hormigas

Parámetro	Símbolo	Red IEEE de 34 nodos	Red local de 2894 nodos
Número de iteraciones	N/A	10	10
Número de hormigas	N/A	30	30
Factor de ponderación de la feromona local	α	1	1
Factor de ponderación de la visibilidad	β	0.1	0.1
Porcentaje de evaporación	ρ	5%	5%
Porcentaje de incremento de la feromona global	σ	10%	10%

Los resultados de reconfiguración de la red se dividen en dos partes, con y sin generación distribuida. En algunas de las siguientes figuras se utiliza la abreviación GD para indicar generación distribuida. Las redes son modeladas con generadores sincrónicos que representan la generación distribuida, y para las simulaciones de la red sin generación distribuida se deshabilitan los generadores mediante comandos de OpenDSS.

3.1.1 Resultados de la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida

En la Tabla 3.3 se presenta las líneas que se abren para las reconfiguraciones de la red para cinco niveles de demanda.

Tabla 3.3 Líneas abiertas en los lazos de la red.

Nivel de Demanda	Líneas abiertas de la red reconfigurada				
	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5
50%	13	35	22	17	20
75%	13	15	16	30	38
100%	13	35	16	30	20
125%	13	35	16	19	38
150%	13	35	16	17	38

3.1.1.1 Resultados de potencia activa para la red IEEE de 34 nodos

En la Tabla 3.4 se presenta los resultados de potencia entregada por la subestación, generadores, pérdidas en las líneas y en los transformadores y carga total antes de la reconfiguración de la red.

Tabla 3.4 Resultados de potencia activa antes de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	980.6	0	-74.01	-2.41	904.19
75%	1503.96	0	-144.55	-5.41	1354
100%	2046.39	0	-261.31	-9.19	1775.9
125%	2670.04	0	-451.35	-16.07	2202.62
150%	3211.71	0	-663.61	-22.85	2525.25

En la Tabla 3.5 se presenta los resultados de potencia después de la reconfiguración.

Tabla 3.5 Resultados de potencia activa después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	960.13	0	-53.13	-2.4	904.59
75%	1423.63	0	-108.48	-5.17	1309.97
100%	1904.21	0	-165.3	-9.21	1729.7
125%	2457.48	0	-278.22	-16.45	2162.81
150%	2984.4	0	-422.16	-24.44	2537.8

En la Tabla 3.6 se presenta la disminución porcentual en las potencias suministradas y de pérdidas respecto a los valores de la topología inicial de la red.

Tabla 3.6 Cambios porcentuales de potencia después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación [%]	Generadores Salida [%]	Pérdidas Líneas [%]	Pérdidas transformadores [%]	Carga total [%]
50%	2.09	0.00	28.21	0.41	-0.04
75%	5.34	0.00	24.95	4.44	3.25
100%	6.95	0.00	36.74	-0.22	2.60
125%	7.96	0.00	38.36	-2.36	1.81
150%	7.08	0.00	36.38	-6.96	-0.50

En la Figura 3.8 se presenta un histograma de las pérdidas de potencia en las líneas en [kW] para los cinco niveles de demanda, antes y después de la reconfiguración.

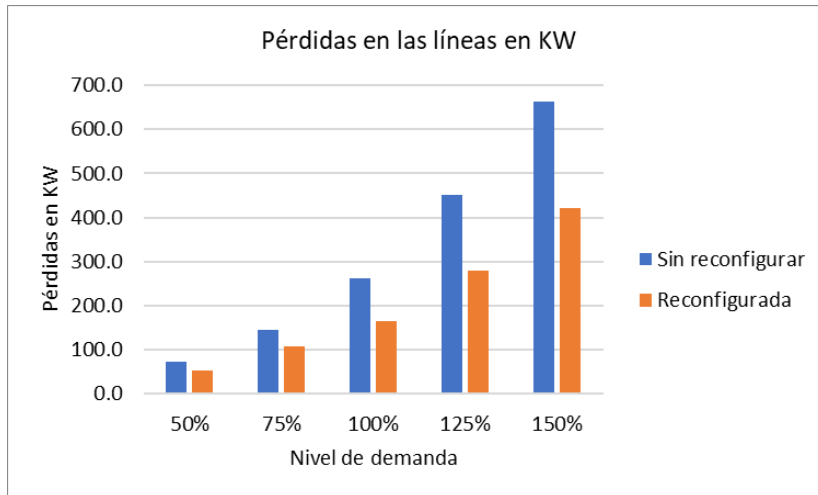


Fig. 3.8 Pérdidas en las líneas de la red IEEE de 34 nodos sin GD.

3.1.1.2 Resultados de corriente en las líneas de la red IEEE de 34 nodos

En todas las Tablas y figuras de esta sección se presenta los resultados para la red de distribución IEEE de 34 nodos sin generación distribuida con los datos antes y después de la reconfiguración de la red. Se presenta los resultados de porcentaje de corriente en las líneas para cinco niveles de demanda por separado.

En la Tabla 3.7 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 50% y en la Figura 3.9 el histograma.

Tabla 3.7 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	2.2	1.1	20	0.0	2.2	1.1	23
2	2.2	4.3	3.3	0	2.2	4.3	3.3	17
3	4.3	6.5	5.4	6	4.3	6.5	5.4	18
4	6.5	8.7	7.6	8	6.5	8.7	7.6	10
5	8.7	10.9	9.8	24	8.7	10.9	9.8	9
6	10.9	13.0	11.9	17	10.9	13.0	11.9	0
7	13.0	15.2	14.1	5	13.0	15.2	14.1	3
Total				80				80

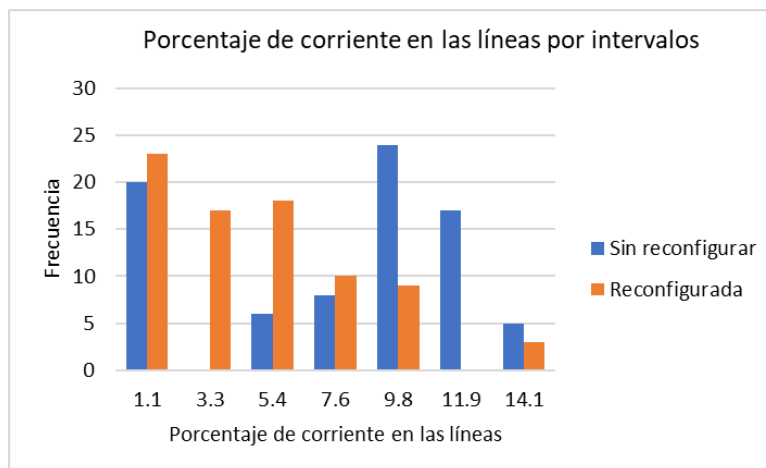


Fig. 3.9 Distribución de frecuencias al 50% de demanda para % de corriente

En la Tabla 3.8 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 75% y en la Figura 3.10 el histograma.

Tabla 3.8 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	3.3	1.6	18	0.0	3.3	1.6	40
2	3.3	6.5	4.9	8	3.3	6.5	4.9	13
3	6.5	9.8	8.1	8	6.5	9.8	8.1	3
4	9.8	13.0	11.4	7	9.8	13.0	11.4	8
5	13.0	16.3	14.7	31	13.0	16.3	14.7	11
6	16.3	19.5	17.9	3	16.3	19.5	17.9	2
7	19.5	22.8	21.2	5	19.5	22.8	21.2	3
Total				80				80

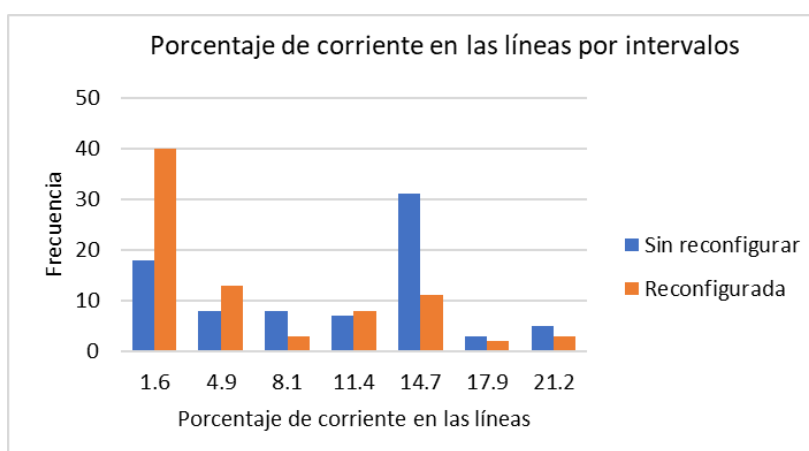


Fig. 3.10 Distribución de frecuencias al 75% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.9 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 100% y en la Figura 3.11 el histograma.

Tabla 3.9 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	4.3	2.1	17	0.0	4.3	2.1	27
2	4.3	8.5	6.4	11	4.3	8.5	6.4	27
3	8.5	12.8	10.6	7	8.5	12.8	10.6	6
4	12.8	17.0	14.9	3	12.8	17.0	14.9	9
5	17.0	21.3	19.1	29	17.0	21.3	19.1	8
6	21.3	25.5	23.4	8	21.3	25.5	23.4	0
7	25.5	29.8	27.6	5	25.5	29.8	27.6	3
				80				80

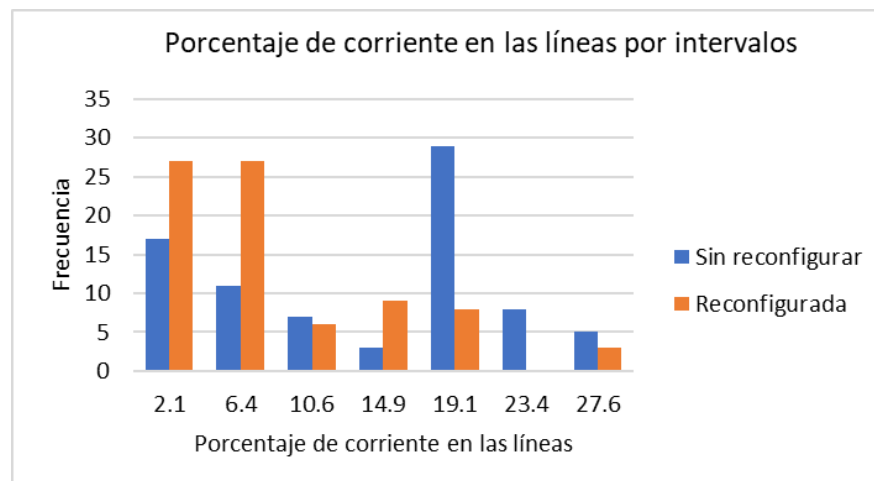


Fig. 3.11 Distribución de frecuencias al 100% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.10 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 125% y en la Figura 3.12 el histograma.

Tabla 3.10 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	5.4	2.7	23	0.0	5.4	2.7	28
2	5.4	10.8	8.1	9	5.4	10.8	8.1	25
3	10.8	16.2	13.5	5	10.8	16.2	13.5	7
4	16.2	21.6	18.9	1	16.2	21.6	18.9	9
5	21.6	27.0	24.3	24	21.6	27.0	24.3	5

6	27.0	32.4	29.7	13	27.0	32.4	29.7	3
7	32.4	37.8	35.1	5	32.4	37.8	35.1	3
Total				80				80

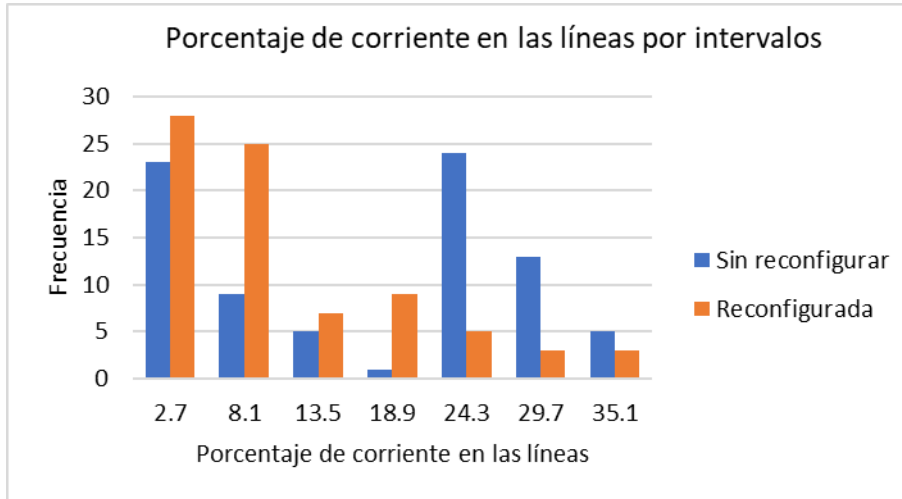


Fig. 3.12 Distribución de frecuencias al 125% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.11 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 150% y en la Figura 3.13 el histograma.

Tabla 3.11 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	6.4	3.2	22	0.0	6.4	3.2	31
2	6.4	12.9	9.7	10	6.4	12.9	9.7	25
3	12.9	19.3	16.1	4	12.9	19.3	16.1	4
4	19.3	25.7	22.5	2	19.3	25.7	22.5	7
5	25.7	32.1	28.9	20	25.7	32.1	28.9	7
6	32.1	38.5	35.3	17	32.1	38.5	35.3	3
7	38.5	45.0	41.7	5	38.5	45.0	41.7	3
Total				80				80

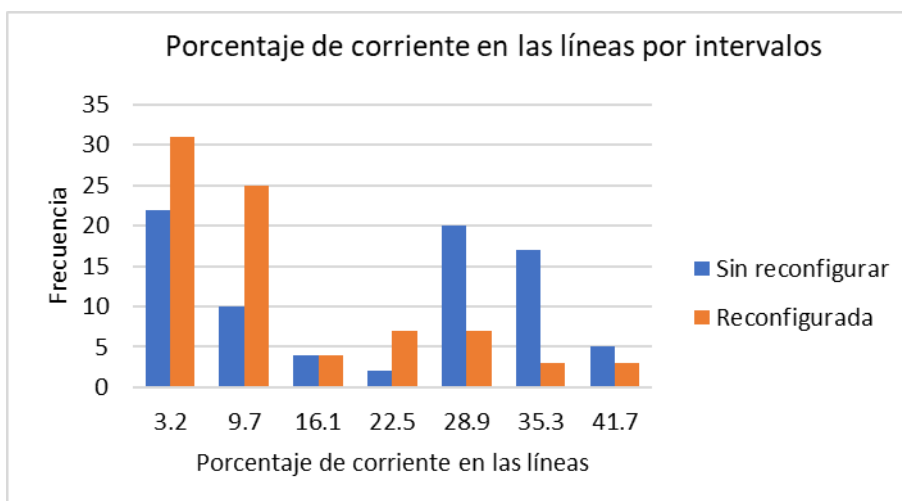


Fig. 3.13 Distribución de frecuencias al 150% de demanda para % de corriente.

3.1.1.3 Resultados de voltaje en los nodos para la red IEEE de 34 nodos

En las Tablas y figuras de esta sección se presentan los resultados de voltaje en los nodos para la red de distribución IEEE de 34 nodos sin generación distribuida. Se presentan los resultados para cinco niveles de demanda por separado, antes y después de la reconfiguración de la red. En las figuras las marcas de clase son los puntos medios de los intervalos de voltaje en por unidad. En la Tabla 3.12 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos para los voltajes en los nodos para una demanda del 50% y en la Figura 3.14 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.12 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.977	0.987	0.982	3	0.977	0.987	0.982	3
2	0.987	0.998	0.993	3	0.987	0.998	0.993	0
3	0.998	1.008	1.003	6	0.998	1.008	1.003	1
4	1.008	1.019	1.014	19	1.008	1.019	1.014	18
5	1.019	1.029	1.024	6	1.019	1.029	1.024	32
6	1.029	1.040	1.034	35	1.029	1.040	1.034	6
7	1.040	1.050	1.045	23	1.040	1.050	1.045	35
Total				95				95

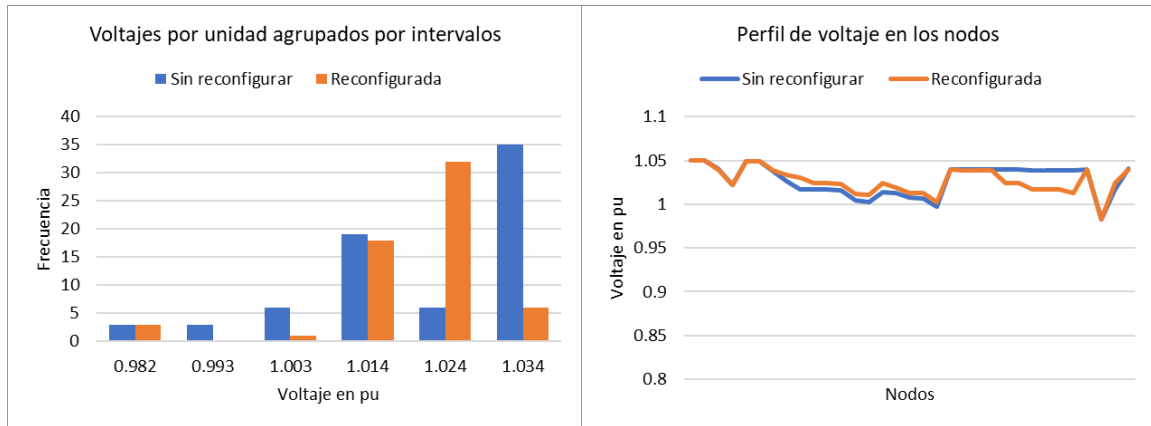


Fig. 3.14 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

En la Tabla 3.13 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 75% y en la Figura 3.15 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.13 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.922	0.940	0.931	0	0.922	0.940	0.931	10
2	0.940	0.959	0.949	2	0.940	0.959	0.949	0
3	0.959	0.977	0.968	1	0.959	0.977	0.968	0
4	0.977	0.995	0.986	4	0.977	0.995	0.986	4
5	0.995	1.013	1.004	11	0.995	1.013	1.004	35
6	1.013	1.032	1.023	24	1.013	1.032	1.023	22
7	1.032	1.050	1.041	53	1.032	1.050	1.041	24
Total				95				95

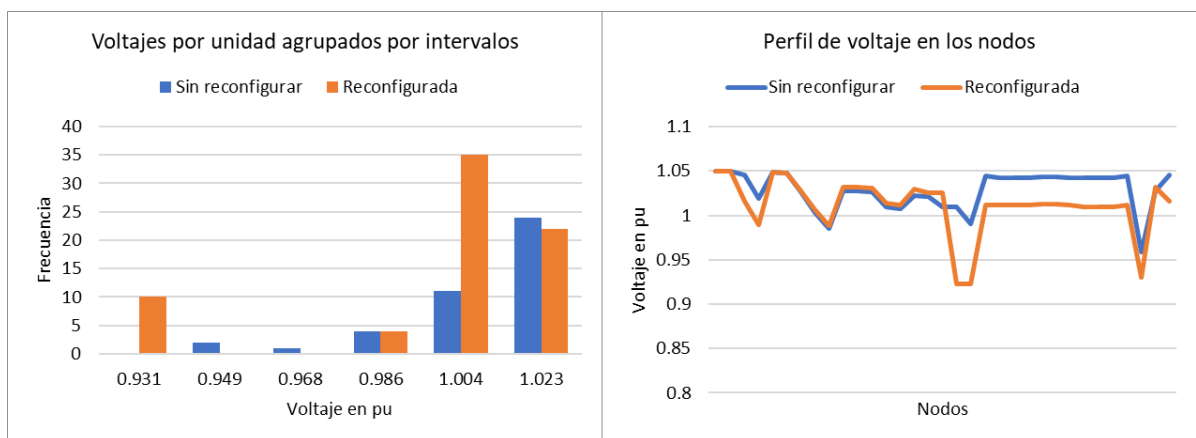


Fig. 3.15 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

En la Tabla 3.14 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 100% y en la Figura 3.16 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.14 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.929	0.946	0.937	3	0.929	0.946	0.937	3
2	0.946	0.963	0.955	1	0.946	0.963	0.955	0
3	0.963	0.981	0.972	4	0.963	0.981	0.972	2
4	0.981	0.998	0.989	5	0.981	0.998	0.989	24
5	0.998	1.015	1.007	16	0.998	1.015	1.007	28
6	1.015	1.033	1.024	16	1.015	1.033	1.024	20
7	1.033	1.050	1.041	50	1.033	1.050	1.041	18
Total				95				95

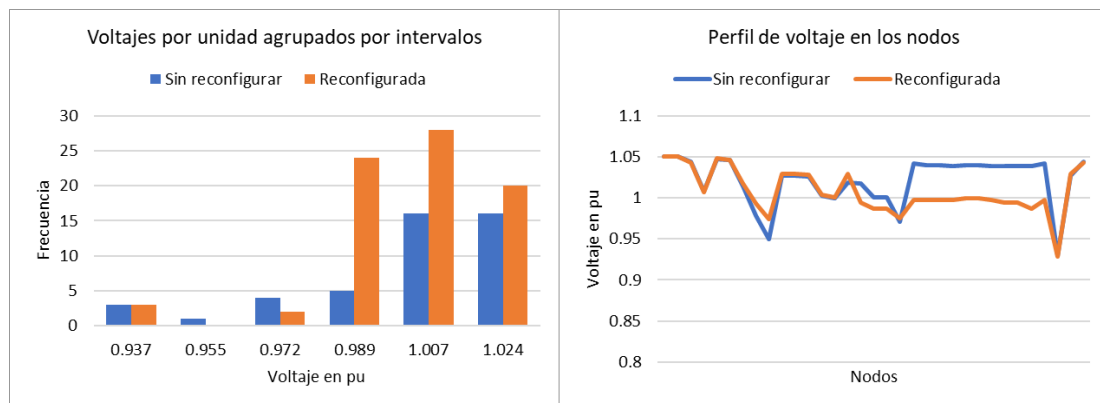


Fig. 3.16 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

En la Tabla 3.15 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 125% y en la Figura 3.17 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.15 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.912	0.932	0.922	3	0.912	0.932	0.922	0
2	0.932	0.951	0.941	5	0.932	0.951	0.941	5
3	0.951	0.971	0.961	6	0.951	0.971	0.961	4
4	0.971	0.991	0.981	7	0.971	0.991	0.981	36
5	0.991	1.011	1.001	9	0.991	1.011	1.001	12
6	1.011	1.030	1.020	36	1.011	1.030	1.020	7
7	1.030	1.050	1.040	29	1.030	1.050	1.040	31
Total				95				95

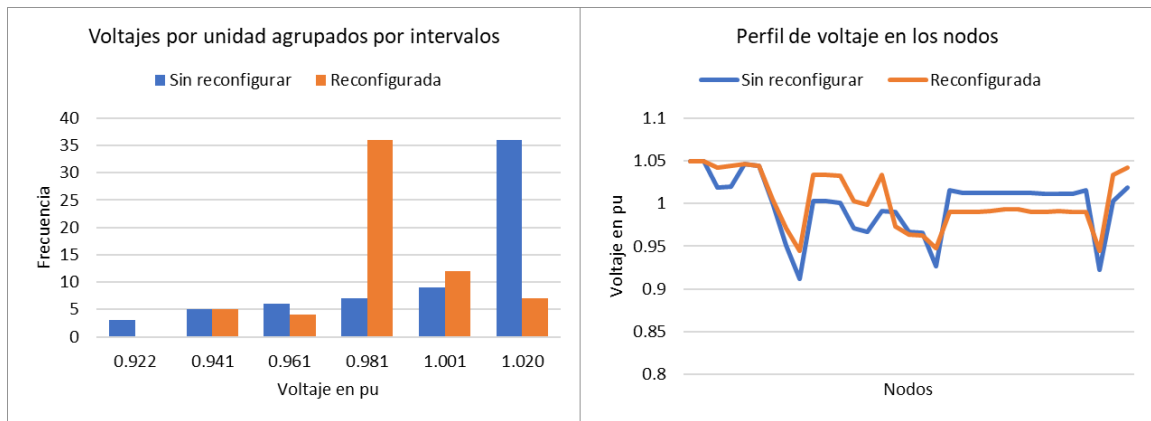


Fig. 3.17 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

En la Tabla 3.16 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 150% y en la Figura 3.18 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.16 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.868	0.896	0.882	3	0.868	0.896	0.882	0
2	0.896	0.924	0.910	2	0.896	0.924	0.910	2
3	0.924	0.952	0.938	9	0.924	0.952	0.938	12
4	0.952	0.980	0.966	24	0.952	0.980	0.966	37
5	0.980	1.009	0.995	20	0.980	1.009	0.995	7
6	1.009	1.037	1.023	24	1.009	1.037	1.023	19
7	1.037	1.065	1.051	13	1.037	1.065	1.051	18
Total				95				95

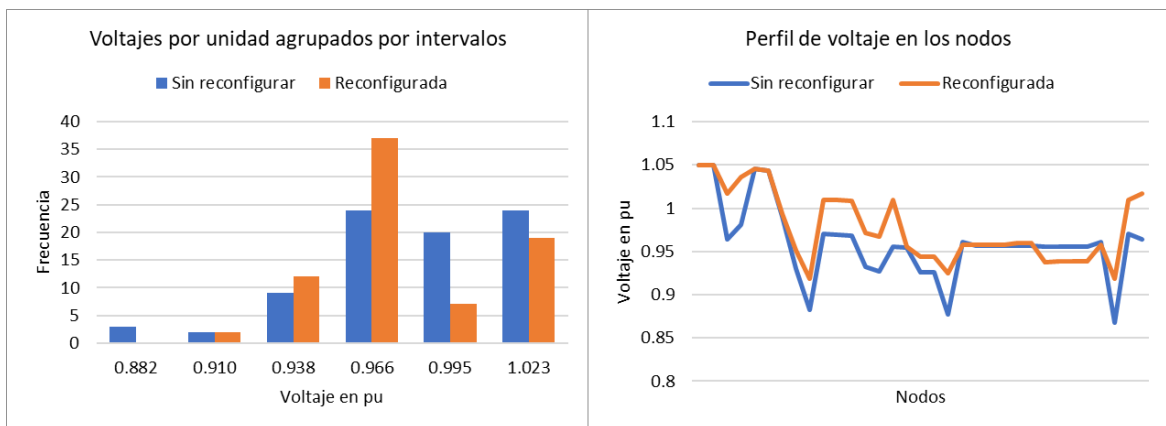


Fig. 3.18 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

3.1.2 Resultados de la red IEEE de 34 nodos con generación distribuida

En la red IEEE de 34 nodos se ha colocado dos generadores sincrónicos, el primero está ubicado en el nodo 890 a 4.16 kV y proporciona una potencia de 100 kW, el segundo está ubicado en el nodo 840 a 24.9 kV y suministra una potencia de 100 kW. En la Tabla 3.17 se presenta las líneas que se abren para las reconfiguraciones de la red.

Tabla 3.17 Líneas abiertas en los lazos de la red.

Nivel de Demanda	Líneas abiertas de la red reconfigurada				
	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5
50%	13	35	22	37	20
75%	13	35	21	37	38
100%	13	35	21	37	20
125%	13	35	29	37	38
150%	13	35	29	37	38

3.1.2.1 Resultados de potencia activa para la red IEEE de 34 nodos

En las Tablas 3.18 y 3.19 se presentan los resultados de potencia antes y después de la reconfiguración de la red con generación distribuida. Las Tablas contienen los resultados de potencia entregada por la subestación, la suma de potencias de los dos generadores distribuidos, las pérdidas de potencia activa en las líneas y en los transformadores y la carga total de la red. Los generadores sincrónicos modelados en OpenDSS a través de MATLAB permanecen habilitados.

Tabla 3.18 Resultados de potencia activa antes de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	790.83	200	-80.44	-0.88	909.51
75%	1275.92	200	-115.99	-2.18	1357.75
100%	1809.81	200	-197.85	-4.61	1807.34
125%	2422.91	200	-343.08	-9.24	2270.58
150%	3009.93	200	-536.38	-15.32	2658.22

Tabla 3.19 Resultados de potencia activa después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	773.78	200	-53.45	-0.88	919.45
75%	1229.63	200	-72.64	-2.19	1354.79
100%	1712.66	200	-122.5	-4.61	1785.55
125%	2222.82	200	-206.17	-9.24	2207.42
150%	2759.32	200	-319.78	-15.46	2624.08

En la Tabla 3.20 se presenta la disminución porcentual en las potencias suministradas y de pérdidas respecto a los valores de la topología inicial de la red.

Tabla 3.20 Cambios porcentuales de potencia después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación [%]	Generadores Salida [%]	Pérdidas Líneas [%]	Pérdidas transformadores [%]	Carga total [%]
50%	2.16	0.00	33.55	0.00	-1.09
75%	3.63	0.00	37.37	-0.46	0.22
100%	5.37	0.00	38.08	0.00	1.21
125%	8.26	0.00	39.91	0.00	2.78
150%	8.33	0.00	40.38	-0.91	1.28

En la Figura 3.19 se presenta un histograma de las pérdidas de potencia en las líneas en [kW] para los cinco niveles de demanda, antes y después de la reconfiguración.

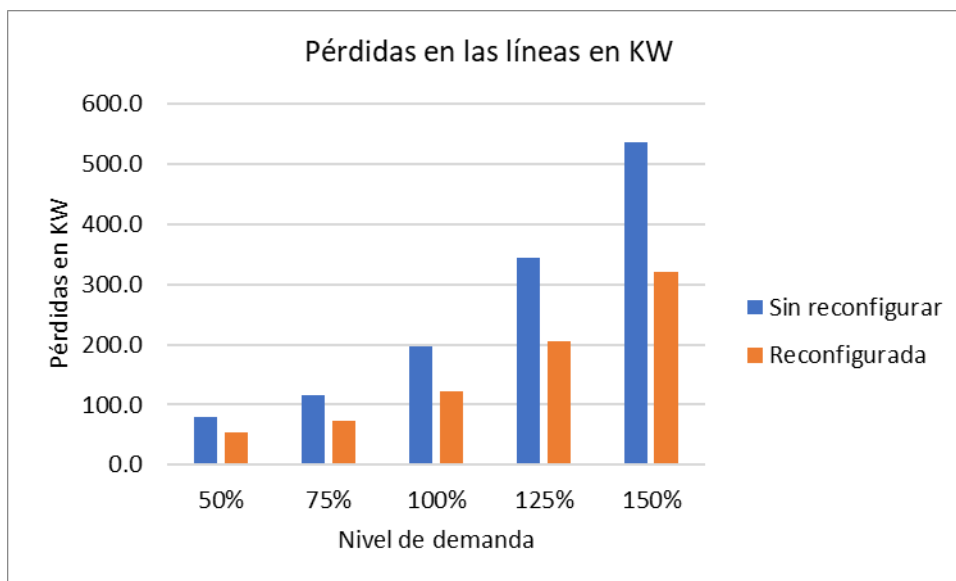


Fig. 3.19 Pérdidas en las líneas para la red IEEE de 34 nodos con GD.

3.1.2.2 Resultados de corriente en las líneas de la red IEEE de 34 nodos

En todas las Tablas y figuras de esta sección se presenta los resultados para la red de distribución IEEE de 34 nodos con generación distribuida con los datos antes y después de la reconfiguración de la red. Se presenta los resultados de porcentaje de corriente en las líneas para cinco niveles de demanda por separado.

En la Tabla 3.21 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 50% y en la Figura 3.20 el histograma.

Tabla 3.21 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	2.0	1.0	12	0.0	2.0	1.0	15
2	2.0	3.9	2.9	8	2.0	3.9	2.9	17
3	3.9	5.9	4.9	5	3.9	5.9	4.9	23
4	5.9	7.8	6.8	1	5.9	7.8	6.8	9
5	7.8	9.8	8.8	11	7.8	9.8	8.8	7
6	9.8	11.7	10.8	20	9.8	11.7	10.8	9
7	11.7	13.7	12.7	23	11.7	13.7	12.7	0
Total				80				80

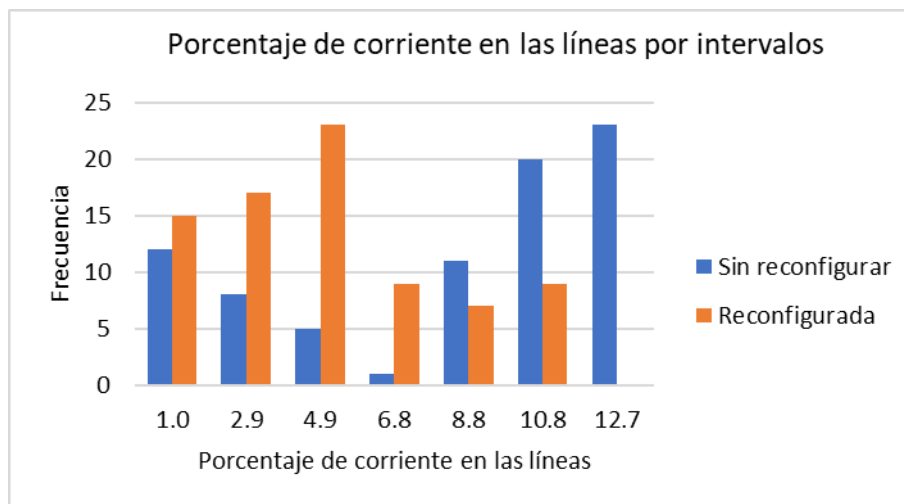


Fig. 3.20 Distribución de frecuencias al 50% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.22 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 75% y en la Figura 3.231 el histograma.

Tabla 3.22 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	2.5	1.3	16	0.0	2.5	1.3	23
2	2.5	5.0	3.8	4	2.5	5.0	3.8	18
3	5.0	7.5	6.3	6	5.0	7.5	6.3	18
4	7.5	10.0	8.8	8	7.5	10.0	8.8	7
5	10.0	12.5	11.3	12	10.0	12.5	11.3	8
6	12.5	15.0	13.8	24	12.5	15.0	13.8	6
7	15.0	17.5	16.3	10	15.0	17.5	16.3	0
Total				80				80

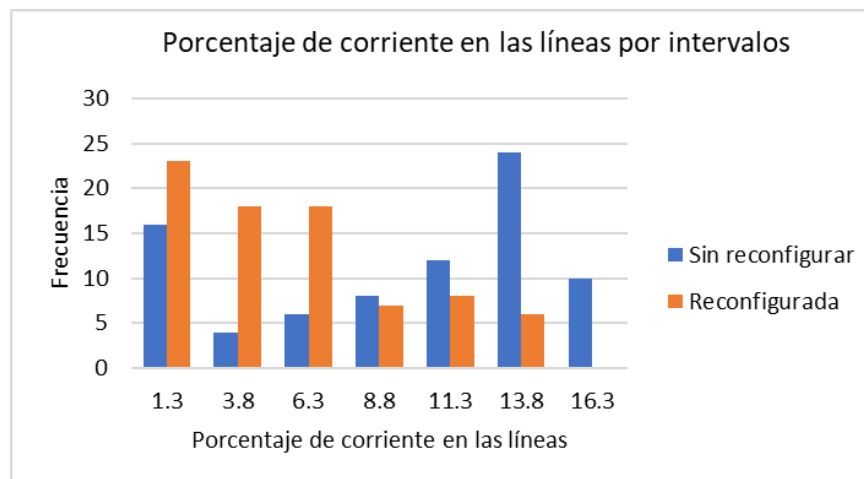


Fig. 3.21 Distribución de frecuencias al 75% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.23 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 100% y en la Figura 3.22 el histograma.

Tabla 3.23 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	3.4	1.7	18	0.0	3.4	1.7	26
2	3.4	6.7	5.1	8	3.4	6.7	5.1	20
3	6.7	10.1	8.4	6	6.7	10.1	8.4	12
4	10.1	13.5	11.8	6	10.1	13.5	11.8	10
5	13.5	16.9	15.2	13	13.5	16.9	15.2	6
6	16.9	20.2	18.5	24	16.9	20.2	18.5	3
7	20.2	23.6	21.9	5	20.2	23.6	21.9	3
Total				80				80

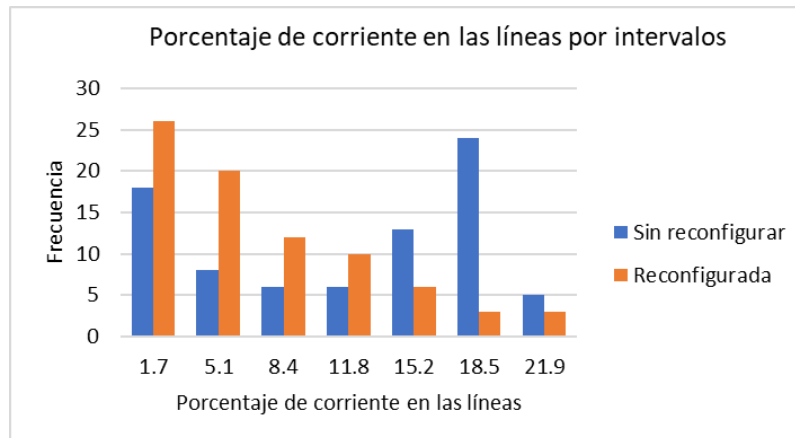


Fig. 3.22 Distribución de frecuencias al 100% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.24 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 125% y en la Figura 3.23 el histograma.

Tabla 3.24 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	4.5	2.3	18	0.0	4.5	2.3	24
2	4.5	8.9	6.7	8	4.5	8.9	6.7	28
3	8.9	13.4	11.2	7	8.9	13.4	11.2	8
4	13.4	17.9	15.6	5	13.4	17.9	15.6	6
5	17.9	22.3	20.1	14	17.9	22.3	20.1	8
6	22.3	26.8	24.5	18	22.3	26.8	24.5	3
7	26.8	31.2	29.0	10	26.8	31.2	29.0	3
Total				80				80

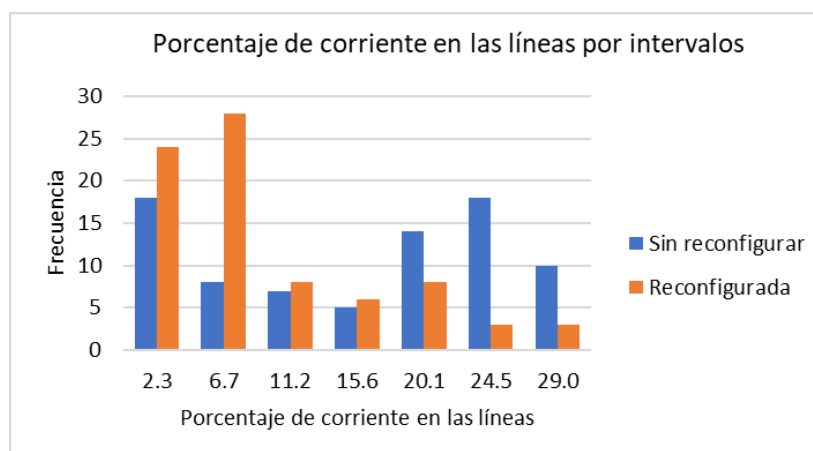


Fig. 3.23 Distribución de frecuencias al 125% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.25 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 150% y en la Figura 3.24 el histograma.

Tabla 3.25 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	5.6	2.8	24	0.0	5.6	2.8	27
2	5.6	11.1	8.3	6	5.6	11.1	8.3	26
3	11.1	16.6	13.9	4	11.1	16.6	13.9	7
4	16.6	22.2	19.4	4	16.6	22.2	19.4	4
5	22.2	27.7	24.9	13	22.2	27.7	24.9	10
6	27.7	33.2	30.5	19	27.7	33.2	30.5	3
7	33.2	38.8	36.0	10	33.2	38.8	36.0	3
Total				80				80

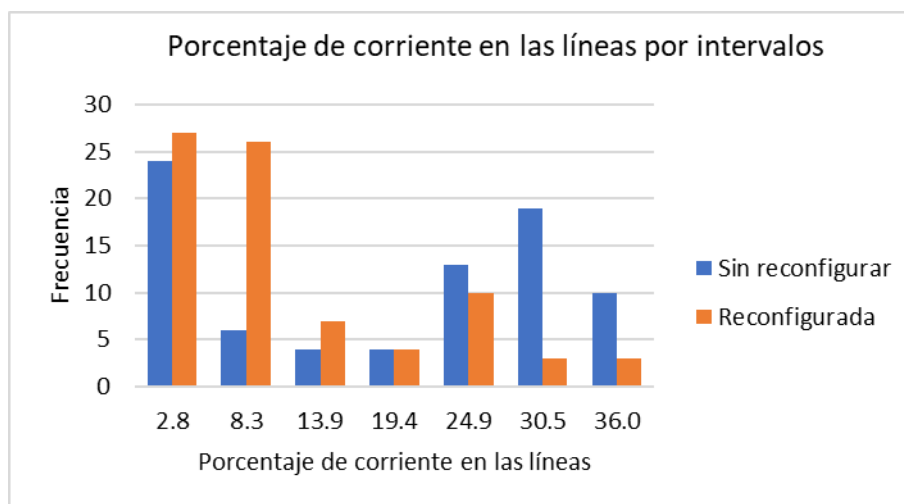


Fig. 3.24 Distribución de frecuencias al 150% de demanda para % de corriente.

3.1.2.3 Resultados de voltaje en los nodos para la red IEEE de 34 nodos

En las Tablas y figuras de esta sección se presentan los resultados de voltaje en los nodos para la red de distribución IEEE de 34 nodos con generación distribuida. Se presentan los resultados para cinco niveles de demanda por separado, antes y después de la reconfiguración de la red. En las figuras las marcas de clase son los puntos medios de los intervalos de voltaje en por unidad.

En la Tabla 3.26 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos voltajes en los nodos para una demanda del 50% y en la Figura 3.25 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.26 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	1.000	1.008	1.004	5	1.000	1.008	1.004	1
2	1.008	1.017	1.013	24	1.008	1.017	1.013	1
3	1.017	1.025	1.021	1	1.017	1.025	1.021	17
4	1.025	1.033	1.029	39	1.025	1.033	1.029	11
5	1.033	1.041	1.037	6	1.033	1.041	1.037	28
6	1.041	1.049	1.045	5	1.041	1.049	1.045	18
7	1.049	1.057	1.053	15	1.049	1.057	1.053	19
Total				95				95

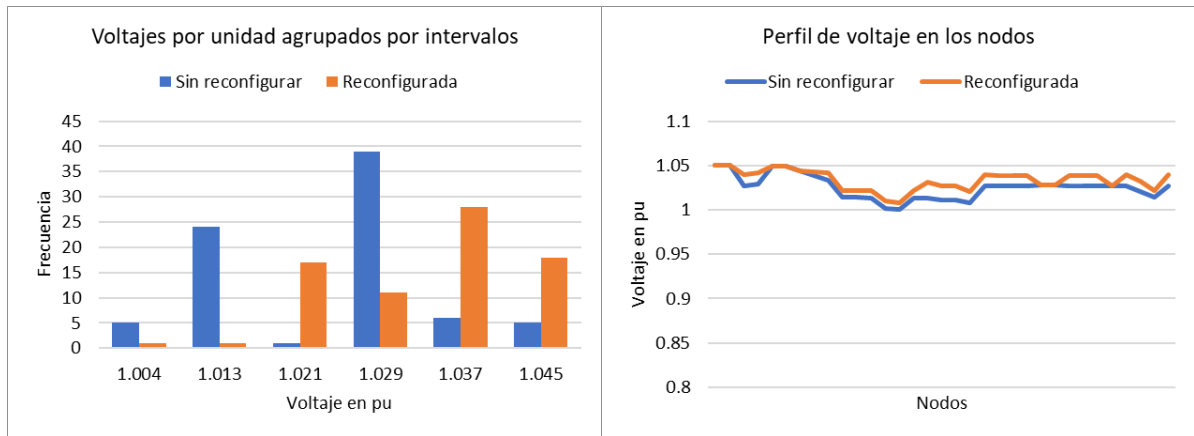


Fig. 3.25 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

En la Tabla 3.27 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 75% y en la Figura 3.26 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.27 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.989	0.998	0.993	5	0.989	0.998	0.993	0
2	0.998	1.006	1.002	9	0.998	1.006	1.002	4
3	1.006	1.015	1.011	7	1.006	1.015	1.011	5
4	1.015	1.024	1.019	13	1.015	1.024	1.019	17
5	1.024	1.033	1.028	18	1.024	1.033	1.028	17
6	1.033	1.041	1.037	28	1.033	1.041	1.037	25
7	1.041	1.050	1.046	15	1.041	1.050	1.046	27
Total				95				95

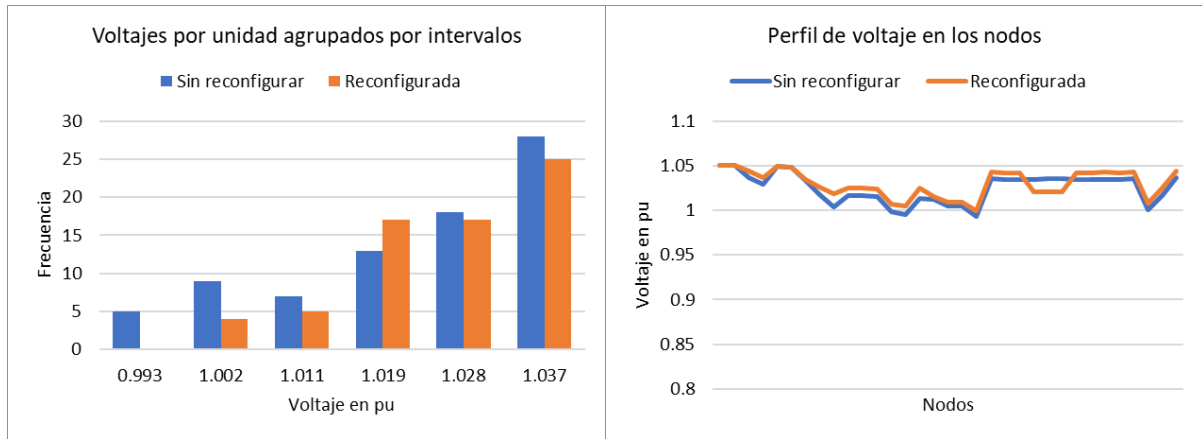


Fig. 3.26 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

En la Tabla 3.28 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 100% y en la Figura 3.27 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.28 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.968	0.980	0.974	4	0.968	0.980	0.974	4
2	0.980	0.992	0.986	3	0.980	0.992	0.986	5
3	0.992	1.003	0.997	8	0.992	1.003	0.997	11
4	1.003	1.015	1.009	9	1.003	1.015	1.009	9
5	1.015	1.027	1.021	16	1.015	1.027	1.021	17
6	1.027	1.038	1.032	18	1.027	1.038	1.032	21
7	1.038	1.050	1.044	37	1.038	1.050	1.044	28
Total				95				95

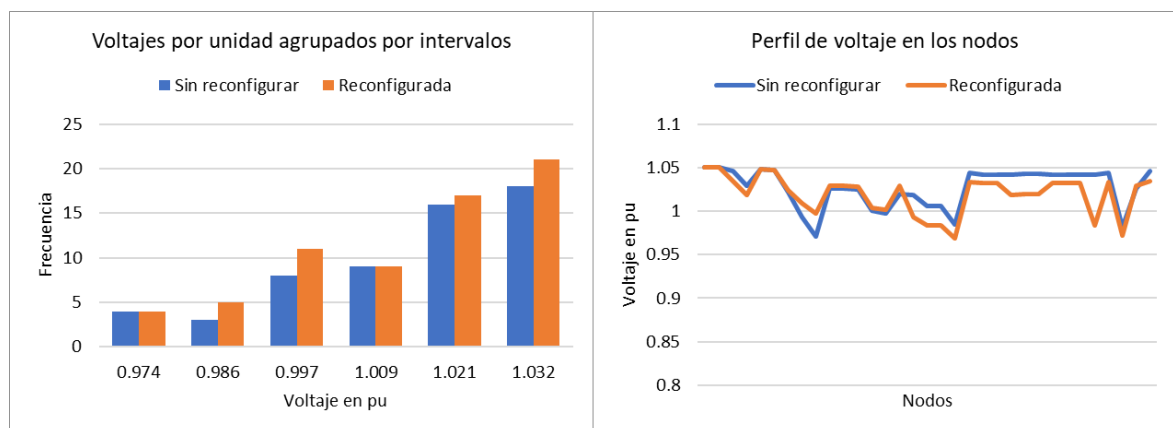


Fig. 3.27 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

En la Tabla 3.29 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 125% y en la Figura 3.28 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.29 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.932	0.952	0.942	1	0.932	0.952	0.942	0
2	0.952	0.972	0.962	4	0.952	0.972	0.962	2
3	0.972	0.991	0.981	4	0.972	0.991	0.981	16
4	0.991	1.011	1.001	13	0.991	1.011	1.001	32
5	1.011	1.031	1.021	20	1.011	1.031	1.021	15
6	1.031	1.051	1.041	50	1.031	1.051	1.041	27
7	1.051	1.071	1.061	3	1.051	1.071	1.061	3
Total				95				95

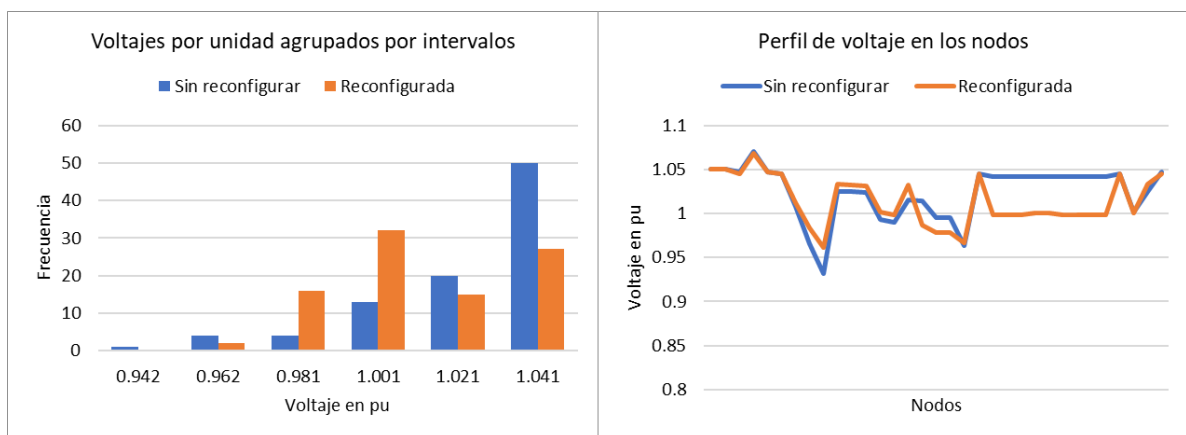


Fig. 3.28 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

En la Tabla 3.30 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos voltajes en los nodos para una demanda del 150% y en la Figura 3.29 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.30 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.899	0.926	0.912	2	0.899	0.926	0.912	0
2	0.926	0.953	0.939	9	0.926	0.953	0.939	2
3	0.953	0.980	0.966	4	0.953	0.980	0.966	6
4	0.980	1.007	0.993	26	0.980	1.007	0.993	44
5	1.007	1.034	1.020	36	1.007	1.034	1.020	15
6	1.034	1.061	1.047	16	1.034	1.061	1.047	25

7	1.061	1.088	1.074	2	1.061	1.088	1.074	3
Total				95				95

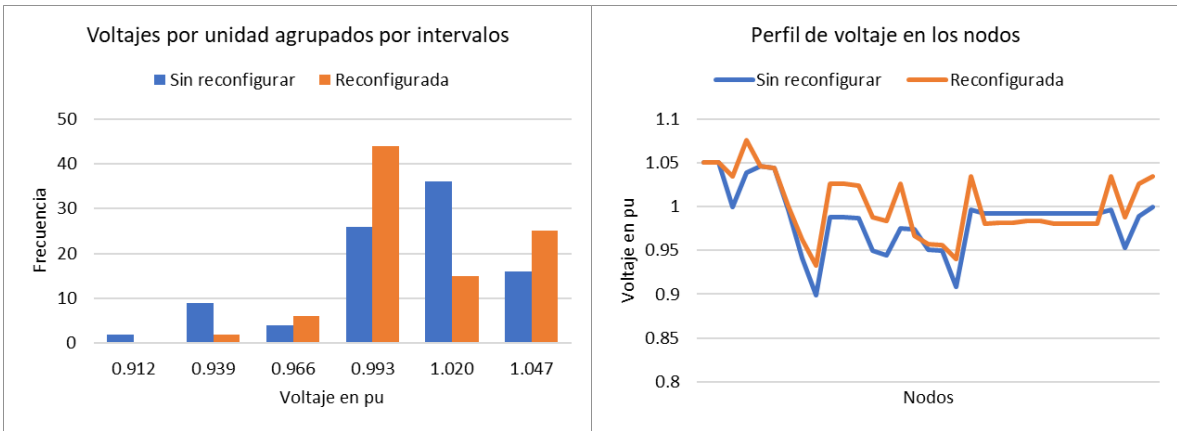


Fig. 3.29 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

3.1.3 Resultados de la red local de 2894 nodos sin generación distribuida

En la Tabla 3.31 se presenta las líneas que se abren para las reconfiguraciones de la red para cinco niveles de demanda. La red contiene ocho lazos por lo tanto se deshabilitan ocho líneas mediante los dispositivos de maniobra.

Tabla 3.31 Líneas abiertas en los lazos de la red.

Nivel de Demanda	Líneas abiertas de la red reconfigurada							
	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5	Lazo 6	Lazo 7	Lazo 8
50%	392	2418	107	51	44	761	874	919
75%	2417	239	107	56	47	753	881	2424
100%	619	335	107	56	16	855	2423	916
125%	2417	239	107	51	16	753	874	916
150%	361	231	107	56	13	761	881	906

3.1.3.1 Resultados de potencia activa para la red de 2894 nodos

En las Tablas 3.32 y 3.33 se presentan los resultados de potencia entregada por la subestación, generadores, pérdidas en las líneas y en los transformadores y carga total antes de la reconfiguración de la red y después de la reconfiguración respectivamente.

Tabla 3.32 Resultados de potencia activa antes de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	1579.28	0	-4.89	-100.04	1474.36
75%	2321.06	0	-9.14	-100.4	2211.54
100%	3064.81	0	-15.09	-101.01	2948.73
125%	3810.53	0	-22.77	-101.89	3685.91
150%	4558.25	0	-32.19	-103.04	4423.08

Tabla 3.33 Resultados de potencia activa después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	1577.29	0	-2.98	-99.96	1474.35
75%	2317.54	0	-5.59	-100.42	2211.54
100%	3059.11	0	-9.25	-101.15	2948.71
125%	3802.03	0	-14.01	-102.14	3685.88
150%	4546.45	0	-20.01	-103.4	4423.05

En la Tabla 3.34 se presenta la disminución porcentual en las potencias suministradas y de pérdidas respecto a los valores de la topología inicial de la red.

Tabla 3.34 Cambios porcentuales de potencia después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación [%]	Generadores Salida [%]	Pérdidas Líneas [%]	Pérdidas transformadores [%]	Carga total [%]
50%	0.13	0.00	39.06	0.08	0.00
75%	0.15	0.00	38.84	-0.02	0.00
100%	0.19	0.00	38.70	-0.14	0.00
125%	0.22	0.00	38.47	-0.25	0.00
150%	0.26	0.00	37.84	-0.35	0.00

En la Figura 3.30 se presenta un histograma de las pérdidas de potencia en las líneas en [kW] para los cinco niveles de demanda, antes y después de la reconfiguración.

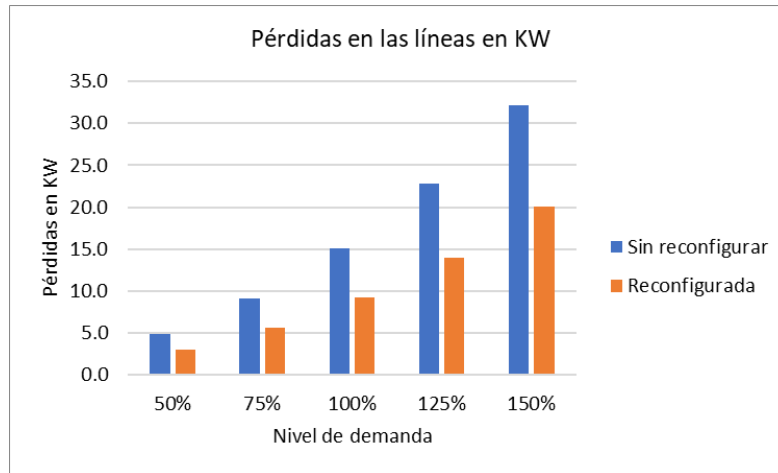


Fig. 3.30 Pérdidas en las líneas para la red de 2894 nodos sin GD.

3.1.3.2 Resultados de corriente en las líneas de la red de 2894 nodos

En todas las tablas y figuras de esta sección se presenta los resultados para la red de distribución de 2894 nodos sin generación distribuida con los datos antes y después de la reconfiguración de la red. Se presenta los resultados de porcentaje de corriente en las líneas para cinco niveles de demanda por separado.

En la Tabla 3.35 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 50% y en la Figura 3.31 el histograma.

Tabla 3.35 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	3.7	1.9	3791	0.0	3.7	1.9	3793
2	3.7	7.4	5.6	157	3.7	7.4	5.6	174
3	7.4	11.2	9.3	149	7.4	11.2	9.3	138
4	11.2	14.9	13.0	56	11.2	14.9	13.0	15
5	14.9	18.6	16.7	0	14.9	18.6	16.7	0
6	18.6	22.3	20.4	1	18.6	22.3	20.4	12
7	22.3	26.0	24.2	2	22.3	26.0	24.2	24
Total				4156				4156

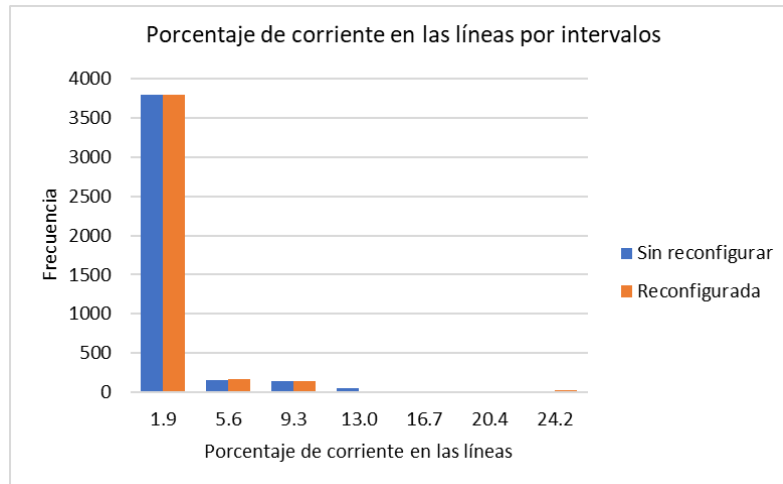


Fig. 3.31 Distribución de frecuencias al 50% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.36 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 75% y en la Figura 3.32 el histograma.

Tabla 3.36 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	5.1	2.5	3797	0.0	5.1	2.5	3806
2	5.1	10.1	7.6	154	5.1	10.1	7.6	193
3	10.1	15.2	12.6	146	10.1	15.2	12.6	106
4	15.2	20.2	17.7	56	15.2	20.2	17.7	15
5	20.2	25.3	22.7	0	20.2	25.3	22.7	0
6	25.3	30.3	27.8	1	25.3	30.3	27.8	12
7	30.3	35.4	32.8	2	30.3	35.4	32.8	24
Total				4156				4156

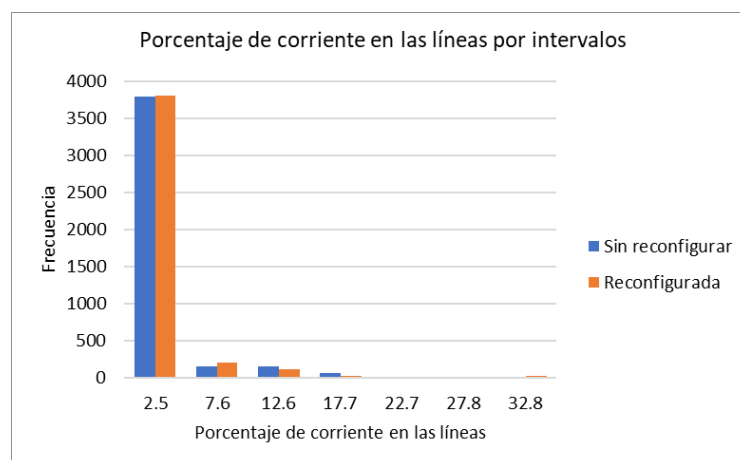


Fig. 3.32 Distribución de frecuencias al 75% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.37 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 100% y en la Figura 3.33 el histograma.

Tabla 3.37 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	6.6	3.3	3799	0.0	6.6	3.3	3805
2	6.6	13.2	9.9	154	6.6	13.2	9.9	218
3	13.2	19.8	16.5	144	13.2	19.8	16.5	82
4	19.8	26.4	23.1	56	19.8	26.4	23.1	15
5	26.4	33.0	29.7	1	26.4	33.0	29.7	4
6	33.0	39.5	36.3	0	33.0	39.5	36.3	8
7	39.5	46.1	42.8	2	39.5	46.1	42.8	24
Total				4156				4156

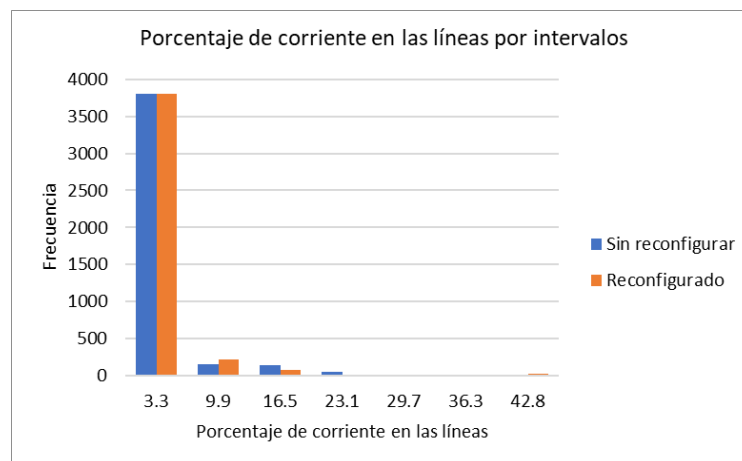


Fig. 3.33 Distribución de frecuencias al 100% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.38 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 125% y en la Figura 3.34 el histograma.

Tabla 3.38 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	8.1	4.0	3798	0.0	8.1	4.0	3807
2	8.1	16.1	12.1	160	8.1	16.1	12.1	205
3	16.1	24.2	20.2	139	16.1	24.2	20.2	93
4	24.2	32.3	28.3	56	24.2	32.3	28.3	15
5	32.3	40.4	36.3	1	32.3	40.4	36.3	4
6	40.4	48.4	44.4	0	40.4	48.4	44.4	8

7	48.4	56.5	52.5	2	48.4	56.5	52.5	24
Total				4156				4156

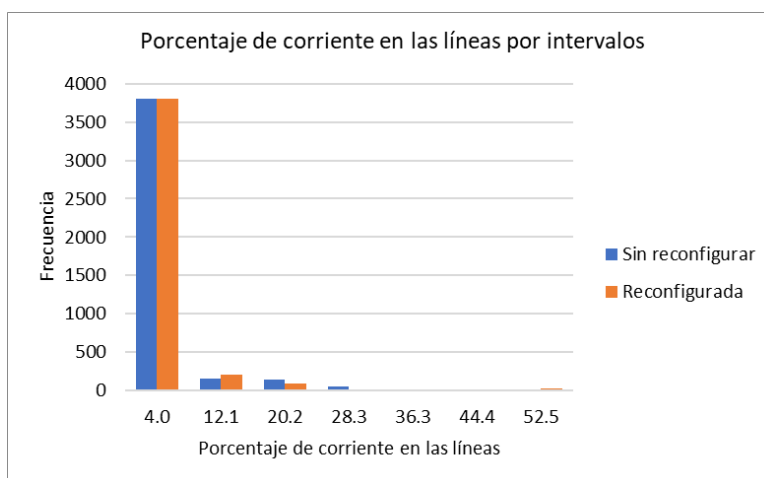


Fig. 3.34 Distribución de frecuencias al 125% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.39 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 150% y en la Figura 3.35 el histograma.

Tabla 3.39 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	9.6	4.8	3798	0.0	9.6	4.8	3828
2	9.6	19.2	14.4	160	9.6	19.2	14.4	224
3	19.2	28.7	23.9	136	19.2	28.7	23.9	53
4	28.7	38.3	33.5	59	28.7	38.3	33.5	15
5	38.3	47.9	43.1	1	38.3	47.9	43.1	4
6	47.9	57.5	52.7	0	47.9	57.5	52.7	8
7	57.5	67.0	62.2	2	57.5	67.0	62.2	24
Total				4156				4156

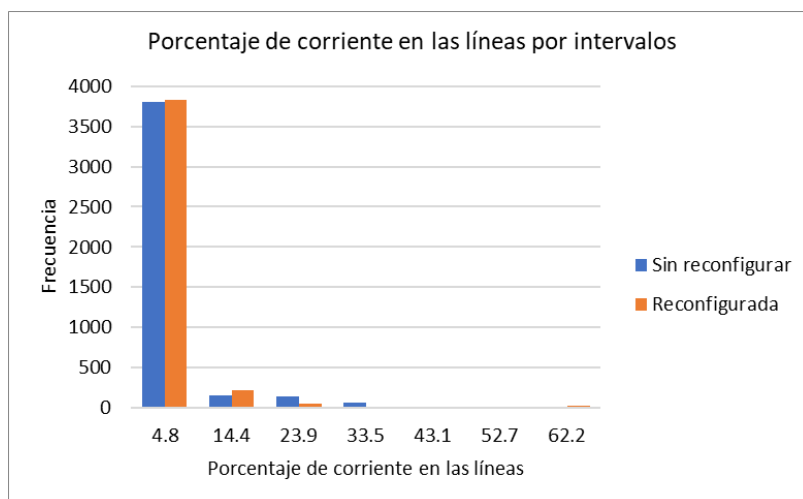


Fig. 3.35 Distribución de frecuencias al 150% de demanda para % de corriente.

3.1.3.3 Resultados de voltaje en los nodos para la red de 2894 nodos

En las Tablas y figuras de esta sección se presentan los resultados de voltaje en los nodos para la red de distribución de 2894 nodos sin generación distribuida. Se presentan los resultados para cinco niveles de demanda por separado, antes y después de la reconfiguración de la red. En las figuras las marcas de clase son los puntos medios de los intervalos de voltaje en por unidad.

En la Tabla 3.40 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 50% y en la Figura 3.36 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.40 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.998	1.000	0.999	191	0.998	1.000	0.999	254
2	1.000	1.001	1.001	3132	1.000	1.001	1.001	3751
3	1.001	1.003	1.002	795	1.001	1.003	1.002	527
4	1.003	1.004	1.004	718	1.003	1.004	1.004	304
Total				4836				4836

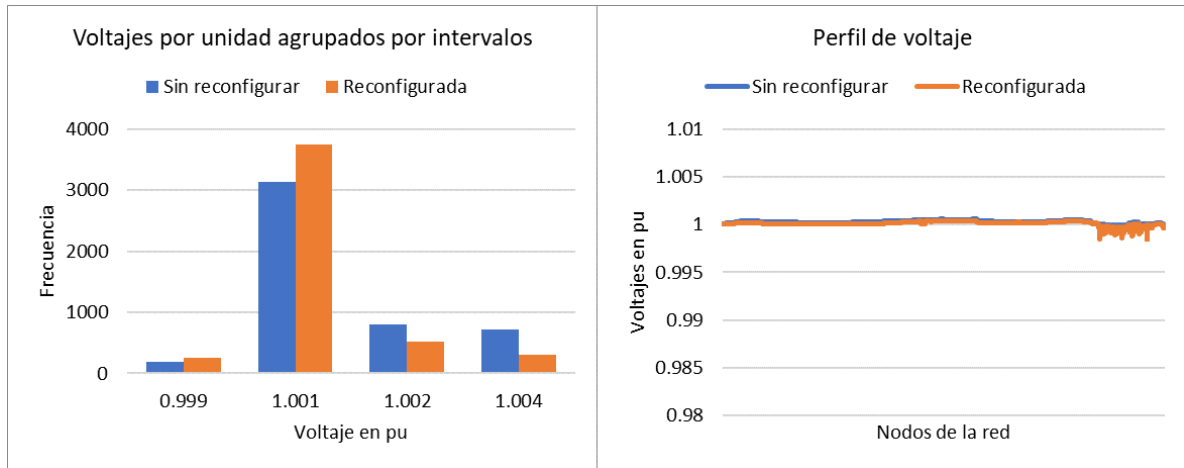


Fig. 3.36 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

En la Tabla 3.41 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 75% y en la Figura 3.37 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.41 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.996	0.998	0.997	54	0.996	0.998	0.997	16
2	0.998	0.999	0.998	1263	0.998	0.999	0.998	1055
3	0.999	1.001	1.000	2695	0.999	1.001	1.000	2921
4	1.001	1.002	1.001	824	1.001	1.002	1.001	844
Total				4836				4836

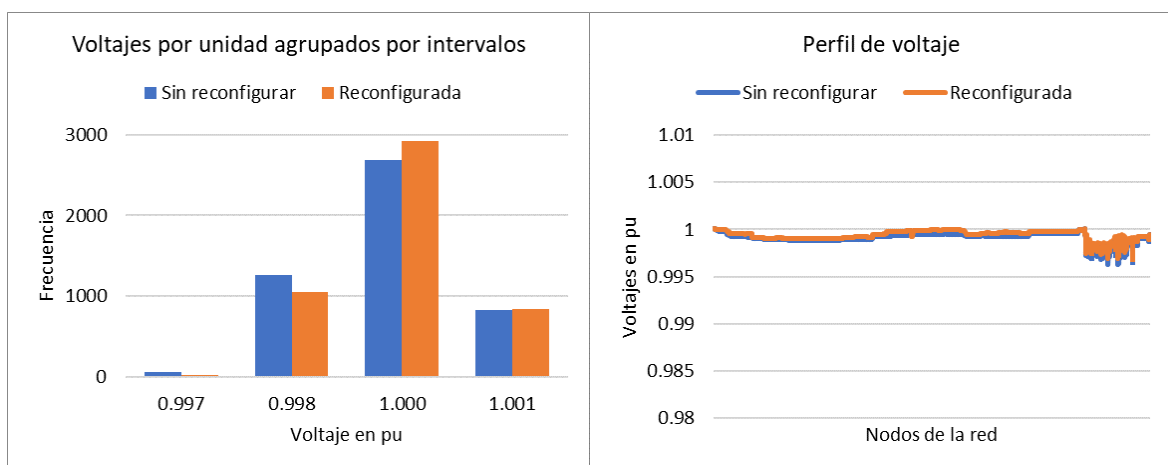


Fig. 3.37 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

En la Tabla 3.42 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 100% y en la Figura 3.38 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.42 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.994	0.995	0.994	36	0.994	0.995	0.994	3
2	0.995	0.997	0.996	695	0.995	0.997	0.996	188
3	0.997	0.999	0.998	2921	0.997	0.999	0.998	1649
4	0.999	1.001	1.000	1184	0.999	1.001	1.000	2996
Total				4836				4836

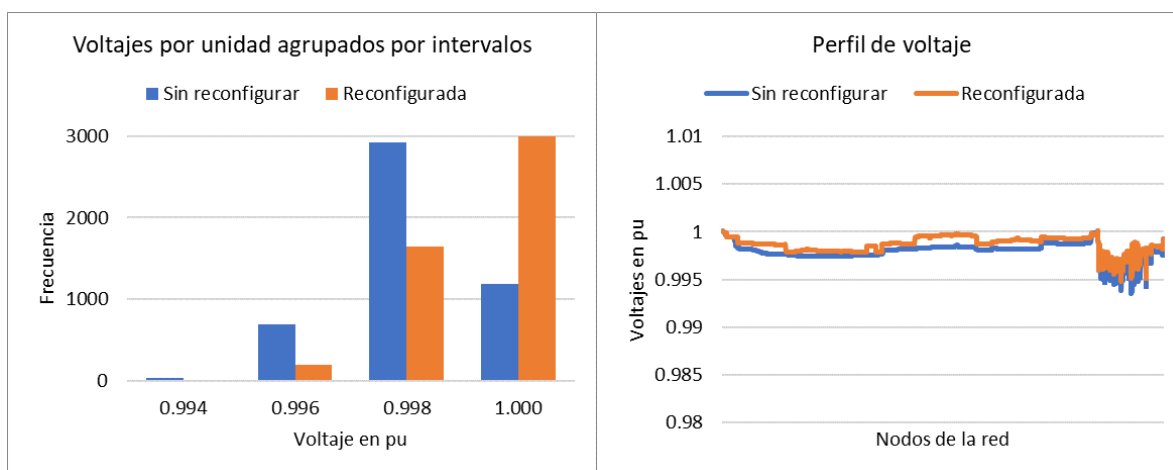


Fig. 3.38 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

En la Tabla 3.43 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 125% y en la Figura 3.39 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.43 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.991	0.993	0.992	53	0.991	0.993	0.992	1
2	0.993	0.995	0.994	733	0.993	0.995	0.994	166
3	0.995	0.998	0.997	3517	0.995	0.998	0.997	1627
4	0.998	1.000	0.999	533	0.998	1.000	0.999	3042
Total				4836				4836

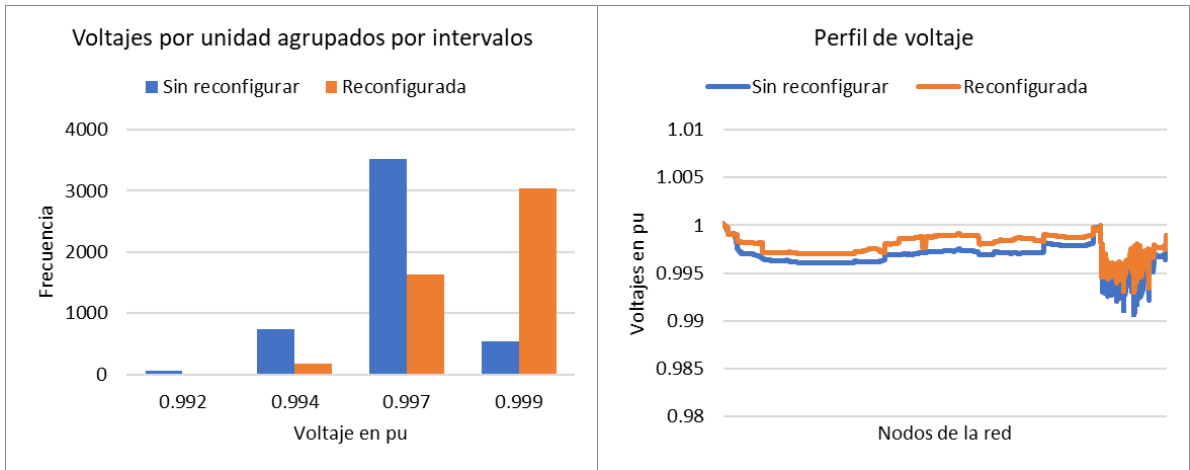


Fig. 3.39 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

En la Tabla 3.44 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 150% y en la Figura 3.40 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.44 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.988	0.991	0.990	88	0.988	0.991	0.990	2
2	0.991	0.994	0.993	840	0.991	0.994	0.993	415
3	0.994	0.997	0.996	3490	0.994	0.997	0.996	1466
4	0.997	1.000	0.999	418	0.997	1.000	0.999	2953
Total				4836				4836

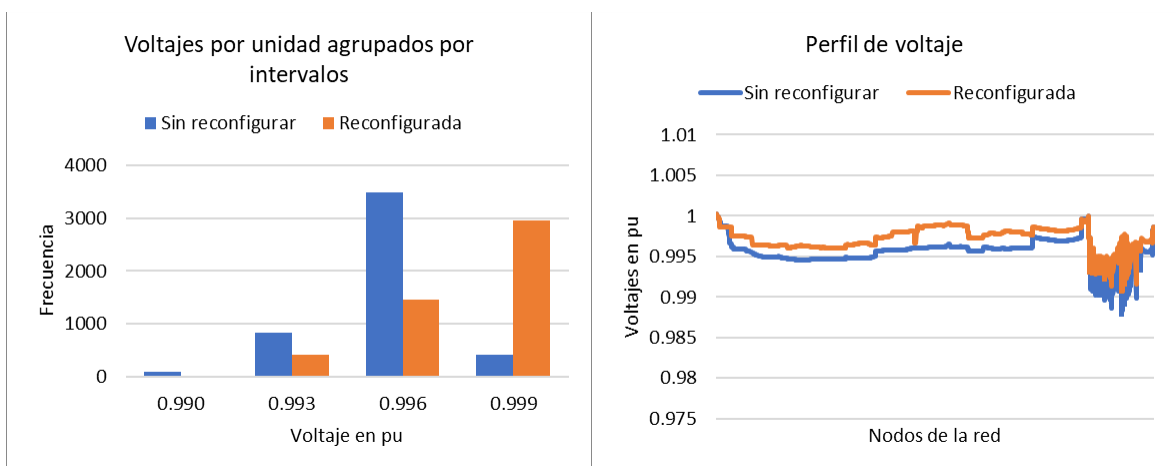


Fig. 3.40 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

3.1.4 Resultados de la red local de 2894 nodos con generación distribuida

La red local de 2894 nodos contiene dos generadores sincrónicos de generación distribuida conectados en un solo nodo, cada generador suministra una potencia de 890 kW a 2.3 kV, y mediante un transformador se eleva el voltaje a 22.86 kV, el cual es el nivel de voltaje de los primarios. En la Tabla 3.45 se presenta las líneas que se abren para las reconfiguraciones de la red.

Tabla 3.45 Líneas abiertas en los lazos de la red.

Nivel de Demanda	Líneas abiertas de la red reconfigurada							
	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3	Lazo 4	Lazo 5	Lazo 6	Lazo 7	Lazo 8
50%	2417	273	107	56	45	1986	2423	909
75%	592	713	107	51	44	2422	2423	913
100%	371	273	107	49	47	754	870	916
125%	619	709	107	48	47	761	870	913
150%	407	702	107	48	47	856	867	913

3.1.4.1 Resultados de potencia activa para la red de 2894 nodos

En las Tablas 3.46 y 3.47 se presentan los resultados de potencia antes y después de la reconfiguración de la red con generación distribuida. Las tablas contienen los resultados de potencia entregada por la subestación, la suma de potencias de los dos generadores distribuidos, las pérdidas de potencia activa en las líneas y en los transformadores y la carga total de la red. Para el nivel de demanda del 50% que se presentan en las tablas 3.46 y 3.47, la potencia de salida de la subestación tiene un valor negativo, lo cual indica que para esa demanda la subestación recibe energía en lugar de suministrar.

Tabla 3.46 Resultados de potencia activa antes de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas trans-formadores [kW]	Carga total [kW]
50%	-177.5	1780	-13.88	-114.3	1474.34
75%	559.65	1780	-13.48	-114.68	2211.51
100%	1298.68	1780	-14.7	-115.32	2948.68
125%	2039.6	1780	-17.56	-116.22	3685.84
150%	2782.45	1780	-22.08	-117.39	4423.01

Tabla 3.47 Resultados de potencia activa después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación Salida [kW]	Generadores Salida [kW]	Pérdidas Líneas [kW]	Pérdidas transformadores [kW]	Carga total [kW]
50%	-181.93	1780	-10.09	-113.63	1474.34
75%	555.44	1780	-9.82	-114.1	2211.52
100%	1294.37	1780	-10.67	-115.02	2948.68
125%	2034.23	1780	-12.43	-115.95	3685.85
150%	2775.39	1780	-15.16	-117.21	4423.02

En la Tabla 3.48 se presenta la disminución porcentual en las potencias suministradas y de pérdidas respecto a los valores de la topología inicial de la red.

Tabla 3.48 Cambios porcentuales de potencia después de la reconfiguración.

Nivel de Demanda	Subestación [%]	Generadores Salida [%]	Pérdidas Líneas [%]	Pérdidas transformadores [%]	Carga total [%]
50%	-2.50	0.00	27.31	0.59	0.00
75%	0.75	0.00	27.15	0.51	0.00
100%	0.33	0.00	27.41	0.26	0.00
125%	0.26	0.00	29.21	0.23	0.00
150%	0.25	0.00	31.34	0.15	0.00

En la Figura 3.41 se presenta un histograma de las pérdidas de potencia en las líneas en [kW] para los cinco niveles de demanda, antes y después de la reconfiguración.

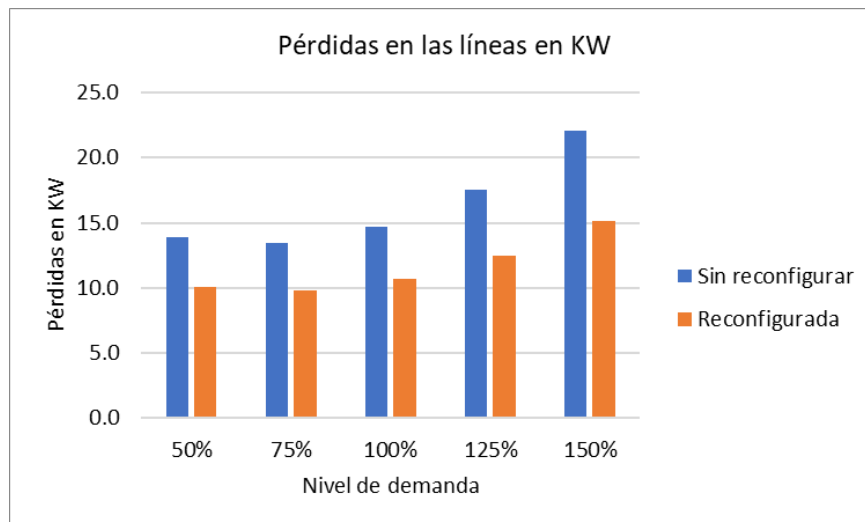


Fig. 3.41 Pérdidas en las líneas para la red de 2894 nodos con GD.

3.1.4.2 Resultados de corriente en las líneas de la red de 2894 nodos

En todas las Tablas y figuras de esta sección se presenta los resultados para la red de distribución de 2894 nodos con generación distribuida con los datos antes y después de la reconfiguración de la red. Se presenta los resultados de porcentaje de corriente en las líneas para cinco niveles de demanda por separado.

En la Tabla 3.49 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 50% y en la Figura 3.42 el histograma.

Tabla 3.49 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	4.4	2.2	3623	0.0	4.4	2.2	3660
2	4.4	8.9	6.7	213	4.4	8.9	6.7	204
3	8.9	13.3	11.1	46	8.9	13.3	11.1	88
4	13.3	17.7	15.5	238	13.3	17.7	15.5	135
5	17.7	22.2	20.0	9	17.7	22.2	20.0	9
6	22.2	26.6	24.4	21	22.2	26.6	24.4	27
7	26.6	31.0	28.8	6	26.6	31.0	28.8	33
Total				4156				4156

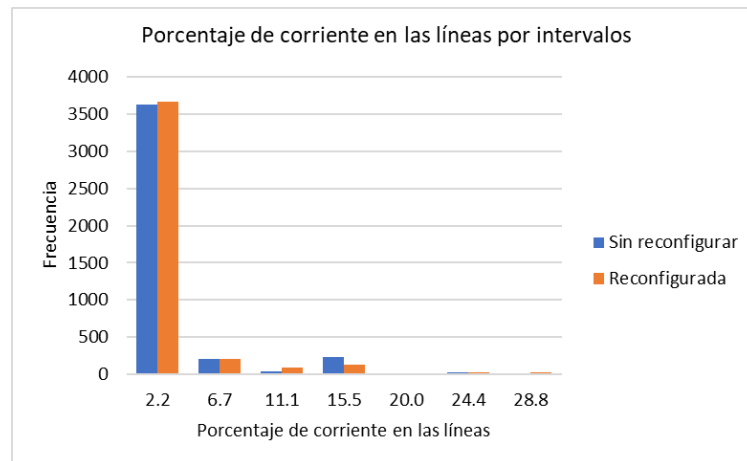


Fig. 3.42 Distribución de frecuencias al 50% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.50 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 75% y en la Figura 3.43 el histograma.

Tabla 3.50 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	4.6	2.3	3591	0.0	4.6	2.3	3678
2	4.6	9.2	6.9	189	4.6	9.2	6.9	177
3	9.2	13.8	11.5	189	9.2	13.8	11.5	172
4	13.8	18.4	16.1	151	13.8	18.4	16.1	60
5	18.4	23.0	20.7	26	18.4	23.0	20.7	30
6	23.0	27.6	25.3	7	23.0	27.6	25.3	25
7	27.6	32.2	29.9	3	27.6	32.2	29.9	14
Total				4156				4156

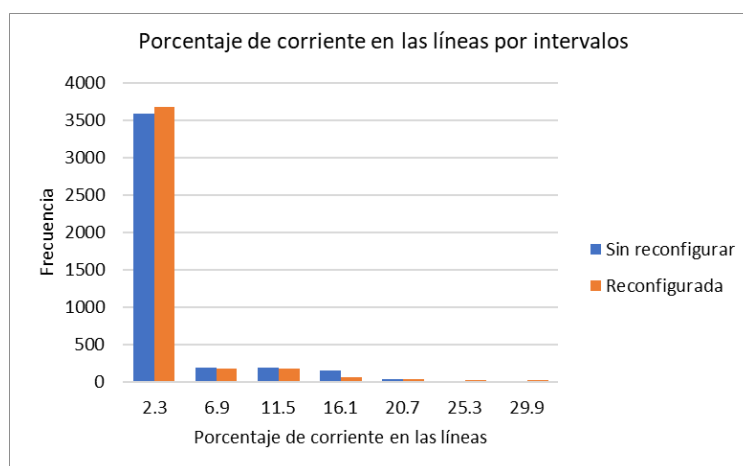


Fig. 3.43 Distribución de frecuencias al 75% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.51 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 100% y en la Figura 3.44 el histograma.

Tabla 3.51 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	5.2	2.6	3540	0.0	5.2	2.6	3721
2	5.2	10.4	7.8	237	5.2	10.4	7.8	250
3	10.4	15.5	12.9	251	10.4	15.5	12.9	118
4	15.5	20.7	18.1	101	15.5	20.7	18.1	28
5	20.7	25.9	23.3	22	20.7	25.9	23.3	3
6	25.9	31.1	28.5	4	25.9	31.1	28.5	24
7	31.1	36.2	33.6	1	31.1	36.2	33.6	12
Total				4156				4156

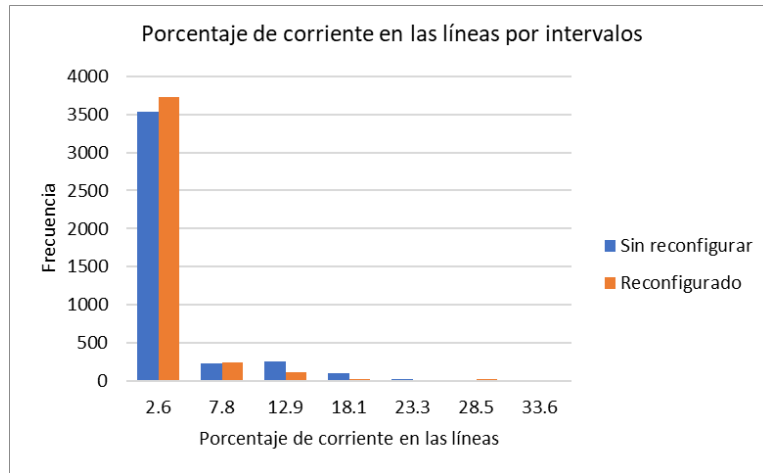


Fig. 3.44 Distribución de frecuencias al 100% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.52 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 125% y en la Figura 3.45 el histograma.

Tabla 3.52 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	6.1	3.0	3582	0.0	6.1	3.0	3649
2	6.1	12.2	9.1	268	6.1	12.2	9.1	327
3	12.2	18.2	15.2	178	12.2	18.2	15.2	103
4	18.2	24.3	21.3	123	18.2	24.3	21.3	41
5	24.3	30.4	27.4	3	24.3	30.4	27.4	4
6	30.4	36.5	33.5	1	30.4	36.5	33.5	20
7	36.5	42.6	39.5	1	36.5	42.6	39.5	12
Total				4156				4156

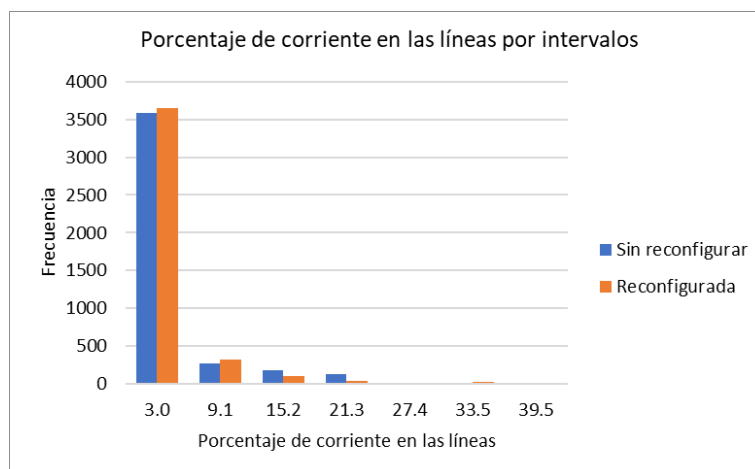


Fig. 3.45 Distribución de frecuencias al 125% de demanda para % de corriente.

En la Tabla 3.53 se presenta la distribución de frecuencias por intervalo para las corrientes en las líneas para una demanda del 150% y en la Figura 3.46 el histograma.

Tabla 3.53 Distribución de frecuencias de intervalos de corriente al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	I [%] Inferior	I [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.0	7.2	3.6	3598	0.0	7.2	3.6	3665
2	7.2	14.4	10.8	298	7.2	14.4	10.8	300
3	14.4	21.6	18.0	141	14.4	21.6	18.0	114
4	21.6	28.7	25.2	116	21.6	28.7	25.2	41
5	28.7	35.9	32.3	1	28.7	35.9	32.3	12
6	35.9	43.1	39.5	1	35.9	43.1	39.5	6
7	43.1	50.3	46.7	1	43.1	50.3	46.7	18
Total				4156				4156

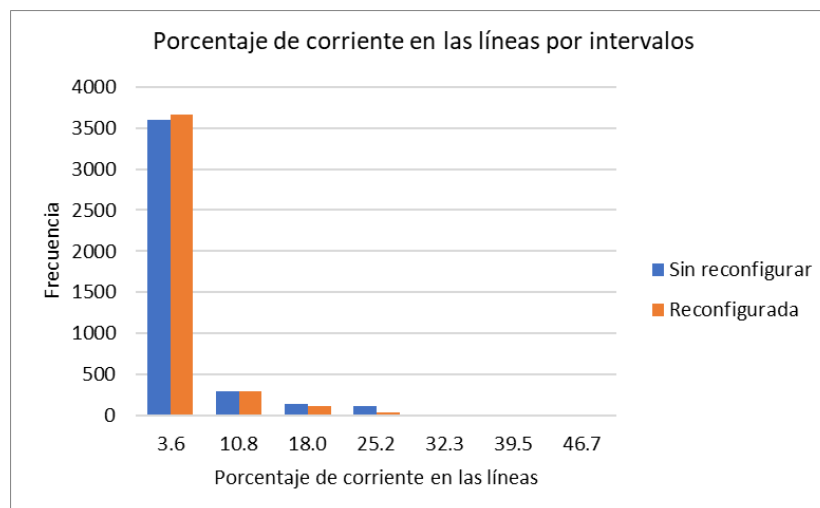


Fig. 3.46 Distribución de frecuencias al 150% de demanda para % de corriente.

3.1.4.3 Resultados de voltaje en los nodos para la red de 2894 nodos

En las Tablas y figuras de esta sección se presentan los resultados de voltaje en los nodos para la red de distribución de 2894 nodos con generación distribuida. Se presentan los resultados para cinco niveles de demanda por separado, antes y después de la reconfiguración de la red. En las figuras las marcas de clase son los puntos medios de los intervalos de voltaje en por unidad. En la Tabla 3.54 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 50% y en la Figura 3.47 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.54 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.999	1.014	1.007	3238	0.999	1.014	1.007	4833
2	1.014	1.029	1.022	1595	1.014	1.029	1.022	0
3	1.029	1.044	1.037	1	1.029	1.044	1.037	1
4	1.044	1.064	1.054	2	1.044	1.064	1.054	2
Total				4836				4836

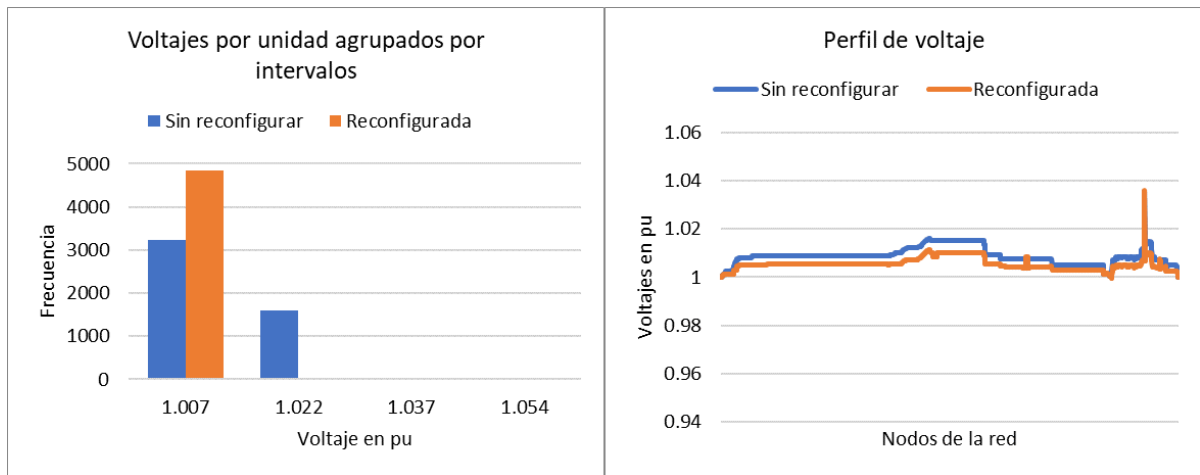


Fig. 3.47 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 50% de demanda.

En la Tabla 3.55 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 75% y en la Figura 3.48 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.55 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.998	1.014	1.006	4012	0.998	1.014	1.006	4833
2	1.014	1.030	1.022	822	1.014	1.030	1.022	0
3	1.030	1.046	1.038	0	1.030	1.046	1.038	2
4	1.046	1.067	1.057	2	1.046	1.067	1.057	1
Total				4836				4836

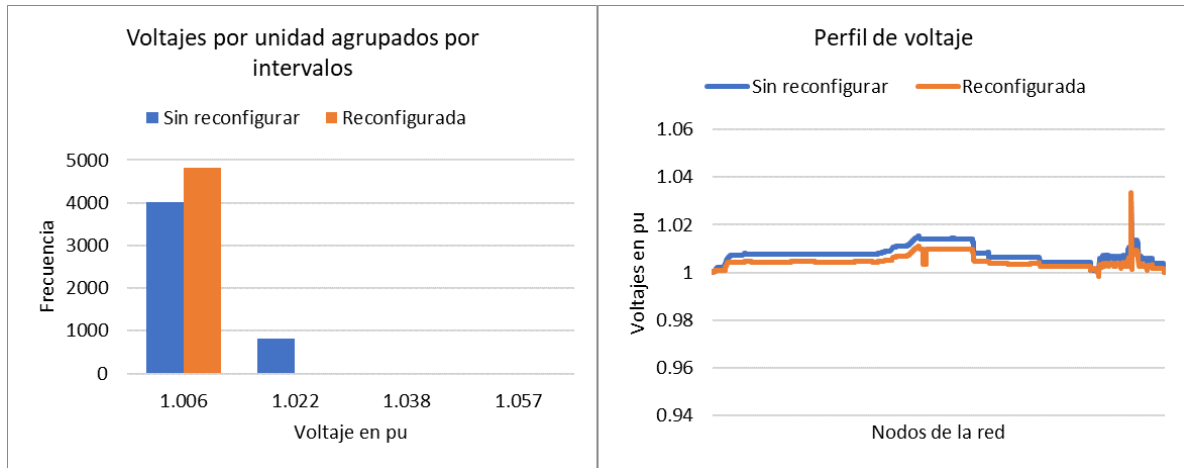


Fig. 3.48 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 75% de demanda.

En la Tabla 3.56 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 100% y en la Figura 3.49 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.56 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.997	1.013	1.005	4174	0.997	1.013	1.005	4833
2	1.013	1.029	1.021	660	1.013	1.029	1.021	1
3	1.029	1.045	1.037	0	1.029	1.045	1.037	1
4	1.045	1.070	1.057	2	1.045	1.070	1.057	1
Total				4836				4836

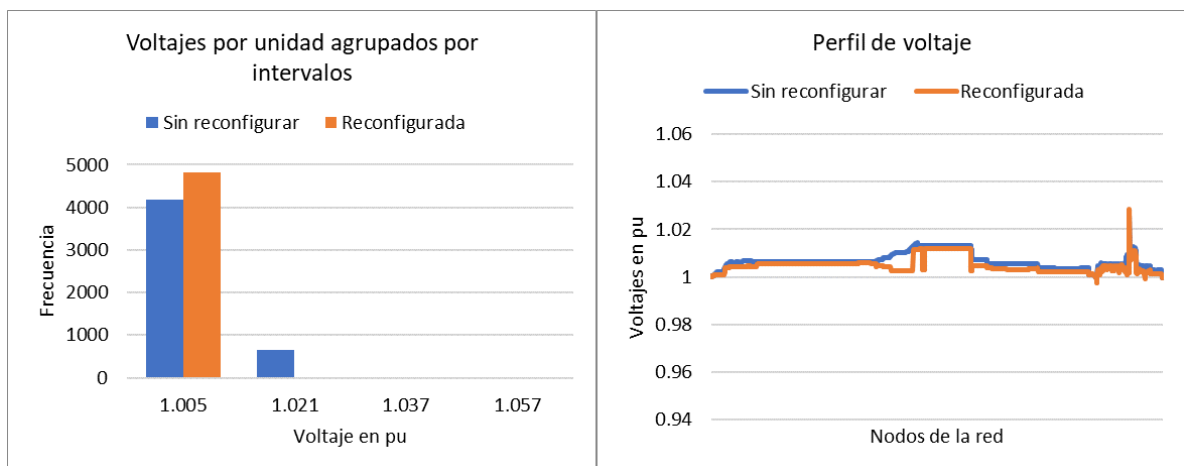


Fig. 3.49 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 100% de demanda.

En la Tabla 3.57 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 125% y en la Figura 3.50 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.57 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.996	1.011	1.004	3933	0.996	1.011	1.004	4824
2	1.011	1.026	1.019	901	1.011	1.026	1.019	9
3	1.026	1.041	1.034	0	1.026	1.041	1.034	2
4	1.041	1.072	1.057	2	1.041	1.072	1.057	1
Total				4836				4836

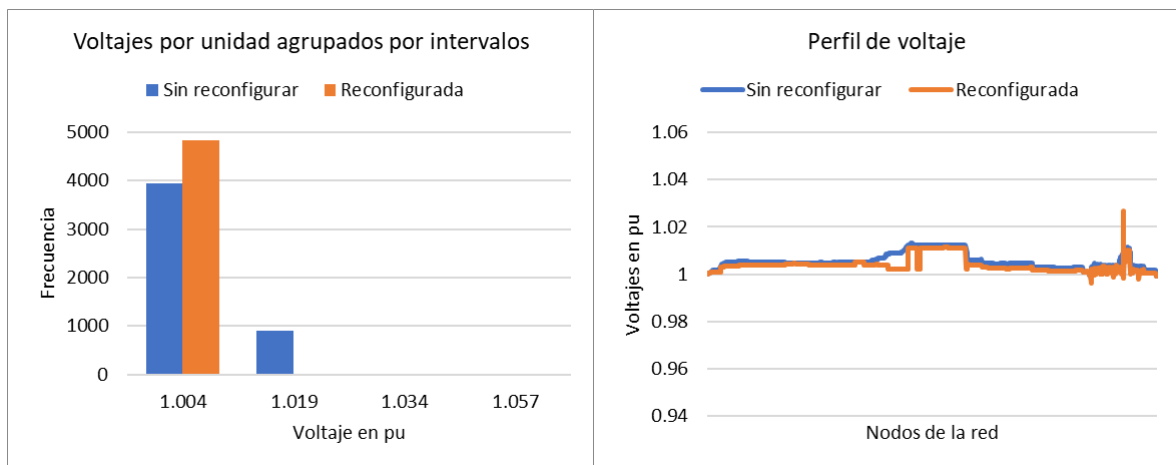


Fig. 3.50 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 125% de demanda.

En la Tabla 3.58 se presenta la distribución de frecuencias por intervalos de voltajes en los nodos para una demanda del 150% y en la Figura 3.51 el histograma y perfil de voltaje.

Tabla 3.58 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

Intervalo de clase	Red sin reconfigurar				Red reconfigurada			
	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo	V [%] Inferior	V [%] Superior	Marca clase	Frecuencia intervalo
1	0.995	1.009	1.002	4102	0.995	1.009	1.002	4655
2	1.009	1.023	1.016	732	1.009	1.023	1.016	178
3	1.023	1.037	1.030	0	1.023	1.037	1.030	2
4	1.037	1.075	1.056	2	1.037	1.075	1.056	1
Total				4836				4836

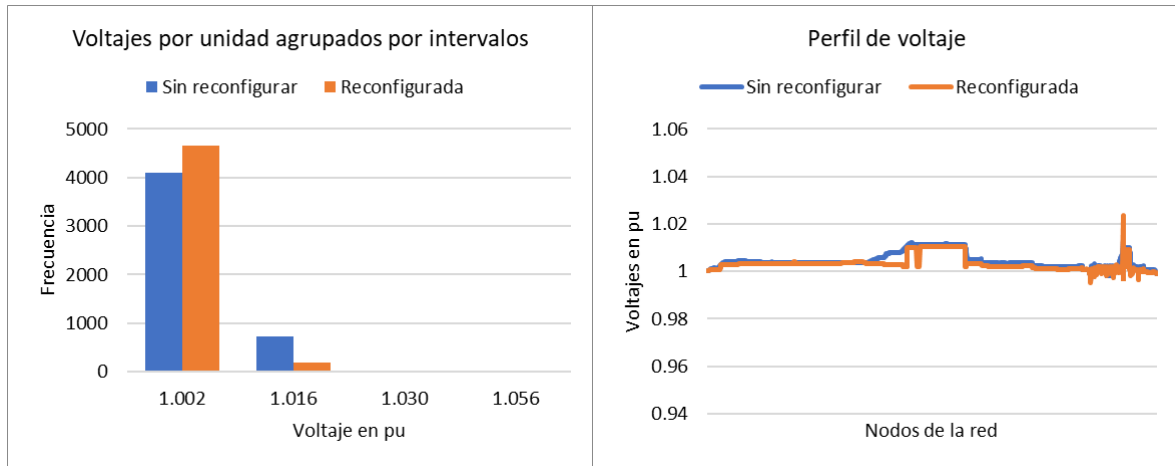


Fig. 3.51 Distribución de frecuencias por intervalos de voltaje al 150% de demanda.

3.2 Discusión

Los resultados se analizan por separado para la red IEEE de 34 nodos y para la red local de 2894 nodos.

3.2.1 Red IEEE de 34 nodos

En las siguientes subsecciones se analiza los resultados en cuanto a reducción de pérdidas de potencia activa en las líneas de la red, voltaje en los nodos y corriente en las líneas.

3.2.1.1 Pérdidas de potencia activa en la red IEEE de 34 nodos

Al aplicar el algoritmo de reconfiguración sobre la red IEEE de 34 nodos se obtiene para la red sin generación distribuida una reducción de pérdidas de potencia activa en un rango del 24.95% al 38.36% y para la red con generación distribuida una reducción de pérdidas en un rango del 33.55 al 40.38%. Después de la reconfiguración de la red, los porcentajes de reducción de pérdidas de la red con generación distribuida son mayores que los porcentajes de reducción de pérdidas sin generación distribuida. Sin embargo, la diferencia porcentual entre los dos casos es baja para los niveles de demanda del 100% al 150%. Esto se debe a que para valores bajos de demanda la potencia suministrada por la generación distribuida tiene una influencia mayor en la red, mientras que para valores altos de demanda la potencia de la generación distribuida es porcentualmente menor respecto a la carga total de la red.

Por ejemplo, para la red sin reconfigurar al 50% de demanda, la generación distribuida es el 20.2% de la potencia total suministrada mientras que para una demanda del 150%, la generación distribuida es solo el 6.2% de la potencia total como se indica en la Tabla 3.59.

En la Figura 3.52 se presenta un histograma que indica el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia en las líneas para cinco niveles de demanda.

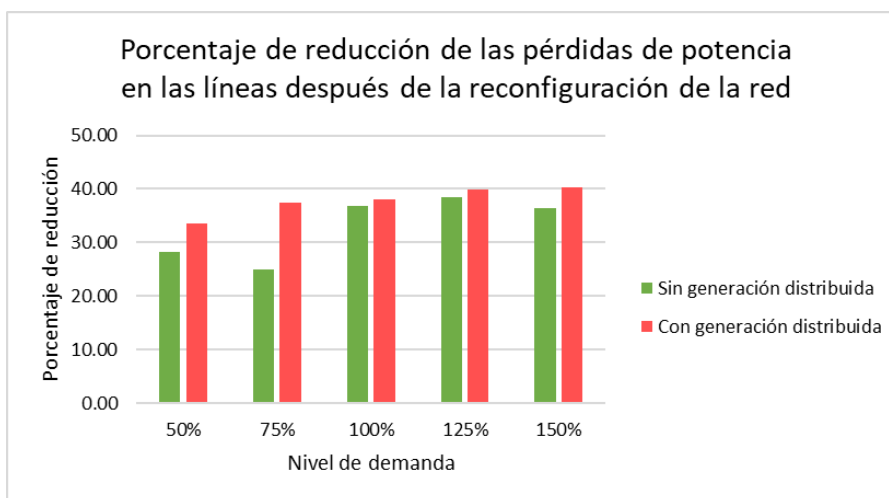


Fig. 3.52 Porcentaje de reducción de pérdidas en la red IEEE de 34 nodos.

Tabla 3.59 Porcentaje de potencia suministrada por la generación distribuida.

Nivel de demanda	Subestación [kW]	Generadores [kW]	Carga total [kW]	% Potencia subestación	% Potencia generadores
50%	790.83	200	909.51	79.8	20.2
75%	1275.92	200	1357.75	86.4	13.6
100%	1809.81	200	1807.34	90.0	10.0
125%	2422.91	200	2270.58	92.4	7.6
150%	3009.93	200	2658.22	93.8	6.2

La generación distribuida en general causa la disminución de pérdidas de potencia en las líneas, sin embargo, existen casos en que las pérdidas en las líneas aumentan al incursionar la generación distribuida. Para la red IEEE de 34 nodos al 50% de demanda, las pérdidas en las líneas son ligeramente mayores para la red con generación distribuida.

Después de reconfigurar la red, las pérdidas de potencia en las líneas son menores para la red con generación distribuida en todos los niveles de demanda del 50% al 150%, con una diferencia mayor en los niveles de demanda superiores.

La Figura 3.53 presenta los dos histogramas de las pérdidas en las líneas antes y después de la reconfiguración. En cada histograma se presenta las pérdidas con y sin generación distribuida. Se puede observar la reducción de pérdidas después de la reconfiguración.

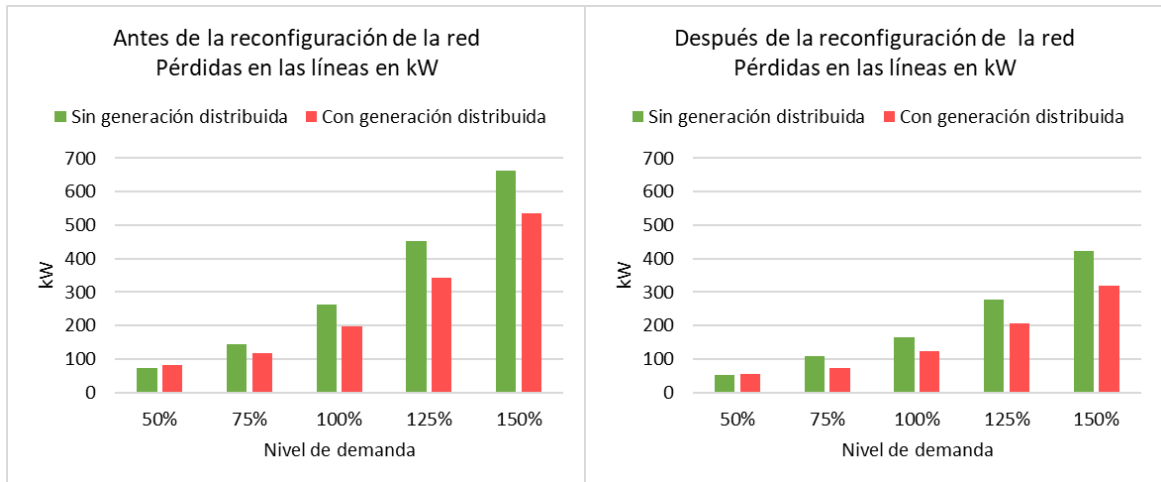


Fig. 3.53 Porcentaje de reducción de pérdidas en la red IEEE de 34 nodos.

3.2.1.2 Corrientes en las líneas de la red IEEE de 34 nodos

La red IEEE de 34 nodos tiene 8 líneas monofásicas y 24 líneas trifásicas, lo cual suma 80 líneas individuales. Los resultados de las corrientes en las líneas se han presentado como porcentajes de las capacidades de corriente en los conductores para cada línea individual.

Para el caso de la red sin generación distribuida al 50%, el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 1.1% y el valor medio máximo es del 14.1%. Para la demanda del 150%, el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 3.2% y el valor medio máximo es del 41.7%.

Para el caso de la red con generación distribuida al 50%, el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 1 % y el valor medio máximo es del 12.7%. Para la demanda del 150% el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 2.8% y el valor medio máximo es del 36.0%.

Por lo tanto, no existe sobrecarga de corriente en las líneas en ningún caso con los niveles de demanda del 50% al 150% para la red con y sin generación distribuida.

De los resultados se concluye que para la red IEEE de 34 nodos, la generación distribuida ha causado la disminución del porcentaje de corriente que circula en las líneas para todos los intervalos de demanda analizados. Por otra parte, al aumentar la demanda aumenta la corriente que circula por las líneas.

Para los dos casos de simulación con y sin generación distribuida, la reconfiguración de la red causa un cambio importante en las frecuencias de los intervalos de distribución de las corrientes en las líneas. La reconfiguración reduce el número de líneas por las cuales fluye

mayor corriente, y aumenta el número de líneas por las cuales circula menor corriente. Esa tendencia se puede observar en todas las figuras para la red con y sin generación distribuida. Por ejemplo, para la red sin generación distribuida al 125% de demanda existen 24 líneas con un porcentaje medio de corriente del 24.3%, mientras que después de la reconfiguración existen solo 5 líneas con ese porcentaje de corriente. Después de la reconfiguración aumenta la cantidad de líneas que tienen menores porcentajes de corriente, para el ejemplo que se describe aumentan la cantidad de líneas con porcentajes de corriente bajos del 8.1% de 9 a 25 líneas.

3.2.1.3 Voltajes en los nodos de la red IEEE de 34 nodos

La red IEEE de 34 nodos tiene algunos nodos que son trifásicos, bifásicos y monofásicos, por lo que en total existen 95 terminales de fases de voltaje para los 34 nodos. La red original IEEE de 34 nodos no contiene generación distribuida, sin embargo, para este trabajo se ha añadido dos generadores sincrónicos en dos nodos de la red para realizar la reconfiguración de la red con generación distribuida.

Para el caso de la red sin generación distribuida, al analizar los resultados de los voltajes antes y después de la reconfiguración de la red se observa que la reconfiguración de la red aumenta la cantidad de nodos que tienen un voltaje por unidad cercano a la unidad y disminuye la cantidad de nodos que están más alejados de la unidad. Por ejemplo, para la red sin generación distribuida al 100% de demanda se tiene 50 terminales de los nodos que tienen un voltaje promedio en por unidad de 1.041 y luego de la reconfiguración disminuye a 18 terminales. Por otra parte, para el ejemplo que se describe, existen 5 terminales con un voltaje promedio de 0.989 por unidad y luego de la reconfiguración la cantidad de terminales con este nivel de voltaje aumenta a 24.

En algunos casos en los que el voltaje en los nodos estaba fuera del rango admisible definido por el ARCONEL, se ha logrado subir a niveles admisibles después de la reconfiguración de la red. Por ejemplo, para la red sin generación distribuida al 125% de demanda se tiene 3 terminales con voltaje medio de 0.922 por unidad, luego de la reconfiguración no existen terminales con ese nivel de voltaje, y el mínimo voltaje medio en los nodos es de 0.941 por unidad.

Sin embargo, también existen casos en los que la reconfiguración de la red no puede solucionar los voltajes en los nodos fuera del rango admisible definido por el ARCONEL, como es el caso de niveles muy altos de demanda, en los cuales algunos terminales en los nodos tienen voltajes debajo de los niveles permisibles, esto se debe a un límite físico

de la red, es decir no existe una configuración que mantenga los voltajes de los nodos en los rangos permisibles a medida que la demanda aumenta.

Por ejemplo, para la red con generación distribuida al 150% de demanda existen 9 terminales que tienen un voltaje medio de 0.939 por unidad, y luego de la reconfiguración se reduce a 2 terminales con ese voltaje, lo cual es una mejora, sin embargo, todavía quedan 2 terminales que están ligeramente bajo el rango admisible. Para este caso en el límite superior se tiene un voltaje medio de 1.074 por unidad, este valor de voltaje corresponde al voltaje más alto obtenido en todos los casos analizados, lo cual está sobre el nivel de voltaje de 0.96 por unidad que establece la normativa del ARCONEL.

Para la red sin generación distribuida al 150% de demanda se tiene un voltaje medio mínimo de 0.882 por unidad y luego de la reconfiguración el voltaje medio mínimo es de 0.91 por unidad.

Para la mayoría de los niveles de demanda analizados se cumple en todos los nodos con el rango de $\pm 6\%$ establecido por la normativa actual del ARCONEL Nro. 053/18, sin embargo, como se presentó en los ejemplos anteriores, también existen algunos nodos con voltajes fuera del rango admisible, esto se debe a que toda red tiene un límite físico de demanda, sobre el cual no existe una solución de reconfiguración que limite los voltajes al rango admisible de $\pm 6\%$. En la normativa anterior No. CONELEC 004/01 el nivel de demanda admisible era de $\pm 10\%$ para medio voltaje, para esta normativa el voltaje de 1.074 por unidad estaría dentro del rango permisible.

En general luego de la reconfiguración la red IEEE de 34 nodos existe una mejora en el perfil de voltaje, ya que aumenta la cantidad de nodos que se acercan a 1.0 por unidad.

3.2.2 Red local de 2894 nodos

En las siguientes subsecciones se analiza los resultados en cuanto a reducción de pérdidas de potencia activa en las líneas de la red, voltaje en los nodos y corriente en las líneas.

3.2.2.1 Pérdidas de potencia activa de la red de 2894 nodos

La red de 2894 nodos está operando actualmente con generación distribuida, sin embargo, se ha realizado la reconfiguración de la red para los dos casos sin y con generación distribuida. En la Figura 3.54 se presenta un histograma que indica el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa en las líneas para los cinco niveles de demanda.

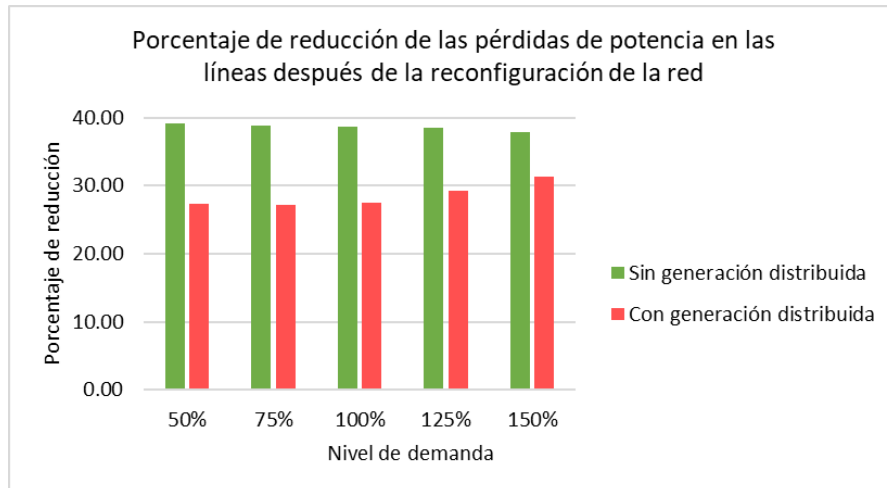


Fig. 3.54 Porcentaje de reducción de pérdidas de la red de 2894 nodos.

Cuando esta red funciona al 50% de demanda, los generadores distribuidos superan el valor total de demanda de la red y por lo tanto suministran el total de potencia a la red. Las pérdidas de potencia en las líneas son bastante bajas para esta red, esto debido a que la mayor parte de la red se encuentra operando a un nivel de demanda bajo.

Al aplicar el algoritmo de reconfiguración sobre la red local de 2894 nodos se obtiene para la red sin generación distribuida una reducción de pérdidas de potencia activa en un rango del 37.84% al 39.06% y para la red con generación distribuida una reducción de pérdidas de potencia activa en un rango del 27.15 al 31.34%. Como se observa en las Tablas anteriores de resultados de potencia, cuanto se incrementa la demanda, las pérdidas en las líneas y en los transformadores se incrementan.

En la Figura 3.55 se presenta las pérdidas en las líneas de la red con y sin generación distribuida. En los histogramas de la Figura se puede notar la reducción de pérdidas en las líneas después de la reconfiguración.

La generación distribuida en general disminuye las pérdidas de potencia en las líneas de la red, sin embargo, también existen casos en los que se incrementa las pérdidas de potencia en la red. Para la red de 2894 nodos antes y después de la reconfiguración se tiene que para los niveles de demanda bajos del 50% y 75% las pérdidas en las líneas son mayores con generación distribuida y para los niveles de demanda altos del 125% al 150% las pérdidas en las líneas son menores con generación distribuida. Cuando la demanda está alrededor del 100%, las pérdidas en las líneas tienen poca diferencia con y sin generación distribuida.

Esto se debe al nivel de potencia que suministran la generación distribuida y la subestación en cada nivel de demanda. Para esta red, la generación distribuida hidroeléctrica tiene una influencia importante respecto a la carga total de la red, lo cual se presenta en la Tabla 3.60.

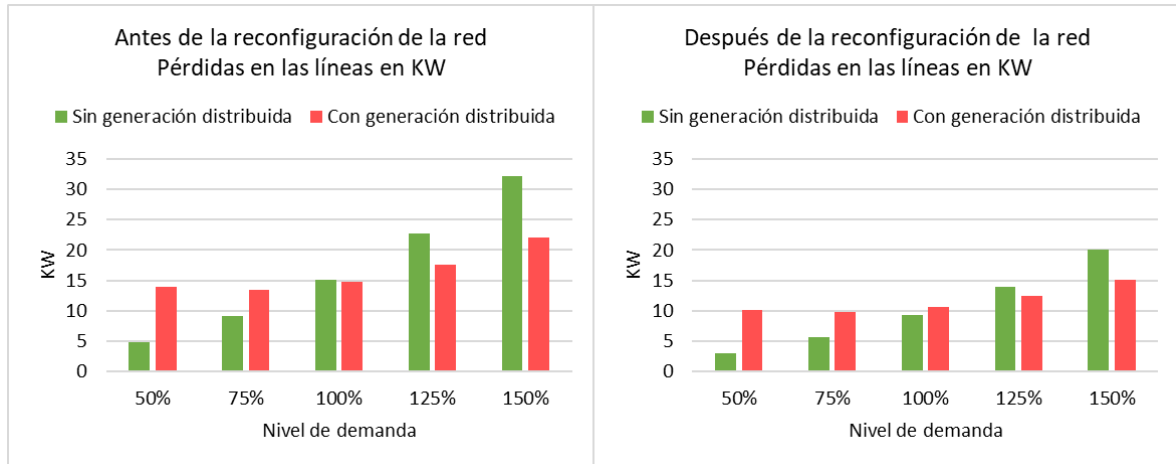


Fig. 3.55 Pérdidas de la red de 2894 con y sin generación distribuida.

Tabla 3.60 Porcentaje de potencia suministrada por la generación distribuida.

Nivel de demanda	Subestación [kW]	Generadores [kW]	Carga total [kW]	% Potencia subestación	% Potencia generadores
50%	-177.5	1780	1474.34	0	100
75%	559.65	1780	2211.51	23.9	76.1
100%	1298.68	1780	2948.68	42.2	57.8
125%	2039.6	1780	3685.84	53.4	46.6
150%	2782.45	1780	4423.01	61.0	39.0

3.2.2.2 Corrientes en las líneas de la red de 2894 nodos

La red local de 2894 nodos tiene 1468 líneas monofásicas, 153 líneas bifásicas y 794 líneas trifásicas, lo cual suma 4156 líneas individuales. Los resultados de las corrientes en las líneas se han presentado como porcentajes de las capacidades de corriente en los conductores para cada línea individual.

Para el caso de la red sin generación distribuida al 50%, el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 1.9% y el valor medio máximo es del 24.2%. Para la demanda del 150% el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 4.8% y el valor medio máximo es del 62.2%. Por lo tanto, no existe sobrecarga de corriente en las líneas en ningún caso con los niveles de demanda del 50% al 150%

Para el caso de la red con generación distribuida al 50%, el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 2.2% y el valor medio máximo es del 28.8%. Para la demanda del 150% el valor medio mínimo del intervalo de frecuencias es del 3.6% y el valor medio máximo es del 46.7%. Por lo tanto, no existe sobrecarga de corriente en las líneas en ningún caso con los niveles de demanda del 50% al 150%.

En la red local de 2994 nodos es importante notar que al 50% de demanda, la generación distribuida suministra el total de potencia a la red, pues la capacidad de potencia de la generación distribuida es superior a la demanda en este nivel.

En la red local de 2894 nodos en los niveles de demanda superiores al 100%, se tiene que la corriente en las líneas es menor para la red con generación distribuida, mientras que para los niveles de demanda bajos del 50% y 75% la corriente es mayor en la red con generación distribuida. Esto concuerda con el histograma de pérdidas de potencias con y sin generación distribuida.

Para los dos casos de simulación con y sin generación distribuida, la reconfiguración de la red causa un cambio en las frecuencias de los intervalos de distribución de las corrientes en las líneas. La reconfiguración, en general reduce el número de líneas por las cuales fluye mayor corriente, y aumenta el número de líneas por las cuales circula menor corriente. Por ejemplo, para la red sin generación distribuida al 125% de demanda existen 139 líneas con un porcentaje medio de corriente del 20.2%, mientras que después de la reconfiguración existen 93 líneas con ese porcentaje de corriente. Por otra parte, después de la reconfiguración aumenta la cantidad de líneas que tienen menores porcentajes de corriente, para el ejemplo que se describe aumentan la cantidad de líneas con porcentajes de capacidad de corriente del 12.1% de 160 a 205 líneas.

Para todos los intervalos de demanda, la mayor cantidad de líneas operan con un nivel de corriente que no supera el 10% de su capacidad de corriente. Esto ocurre con por lo menos 86% de las líneas de la red.

3.2.2.3 Voltajes en los nodos de la red local de 2894 nodos

La red local tiene 2894 nodos cada uno con sus terminales de fase. Esta red tiene 1432 terminales para la fase A, 1610 terminales para la fase B y 1794 para la fase C, lo cual suma 4836 terminales de fase. Para esta red se presentó los resultados de voltaje agrupándolos en cuatro intervalos de distribución de frecuencia. Se utilizó únicamente cuatro intervalos de frecuencia debido a que la distribución de niveles de voltaje es muy

uniforme y casi todos los nodos tienen voltaje de 1 por unidad o cercanos a 1, antes y después de la reconfiguración de la red.

La reconfiguración de la red incrementa el número de nodos con voltajes de uno por unidad o cercanos a uno por unidad. Esto ocurre para los dos casos de la red con y sin generación distribuida.

Para la red sin generación distribuida, el perfil de voltaje es homogéneo y prácticamente constante con un valor de 1 por unidad para todos los nodos. Sin embargo, con la reconfiguración óptima en todos los niveles de demanda se observa un aumento del número de nodos con cercanos a 1 por unidad. Por ejemplo, al 150% de nivel de demanda la red tiene 418 terminales con un voltaje de 0.999 por unidad y después de la reconfiguración el número de terminales con este voltaje aumenta 2953. La diferencia de voltaje es mínima en todos los niveles de demanda de la red sin generación distribuida.

Para la red con generación distribuida al 100% de demanda, antes de la reconfiguración existen 4174 terminales de fase con un voltaje de 1.005 por unidad, y después de la reconfiguración aumentan a 4833 terminales con ese valor por unidad. Solo 3 terminales de voltaje tienen un valor por unidad de 1.06, que corresponden al nodo en el cual están conectados los dos generadores sincrónicos.

La generación distribuida causa un incremento de voltaje en los nodos, para la red de 2894 nodos se aprecia un incremento aproximado de hasta 0.02 por unidad según el nivel de demanda, especialmente en los nodos cercanos a la fuente de generación distribuida hidroeléctrica.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se ha cumplido el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de titulación, se ha desarrollado una metodología para la reconfiguración de redes de distribución que contienen generación distribuida basada en el algoritmo de colonia de hormigas para reducir las pérdidas de potencia en las líneas, desarrollado el algoritmo de reconfiguración, programación en MATLAB del algoritmo de colonia de hormigas, programación de una rutina que permita comandar desde MATLAB los flujos de potencia en OpenDSS, desarrollado una rutina que permite construir la red local en OpenDSS a partir de la base de datos de la red entregada por la distribuidora y aplicando la metodología de reconfiguración sobre dos redes de distribución, la red IEEE de 34 nodos y la red local con generación distribuida hidroeléctrica considerando diferentes niveles de demanda.

Para validar el funcionamiento del algoritmo de colonia de hormigas, en este trabajo se aplicó la metodología de reconfiguración sobre dos redes de distribución eléctrica estándar de 33 nodos y de 69 nodos. Para cada red se utilizó la misma numeración de las líneas, nodos y lazos que se encuentran en publicaciones de varios artículos científicos. Se comprobó la efectividad del algoritmo desarrollado para encontrar el óptimo de la reconfiguración, al encontrar en este trabajo los mismos dispositivos de maniobra que se abren en el óptimo de la reconfiguración.

Todas las preguntas de investigación planteadas al inicio de este trabajo han sido respondidas en los capítulos correspondientes al tema. En el capítulo dos se responde detalladamente a las dos primeras preguntas de investigación, cómo desarrollar una metodología aplicando un algoritmo adaptado de colonia de hormigas para resolver el problema de reconfiguración de la topología de una red de distribución y cómo implementar la programación de la reconfiguración de la red de distribución eléctrica con la función objetivo de reducir las pérdidas en las líneas y con las restricciones de topología radial de la red, voltaje en los nodos en un rango admisible y corriente en las líneas dentro de los límites de su capacidad. En el capítulo tres se responde a las preguntas sobre el impacto de la reconfiguración de las redes de distribución y el impacto de la generación distribuida sobre la red de distribución IEEE de 34 nodos y la red local respecto a las pérdidas de potencia en las líneas, corriente en las líneas y voltaje en los nodos. Se ha presentado los resultados detallados con tablas de distribución de frecuencia por intervalos, histogramas y cálculos de porcentajes para los 24 niveles de demanda con y sin generación distribuida.

La aplicación del algoritmo de colonia de hormigas para la reconfiguración de las redes de distribución eléctrica permite obtener una reducción importante de las pérdidas de potencia en las líneas. En el caso de la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida, para los cinco niveles de demanda analizados se consigue una disminución de las pérdidas en las líneas después de la reconfiguración en un rango del 24.95% al 38.36% y una reducción del 33.55% al 40.38 % para la red con generación distribuida. Al aplicar el algoritmo de colonia de hormigas sobre la red local de 2894 nodos cuando no está conectada a la central de generación hidroeléctrica se consigue una reducción de pérdidas en las líneas del 37.84% al 39.06% y cuando la red está conectada a la central de generación hidroeléctrica se consigue una reducción de pérdidas en las líneas en un rango de 27.15% al 31.34%.

En general la reconfiguración óptima de la red disminuye la magnitud de las corrientes en las líneas para todos los intervalos de demanda utilizados que están entre el 50% y 150%, lo cual permite la reducción de pérdidas de potencia total de la red. La red IEEE de 34 nodos no tiene líneas que excedan su capacidad de corriente para el rango de demanda del 50% al 150%.

La reconfiguración de la red mediante el algoritmo de colonia de hormigas cambia la cantidad de líneas dentro de los intervalos de distribución de corriente. La reconfiguración óptima reduce el número de líneas por las cuales fluye mayor corriente, y aumenta el número de líneas por las cuales circula menor corriente. Por ejemplo, para la red IEEE de 34 nodos sin generación distribuida al 100% de demanda, antes de la reconfiguración existen 29 líneas con una marca de clase de corriente del 19.1%, y después de la reconfiguración existen solo 8 líneas con ese porcentaje de corriente. Por otra parte, la cantidad de líneas con porcentajes de corriente bajos aumenta, para el ejemplo descrito la cantidad de líneas con una marca de clase de corriente del 6.4% es de 11 líneas antes de la reconfiguración y de 27 líneas después de la reconfiguración.

El incremento de demanda causa un incremento de la corriente en las líneas para las dos redes de distribución con y sin generación distribuida.

La red local de 2894 nodos tiene la mayoría de las líneas operando a menos del 10% de su capacidad de corriente. Esto ocurre con alrededor del 86% de las líneas de esta red. Por lo tanto, los resultados indican que la red trabaja sin sobrecarga en las líneas para todos los intervalos de demanda del 50% al 150%.

La generación distribuida aumenta el nivel de voltaje en los nodos cercanos a su ubicación. Por ejemplo, la red IEEE de 34 nodos sin reconfigurar al 125% de demanda tiene tres

terminales con un voltaje medio de 0.922 por unidad y al conectar la generación distribuida no existen nodos con ese voltaje, con generación distribuida el voltaje medio mínimo en los nodos es de 0.962 por unidad.

La generación distribuida en general disminuye el nivel de corriente que circula en las líneas. Sin embargo, también existen casos en los que la red con generación distribuida puede incrementar la corriente en las líneas, lo cual ocurre al 50% de demanda para la red IEEE de 34 nodos y a determinados niveles de demanda para la red local de 2894 nodos. En la red local de 2894 nodos para los niveles de demanda superiores al 100%, se tiene que la corriente en las líneas es menor para la red con generación distribuida, mientras que para los niveles de demanda bajos del 50% y 75% la corriente es mayor en la red con generación distribuida. La razón del cambio en el comportamiento de la red en los niveles bajos de demanda es que la generación distribuida suministra el total de potencia a la red para valores bajos de demanda, mientras que para demandas altas la red es alimentada tanto por la generación distribuida como por la subestación.

La reconfiguración de la red mejora el perfil de voltaje en la mayoría de los nodos, se consigue que aumente la cantidad de nodos que se encuentran cercanos al voltaje de uno por unidad. Las distribuciones de frecuencia por intervalos de voltaje indican que la red de 2894 nodos tiene en todos los niveles de demanda un perfil de voltaje casi constante en un nivel de uno por unidad, excepto en el nodo de ubicación de la estación hidroeléctrica.

Las soluciones que proporciona la metodología presentada son siempre factibles, es decir siempre cumplen con la topología radial, en el algoritmo propuesto no se requiere realizar correcciones al espacio de soluciones. En varios algoritmos de reconfiguración mediante colonia de hormigas encontrados en publicaciones científicas, es necesario realizar correcciones mediante reglas en el flujo del algoritmo cuando aparecen soluciones no factibles en ciertos recorridos de las hormigas. En este trabajo no se requiere correcciones debido a que la topología radial se crea en el proceso de avance de la hormiga a través de los lazos de la red, la excursión de la hormiga es realizada sólo a través de espacios de solución factibles.

El algoritmo de colonia desarrollado en este trabajo se diferencia de varios algoritmos encontrados en la literatura en que el recorrido de la hormiga se realiza a través del co-arbol de la red, es decir la hormiga transita a través de los elementos de los lazos que se deben abrir después de la reconfiguración. En varias publicaciones científicas se encuentra que las matrices de feromona y visibilidad en las que se basa el algoritmo de colonia de hormigas se forman utilizando los elementos dentro de cada lazo de la red, mientras que

en este trabajo las matrices de feromona y visibilidad se han creado utilizando los elementos de los lazos consecutivos de la red de modo que los elementos de las matrices contienen información de la transición de la hormiga entre lazos.

El software de modelación y simulación de redes de distribución OpenDSS es de gran utilidad para trabajos de investigación, es una herramienta profesional para el análisis de redes distribución y realiza las simulaciones en un tiempo muy corto, en el orden de las décimas de segundo para las redes utilizadas en este trabajo. La velocidad de ejecución de los flujos de potencia en OpenDSS permite que algoritmos complejos de reconfiguración de redes se ejecuten en un tiempo aceptable. El algoritmo de colonia de hormigas requiere de la ejecución de flujos de potencia cientos de veces y para redes de gran tamaño podría ser un proceso lento. El tiempo de ejecución del programa de reconfiguración de la red depende principalmente del tamaño de la red, lo cual afecta proporcionalmente el tiempo de ejecución de varios procesos como son la lectura de las bases de datos de los parámetros de la red, la creación de los comandos en MATLAB para OpenDSS, el envío y recepción de datos entre OpenDSS y MATLAB, las estructuras de programación, la creación de Tablas de resultados, la escritura de resultados en las hojas de cálculo y la interfaz gráfica del software. El tiempo de ejecución del algoritmo de colonia de hormigas para la red IEEE de 34 nodos es de alrededor de 13 segundos y para la red de 2894 nodos es de alrededor de 68.5 segundos. La diferencia de tiempo de ejecución es de aproximadamente cinco a uno, debido a que la red local tiene una cantidad de elementos mucho mayor que la red IEEE de 34 nodos.

4.2 Recomendaciones

Para la construcción de redes reales en OpenDSS que contienen cientos de elementos es necesario utilizar bases de datos en Excel con los elementos del mismo tipo para las líneas, transformadores, cargas, capacitores, generadores. Mediante programación se transfiere los datos a un programa que permita el tratamiento de datos y la generación de código para la construcción de la red, en este caso es recomendable utilizar MATLAB o un lenguaje de programación que permita la comunicación con OpenDSS. La red de 2894 nodos utilizada en este trabajo tiene miles de elementos, pero con la utilización de estructuras de programación y almacenamiento de los datos en Excel se ha optimizado la construcción de la red sin importar su gran tamaño.

La reconfiguración de las redes de distribución puede utilizarse con fines operativos considerando los niveles de demanda para el periodo que se requiera. Por lo cual es

recomendable que se aplique en redes de distribución que dispongan alternativas de reconfiguración en cuanto a líneas de enlace.

Las simulaciones de reconfiguraciones de redes de distribución pueden ser utilizada también con fines de planificación, para determinar alternativas de topologías radiales que producen las menores pérdidas de potencia en las líneas.

Se recomienda que las empresas distribuidoras tengan bases de datos de las curvas de demanda diaria por cada sector y tipo de demanda, residencial, comercial e industrial.

Se recomienda a las empresas distribuidoras que actualicen con valores exactos los datos de los transformadores de distribución. En la red local utilizada en este trabajo existen 479 transformadores, por lo que una simulación con los datos exactos de cada transformador afecta los resultados de los flujos de potencia de la red.

Como alternativa para subir los niveles de voltaje es recomendable utilizar generación distribuida en nodos específicos de la red. Para el caso de estudio de la red IEEE de 34 nodos se realizó la ubicación experimental de generadores sincrónicos en dos nodos de la red y se comprobó que existe una mejora de voltaje en los nodos en los que se coloca pequeñas fuentes de generación distribuida.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Ramraj, «Capacitor Placement and Reconfiguration of Distribution System with hybrid Fuzzy-Opposition based Differential Evolution Algorithm», *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, pp. 64-69, ene. 2013, doi: 10.9790/1676-0646469.
- [2] G. Mahendran y C. Govindaraju, «Flower Pollination Algorithm for Distribution System Phase Balancing Considering Variable Demand», *Microprocessors and Microsystems*, p. 103008, feb. 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103008.
- [3] M. E. Baran y F. F. Wu, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, n.º 2, pp. 1401-1407, abr. 1989, doi: 10.1109/61.25627.
- [4] H.-D. Chiang y R. Jean-Jumeau, «Optimal network reconfigurations in distribution systems. I. A new formulation and a solution methodology», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n.º 4, pp. 1902-1909, oct. 1990, doi: 10.1109/61.103687.
- [5] H.-D. Chiang y R. Jean-Jumeau, «Optimal network reconfigurations in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n.º 3, pp. 1568-1574, jul. 1990, doi: 10.1109/61.58002.
- [6] Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Jin-O Kim, Joong-Rin Shin, y K. Y. Lee, «An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, n.º 4, pp. 1070-1078, oct. 2002, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803823.
- [7] D. Das, «A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, n.º 1, pp. 202-209, ene. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852335.
- [8] D. P. Bernardon, V. J. Garcia, A. S. Q. Ferreira, y L. N. Canha, «Electric distribution network reconfiguration based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm», *Electric Power Systems Research*, vol. 79, n.º 10, pp. 1400-1407, oct. 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2009.04.012.
- [9] H. Fathabadi, «Power distribution network reconfiguration for power loss minimization using novel dynamic fuzzy c-means (dFCM) clustering based ANN approach», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 96-107, jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.077.
- [10] P. Mariaraja, T. Manigandan, y S. Thiruvankadam, «An expert system for distribution system reconfiguration through fuzzy logic and flower pollination algorithm», *Measurement and Control*, vol. 51, n.º 9-10, pp. 371-382, nov. 2018, doi: 10.1177/0020294018790774.
- [11] G. Namachivayam, C. Sankaralingam, S. K. Perumal, y S. T. Devanathan, «Reconfiguration and Capacitor Placement of Radial Distribution Systems by Modified Flower Pollination Algorithm», *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, n.º 13, pp. 1492-1502, ago. 2016, doi: 10.1080/15325008.2016.1172281.
- [12] H. D. de Macedo Braz y B. A. de Souza, «Distribution Network Reconfiguration Using Genetic Algorithms with Sequential Encoding: Subtractive and Additive Approaches», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, n.º 2, pp. 582-593, may 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2059051.

- [13] J. Moshtagh y S. Ghasemi, «Optimal distribution system reconfiguration using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)», *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 1, pp. 12-21, ene. 2013.
- [14] N. C. Sahoo y K. Prasad, «A fuzzy genetic approach for network reconfiguration to enhance voltage stability in radial distribution systems», *Energy Conversion and Management*, vol. 47, n.º 18, pp. 3288-3306, nov. 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2006.01.004.
- [15] A. Swarnkar, N. Gupta, y K. R. Niazi, «A novel codification for meta-heuristic techniques used in distribution network reconfiguration», *Electric Power Systems Research*, vol. 81, n.º 7, pp. 1619-1626, jul. 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.03.020.
- [16] A. Roy, S. Roy, y P. P. Biswas, «Minimizing Loss in a Larger Distribution Network by Optimal Network Reconfiguration and DG Allotment using an Advanced Adaptive Differential Evolution», vol. 8, n.º 4, p. 8, 2018.
- [17] R. M. Kumar y K. Thanushkodi, «Network reconfiguration and restoration in distribution systems through opposition based differential evolution algorithm and PGSA», en *2013 International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET)*, jul. 2013, pp. 284-290, doi: 10.1109/ICCTET.2013.6675967.
- [18] C. Wang, X. Wang, y J. Liu, «Distribution Network Reconfiguration Based on Differential Evolution Algorithm», *AASRI Procedia*, vol. 3, pp. 203-208, ene. 2012, doi: 10.1016/j.aasri.2012.11.034.
- [19] A. Tiguercha, A. A. Ladjici, y M. Boudour, «Optimal radial distribution network reconfiguration based on multi objective differential evolution algorithm», en *2017 IEEE Manchester PowerTech*, jun. 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2017.7980932.
- [20] A. LANDEROS, S. KOZIEL, y M. F. ABDEL-FATTAH, «Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization», *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, n.º 3, pp. 589-598, may 2019, doi: 10.1007/s40565-018-0480-7.
- [21] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer, y M. A. L. Badr, «Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm», *Electric Power Systems Research*, vol. 80, n.º 8, pp. 943-953, ago. 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2010.01.001.
- [22] K. K. LI, T. S. CHUNG, G. J. CHEN, y G. Q. TANG, «A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction», *Electric Power Components and Systems*, vol. 32, n.º 6, pp. 571-585, jun. 2004, doi: 10.1080/15325000490228414.
- [23] X. Xu, C. Wang, y X. Feng, «A Tabu Search Approach for Distribution Network Reconfiguration Based on GIS», en *2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, may 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWISA.2009.5072681.
- [24] D. Zhang, Z. Fu, y L. Zhang, «An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems», *Electric Power Systems Research*, vol. 77, n.º 5, pp. 685-694, abr. 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.06.005.
- [25] R. Priyadarshini, R. Prakash, y Shankaralingappa C.B, «Network Reconfiguration of radial distribution network using Cuckoo Search Algorithm», en *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, dic. 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443612.
- [26] T. Nguyen y V. Truong, «Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 68, jun. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.075.

- [27] T. T. Nguyen, A. V. Truong, y T. A. Phung, «A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 801-815, jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030.
- [28] T. T. Tran, D. N. Vo, y P. Vasant, «Distribution Network Reconfiguration Using One Rank Cuckoo Search Algorithm», p. 7, 2016.
- [29] K. Liu, W. Sheng, Y. Liu, y X. Meng, «A Network Reconfiguration Method Considering Data Uncertainties in Smart Distribution Networks», *Energies*, vol. 10, n.º 5, pp. 1-17, 2017.
- [30] A. A. El-Ela, R. A. El-Sehiemy, y N. K. El-Ayaat, «Multi-objective Binary Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Distribution System reconfiguration», nov. 2019, Accedido: ene. 31, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://easychair.org/publications/preprint/HC4n>.
- [31] I. Atteya, H. Ashour, N. Fahmi, y D. Strickland, «Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation», *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, pp. 2505-2508, oct. 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.1286.
- [32] R. Pegado y Y. Molina, «Distribution Network Reconfiguration with the OpenDSS using Improved Binary Particle Swarm Optimization», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, jul. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8444386.
- [33] R. Pegado, Z. Ñaupari, Y. Molina, y C. Castillo, «Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO», *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 206-213, abr. 2019, doi: 10.1016/j.eprsr.2018.12.030.
- [34] G. Xiaozhi, L. Linchuan, y X. Hailong, «Network Reconfiguration at the Distribution System with Distributed Generators», en *Life System Modeling and Intelligent Computing*, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 400-409, doi: 10.1007/978-3-642-15597-0_44.
- [35] I. I. Atteya, H. A. Ashour, N. Fahmi, y D. Strickland, «Distribution network reconfiguration in smart grid system using modified particle swarm optimization», en *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, nov. 2016, pp. 305-313, doi: 10.1109/ICRERA.2016.7884556.
- [36] W. Gao, N. Tang, y X. Mu, «A Distribution Network Reconfiguration Algorithm Based on Hopfield Neural Network», en *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, oct. 2008, vol. 3, pp. 9-13, doi: 10.1109/ICNC.2008.147.
- [37] P. Kayal, S. Chanda, y C. K. Chanda, «An ANN based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network», en *2011 International Conference on Power and Energy Systems*, dic. 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICPES.2011.6156643.
- [38] R. Rajaram, K. S. Kumar, S. P. Karthikeyan, y J. E. Belwin, «Distribution System Reconfiguration for Loss Minimization Using Modified Artificial Neural Network Approach of 16 Bus and 33 Bus Standard Test Systems with an Compensator», *Applied Mechanics and Materials*, 2014. <https://www.scientific.net/AMM.573.767> (accedido feb. 06, 2020).
- [39] K. S. Kumar, K. Rajalakshmi, y S. P. Karthikeyan, «A modified artificial neural network based Distribution System reconfiguration for loss minimization», en *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, ene. 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAEE.2014.6838513.

- [40] V. S. Patel, S. Chakrabarti, y S. N. Singh, «A hopfield neural network based reconfiguration algorithm for power distribution systems», en *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*, jul. 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/TENCONSpring.2017.8070048.
- [41] A. B. Kanase y S. R. Gengaje, «Reconfiguration of Electrical Distribution Network using Artificial Neural Network», p. 10.
- [42] P. Ravi Babu y R. Kumar Tiwari, «Reconfiguration of a Radial Distribution Network through Whale Optimization Algorithm», vol. 14, n.º 14, p. 7, 2019.
- [43] R. Kumar Tiwari y P. Ravi Babu, «Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution System by Whale Optimization Algorithm», *IJRTE*, vol. 8, n.º 3, pp. 2392-2398, sep. 2019, doi: 10.35940/ijrte.C4664.098319.
- [44] S. M. A. Elazim y E. S. Ali, «Improved Whale Optimization Algorithm for Optimal Network Reconfiguration», *International Journal of Communications*, vol. 04, dic. 2019, Accedido: ene. 31, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://iaras.org/iaras/home/caijoc/improved-whale-optimization-algorithm-for-optimal-network-reconfiguration>.
- [45] T. Zang, Z. He, y D. Ye, «Bacterial Foraging Optimization Algorithm with Particle Swarm Optimization Strategy for Distribution Network Reconfiguration», en *Advances in Swarm Intelligence*, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 365-372, doi: 10.1007/978-3-642-13495-1_45.
- [46] K. Sathish Kumar y T. Jayabarathi, «Power system reconfiguration and loss minimization for an distribution systems using bacterial foraging optimization algorithm», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 36, n.º 1, pp. 13-17, mar. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.016.
- [47] S. Naveen, K. Kumar, y K. Rajalakshmi, «Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 69, jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.090.
- [48] M. Mam, G. Leena, y N. S. Saxena, «Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm», *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 6, pp. 18-32, mar. 2016, doi: 10.5815/ijem.2016.02.03.
- [49] Y. Yong-zhe, H. Jia-dong, y R. Jing, «Reconfiguration of Distribution Network Based on Improved Plant Growth Simulation Algorithm», en *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, oct. 2009, vol. 1, pp. 387-391, doi: 10.1109/ICICTA.2009.101.
- [50] J. Ye y F. Wang, «A Refined Plant Growth Simulation Algorithm for Distribution Network Reconfiguration», *Proceedings - 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, ICIS 2009*, vol. 1, nov. 2009, doi: 10.1109/ICISYS.2009.5357829.
- [51] P. V. V. R. Rao, S. Sivanagaraju, y P. V. Prasad, «Network reconfiguration for loss reduction using Plant Growth Simulation Algorithm», en *2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, nov. 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPCES.2010.5698688.
- [52] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, y N. Rajasekar, «Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)», *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116-122, nov. 2015, doi: 10.1016/j.egyr.2015.03.002.
- [53] A. V. S. Reddy, M. D. Reddy, y M. S. K. Reddy, «Network Reconfiguration of Primary Distribution System Using GWO Algorithm», *International Journal of Electrical and Computer*

Engineering (IJECE), vol. 7, n.º 6, pp. 3226-3234, dic. 2017, doi: 10.11591/ijece.v7i6.pp3226-3234.

- [54] M. Siavash, C. Pfeifer, A. Rahiminejad, y B. Vahidi, «Reconfiguration of Smart Distribution Network in the Presence of Renewable DG's Using GWO Algorithm», *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 83, p. 012003, ago. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/83/1/012003.
- [55] M. F. Abu Haggag, E. Beshr, y M. B. Eteiba, «Minimizing Power Loss in Distribution System by Optimal Sizing and Siting of Distributed Generators with Network Reconfiguration Using Grey Wolf and Particle Swarm Optimizers», en *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, jun. 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493703.
- [56] M. Fouad, E. Beshr, y M. Eteiba, «A New Hybrid Technique for Minimizing Power Losses in a Distribution System by Optimal Sizing and Siting of Distributed Generators with Network Reconfiguration», *Energies*, vol. 11, p. 3351, nov. 2018, doi: 10.3390/en1123351.
- [57] H. Hamour, S. Kamel, L. Nasrat, y J. Yu, «Distribution Network Reconfiguration Using Augmented Grey Wolf Optimization Algorithm for Power Loss Minimization», en *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, feb. 2019, pp. 450-454, doi: 10.1109/ITCE.2019.8646595.
- [58] B. Sultana, M. W. Mustafa, U. Sultana, y A. R. Bhatti, «Review on reliability improvement and power loss reduction in distribution system via network reconfiguration», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 297-310, dic. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.08.011.
- [59] M. Dorigo, V. Maniezzo, y A. Coloni, «Ant system: optimization by a colony of cooperating agents», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, n.º 1, pp. 29-41, feb. 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
- [60] M. Dorigo y L. M. Gambardella, «Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem», *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, n.º 1, pp. 53-66, abr. 1997, doi: 10.1109/4235.585892.
- [61] M. Dorigo, M. Birattari, y T. Stutzle, «Ant colony optimization», *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, n.º 4, pp. 28-39, nov. 2006, doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
- [62] A. A. A. El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A.-M. Kinawy, y M. T. Mouwafi, «Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement», *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, n.º 5, pp. 1209-1221, abr. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0799.
- [63] D. J. Singh, M. Tiwari, y M. oza, «Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Ant Colony Search Algorithm», *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 9, pp. 729-731, mar. 2014, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V9P337.
- [64] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, y A. G. Kladas, «Ant colony solution to optimal transformer sizing problem», en *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, oct. 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPQU.2007.4424161.
- [65] H. Bagheri Tolabi, M. H. Ali, y M. Rizwan, «Simultaneous Reconfiguration, Optimal Placement of DSTATCOM, and Photovoltaic Array in a Distribution System Based on Fuzzy-ACO Approach», *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, n.º 1, pp. 210-218, ene. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2364230.

- [66] M. Jamil y A. Sharma, «Ant Colony Optimization for restoration of distribution system», en *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, dic. 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443575.
- [67] T. L. A. de Carvalho y N. R. Ferreira, «Optimal allocation of distributed generation using ant colony optimization in electrical distribution system», en *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, may 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395672.
- [68] F. Scenna, D. Anaut, L. I. Passoni, y G. J. Meschino, «Reconfiguration of electrical networks by an Ant Colony Optimization algorithm», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, n.º 1, pp. 538-544, feb. 2013, doi: 10.1109/TLA.2013.6502858.
- [69] W. Hui, Z. Liang, W. Wei, Z. Fei-fan, J. Xiu, y Z. Hong, «Distribution network reconstruction based on improved ant colony algorithm of directional pheromones», en *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, may 2015, pp. 1243-1247, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162108.
- [70] A. Swarnkar, N. Gupta, y K. R. Niazi, «Efficient reconfiguration of distribution systems using ant colony optimization adapted by graph theory», en *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, jul. 2011, pp. 1-8, doi: 10.1109/PES.2011.6039006.
- [71] S. Abazari y M. Heidari Soudejani, «A new technique for efficient reconfiguration of distribution networks», *Scientia Iranica*, vol. 22, n.º 6, pp. 2516-2526, dic. 2015.
- [72] S. Ganesh y R. Kanimozhi, «An effective soft computing technique for network reconfiguration in distribution system», en *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, may 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831759.
- [73] M. Divya y R. Bindu, «Ant Colony Optimization Method Applied to Distribution Network Reconfiguration», 2013.
- [74] M. Nayak, «Optimal Feeder Reconfiguration of Distribution System with Distributed Generation Units using HC-ACO», *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 6, pp. 107-128, mar. 2014, doi: 10.15676/ijeii.2014.6.1.8.
- [75] M. Divya, «A Comparison of Ant Colony Optimization Algorithms Applied to Distribution Network Reconfiguration», *International Journal of Engineering Research*, vol. 3, n.º 01, p. 6, 2015.
- [76] A. Oloulade, A. I. Moukengue, R. Agbokpanzo, A. Vianou, H. Tamadaho, y R. Badarou, «New Multi Objective Approach for Optimal Network Reconfiguration in Electrical Distribution Systems Using Modified Ant Colony Algorithm», *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 8, n.º 5, p. 120, oct. 2019, doi: 10.11648/j.epes.20190805.13.
- [77] M. Amin Heidari, «Optimal network reconfiguration in distribution system for loss reduction and voltage-profile improvement using hybrid algorithm of PSO and ACO», *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, n.º 1, pp. 2458-2461, 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.1007.
- [78] D. Šošić y P. Stefanov, «Reconfiguration of distribution system with distributed generation using an adaptive loop approach», *Journal of Electrical Engineering*, vol. 70, n.º 5, pp. 345-357, sep. 2019, doi: 10.2478/jee-2019-0066.
- [79] J. Brownlee, *Clever Algorithms: Nature-inspired Programming Recipes*. Jason Brownlee, 2011.
- [80] M. Dorigo, D. de R. D. F. M. Dorigo, y T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. MIT Press, 2004.

- [81] R. C. Dugan y D. Montenegro, *The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*. Electric Power Research Institute, Inc., 2019.
- [82] A. Arefi, F. Shahnia, y G. Ledwich, *Electric Distribution Network Management and Control*, 1st ed. Springer, 2018.
- [83] Kersting, William H., *Distribution System Modeling and Analysis*, Third. CRC Press, 2012.
- [84] Agencia de regulación y control de electricidad ARCONEL, «Regulación No. ARCONEL-053/18». dic. 28, 2018.
- [85] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*. John Wiley & Sons, 2015.
- [86] J. D. Glover, M. S. Sarma, y T. Overbye, *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning, 2011.
- [87] S. Sivanagaraju, *Electric Power Transmission and Distribution*. Pearson Education India, 2008.
- [88] D. Báez López y O. Cervantes, *MATLAB - Con Aplicaciones A La Ingeniería, Física Y Finanzas*, 2a. Edición edition. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2012.
- [89] W. Palm, *MATLAB for Engineering Applications*, 4th edition. McGraw-Hill Higher Education, 2018.
- [90] M. Nayak, «Optimal Feeder Reconfiguration of Distribution System with Distributed Generation Units using HC-ACO», *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 6, pp. 107-128, mar. 2014, doi: 10.15676/ijeei.2014.6.1.8.
- [91] A. Onlam, D. Yodphet, R. Chatthaworn, C. Surawanitkun, A. Siritaratiwat, y P. Khunkitti, «Power Loss Minimization and Voltage Stability Improvement in Electrical Distribution System via Network Reconfiguration and Distributed Generation Placement Using Novel Adaptive Shuffled Frogs Leaping Algorithm», *Energies*, vol. 12, n.º 3, Art. n.º 3, ene. 2019, doi: 10.3390/en12030553.
- [92] J. S. Savier y D. Das, «Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, n.º 4, pp. 2473-2480, oct. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905370.
- [93] J. Siahbalaee, N. Rezanejad, y G. B. Gharehpetian, «Reconfiguration and DG Sizing and Placement Using Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm», *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, n.º 16-17, pp. 1475-1488, oct. 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1689449.
- [94] IEEE Power & Energy Society, «34-bus Feeder», *IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group*. <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> (accedido feb. 20, 2020).
- [95] M. H. J. Bollen y F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, 2011.

ORDEN DE EMPASTADO

