

RECONFIGURACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL ALGORITMO DE RECOCIDO SIMULADO

RECONFIGURATION OF ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS USING THE SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

Dionicio Ñaupari-Huatuco¹, Franklin Simeon-Pucuhuayla¹, Yuri Molina-Rodríguez²

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

²Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa, Paraíba, Brazil

Recibido (Received): 09 / 05 / 2023 Aceptado (Accepted): 12 / 10 / 2023

Publicación correspondiente al Volumen 34 n° 1

RESUMEN

Este artículo presenta un nuevo algoritmo para resolver el problema de la reconfiguración de redes de distribución utilizando Optimización de Recocido Simulado. El método propuesto proporciona una mejora en relación al método clásico, así como la tasa de convergencia entre sus simulaciones, utilizando los recursos del software Open Distribución System Simulator (OpenDSS). Además de utilizar el concepto de búsqueda por malla del espacio selectivo, que reduce considerablemente el espacio de búsqueda de soluciones. El algoritmo propuesto tiene como objetivo reducir las pérdidas de energía en las redes de distribución, su funcionamiento se aplicó al sistema sencillo de 5 barras. Finalmente, el algoritmo propuesto se aplicó al sistema de prueba de distribución de 33 barras, comúnmente encontrado en la literatura. Los resultados de la simulación muestran que el método propuesto es muy eficiente y garantiza la obtención del óptimo global.

Palabras Clave: Redes de distribución; Reconfiguración; Recocido Simulado; Optimización; Malla de espacio selectivo.

ABSTRACT

This article presents a new algorithm to solve the distribution network reconfiguration problem using Simulated Annealing Optimization. The proposed method provides an improvement relative to the classic approach and the convergence rate between its simulations, using the Open Distribution System Simulator (OpenDSS) software. In addition, using the particular space mesh search concept, which considerably reduces the solution search space. The proposed algorithm aims to reduce energy losses in distribution networks; its operation was applied to the simple 5-bus system. Finally, the proposed algorithm was used for the 33-bus distribution test system, commonly found in the literature. The simulation results show that the proposed method is very efficient and guarantees the achievement of the global optimum.

Keywords: Distribution networks; Reconfiguration; Simulated Annealed; Optimization; Selective Space Mesh.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de distribución es una parte importante del Sistema Eléctrico que generalmente cubre las conexiones finales entre generación y consumidor. La mayoría de los sistemas de distribución utilizan una rama principal con ramas a lo largo del camino, lo que se denomina sistema radial. Este tipo de sistema se utiliza principalmente debido al diseño simple, a menudo de bajo costo y esquema de protección robusto. Esta configuración sugiere que todos los componentes entre una carga y una generación deberían funcionar, aunque es posible que se produzcan apagones debido a que una falla puede hacer que algunas cargas no sean alimentadas. La confiabilidad de un sistema de distribución radial se puede mejorar mediante la reconfiguración de la red,

que es posible al cerrar los interruptores normalmente abiertos y abrir los interruptores normalmente cerrados [7].

La definición de redes de distribución reconfigurables y flexibles se interpreta en dos aspectos. Cuando la red opera normalmente, se refiere a reducir pérdidas, equilibrar la carga de la red y mejorar el estado operativo de la red. En caso de cortocircuitos o apagones, la reconfiguración de la red se refiere a encontrar posibles configuraciones para garantizar el suministro del mayor número posible de cargas. La solución óptima para la reconfiguración será aquella que proporcione el nivel más bajo de pérdidas de red [23].

Al cambiar la topología de la red se pueden observar una serie de consecuencias: (i) carga de los alimentadores, (ii) pérdidas de energía, (iii) niveles de tensión y (iv) confiabilidad. La conexión de fuentes de

* Corresponding author:
E-mail: znaupari@uni.edu.pe

generación distribuida (GD), como la eólica y la fotovoltaica, además de la llegada de los coches eléctricos, ha ido cambiando la estructura de las redes de distribución. Su aumento tiene fuertes influencias en el flujo de potencia y el perfil de tensión en las redes, haciendo que la importancia de las reconfiguraciones de la red aumente cada vez más, requiriendo una mayor velocidad en la adaptación a las cargas y GD (que tienen un comportamiento dinámico a lo largo del día) [19, 20, 6, 2, 33]. Tal problema para encontrar la solución óptima se llama optimización combinatoria. Tal solución no es fácil de encontrar, ya que existen numerosas posibilidades de configuración en una red de distribución, que aumentan a medida que evoluciona el tamaño de la red. Considerando que cada interruptor tiene dos estados, el número de configuraciones será 2^n , donde n es el número de interruptores en el sistema llegando a tener un número elevado de topologías [1, 11].

Además del objetivo principal, que es minimizar las pérdidas, el problema de la reconfiguración también tiene restricciones que se deben respetar. Las restricciones comúnmente adoptadas son mantener la topología radial del sistema, el límite de tensión de las barras, la capacidad de corriente en las ramas y la conexión de todas las cargas. Actualmente, se utilizan varios métodos para resolver el problema de optimización de la reconfiguración de la red debido al alto costo computacional que implicaría probar cada configuración posible. Este trabajo busca, utilizando una Interfaz desarrollada en lenguaje Python en el entorno de desarrollo Visual Studio para mejorar la interacción usuario-algoritmo, aplicar una metaheurística para resolver el problema a través de un algoritmo denominado Recocido Simulado ampliamente utilizado en la literatura técnica. Proponemos el algoritmo para encontrar soluciones a cinco sistemas de distribución diferentes utilizados en la literatura, las principales aportaciones del algoritmo son:

- Se propuso la búsqueda por malla de espacio selectivo para la generación de vecinos.
- Promueve una mejor aceptación de soluciones debido al uso del enfriamiento híbrido de la temperatura y reducción del número de iteraciones mediante la mejora de los criterios de parada.
- El algoritmo propuesto muestra una buena convergencia, obteniendo las soluciones reportadas en la literatura técnica para cada sistema.
- Los resultados muestran es computacionalmente eficiente y garantiza la obtención la solución óptima global.

2. ANTECEDENTES

La revisión de la literatura técnica sobre el problema de reconfiguración de redes usando recocido simulado para resolver este problema tenemos.

En 1975, en el artículo [21] propuso en su trabajo un método de resolución en el que, partiendo de una red mallada con todos los interruptores cerrados, se abrían secuencialmente guiados por la minimización de pérdidas activas. Entre sus dificultades se encontraban el elevado tiempo de procesamiento y el uso exclusivo de la componente real de la corriente.

Después de 13 años, en [13], el punto de partida es una solución radial inicial y al abrir un interruptor y cerrar otro, la radialidad está garantizada. Este trabajo estudia la reconfiguración de la red con transferencias de carga entre alimentadores, a través de un método denominado "Branch Exchange". Para reducir el número de posibilidades en el espacio de búsqueda, se utilizó un método basado en las tensiones terminales del interruptor a cerrar para asegurar la reducción de pérdidas. La obra es considerada de gran importancia dentro del medio científico.

Poco después, en 1989, el artículo [30] propuso un método heurístico robusto para la reconfiguración de redes de distribución, que puede ser utilizado tanto en el diseño como en la operación. Este trabajo utiliza como punto de partida una red en malla con todos los interruptores cerrados. Como una forma de buscar la solución con las menores pérdidas, se modelan fuentes de corriente ficticias y la que tiene, al calcular el flujo de potencia, el menor valor de corriente, indica el interruptor a abrir. Como limitaciones de este trabajo, su aplicación en una supuesta operación de red debe tener un reajuste en el número límite de operaciones de intercambio de interruptores.

En el mismo año, [4] propuso una continuación del trabajo de [13]. En él se proponía una mejora en el método de la Bolsa de Sucursales, utilizando cálculos de flujo de carga específicos de redes radiales, optimizando la búsqueda de la mejor solución con el fin de minimizar pérdidas y equilibrar las cargas. Aquí los problemas de reconfiguración comenzaron a ser vistos como de naturaleza combinatoria. En 1995, [27] desarrolló un método que combinaba la conmutación de ramales y la apertura secuencial, incluyendo mejoras en ambos métodos.

En 1999 el artículo [3] compararon los métodos Tabu Search, Simulated Annealing y un Genetic Algorithm, con algunas adaptaciones, en sus aplicaciones al problema de reconfiguración de redes.

A partir de la década de 2000 se observa un predominio de métodos basados en modelos físicos o biológicos para la resolución de problemas de reconfiguración, destacando el uso de técnicas metaheurísticas [26].

En [16] se utilizó la técnica Simulated Annealing junto con la Tabu Search para la optimización de sistemas reales. Según ellos, el recocido simulado logró evitar los mínimos locales, pero con un alto costo computacional, mientras que la búsqueda tabú encontró la solución a través de un algoritmo de descenso, pero no garantizó la convergencia.

En [35] se utiliza Simulated Annealing para resolver el problema de reconfiguración de las redes de distribución, teniendo en cuenta las restricciones de carga en la función de optimización objetiva.

En el mismo año, [31] utilizó recocido simulado para mejorar la confiabilidad de la red, minimizando el costo causado por la interrupción del suministro al cliente, observando las limitaciones operativas del sistema. La técnica de recocido simulado se utilizó junto con el análisis de confiabilidad.

En [9] se utiliza el algoritmo Simulated Immune Annealing (SAI) para el problema de reconfiguración de redes de distribución. En este trabajo se utilizan interruptores compartidos entre mallas para generar posibles soluciones, además de utilizar resultados históricos y actuales para optimizar la búsqueda.

En [10], OpenDSS se usa junto con recocido simulado para analizar los impactos de la inyección de Generación Distribuida en redes de distribución tanto en operación normal como en situaciones post-cortocircuito con diferentes niveles de carga. Según los autores, la integración de Generación Distribuida aumenta las posibles soluciones y disminuye las pérdidas en la solución óptima.

En [10] se discute el uso de Simulated Annealing aplicado al algoritmo Ant Colony para realizar la optimización del problema de reconfiguración de la red de distribución. El método se denominó Algoritmo mejorado de colonias de hormigas híbridas y resultó eficiente en la búsqueda de la solución óptima.

En [17] se introdujo un nuevo algoritmo para resolver el problema de reconfiguración utilizando un enfoque de aproximación secuencial, que incluye cambios cercanos y aleatorios en la red en el método de recocido simulado. Este método fue más eficiente que los publicados previamente.

El método de recocido simulado se aplicó en [34] para la configuración óptima de una red de distribución durante un día, teniendo en cuenta varias variables de

optimización. Como se ve, Simulated Annealing tiene un amplio uso en el ámbito de la optimización aplicada a la reconfiguración de redes de distribución.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La reconfiguración de los sistemas de distribución es un problema de optimización no lineal y multiobjetivo. Entre los diversos objetivos tenemos: la minimización de pérdidas, minimización de parámetros de confiabilidad, balance de carga del transformador, el balance de carga en los alimentadores, la carga máxima del alimentador y la mejora del perfil de tensión. La reconfiguración de redes utiliza los recursos existentes del sistema para determinar los estados de los interruptores. Este artículo, tiene como objetivo principal minimizar las pérdidas de potencia activa del sistema teniendo en cuenta las restricciones operativas, de límite de tensión, límite de corriente que soportan los ramales y sobre todo la radialidad del sistema.

3.1 FUNCIÓN OBJETIVO

También llamada la función fitness, el problema de reconfiguración de redes busca minimizar las pérdidas activas de las líneas (conductores) del sistema considerando las restricciones de tensión y corriente. La función viene dada por:

$$\min f(x) = \sum_{l=1}^{N_l} r_l i_l^2 \tag{1}$$

Donde, N_l es el número de líneas, r_l la resistencia de la línea l , i_l la corriente que fluye por la línea l y $f(x)$ es la suma de toda las pérdidas activas de las líneas. x es la solución para el sistema, que nos brinda el estado de los interruptores (abierto o cerrado).

La evaluación de pérdidas se obtiene mediante el software OpenDSS, cuyo método se detalla en [29][22][14].

3.2 RESTRICCIONES

Las restricciones consideradas son:

3.2.1 Restricción de tensión

Las barras del sistema deben mantener el nivel de tensión en un rango de valores mínimo y máximo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_{min} \leq |E_k| \leq E_{max} \tag{2}$$

Donde, E_{min} , E_{max} son los valores mínimo y máximo admisible por la barra k respectivamente. Estos valores por lo general se encuentran en un rango de hasta 5%

para sobretensión y hasta 7% para subtensión (caída de tensión), estos valores dependen del operador del sistema de cada país según los códigos de red establecidos.

3.2.2 Restricción de corriente

Se debe tener en cuenta los límites de corriente para las líneas, debido a sus características técnicas propias. De donde la corriente i_l que fluye através de la línea l no puede exceder su capacidad máxima admitida i_l^{max} , como se muestra en la siguiente expresión.

$$i_l \leq i_l^{max} \tag{3}$$

3.2.3 Restricción de radialidad

Esta restricción nos menciona que la red de distribución debe mantener su estructura radial, es decir, solo debe haber una única ruta desde cualquier barra hasta su subestación. Con ayuda de los estados de apertura y cierre de los interruptores se debe llegar a esta condición de radialidad. La topología radial no presenta lazos y todas las cargas están energizadas y conectadas a la subestación. Las condiciones utilizadas para esta condición se toman de [18] [24].

- El número total de mallas obtenidas al cerrar todos los interruptores debe de ser:

$$N_{mallas} = (N_{lineas} - N_{barras}) + 1 \tag{4}$$

Dónde: N_{mallas} , es el número de mallas, N_{lineas} es el número total de líneas activas y N_{barras} el número total de barras del sistema.

- El número total de líneas debe de ser según la siguiente ecuación:

$$N_{lineas} = N_{barras} - N_f \tag{5}$$

Dónde: N_{lineas} , es el número de líneas activas, N_{barras} el número total de barras y N_f es el número de fuentes.

- El sistema debe estar conectado y energizado, es decir, todo el sistema debe estar alimentado a una subestación o fuentes y todas las cargas deben estar alimentadas.

4. ALGORITMO CLÁSICO DE RECOCIDO SIMULADO

El Recocido Simulado (RS) propuesto por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi (1983), uno de los muchos algoritmos que surgieron en la computación natural, ciencia que utiliza los sistemas naturales como inspiración para resolver problemas computacionales. En el caso del RS, la inspiración proviene del área

fisicoquímica, donde buscan imitar el recocido de materiales como metales o vidrios [15].

En [8] mencionan que el Recocido Simulado “RS” está inspirado en el proceso de recocido en la metalurgia. En este proceso natural, un material se calienta y se enfría lentamente en condiciones controladas para aumentar el tamaño de los cristales del material y reducir sus defectos. Esto tiene el efecto de mejorar la resistencia y la durabilidad del material. El calor aumenta la energía de los átomos permitiéndoles moverse libremente, y el programa de enfriamiento lento permite descubrir y explotar una nueva configuración de baja energía.

Una manera de entender mejor como es la analogía entre el sistema físico y el problema de optimización RS, podemos observar en la siguiente figura tomada de [32].

TABLA I
RS Sistema físico y problema de optimización

Sistema Físico	Problema de Optimización
Estado del sistema	Solución
Posiciones Moleculares	Variables de decisión
Energía	Función objetivo
Estado de reposo	Solución óptima global
Estado metaestable	Óptimo local
Enfriamiento rápido	Búsqueda local
Temperatura	Parámetro de control T
Recocido cuidadoso	Recocido Simulado

Fuente: extraído de [32].

4.1 ESTRATEGIA DEL RECOCIDO SIMULADO

De [15], se menciona que RS, basa su estrategia en tres características:

1. Uso de una solución inicial.
2. Generación aleatoria de nuevas soluciones basadas en la solución actual.
3. Criterio progresivamente elitista para cambiar la solución aleatoria por la actual.

4.2 REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA Y PARÁMETROS

Su principal característica es su capacidad para escapar del óptimo local en función de la regla de aceptación de una solución candidata. Si la solución actual (f_{new}) tiene un valor de función objetivo menor (suponiendo minimización) a la solución anterior (f_{old}), entonces se acepta la solución actual. De lo contrario, la solución actual también puede aceptarse si el valor dado por la distribución de Boltzmann.

$$e^{\frac{f_{new}-f_{old}}{T}} \tag{6}$$

es mayor que un número aleatorio uniforme en [0,1], donde T es el parámetro de control de "temperatura" [12]. La función objetivo y los parámetros son:

1. Función objetivo: La expresión de la función objetivo según sea la aplicación, relaciona los parámetros con alguna propiedad (distancia, costo, pérdidas de potencia, etc.) que se desea minimizar o maximizar.
2. Población inicial: Se requiere la definición de una suposición inicial para los valores de parámetros en cada técnica iterativa, incluso existen algoritmos que requieren más de una solución inicial, pero para el caso de RS no es necesario.
3. Temperatura inicial: Se debe definir cuidadosamente el parámetro de control 'temperatura', puesto que controla la regla definida en (6). El valor de T debe ser suficientemente grande para permitir que el algoritmo se aleje de un mínimo local, pero al mismo tiempo lo suficientemente pequeño para no alejarse de un mínimo global.
4. Mecanismo de perturbación: Es el método para crear soluciones nuevas a partir de la solución actual. Es decir, es un método para explorar la vecindad de la solución actual creando pequeñas modificaciones en la solución actual.
5. Enfriamiento: La regla geométrica es la más común para las variaciones de temperatura.
6. Criterio de terminación: En [12] se menciona algunos métodos para poder controlar la terminación del Recocido Simulado como: número de iteraciones, temperatura final, valor mínimo de función objetivo, valor mínimo de tasa de aceptación.

Con los parámetros y conceptos explicados se puede entender el algoritmo mediante el siguiente diagrama de flujo tomada de [12].

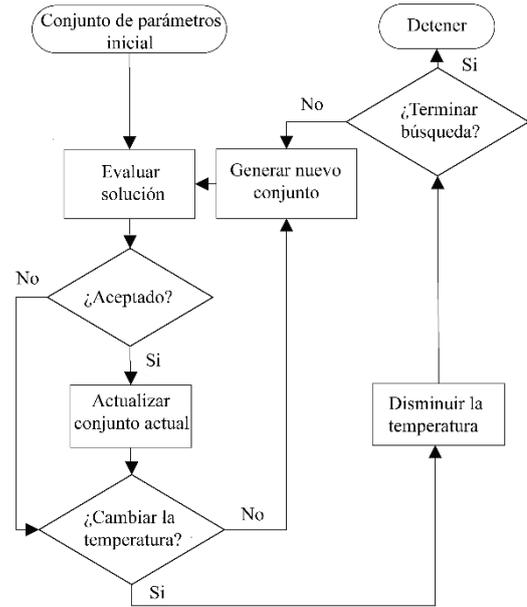


Fig. 1. Diagrama de flujo algoritmo Recocido Simulado [12].

5. METODOLOGÍA

La presente investigación utilizó como motor de solución el software OpenDSS, herramienta de cálculo de flujo de potencia que permite su integración con diferentes plataformas y paquetes de programación como son C #, MATrix LABoratory (MATLAB), Microsoft Office como Visual Basic for Applications (VBA), Python (utilizado para el presente artículo), entre otros. OpenDSS utiliza dos algoritmos capaces de resolver el flujo de potencia: el método de inyección de corriente y el método de Newton. En el artículo, los datos relacionados con el flujo de potencia, como tensiones, potencias, corrientes, pérdidas, entre otros, son resultados obtenidos de OpenDSS.

5.1 SOLUCIÓN INICIAL Y TEMPERATURA INICIAL

La elección de la temperatura inicial como se mencionó no debe ser ni muy grande ni muy pequeña, para ello usamos el parámetro variable "C" y el número de soluciones iniciales, que corresponden al cálculo de la temperatura inicial "To", como se muestra a continuación.

$$T_o = \frac{-PerdPromedio}{\ln(C)} \tag{7}$$

Siendo "PerdPromedio", las pérdidas promedio de "n" soluciones iniciales (SolIni) y "C" es una constante que toma valores de 0 a 1.

$$\begin{aligned}
 &PerdPromedio \\
 &= \frac{SolIni_1 + SolIni_2 + \dots + SolIni_n}{n} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^n SolIni_i}{n}
 \end{aligned} \tag{8}$$

De esta manera obtendremos una temperatura inicial adecuada, que estará de acuerdo al requerimiento del sistema eléctrico considerando sus pérdidas iniciales. La solución inicial a considerar para el algoritmo será la que tenga las mínimas pérdidas de las "n" soluciones iniciales creadas.

$$SOL_{ini} = \min_{p\acute{e}rdidas}(SolIni_1, SolIni_2, \dots, SolIni_n) \quad (9)$$

Dónde: SOL_{ini} , es la solución que se usará como la configuración inicial y sus pérdidas serán las pérdidas iniciales para el algoritmo, $SolIni_1, SolIni_2, \dots, SolIni_n$ son las "n" soluciones creadas inicialmente.

5.2 MALLA DE ESPACIO SELECTIVO

Como se mencionó el número de soluciones de configuraciones posibles que se pueden obtener viene dado por 2^n , donde "n" es el número de interruptores, cada línea del sistema tiene solo un interruptor maniobrable, teniendo que el número de interruptores maniobrables n_c es igual al número de líneas n_l . De esta manera para un sistema pequeño de 5 barras, que cuenta con 7 líneas se tendría $2^7 = 128$ configuraciones posibles.

Si utilizamos la ecuación 4, tendríamos:

$$N_{mallas} = (N_{lineas} - N_{barras}) + 1 = (7 - 5) + 1 = 3 \quad (10)$$

Se tendría 3 mallas, de los cuales cada interruptor solo pertenecería a una malla, para el sistema de 5 mallas quedaría de la siguiente manera. Al tener 3 mallas el sistema sería de dimensión 3, es decir la configuración tendrá 3 interruptores abiertos. La malla 1 será [s1, s2, s3], malla 2 es [s4, s5] y la malla 3 es [s6, s7].

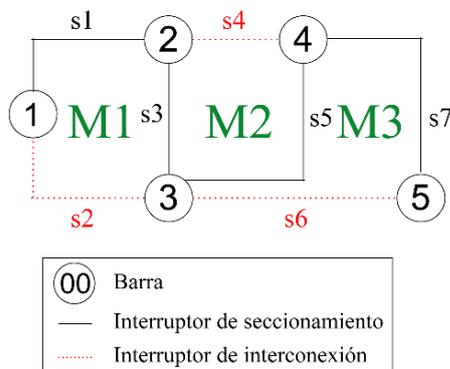


Fig. 2. Mallas del sistema de 5 barras.

El número máximo de configuraciones sería $3 \times 2 \times 2 = 12$ posibles soluciones, siendo una cantidad mucho menor que los 128 planteados al inicio. Para sistemas de mayor magnitud la búsqueda por malla de espacio selectivo es de mucha ayuda.

5.3 CRITERIO DE ENFRIAMIENTO

Para el criterio de enfriamiento se utiliza un enfriamiento geométrico. Siendo el valor de reducción de 0.7 a 0.99 lo recomendado.

5.4 CRITERIO DE PARADA

Para no llegar hasta la temperatura final y no hacer esfuerzo computacional en vano se considera un número "M" de repeticiones de la mejor solución encontrada hasta el momento.

5.5 CREACIÓN DE VECINOS

Conociendo la dimensión del sistema, se genera vecinos variando aleatoriamente uno de los interruptores de la configuración de la solución actual aceptada por el Recocido Simulado mediante la ecuación de Boltzmann.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección, el algoritmo se aplica a dos sistemas de distribución utilizados en la literatura técnica. Los parámetros requeridos para los sistemas son C y número de soluciones iniciales. Para el sistema de 33 barras se muestran resultados para diversas cantidades de vecinos creados y repeticiones de solución.

6.1 SISTEMA DE 5 BARRAS

Consideraremos el sistema didáctico de 5-Barras y 7-Líneas presentado inicialmente en [28]. Este sistema cuenta con una subestación (Barra 1), 4 interruptores de seccionamiento (s1, s3, s5 y s7) y 3 interruptores de interconexión (s2, s4 y s6).

TABLA II
Resultados para 5 Barras - 100 simulaciones

Parámetro	Resultados						Nro. Recu.	
	Valor promedio (kW)	Desv. Estand.	Peor Solución (kW)		Mejor Solución (kW)			
C	n			Pérdidas	Solución	Pérdidas	Solución	
0.1	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.2	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.3	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.4	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.5	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.6	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.7	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.8	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100
0.9	2	36.248	0.000	36.2479	[3, 4, 7]	36.248	[3, 4, 7]	100

Se puede apreciar que solo es necesario tener 2 soluciones iniciales y con un valor de C = 2, es más que suficiente, se logra un 100% de encontrar la solución global para 100 simulaciones. La solución encontrada y reportada por la literatura es [s3, s4, s7].

Las primeras 5 simulaciones se muestran a continuación para C=0.1 en la Tabla III.

TABLA III
Barras, Primeras 5 simulaciones para C=0.1 para 20 vecinos

N°	Solución	Pérd.	Solución	Pérd.		
Sim	To	Ini.(kW)	Tf	Fin. (kW)		
1	48.484	[1, 5, 6]	74.005	28.152	[3, 4, 7]	36.248
2	15.917	[3, 4, 7]	36.248	9.916	[3, 4, 7]	36.248
3	54.021	[3, 5, 7]	99.504	29.829	[3, 4, 7]	36.248
4	54.021	[3, 5, 7]	99.504	31.367	[3, 4, 7]	36.248
5	48.033	[1, 4, 6]	39.168	26.258	[3, 4, 7]	36.248

La tabla muestra la temperatura inicial, las pérdidas iniciales y la temperatura final alcanzada que como se

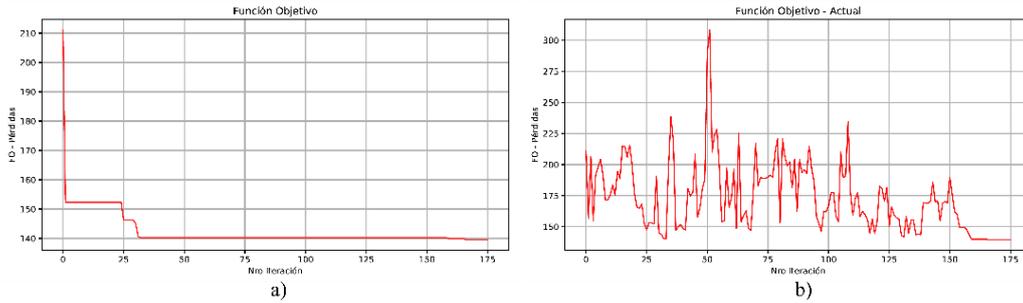


Fig. 3. 5 Barras - Mejor solución C=0.1, n=2. (a) Función Objetivo, (b) Solución aceptada actual.

La primera gráfica muestra cómo se va reduciendo la mejor solución encontrada en cada iteración, comenzando con pérdidas iniciales de 151.66 kW, llegando a conseguir la solución en la iteración 5. En la segunda gráfica se muestra las soluciones aceptadas en cada iteración por la ecuación de Boltzmann, la peor solución aceptada se da en las iteraciones 34 y 35 con unas pérdidas de 182.03 kW, la simulación tiene 57 iteraciones.

Se menciona este pequeño sistema porque es el sistema donde se probó todos los criterios mencionados. Para el presente sistema se considera 20 vecinos y 10 repeticiones. De acuerdo a la figura 2, los interruptores que se encuentran en líneas rojas punteadas son los que se encuentran abiertos en condiciones normales o iniciales del sistema con unas pérdidas de 151.658 kW, el resultado obtenido consigue pérdidas de 36.248 kW consiguiendo una reducción de 76.1% de pérdidas.

6.2 SISTEMA DE 33 BARRAS

El sistema de prueba 33-Barras de 10 MVA de Baran y Wu [5, 25] es un sistema de cinco dimensiones (mallas); subestación de 12,66 kV; cuenta con 37 ramales, 32 interruptores normalmente cerradas (seccionadores) y 5 interruptores normalmente abiertos (interruptor de interconexión).

En la figura 4, se observa las mallas creadas para el sistema de 33 barras, al ser un sistema de dimensión 5 el número de mallas creadas debe ser 5. La conformación de las mallas, las mismas que son enumeradas y representadas con la letra **M**. Esta conformación

muestra no llegan a 0.01 que era la temperatura final de parada, por lo contrario, valores que llegan a ser entre el 60 a 70% de la temperatura inicial. De esta manera no se pierde tiempo computacional en vano. Tomar 2 soluciones iniciales es un buen valor considerando que el sistema es pequeño, esta cantidad ayuda a inicializar adecuadamente la temperatura y solución inicial.

La mejor solución encontrada para C=0.1 se muestra en la figura 3:

muestra la malla 1 con los interruptores S2, S3, S4, S5, S6, S7, S33, S20, S19, S18, la malla 2 conformada por S8, S9, S10, S11, S35, S21, la malla 3 por S22, S23, S24, S37, S28, S27, S26, S25, la malla 4 S12, S13, S14, S34 y la malla 5 conformado por S29, S30, S31, S32, S36, S17, S16, S15.

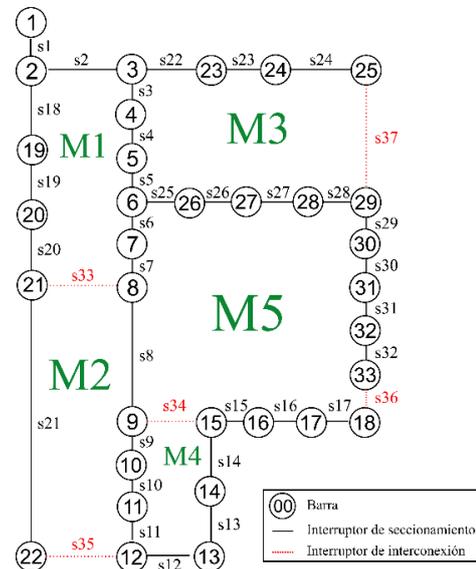


Fig. 4. Mallas del sistema de 33 barras

6.3 RESULTADOS PARA 20 VECINOS Y 10 REPETICIONES

En la tabla IV, se muestra los resultados obtenidos cuando se crean 20 vecinos para cada instante de temperatura y considerando 10 repeticiones de solución, variando el valor de C de 0.1 a 0.9 con pasos de 0.1 y considerando 4 soluciones iniciales.

TABLA IV
Resultados 33 Barras, n=4, 20 vecinos - 100 simulaciones

Parámetro		Resultados						
C	n	Valor promedio (kW)	Desv. Estand.	Peor Solución		Mejor Solución		Nro Recu.
				Pérdidas (kW)	Solución	Pérdidas (kW)	Solución	
0.1	4	139.59	0.33	142.83	[6,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	97
0.2	4	139.57	0.09	140.28	[7,10,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	97
0.3	4	139.57	0.10	140.28	[7,10,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	96
0.4	4	139.59	0.18	141.21	[7,11,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	94
0.5	4	139.60	0.33	142.83	[6,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	96
0.6	4	139.64	0.52	143.51	[7,10,37,34,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	94
0.7	4	139.57	0.09	139.95	[7,9,28,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	95
0.8	4	139.69	0.71	144.29	[7,11,28,34,36]	139.55	[7,9,37,14,32]	96
0.9	4	139.65	0.50	143.71	[33,11,28,34,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	94

Para C=0.8 se tiene la mayor desviación estándar con 0.71, pero el valor promedio es 139.69 kW que es mayor solo en 0.14kW que la solución objetivo reportada en la

literatura. Para una simulación de 100 veces se obtiene como min un 94% de efectividad para estas condiciones.

A continuación, se muestra las primeras 5 simulaciones para C=0.1 en la Tabla V.

TABLA V
33 Barras, Primeras 5 simulaciones para C=0.1 para 20 vecinos

Nº Sim	To	Solución Inicial	Pérd. Ini.(kW)	Tf	Solución Final	Pérd. Fin. (kW)
1	100.02	[33, 11, 25, 14, 15]	174.676	0.150	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
2	123.94	[33, 8, 28, 13, 17]	152.412	0.130	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
3	111.45	[7, 35, 26, 34, 36]	165.851	0.187	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
4	74.96	[5, 8, 27, 13, 17]	167.621	0.119	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
5	133.00	[33, 11, 26, 12, 17]	172.725	0.158	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553

Los valores muestran la temperatura inicial, las pérdidas iniciales y la temperatura final alcanzada que como se muestra no llegan a 0.01 que era la temperatura final de parada. De esta manera no se pierde tiempo computacional en vano. Un valor de 4 soluciones iniciales muestra un buen panorama para saber entre que valores están las pérdidas de las diversas configuraciones y poder inicializar adecuadamente una temperatura y solución inicial.

La mejor solución encontrada para C=0.1 se muestra en la figura 5:

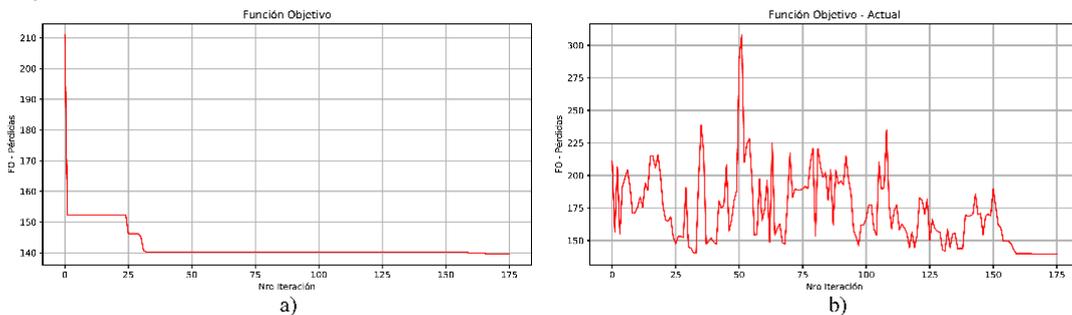


Fig. 5. 33 Barras - Mejor solución C=0.1, n=4. (a) Función Objetivo, (b) Solución aceptada actual.

La primera gráfica muestra cómo se va reduciendo la mejor solución encontrada en cada iteración, comenzando con pérdidas iniciales de 211.0907 kW, llegando a conseguir la solución en la iteración 166. En la segunda gráfica se muestra las soluciones aceptadas en cada iteración por la ecuación de Boltzmann, la peor solución aceptada se da en la iteración 51 con unas pérdidas de 308.306 kW, la simulación tiene 175 iteraciones.

6.4 RESULTADOS PARA 25 VECINOS Y 15 REPETICIONES

En la tabla VI, se muestra los resultados obtenidos cuando se crean 25 vecinos para cada instante de temperatura y considerando 15 repeticiones de solución, variando el valor de C de 0.1 a 0.9 con pasos de 0.1 y considerando 4 soluciones iniciales.

TABLA VI
Resultados 33 Barras, n=4, 25 vecinos - 100 simulaciones

Parámetro		Resultados						
C	n	Valor promedio (kW)	Desv. Estand.	Peor Solución		Mejor Solución		Nro Recu.
				Pérdidas (kW)	Solución	Pérdidas (kW)	Solución	
0.1	4	139.57	0.12	140.68	[7,10,28,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	98
0.2	4	139.55	0.00	139.55	[7,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	100
0.3	4	139.55	0.00	139.55	[7,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	100
0.4	4	139.55	0.00	139.55	[7,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	100
0.5	4	139.59	0.25	141.92	[7,9,28,14,36]	139.55	[7,9,37,14,32]	97
0.6	4	139.61	0.58	145.34	[6,11,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	99
0.7	4	139.55	0.00	139.55	[7,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	100
0.8	4	139.56	0.04	139.95	[7,9,28,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	99
0.9	4	139.55	0.00	139.55	[7,9,37,14,32]	139.55	[7,9,37,14,32]	100

Para C=0.6 se tiene la mayor desviación estándar con 0.58, pero el valor promedio es 139.61 kW que es mayor solo en 0.06 kW que la solución objetivo reportada en la literatura. Para una simulación de 100 veces se obtiene como mín un 97% de efectividad para estas condiciones,

llegando a obtener en varios casos el 100% de recurrencia a la solución objetivo.

A continuación, se muestra las primeras 5 simulaciones para C=0.2 en la Tabla VII.

TABLA VII
33 Barras, Primeras 5 simulaciones para C=0.2 para 25 vecinos

Nº Sim	To	Solución Inicial	Pérd. Ini.(kW)	Tf	Solución Final	Pérd. Fin. (kW)
1	197.73	[5, 8, 26, 34, 32]	166.426	0.088	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
2	119.35	[6, 35, 37, 12, 16]	160.110	0.091	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
3	177.78	[3, 8, 25, 14, 17]	180.838	0.088	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
4	180.60	[4, 9, 28, 13, 17]	173.675	0.107	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553
5	235.03	[20, 21, 25, 12, 16]	198.330	0.094	[7, 9, 37, 14, 32]	139.553

Al igual que el caso anterior, los valores muestran la temperatura inicial, las pérdidas iniciales y la temperatura final alcanzada que como se muestra no llegan a 0.01 que era la temperatura final de parada. De esta manera no se pierde tiempo computacional en vano. Se ratifica que un valor de 4 soluciones iniciales muestra un buen panorama para poder inicializar adecuadamente una temperatura y solución inicial.

La mejor solución encontrada para C=0.2 se muestra en la figura 6:

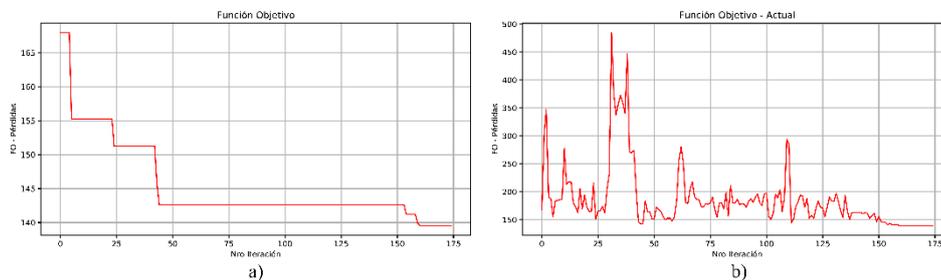


Fig. 6. 33 Barras - Mejor solución C=0.2, n=4. (a) Función Objetivo, (b) Solución aceptada actual.

La primera gráfica muestra cómo se va reduciendo la mejor solución encontrada en cada iteración, comenzando con pérdidas iniciales de 167.9775 kW, llegando a conseguir la solución en la iteración 160. En la segunda gráfica se muestra las soluciones aceptadas en cada iteración por la ecuación de Boltzmann, la peor

solución aceptada se da en la iteración 31 con unas pérdidas de 484.8326 kW, la simulación tiene 174 iteraciones.

De acuerdo a los resultados se puede apreciar que solo es necesario tener 4 soluciones iniciales y con un

valor de $C = 0.1$ a 0.3 , es más que suficiente, se obtienen muy buenos valores para 100 simulaciones, los valores promedio de pérdidas y desviación estándar lo ratifican, obteniendo una buena recurrencia de resultados en la solución encontrada y reportada por la literatura que es [57, 59, 537, 514, 532]. De acuerdo a la figura 4, los interruptores que se encuentran en líneas rojas punteadas son los que se encuentran abiertos en condiciones normales o iniciales del sistema con unas pérdidas de 202.634 kW, el resultado obtenido consigue pérdidas de 139.55 kW consiguiendo una reducción de 31.13% de pérdidas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso un método para la reconfiguración de redes de distribución con el fin de reducir las pérdidas de potencia activa mediante un algoritmo. El método propuesto, denominado Recocido Simulado, presenta mejoras en la búsqueda por malla de espacio selectivo, para poder mejorar la búsqueda de soluciones y obtener mejor convergencia de soluciones. Los resultados muestran que el enfriamiento utilizado ayuda a mejorar la aceptación de soluciones mediante la ecuación de Boltzmann, los criterios de parada son adecuados para tener buenas soluciones sin necesidad que se llegue a la temperatura final. Los resultados de las simulaciones muestran que el método propuesto es muy poderoso, eficaz y garantiza la obtención de buenas soluciones y obtuvo hasta un 100% de efectividad en ambos sistemas.

REFERENCIAS

[1] B. Avelar Rodrigues de Andrade y N. Roberto Ferreira. "Simulated annealing and tabu search applied on network reconfiguration in distribution systems". En: 2018 *Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395757.

[2] M. Antončič, M. Mikec y B. Blažič. "Development of distribution network model in OpenDSS using Matlab and GIS data". En: 2019 *7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/IYCE45807.2019.8991604.

[3] A. Augugliaro, L. Dusonchet y E. Riva Sansaverino. "Genetic, simulated annealing and tabu search algorithms: Three heuristic methods for optimal reconfiguration and compensation of distribution networks", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 9, 1999, pp. 35–41, doi: 10.1002/etep.4450090104.

[4] M.E. Baran y F.F. Wu. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 4, no. 2, 1989, pp. 1401–1407. doi: 10.1109/61.25627.

[5] D. Pinheiro Bernardon. "Novos Métodos para Reconfiguração das Redes de Distribuição a partir de Algoritmos de Tomadas de Decisão Multicritérios". Tesis de Doctorado, Universidad Federal de Santa Maria, Río Grande del Sur, Brasil, 2007. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3651>

[6] R.E. Brown. "Distribution reliability assessment and reconfiguration optimization". En: 2001 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat.No.01CH37294)*, Vol. 2. 2001, 994–999 vol.2. doi: 10.1109/TDC.2001.971382.

[7] J. Brownlee. *Clever algorithms: nature-inspired programming recipes*. Jason Brownlee, 2011.

[8] J. Chen, F. Zhang y Y. Zhang. "Distribution Network Reconfiguration Based on Simulated Annealing Immune Algorithm", *Energy Procedia*, vol. 12, 2011, pp. 271–277. doi: 10.1016/j.egypro.2011.10.037.

[9] E. Chen, S. Zhang y T. Wang. "Research on distribution network reconstruction based on improved simulated annealing — Ant colony algorithm". En: 2017 *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017, pp. 3575–3579. doi: 10.1109/CAC.2017.8243401.

[10] H. D. Chiang y R. Jean-Jumeau. "Optimal network reconfigurations in distribution systems. I. A new formulation and a solution methodology", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1902–1909, 1990. doi: 10.1109/61.103687.

[11] R. Chibante. *Simulated annealing: theory with applications*. BoD—Books on Demand, 2010.

[12] S. Civanlar et al. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, 1988. doi: 10.1109/61.193906.

[13] R. C. Dugan y D. Montenegro. "Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)". *Electric Power Research Institute, Inc*, vol. 9.0, 2020, pp. 1–218. [En línea]. Disponible: <https://sourceforge.net/p/electricdss/code/HEAD/tree/trunk/DistrIb/Doc/OpenDSSManual.pdf>

[14] E. Goldbarg, M. Goldbarg y H. Luna. *Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações*. Elsevier Brasil, 2017.

[15] Y. J. Jeon y J. C. Kim. "Network reconfiguration in radial distribution system using simulated annealing and Tabu search", 2000 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, Vol. 4, pp. 2329–2333, 2000. doi: 10.1109/PESW.2000.847169.

[16] S. Koziel, A. Landeros y S. Moskwa. "Power loss reduction through distribution network reconfiguration using feasibility-preserving simulated annealing", 2018 *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pp. 1–5, 2018. doi: 10.1109/EPE.2018.8396016.

[17] M. Lavorato et al. "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, 2011. doi: 10.1109/TPWRS.2011.2161349

[18] R. C. Marques, H. S. Eichkoff y A. P. C. de Mello. "Analysis of the distribution network reconfiguration using the OpenDSS®software". En: 2018 *Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395703.

[19] A. P. Carboni de Mello. "Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída". 2014 Universidad Federal de Santa Maria. Tesis de Maestría, Universidad Federal de Santa Maria, Río Grande del Sur, Brasil, 2014. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8537>

[20] A. Merlin y H. Back. "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System". En: *Fifth Power Systems Computer Conference (PSSC)*, 1975.

[21] D. Montenegro. "Introduction to the Next Generation of Distribution Analysis Tools – Summer course D1". En: *Electric Power Research Institute*, 2019, pp. 1–105. [En línea]. Disponible: https://sourceforge.net/p/electricdss/code/2705/tree/trunk/Training/Uniandes-2019/NGDAT_Day_1.pdf

[22] S. Nie et al. "Analysis of the impact of DG on distribution network reconfiguration using OpenDSS". En: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303390.

[23] T. Niknam, E. Azadfarسانی y M. Jabbari. "A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive PSO and NM algorithms for distribution feeder reconfiguration". En: *Energy Conversion and Management*, vol. 54, no. 1, pp. 7–16, 2012. doi: 10.1016/j.enconman.2011.09.014

[24] R. Pegado et al. "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO". En: *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 206–213, 2019. doi: 10.1016/j.epsr.2018.12.030.

[25] R. de Araújo Pegado. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando otimização por enxame de partículas

- aprimorado. Tesis de Maestría. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/17174>
- [26] G.J. Peponis, M.P. Papadopoulos y N.D. Hatziargyriou. "Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1338–1342, 1995. doi: 10.1109/61.400914.
- [27] F. S. Pereira, K. Vittori y G. R. M. da Costa. "Ant colony based method for reconfiguration of power distribution system to reduce losses". En: *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008, pp. 1–5. doi: 10.1109/TDC-LA.2008.4641831.
- [28] J. Sexauver. "New User Primer: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)", *Electric Power Research Institute, Inc*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1–35.
- [29] D. Shirmohammadi y H.W. Hong. "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 4, no.2, pp. 1492–1498, 1989. doi: 10.1109/61.25637.
- [30] A. Skoonpong y S. Sirisumrannukul. "Network Reconfiguration for Reliability Worth Enhancement in Distribution Systems by multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition integrating with thought of simulated annealing", *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008. doi: 10.1109/ECTICON.2008.4600585
- [31] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [32] M. Zulqarnain Zeb et al. "Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in the Active Distribution Network", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 68124–68134, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984127.
- [33] J. Zhang, Z. Li y B. Wang. "Within-day rolling optimal scheduling problem for active distribution networks by Simulated Annealing", *Energy*, Vol. 223, pp. 937–940, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120027.
- [34] M. Zhigang. "Study on distribution network reconfiguration based on genetic simulated annealing algorithm". En: *2008 China International Conference on Electricity Distribution*, 2008, pp. 1–7. doi: 10.1109/CICED.2008.5211684.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND 2.5 Perú. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe