

**RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL
PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE
ENJAMBRE DE PARTÍCULAS**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL
PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE
ENJAMBRE DE PARTÍCULAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: WILMER FERNANDO MARIÑO ANDAGOYA
TUTOR: JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO

Quito -Ecuador
2022

Wilmer Fernando Mariño Andagoya

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña historia e información de contacto:



Wilmer Fernando Mariño Andagoya (Y'1994). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Instituto Superior Tecnológico Guayaquil de la ciudad de Ambato. Egresado de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo consiste en realizar la reconfiguración del sistema de distribución para mejora del perfil de voltaje utilizando la optimización mejorada de enjambre de partículas. wmarinoa@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Ing. Jorge Paúl Muñoz Pilco (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Quito –Ecuador, 2014, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico. Además, cursó estudios de posgrado como becario de Fundación Carolina en la Universidad Pública de Navarra, Pamplona –España, 2017, obteniendo el título de Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. jmunoz@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilmer Fernando Mariño Andagoya con documento de identificación N° 1804559951 manifiesto que:

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

Quito, 29 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Wilmer Fernando Mariño Andagoya

1804559951

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

Yo, Wilmer Fernando Mariño Andagoya con documento de identificación No. 1804559951, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Reconfiguración del sistema de distribución para mejora del perfil de voltaje utilizando la optimización mejorada de enjambre de partículas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 29 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Wilmer Fernando Mariño Andagoya
1804559951

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco con documento de identificación N° 1719006189, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS, realizado por Wilmer Fernando Mariño Andagoya con documento de identificación N° 1804559951, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 29 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Jorge Paúl Muñoz Pilco, MSc
1719006189

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción.....	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Sistema de Distribución.....	4
2.1.1	Red de Distribución Radial.....	4
2.1.2	Red de Distribución en Malla.....	5
2.1.3	Red de Distribución en Bucle Abierto o Anillo.....	5
2.2	Calidad de Energía en Redes de Distribución Eléctricas.....	5
2.3	Reconfiguración del sistema de distribución (DNR)	7
2.3.1	Restricciones en DNR.....	7
2.3.2	Tensión media en DNR.....	8
2.4	Optimización Mejorada de Enjambre de Partículas (MPSO).....	8
2.4.1	Optimización de Enjambre de Partículas(PSO).....	8
2.4.2	PSO Modificado.....	9
2.4.3	MPSO aplicado en DNR.....	10
3	Planteamiento del problema.....	10
3.1	Formulación del problema.....	10
3.1.1	Función Objetivo de DNR.....	10
3.1.2	Limitaciones de las líneas de distribución.....	11
3.1.3	Limitaciones de conmutación.....	11
3.1.4	Limitaciones de tensión en barras.....	11
3.1.5	Limitaciones de corriente en las ramas.....	12
3.1.6	Limitaciones de topología y servicio.....	12
3.2	Sistemas de prueba de la IEEE.....	12
3.2.1	Modelo de distribución de 13 barras IEEE Modificado.....	12
3.2.2	Modelo de distribución de 34 barras IEEE Modificado.....	13
4	Implementación de Metodología del MPSO.....	14
4.1	Etapas de implementación.....	15
4.2	Casos de estudio.....	16
5	Análisis de resultados.....	18
5.1	Reducción de pérdidas en el modelo de prueba de 13 barras.....	18
5.2	Mejora del perfil de voltaje en el modelo de prueba de 13 barras.....	23
5.3	Reducción de pérdidas en el modelo de prueba de 34 barras.....	25
5.4	Mejora del perfil de voltaje en el modelo de prueba de 34 barras.....	29
6	Conclusiones.....	31

6.1 Trabajos futuros.....	31
7 Referencias:.....	32
7.1 Matriz de Estado del Arte.....	35
7.2 Resumen de Indicadores.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación descriptiva de la reconfiguración del sistema de distribución aplicando MPSO.	3
Figura 2. Diagrama de bloques de un sep.	4
Figura 3. Diagrama de una topología radial en una red de distribución eléctrica.....	5
Figura 4. Diagrama de una topología en malla.	5
Figura 7. Transitorio de tipo impulsivo.....	6
Figura 8. Caída de tensión por falla en transformador.....	6
Figura 9. Sobretensión debido a sobre compensación capacitiva en red de distribución.	6
Figura 10. Diagrama de un sistema de 14 nodos con cambio en su topología aplicando DNR.	7
Figura 11. Alimentador de distribución simple.....	7
Figura 12. Diagrama de flujo básico de PSO.	9
Figura 13. Sistema de 13 barras-IEEE.	12
Figura 14. Sistema de 13 barras-IEEE modificado.	13
Figura 15. Sistema de 34 barras-IEEE	14
Figura 16. Sistema de 34 barras-IEEE, modificado.	14
Figura 17. Diagrama de flujo de MPSO.....	15
Figura 18. Comparativa de cargabilidad con flujo por las líneas en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.	19
Figura 20. Sistema de 13 barras después de reconfiguración - Caso1	20
Figura 21. Comparativa de cargabilidad de líneas en el sistema de 13 barras a voltaje crítico antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.	21
Figura 22. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.....	22
Figura 23. Sistema de 13 barras después de reconfiguración – Caso2	23
Figura 24. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1	24
Figura 25. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.....	24

Figura 26. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO, sin restricción de topología-Caso2.	25
Figura 27. Comparativa de cargabilidad con flujo por las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.	26
Figura 28. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1	26
Figura 29. Sistema de 34 barras después de reconfiguración - Caso1	27
Figura 30. Comparativa de cargabilidad de líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal y voltaje crítico antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.....	28
Figura 31. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO- Caso2.....	28
Figura 32. Sistema de 34 barras después de reconfiguración-Caso2	29
Figura 33. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.....	30
Figura 34. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.....	30
Figura 35. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.....	39
Figura 36. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.....	39
Figura 37. Indicador de solución – Estado del arte.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas de las perturbaciones eléctricas.....	7
Tabla 2. Configuraciones de línea e impedancias en la red de 13 barras ya existente[37].	13
Tabla 3. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 13.....	13
Tabla 4. Capacitores shunt en la red de 13[37].	13
Tabla 5. Configuraciones de línea e impedancias en la red de 34 barras ya existente[38].	14
Tabla 6. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34.....	14
Tabla 7. Capacitores shunt en la red de 34[38].	14
Tabla 8. Descripción de modelos de carga IEEE[37].	16
Tabla 9. Demanda de cargas puntuales en la red de 13 barras modificada[37].	16
Tabla 10. Demanda de cargas puntuales en la red de 34 barras modificada[38].	17
Tabla 11. Resultados de simulación en sistema IEEE modificado de 13 nodos-Caso1.....	19
Tabla 12. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 13 barras - Caso1.....	19
Tabla 13. Resultados de simulación en sistema IEEE modificado de 13 nodos-Caso2.....	21
Tabla 14. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 13 barras- Caso2.....	22
Tabla 15. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34.....	25
Tabla 16. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 34 barras- Caso1.....	26
Tabla 17. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34 barras-Caso2.....	27
Tabla 18. Estado de líneas antes y después de DNR – Caso2.....	29
Tabla 19. Matriz de estado del arte.	35

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Resumen

El sistema de distribución es la etapa donde se presentan la mayor cantidad de problemas con la red eléctrica debido a que la carga se encuentra en constante crecimiento y a la interacción directa con el consumidor final.

Es común la presencia de anomalías en los niveles de voltaje de los alimentadores y las excesivas pérdidas de potencia en los distintos tramos, por lo que se ha propuesto mediante este trabajo la solución a estos problemas realizando una DNR (distribution network reconfiguration), buscando la minimización de pérdidas en el sistema como función objetivo principal y a la vez la mejora del perfil de voltaje de la red. Como herramienta para la resolución del problema de reconfiguración se ha utilizado MPSO (modified particle swarm optimization) buscando cumplir la minimización de la función objetivo, así como distintas restricciones de voltaje y cargabilidad para mejorar la calidad de energía.

La DNR se realizará en modelos de prueba modificados con la implementación de la herramienta MATPOWER en MATLAB.

Palabras Clave: Redes de distribución de energía, función objetivo, fluctuaciones de voltaje, optimización de enjambre de partículas, calidad de energía.

Abstract

The distribution system is the stage where most problems occur with the electrical network due to the constantly growing load and the direct interaction with the final consumer.

It is common the presence of anomalies in the voltage levels of the feeders and excessive power losses in the different sections, so it has been proposed through this work the solution to these problems by performing a DNR (distribution network reconfiguration), seeking the minimization of losses in the system as the main objective function and at the same time the improvement of the voltage profile of the network.

As a tool for solving the reconfiguration problem, MPSO (modified particle swarm optimization) has been used, aiming at the minimization of the objective function as well as different voltage and loadability constraints to improve power quality.

DNR will be implemented in modified test models with the help of MATLAB's MATPOWER tool.

Keywords: Power distribution networks, objective function, voltage fluctuations, particle swarm optimization, power quality.

1 Introducción

Existen varios tipos de algoritmos aplicables a la solución de problemas de reconfiguración de redes eléctricas, según [1], es posible encontrar una reconfiguración eficiente mediante flujos de potencia por el método de Newton utilizando distintos tipos de modificaciones en la optimización de enjambre de partículas consiguiendo resultados de mejoras del sistema superiores al 90% en reducción de pérdidas de potencia, de similar forma las mejoras del perfil de voltaje son notables.

La integración de interruptores para la realización de reconfiguraciones permite obtener múltiples soluciones factibles al momento de mejorar las condiciones de funcionamiento de la red, en trabajos anteriores se ha implementado y comparado métodos como el algoritmo genético (GA), algoritmo bat binario modificado (MBBA), optimización binaria de partículas (BPSO), entre otros algoritmos híbridos para obtener reconfiguraciones óptimas [2]-[3]-[4].

El método de MPSO según el trabajo expuesto por Mr. Habtemariam Aberie, [5] demuestra notables mejorías en comparación con el algoritmo PSO básico, manteniendo el nivel de voltaje en los nodos dentro de los parámetros preestablecidos y contribuyendo a una reducción notable en cuanto a pérdidas de potencia para sistemas de distribución radiales.

La calidad de energía presenta varios índices los cuales son regularizados para dar al consumidor final un suministro eléctrico confiable y de calidad, entre los índices más importantes de calidad en redes

de distribución se tiene perfiles de voltaje y estudios de pérdidas en la red.

Las caídas de voltaje o sobretensiones son problemas muy comunes en distribución debido a la constante fluctuación de la demanda la cual está integrando nueva carga constantemente haciendo que el sistema tenga que cubrir las necesidades energéticas de manera rápida y eficiente. Al existir caídas de tensión mayores a 10% ya se producen problemas a nivel residencial como deterioro del tiempo de vida de electrodomésticos, motores eléctricos, luminarias entre otros. Especialmente las cargas críticas las cuales integran partes electrónicas sensibles a las variaciones de voltaje.[6]

De la misma forma las pérdidas afectan la calidad y confiabilidad de la red de distribución ya que en esta etapa del sistema eléctrico es donde se dan más pérdidas. Por este motivo se enfoca gran parte del presupuesto en tratar de mantener óptimo el sistema de distribución y se da paso a trabajos de investigación que aporten a la calidad de energía y eficiencia de suministro eléctrico a los consumidores.

Existen varias herramientas las cuales nos pueden permitir mejorar estos indicadores de calidad, como en este trabajo la reconfiguración de la red de distribución (DNR), la cual consiste en la modificación de estados entre abierto y cerrado de interruptores los cuales conectan tramos de los alimentadores en configuración radial y mediante estos cambios de estado modifican la topología de la red buscando la configuración que permita tener menos pérdidas de potencia activa y a la vez mejorar niveles de voltaje en cada tramo del sistema. [7]

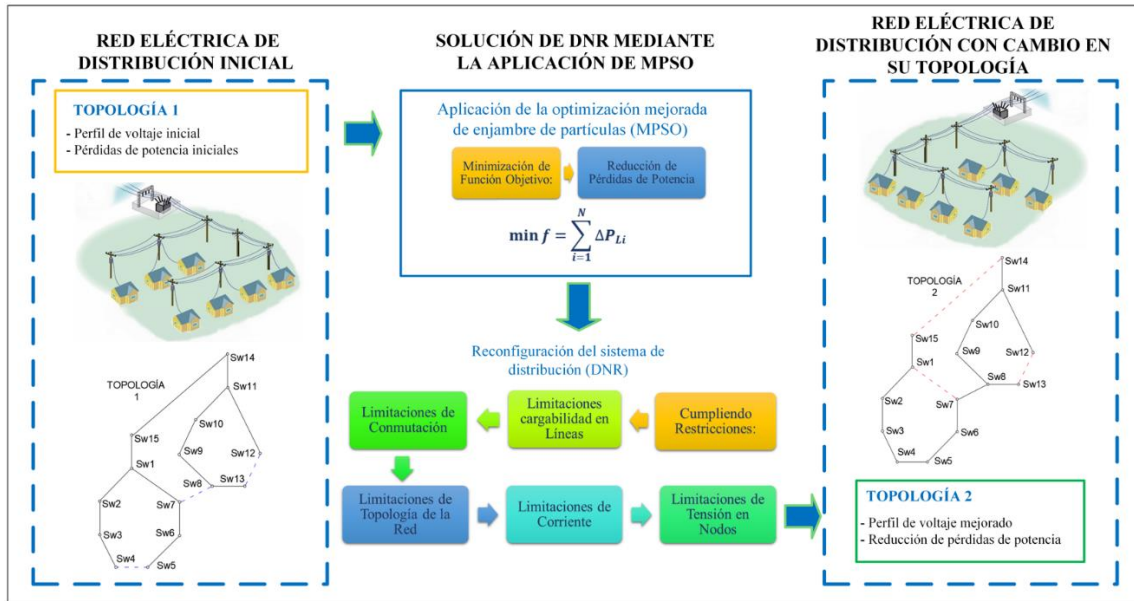


Figura 1. Representación descriptiva de la reconfiguración del sistema de distribución aplicando MPSO.

La reconfiguración de la red puede darse en condición de falla teniendo que volver a una configuración inicial una vez se despeje la falla en el sistema o en condiciones de pleno funcionamiento la cual únicamente tiene el objetivo de mejorar la red y será tema de estudio del presente trabajo.[8]

La optimización de enjambre de partículas (PSO) es una herramienta de gran utilidad en distintos campos de estudio tanto en áreas científicas como de ingeniería y aunque su base se podría definir como simple sin duda resulta importante al momento de resolver problemas de optimización. Este algoritmo se fundamenta en el estudio del comportamiento de grupos de animales como pájaros, abejas y peces a través del análisis del paradigma de enjambre.[9]

Las aplicaciones para este algoritmo pueden ser diversas como por ejemplo en manejo de datos, resolución de problemas de mallas, procesos de aprendizaje automático entre otras.

Esta técnica de optimización propone la creación de combinaciones utilizadas aleatoriamente en la formulación y resolución de un determinado problema con

una velocidad muy rápida de convergencia. [10]

Si bien esto es una ventaja para la resolución de determinados problemas, para problemas más complejos una convergencia precoz implica problemas al encontrar una solución óptima global ya que el algoritmo de PSO al converger rápidamente encuentra soluciones en óptimos locales, lo que no lo hace totalmente eficiente al momento de resolver problemas extensos, o en el caso de redes eléctricas sistemas multimodales.[11]

Por esta razón a lo largo de los años este algoritmo se ha ido modificando a través de investigación adaptándose a las diferentes áreas donde se lo ha utilizado variando su formulación para así encontrar soluciones óptimas.[12]

La optimización mejorada de enjambre de partículas (MPSO) es una de estas modificaciones al PSO original lo que lo hace diferente a su algoritmo base es la modificación en los factores de velocidad de las partículas lo que hace que la mismas comiencen su búsqueda de forma caótica sin limitarse a un óptimo local lo que ayuda al algoritmo en la búsqueda de soluciones

óptimas a problemas multimodales complejos.[13]

2 Marco teórico

La electricidad es una fuente de energía indispensable para la humanidad ya que le ha permitido desarrollarse a lo largo de los años tanto en los hogares haciéndolos dependientes del confort, como a nivel económico con la industrialización e impulso que la energía eléctrica brinda a través de la producción a gran escala, el desarrollo de una nación es dependiente en gran medida de sus fuentes energéticas y su utilización en la industria.

Los sistemas eléctricos de potencia son la base sobre la cual se mueve la producción de energía mundial, ya que se encargan del manejo eléctrico desde los distintos puntos de generación sean centrales térmicas, hidráulicas o eólicas hasta los consumidores finales en los distintos sectores de consumo.

Para la implementación de los sistemas eléctricos es requerida la inversión de mucho capital, a la vez se requiere tecnología eficiente capaz de brindar seguridad a los operarios y usuarios finales.[14]

Todo el equipo tecnológico requerido para la implementación de un sistema eléctrico eficiente debe ser complementado con diversos estudios de ingeniería eléctrica, aplicación de conceptos complejos y avanzados además de estudios de los distintos materiales a emplearse todo realizado por equipos de profesionales calificados y con experiencia en campo, para brindar seguridad tanto en etapa de diseño como implementación del sistema eléctrico.[14]

Los sistemas de distribución en la actualidad son fuente de interés a nivel de investigación debido a que es la parte del SEP donde se generan la mayor parte de inconvenientes tanto en calidad de energía como en confiabilidad y es precisamente en esta etapa donde se suministra energía al consumidor final el cual es el principal

afectado por estos problemas en el suministro.

Esto ha hecho que se enfoque las investigaciones en buscar métodos o maneras de mitigar los distintos problemas que comúnmente se presentan en la red de distribución.[15]

2.1 Sistema de Distribución

El sistema de distribución es de fundamental importancia, esto debido a la gran cantidad de elementos que lo conforman y a su función la cual comienza cuando la energía llega mediante líneas de transmisión hasta la subestación de distribución de donde salen los distintos alimentadores primarios que transportarán la energía a los distintos sectores.

Teniendo en cuenta que es en esta etapa donde se genera la mayor cantidad de pérdidas debido a las caídas de voltaje ocasionadas por la complejidad de las topologías en las redes de distribución[16].

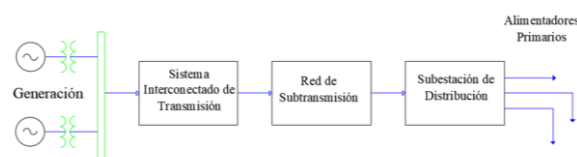


Figura 2. Diagrama de bloques de un sep.

2.1.1 Red de Distribución Radial

La topología de un sistema eléctrico de distribución está dada en función del ordenamiento de los alimentadores y elementos que conforman la red, la estructura radial es aquella que llega a la carga mediante un solo alimentador primario desde un extremo de forma radial, esta configuración es la más simple, pero a la vez presenta la menor confiabilidad para los usuarios[17].

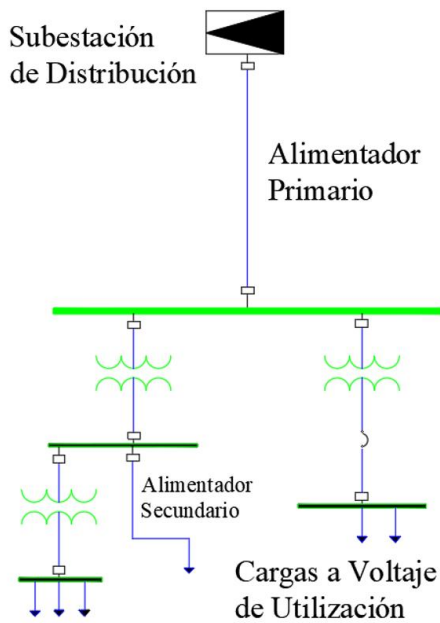


Figura 3. Diagrama de una topología radial en una red de distribución eléctrica.

2.1.2 Red de Distribución en Malla

Por otro lado, también se utiliza la estructura de malla o sistema mallado el cual abastece de energía a la carga por más de un camino de forma simultánea en el caso de una falla los interruptores aislarán el tramo de la red fallada permitiendo que el resto del sistema continúe con suministro eléctrico[6].

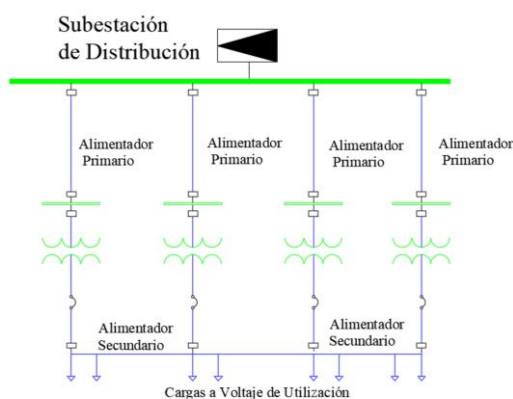


Figura 4. Diagrama de una topología en malla.

2.1.3 Red de Distribución en Bucle Abierto o Anillo

Una red tipo anillo es aquella que entrelaza sus alimentadores primarios mediante

reconectores, y tiene más de un camino efectivo en caso de falla en cualquier punto de la red, al momento de existir una falla, el tramo fallado puede aislarse de manera efectiva sin perder suministro el resto de la red por lo que presenta grandes ventajas en cuanto a confiabilidad del sistema[18].

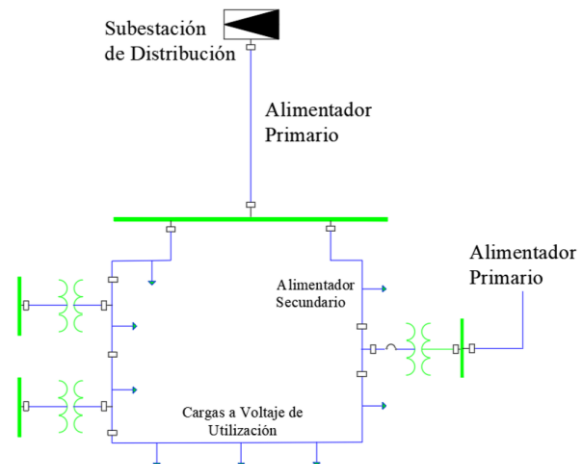


Figura 5. Diagrama de una red de distribución en bucle abierto o anillo.

2.2 Calidad de Energía en Redes de Distribución Eléctricas

La calidad de energía en sistemas de distribución esta cuantificada por la capacidad de la red de brindar a los distintos consumidores un servicio óptimo cumpliendo todos los parámetros eléctricos para el correcto abastecimiento de las cargas.

El sistema de distribución eléctrico es el más afectado por pérdidas de energía y distintos tipos de fallas, estas pueden darse debido a distintos problemas como pérdidas de grandes cargas, maniobras inadecuadas, fallas en dispositivos que forman parte de la red entre otras[19].

Estos eventos causan a su vez distintos fenómenos como variaciones en los niveles de tensión, aparición de transitorios, variación de la frecuencia y cambios en la forma de onda los cuales en la actualidad al tener cargas que integran gran cantidad de

aparatos electrónicos, los mismos se ven afectados debido a su gran sensibilidad a las distintas perturbaciones eléctricas[19].

Transitorios

Son fuertes variaciones de tensión en un corto tiempo, los cuales pueden ser de tipo oscilatorio o impulsivo y pueden ocasionar daños a los usuarios y equipos[19].

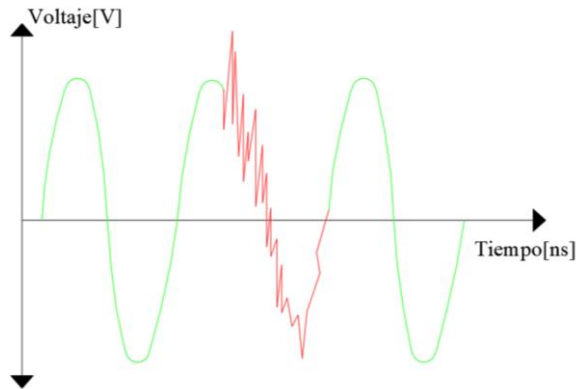


Figura 6. Transitorio de tipo oscilatorio por inserción de banco de capacitores en la red de distribución.

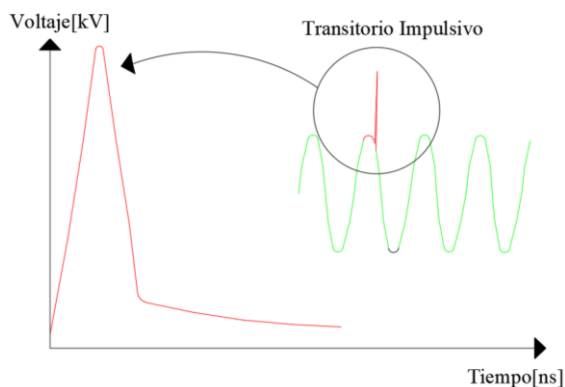


Figura 7. Transitorio de tipo impulsivo.

Interrupciones

Pueden ser ocasionadas por cualquier tipo de falla en la red de suministro, y se clasifican en función del tiempo de duración de la interrupción[20].

Caída de Tensión

Usualmente la caída de tensión puede darse debido al ingreso de fuertes cargas inductivas a la red, también al producirse despeje remoto de fallas, entre otros[21].

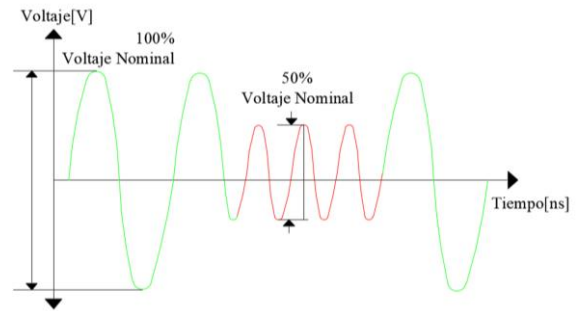


Figura 8. Caída de tensión por falla en transformador.

Sobretensión

La sobretensión en un sistemas de distribución puede darse de forma normal en periodos donde la carga conectada al sistema es baja y en las zonas donde exista compensación capacitiva conectada a la red, también puede darse debido a la salida de grandes cargas del sistema, entre otras[21].

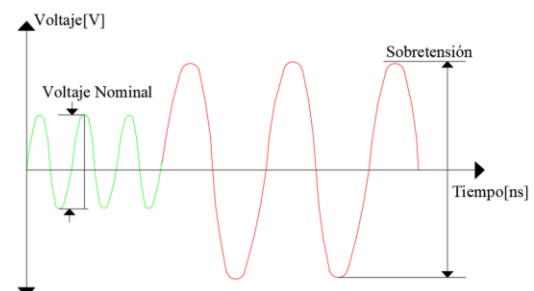


Figura 9. Sobretensión debido a sobre compensación capacitiva en red de distribución.

Distorsión Armónica (THD)

Este problema se manifiesta con el cambio o deformación en la forma de onda original sinusoidal en ondas compuestas por ondas de frecuencias múltiplos de la frecuencia nominal del sistema, y matemáticamente la distorsión armónica total se expresa de la siguiente manera[22]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_f} \quad (1)$$

Donde:

THD Distorsión armónico total de la señal

I_h Armónico individual

h Orden del armónico

I_f Armónico fundamental de la distorsión.

Variaciones de Frecuencia

Este tipo de perturbación es poco usual en la red de distribución y ocurre cuando existe cambios en la frecuencia nominal del sistema y generalmente se ocasiona por problemas al sobrecargar generadores sean estos de autoconsumo o los conectados a la red[23].

Tabla 1. Causas de las perturbaciones eléctricas.

Perturbaciones Eléctricas	Causas
Transitorios	<ul style="list-style-type: none"> Deficiencia en el diseño de puesta a tierra Despeje de fallas en la red de distribución Fuertes descargas atmosféricas Otro tipo de descargas
Interrupciones	<ul style="list-style-type: none"> Cualquier evento de falla en la red de suministro eléctrico.
Caída de Tensión	<ul style="list-style-type: none"> Ingreso de fuertes cargas inductivas a la red Despeje remoto de fallas, entre otros.
Sobretensión	<ul style="list-style-type: none"> Salida de grandes cargas Ingreso de cargas de alta impedancia Fallas de tipo monofásico en un sistema trifásico.
Distorsión Armónica	<ul style="list-style-type: none"> Conexión a la red de fuentes conmutadas, UPS, rectificadores, hornos, entre otros
Variaciones de Frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> Problemas con generadores.

2.3 Reconfiguración del sistema de distribución (DNR)

La DNR, es un problema complejo que consiste en la modificación de estados de apertura y cierre de interruptores en la red de distribución con lo cual se busca modificar la topología de la red de forma que cumpla distintos parámetros establecidos de calidad y confiabilidad[24].

Mediante la aplicación de DNR se busca principalmente la minimización de la función objetivo en el sistema, es decir las pérdidas, además de la mejora de niveles de voltaje en las ramas, reducción de niveles de sobrecarga en líneas, además de reducción en eventos de conmutación y en caso de fallas, continuidad en suministro eléctrico de la red al usuario final.

Todo esto cumpliendo con las distintas restricciones del problema de DNR para resguardar un correcto funcionamiento en el sistema[4].

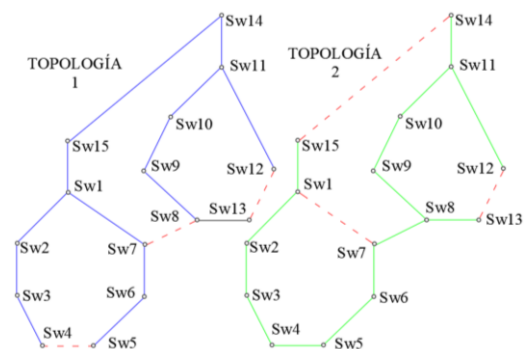


Figura 10. Diagrama de un sistema de 14 nodos con cambio en su topología aplicando DNR.

2.3.1 Restricciones en DNR

Existen varias restricciones que deben cumplirse al momento de realizar una DNR en base del cumplimiento de la función objetivo, la cual es reducir las pérdidas de energía en la red de distribución[25].

Para esto es necesario realizar el análisis de flujos de potencia en la red para verificar que se cumplan los límites máximos y mínimos tanto a nivel de tensión como corriente por las ramas y pérdidas en el sistema[26].

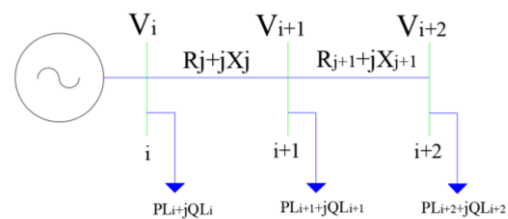


Figura 11. Alimentador de distribución simple.

2.3.2 Tensión media en DNR

La definición de tensión media se la plantea para cuantificar la mejoría del perfil de voltaje de forma general en toda la red de distribución y se lo realiza de forma previa y posterior a la reconfiguración mediante el algoritmo planteado[27].

Esto debido a que al realizar la DNR los niveles de tensión varían de forma distinta en cada barra, de manera que en ciertos puntos existirá mejoría y en otros no, la tensión media del sistema se la puede calcular utilizando las siguientes ecuaciones[28]:

$$V_{av}^0 = \sum_{i=1}^{N_n} V_i^0 / N_n \quad (2)$$

$$V_{av}^r = \sum_{i=1}^{N_n} V_i^r / N_n \quad (3)$$

Donde:

V_{av}^0	Tensión media del sistema antes de DNR
V_{av}^r	Tensión media del sistema después de la DNR
V_i^0	Tensión en la barra i antes de la DNR
V_i^r	Tensión en la barra i después de la DNR
N_n	Número de barras

2.4 Optimización Mejorada de Enjambre de Partículas (MPSO)

La optimización de enjambre de partículas (PSO), se fundamenta en la población y tiene como objetivo realizar una búsqueda óptima basándose en un intercambio de información entre partículas. Esto se lo realiza mediante iteraciones al inicializar los parámetros de un grupo de partículas determinado[29].

El algoritmo en su forma básica cuando se plantea problemas multimodales tiene inconvenientes debido a la posición

aleatoria con la que se inicializa las partículas, por lo que es necesario realizar una mejora en el algoritmo para buscar reducir el problema de convergencia prematura es en este punto donde se plantea la MPSO[30].

2.4.1 Optimización de Enjambre de Partículas (PSO)

La función de este algoritmo se basa en la atracción de las partículas hacia la mejor solución previa de forma individual, y a su vez esta partícula busca la mejor solución de forma global encontrada por cualquier otra partícula de su vecindad[31].

El vecindario está formado por el grupo de partículas o enjambre que mantienen el intercambio de información entre sí, actualizando de forma repetitiva tanto velocidad como posición de cada una de las partículas que conforman el vecindario[31].

Este algoritmo de optimización inteligente es utilizado para resolver distintos problemas de optimización complejos, cuya principal ventaja es su rápida velocidad de convergencia en problemas de un solo nodo. A la vez en sistemas multimodales esto es una desventaja debido a que puede presentar convergencia prematura dando soluciones imprecisas[9].

Al utilizar este algoritmo en sistemas multinodos la posición inicial de la partícula será la que determine si se puede obtener o no una solución óptima global rápida y precisa, por lo que se pueden realizar mejoras en la etapa de inicialización de las partículas[32].

A continuación, se muestra la ecuación de actualización de velocidad de las partículas para la PSO:

$$V_{i(t+1)} = w * V_{i(t)} + c_1 * rand1 * (pb_i - X_{act,i(t)}) + c_2 * rand2 * (gb_i - X_{act,i(t)}) \quad (4)$$

$$X_{act,i(t+1)} = X_{i(t)} + V_{el,i(t+1)} \quad (5)$$

Donde:

- V_i Velocidad del fragmento i.
- $X_{act,i}$ Posición del fragmento i.
- pb_i La mejor partícula anterior a la partícula i.
- gb_i La mejor partícula global encontrada por todas las partículas hasta ese momento.
- w Factor de Inercia.
- $rand_{1,2}$ Números aleatorios dentro del rango [0,1].
- $c_{1,2}$ Factores de aprendizaje.

El algoritmo del procedimiento para el análisis de la PSO se muestra a continuación.

Donde:

- Tp Tamaño de población en el sistema.
- N_{ev} Número de evaluaciones de funciones.
- $MAX_{N_{ev}}$ Número de evaluaciones de funciones máximo.

Algoritmo de PSO estándar:

```

Inicio
while  $N_{ev} < MAX_{N_{ev}}$  do
  for  $i=1$  to  $Tp$  do
    Actualizar la velocidad de la i-ésima partícula
    según (4);
    Actualizar la posición de la i-ésima
    partícula según (5);
    Calcular el valor de aptitud de la i-ésima
    partícula;
     $N_{ev}++$ ;
  end for
  Actualizar el pbi y el gb en la población;
end while
Finalizar

```

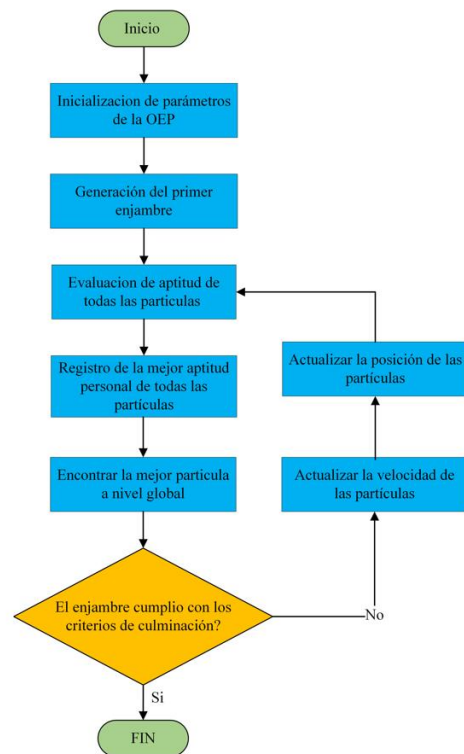


Figura 12. Diagrama de flujo básico de PSO.

2.4.2 PSO Modificado

Al modificar la OEP se busca reducir los efectos de la inicialización de las partículas de forma aleatoria mediante una búsqueda caótica inicial para luego continuar el proceso de la PSO estándar, de esta forma se busca una solución óptima global más exacta y rápida[33].

La convergencia prematura se da debido a que no se dan cambios en un sistema óptimo local para lo cual se ha propuesto la modificación de la ecuación de actualización de velocidad de la partícula[34]:

$$V_{i(t+1)} = w * V_{i(t)} + c_1 * rand1 * (pb_{est} - X_{i(t)}) + c_2 * rand2 * (gb_{est} - X_{i(t)}) \quad (6)$$

Donde:

- gb_{est} Dimensión i de la mejor partícula del enjambre en la iteración k.
- pb_{est} Dimensión i de la mejor posición de la partícula j hasta la iteración k.

i_2 Enteros distintos dentro de $[1, T_p]$.

Teniendo en cuenta que, $i_1 \neq i_2 \neq i$

Algoritmo de PSO modificado:

Inicio

while $N_{ev} < MAX_{N_{ev}}$ **do**

for $i=1$ to T_p **do**

 Actualizar la velocidad de la i -ésima partícula según (6);

 Actualizar la posición de la i -ésima partícula según (5);

 Calcular el valor de aptitud de la i -ésima partícula;
 $N_{ev}++$;

end for

 Actualizar el pbi y el gb en la población;

end while

Finalizar

2.4.3 MPSO aplicado en DNR

Teniendo en cuenta la función objetivo de DNR y aplicando la MPSO para buscar una solución óptima el procedimiento para esta aplicación es el siguiente[35]:

1. Establecimiento de parámetros del sistema y condiciones límites de la partícula.
2. Inicialización, se inicializa los factores de aprendizaje c_1 y c_2 , el factor de inercia w y cada una de las partículas.
3. Se realiza el cálculo de aptitud de las partículas.
4. Se realiza comparaciones de aptitud para todas las partículas
 - Si la aptitud de partícula es superior a la aptitud pb_i , el valor se actualiza como pb_i .
 - Si la aptitud de partícula es mejor que la aptitud gb_i , el valor se actualiza como gb_i .
5. Actualización de posición y velocidad de cada partícula.
6. Analizar el número máximo de iteraciones para determinar una suspensión o retornar al paso 3.

3 Planteamiento del problema

En este apartado se describen las limitaciones de los sistemas a tomar en cuenta para la resolución del problema de DNR y así encontrar la reconfiguración óptima manteniendo la calidad y confiabilidad, así como una descripción de los sistemas de prueba planteados para la implementación del algoritmo MPSO teniendo en consideración los distintos casos de estudio.

3.1 Formulación del problema

Se plantea el modelado mediante el software de simulación Matlab de la red de distribución IEEE de 13 y 34 nodos con el objetivo de calcular los parámetros eléctricos de voltaje y pérdidas en cada alimentador mediante flujos de potencia, en el primer caso con los sistemas en su configuración original, para posterior a esto realizar una reconfiguración de cada uno de los sistemas basado en el MPSO.

Todo esto cumpliendo con las restricciones que conlleva la resolución de DNR y buscando una configuración que nos permita alcanzar una topología óptima permitiendo la reducción de pérdidas en los alimentadores y mejorar los perfiles de tensión en los dos sistemas.

Una vez realizada la reconfiguración óptima de los sistemas de prueba se puede obtener un valor porcentual real de mejora tanto en decremento de pérdidas como en niveles de tensión.

3.1.1 Función Objetivo de DNR

Al reconfigurar el sistema se busca la topología óptima de la red en la que se pueda reducir pérdidas de energía y mejorar perfiles de tensión para lo cual la función objetivo del problema de RSD es la de buscar reducir de forma significativa las pérdidas de potencia en la red mientras se cumple con los límites de operación[36].

$$\min f = \sum_{i=1}^N \Delta P_{Li} \quad (7)$$

$$\min f = \sum_{i=1}^N R_i L_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (8)$$

Donde:

- ΔP_{Li} Pérdida de potencia en la i-ésima línea en kW.
- N Número de líneas totales.
- R_i Resistencia unitaria de la i-ésima línea en Ω .
- L_i Longitud de línea i en km.
- P_i Flujo de potencia P de la i-ésima línea kW.
- Q_i Flujo de potencia Q de la i-ésima línea en Kvar.
- V_i Tensión en la i-ésima línea en kV.

3.1.2 Limitaciones de las líneas de distribución

En las líneas de distribución se toman en cuenta restricciones referentes a cargabilidad de las líneas mediante las siguientes ecuaciones:

$$|P_{ij}^{Linea}| < P_{ij,max}^{Linea} \quad (9)$$

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (10)$$

$$Q_{ij} = \sum_{k=0}^{N_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (11)$$

Donde:

- P_{ij}^{Linea} Potencia a través de la red de distribución.
- $P_{ij,max}^{Linea}$ Límite máximo de potencia por las líneas.
- P_i Potencia activa inyectada en la i-ésima barra.
- Q_i Potencia reactiva inyectada en la i-ésima barra.
- V_i Voltaje en la barra i-ésima.

- δ_i Ángulo de tensión en la i-ésima barra.
- Y_{ij} Admitancia de la línea entre la barra i-j.

3.1.3 Limitaciones de conmutación

Para resolver el problema de DNR en general, el número máximo de conmutaciones se da de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^{N_S} |S_i - S_{oi}| \leq N_{switch} \quad (12)$$

Donde:

- S_i Estado inicial de los i-ésimos interruptores.
- S_{oi} Nuevo estado de los i-ésimos interruptores.
- N_S Máximo número de interruptores.
- N_{switch} Máximo número de conmutaciones.

Estado 0 significa que el interruptor está cerrado, estado 1 significa que está abierto.

3.1.4 Limitaciones de tensión en barras

La tensión en cada una de las barras de los dos sistemas debe estar dentro de los límites.

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{máx} ; i = 1, 2, \dots, N_n \quad (13)$$

Donde:

- V_i Tensión en la i-ésima barra.
- V_{min} Límite de tensión mínima.
- $V_{máx}$ Límite de tensión máxima.
- N_n Número total de barras.
- N_b Número total de ramas.

Para caso de estudio se considera a la tensión de la subestación como 1p.u. y los límites mínimos y máximos, como tensión

mínima 0.9 p.u. y tensión máxima un valor de 1 p.u.

3.1.5 Limitaciones de corriente en las ramas

Las magnitudes de corriente al darse el paso de potencia a través del sistema de distribución deben ser menor al máximo permitido por el diseño de cada rama.

$$|I_j| \leq I_{j,m\acute{a}x} ; i = 1,2, \dots N_b \quad (14)$$

Donde:

- I_j Corriente por la j-ésima rama.
- $I_{j,m\acute{a}x}$ Límite máximo de corriente por la j-ésima rama.
- N_n Número total de barras.
- N_b Número total de ramas.

3.1.6 Limitaciones de topología y servicio

Para los casos de estudio los sistemas mantendrán una estructura radial y debe permanecer con este tipo de topología además todos los tramos de la red de distribución deben mantener su servicio operativo.

3.2 Sistemas de prueba de la IEEE

Para la implementación de la solución de DNR aplicando el algoritmo de MPSO se ha considerado la utilización de modelos de prueba de la IEEE en los cuales se realizará modificaciones con el fin de implementar la reconfiguración de las redes buscando cumplir los objetivos del presente trabajo.

3.2.1 Modelo de distribución de 13 barras IEEE Modificado

El modelo modificado de 13 barras de la IEEE es un sistema de topología radial utilizado para estudios de redes de distribución que trabaja a un voltaje nominal de 4.16 kV y es alimentado por un transformador de 5000 KVA, con una

relación de transformación de 115kV a 4.16kV, lado de alta y baja respectivamente.

También integra un transformador denominado “XFM-1”, el cual alimenta solo una barra. Este modelo ha sido modificado por motivos prácticos eliminando el transformador para que todas las barras se encuentren a un solo nivel de voltaje y pueda existir enlaces entre ellas sin restricciones al momento de que el algoritmo realice la DNR.

Se ha creado líneas de enlace con interruptores abiertos en la configuración inicial las mismas que serán de utilidad al momento de realizar el cambio de topología mediante el algoritmo BPSO.

El sistema de 13 nodos IEEE para facilidad de implementación del algoritmo BPSO se lo asume como un sistema balanceado con cargas puntuales.

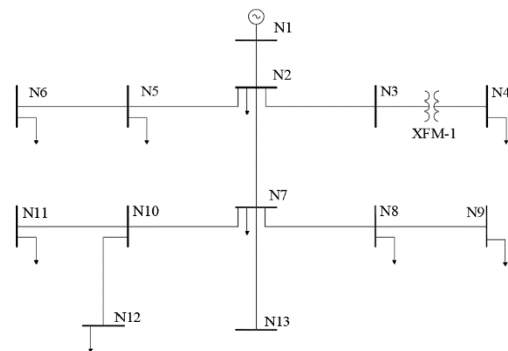


Figura 13. Sistema de 13 barras-IEEE.

En la Figura 14 se visualiza el diagrama del sistema de 13 nodos- IEEE modificado con líneas de enlace las cuales servirán para realizar la modificación de topología mediante la resolución del problema de DNR con BPSO.

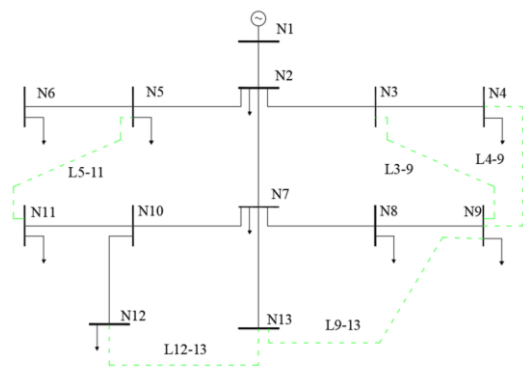


Figura 14. Sistema de 13 barras-IEEE modificado.

A continuación, se tabula los datos de líneas del sistema modificado (Tabla 2) y los datos de las nuevas líneas de enlace añadidas al sistema (Tabla 3)

Tabla 2. Configuraciones de línea e impedancias en la red de 13 barras ya existente[37].

Datos de Líneas				Impedancia	
No	Nf	Long (m)	Config.	R(ohm)	X(ohm)
1	2	609.60	601	0.00379	0.01114
2	5	152.40	603	0.00364	0.00369
2	3	152.40	602	0.00206	0.00323
3	4	120.00	601	0.00206	0.00323
5	6	91.44	603	0.00218	0.00221
10	12	243.84	607	0.00588	0.00226
2	7	609.60	601	0.00379	0.01114
7	10	91.44	604	0.00217	0.00223
7	13	304.80	601	0.00190	0.00557
7	8	609.60	601	0.00190	0.00557
10	11	91.44	605	0.00218	0.00221
8	9	152.40	606	0.00218	0.00122

Nota: se asume configuración 601 y 120m de longitud para los tramos modificados

Tabla 3. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 13.

Datos de Líneas				Impedancia	
No	Nf	Long (m)	Config.	R(ohm)	X(ohm)
5	11	120	601	0.003792	0.011140
3	9	120	601	0.005877	0.002256
4	9	120	601	0.003792	0.011140
12	13	120	601	0.002172	0.002228
13	9	120	601	0.005877	0.002256

Nota: se asume configuración 601 y 120m de longitud para los tramos modificados

La tabla 4 muestra los datos de capacitores shunt los cuales se los integrara al sistema para el caso de estudio 1 en el sistema de 13 barras.

Tabla 4. Capacitores shunt en la red de 13[37].

Nodo	Capacitores Shunt	
	Compensación Reactiva	
	kVAr	P.U.
9	600	0.1200
11	700	0.1400

3.2.2 Modelo de distribución de 34 barras IEEE Modificado

El modelo de prueba de 34 barras IEEE es un sistema trifásico utilizado en distribución que trabaja a voltaje nominal de 24.9 kV y su diseño integra dos transformadores, el primero llamado “Subestación” el cual es un transformador de 2500 kVA con una relación de transformación de 69kV en el lado de alta y de 24.9 kV en el lado de baja.

El segundo transformador “XFM-1” un transformador de 500 kVA y una relación de transformación de 24.9 kV en el lado de alta y 4.16 kV en el lado de baja tensión.

A este sistema se le ha realizado cambios en los cuales no se consideró en la simulación el transformador “XFM-1” esto debido a que su secundario alimenta solo a dos nodos 32, 33 dejando los mismos a un nivel de tensión diferente a los otros nodos por lo cual al querer realizar la DNR no se podría interconectar estos nodos mediante líneas de enlace.

Se incrementó líneas al sistema las mismas que actuarán de enlaces para la modificación de la topología, estas líneas en la configuración inicial están normalmente abiertas y una vez realizada la DNR el algoritmo mostrará qué tramos deben abrir o cerrar para la reducción de pérdidas y mejora del nivel de voltaje.

Esto manteniendo siempre la configuración radial del sistema.

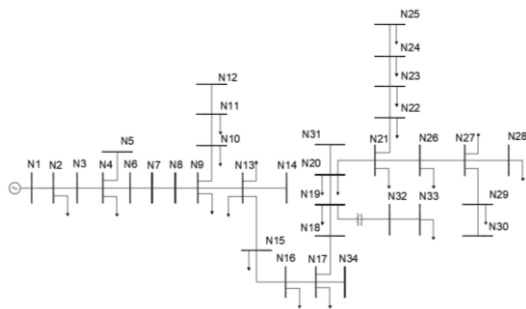


Figura 15. Sistema de 34 barras-IEEE.

La Figura 16 muestra el sistema de 34 barras de la IEEE modificado una vez se añadido las líneas que servirán como enlace para la reconfiguración de la red mediante MPSO.

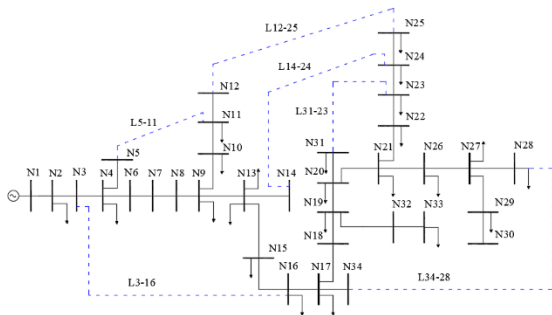


Figura 16. Sistema de 34 barras-IEEE, modificado.

A continuación, se tabulan los datos de las líneas ya existentes en el sistema (Tabla 5) y las líneas de enlace nuevas las cuales servirán para la implementación del algoritmo (Tabla 6).

Tabla 5. Configuraciones de línea e impedancias en la red de 34 barras ya existente[38].

Datos de Líneas				Impedancia	
No	Nf	Long (m)	Config.	R(ohm)	X(ohm)
1	2	786.38	300	0.547	0.407
2	3	527.30	300	0.367	0.273
3	4	9823.70	300	6.837	5.086
4	5	1769.06	300	1.231	0.916
4	6	11430.00	300	7.955	5.918
6	7	9061.70	300	6.307	4.692
7	8	3.05	301	0.003	0.002
9	10	521.21	300	0.363	0.270
9	13	3112.01	301	3.268	1.627
10	11	14676.12	300	10.215	7.599
11	12	4187.95	300	1.711	2.168
13	14	923.54	300	0.363	0.478
13	15	256.03	301	0.269	0.134
15	16	6230.11	301	6.543	3.256
16	17	158.50	301	0.166	0.083
19	20	1493.52	301	1.568	0.781
19	32	238.5	300	1.900	4.080

21	26	615.70	301	0.647	0.322
21	22	85.34	301	0.090	0.045
27	28	262.13	301	0.275	0.137
27	29	85.34	301	0.090	0.045
22	23	411.48	301	0.432	0.215
23	24	1109.47	301	1.165	0.580
24	25	161.54	301	0.170	0.084
8	9	94.49	301	0.099	0.049
18	19	3.05	301	0.003	0.002
17	34	7110.98	300	2.793	3.682
17	18	11225.78	301	11.789	5.867
20	31	493.78	300	0.194	0.256
20	21	1776.98	301	1.866	0.929
26	27	816.86	301	0.858	0.427
29	30	1481.33	300	0.582	0.767
32	33	3218.69	300	2.240	1.667

Nota: se asume la configuración 300 para tramos no trifásicos

Tabla 6. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34.

Datos de Líneas Nuevas				Impedancia	
No	Nf	Long (m)	Config.	R(ohm)	X(ohm)
5	11	7110.98	300	0.451	0.5938
12	25	112253.78	301	1.901	0.946
34	28	493.78	300	0.031	0.946
3	16	1776.98	301	0.301	0.150
31	23	816.86	301	0.138	0.069
14	24	3218.69	300	0.361	0.269

La tabla 7 muestra los datos de capacitores shunt los cuales se los integrará al sistema para el caso de estudio 1 en el sistema de 34 barras.

Tabla 7. Capacitores shunt en la red de 34[38].

Nodo	Capacitores Shunt	
	Compensación Reactiva	
	kVAr	P.U.
23	300	0.0030
25	450	0.0045

4 Implementación de Metodología del MPSO

Toda la información referente al sistema, sus funciones y distintas características importantes en el análisis se encuentran en las partículas que conforman el enjambre.

La función fitness, es la función objetivo o función donde se realiza la evaluación y es esta la que se busca optimizar mediante el algoritmo.

El MPSO se encarga de dar valores al azar a las partículas del enjambre y realiza evaluaciones mediante el cálculo de la función fitness buscando la mejor, tanto de manera local como global. Una vez agrupados las mejores partículas globales se busca la convergencia del algoritmo buscando la solución más cercana a la óptima.

La actualización de la velocidad depende de los valores globales de las mejores partículas las mismas que cambian de posición con la actualización de su velocidad. Este proceso se repite varias veces buscando siempre las soluciones óptimas acorde a las iteraciones programadas para el algoritmo.

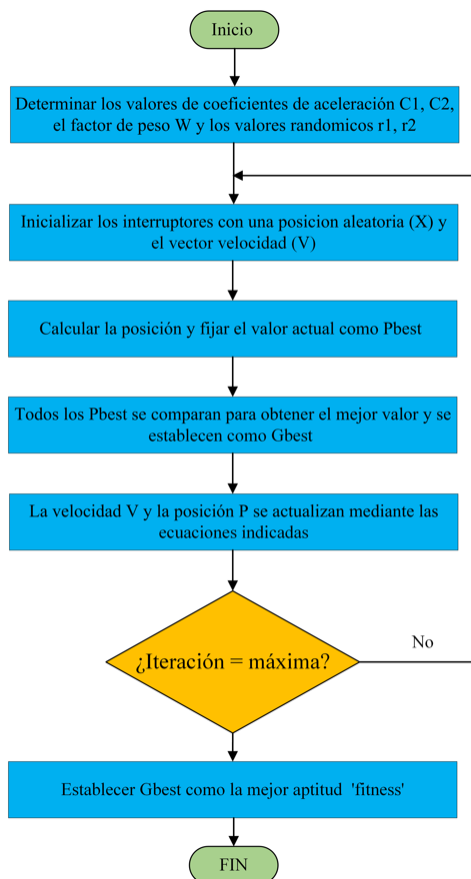


Figura 17. Diagrama de flujo de MPSO.

4.1 Etapas de implementación

- **Etapa 1:**

Se comienza mediante el ingreso de datos base del sistema a analizar, matriz de nodos, datos de del generador, y matriz de datos de líneas todo esto para el cálculo de flujos de potencia.

- **Etapa 2:**

Creación de la matriz de partículas del enjambre y generación aleatoria de velocidades y estados de los interruptores que modificaran la topología de la red de distribución.

- **Etapa 3:**

Se realiza el cálculo de flujo de potencia mediante la herramienta MATPOWER y se calcula las pérdidas en cada uno de los tramos Pbest, buscando el que tenga menos pérdidas y guardando su valor en la variable Gbest que se lo considera el interruptor con menos pérdidas globales, buscando la reconfiguración óptima de la red.

- **Etapa 4:**

Mediante las ecuaciones planteadas se realiza el cálculo del peso, actualizaciones de velocidad y posición para cada uno de los interruptores.

Peso de la partícula:

$$w^k = w_{sup} - \left(\frac{w_{sup} - w_{men}}{Iter_{sup}}\right)(Iter_{act}) \quad (15)$$

Actualización de Velocidad:

$$V_{nuev} = w^k * V_{act} + c_1 * r_1 * (P_{best} - X_1) + c_2 * r_2 * (G_{best} - X_1) \quad (16)$$

Actualización de Posición:

$$S_{ij}^{k+1} = S_{ij}^k + V_{ij}^{k+1} \quad (17)$$

Donde:

- w_{sup} Peso superior o máximo.
- w_{men} Peso inferior o mínimo.

w^k	Peso en la iteración k.
$Iter_{act}$	Iteración actual.
$Iter_{sup}$	Iteración superior o máxima.
V_{nuev}	Velocidad nueva.
V_{act}	Velocidad actual.
P_{best}	Interruptor con mejor posición en iteración actual.
G_{best}	Interruptor con mejor posición global en cualquier interruptor de la iteración actual.
X_1	Posición del interruptor actual.
c_1, c_2	Coefficientes de aceleración.
r_1, r_2	Variabes aleatorias entre 0-1.
S_{ij}^{k+1}	Dimensión i de la posición de la partícula j en iteración k.
V_{ij}^{k+1}	Dimensión i de la velocidad en partícula j en la iteración k.

- **Etapa 5:**

Se realiza comparaciones a nivel local de los valores Pbest (Interruptores con menos pérdidas) seleccionando el mejor local y se pasa a realizar comparaciones con Gbest para seleccionar la mejor opción global y así obtener los interruptores con menos pérdidas en el sistema.

- **Etapa 6:**

Una vez completadas las iteraciones programadas se obtiene Gbest como la mejor opción o elemento ‘fitness’ si no se ha completado las iteraciones se regresa a la inicialización de valores aleatorios en la etapa 2.

4.2 Casos de estudio

Con el objetivo de afirmar las mejoras en los dos modelos de redes de distribución tanto en reducción de pérdidas como en mejora de perfiles de voltaje se ha planteado la resolución de DNR de los sistemas con compensación shunt a voltaje de 1.00 p.u. en la barra de ref. y en estado crítico con caída de voltaje a 0.95 p.u. en la barra de ref. y salida de los capacitores shunt.

Esto con el objetivo de hacer más visible las caídas de tensión en la red de estudio.

Modelo de distribución de 13 barras a demanda nominal.

Se muestra en la tabla 8 la descripción de los modelos de carga y la demanda establecidos en el diseño de la red IEEE.

Tabla 8. Descripción de modelos de carga IEEE[37].

Modelo	Conex.	Detalle
Y - PQ	Y	kW y kVAr kte.
Y - I	Y	Corriente kte.
Y - Z	Y	Impedancia kte.
D - PQ	D	kW y kVAr kte.
D - I	D	Corriente kte.
D - Z	D	Impedancia kte.

Donde:

kte Valor constante.

Para facilidad de implementación en cada nodo de la red de distribución de 13 barras modificado, para el análisis de reconfiguración se asume un modelo Y de potencia activa y reactiva constante mostrado en la Tabla 9 además, se asume cargas puntuales en los nodos.

Tabla 9. Demanda de cargas puntuales en la red de 13 barras modificada[37].

Nodo	Modelo	Demanda	
		W	VAr
2	Y - PQ	200	116
4	Y - PQ	400	290
5	Y - PQ	170	125
6	Y - PQ	230	132
12	Y - PQ	128	860

7	Y - PQ	1155	66
9	Y - PQ	843	462
8	Y - PQ	170	151
11	Y - PQ	170	80
Total		3466	2102

- **Caso1: Modelo con compensación reactiva a voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

Se realiza el cálculo de flujos utilizando Newton para obtener los parámetros de la red integrando compensadores shunt en los nodos 9 y 11 con valores de 0.12 y 0.14 p.u. respectivamente, como se muestra en la tabla 4, configurando el voltaje en la barra de ref. de 1 p.u. y teniendo en cuenta límites de voltaje máximos y mínimos de 1.00 y 0.95 p.u. respectivamente.

Una vez implementado el algoritmo de MPSO se obtiene la solución a la DNR y se realiza una comparativa en la sección 5 Análisis de resultados.

- **Caso2: Modelo sin compensación reactiva a voltaje de 0.95 p.u. en la barra de ref.**

Se sigue el mismo procedimiento de cálculo de flujos mediante el procedimiento de Newton para obtener los parámetros de la red desconectando los compensadores shunt, pero ahora en un estado crítico de caída de voltaje configurando el voltaje en la barra de ref. a 0.95 p.u. y reduciendo el límite de voltaje permitido en las barras a 0.90 p.u.

Con estas modificaciones en los parámetros de la red se busca evidenciar al sistema con problemas de caídas de tensión y analizar posibles soluciones.

Modelo de distribución de 34 barras a demanda nominal.

Se muestra en la tabla 10 la descripción de los modelos de carga y la demanda en cada nodo de la red donde se asume un modelo Y a demanda constante PQ en la red de distribución de 34 barras modificado para el

análisis de reconfiguración a demanda nominal en los dos casos de estudio.

Tabla 10. Demanda de cargas puntuales en la red de 34 barras modificada[38].

Cargas del Sistema			
Nodo	Modelo	Demanda	
		MW	MVAr
2	Y - PQ	0.0550	0.0290
4	Y - PQ	0.0160	0.0080
10	Y - PQ	0.0340	0.0170
11	Y - PQ	0.1350	0.0700
9	Y - PQ	0.0050	0.0020
13	Y - PQ	0.0400	0.0200
13	Y - PQ	0.0040	0.0020
15	Y - PQ	0.0070	0.0030
17	Y - PQ	0.0040	0.0020
19	Y - PQ	0.0150	0.0070
20	Y - PQ	0.0020	0.0010
20	Y - PQ	0.0320	0.0170
21	Y - PQ	0.1460	0.0730
26	Y - PQ	0.0820	0.0430
27	Y - PQ	0.0400	0.0200
29	Y - PQ	0.0280	0.0140
22	Y - PQ	0.0090	0.0050
23	Y - PQ	0.0450	0.0230
24	Y - PQ	0.0230	0.0110
26	Y - PQ	0.0600	0.0480
28	Y - PQ	0.0270	0.0210
23	Y - PQ	0.4050	0.3150
25	Y - PQ	0.0600	0.0480
33	Y - PQ	0.4500	0.2250
16	Y - PQ	0.0450	0.0200
Total		1.7690	1.0440

- **Caso1: Modelo con compensación reactiva a voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

Se realiza el método de Newton para obtener los parámetros de la red integrando compensadores shunt en los nodos 23 y 25 como se muestra en la tabla 7. Configurando el voltaje en la barra de ref. de 1 p.u. y teniendo en cuenta límites de voltaje máximos y mínimos de 1.00 y 0.95 p.u. respectivamente.

Una vez implementado el algoritmo de MPSO se obtiene la solución a la DNR y se realiza una comparativa en la sección 5 Análisis de resultados.

- **Caso2: Modelo sin compensación reactiva a voltaje de 0.95 p.u. en la barra de ref.**

Se sigue el mismo procedimiento de cálculo de flujos de en el sistema mediante Newton para obtener los parámetros de la red desconectando los compensadores shunt, pero ahora en un estado crítico de caída de voltaje configurando el voltaje en la barra de ref. a 0.95 p.u. y reduciendo el límite de voltaje permitido en las barras a 0.90 p.u.

Con estas modificaciones en los parámetros de la red se busca evidenciar al sistema con problemas de caídas de tensión y como el algoritmo busca una posible solución sin romper las restricciones para el óptimo funcionamiento del suministro eléctrico.

5 Análisis de resultados

En este apartado se muestra los resultados obtenidos de la implementación de DNR mediante MPSO en los dos sistemas para los distintos casos de estudio.

5.1 Reducción de pérdidas en el modelo de prueba de 13 barras.

A continuación, se visualizan los resultados obtenidos antes y después de la DNR para cada caso en el modelo de prueba de 13 barras.

- **Caso1: Compensación reactiva en nodos 9 y 11 con voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

Se ha graficado los valores obtenidos por flujos de potencia a través de las líneas antes y después de la resolución del problema de DNR mediante el MPSO integrando compensación reactiva en los nodos 9 y 11 con valores de 0.12 y 0.14 p.u. respectivamente, y se muestran en la Figura 18.

El flujo a través de las líneas después de la reconfiguración se ha reducido bajando la cargabilidad de las líneas: L10-12, L2-7, L7-10, L7-8, L8-9, L12-13.

En ciertas líneas el flujo de potencia ha aumentado, caso de las líneas: L2-3, L3-4, L7-13, L4-9.

También existen flujos de potencia negativos esto se justifica debido a la dirección del flujo de potencia al realizar el cálculo mediante NR. En general, se ha cumplido con el objetivo que es mejorar los resultados totales de cargabilidad como se puede observar en la Figura 18.

Como se puede apreciar en la tabla 11 las pérdidas en las líneas se redujeron en un 14.94% después de realizado el DNR mediante MPSO.

Los resultados de la simulación para el caso1 también muestran las pérdidas de potencia activa antes y después de DNR las cuales pasan de 277.03 kW a 235.65 kW respectivamente.

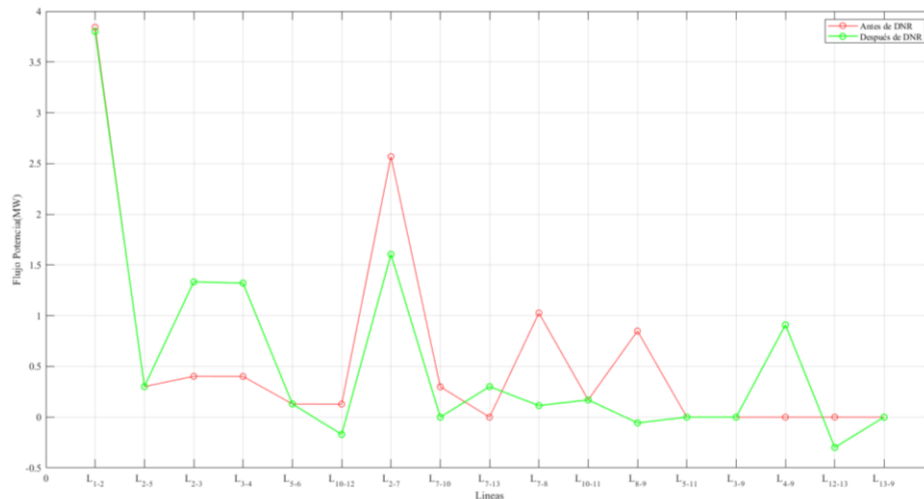


Figura 18. Comparativa de cargabilidad con flujo por las líneas en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.

El cuadro de resultados también muestra los interruptores abiertos antes y después de la DNR, hay que tener en cuenta que los interruptores abiertos antes de DNR son los asociados a las líneas de enlace agregadas mostradas en la Tabla 3.

En la Figura 19 se observa que las pérdidas en las líneas L2-7, L7-8, L8-9 se redujeron después de DNR mientras en las líneas L2-3, L3-4, L4-9 las pérdidas aumentaron, pero en menor magnitud. En el resto de las líneas las pérdidas se mantuvieron. Al realizar un análisis global de las magnitudes mediante DNR se logra reducir un 14.94% de pérdidas en todas las líneas de la red de 13 nodos-Caso1. Después

de la reconfiguración los interruptores abiertos son las de las líneas: L3-9, L8-9, L9-13, L7-10, L5-11.

Tabla 12. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 13 barras - Caso1.

Nº Línea Abierta	Antes de DNR	Después de DNR
8	CERRADA	L7-10
12	CERRADA	L8-9
13	L5-11	L5-11
14	L3-9	L3-9
15	L4-9	CERRADA
16	L12-13	CERRADA
17	L9-13	L9-13

Tabla 11. Resultados de simulación en sistema IEEE modificado de 13 nodos-Caso1.

Resultados de Simulación en Sistema de 13 Nodos-Caso1		
	Antes de DNR	Después de DNR
Pérdidas de Potencia (kW)	277.03	235.65
Reducción de Pérdidas (%)	-	14.94
Interruptores Abiertos:	13-14-15-16-17	8-12-13-14-17
Número de Iteraciones	-	4.0
Tiempo de Convergencia (s)	-	1.01

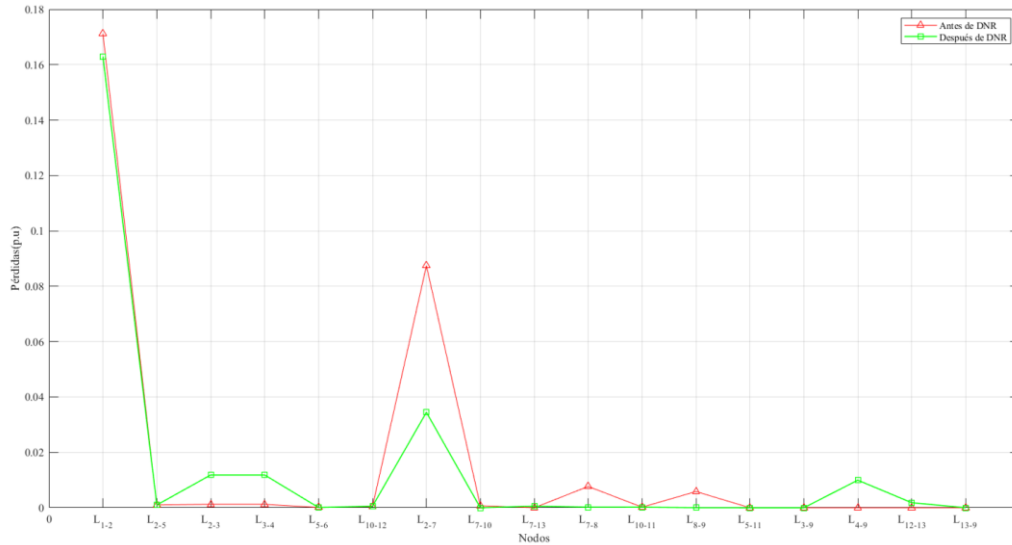


Figura 19. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1

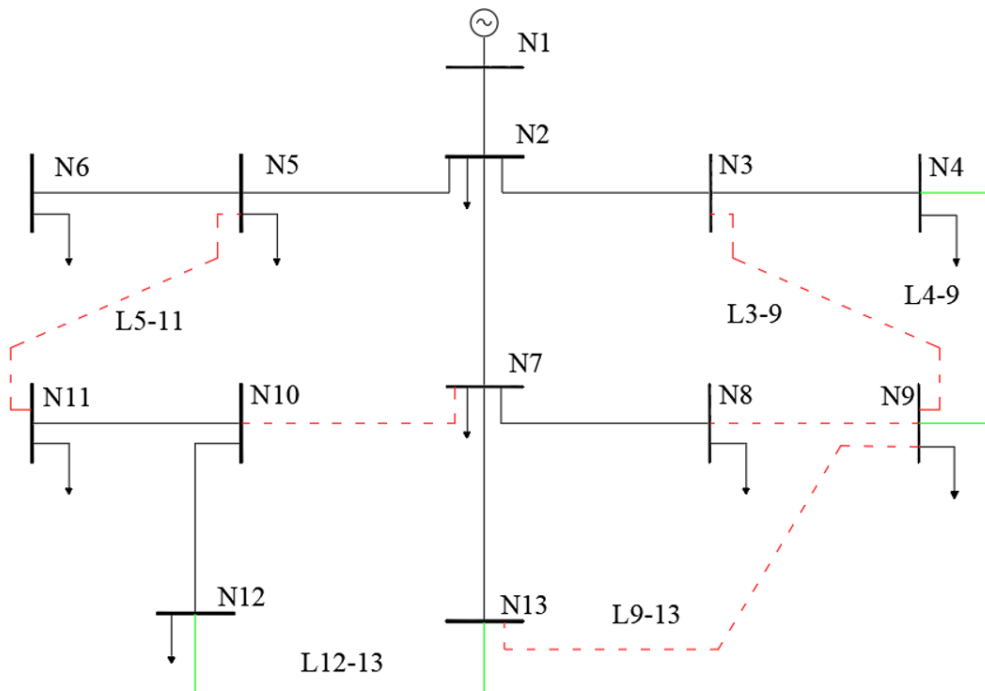


Figura 20. Sistema de 13 barras después de reconfiguración - Caso1

- **Caso2: Sistema en estado crítico sin compensación con voltaje reducido a 0.95 p.u. en la barra de ref.**

Para el Caso2, se ha retirado la compensación reactiva de los nodos 9 y 11

y se ha reducido el voltaje en por unidad en la barra de ref. obteniendo los resultados de la Figura 21 donde se puede visualizar la reducción del flujo de potencia en 9 líneas una vez resuelto el problema de DNR

mediante MPSO: L2-3, L3-4, L10-12, L7-10, L7-8, L10-11, L8-9, L4-9, L12-13.

Se puede evidenciar que en las líneas abiertas la cargabilidad es cero ya que no existe flujo de potencia a través de estas líneas.

Las cargabilidades negativas se deben a la dirección del flujo de potencia referente al cálculo mediante NR

La tabla 13, muestra los resultados totales obtenidos una vez se ha realizado la simulación en el sistema de 13 barras para el Caso2.

Se tiene que las pérdidas de potencia activa antes de DNR son 322.90 kW, mientras que después de DNR las pérdidas descienden a 269.72 kW . El sistema converge en la iteración 7 para este caso.

También se muestran los estados de las líneas una vez realizado la reconfiguración y el tiempo de convergencia del algoritmo.

Análisis de Pérdidas

En la gráfica comparativa de pérdidas en las líneas Figura 22, se puede visualizar que las pérdidas se mantienen bajas en la mayor parte de las líneas excepto en las líneas: L1-2 y L2-7 que como se puede observar en la representación unifilar de la Figura 23.

Estas líneas conforman el ramal principal de la red por lo cual la corriente que pasa a través de estas es alta al igual que sus pérdidas. La reducción de pérdidas para el Caso2 del sistema de 13 barras es del 16.47%.

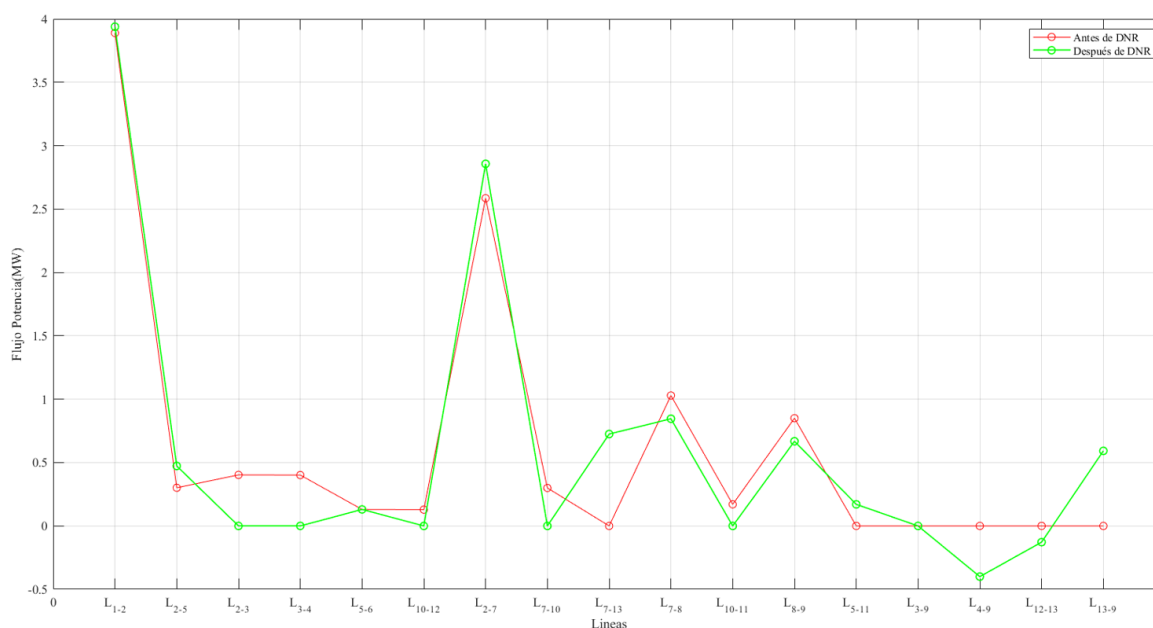


Figura 21. Comparativa de cargabilidad de líneas en el sistema de 13 barras a voltaje crítico antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.

Tabla 13. Resultados de simulación en sistema IEEE modificado de 13 nodos-Caso2

Resultados de Simulación en Sistema IEEE 13 Nodos a Voltaje Crítico		
	Antes de DNR	Después de DNR
Pérdidas de Potencia (kW)	322.90	269.73
Reducción de Pérdidas (%)	-	16.47
Interruptores Abiertos:	13-14-15-16-17	4-6-8-12-14
Número de Iteraciones	-	7.0
Tiempo de Convergencia (s)	-	2.04

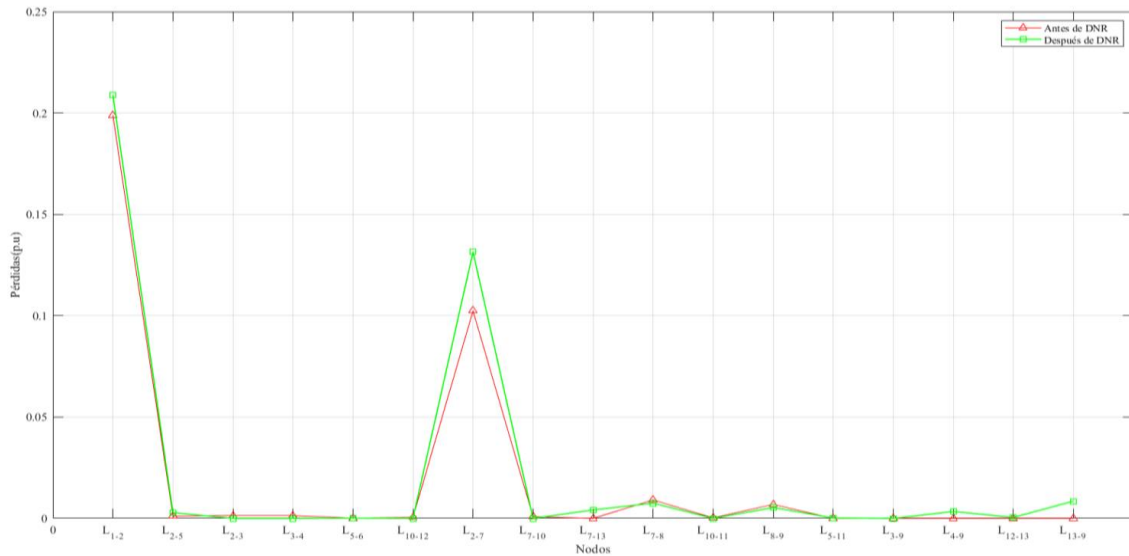


Figura 22. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2

A continuación, se muestra los estados de las líneas que conforman el sistema antes y después de resolver la DNR para el Caso2.

El diagrama de la Figura 23, muestra el sistema de 13 barras modificado con líneas de enlace para el Caso2, una vez se ha implementado la reconfiguración mediante el algoritmo MPSO, obteniendo una red de topología radial con menos pérdidas y menor cargabilidad en las líneas.

Las líneas segmentadas rojas representan las líneas abiertas, y las verdes muestran las nuevas líneas de enlace cerradas después de DNR.

Tabla 14. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 13 barras- Caso2.

N° Línea Abierta	Antes de DNR	Después de DNR
4	CERRADA	L3-4
6	CERRADA	L10-12
8	CERRADA	L7-10
12	CERRADA	L8-9
13	L5-11	CERRADA
14	L3-9	L3-9
15	L4-9	CERRADA
16	L12-13	CERRADA
17	L9-13	CERRADA

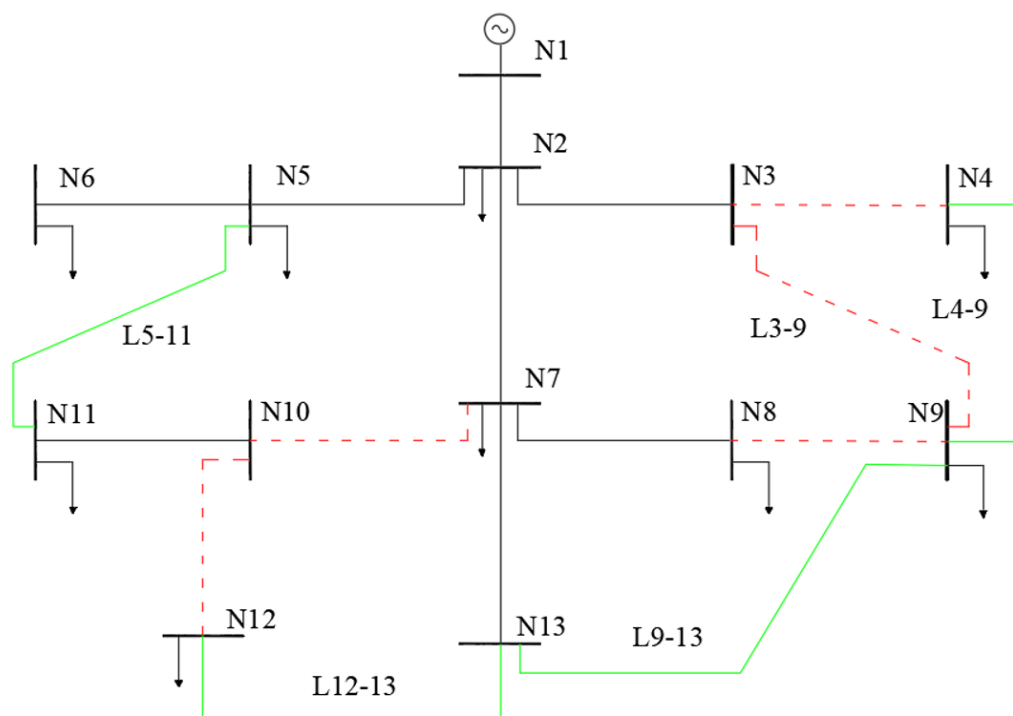


Figura 23. Sistema de 13 barras después de reconfiguración – Caso2

5.2 Mejora del perfil de voltaje en el modelo de prueba de 13 barras.

En este apartado se muestran los resultados de los casos propuestos para el modelo de prueba de 13 barras.

- **Caso1: Compensación reactiva en nodos 23 y 25 con voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

Para el Caso1 en el sistema de 13 nodos se logra mejoría del perfil de voltaje en 10 nodos de la red subiendo el voltaje mínimo

arriba de 0.86 p.u. después de la reconfiguración.

Todos los nodos son alimentados desde distintas líneas conservando una configuración radial antes y después de la aplicación del algoritmo MPSO para la resolución de DNR. Se debe mencionar que el sistema original IEEE integra en su red un regulador de tensión en el tramo de L1-2 el cual no se ha integrado a la simulación con el objetivo de hacer visibles las caídas de voltaje y las mejorías mediante la implementación de DNR.

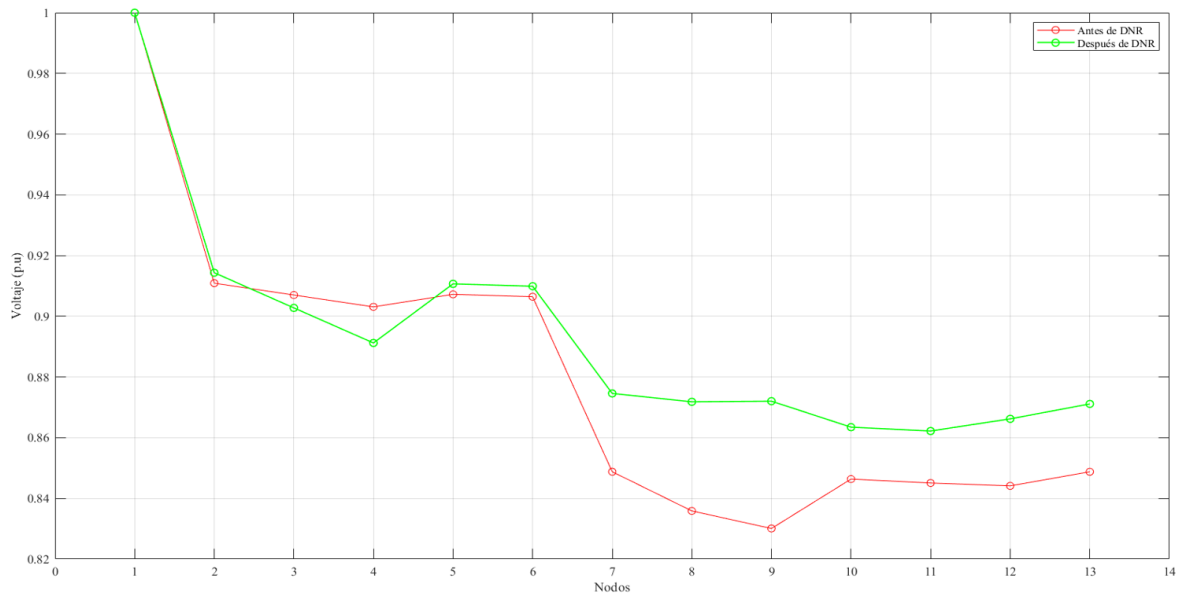


Figura 24. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1

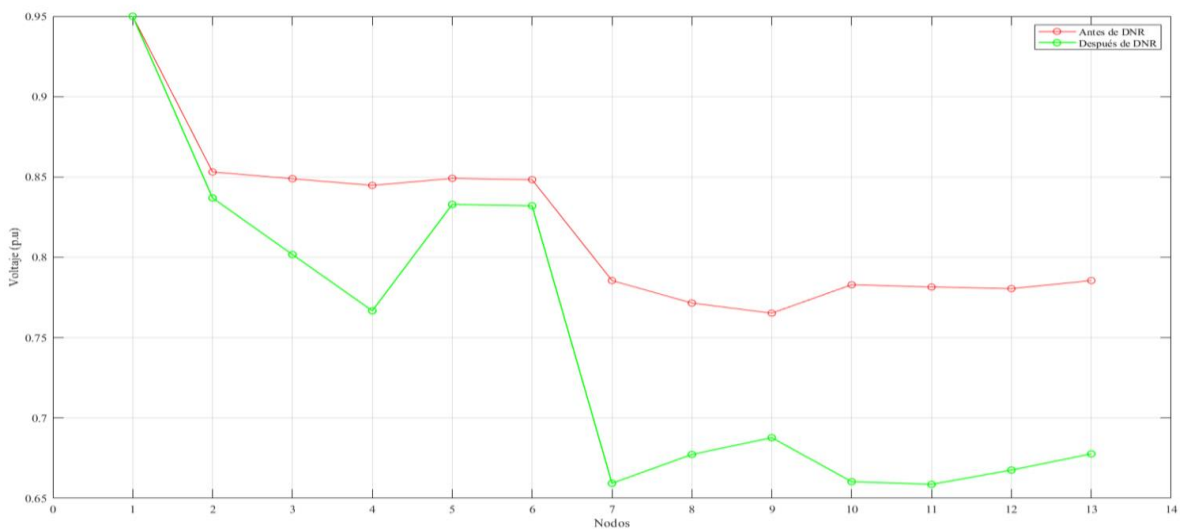


Figura 25. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.

- **Caso2: Sistema en estado crítico sin compensación con voltaje reducido a 0.95 p.u. en la barra de ref.**

Para el caso2 en el sistema de 13 barras no se logra mejoría del perfil de voltaje debido a la salida de los capacitores shunt y a la reducción de voltaje en la barra de ref. del sistema. Al priorizar la restricción de mantener una red radial la reconfiguración

mostrada por el algoritmo mantiene la topología, pero se dan caídas de voltaje en toda la red.

Los voltajes críticos llegan a caer en ciertos nodos a 0.66 p.u.

- **Caso2. Sin restricción de topología.** Se retiró la restricción de topología en la red y se logra conseguir una red con mejoras en el perfil de voltaje, pero comprometiendo la confiabilidad del sistema dando como

resultado la desconexión del nodo 6 de la red.

5.3 Reducción de pérdidas en el modelo de prueba de 34 barras.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos antes y después de la DNR para cada caso en el modelo de prueba de 34 barras.

- **Caso1: Compensación reactiva en nodos 23 y 25 con voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

Se ha graficado los valores obtenidos por flujos de potencia a través de las líneas antes y después de la resolución del problema de

DNR mediante el MPSO y se muestran en la Figura 27.

Se puede evidenciar que se produce una mejoría en los niveles de cargabilidad en la mayoría de las líneas.

Las pérdidas en las líneas se redujeron en un 94.86% después de realizado el DNR como se puede visualizar en los resultados tabulados en la Tabla 13.

Esto también se evidencia en la Figura 28 donde se puede visualizar la curva de pérdidas en tramos antes y después de la DNR de la red.

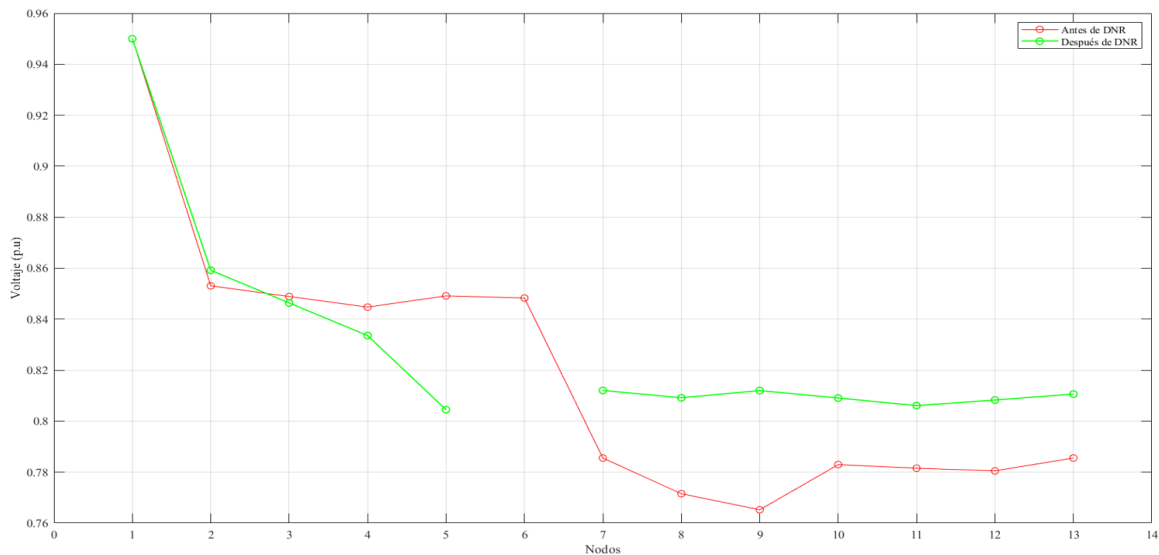


Figura 26. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 13 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO, sin restricción de topología-Caso2.

Tabla 15. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34.

Resultados de Simulación en Sistema IEEE 34 Nodos-Caso1		
	Antes de DNR	Después de DNR
Pérdidas de Potencia (kW)	371.26	19.07
Reducción de Pérdidas (%)	-	94.86
Interruptores Abiertos:	34-35-36-37-38-39	10-22-24-14-18-29
Número de Iteraciones	-	4.0
Tiempo de Convergencia (s)	-	3.36

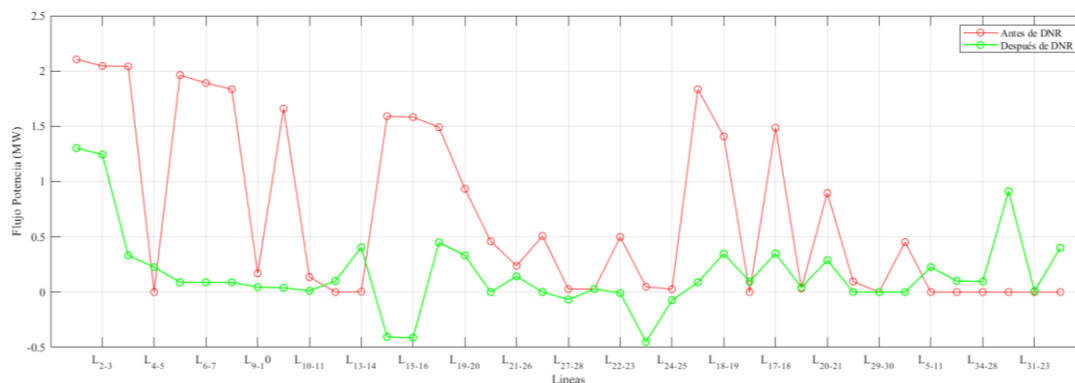


Figura 27. Comparativa de cargabilidad con flujo por las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.

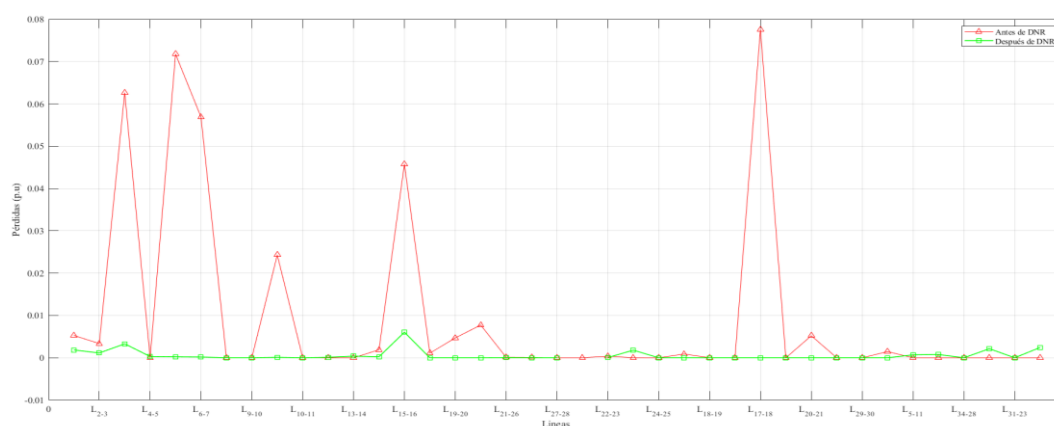


Figura 28. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1

Después de la reconfiguración los interruptores abiertos son los de las líneas : L10-11, L25-24, L22-23, L15-16, L21-26, L20-31.

A continuación, se muestra la tabla de estados de líneas antes y después de DNR mediante MPSO.

Tabla 16. Estado de líneas antes y después de DNR sistema 34 barras- Caso1.

Nº Línea Abierta	Antes de DNR	Después de DNR
34	L5-11	CERRADA
35	L12-25	CERRADA
36	L34-28	CERRADA
37	L3-16	CERRADA
38	L31-23	CERRADA
39	L14-24	CERRADA
10	CERRADA	L10-11
24	CERRADA	L25-24
22	CERRADA	L22-23
14	CERRADA	L15-16

18	CERRADA	L21-26
29	CERRADA	L20-31

Como se puede apreciar en el diagrama de la red después de la resolución de DNR se ha obtenido una reconfiguración radial mejorada integrando a la red las nuevas líneas de enlace.

Las líneas rojas segmentadas muestran las conexiones de líneas abiertas debido a la modificación de la reconfiguración de la red de distribución.

Las líneas azules son las nuevas líneas integradas a la red para la implementación de DNR.

- **Caso2: Sistema en estado crítico sin compensación con voltaje reducido a 0.95 p.u. en la barra de ref.**

En la Figura 30 se muestra la gráfica comparativa de cargabilidad en las líneas mediante flujos de potencia del sistema de 34 barras antes y después de la DNR en el sistema modificado en estado crítico sin compensación reactiva a voltaje de 0.95 p.u. en la barra de ref.

En la gráfica antes de DNR se puede apreciar como el flujo desde las líneas 34 a la 39 es cero, debido a que estas líneas se las integro a la red para implementación de la reconfiguración.

Después de la DNR se puede apreciar que ya existe flujo de potencia a través de

esas líneas debido al cambio de topología y a la apertura de otras líneas ya existentes.

Los flujos de potencia negativos se deben a la dirección del flujo al momento del cálculo mediante NR.

Las pérdidas en las líneas se redujeron en un 70.65% después de realizado el DNR como se puede visualizar en los resultados tabulados en la Tabla 15.

Después de la reconfiguración los interruptores abiertos son las de las líneas: L6-7, L9-13, L15-16, L20-19, L21-22, L27-28.

Las pérdidas de potencia activa se reducen de 306.57 kW a 89.99 kW y el sistema converge a la cuarta iteración en un tiempo de 2.94 segundos.

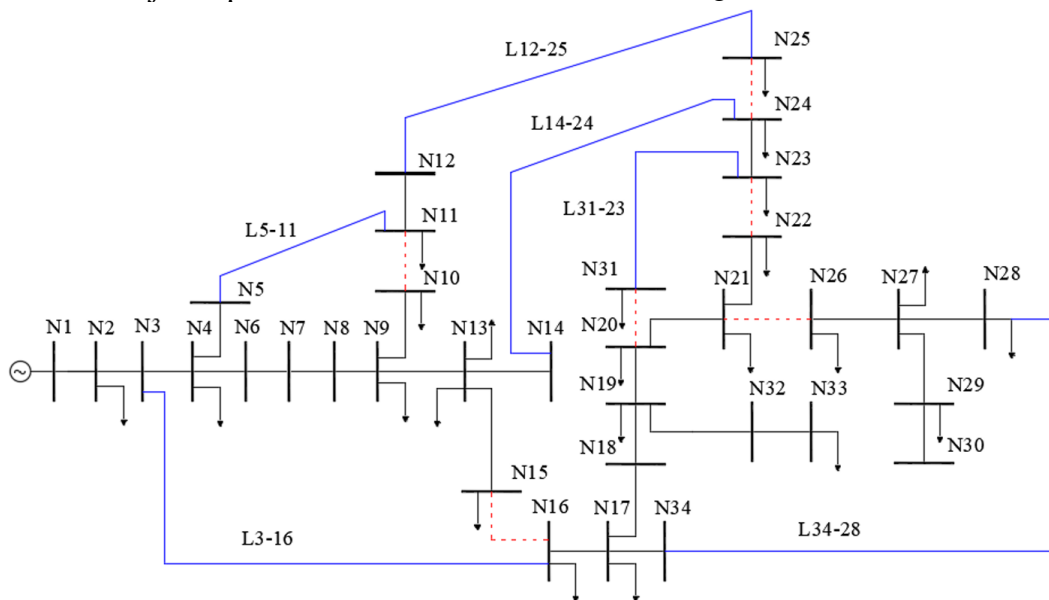


Figura 29. Sistema de 34 barras después de reconfiguración - Caso1 .

Tabla 17. Configuraciones de líneas nuevas e impedancias en la red de 34 barras-Caso2.

Resultados de Simulación en Sistema IEEE 34 Nodos a Voltaje Crítico-Caso2		
	Antes de DNR	Después de DNR
Pérdidas de Potencia (kW)	306.57	89.99
Reducción de Pérdidas (%)	-	70.6460
Interruptores Abiertos:	34-35-36-37-38-39	6-9-14-16-19-20
Número de Iteraciones	-	4.0
Tiempo de Convergencia (s)	-	2.94

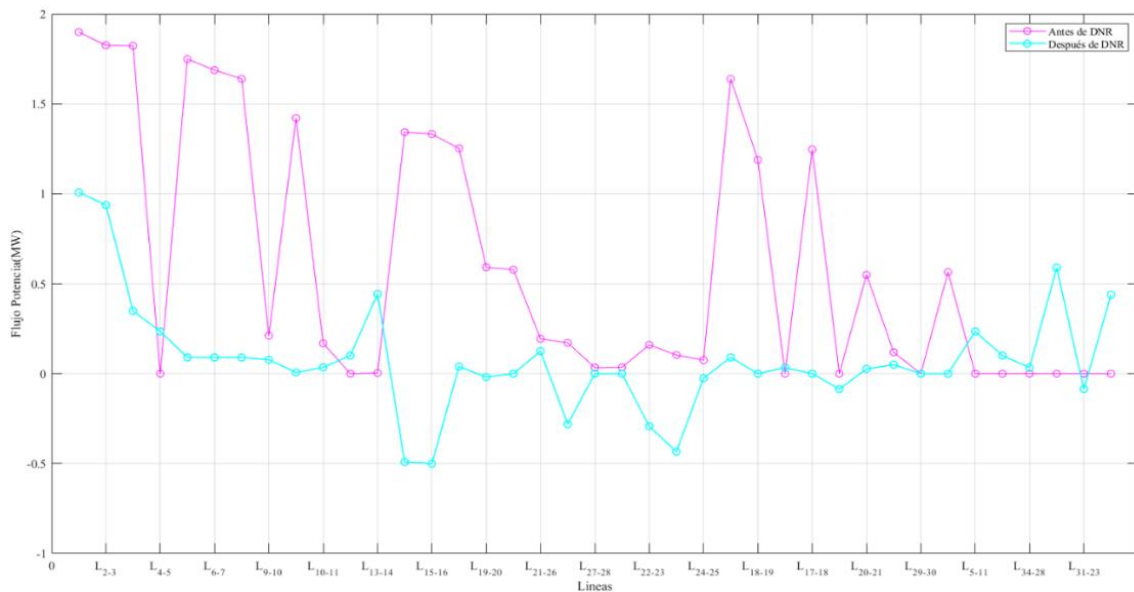


Figura 30. Comparativa de cargabilidad de líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal y voltaje crítico antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.

Las pérdidas se consiguen reducir drásticamente debido a la apertura de las líneas que presentaban mayor cantidad de pérdidas llegando en muchas líneas a valores cercanos a cero.

Similar al Caso1 la configuración obtenida mejoró los parámetros de la red

tanto en reducción de pérdidas como mejora del perfil de voltaje.

Se mantiene una topología radial alimentando todos los nodos, reduciendo de forma notable las pérdidas en las líneas y mejorando el perfil de voltaje como se muestra en la Figura 31.

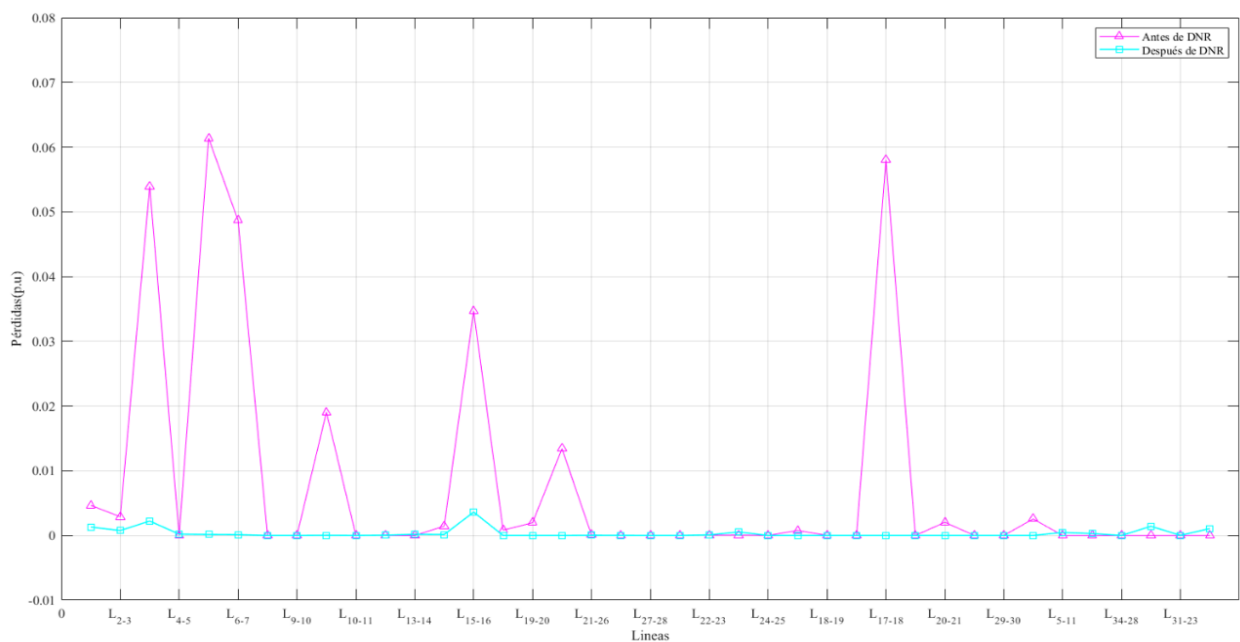


Figura 31. Comparativa de pérdidas (p.u.) en las líneas en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO- Caso2.

Tabla 18. Estado de líneas antes y después de DNR – Caso2

Nº Línea Abierta	Antes de DNR	Después de DNR
34	L5-11	CERRADA
35	L12-25	CERRADA
36	L34-28	CERRADA
37	L3-16	CERRADA
38	L31-23	CERRADA
39	L14-24	CERRADA
6	CERRADA	L6-7
9	CERRADA	L9-13
14	CERRADA	L15-16
16	CERRADA	L19-20
19	CERRADA	L21-22
20	CERRADA	L27-28

En el diagrama unifilar mostrado en la Figura 32 se representa la configuración una vez aplicado DNR mediante MPSO.

En línea segmentada roja las líneas abiertas después de resuelta la reconfiguración. Y en línea azul las líneas de enlace integradas al sistema para la implementación del algoritmo.

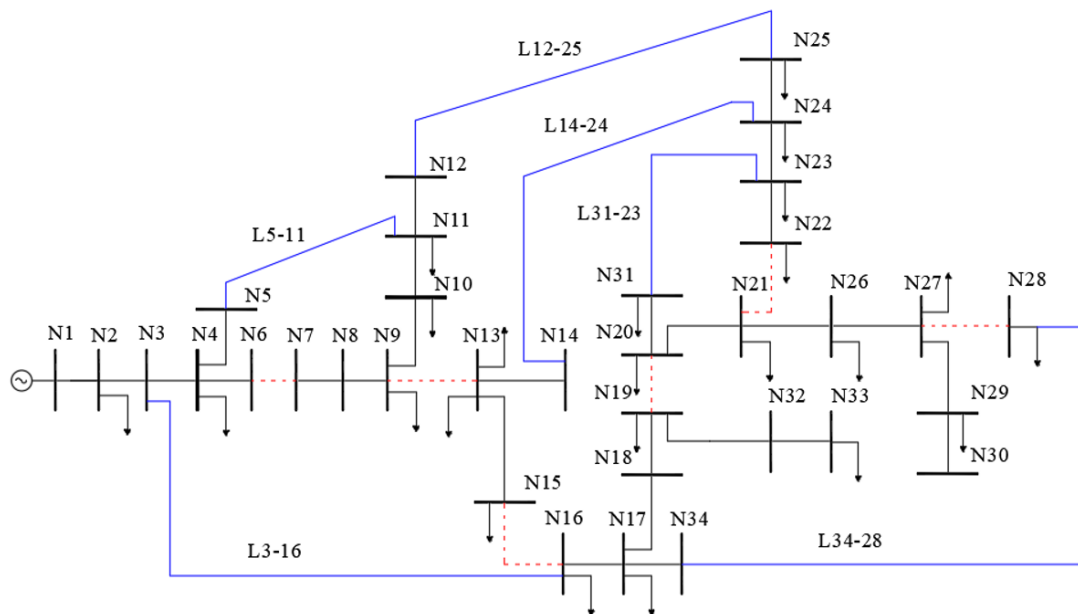


Figura 32. Sistema de 34 barras después de reconfiguración-Caso2.

5.4 Mejora del perfil de voltaje en el modelo de prueba de 34 barras.

En esta sección se muestran los resultados dados en los casos propuestos para el modelo de prueba de 34 barras.

- **Caso1: Compensación reactiva en nodos 23 y 25 con voltaje de 1 p.u. en la barra de ref.**

El sistema original IEEE integra en su red dos reguladores de tensión en los tramos de L7-8 y L18-19 los cuales no se han

integrado a la simulación con el objetivo de hacer visibles las caídas de voltaje y las mejoras mediante la implementación de DNR.

Se observa en la Figura 33 la mejora considerable del perfil de voltaje en los nodos del sistema de 34 barras después de la reconfiguración teniendo valores arriba del 0.95 p.u mientras en el sistema sin DNR los voltajes llegan a caer a valores por debajo de 0.8 p.u en los tramos más alejados de la barra de ref.

- **Caso2: Sistema en estado crítico sin compensación con voltaje reducido a 0.95 p.u. en barra de ref.**

Se puede observar en la Figura 34 como al reducirse el voltaje en la barra de ref. a 0.95 p.u. existe una caída de voltaje general en todo el sistema antes de DNR.

Se puede apreciar un perfil similar al del Caso1 esto debido a que los valores de reactancias de línea y demandas en nodos no han cambiado. En la comparativa se aprecia la mejoría notable después de la resolución de DNR, donde los voltajes están arriba de 0.93 p.u. para este caso de nivel de voltaje crítico.

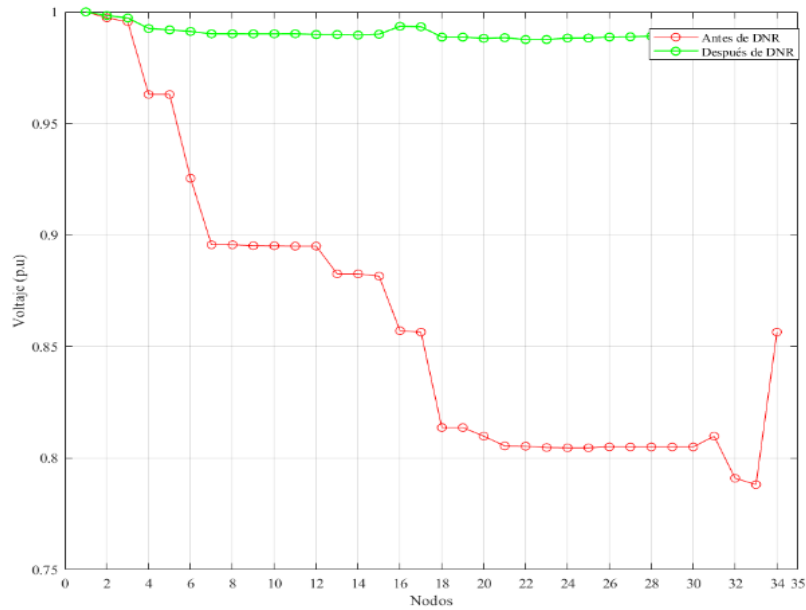


Figura 33. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso1.

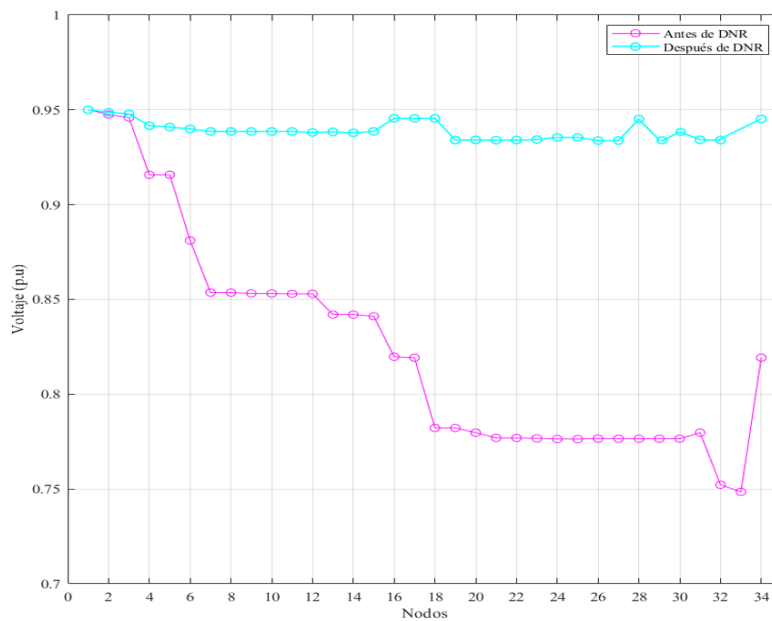


Figura 34. Comparativa de perfiles de voltaje en nodos en el sistema de 34 barras a demanda nominal antes y después de DNR aplicando MPSO-Caso2.

6 Conclusiones

A continuación, se detalla las conclusiones de este trabajo en base a los resultados dados en la implementación de los casos de estudio en los distintos sistemas de 13 y 34 barras.

El análisis de flujos de potencia en las redes de 13 y 34 barras se lo realizó mediante la herramienta MATPOWER utilizando el método de Newton donde se calcula las variaciones de parámetros, se forma el jacobiano basado en la variación de parámetros y se actualiza los valores de acuerdo con cada iteración.

La resolución de DNR se la realizó utilizando MPSO. En base a este algoritmo se obtuvo las configuraciones óptimas para la solución de DNR de los dos casos de estudio para cada uno de los sistemas, manteniendo las restricciones para un idóneo funcionamiento del sistema en cuanto a confiabilidad y logrando la minimización de la función objetivo que para este trabajo son las pérdidas de potencia activa en los sistemas. También se logró mejoras notables en los niveles de voltaje tanto para el sistema de 13 como para el de 34 barras.

El porcentaje de reducción de pérdidas en el sistema de 34 barras fue mucho mayor que el sistema de 13 barras donde el primero alcanzo una reducción superior al 70% de pérdidas para los dos casos, mientras el sistema de 13 alcanzó reducciones de pérdidas que bordean el 15% en cada caso de estudio.

Para el sistema de 13 barras en el Caso2 el algoritmo no consiguió una reconfiguración donde se pudiera apreciar mejoras en el perfil de voltaje debido a que para este caso el nivel de voltaje en el sistema era crítico, se modificó la restricción de topología del algoritmo y finalmente se logró un perfil de voltaje mejorado, pero comprometiendo la confiabilidad del nodo 6 del sistema que se aisló debido al bajo nivel de voltaje.

Debido al estado crítico de voltaje propuesto en el Caso2, el algoritmo tuvo inconvenientes en su convergencia, para la resolución de DNR de los dos sistemas fue necesario la reducción de voltaje mínimo admisible en el algoritmo MPSO con lo cual se logró cumplir los objetivos de mejoras de perfil de voltaje para los dos sistemas y cada uno de sus casos.

Para la implementación de DNR es indispensable contar con los interruptores que permitan realizar la reconfiguración además de líneas de enlace las cuales se encuentren en rutas factibles y sin inconvenientes al momento de alimentarse desde otros puntos.

Hay que tener en cuenta que la aplicación de DNR para una red real conlleva la integración de cargas distribuidas y puntuales además de desbalances de carga y simulación de otros elementos que se encuentran usualmente en las redes de distribución, el algoritmo MPSO demostró ser una buena herramienta al momento de optimizar variables cumpliendo restricciones para asegurar índices de calidad y confiabilidad de energía en la red encontrando soluciones óptimas y cumpliendo la minimización de la función objetivo de pérdidas de potencia activa.

6.1 Trabajos futuros

El trabajo presentado genera diversas temáticas para mejoras y trabajos futuros, entre los más importantes se puede mencionar:

- Reconfiguración de un sistema de distribución desbalanceado utilizando MPSO.
- Reconfiguración del sistema de distribución utilizando el algoritmo genético.
- Reconfiguración del sistema de distribución para reducir pérdidas y mejora del perfil de voltaje mediante algoritmos híbridos.

7 Referencias:

- [1] A. O. Salau, Y. W. Gebru, and D. Bitew, "Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04233, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04233.
- [2] M. J. Quintero-Duran, J. E. Candelo-Becerra, and K. Cabana-Jimenez, "Distribution network reconfiguration with large number of switches solved by a modified binary bat algorithm and improved seed population," *Teh. Vjesn.*, vol. 26, no. 5, pp. 1284–1291, 2019, doi: 10.17559/TV-20180525204445.
- [3] I. Conference and E. D. Stockholm, "22 nd International Conference on Electricity Distribution 22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm , 10-13 June 2013 Paper 0668," no. 0668, pp. 10–13, 2013.
- [4] M. J. Tahir, I. A. Latiff, M. Alam, and M. S. Mazliham, "Network Reconfiguration Using Modified Particle Swarm Algorithm," *2018 2nd Int. Conf. Smart Sensors Appl. ICSSA 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICSSA.2018.8535944.
- [5] Y. Gebru, D. Bitew, H. Aberie, and K. Gizaw, "Performance enhancement of radial distribution system using simultaneous network reconfiguration and switched capacitor bank placement," *Cogent Eng.*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2021.1897929.
- [6] J. D. Juárez Cervantes, *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*, vol. 52, no. 1. 2002.
- [7] D. E. A. P. Equinos, F. Guzmán, L. Fernando, M. C. Brito, and B. Leandro, "I NSTITUTO P OLITÉCNICO N ACIONAL Ingeniero en Control y Automatización Presentan :," pp. 1–137, 2010.
- [8] W. Zheng, W. Huang, D. J. Hill, and Y. Hou, "An Adaptive Distributionally Robust Model for Three-Phase Distribution Network Reconfiguration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1224–1237, 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3030299.
- [9] Y. Ren and S. Liu, "Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Engineering Structural Optimization Problem," *Proc. - 13th Int. Conf. Comput. Intell. Secur. CIS 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 504–507, 2018, doi: 10.1109/CIS.2017.00117.
- [10] G. Wenjie, Y. Litao, H. Aoyang, and L. Zhengjie, "Optimal Dispatch Model of Active Distribution Network Based on Particle Swarm optimization Algorithm with Random Weight," *2021 IEEE 2nd Int. Conf. Big Data, Artif. Intell. Internet Things Eng. ICBAIE 2021*, no. Icbaie, pp. 482–485, 2021, doi: 10.1109/ICBAIE52039.2021.9389910.
- [11] M. Anantathanavit and M. A. Munlin, "Radius particle swarm optimization," *2013 Int. Comput. Sci. Eng. Conf. ICSEC 2013*, pp. 126–130, 2013, doi: 10.1109/ICSEC.2013.6694765.
- [12] N. A. Basyarach, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, "Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using accelerated particle swarm optimization," *2017 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. Strength. Link Between Univ. Res. Ind. to Support ASEAN Energy Sect. ISITIA 2017 - Proceeding*, vol. 2017-Janua, no. 2, pp. 93–97, 2017, doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124061.
- [13] M. B. Shafik, G. I. Rashed, H. Chen, M. R. Elkadeem, and S. Wang,

- “Reconfiguration strategy for active distribution networks with soft open points,” *Proc. 14th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2019*, pp. 330–334, 2019, doi: 10.1109/ICIEA.2019.8833865.
- [14] S. Ramírez, *Redes de distribución de energía*. 2009.
- [15] U. A. D. E. Ingeniería and C. D. E. I. Eléctrica, “Comunidad al servicio del Pueblo Y CONSTRUCCIÓN,” 2018.
- [16] C. A. L. Valladares, “Distribución de la Energía Eléctrica,” pp. 1–29, 2010.
- [17] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis, Third Edition*. 2012.
- [18] J. D. Toapanta Merino, “Ubicación óptima de rmu’s en redes eléctricas soterradas de distribución radial usando técnicas heurísticas.”
- [19] M. Polo, J. Bernardo, and J. B. Peña, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra,” *Cienc. e Ing.*, vol. 38, no. 2, pp. 167–176, 2017.
- [20] M. A. S. Cortés, “Calidad de la Energía Eléctrica,” p. 492, 2009.
- [21] S. Ramirez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*. 2006.
- [22] M. Holguin and D. Gomezcoello, “Análisis de la calidad de energía eléct de la calidad de energía eléct,” pp. 1–234, 2010, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2110/13/UPS-GT000145.pdf>.
- [23] A. Roviello, L. Perez, and P. Ledesma, “Regulación de Frecuencia y Potencia,” *Over Rim*, pp. 191–199, 2017, doi: 10.2307/j.ctt46nrzt.12.
- [24] C. Zhang, J. Zhang, and X. Gu, “The application of hybrid genetic particle swarm optimization algorithm in the distribution network reconfigurations multi-objective optimization,” *Proc. - Third Int. Conf. Nat. Comput. ICNC 2007*, vol. 2, no. Icnc, pp. 455–459, 2007, doi: 10.1109/ICNC.2007.708.
- [25] M. F. Sulaima, S. N. Othman, M. S. Jamri, R. Omar, and M. Sulaiman, “A DNR by using rank evolutionary particle swarm optimization for power loss minimization,” *Proc. - Int. Conf. Intell. Syst. Model. Simulation, ISMS*, vol. 2015-Septe, no. 1, pp. 417–422, 2015, doi: 10.1109/ISMS.2014.77.
- [26] A. Tandon and D. Saxena, “Optimal reconfiguration of electrical distribution network using selective particle swarm optimization algorithm,” *2014 Int. Conf. Power, Control Embed. Syst. ICPCES 2014*, 2014, doi: 10.1109/ICPCES.2014.7062806.
- [27] F. M. F. Flaih, X. Lin, S. M. Dawoud, and M. A. Mohammed, “Distribution system reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using Modified particle swarm optimization,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2016-Decem, pp. 120–124, 2016, doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779482.
- [28] W. Chunyi, G. Jie, S. Wei, M. Hong, and N. Xu, “Static distribution network reconfiguration based on an improved particle swarm optimization algorithm,” *Proc. - Int. Conf. Nat. Comput.*, vol. 2016-Janua, pp. 1285–1289, 2016, doi: 10.1109/ICNC.2015.7378177.
- [29] N. Li and S. Zhu, “Modified particle swarm optimization and its application in multimodal function

- optimization,” *Proc. 2011 Int. Conf. Transp. Mech. Electr. Eng. TMEE 2011*, pp. 375–378, 2011, doi: 10.1109/TMEE.2011.6199221.
- [30] A. H. Al-mter and S. Lu, “2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence A Modified Particle Swarm Optimization Algorithm using Uniform Design,” *2016 Int. Conf. Inf. Syst. Artif. Intell.*, no. 2, pp. 432–435, 2016, doi: 10.1109/ISAI.2016.30.
- [31] Z. Pengjun, L. Sanyang, and C. Guo, “Modified particle swarm optimization for optimization problems,” *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 610–614, 2012.
- [32] Y. Zhao and W. Zu, “Real-time obstacle avoidance method for mobile robots based on a modified particle swarm optimization,” *Proc. 2009 Int. Jt. Conf. Comput. Sci. Optim. CSO 2009*, vol. 2, pp. 269–272, 2009, doi: 10.1109/CSO.2009.196.
- [33] C. Wang, J. Zhang, J. Yang, C. Hu, and J. Liu, “A modified particle swarm optimization algorithm and its application for solving traveling salesman problem,” *Proc. 2005 Int. Conf. Neural Networks Brain Proceedings, ICNNB’05*, vol. 2, no. August, pp. 689–694, 2005, doi: 10.1109/icnnb.2005.1614723.
- [34] J. Rizwana, R. Jeevitha, R. Venkatesh, and K. S. Parthiban, “Minimization of fuel cost in solving the power economic dispatch problem including transmission losses by using modified Particle Swarm Optimization,” *2015 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Comput. Res. ICCIC 2015*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/ICCIC.2015.7435718.
- [35] C. R. Wang and Y. E. Zhang, “Distribution network reconfiguration based on modified particle swarm optimization algorithm,” *Proc. 2006 Int. Conf. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 2006, no. August, pp. 2076–2080, 2006, doi: 10.1109/ICMLC.2006.258346.
- [36] C. Karaaom, P. Jirapong, and P. Thararak, “Optimal Distribution Network Reconfiguration Implemented with Tie Line and Capacitor Using Improved Particle Swarm Optimization,” *Proc. 2020 Int. Conf. Power, Energy Innov. ICPEI 2020*, pp. 61–64, 2020, doi: 10.1109/ICPEI49860.2020.9431479 .
- [37] D. A. ARIAS and J. G. Z. MOLINA, “ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SPARD mp DISTRIBUCION ®,” *ANÁLISIS Sist. Distrib. Median. EL Softw. SPARD mp Distrib.*, 2008.
- [38] W. H. Kersting, “Radial distribution test feeders,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. WINTER MEETING, pp. 908–912, 2001, doi: 10.1109/PESW.2001.916993.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 19. Matriz de estado del arte.

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS																							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Sistemas de Distribución	Topologías de redes eléctricas	Calidad de energía en redes eléctricas de distribución	Reconfiguración de redes de distribución (DNR)	Optimización mejorada de enjambre de partículas (MPSO)	Modelado de sistemas IEEE para el análisis de DNR	Función objetivo de DNR	Etapas de implementación de MPSO	Limitaciones de líneas de distribución	Limitaciones de comutación	Limitaciones de tensión en barras	Limitaciones de corriente por las ramas	Limitaciones de topología y de servicio	Cálculo de flujos de potencia	Minimización de pérdidas en líneas	Mejora de perfil de tensión en redes de distribución	Determinación de estados de interruptores después de DNR	Comparativa de pérdidas de potencia antes y después de DNR	Comparativa de perfiles de voltaje antes y después de DNR	Reconfiguración de redes de distribución
1	2020	Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems	22	☒			☒		☒												☒	☒	
2	2019	Distribution network reconfiguration with large number of switches solved by a modified binary bat algorithm and improved seed population	26				☒	☒	☒	☒												☒	
3	2013	22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm	8	☒	☒																		
4	2018	Network Reconfiguration Using Modified Particle Swarm Algorithm	20			☒		☒		☒	☒				☒	☒	☒	☒			☒		
5	2021	Performance enhancement of radial distribution system using simultaneous network reconfiguration and switched capacitor bank placement	24		☒		☒					☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	
6	2002	Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica, vol. 52	10			☒												☒	☒				
7	2010	"MINIMIZACION DE PÉRDIDAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE RECONFIGURACION"	9	☒	☒		☒			☒								☒				☒	
8	2021	An Adaptive Distributionally Robust Model for Three-Phase Distribution Network Reconfiguration	43				☒		☒			☒	☒	☒	☒							☒	
9	2018	Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Engineering Structural Optimization Problem	15			☒		☒			☒											☒	
10	2021	Optimal Dispatch Model of Active Distribution Network Based on Particle Swarm optimization Algorithm with Random Weight	12		☒		☒	☒							☒							☒	☒
11	2013	Radius particle swarm optimization	12	☒	☒					☒					☒			☒					

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA				
					Sistemas de Distribución	Topologías de redes eléctricas	Calidad de energía en redes eléctricas de distribución	Reconfiguración de redes de distribución (DNR)	Optimización mejorada de enjambre de partículas (MPSO)	Modelado de sistemas IEEE para el análisis de DNR	Función objetivo de DNR	Etapas de Implementación de MPSO	Limitaciones de líneas de distribución	Limitaciones de comutación	Limitaciones de tensión en barras	Limitaciones de corriente por las ramas	Limitaciones de topología y de servicio	Cálculo de flujos de potencia	Minimización de pérdidas en líneas	Mejora de perfil de tensión en redes de distribución	Determinación de estados de interruptores después de DNR	Comparativa de pérdidas de potencia antes y después de DNR	Comparativa de perfiles de voltaje antes y después de DNR
12	2017	Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using accelerated particle swarm optimization		9		☒	☒		☒				☒										☒
13	2019	Reconfiguration strategy for active distribution networks with soft open points		24				☒		☒						☒							☒
14	2009	Redes de distribución de energía		15	☒	☒				☒													
15	2018	Comunidad al servicio del Pueblo Y CONSTRUCCIÓN		36	☒							☒	☒				☒	☒		☒	☒		
16	2010	Distribución de la Energía Eléctrica		26	☒	☒	☒																
17	2012	Distribution System Modeling and Analysis		2	☒					☒				☒	☒	☒	☒						☒
18	2019	Ubicación óptima de rmu's en redes eléctricas soterradas de distribución radial usando técnicas heurísticas		50		☒	☒		☒		☒	☒											
19	2017	Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra		18	☒	☒	☒																
20	2009	Calidad de la Energía Eléctrica		3		☒	☒							☒		☒							
21	2016	Calidad del Servicio de Energía Eléctrica		111	☒		☒										☒						☒
22	2010	Análisis de la calidad de energía eléctrica de la ciudad		23			☒						☒				☒	☒					
23	2017	Regulación de Frecuencia y Potencia		10					☒	☒		☒					☒						
24	2017	The application of hybrid genetic particle swarm optimization algorithm in the distribution network reconfigurations multi-objective optimization		12		☒		☒	☒		☒					☒						☒	☒

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA					
				Sistemas de Distribución	Topologías de redes eléctricas	Calidad de energía en redes eléctricas de distribución	Reconfiguración de redes de distribución (DNR)	Optimización mejorada de enjambre de partículas (MPSO)	Modelado de sistemas IEEE para el análisis de DNR	Función objetivo de DNR	Etapas de Implementación de MPSO	Limitaciones de líneas de distribución	Limitaciones de commutación	Limitaciones de tensión en barras	Limitaciones de corriente por las ramas	Limitaciones de topología y de servicio	Cálculo de flujos de potencia	Minimización de pérdidas en líneas	Mejora de perfil de tensión en redes de distribución	Determinación de estados de interruptores después de DNR	Comparativa de pérdidas de potencia antes y después de DNR	Comparativa de perfiles de voltaje antes y después de DNR	Reconfiguración de redes de distribución
25	2015	A DNR by using rank evolutionary particle swarm optimization for power loss minimization	14				☒											☒	☒		☒		
26	2014	Optimal reconfiguration of electrical distribution network using selective particle swarm optimization algorithm	23				☒	☒		☒	☒									☒	☒		
27	2016	Distribution system reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using Modified particle swarm optimization	14	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒								☒	☒	
28	2016	Static distribution network reconfiguration based on an improved particle swarm optimization algorithm	10	☒	☒		☒							☒	☒						☒		
29	2011	Modified particle swarm optimization and its application in multimodal function optimization	10	☒			☒									☒	☒	☒				☒	
30	2016	2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence A Modified Particle Swarm Optimization Algorithm using Uniform Design	14	☒					☒	☒												☒	
31	2012	Modified particle swarm optimization for optimization problems	10		☒		☒	☒		☒												☒	
32	2019	Real-time obstacle avoidance method for mobile robots based on a modified particle swarm optimization	7				☒			☒												☒	
33	2015	A modified particle swarm optimization algorithm and its application for solving traveling salesman problem	10		☒		☒			☒												☒	
34	2015	Minimization of fuel cost in solving the power economic dispatch problem including transmission losses by using modified Particle Swarm Optimization	12				☒			☒												☒	
35	2006	Distribution network reconfiguration based on modified particle swarm optimization algorithm	15	☒			☒	☒	☒	☒				☒	☒							☒	☒

RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE UTILIZANDO LA OPTIMIZACIÓN MEJORADA DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Sistemas de Distribución	Topologías de redes eléctricas	Calidad de energía en redes eléctricas de distribución	Reconfiguración de redes de distribución (DNR)	Optimización mejorada de enjambre de partículas (MPSO)	Modelado de sistemas IEEE para el análisis de DNR	Función objetivo de DNR	Etapas de Implementación de MPSO	Limitaciones de líneas de distribución	Limitaciones de commutación	Limitaciones de tensión en barras	Limitaciones de corriente por las ramas	Limitaciones de topología y de servicio	Cálculo de flujos de potencia	Minimización de pérdidas en líneas	Mejora de perfil de tensión en redes de distribución	Determinación de estados de interruptores después de DNR	Comparativa de pérdidas de potencia antes y después de DNR	Comparativa de perfiles de voltaje antes y después de DNR	Reconfiguración de redes de distribución	Algoritmo mejorado de enjambre de partículas (MPSO)
36	2020	Optimal Distribution Network Reconfiguration Implemented with Tie Line and Capacitor Using Improved Particle Swarm Optimization	6				☒	☒		☒						☒	☒		☒	☒		☒	☒	
37	2008	ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SPARD DISTRIBUTION	7	☒	☒	☒									☒	☒	☒				☒	☒		
38	2001	Radial distribution test feeders	4	☒					☒															
CANTIDAD				13	17	14	13	18	10	13	10	9	5	9	6	7	11	12	7	8	7	4	15	19

7.2 Resumen de Indicadores

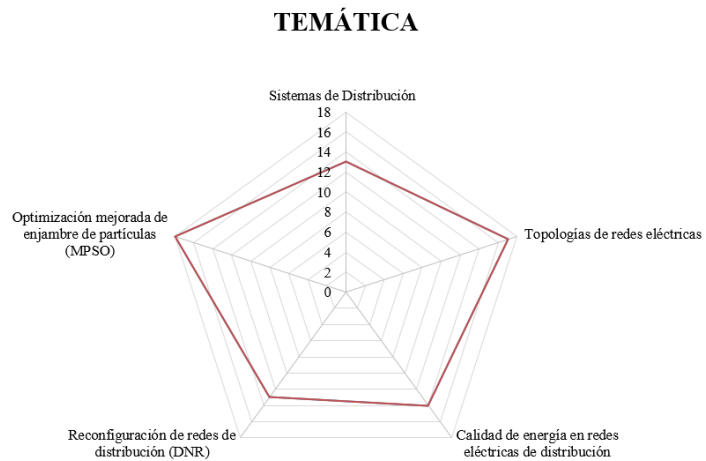


Figura 35. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.

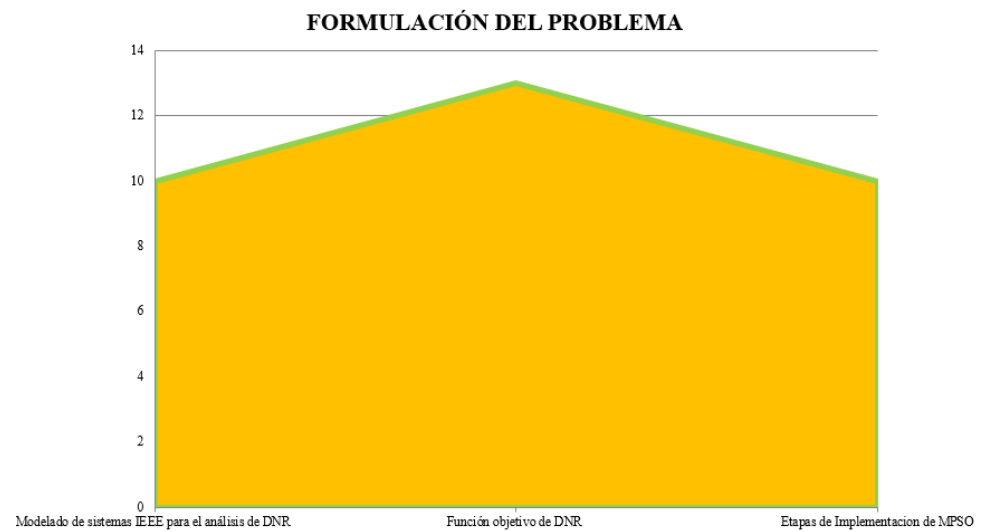


Figura 36. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.

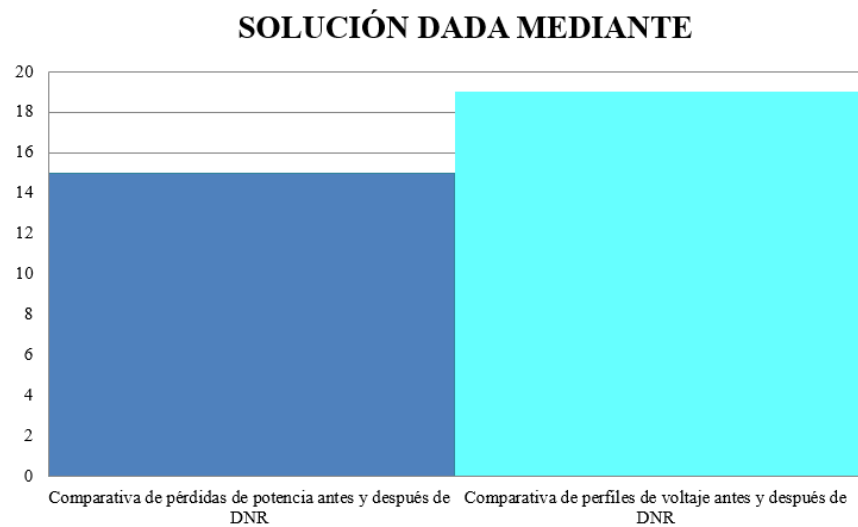


Figura 37. Indicador de solución – Estado del arte.