Estrategia metaheurística aplicada en la reconfiguración dinámica de un sistema eléctrico de distribución que incorpora generación distribuida

Maira Alejandra Pérez Sandoval y Yessica Ramos Herrera

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Electricista

Director
Jairo Blanco Solano
PhD en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

2021

Dedico este primer gran logro académico en mi vida a Dios, a mis padres, a mi HIJO, a mi amor, a mis amigos y a todos aquellos que hicieron parte de mi proceso, a aquellos que en momentos de debilidad me fortalecieron y creyeron en mi cuando perdía mi fe.

Acá, solo inician tantos sueños que han habitado y han crecido en mi interior a lo largo de estos años.

Quiero ser tu ejemplo mi Juli, hoy y siempre. Te ama, mamá.

Maira Alejandra Pérez Sandoval

A Dios por darme la fortaleza en momentos difíciles donde sentía no poder.

A mis padres, Delcy y Domingo, por cada gota de esfuerzo, por los días duros de trabajo, por escucharme y abrazarme siempre que lo necesité.

A mis hermanas, Yenifer y Yeisy, por brindarme su apoyo, confianza y amor en todo momento.

A mis amigos por ser sostenes de aliento, ángeles de cariño y amistad durante toda la carrera.

A toda mi familia por estar acompañándome en cada ciclo de mi vida.

Yessica Ramos Herrera

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director Jairo Blanco Solano por sus aportes académicos significativos, por su apoyo, guía y orientación a lo largo de este proyecto.

Sentimos inmensa gratitud por todas las personas que hacen parte de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicaciones (E3T) de nuestra alma mater, gracias por el apoyo y guía prestada durante el paso por la academia y por estar prestos siempre que lo necesitamos.

Igualmente, muchas gracias a nuestros profesores quienes fueron parte fundamental en este proceso, gracias por su tiempo, interés, compromiso, por hacer de nosotras unas profesionales críticas y personas conscientes para contribuir positivamente en la sociedad.

*Maira Alejandra Pérez Sandoval**,** Yessica Ramos Herrera*

Tabla de contenido

Introducción 11

1. Estado del arte 14

2. Objetivos 21

2.1. Objetivo general 21

2.2. Objetivos específicos 21

3. Descripción del proyecto 22

3.1. Formulación matemática del problema de reconfiguración óptima usando BPSO 22

3.1.1. Función Objetivo 22

3.1.2. Restricciones del problema de reconfiguración 23

3.1.2.1. Límites operacionales de tensión en los nodos 23

3.1.2.2. Límites de corriente en la línea.. 23

3.1.2.3. Topología de la red 23

3.1.3. Algoritmo BPSO 24

3.1.4. BPSO: Decisiones y ajustes en el algoritmo 28

3.2. Herramienta automática para la reconfiguración dinámica 28

3.2.1. OpenDSS 28

3.2.2. MATLAB 29

3.3. Caso de estudio 29

4. Resultados y Análisis 32

4.1. Operación con topologías horarias 35

4.2. Operación con una única topología diaria 37

4.3. Operación con dos topologías diarias 37

5. Conclusiones 40

Referencias bibliográficas 42

Lista de figura

Figura 1. Características PSO 19

Figura 2. Diagrama de flujo BPSO 27

Figura 3. Circuito IEEE 69-Bus 30

Figura 4. Perfil de demanda de potencia 30

Figura 5. Perfil de generación de potencia activa en por unidad 31

Figura 6. Perfil de pérdidas de potencia activa en un día. 34

Lista de tablas

Tabla 1. Artículos algoritmos metaheurísticos 17

Tabla 2. Pérdidas de potencia del caso base. 32

Tabla 3. Reconfiguraciones heurísticas. 33

Tabla 4. Reconfiguraciones obtenidas BPSO. 34

Tabla 5. Resultados de pérdidas con la reconfiguración horaria. 36

Tabla 6. Topologías seleccionadas 37

Tabla 7. Topologías seleccionadas para 2 intervalos operativos. 38

Tabla 8. Topologías seleccionadas para 3 intervalos operativos. 38

Tabla 9. Topologías seleccionadas para 4 intervalos operativos. 38

Resumen

Título: Estrategia metaheurística aplicada en la reconfiguración dinámica de un sistema eléctrico de distribución que incorpora generación distribuida*

Autor: Maira Alejandra Pérez Sandoval, Yessica Ramos Herrera**

Palabras Clave: Algoritmo metaheurístico, BPSO, generación distribuida, minimización de pérdidas de energía, reconfiguración de sistemas de distribución.

Descripción:

En investigaciones realizadas durante la última década en el área de reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica se destacan aquellas basadas en enfoques metaheurísticos aplicados en el problema de minimización de las pérdidas de energía. En este trabajo de grado se presenta inicialmente una revisión del estado del arte destacando las estrategias metaheurísticas aplicadas en el problema de minimización de pérdidas, identificando las ventajas y desventajas que estos métodos brindan en la solución al problema de reconfiguración. Dentro del conjunto de estrategias identificadas y analizadas, el método P*article Swarm Optimization* (PSO) se destaca por su aplicabilidad con éxito en los últimos años. PSO puede generar soluciones en un tiempo de cálculo reducido para problemas de optimización de escala importante como el de reconfiguración de sistemas de distribución. Adicionalmente, PSO tiene ventajas como su simplicidad matemática y su flexibilidad para convertirse en una herramienta híbrida.

En este trabajo de grado se selecciona e implementa el método *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), usando la plataforma Matlab para obtener como solución la reconfiguración óptima de un sistema de distribución de energía eléctrica. El sistema de distribución seleccionado y usado como caso de estudio es el sistema IEEE 69 nodos, siendo implementado en la plataforma de simulación OpenDSS para la solución de los flujos de potencia de la red. Mediante la interfaz COM de Matlab se extrae los resultados del flujo de potencia computados por OpenDSS, para usar esta información como entrada al método BPSO implementado en Matlab para la obtención de la reconfiguración dinámica del sistema de distribución bajo estudio.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jairo Blanco Solano. PhD en Ingeniería

Abstract

Title: Metaheuristic strategy for the dynamic reconfiguration in distribution power systems considering distributed generation*

Author: Maira Alejandra Pérez Sandoval, Yessica Ramos Herrera[1]

Key Words: Metaheuristic algorithm; BPSO; distributed generation; energy loss minimization; distribution system reconfiguration.

Description:

During the last decade, in the reconfiguration of electrical energy distribution systems area, those articles who are related with metaheuristic methods and that who helps to reduce energy losses stands out. In this degree work, we did a review of the state of the art with the metaheuristics strategies, also, we identified the main advantages and disadvantages that those methods provide in relation to other possible solution strategies to the reconfiguration problem.

If we see the group of strategies identified and analyzed, the Particle Swarms Optimization (PSO) method stands out for its successful applicability in recent years. PSO can generate solutions in a short time for important optimization problems like reconfiguration. Additionally, it has fundamental advantages such as its mathematical simplicity and its flexibility to become a hybrid tool.

In this degree work, the Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) method is selected and implemented, using the Matlab platform to obtain the optimal reconfiguration of an electric power distribution system as a solution. Our case of study is about the implementation of the IEEE 69 nodes system in the OpenDSS software for the solution of the power flows in the network. In turn, the Matlab COM interface extracts the results of the power flow to use that information as input in the BPSO method to obtain the dynamic reconfiguration of the distribution system

* Degree Work

[1] Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Jairo Blanco Solano. PhD in Engineering

Introducción

La operación de los sistemas eléctricos se desarrolla bajo un enfoque orientado hacia un servicio con altos niveles de confiabilidad y seguridad para los usuarios finales de la energía eléctrica. Dicha confiabilidad es afectada por fallas en los sistemas y se enfrenta a retos ante la creciente incorporación de generación distribuida en la red de distribución y el incremento en la demanda de energía. Algunos factores que tienden a ser controlados en los sistemas de distribución son las posibles sobrecargas, las pérdidas de energía, los niveles de tensión, la frecuencia y los cambios topológicos de las redes (**Binti Ida Umaya**, **2017**).

Dentro de este conjunto de factores, es relevante la cuantificación de las pérdidas técnicas y realizar simultáneamente planteamientos de estrategias para su reducción (**Mme**, **2013**). En el caso colombiano, la actualización del marco regulatorio de la calidad del servicio de energía eléctrica realizado en enero del 2018 por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se definen unos objetivos específicos a través de las diferentes propuestas regulatorias y entre estos la reducción de las pérdidas de energía en 1.300 GWh en los próximos 5 años, equivalente al 2% de la demanda anual de energía eléctrica del país. Por lo tanto, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) viene adelantando la revisión detallada de los requerimientos y los ajustes que deben realizarse al Sistema Único de Información (SUI) (**Agrupado et al.**, **2018**) para validar el cumplimiento de dicha meta.

Ante este escenario, resulta de interés este trabajo en lo referente a la reducción de pérdidas de energía en los sistemas eléctricos, y con el objetivo de proveer estrategias para los operadores de red que enfrentan estos importantes retos en la operación de sus redes. Sin embargo, realizar esta tarea es bastante compleja debido a las importantes longitudes de un SD y cantidad de usuarios. Por lo tanto, surge la necesidad de utilizar herramientas computacionales que implementen estrategias para solucionar problemas de optimización incluyendo las características reales de las redes eléctricas (**De Araujo Pegado & Rodriguez**, **2018**).

Existen diferentes estrategias para la solución del problema de minimización de pérdidas, como la reconfiguración topológica de red, la instalación de equipos de compensación de reactivos, el balanceo de cargas y el ajuste de mayores niveles de tensión. Este trabajo de investigación se centra en la reconfiguración óptima de los sistemas de distribución, con miras en gestionar las diferentes topologías de operación de red realizando un proceso apertura o cierre de interruptores controlados o tie-switch. Se busca una topología operativa de red que proporcione una reducción significativa de las pérdidas de energía eléctrica y así se controle la sobrecarga de la red.

El estado del arte sobre el tema de reconfiguración reporta que inicialmente fue propuesto por Merlín y Back en 1975, aunque en 1990 surgieron nuevas técnicas de reconfiguración de sistemas basadas en redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos y sistemas expertos (**Rswlpl & Dojrulwkp**, **2009**). La reconfiguración plantea dos enfoques destacados en la solución del problema: los métodos metaheurísticos y los determinísticos (**Wen et al.**, **2018**)(**Nguyen et al.**, **2016**)(**Gong et al.**, **2019**).

Los métodos determinísticos generan soluciones a partir de reglas estructuradas que se adaptan con precisión al obtener resultados óptimos, siendo adecuados para la solución de problemas de optimización binaria mixta usando en los métodos de reconfiguración de sistemas

de distribución. Por otro lado, los métodos metaheurísticos presentan soluciones estocásticas con una velocidad computacional aceptable, buena precisión y tiene como ventaja su simplicidad ofreciendo mejores soluciones de calidad en un tiempo determinado, sin embargo, estas soluciones no son repetibles y requieren de varias ejecuciones del algoritmo para obtener la mejor solución (**Jabr et al.**, **2012**).

En este trabajo se implementa un método de reconfiguración mediante el algoritmo metaheurístico BPSO para un sistema de distribución de prueba que incorpora generación distribuida. El método de reconfiguración implementados se prueba en un entorno de operación dinámico del sistema de distribución, esto con el fin de obtener resultados de un escenario donde se considera la naturaleza variable de las cargas y de la potencia inyectada por las fuentes de generación distribuida (**Dahalan**, **2012**).

En una primera tarea se aborda la revisión del estado del arte referente a los métodos metaheurísticos empleados para realizar reconfiguración en sistemas de distribución, realizando una comparación entre las ventajas y desventajas de cada una de las investigaciones revisadas en la literatura se seleccionó una modificación binaria del algoritmo PSO el cual es una ofrece una estrategia que presenta alta efectividad en la reducción de pérdidas de energía al implementarse el método en Matlab. Posteriormente se realiza la implementación del sistema de distribución en OpenDSS, y de esta manera se emula dinámicamente su comportamiento con perfiles de demanda y de generación variables. Finalmente, se evalúa la disminución de las pérdidas de energía mediante la aplicación de un esquema de reconfiguración que permite toma de decisiones.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 presenta una revisión del estado del arte sobre los métodos propuestos para reconfiguración de sistemas de distribución. La sección 3 presenta la formulación del problema. La sección 4 presenta la herramienta

automática implementada. En la sección 5 el caso de estudio. Los resultados de las pruebas se presentan en la sección 6 y en la sección 7 se presentan las conclusiones del trabajo.

1. Estado del arte

En la literatura, se presentan diferentes técnicas que van desde las determinísticas (**Jabr et al.**, **2012**) hasta las heurísticas o metaheurísticas (**Raju & Bijwe**, **2008**)(**Pegado et al.**, **2019**). Las metaheurísticas son una corriente principal al momento de querer solucionar el problema de reconfiguración, estas resuelven problemas logístico-operativos de alta complejidad conocidos como optimización combinatoria. Estos métodos por medio de la generación de patrones reducen significativamente los costos de los recursos involucrados, resuelven problemas de optimización ya que tienen la capacidad de hacer búsquedas en el espacio de problemas realmente grandes con un tiempo razonable. Las estrategias metaheurísticas, emergieron como una nueva clase de algoritmos de búsqueda aproximados que, básicamente, combinan las características de los métodos heurísticos básicos en estructuras de mayor nivel, intentando con ello alcanzar una mayor eficiencia y efectividad en la exploración del espacio de búsqueda.

En la tabla 1 se presentan diferentes artículos de interés referentes a los métodos metaheurísticos, relacionando sus autores, la estrategia que implementaron y el año de publicación, teniendo en cuenta las publicaciones en los últimos diez años.

En (**Shetty & Ankaliki**, **2019**) se realiza un estudio para obtener la mejor reconfiguración para el sistema de distribución IEEE 33 nodos, comparando los métodos Particle Swarm Optimization (PSO) y Genetic Algorithm (GA), donde los autores concluyen que PSO ofrece los mejores resultados ya que las reducciones de pérdidas disminuyen en un 17% más que los resultados arrojados por el método GA.

En (**Pegado et al.**, **2019**) se presenta el uso de un método evolutivo basado en BPSO el cual resuelve el problema de RSD con una modificación en la función sigmoidea. Según los autores los resultados demuestran que el método IS-BPSO conduce a una mejor exploración del espacio de búsqueda y presenta mejor convergencia en los resultados, por lo tanto, este método resulta eficiente, garantizando la consecución del óptimo global.

En (**Jordehi**, **2018**) se realiza un estudio de cuatro algoritmos de optimización que son: PSO, optimización del lobo gris (GWO), algoritmo de búsqueda de retroceso (BSA) y algoritmo de optimización de ballenas (WOA) para la RSD y asignación de DG de diferentes tipos en el sistema de distribución IEEE 33 nodos, realizando simulaciones en seis escenarios que son: escenario 1 presenta dos DG de tipo P (solo genera potencia activa), escenario 2 dos DG de tipo Q (solo intercambia potencia reactiva con la red de distribución), escenario 3 contiene la asignación de un DG tipo P y un DG tipo Q, escenario 4 contiene la asignación de un DG tipo P y un DG tipo PQ(genera potencia activa e inyecta potencia reactiva a la red), escenario 5 contiene la asignación de un DG tipo Q y un DG tipo PQ y finalmente el escenario 6 con la asignación de un DG tipo P, un DG tipo Q y un DG tipo PQ, de acuerdo a cada escenario se realiza la reconfiguración y según los autores se concluye que GWO tiene un desempeño superior a los demás en la mayoría de los casos. Sin embargo, PSO presenta resultados muy cercanos.

En (**Mori & Ikegami**, **2017**) proponen un método EPSO discreto que adaptativamente subió los parámetros de PSO haciendo que este maneje paralelamente el problema de optimización y acelere el tiempo computacional. Se demuestra que ofrece mejores resultados en términos de precisión de la solución y tiempo de CPU.

En (**Kohinata et al.**, **2016**) analizan PSO determinístico canónico con PSO convencional, y a partir de estos proponen un método superior llamado determinística de múltiples agentes (MAS) que tienen un excelente rendimiento de búsqueda.

En (**Li et al.**, **2016**) se presenta una versión mejorada de PSO convencional llamada DMS-PSO ofrece un mecanismo de operación de reparación para mejorar la tasa de convergencia y la precisión del algoritmo, demostró en las pruebas tener un buen desempeño.

En (**Nguyen et al.**, **2016**) los autores proponen el método Cuckoo Search Algorithm (CSA) para resolver el problema de RSD con generación distribuida. Los resultados demuestran que CSA presenta mejor rendimiento que FWA y HSA.

En (**Cheng et al.**, **2016**) los autores proponen un método modificado de PSO llamado algoritmo Adaptive Bi-group PSO es capaz de mejorar la capacidad de búsqueda local, este método presenta según los resultados mejores resultados que el enfoque binario con PSO.

En (**Nasir et al.**, **2014**) los autores presentan en los resultados que PSO es el mejor método para encontrar el interruptor de seccionamiento de red y que cumple con el objetivo de reducir las pérdidas.

En (**Sawa**, **2011**) los autores proponen PSO decimal discreto con mutación (DDM-PSO), demostrando mejor efectiva respecto a PSO sin mutación y GA.

En la literatura, PSO presenta un equilibrio entre precisión requerida y tiempo de convergencia dando así una solución aceptable. PSO convencional o hibrido ha sido utilizado en el 90% de las investigaciones referenciadas en este artículo para la solución del problema de reconfiguración del sistema de distribución y minimización de pérdidas demostrando eficacia sobre los demás métodos (**Jordehi**, **2018**). Sin embargo, en ningún trabajo investigado se presenta un estudio basado en la reconfiguración dinámica.

En (**Abdul kadir et al.**, **2013**) se realiza el estudio de reconfiguración con dos DG variando su tamaño y las cargas del sistema son fijas, los métodos allí usados son la aplicación de SA y EP-HDLF.

Basados en la revisión del estado del arte, el método metaheurístico PSO con la modificación binaria resulta relevante y prometedor en la solución del problema de reconfiguración óptima de sistemas de distribución que también incorporan generación distribuida. En la figura 1 se complementa la información a destacar de PSO.

Tabla 1

Artículos algoritmos metaheurísticos

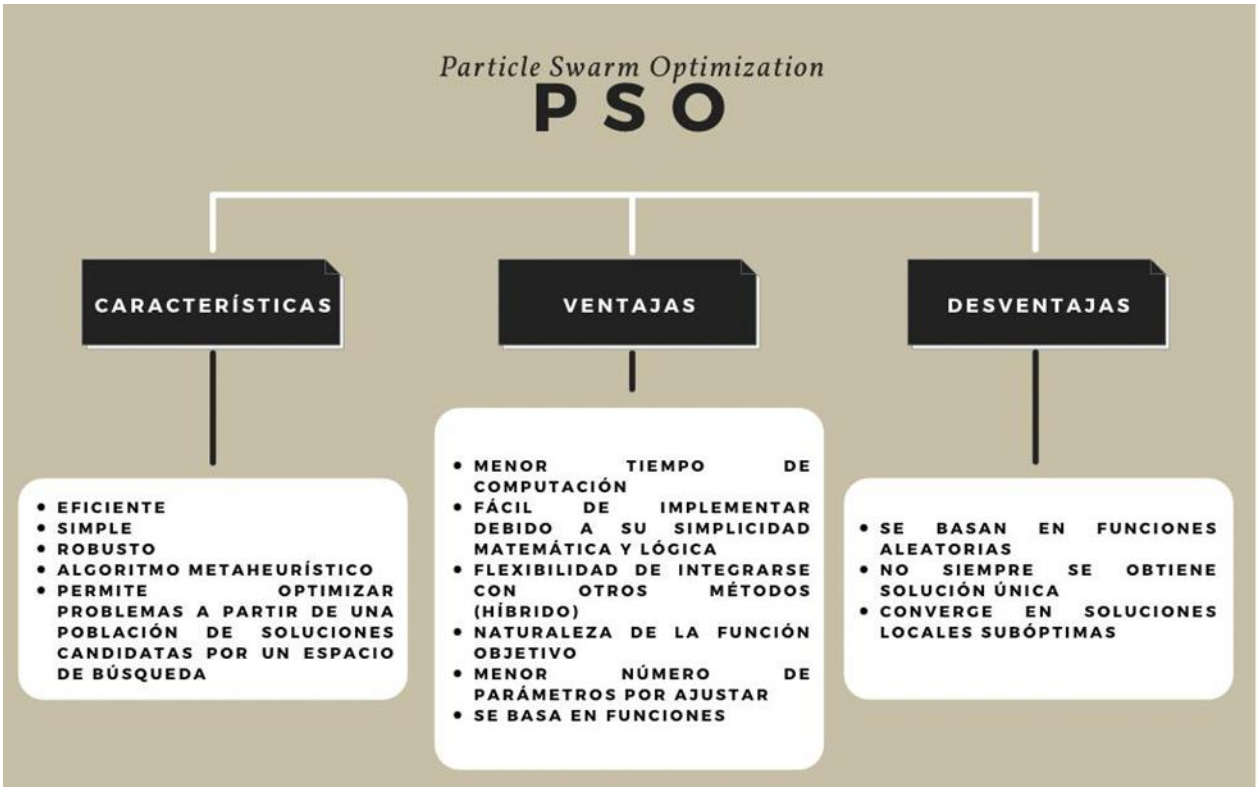
TITULO	**AUTOR**	**ESTRATEGIA USADA**	**AÑO**
Electrical Distribution System Power Loss Reduction and Voltage profile enhancement by NR using PSO (**Shetty & Ankaliki**, **2019**)	Vinay J. Shetty S.G Ankaliki	PSO Genetic algorithm	2019
Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO (**Pegado et al.**, **2019**)	Pegado, Raoni Ñaupari, Zocimo Molina, Yuri	BPSO	2019

	Castillo, Carlos		
DG allocation and reconfiguration in distribution systems by metaheuristic optimization algorithms: comparative analysis (**Jordehi**, **2018**)	A. Jordehi	PSO GWO BSA WOA	2018
Parallel Discrete EPSO for Distribution Network Reconfigurations (**Mori & Ikegami**, **2017**)	Hiroyuki Mori, Hiromitsu Ikegami	EPSO, PSO	2016
A Novel Deterministic Multi-Agent Solving Method (**Kohinata et al.**, **2016**)	Kohinata, Kenta Kurihara, Takuya Shindo, Takuya Jinno, Kenya	PSO CD-PSO	2016
Reconfiguration of distribution network based on improved dynamic multi-swarm particle swarm optimization (**Li et al.**, **2016**)	Han Li, Xuexia Zhang, Zhigi Guo, Xindi Wang, Shengyong Ye.	DMS PSO	2016
A novel method base on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network (**Nguyen et al.**, **2016**)	Thuan Thanh Nguyen Anh Viet Truong Tuan Anh Phung	CSA	2015
Distribution Network Reconfiguration Based on Adaptive Bi-Group Particle Swarm Algorithm (**Cheng et al.**, **2016**)	Ruofa Cheng. Lizhou Xu.	Binary PSO algorithm	2015

	Yang Liu. Jianchao Gao		
Distribution Network Reconfiguration based on PSO: Considering DGs sizing and allocation evaluation for voltage profile improvement (**Nasir et al.**, **2014**)	M.N.M Nasir, M.F Sulaima, M.Y Hassan	PSO	2014
Radial network reconfiguration method in distribution system using mutation Particle Swarm Optimization (**Sawa**, **2011**)	T. Sawa	DDM PSO GA	2009

Figura 1

Características PSO



2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de un algoritmo metaheurístico de reconfiguración dinámica para minimizar las pérdidas en un sistema de distribución de energía eléctrica que incorpora generación distribuida.

2.2. Objetivos específicos

Seleccionar una técnica metaheurística mediante una revisión del estado del arte, abordando sus principios conceptuales, ventajas y efectividad en la solución del problema de reconfiguración de los sistemas de distribución.

Implementar la técnica metaheurística seleccionada para reconfigurar óptimamente un sistema de distribución con el fin de reducir sus pérdidas, incorporando la generación distribuida y la característica dinámica de su operación.

Evaluar mediante simulación la efectividad de la técnica de reconfiguración en la reducción de pérdidas en el sistema eléctrico.

3. Descripción del proyecto

3.1. Formulación matemática del problema de reconfiguración óptima usando BPSO(De Araujo Pegado & Rodriguez, 2018)

3.1.1. Función Objetivo

En este caso de estudio en particular, el problema de reconfiguración tiene como función objetivo la reducción de las pérdidas de potencia activa en el sistema.

Esta función está definida por la ecuación (1):

$$f(x) = \min\left(\sum_{i=1}^{N} K_i r_i |I_i|^2\right) \qquad (1)$$

Donde:

K_i= Variable de control que representa el estado de la línea (Estado de partículas X_i)

r_i= Resistencia de la línea en p.u

I_i= Corriente que circula por la línea en p.u

N = Número total de líneas e interruptores de enlace

3.1.2. Restricciones del problema de reconfiguración

Para el problema de reconfiguración, se consideran las siguientes restricciones:

3.1.2.1. Límites operacionales de tensión en los nodos

$$\boldsymbol{V_{min}} \leq |\boldsymbol{V_i}| \leq \boldsymbol{V_{max}} \qquad (2)$$

Donde $\boldsymbol{V_i}$ es la tensión en el nodo i y $\boldsymbol{V_{min}}$ y $\boldsymbol{V_{max}}$ son los límites mínimos y máximos de tensión permitidos en los nodos de carga, como se plantea en (2). Normalmente, estos valores pertenecen al rango del ± 10 % del valor de tensión nominal.

3.1.2.2. Límites de corriente en la línea. En la ecuación (3) se establece la restricción asociada al límite de corriente máxima que puede circular por cada una las líneas eléctricas.

$$|I_i| = I_{max} \qquad (3)$$

$$i \in \{1,2,3,\dots,N_C\}$$

Donde:

I_i = corriente que fluye por la línea

I_{max}= máxima corriente permitida para fluir por la línea de acuerdo con su capacidad.

3.1.2.3. Topología de la red. La solución obtenida en el problema de reconfiguración debe garantizar la radialidad de la red de distribución y el suministro de todas las cargas.

$$Sum_C = \sum_{i=1}^{K_T} A_{i,C} = 0 \quad (4)$$

Donde:

$A : Matriz\ de\ incidencia\ del\ sistema.$

$C = 1\ ,\quad \ldots C_T$

$i = 1,\quad \ldots\ K_T$

$K_T : \#\ total\ de\ filas\ de\ la\ matriz\ A$

$C_T : \#\ total\ de\ columnas\ de\ la\ matriz\ A$

3.1.3. Algoritmo BPSO

En el método de optimización por enjambre de partículas (PSO) cada componente es denominado partícula, esta representa una posible solución al problema analizado, y cada partícula se mueve en el espacio de búsqueda multidimensional con una velocidad, que es constantemente actualizada por la propia experiencia de la partícula y de los vecinos de la partícula. Para el espacio de búsqueda dimensional, la posición, la velocidad, la mejor posición anterior para cada partícula (i-ésima partícula) y la mejor posición para todas las partículas son representadas por vectores y descritas en las ecuaciones (5), (6), (7), (8) respectivamente (**De Araujo Pegado & Rodriguez**, **2018**):

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{in}] \qquad (5)$$

$$V_i = [V_{i1}, V_{i2}, \ldots, V_{in}] \qquad (6)$$

$$Pbest_i = [P_{i1}, P_{i2}, \ldots, P_{in}] \qquad (7)$$

$$Gbest_i = [G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{in}] \qquad (8)$$

En la iteración k, la velocidad (9) y la posición para la dimensión n de la i-ésima partícula (10) se actualizan respectivamente:

$$V_i^{(k+1)} = w\ x\ V_i^k + C_1\ x\ rand_1(0)\left(Pbest_i - X_i^k\right) + C_2\ x\ rand_2(0)\left(Gbest_i - X_i^k\right) \qquad (9)$$

$$X_i^{(k+1)} = X_i^k + X_i^{(k+1)} \qquad (10)$$

Donde *w* es el peso de inercia; C_1 y C_2 son valores de ponderación estocástica; $rand_1$ y $rand_2$ valores aleatorios en el intervalo [0-1]. La función peso *w* se actualiza en cada iteración de acuerdo con:

$$w^{(k+1)} = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} * \ k \qquad (11)$$

Donde w_{max} es el peso inicial de valor 0,9; w_{min} es el peso del valor final de valor 0,5; k_{max} es el número máximo de iteraciones y k es la iteración actual.

El método PSO considera variables reales continuas durante el proceso de optimización. Sin embargo, existen problemas de optimización en la ingeniería cuyo modelo implica variables discretas y soluciones combinatorias, a ejemplo el problema de reconfiguración de redes de distribución analizado en este trabajo. De esta forma, Kennedy y Eberhart adaptaron el algoritmo del PSO para operar con variables binarias en el dominio discreto BPSO. Con esta modificación cada elemento del vector posición solo puede tomar valores binarios y su velocidad respectiva toma valores en [0,1] (**De Araujo Pegado & Rodriguez**, **2018**)(**Essallah & Khedher**, **2019**).

La función sigmoide $S(V_i^k)$ descrita por las ecuaciones 12 y 13, se utiliza para lograr esta última modificación donde la actualización de la posición de cada partícula:

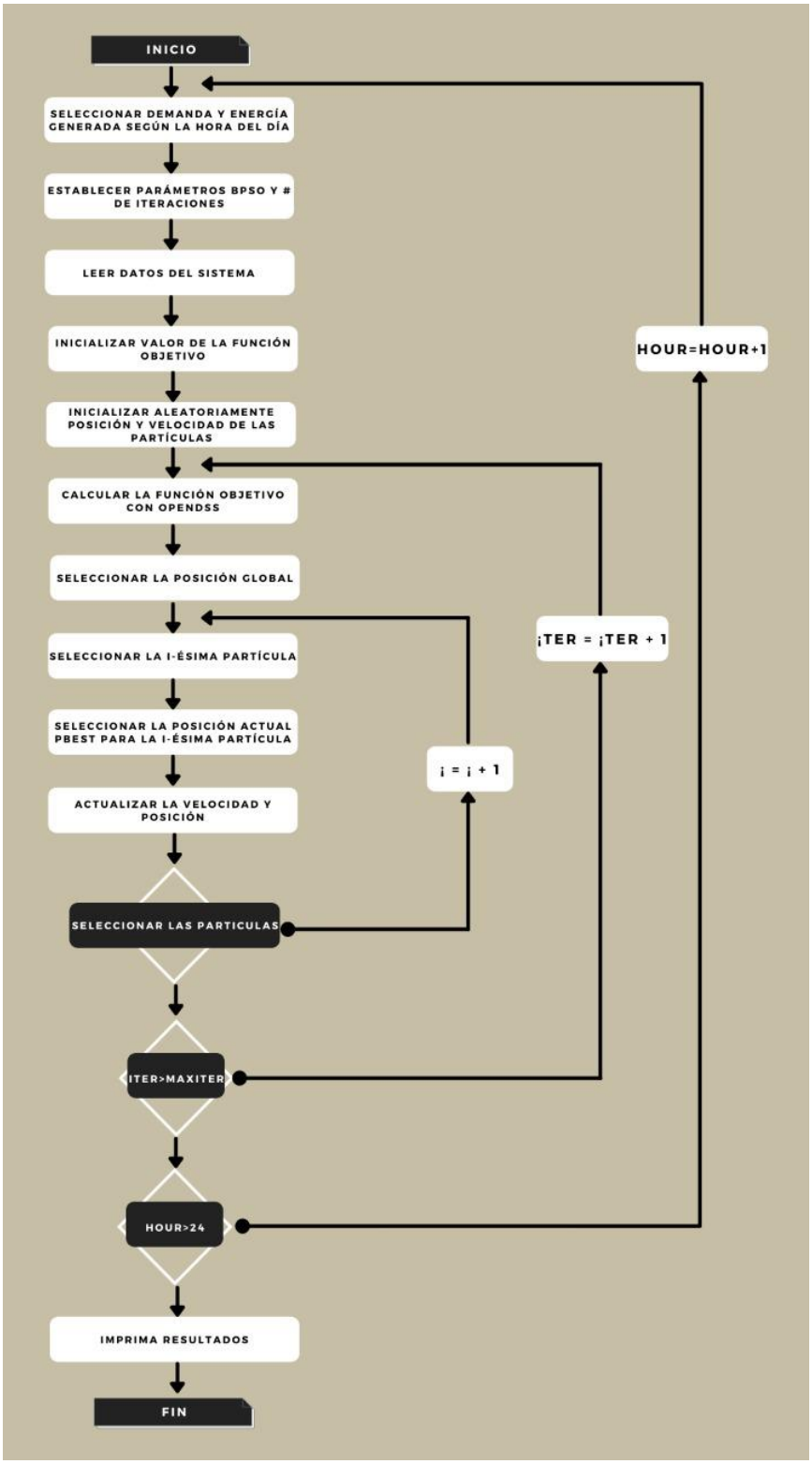
$$X_i^k = \begin{cases} 1, & rand(0) \leq S(V_i^k) \\ 0, & otro \end{cases} \qquad (12)$$

$$S(V_i^k) = \frac{1}{1 + exp(-V_i^k)} \qquad (13)$$

En la *figura 2*, se presenta el diagrama de flujo que describe la implementación realizada para la solución del problema de reconfiguración óptima de un sistema de distribución.

Figura 2

Diagrama de flujo BPSO



3.1.4. BPSO: Decisiones y ajustes en el algoritmo

A la hora de implementar este método se deben tener en cuenta los siguientes aspectos propios del sistema en estudio.

Partículas: Puesto que el algoritmo BPSO se basa en las experiencias previas que han tenido las partículas, y de acuerdo con esto actualiza la posición y la velocidad de estas hasta encontrar una mejor a la anterior o bien sea hasta llegar al máximo de iteraciones determinadas, es por esto por lo que es de gran ayuda realizar un análisis previo al problema, con la finalidad de reducir el espacio de búsqueda.

Mínimos locales: El algoritmo es muy sensible a caer en bucles, por lo que es de gran ayuda identificar los posibles en los que puede caer, para que con esto sea más eficiente y rápida la búsqueda de la solución óptima

3.2. Herramienta automática para la reconfiguración dinámica

La implementación del método de reconfiguración basado en PSO se desarrolla en un computador, con procesador Intel® Core™ CPU i5 1.60GHz y memoria RAM de 8GB, utilizando principalmente dos softwares con el fin de optimizar, simular y almacenar datos. En la subsección 4.1 y 4.2 se presentan los dos softwares implementados para dar solución a la problemática en estudio.

3.2.1. OpenDSS

Es un software de simulación de distribución abierta desarrollado desde 1997, utilizado como herramienta que hace posible modelar, diseñar y planear las redes de distribución. Este

permite incorporar generación distribuida, diferentes modelos de cargas y cambios de topología en los circuitos. Utilizar esta herramienta hacen que realizar estimaciones sean mucho más simple.

En esta herramienta (**Dugan**, **2013**) se definen todos los componentes principales del sistema, tales como: generador, líneas, cargas y switches, con estos datos se puede realizar un análisis del flujo de potencia del sistema de distribución a optimizar, este ofrece resultados de pérdidas de potencia en los diferentes casos de reconfiguración planteados.

3.2.2. MATLAB

Es un sistema de computación numérico, que permite la manipulación y procesamiento de datos en forma vectores y matrices. En este software se realizan las siguientes funciones sistemáticas:

Implementación de BPSO

Manipulación de la interfaz COM de OpenDSS.

Extracción de los resultados de flujos de carga desde OpenDSS.

Validación y comparación de resultados, controlando OpenDSS con un enfoque dinámico.

3.3. Caso de estudio

La implementación del método BPSO para reconfiguración óptima se ha evaluado en el circuito de distribución IEEE 69 bus (ver Figura 3) con el fin de determinar el desempeño del método de reconfiguración para la minimización de pérdidas. El sistema cuenta con 68 líneas, una carga total de 3800 [kW] y 2690 [kVAR]. Los datos de la red se detallan en (**Pisica et al.**, **2009**)(**Delfanti et al.**, **2014**). Adicionalmente, las dos unidades de generación distribuida se ubican

en los nodos 21 y 61 identificados en el diagrama unifilar de la figura 3 (**Abdul kadir et al.**, **2013**) (ver Tabla 2).

Para realizar el estudio de reconfiguración dinámica del sistema de distribución, se implementa el perfil de demanda de la figura 4. Asimismo, para la inyección de potencia desde las unidades DG al sistema de distribución se toma el perfil de inyección de la figura 5.

Figura 3

Circuito IEEE 69-Bus

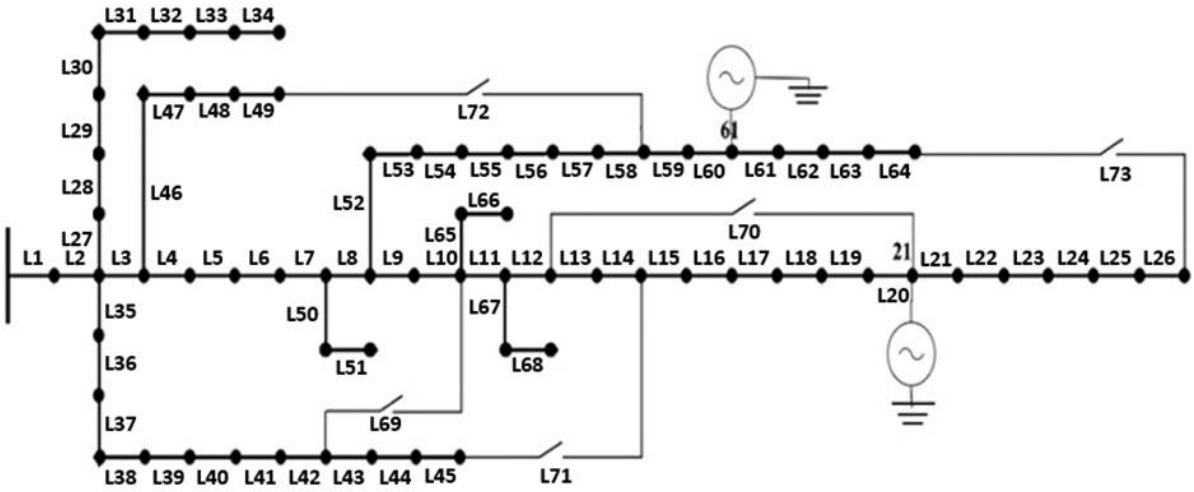


Figura 4

Perfil de demanda de potencia

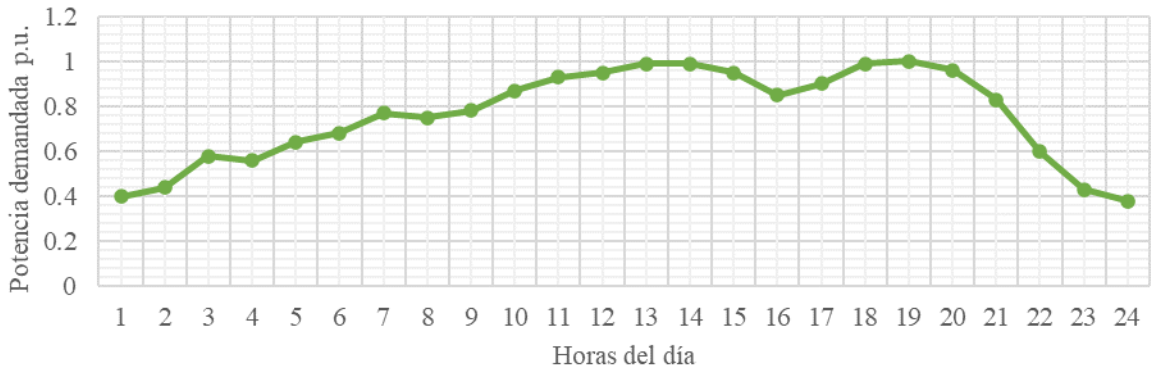
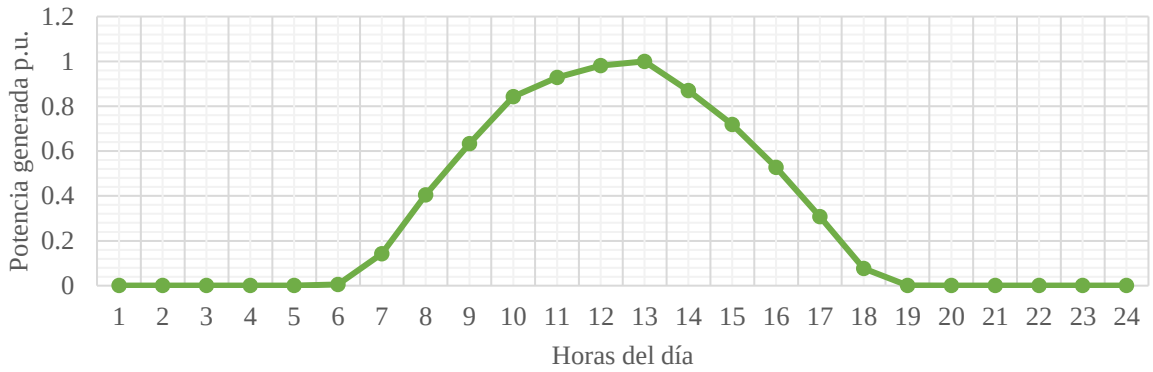


Figura 5

Perfil de generación de potencia activa en por unidad



4. Resultados y Análisis

La Tabla 2 presenta las pérdidas de potencia activa en cada hora para el caso base de configuración del sistema. Este caso base se caracteriza al operar con apertura de las líneas 69, 70, 71, 72 y 73.

Tabla 2

Pérdidas de potencia del caso base

Hora	**Pérdidas [kW-h]**
1	32,5255
2	39,6117
3	70,4748
4	65,4768
5	86,6923
6	97,5139
7	97,5518
8	55,2721
9	45,9177
10	54,8674
11	62,9804
12	66,1775
13	71,6603
14	72,5898
15	71,5146
16	67,0302

17	107,0522
18	196,6686
19	225,8809
20	206,6603
21	150,7654
22	75,6753
23	37,7702
24	29,2596
Total, caso base [kW-h/día]	**2087.6**

En la tabla 3 se detallan dos reconfiguraciones aplicando reglas heurísticas y se comparan con el caso base, tal como se muestra en la figura 6.

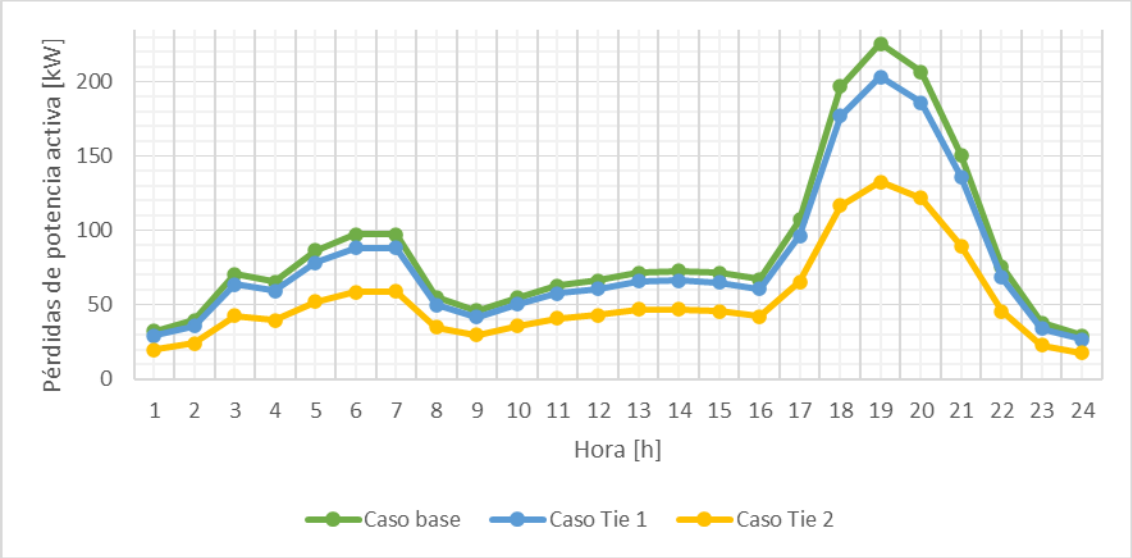
Tabla 3

Reconfiguraciones heurísticas

	Líneas abiertas	**Pérdidas diarias**	**Reducción**
R-Base	69, 70, 71, 72, 73	2087,6 [kW-h/día]	-
R-Tie 1	10-70-71-72-73	1891.1 [kW-h/día]	9.4127 %
R-Tie 2	58-69-70-71-73	1274.1 [kW-h/día]	38.9681 %

Figura 6

Perfil de pérdidas de potencia activa en un día



A partir de las reconfiguraciones planteadas en la tabla 4 considerando reglas heurísticas, se puede evidenciar que este método es efectivo, ya que logra una reducción de pérdidas aproximadamente del 39%.

Al realizar la optimización del problema por medio de BPSO (*Network Reconfiguration by BPSO Method - File Exchange - MATLAB Central*, n.d.) y aplicado en cada hora, para un día, se obtienen las siguientes reconfiguraciones (ver Tabla 4):

Tabla 4

Reconfiguraciones obtenidas BPSO

Reconfiguración	Líneas abiertas
R-hora 1	14-56-61-69-70
R-hora 2	14-56-61-69-70
R-hora 3	17-56-63-69-71
R-hora 4	13-18-57-61-69
R-hora 5	14-56-61-69-70

R-hora 6	14-56-61-69-70
R-hora 7	14-57-61-69-70
R-hora 8	14-58-63-69-70
R-hora 9	13-18-58-63-69
R-hora 10	14-17-56-64-69
R-hora 11	12-58-63-69-70
R-hora 12	13-17-58-64-69
R-hora 13	14-17-57-64-69
R-hora 14	14-58-63-69-70
R-hora 15	14-56-63-69-70
R-hora 16	14-56-63-69-70
R-hora 17	14-56-63-69-70
R-hora 18	14-58-61-69-70
R-hora 19	14-56-61-69-70
R-hora 20	13-18-56-61-69
R-hora 21	14-56-61-69-70
R-hora 22	14-56-61-69-70
R-hora 23	17-56-63-69-71
R-hora 24	14-56-61-69-70

En base a las reconfiguraciones obtenidas en la tabla 5 y ante la decisión de implementar los equipos e infraestructura necesaria para garantizar las topologías que dan solución al problema de reconfiguración, se requiere realizar algunos cuestionamientos, los cuales se especifican en las siguientes subsecciones.

4.1. Operación con topologías horarias

Se implementan las reconfiguraciones obtenidas hora a hora de la Tabla 5, y se extraen los valores de pérdidas (ver tabla 5).

Tabla 5

Resultados de pérdidas con la reconfiguración horaria

Hora	Reconfiguración	Pérdidas [kW-h]
1	R-hora 1	15.9001
2	R-hora 2	19.3086
3	R-hora 3	37.6493
4	R-hora 4	32.0479
5	R-hora 5	41.5966
6	R-hora 6	46.6491
7	R-hora 7	46.8465
8	R-hora 8	28.0685
9	R-hora 9	25.9634
10	R-hora 10	32.2516
11	R-hora 11	37.8282
12	R-hora 12	39.0028
13	R-hora 13	42.2149
14	R-hora 14	41.4618
15	R-hora 15	38.8156
16	R-hora 16	34.6220
17	R-hora 17	51.9103
18	R-hora 18	92.0002
19	R-hora 19	105.0016
20	R-hora 20	97.6385
21	R-hora 21	71.1924
22	R-hora 22	36.4269
23	R-hora 23	20.4127

24	R-hora 24	14.3240
Total [kW-h/día]		**1049.1**
Total, caso base [kW-h/día]		**2087.6**
Reducción [%]		**49.7461**

4.2. Operación con una única topología diaria

Se plantea la implementación de un único esquema de reconfiguración aplicado al día con una topología del sistema diferente a la preestablecida en el caso base, se seleccionan dos reconfiguraciones obtenidas por medio del método BPSO (tabla 4). La primera es el caso en el cual se obtienen las menores pérdidas diarias (R-hora 8) y el segundo caso en el punto de demanda máxima (R-hora 19) (ver figura 4).

Tabla 6

Topologías seleccionadas

Opción	Reconfiguración (Líneas abiertas)	Pérdidas [kW-h/día]
1	R-hora 8 (14-58-63-69-70)	1046.81
2	R-hora 19 (14-56-61-69-70)	1050.26
Reducción opción 1 [%]		**49.84**
Reducción opción 2 [%]		**49.67**

Obteniendo los resultados de pérdidas se observa en la tabla 6, la mejor reconfiguración diaria es R-hora 8.

4.3. Operación con dos topologías diarias

Otra discusión que se plantea es realizar la división de un día en dos intervalos operativos que se distinguen por la topología seleccionada. Por lo cual en la tabla 7 se seleccionaron dos

topologías para aplicar en un día, donde esta propuesta reduce las pérdidas aproximadamente en un 50%.

Tabla 7

Topologías seleccionadas para 2 intervalos operativos

Hora	Reconfiguración	Pérdidas [kW-h]
8-17	14-58-63-69-70	466.7932
18-7	14-56-61-69-70	577.7977
	Total	**1044.5909 [KW-h/día]**
	Reducción	**49.94 %**

Tabla 8

Topologías seleccionadas para 3 intervalos operativos

Hora	Reconfiguración	Pérdidas [kW-h]
10-13	14-17-56-64-69	150.5682
14-18	14-58-63-69-70	259.1346
19-9	14-56-61-69-70	632.0182
	Total	**1041.721**
	Reducción	**50.085 %**

Tabla 9

Topologías seleccionadas para 4 intervalos operativos

Hora	Reconfiguración	Pérdidas [kW-h]
6-9	14-58-63-69-70	147.4157
10-13	14-17-56-64-69	150.5682
14-18	14-58-63-69-70	259.1346
19-5	14-56-61-69-70	484.1750
	Total	**1041.2935**

Reducción	**50.105%**

En síntesis al implementar diferentes reconfiguraciones en intervalos de tiempo a lo largo del día, se observa en el caso de dos intervalos (tabla 7) se requieren instalar 7 interruptores seccionadores, en el de 3 (tabla 8) y 4 (tabla 9) se requieren implementar 9 interruptores seccionadores, igualmente es notable que el porcentaje de diferencia en las pérdidas de potencia activa entre la una y la otra no supera el 2%, por lo tanto, se decide que la mejor reconfiguración es la propuesta en la tabla 8, ya que tendría un costo-beneficio adecuado.

5. Conclusiones

El trabajo desarrollado se centra en el estudio y la puesta en práctica de una estrategia metaheurística aplicada en la reconfiguración dinámica de un sistema eléctrico de distribución que incorpora generación distribuida. Gracias a la implementación del enfoque mencionado y teniendo en cuenta que la topología del sistema puede cambiar debido a múltiples factores, se realizó un análisis más detallado el cual permitió obtener una dimensión más real del caso de estudio. Sin embargo, el método estudiado no garantiza la determinación del óptimo global al problema, pero si varias soluciones confiables.

Se seleccionan reconfiguraciones en diferentes intervalos de tiempo durante el día, las cuales permitieron determinar que, para el sistema en estudio, las variaciones que contenían desde 1 a 4 topologías no presentaron un porcentaje de reducción significativo con poca variación. Esto indica que el sistema de distribución objeto de estudio tiene baja sensibilidad en ese aspecto, indicando que una posible y continua investigación, estaría relacionada al estudio de la sensibilidad que tiene el sistema de acuerdo con la ubicación y capacidad de las unidades de generación distribuida.

El presente trabajo de grado fue desarrollado en el marco del proyecto interno de investigación de capital semilla titulado: “Método de estimación de estado para la gestión operativa en redes de distribución de energía eléctrica que incorpora fuentes no convencionales de energía renovable”, financiando por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2691.

Referencias bibliográficas

Abdul kadir, A. F., Mohamed, A., Shareef, H., & Che Wanik, M. Z. (2013). Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THDv using evolutionary programming. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *21*(SUPPL. 2), 2269–2282. https://doi.org/10.3906/elk-1205-35

Agrupado, T., Saidi, I., & Des, I. (2018). *Superintendencia Delegada Para Energía Y Gas*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017_version_06072018_1.pdf

Binti Ida Umaya. (2017). ANALISIS DEL IMPACTO DE LA DG EN UN SISTEMA IEEE 37 NODOS. *Universitas Nusantara PGRI Kediri*, *01*, 1–7. http://www.albayan.ae

Cheng, R., Xu, L., Liu, Y., & Gao, J. (2016). Distribution Network Reconfiguration Based on Adaptive Bi-Group Particle Swarm Algorithm. *Proceedings - 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2015*, *1*, 374–378. https://doi.org/10.1109/ISCID.2015.116

Dahalan, W. M. (2012). *Network Reconfiguration for Loss Reduction with Distributed Generations Using PSO*. *December*, 2–5.

De Araujo Pegado, R., & Rodriguez, Y. P. M. (2018). Distribution network reconfiguration with the OpenDSS using improved binary particle swarm optimization. *IEEE Latin America Transactions*, *16*(6), 1677–1683. https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8444386

Delfanti, M., Falabretti, D., Merlo, M., & Moneta, D. (2014). Impact of network reconfiguration

on distribution systems performance. *International Review on Modelling and Simulations*, *7*(2), 258–269. https://doi.org/10.15866/iremos.v7i2.531

Dugan, R. C. (2013). Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). *Electric Power Research Institute, Inc.*, *November*, 1–177.

Essallah, S., & Khedher, A. (2019). Optimal Distribution System Reconfiguration for Loss Minimization using BPSO Algorithm. *2019 10th International Renewable Energy Congress, IREC 2019, Irec*. https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754519

Gong, Z., Chen, Q., & Sun, K. (2019). Novel methodology solving distribution network reconfiguration with DG placement. *The Journal of Engineering*, *2019*(16), 1668–1674. https://doi.org/10.1049/joe.2018.8521

Jabr, R. A., Singh, R., & Pal, B. C. (2012). Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, *27*(2), 1106–1115. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2180406

Jordehi, A. R. (2018). *DG allocation and reconfiguration in distribution systems by metaheuristic optimisation algorithms: a comparative analysis*. 0–5.

Kohinata, K., Kurihara, T., Shindo, T., & Jinno, K. (2016). A Novel Deterministic Multi-Agent Solving Method. *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2015*, 1758–1763. https://doi.org/10.1109/SMC.2015.308

Li, H., Zhang, X., Guo, Z., Wang, X., & Ye, S. (2016). Reconfiguration of distribution network based on improved dynamic multi-swarm particle swarm optimization. *Chinese Control Conference, CCC*, *2016-Augus*, 9952–9956. https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554928

Mme, D. (2013). Modelo de incentivos para la reducción de pérdidas de energía eléctrica en Colombia. *Revista de La Maestría En Derecho Económico*, *6*(6), 221–257.

Mori, H., & Ikegami, H. (2017). Parallel discrete EPSO for distribution network reconfigurations. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 2662–2665. https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848521

Nasir, M. N. M., Shahrin, N. M., Bohari, Z. H., Sulaima, M. F., & Hassan, M. Y. (2014). A distribution network reconfiguration based on PSO: Considering DGs sizing and allocation evaluation for voltage profile improvement. *2014 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD 2014*, 4–9. https://doi.org/10.1109/SCORED.2014.7072981

Network reconfiguration by BPSO method - File Exchange - MATLAB Central. (n.d.). Retrieved April 19, 2021, from https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45946-network-reconfiguration-by-bpso-method

Nguyen, T. T., Truong, A. V., & Phung, T. A. (2016). A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *78*, 801–815. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.030

Pegado, R., Ñaupari, Z., Molina, Y., & Castillo, C. (2019). Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO. *Electric Power Systems Research*, *169*(December 2018), 206–213. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.12.030

Pisica, I., Bulac, C., & Eremia, M. (2009). Optimal distributed generation location and sizing using genetic algorithms. *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to*

Power Systems, ISAP '09, *December*. https://doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352936

Raju, G. K. V., & Bijwe, P. R. (2008). An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. *IEEE Transactions on Power Systems*, *23*(3), 1280–1287. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.926084

Rswlpl, F., & Dojrulwkp, D. (2009). Reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas. *Tecnura*, *12*(24), 14–22. https://doi.org/10.14483/22487638.6266

Sawa, T. (2011). Radial network reconfiguration method in distribution system using mutation Particle Swarm Optimization. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, *131*(3), 1–6. https://doi.org/10.1541/ieejpes.131.297

Shetty, V. J., & Ankaliki, S. G. (2019). Electrical Distribution System Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement by Network Reconfiguration Using PSO. *5th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2019*, ㊁(4), 19–22. https://doi.org/10.1109/ICEES.2019.8719292

Wen, J., Tan, Y., Jiang, L., & Lei, K. (2018). Dynamic reconfiguration of distribution networks considering the real-time topology variation. *IET Generation, Transmission and Distribution*, *12*(7), 1509–1517. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1304