

Artículo de investigación

Balance eficiente de polos en redes bipolares de CC asimétricas a través del algoritmo de búsqueda por vórtices

Efficient pole balancing in bipolar DC asymmetric networks via the vortex search algorithm

Gabriel Felipe Tovar-García¹ ✉, Wilmer Orlando Chila-Cruz¹ ✉, Oscar Danilo Montoya¹  ✉, Walter Gil González² ✉ y Edwin Rivas Trujillo¹ ✉

¹Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM), Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá 110231, Colombia.

²Department of Electrical Engineering, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira 660003, Colombia.

Recepción: 16-nov-2023 **Aceptado:** 6-mayo-2024 **Publicado:** 23-julio-2024

Cómo citar: Tovar-García, G. F., Chila-Cruz, W. O., Montoya Giraldo, O. D., Gil-González, W., & Rivas Trujillo, E. (2024). Balance eficiente de polos en redes bipolares de CC asimétricas a través del algoritmo de búsqueda por vórtices. *Ciencia en Desarrollo*, 15(2). <https://doi.org/10.19053/uptc.01217488.v15.n2.2024.16851>

Resumen

Este artículo presenta la aplicación del algoritmo de optimización de búsqueda por vórtices y el método de flujo de potencia triangular al problema de balance óptimo de polos en redes de corriente continua bipolares mediante una estrategia de optimización del tipo maestro-esclavo. Este problema consiste en la redistribución eficiente de cargas en los polos positivo y negativo, respecto del polo de neutro, tal que las pérdidas de potencia para una condición de carga determinada son reducidas. El problema de balance óptimo de polos corresponde a un problema de programación no lineal entero-mixto de difícil solución. Para abordar este problema se propone la utilización del algoritmo de búsqueda por vórtices en su etapa maestra y el método de flujo de potencia triangular en su etapa esclava. La etapa maestra se encarga de definir las conexiones de las cargas en los polos positivo y negativo para cada nodo, mientras que la etapa esclava se encarga de evaluar el problema de flujo de potencia resultante y definir el valor de pérdidas para cada condición de carga proveída por la etapa maestra. Los resultados numéricos en los sistemas de 21 y 85 nodos, demuestran la efectividad del modelo de optimización propuesto cuando se compara con métodos combinatorios, disponibles en la literatura especializada. Todas las implementaciones computacionales han sido desarrolladas en el entorno de programación de MATLAB en la versión 2022b.

Palabras Clave: Balance óptimo de polos; redes de distribución bipolares; flujo de potencia triangular; algoritmo de búsqueda por vórtices; pérdidas de potencia; paralelaje de cargas.

Abstract

This paper presents the application of the vortex search optimization algorithm and the triangular power flow method to the optimal pole balancing problem in bipolar direct current networks using a master-slave type optimization strategy. This problem consists of the efficient redistribution of loads in the positive and negative poles, with respect to the neutral pole, such that the power losses for a given load condition are reduced. The optimal pole balancing problem corresponds to a mixed-integer nonlinear programming problem that is difficult to solve. To address this problem, the use of the vortex search algorithm in its master stage and the triangular power flow method in its slave stage is proposed. To address this problem, the use of the vortex search algorithm in its master stage and the triangular power flow method in its slave stage is proposed. The master stage is responsible for defining the connection of the loads on the positive and negative poles for each node, while the slave stage is responsible for evaluating the resulting power flow problem, and defining the loss value for each load condition, provided by the master stage. The numerical results for the 21 and 85 node systems demonstrate the effectiveness of the proposed optimization model when compared with combinatorial methods available in the specialized literature. All computational implementations have been developed in the MATLAB programming environment in version 2022b.

Keywords: Optimal pole swapping; bipolar distribution networks; triangular power flow; vortex search algorithm; power losses; load parallelizing.

1. Introducción

Los sistemas de distribución radial son la parte del sistema de energía eléctrica responsable de proporcionar energía a los consumidores finales, siendo la configuración más convencional del sistema al tener una gran simplicidad en la topología de la red [1]; el inconveniente de los sistemas de distribución con estructura radial es que presentan un mayor valor de pérdidas de potencia en los sistemas eléctricos, cuando se compara con topologías enmalladas; además, estos presentan las tasas más altas de interrupción del servicio de energía, es decir, niveles más elevados de energía no servida [2].

Actualmente, con el crecimiento tecnológico enfocado en promocionar el uso de formas sostenibles de generación de energía mediante recursos renovables, se presenta un gran impacto en el sistema eléctrico convencional, por este motivo nace un gran interés en el uso de sistemas de redes de corriente continua (CC) teniendo como premisa los avances presentados en los últimos años en temas relacionados con electrónica de potencia [3]. Los sistemas CC tienen ventajas con respecto a la tecnología de corriente alterna convencional, ya que no presentan problemas relacionados con la sincronización de frecuencia en la red, además, no se presentan fenómenos inductivos en condiciones de estado estacionario, con lo cual no existen pérdidas asociadas a potencia reactiva [4]; y solo es necesario controlar la magnitud de la tensión [5].

Para lograr una transformación hacia nuevas tecnologías de distribución focalizadas en sistemas de CC, es esencial considerar las diferentes configuraciones que pueden surgir. Estas pueden ser redes monopolares y bipolares [5]. Los sistemas monopolares se componen de un polo positivo y un polo neutro, mientras que los sistemas bipolares incluyen un polo positivo, un polo neutro y un polo negativo [6]. En la Figura 1 se presentan las configuraciones monopolar y bipolar para una red de CC. Nótese que, los sistemas bipolares presentan ventajas significativas en comparación con los sistemas monopolares, permitiendo una mayor capacidad de transferencia de energía a través del polo neutro, la posibilidad de operar con dos niveles de tensión en las cargas y la flexibilidad para cambiar el polo de suministro de la carga [3].

De la Figura 1 es posible notar que la red monopolar consta únicamente de un nivel de tensión aplicado a la carga P^{pn} , i.e., V_{cc} , con una conexión entre el polo positivo (p) y el polo negativo (n) (o de retorno), tal como se ilustra en la Figura 1(a). En contraste, los sistemas bipolares están formados por tres terminales: positivo, negativo y neutro (o), lo que permite dos niveles de tensión distintos, ya sea en las cargas P^{po} conectadas entre el terminal positivo y neutro, o en las cargas P^{no} conectadas entre el terminal negativo y neutro. Además, en las cargas conectadas entre los terminales positivo y negativo P^{pn} , se experimenta el doble de la tensión, como se ilustra en la Figura 1(b).

El principal desafío atribuido al uso de sistemas bipolares radica en la asimetría de los polos. Esta asimetría se deriva de las diversas combinaciones de conexiones posibles en la red, las cuales abarcan la conexión entre el polo positivo y

el neutro, entre el polo negativo y el neutro, y entre polos positivos y negativos. Esta variabilidad en las conexiones conlleva un desequilibrio en el sistema, ya que las cargas vinculadas a los polos positivos y neutros difieren de las cargas conectadas entre los polos negativos y el neutro, generando impactos en los perfiles de tensión [7].

De la Figura 1 es posible notar que la red monopolar consta únicamente de un nivel de tensión aplicado a la carga P^{pn} , i.e., V_{cc} , con una conexión entre el polo positivo (p) y el polo negativo (n) (o de retorno), tal como se ilustra en la Figura 1(a). En contraste, los sistemas bipolares están formados por tres terminales: positivo, negativo y neutro (o), lo que permite dos niveles de tensión distintos, ya sea en las cargas P^{po} conectadas entre el terminal positivo y neutro, o en las cargas P^{no} conectadas entre el terminal negativo y neutro. Además, en las cargas conectadas entre los terminales positivo y negativo P^{pn} , se experimenta el doble de la tensión, como se ilustra en la Figura 1(b).

El principal desafío atribuido al uso de sistemas bipolares radica en la asimetría de los polos. Esta asimetría se deriva de las diversas combinaciones de conexiones posibles en la red, las cuales abarcan la conexión entre el polo positivo y el neutro, entre el polo negativo y el neutro, y entre polos positivos y negativos. Esta variabilidad en las conexiones conlleva un desequilibrio en el sistema, ya que las cargas vinculadas a los polos positivos y neutros difieren de las cargas conectadas entre los polos negativos y el neutro, generando impactos en los perfiles de tensión [7].

1.1. Revisión de la literatura

A continuación, se presentan los principales aportes existentes en la literatura especializada en temas relacionados con redes de CC bipolares asimétricas.

En la referencia [8], los autores propusieron una estrategia de conmutación de carga de CC desequilibrada basada en el interruptor de conmutación automática y el algoritmo genético; este método propuesto ajusta automáticamente la polaridad de la fuente de alimentación de la carga de CC. Por su parte, los autores de [9] abordaron los desbalances en las tensiones inherentes a los sistemas bipolares de CC mediante un enfoque distinto a las soluciones tradicionales basadas en electrónica de potencia. Su metodología implica la implementación de modelos de flujo de potencia que hacen uso de técnicas de línea única y el análisis nodal. Además, propusieron un modelo de distribución de carga de tipo binario, que permite la reasignación de las cargas monopolares en los polos positivo o negativo, dependiendo de la mejor opción en cuanto a pérdidas y perfiles de tensión. Para resolver el problema de reasignación óptima de cargas en redes bipolares de CC, los autores proponen una estrategia de programación lineal entera de tipo multi-objetivo, con excelentes resultados en redes de pequeña escala implementadas en el laboratorio.

Los autores de [10], evaluaron en los sistemas de CC bipolares para el flujo de carga que existen dos barras que actúan como barras de holgura evitando la configuración de la matriz jacobiana, por este motivo desarrollaron un método de análisis con consideración de elementos operativos que

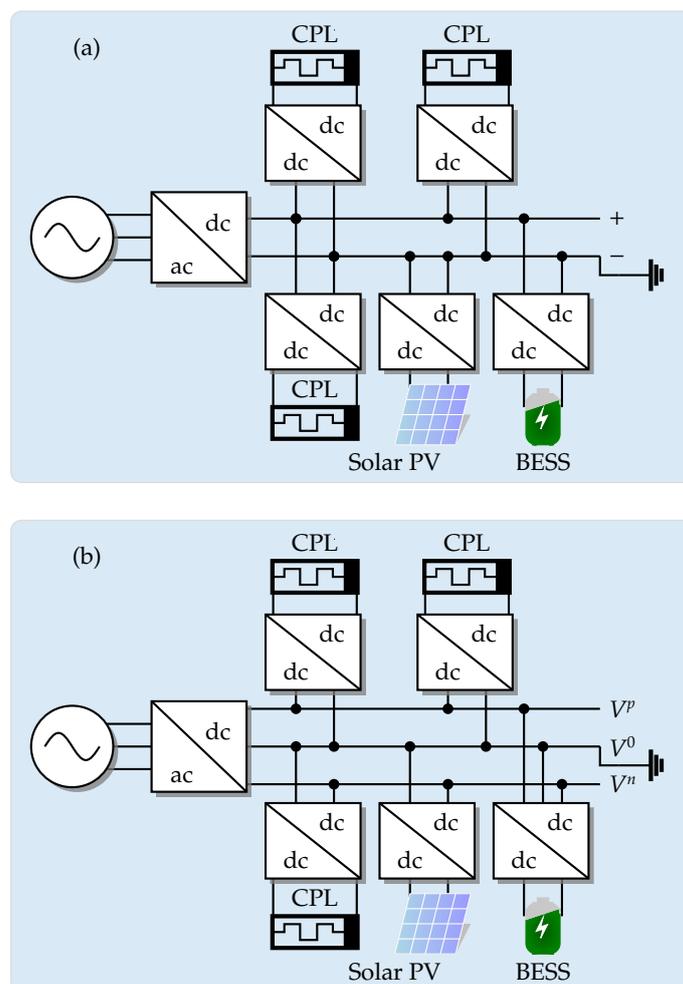


Figura 1: Representación esquemática de redes de CC: (a) red monopolar y (b) red bipolar.

están directamente conectados entre el potencial eléctrico neutro causado por el desequilibrio de cargas en las redes de distribución CC. Así mismo, en la referencia [11] se tuvo como objetivo realizar un control de flujo de potencia en las redes de distribución CC, mientras se suprime desequilibrio de la tensión y potencia de los polos positivos y negativos, se busca la aplicación del control de flujo de potencia en serie o paralelo en sistemas bipolares de distribución CC. Por otro lado, los autores de [12] describieron la adaptación de un equilibrador de polos para suprimir la tensión y la corriente desequilibrada en las redes de distribución de CC. Para esto, los autores consideran múltiples balanceadores de tensión combinando control primario y control secundario, es decir, emplean un enfoque de control que aprovecha los convertidores electrónicos de potencia presentes en las redes bipolares de CC para mejorar los perfiles de tensión en los nodos donde estos convertidores se encuentran conectados.

En la referencia [6], los autores contemplaron una solución del flujo de potencia en redes bipolares de CC con cargas múltiples monopolares y bipolares de potencia constante, el flujo de potencia se formula a través de la representación de base triangular de la topología de la red, generando una formulación que permite determinar los valores de tensión

en los nodos de demanda a través de un procedimiento iterativo. Por otro lado, los autores de [13] abordaron el problema de intercambio de polos óptimo en redes de CC bipolares asimétricos mediante el uso de un modelo de programación cuadrática de enteros mixtos. La principal ventaja de este enfoque es que para sistemas de CC bipolares, es posible asegurar el hallazgo del óptimo global debido a las propiedades de convexidad del modelo de programación propuesto.

1.2. Contribuciones

Luego de una exhaustiva revisión de la literatura especializada, se identificó un documento que aborda la temática del intercambio de polos mediante la aplicación de métodos de optimización combinatoria y la evaluación de dos alternativas de intercambio. La primera implica mantener las cargas en su configuración original, mientras que la segunda propone intercambiar las cargas entre el polo positivo y el polo negativo, tal como se presenta en [14]. Esta investigación abre la puerta a dos valiosas oportunidades de estudio: la utilización de métodos de optimización metaheurística para evaluar y mejorar los resultados previamente obtenidos, y la

consideración de dos nuevas posibilidades de intercambio de polos, a saber, la paralelización de las cargas en el polo positivo o en el polo negativo. El propósito fundamental de este trabajo radica en contribuir a la expansión del conocimiento en el ámbito del intercambio de polos, con la finalidad de reducir las pérdidas de potencia originadas por los perfiles de tensión.

En relación con los resultados existentes en la literatura especializada para el problema de balance óptimo de polos en sistemas de distribución de CC bipolares, este trabajo de grado realiza las siguientes contribuciones.

- i. Modificar el modelo de balance de polos tradicional en el que las cargas conectadas entre polo y neutro por cada nodo sólo podían permanecer con la configuración original o ser intercambiadas, proponiendo una estrategia en la que se permite el paralelaje de cargas en cada nodo, en caso de que esta opción sea la mejor para reducir las pérdidas de potencia para una condición de carga esperada.
- ii. La introducción y adaptación exitosa del algoritmo de búsqueda de vórtices como una herramienta dentro del marco de las redes de distribución de corriente continua bipolares representan un hito fundamental en esta investigación. Este planteamiento se centra en optimizar la eficiencia del sistema, con un énfasis particular en la reducción de pérdidas energéticas y la mejora de los perfiles de tensión en la red. La exitosa adaptación y aplicación del VSA en este entorno específico representa un avance significativo en la capacidad de diseñar sistemas de distribución de CC más eficientes y confiables. Este trabajo no solo corrobora la viabilidad del VSA en esta aplicación, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones destinadas a mejorar la calidad y eficiencia de las redes eléctricas de corriente continua bipolares.

1.3. Organización del documento

Este artículo está organizado de la siguiente forma: La sección 2 presente el desarrollo matemático para obtener el modelo de optimización para el balance óptimo de redes bipolares de CC asimétricas. La sección 3 describe la metodología de solución al problema de balance óptimo de redes bipolares de CC asimétricas. la sección 4 muestra los sistemas de prueba usados para validar la metodología propuesta. La sección 5 presenta los principales resultados avanzados con la metodología propuesta, así como también, una comparación con otras metodologías desarrolladas en otros artículos. Finalmente, la sección 6 resalta las principales conclusiones de este artículo, así como también, los posibles trabajos futuros derivados de esta investigación.

2. Modelado matemático

Con el propósito de afrontar el problema de intercambio óptimo de polos en redes de CC bipolares, teniendo en cuenta la inclusión del cable neutro, se emplea una formulación basada en programación no lineal entera mixta (MINLP, por

sus siglas en inglés). En este enfoque, la parte entera del modelo de MINLP se relaciona con las variables de decisión asociadas a la conexión de cargas monopolar en un nodo k específico, ya sea en el polo positivo o negativo. Por otro lado, la parte continua de este modelo se refiere a magnitudes como voltajes, corrientes de línea e inyecciones de potencia, entre otras. En lo que sigue, se presenta de manera detallada el modelo de MINLP que representa la problemática de intercambio óptimo de polos.

2.1. Función Objetivo

La función objetivo del problema de intercambio óptimo de polos es la minimización de las pérdidas de potencia en todas las líneas de distribución para los conductores positivo, negativo y neutro. La Ecuación (1) define su formulación.

$$\min p_{\text{loss}} = \sum_{r \in \mathbf{P}} \sum_{j \in \mathbf{N}} V_j^r \left(\sum_{s \in \mathbf{P}} \sum_{k \in \mathbf{N}} G_{jk}^{rs} V_k^s \right), \quad (1)$$

donde p_{loss} representa el valor de la función objetivo relacionada con las pérdidas totales de potencia en la red. Estas pérdidas se calculan como la suma de la tensión en el nodo j en el polo r , denotada como V_j^r , multiplicada por la conductancia de la línea jk que relaciona los polos r y s , representada por G_{jk}^{rs} , y la tensión en el nodo k en el polo s , señalada como V_k^s . Nótese que \mathbf{P} es el conjunto que contiene todos los polos del sistema y \mathbf{N} es el conjunto que contiene todos los nodos de la red bipolar.

2.2. Conjunto de restricciones

El conjunto de restricciones asociadas al problema de intercambio óptimo de polos incluye el balance de potencia en todos los nodos de la red por cada polo, la regulación de tensión y la condiciones asignadas a las variables binarias, entre otras. El conjunto completo de restricciones se recoge en las ecuaciones (2) a (14).

Las ecuaciones (2) a (4) definen el balance de corrientes en cada uno de los polos del sistema.

$$I_{g,k}^p - I_{d,k}^p - I_{d,k}^{p-n} = \sum_{r \in \mathbf{P}} \sum_{j \in \mathbf{N}} G_{jk}^{pr} V_{k'}^r \quad \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (2)$$

$$I_{g,k}^o - I_{d,k}^o - I_{d,k}^{\text{ground}} = \sum_{r \in \mathbf{P}} \sum_{j \in \mathbf{N}} G_{jk}^{or} V_{k'}^r \quad \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (3)$$

$$I_{g,k}^n - I_{d,k}^n + I_{d,k}^{p-n} = \sum_{r \in \mathbf{P}} \sum_{j \in \mathbf{N}} G_{jk}^{nr} V_{k'}^r \quad \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (4)$$

donde $I_{g,k}^p$, $I_{g,k}^o$ e $I_{g,k}^n$ representan las corrientes generadas en el nodo k en los polos positivo, neutro y negativo, respectivamente; $I_{d,k}^p$, $I_{d,k}^o$ e $I_{d,k}^n$ corresponden a los consumos de corriente monopolar en el nodo k para los polos positivo, neutro y negativo, respectivamente; $I_{d,k}^{\text{ground}}$ representa la corriente drenada hacia la tierra del sistema, en el caso de que el nodo k se encuentre sólidamente aterrizado, $I_{d,k}^{p-n}$ representa el consumo de corriente asociado a una carga bipolar conectada entre los polos p y n .

En las ecuaciones (5) a (8) se define el cálculo de las corrientes demandadas en los polos positivo, negativo y neutro, como una función hiperbólica que relaciona las potencias y los voltajes.

$$I_{d,k}^p = \frac{x_k^p P_{d,k}^p + x_k^n P_{d,k}^n + (P_{d,k}^p + P_{d,k}^n) w_k}{V_k^p - V_k^o}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (5)$$

$$I_{d,k}^n = \frac{x_k^n P_{d,k}^p + x_k^p P_{d,k}^n + (P_{d,k}^p + P_{d,k}^n) y_k}{V_k^n - V_k^o}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (6)$$

$$I_{d,k}^o = -I_{d,k}^p - I_{d,k}^n, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (7)$$

$$I_{d,k}^{p-n} = \frac{P_{d,k}^{p-n}}{V_k^p - V_k^n}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (8)$$

donde $P_{d,k}^p$, $P_{d,k}^n$ y $P_{d,k}^{p-n}$ representan los consumos de potencia constante en los polos positivo y negativo, con respecto al neutro, así como las cargas bipolares conectadas entre los polos p y n , respectivamente. Las variables x_k^p , x_k^n , w_k y y_k son variables binarias que determinan si las cargas monopolares, i.e., $P_{d,k}^p$ y $P_{d,k}^n$, se mantienen conectadas en su forma original, intercambian de polo, se conectan en paralelo en el polo positivo, o se conectan en paralelo en el polo negativo, respectivamente.

Las restricciones de desigualdad dadas entre (9) y (11) definen los límites operativos de las corrientes inyectadas por el generador g conectado al nodo k en cada uno de sus polos.

$$I_{g,k}^{p,\min} \leq I_{g,k}^p \leq I_{g,k}^{p,\max}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (9)$$

$$I_{g,k}^{o,\min} \leq I_{g,k}^o \leq I_{g,k}^{o,\max}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (10)$$

$$I_{g,k}^{n,\min} \leq I_{g,k}^n \leq I_{g,k}^{n,\max}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (11)$$

donde $I_{g,k}^{p,\min}$ e $I_{g,k}^{p,\max}$ representa a los límites inferior y superior para la corriente inyectada en el polo positivo en el nodo k , $I_{g,k}^{o,\min}$ e $I_{g,k}^{o,\max}$ son los límites inferior y superior para la corriente inyectada en el polo de neutro en el nodo k , y $I_{g,k}^{n,\min}$ e $I_{g,k}^{n,\max}$ corresponden a los límites inferior y superior para la corriente inyectada en el polo negativo en el nodo k , respectivamente.

Las restricciones (12) y (13) definen los límites de regulación de tensión aplicables a una red bipolar en sus polos positivo y negativo.

$$V_k^{p,\min} \leq V_k^p \leq V_k^{p,\max}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (12)$$

$$V_k^{n,\min} \leq V_k^n \leq V_k^{n,\max}, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (13)$$

donde $V_k^{p,\min}$ y $V_k^{p,\max}$ representan los límites inferior y superior de tensión aplicables a polo positivo en el nodo k , y $V_k^{n,\min}$ y $V_k^{n,\max}$ representan los límites inferior y superior de tensión aplicables a polo negativo en el nodo k , respectivamente.

...

Por otro lado, la Ecuación (14) define el voltaje aplicado en terminales de la subestación.

$$\begin{bmatrix} V_j^p \\ V_j^o \\ V_j^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} V_{\text{nom}}, \{j = \text{slack}\} \quad (14)$$

donde V_{nom} representa la tensión nominal de la red bipolar de CC.

Finalmente, la Ecuación (15) y la condición (16) garantizan que sólo un tipo de conexión es aplicable a las cargas de cada nodo, lo cual se asegura mediante la condición binaria de las variables de decisión.

$$x_k^p + x_k^n + w_k + y_k = 1, \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (15)$$

$$\{x_k^p, x_k^n, w_k, y_k\} \in \{0, 1\} \{\forall k \in \mathbf{N}\} \quad (16)$$

Observación 1 Es importante mencionar que, debido a la naturaleza del modelo matemático (1)–(16), el cual corresponde a la familia de los modelos de MINLP, se requiere de implementar estrategias de optimización eficientes que permitan su solución numérica en tiempos de cómputo razonables, en este sentido, en este artículo se presentará una metodología de optimización del tipo maestro esclavo para abordar este problema de optimización

2.3. Ejemplo ilustrativo de la conexión de cargas en una red bipolar

Con el fin de ilustrar el efecto que tienen las variables binarias en la conexión de las cargas monopolares en los polos positivo y negativo de una red bipolar, respecto de su polo de neutro, se considera el ejemplo gráfico que se presenta en la Figura 2. Nótese que estas posibles configuraciones para las cargas, se obtienen a partir de las posibles soluciones binarias de la Ecuación (16).

- i. En la Figura 2(a) se presenta la conexión original del sistema, donde la carga C_1 está conectada entre el polo positivo y el neutro, la carga C_2 está conectada entre el polo negativo y el neutro, y la carga C_3 corresponde a una carga bipolar conectada entre los polos positivo y negativo, respectivamente. Nótese que esta conexión se da cuando la variable binaria x_k^p se activa.
- ii. En la Figura 2(b) se presenta la primera posibilidad en el intercambio de cargas, en el cual se presenta, cuando la carga del polo positivo pasa al polo negativo y viceversa. Observe que esta condición operativa se presenta cuando la variable binaria x_k^n se activa.
- iii. En la Figura 2(c) se muestra la segunda posibilidad en el intercambio eficiente de polos para redes de CC asimétricas, en esta se realiza un paralelaje de cargas en el polo positivo. Nótese que esta condición se presenta cuando la variable binaria w_k se activa.
- iv. En la Figura 2(d) se muestra la tercera posibilidad en el intercambio eficiente de polos para redes de CC asimétricas, en esta se realiza un paralelaje de cargas en el polo negativo. Observe que esta condición se presenta cuando la variable binaria y_k se activa.

3. Metodología de solución

En esta sección se presenta la metodología de solución propuesta para abordar el problema de intercambio eficiente de polos en redes de CC de naturaleza bipolar con cargas asimétricas. La metodología propuesta hace parte de la familia

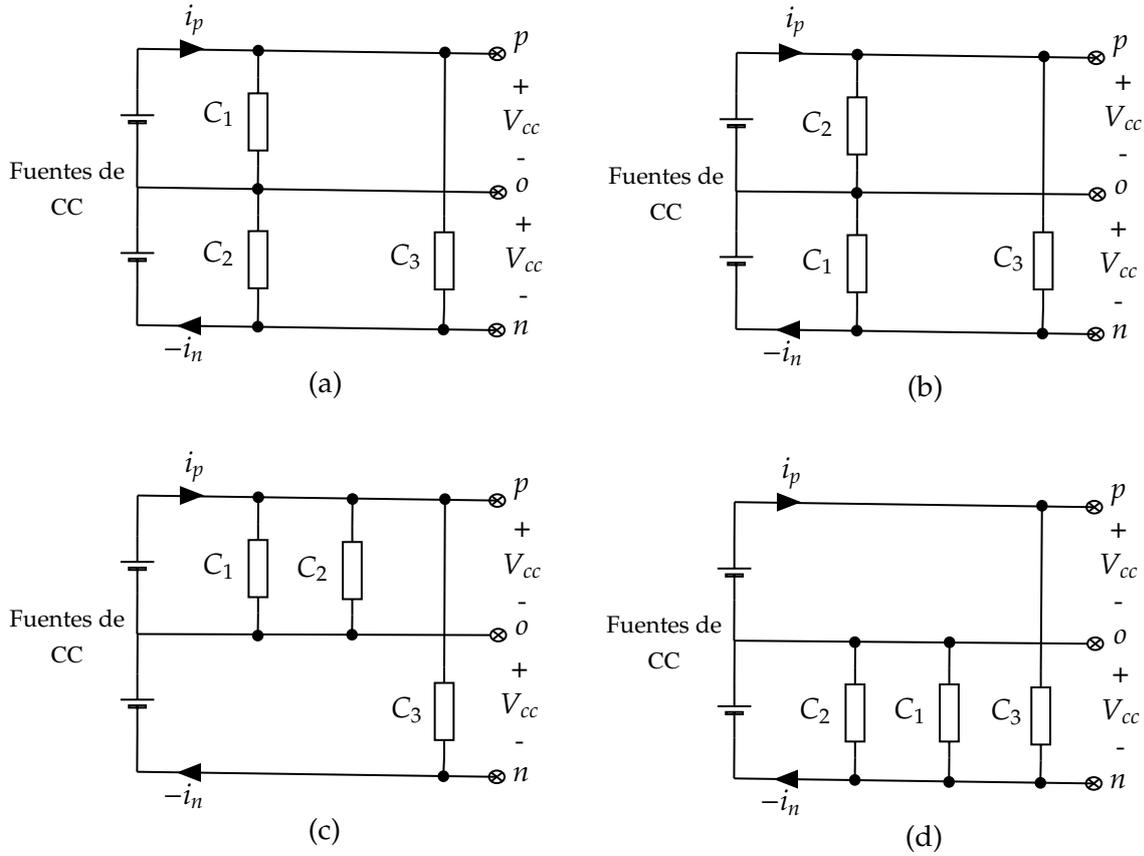


Figura 2: Ejemplo del intercambio de cargas en una red bipolar de CC.

de los métodos de optimización del tipo maestro-esclavo, donde la etapa maestra se encargará de definir las conexiones de las cargas en cada nodo y la etapa esclava resolverá el problema de flujo de potencia resultante. A continuación se detallan cada una de las etapas de la metodología de solución propuesta en esta investigación.

3.1. Etapa esclava: flujo de potencia triangular

La etapa de análisis de flujo de potencia marca la fase fundamental de la evaluación de las condiciones operativas de una red eléctrica. A través de la solución del problema de flujo de potencia, es posible conocer el estado operativo de una red eléctrica en su totalidad, por ejemplo, las pérdidas de potencia para un escenario de demanda en particular, la regulación de tensión o la cargabilidad de los tramos [15, 16]. Aunque en la literatura científica existen diferentes métodos para resolver el problema de flujo de potencia en redes bipolares de CC, como el método de Newton-Raphson [15], el método de aproximaciones sucesivas con limitador de corriente [17], el método de la aproximación hiperbólica [18] y el método triangular [16]. En este artículo se selecciona el método de flujo de potencia triangular por su eficiencia y facilidad de implementación en redes de CC bipolares asimétricas [19].

La fórmula que define el método de flujo de potencia triangular se expone en la Ecuación (17). Dicha fórmula es derivada

mediante la aplicación de la teoría de grafos a redes de distribución radiales, como fue presentada por [20].

$$V_d^{pon,m+1} = \mathbf{A}_{ds} V_s^{pon} - \mathbf{R}_{dd}^{pon} I_d^{pon,m}. \quad (17)$$

donde $V_d^{pon,m+1}$ es el vector que contiene todas las tensiones de demanda en la iteración $m + 1$ para los polos positivo, neutro y negativo, respectivamente, que es una función no lineal de las corrientes de demanda $I_d^{pon,m}$. Es importante destacar que en la Ecuación (17) se encuentra implícita la matriz triangular que relaciona ramas con corrientes de demanda \mathbf{T}_{dd}^{pon} (ver la referencia [19] para más detalles). Además, V_s^{pon} representa las salidas de tensión en la subestación, como se muestra en la Ecuación (14). Se observa que \mathbf{A}_{ds} y $\mathbf{R}_{dd,pon}$ son matrices que dependen de la topología de red analizada. Obsérvese que las corrientes demandadas $I_d^{pon,m}$ se mantienen en la forma de una relación hiperbólica entre tensiones y potencias, y dependen también de las variables cuaternarias x_k^p , x_k^n , w_k y y_k , i.e., es decir, son función del vector de decisión X_i^i (como se describirá más adelante). Obsérvese que $I_{dk}^{pon,m}$ para cada nodo k puede definirse como se presenta en la Ecuación (18).

$$I_{dk}^{pon,m} = \mathbf{H} \text{diag}^{-1} (\Delta v_{dk}^{pon,m}) X_k P_{dk}^{pon}, \quad (18)$$

donde

$$I_{d,k}^{pon,m} = \begin{bmatrix} i_{d,k}^p \\ i_{d,k}^o \\ i_{d,k}^n \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$P_{dk}^{pon} = \begin{bmatrix} p_{d,k}^p \\ p_{d,k}^{p-n} \\ p_{d,k}^n \end{bmatrix}.$$

siendo $v_{d,k}^{po} = v_{d,k}^p - v_{d,k}^o$, $v_{d,k}^{pn} = v_{d,k}^p - v_{d,k}^n$ y $v_{d,k}^{no} = v_{d,k}^n - v_{d,k}^o$ se agrupan en un vector como $\Delta v_{d,k}^{pon} = [v_{d,k}^{po} \ v_{d,k}^{pn} \ v_{d,k}^{no}]^T$. Cabe mencionar que \mathbf{X}_k es una variable que representa la conexión de las cargas monopolares en el nodo k , es decir, es la variable que decodifica el valor de la solución para cada nodo y que está contenido en X_i^t .

Para determinar cuándo la solución del flujo de potencia dada por la Ecuación (18) ha convergido a la solución del flujo de potencia, se calcula la diferencia máxima entre dos iteraciones consecutivas i.e., $\max\{||V_d^{pon,m+1}| - |V_d^{pon,m}||\} \leq \zeta$, siendo ζ el error máximo de convergencia, que normalmente se elige como 1×10^{-10} [19].

Una vez resuelto el problema de flujo de potencia para cada vector solución X_i^t (solución proveída por la etapa maestra), es posible determinar las pérdidas de potencia para la configuración total de la red. Estas pérdidas se calculan según se define en la Ecuación (19).

$$p_{\text{loss}} = J_l^{pon,T} \mathbf{R}_{ll}^{pon} J_l^{pon}, \quad (19)$$

donde $J_l^{pon,T}$ representa el vector con todas las corrientes a través de las líneas, y \mathbf{R}_{ll}^{pon} es la matriz de resistencia elemental vinculada a todas las ramas. Este estudio adopta la formulación de flujo de potencia triangular como la etapa esclava, ya que en cualquier método de optimización maestro-esclavo, su objetivo es definir la viabilidad técnica de cada vector de solución proporcionado por la metodología de optimización maestra [21].

3.2. Algoritmo de optimización de búsqueda por vórtices

La parte principal de la metodología de optimización es la etapa maestra, ya que es la encargada de realizar la guía de la exploración y explotación del espacio de solución mediante reglas de evolución especializadas [22]. En esta investigación se emplea un método de optimización metaheurística para resolver el problema de intercambio eficiente de polos en redes de distribución de CC bipolares conocido como el algoritmo de búsqueda de vórtices (VSA, por sus siglas en inglés).

En la literatura científica, el VSA ha encontrado aplicaciones en diversas áreas, y algunos de los trabajos más destacados incluyen el diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos en redes de distribución para minimizar costos operativos [23]; la optimización del ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos para estimar la radiación solar que incide en la superficie de los mismos [24]; la clasificación y localización de fallas en líneas de transmisión [25]; la solución del problema de equilibrio de fases en sistemas de distribución trifásicos [26]

y la estimación de armónicos e interarmónicos en sistemas eléctricos con alta penetración de convertidores [27]. Estos ejemplos demuestran la versatilidad del VSA en la solución de problemas en una amplia gama de aplicaciones. Por lo tanto, la elección del VSA como la metodología principal en esta investigación se justifica por su capacidad para abordar problemas de manera iterativa, generando y sustituyendo soluciones basadas en la solución actual, una característica fundamental de este algoritmo.

El VSA es un algoritmo basado en el comportamiento de los vórtices generados por los fluidos agitados; el algoritmo postula soluciones candidatas utilizando una distribución Gaussiana en cada iteración, tomando la mejor solución actual como el centro de la hiper-elipse que contiene a todas las soluciones candidatas [28]. Para dar comienzo a la solución de un problema considerado de optimización bidireccional, el algoritmo requiere de una solución inicial, para ello el espacio exterior del vórtice se centra en el primer espacio de búsqueda cuyo centro inicial (en $m = 0$, siendo t el contador de iteraciones) μ_t (centro de la hiper-elipse), y se calcula utilizando la Ecuación (20).

$$\mu_t = \frac{x_{\text{máx}} + x_{\text{mín}}}{2} \quad (20)$$

donde el límite superior y el límite inferior de las variables de decisión están definidos por $x_{\text{máx}}$ y $x_{\text{mín}}$, respectivamente. Nótese que la dimensión de los vectores $x_{\text{mín}}$ y $x_{\text{máx}}$ corresponde a $d \times 1$, siendo d el número de nodos del sistema, excepto el nodo slack.

Utilizando una distribución Gaussiana se generan un número de soluciones vecinas $C_i(s)$ y se generan aleatoriamente alrededor de μ_m en el espacio de dimensión d ; $C_0(s) = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ $k = 1, 2, \dots, n$ representan las soluciones y n representa el número total de soluciones candidatas [22].

$$p(x|\mu_t, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d |\Sigma|}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu_t)^T \Sigma^{-1} (x-\mu_t)} \quad (21)$$

siendo x un vector de dimensión $dx1$ que contiene variables aleatorias, μ_t es un vector de dimensión $dx1$ que contiene la media de la muestra y Σ es la matriz de covarianza. Nótese que si elementos de la matriz de covarianza son iguales y los elementos fuera de diagonal de esta matriz se consideran cero, entonces la forma resultante de la distribución Gaussiana se generará como hiper-elipses en un espacio de dimensión d [29]. Una forma simple de calcular Σ se presenta en la Ecuación (22).

$$\Sigma = \sigma^2 I_{d \times d} \quad (22)$$

donde σ es la varianza de la distribución Gaussiana e I es una matriz identidad de dimensiones $d \times d$.

La desviación estándar inicial (σ_t , con $t = 0$) de la distribución se puede calcular utilizando la Ecuación (23) [22].

$$\sigma_t = \frac{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}}{2}. \quad (23)$$

Es importante mencionar que una de las principales características del VSA es que funciona con un radio variable que disminuye a medida que se explora el espacio de solución. Esto, con el fin de controlar el equilibrio entre la exploración

y la explotación a medida que avanza el proceso de búsqueda de la solución óptima [28]. Con el objetivo de preservar la factibilidad de las soluciones candidatas, es necesario llevar a cabo la delimitación de las soluciones candidatas, especialmente considerando que las distribuciones Gaussianas pueden generar soluciones que se encuentren por encima o por debajo de los límites definidos. Este proceso de delimitación se refleja en la Ecuación (24) [30];

$$s_k^i = \begin{cases} \mathbf{r}(\delta(x_i^{\text{máx}} - x_i^{\text{mín}}) + x_i^{\text{mín}}) & s_k^i < x_i^{\text{mín}} \\ s_k^i & x_i^{\text{mín}} \leq s_k^i \leq x_i^{\text{máx}} \\ \mathbf{r}(\delta \cdot (x_i^{\text{máx}} - x_i^{\text{mín}}) + x_i^{\text{mín}}) & s_k^i > x_i^{\text{máx}} \end{cases} \quad (24)$$

donde $k = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, d$ y δ representa un valor aleatorio que se distribuye uniformemente entre un valor entero de 0 a 1 y la función $\mathbf{r}(\cdot)$ retorna el valor entero asociado a cada posición del vector x .

Luego de verificar y corregir los valores dentro de los límites predefinidos, se procede a seleccionar la mejor solución, denotada como s^* . Esta solución se almacena en $C_0(s^*)$ para reemplazar el centro actual de la hiper-elipse, μ_0 . Si la solución actual resulta ser mejor a la solución anterior, se establece como la mejor solución en s_t y se realiza la actualización de la hiper-elipse μ_t , lo que conlleva a la reducción del radio r_m . Este proceso genera un nuevo conjunto de soluciones alrededor del nuevo centro. La reducción adaptativa del radio de la hiper-elipse se lleva a cabo en cada iteración utilizando la función gamma incompleta, tal como se ilustra en la Ecuación (25) [31]. Además, es importante mencionar la existencia de la función gamma incompleta inversa, la cual se describe detalladamente en la Ecuación (26).

$$\gamma(x, a) = \int_0^x \exp^{-t} t^{a-1} dt, \quad (25)$$

$$r_t = \sigma_t \gamma^{-1}(x, a) \quad (26)$$

donde $a > 0$ representa el parámetro de forma y $\gamma \geq 0$ es un parámetro aleatorio definido por el programador.

Observación 2 *La principal ventaja del VSA es el equilibrio que se logra entre la exploración y la explotación del espacio de soluciones a partir de la generación de soluciones candidatas alrededor de la mejor solución actual, al tiempo que se reduce el radio de la hiper-elipse que contiene estas soluciones. Adicionalmente, para el caso del problema del balance óptimo de polos, es importante mencionar que los vectores $x_{\text{mín}}$ y $x_{\text{máx}}$ están compuestos por vectores de la forma $[0, 0, \dots, 0]_{d \times 1}$ y $[3, 3, \dots, 3]_{d \times 1}$, siendo estos los equivalentes para las variables binarias x_k^p, x_k^n, y_k y w_k en términos discretos.*

3.3. Resumen de la metodología propuesta

Con el fin de ilustrar de manera detallada los principales aspectos de la implementación algorítmica del VSA al intercambio eficiente de polos en redes de CC bipolares, considere el Algoritmo 1.

4. Sistemas de prueba

En esta sección se presentan las principales características de los sistemas de prueba utilizados para la validación compu-

-
- 1: **INICIO**
 - 2: Leer la información de la red de distribución CC.
 - 3: Definir $m = 0$ y generar la solución inicial como centro del espacio de búsqueda μ_m .
 - 4: Definir el radio inicial r_m ó la desviación estándar σ_m .
 - 5: Establecer la función adaptativa $g_{\text{mín}}$.
 - 6: **for** m in $1 : \text{máx}$ **do**
 - 7: Obtener conjunto de soluciones candidatas $C_m(s)$, utilizando distribución Gaussiana alrededor del centro μ_m y desviación estándar σ_m
 - 8: Evaluar si $C_m(s)$ exceden algún limite ya sea inferior o superior, ajustar el conjunto de soluciones dentro de los limites.
 - 9: Elegir la mejor solución s^* que produce el $f_{\text{mín}}$ mas bajo (donde $f_{\text{mín}}$ representa la función adaptativa evaluado en la mejor solución $g_{\text{mín}}(s^*)$, es decir, la evaluación en la etapa esclava).
 - 10: Actualizar el valor $g_{\text{mín}}$.
 - 11: Se desplaza el centro hacia la nueva mejor solución μ_m .
 - 12: Calcular el nuevo radio r_m .
 - 13: **end for**
 - 14: Reportar la mejor solución.
-

15: FIN

Algorithm 1: Descripción del VSA aplicado al problema de balance óptimo de polos

tacional de la metodología de solución propuesta para el problema intercambio eficiente de polos en redes de distribución de CC de naturaleza bipolar mediante la aplicación del VSA. Los sistemas empleados corresponden a las versiones bipolares de los sistemas de 21 y 85 nodos.

4.1. Sistema de prueba de 21 nodos

El sistema de CC compuesto de 21 nodos representa una adaptación específica de una red de distribución de CC de naturaleza monopolar [32]. Este sistema de prueba opera con una tensión equivalente en terminales de la subestación de ± 1 kV, para los polos positivo y negativo, mientras que el polo neutro se encuentra sólidamente aterrizado, lo cual garantiza una tensión de 0 V en dicho terminal. El diagrama monopolar que representa a la red eléctrica de 21 nodos se presenta en la Figura 3.

Las principales características de la red bipolar de CC de 21 nodos son: (i) El consumo monopolar equivalente para el polo positivo es de 554 kW, (ii) el consumo monopolar equivalente para el polo negativo es de 445 kW, (iii) el consumo bipolar equivalente, es decir, las cargas conectadas entre el polo positivo y el polo negativo suman un total de 405 kW de consumo, y (iv) las pérdidas de potencia para la configuración inicial del sistema considerando que todos los nodos, excepto la subestación, tienen neutro flotante, suman un total de 95.4237 kW.

La información paramétrica del sistema de prueba de 21 nodos se lista en la Tabla 1, donde se presentan las conexiones

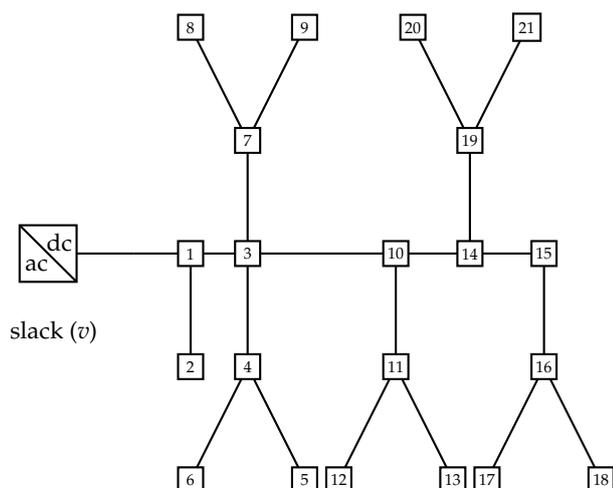


Figura 3: Representación topológica de la red bipolar de CC de 21 nodos.

nodales, así como los valores de resistencia de cada tramo de red y los consumos de potencia [6].

Tabla 1: Datos de resistencia y consumo para el sistema de 21 nodos (todas las potencias en kW)

Nodo j	Nodo k	R_{jk} (Ω)	$P_{d,k}^p$	$P_{d,k}^n$	$P_{d,k}^{p-n}$
1	2	0.053	70	100	0
1	3	0.054	0	0	0
3	4	0.054	36	40	120
4	5	0.063	4	0	0
4	6	0.051	36	0	0
3	7	0.037	0	0	0
7	8	0.079	32	50	0
7	9	0.072	80	0	100
3	10	0.053	0	10	0
10	11	0.038	45	30	0
11	12	0.079	68	70	0
11	13	0.078	10	0	75
10	14	0.083	0	0	0
14	15	0.065	22	30	0
15	16	0.064	23	10	0
16	17	0.074	43	0	60
16	18	0.081	34	60	0
14	19	0.078	9	15	0
19	20	0.084	21	10	50
19	21	0.082	21	20	0

4.2. Sistema de prueba de 85 nodos

El sistema de prueba de 85 nodos bipolar de CC corresponde a una adaptación del sistema de prueba IEEE de 85 nodos monofásico para estudios de corriente alterna propuesto por los autores de [13]. Este sistema de prueba opera con una tensión equivalente en terminales de la subestación de ± 11 kV, para los polos positivo y negativo, mientras que el polo neutro se encuentra sólidamente aterrizado, lo cual garantiza una tensión de 0 V en dicho terminal. El diagrama

monopolar que representa a la red eléctrica de 85 nodos se presenta en la Figura 4.

Las principales características de la red bipolar de CC de 85 nodos son: (i) el consumo monopolar equivalente para el polo positivo es de 1654.84 kW, (ii) el consumo monopolar equivalente para el polo negativo es de 2616.485 kW, (iii) el consumo bipolar equivalente, es decir, las cargas conectadas entre el polo positivo y el polo negativo suman un total de 41883.455 kW de consumo, y (iv) las pérdidas de potencia para la configuración inicial del sistema considerando que todos los nodos, excepto la subestación, tienen neutro flotante, suman un total de 489.5759 kW.

La información paramétrica del sistema de prueba de 85 nodos se lista en la Tabla 2, donde se presentan las conexiones nodales, así como los valores de resistencia de cada tramo de red y los consumos de potencia [18].

5. Resultados

Para resolver el problema de intercambio óptimo de polos en redes de CC bipolares, en los sistemas de 21 y 85 nodos, se realiza una implementación computacional en el entorno de programación MATLAB usando scripts desarrollados en esta investigación. Para esta implementación se utilizó la versión 2022b de MATLAB en un PC con un procesador AMD Ryzen 7 5900x a 3,2 GHz y 16.0 GB RAM, funcionando con una versión de 64-bit de Microsoft Windows 10 Pro. A continuación se describen los principales resultados de simulación obtenidos de esta investigación, dentro de los cuales se destacan las diferentes soluciones obtenidas para el intercambio de polos en cada sistema de prueba, así como el comportamiento de los perfiles de tensión antes y después de implementar la solución obtenida con el método de optimización de VSA.

5.1. Sistema de 21 Nodos

Para el sistema de prueba de 21 nodos, en la Tabla 3 se presenta la configuración obtenida para las conexiones de las cargas, cuando se aplica la metodología de solución propuesta en esta monografía.

En la Tabla 3, se puede observar que tras la ejecución del algoritmo VSA, se obtuvo un valor de pérdidas de 91.6628 kW. Esta cifra se compara con las pérdidas iniciales de 95.4237 kW, evidenciando una notable reducción del 3.9413 %. Las configuraciones implementadas para cada nodo modificado fueron las siguientes:

- ✓ Soluciones para $x_k^p = 1$, es decir, nodos sin movimiento de cargas: [1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20]
- ✓ Soluciones para $x_k^n = 1$, es decir, rotación de cargas entre polo positivo y negativo: [8, 12, 16, 21]
- ✓ Soluciones para $y_k = 1$, es decir, nodos con paralelaje de cargas en el polo positivo: [10]
- ✓ Soluciones para $y_k = -1$, es decir, nodos con paralelaje de cargas en el polo negativo: [5, 9, 13]

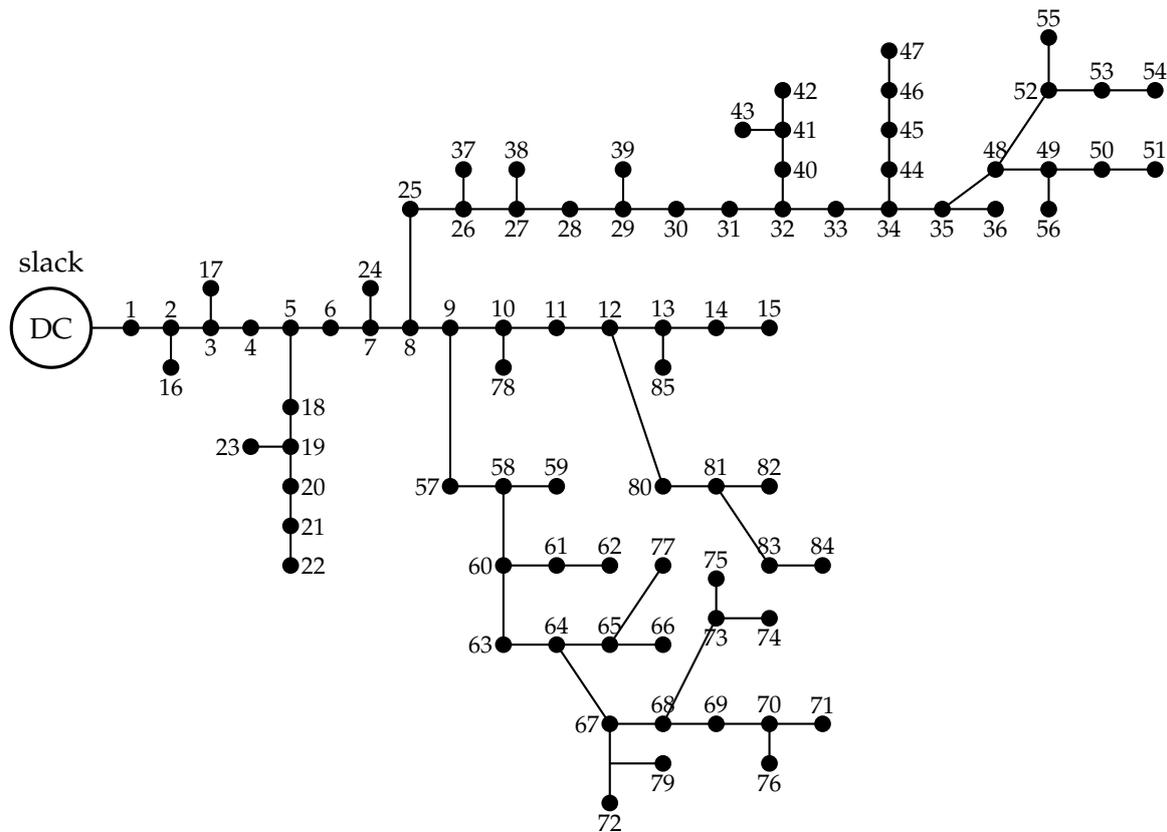


Figura 4: Representación topológica de la red bipolar de CC de 85 nodos.

Por otro lado, en la Figura 5 se ilustra el comportamiento de los perfiles de tensión en todos los nodos del sistema de 21 nodos, abordando cada uno de los polos. Se analiza tanto el caso de referencia como la solución obtenida mediante el optimizador metaheurístico.

Los resultados de los perfiles de tensión en la Figura 5 permiten observar que el principal efecto del balance de polos es la reducción de la corriente circulante por el neutro, con lo cual las tensiones en este polo presentan mejoras significativas respecto del caso base, como se puede observar en la Figura 5(c). Además, la comparación de los perfiles de tensión en el polo positivo y negativo (ver Figuras 5(a) y 5(b)) muestra que el polo positivo quien tenía un mayor consumo monopolar en principio evidencia una mejora en los perfiles de tensión; sin embargo, esta mejora implica que parte de las cargas han pasado al polo negativo, con lo cual este recibirá un impacto negativo en las tensiones respecto del caso de referencia; sin embargo, en su conjunto el intercambio eficiente de polos ha mejorado el desempeño de la red, ya que se han logrado pérdidas menores y se ha mejorado el perfil de tensiones en el polo de neutro.

5.2. Sistema de 85 Nodos

La solución al problema de intercambio de polos para el sistema de 85 nodos aplicando el VSA, se presenta en la Tabla 4.

En la Tabla 4, se destaca que tras ejecutar el algoritmo VSA, se obtuvo un valor de pérdida de 439.8161 kW. En comparación, la configuración inicial registraba pérdidas de 489.5759 kW, lo que refleja una significativa disminución del 10.1639% en las pérdidas de potencia. Las configuraciones implementadas para cada nodo modificado fueron las siguientes:

- ✓ Soluciones para $x_k^p = 1$, es decir, nodos sin movimiento de cargas:

$$\left[1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 32, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 45, 49, 50, 52, 56, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 75, 83 \right]$$

- ✓ Soluciones para $x_k^n = 1$, es decir, rotación de cargas entre polo positivo y negativo:

$$\left[4, 5, 9, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 31, 33, 38, 42, 43, 44, 46, 47, 51, 53, 54, 57, 62, 72, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 84, 85 \right]$$

- ✓ Soluciones para $y_k = 1$, es decir, nodos con paralelaje de cargas en el polo positivo: $[12, 29, 39, 48, 70]$

- ✓ Soluciones para $y_k = 1$, es decir, nodos con paralelaje de cargas en el polo negativo: $[55, 73, 81]$

Por otro lado, la Figura 6 se ilustra el comportamiento de los perfiles de tensión en todos los nodos del sistema de 85

Tabla 2: Datos de resistencia y consumo para el sistema de 85 nodos

Nodo j	Nodo k	R_{jk} (Ω)	$P_{d,k}^p$ (kW)	$P_{d,k}^n$ (kW)	$P_{d,k}^{p-n}$ (kW)	Nodo j	Nodo k	R_{jk} (Ω)	$P_{d,k}^p$ (kW)	$P_{d,k}^n$ (kW)	$P_{d,k}^{p-n}$ (kW)
1	2	0.108	0	0	10.075	34	44	1.002	17.64	17.995	0
2	3	0.163	50	0	40.35	44	45	0.911	50	17.64	17.995
3	4	0.217	28	28.565	0	45	46	0.911	25	17.64	17.995
4	5	0.108	100	50	0	46	47	0.546	7	7.14	10
5	6	0.435	17.64	17.995	25.18	35	48	0.637	0	10	0
6	7	0.272	0	8.625	0	48	49	0.182	0	0	25
7	8	1.197	17.64	17.995	30.29	49	50	0.364	18.14	0	18.505
8	9	0.108	17.8	350	40.46	50	51	0.455	28	28.565	0
9	10	0.598	0	100	0	48	52	1.366	30	0	15
10	11	0.544	28	28.565	0	52	53	0.455	17.64	35	17.995
11	12	0.544	0	40	45	53	54	0.546	28	30	28.565
12	13	0.598	45	40	22.5	52	55	0.546	38	0	48.565
13	14	0.272	17.64	17.995	35.13	49	56	0.546	7	40	32.14
14	15	0.326	17.64	17.995	20.175	9	57	0.273	48	35.065	10
2	16	0.728	17.64	67.5	33.49	57	58	0.819	0	50	0
3	17	0.455	56.1	57.15	50.25	58	59	0.182	18	28.565	25
5	18	0.820	28	28.565	200	58	60	0.546	28	43.565	0
18	19	0.637	28	28.565	10	60	61	0.728	18	28.565	30
19	20	0.455	17.64	17.995	150	61	62	1.002	12.5	29.065	0
20	21	0.819	17.64	70	152.5	60	63	0.182	7	7.14	5
21	22	1.548	17.64	17.995	30	63	64	0.728	0	0	50
19	23	0.182	28	75	28.565	64	65	0.182	12.5	25	37.5
7	24	0.910	0	17.64	17.995	65	66	0.182	40	48.565	33
8	25	0.455	17.64	17.995	50	64	67	0.455	0	0	0
25	26	0.364	0	28	28.565	67	68	0.910	0	0	0
26	27	0.546	110	75	175	68	69	1.092	13	18.565	25
27	28	0.273	28	125	28.565	69	70	0.455	0	20	0
28	29	0.546	0	50	75	70	71	0.546	17.64	38.275	17.995
29	30	0.546	17.64	0	17.995	67	72	0.182	28	13.565	0
30	31	0.273	17.64	17.995	0	68	73	1.184	30	0	0
31	32	0.182	0	175	0	73	74	0.273	28	50	28.565
32	33	0.182	7	7.14	12.5	73	75	1.002	17.64	6.23	17.995
33	34	0.819	0	0	0	70	76	0.546	38	48.565	0
34	35	0.637	0	0	50	65	77	0.091	7	17.14	25
35	36	0.182	17.64	0	17.995	10	78	0.637	28	6	28.565
26	37	0.364	28	30	28.565	67	79	0.546	17.64	42.995	0
27	38	1.002	28	28.565	25	12	80	0.728	28	28.565	30
29	39	0.546	0	28	28.565	80	81	0.364	45	0	75
32	40	0.455	17.64	0	17.995	81	82	0.091	28	53.75	0
40	41	1.002	10	0	0	81	83	1.092	12.64	32.995	62.5
41	42	0.273	17.64	25	17.995	83	84	1.002	62	72.2	0
41	43	0.455	17.64	17.995	0	13	85	0.819	10	10	10

Tabla 3: Resultados del sistema de 21 nodos aplicando el VSA.

Método	Nodos con Modificación	No. de Modificaciones	p_{loss} (kW)	Reducción (%)	Tiempo (s)
Caso de Referencia	—	0	95.4237	—	—
VSA	[5, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 21]	8	91.6628	3.9413	10.2018

Tabla 4: Resultados del sistema de 85 nodos para el algoritmo metaheurístico propuesto.

Método	Nodos con Modificación	Numero de Modificaciones	p_{loss} (kW)	Reducción (%)	Tiempo (s)
Caso de Referencia	—	0	489.5759	—	—
VSA	[4, 5, 9, 12, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 29, 31, 33, 38, 39, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 53, 54, 55, 57, 62, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85]	40	439.8161	10.1639	112.503

nodos, abordando cada uno de los polos. Se analiza tanto el caso de referencia como la solución obtenida mediante el optimizador metaheurístico.

El sistema de intercambio de polos, con la asistencia del algoritmo VSA, opera con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia al modificar el sistema. En este contexto específico,

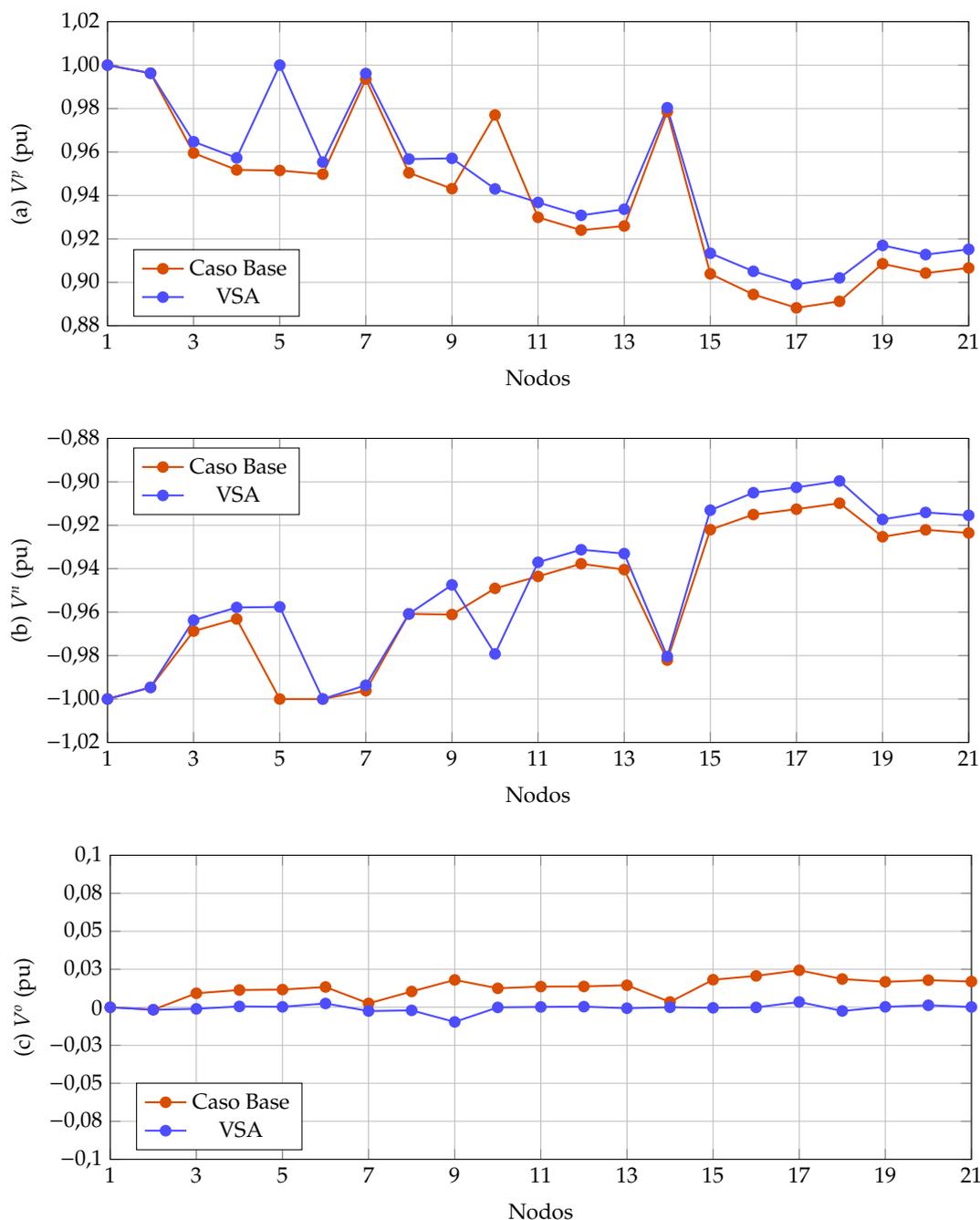


Figura 5: Comportamientos de tensión para el sistema de 21 nodos con el optimizador metaheurístico VSA: (a) Valores de tensión en el polo positivo, (b) Valores de tensión en el polo negativo, y (c) Valores de tensión en el polo neutro.

se efectuó un intercambio de las cargas, con la finalidad de compensar las tensiones entre los polos. Esta modificación se ilustra en la Figura 6. En la situación de referencia, la tensión del polo neutro denota un sistema desequilibrado, evidenciando variaciones en su tensión en el polo neutro. Sin embargo, tras la implementación del intercambio de cargas, se logra el equilibrio entre los polos positivos y negativos, lo que resulta en una tensión del polo neutro aproximada a 0 V en todos los nodos.

5.3. Comparación de resultados

En esta sección se realiza la comparación de los resultados con la metodología de optimización del tipo maestro esclavo propuesta en este artículo, la cual combina el VSA en la etapa maestra y el algoritmo de flujo de potencia triangular en la etapa esclava, con un reporte reciente de la literatura científica propuesta en [14]. En esta contribución se presentaron los siguientes algoritmos de optimización metaheurística para resolver el problema de intercambio eficiente de polos: (i) al-

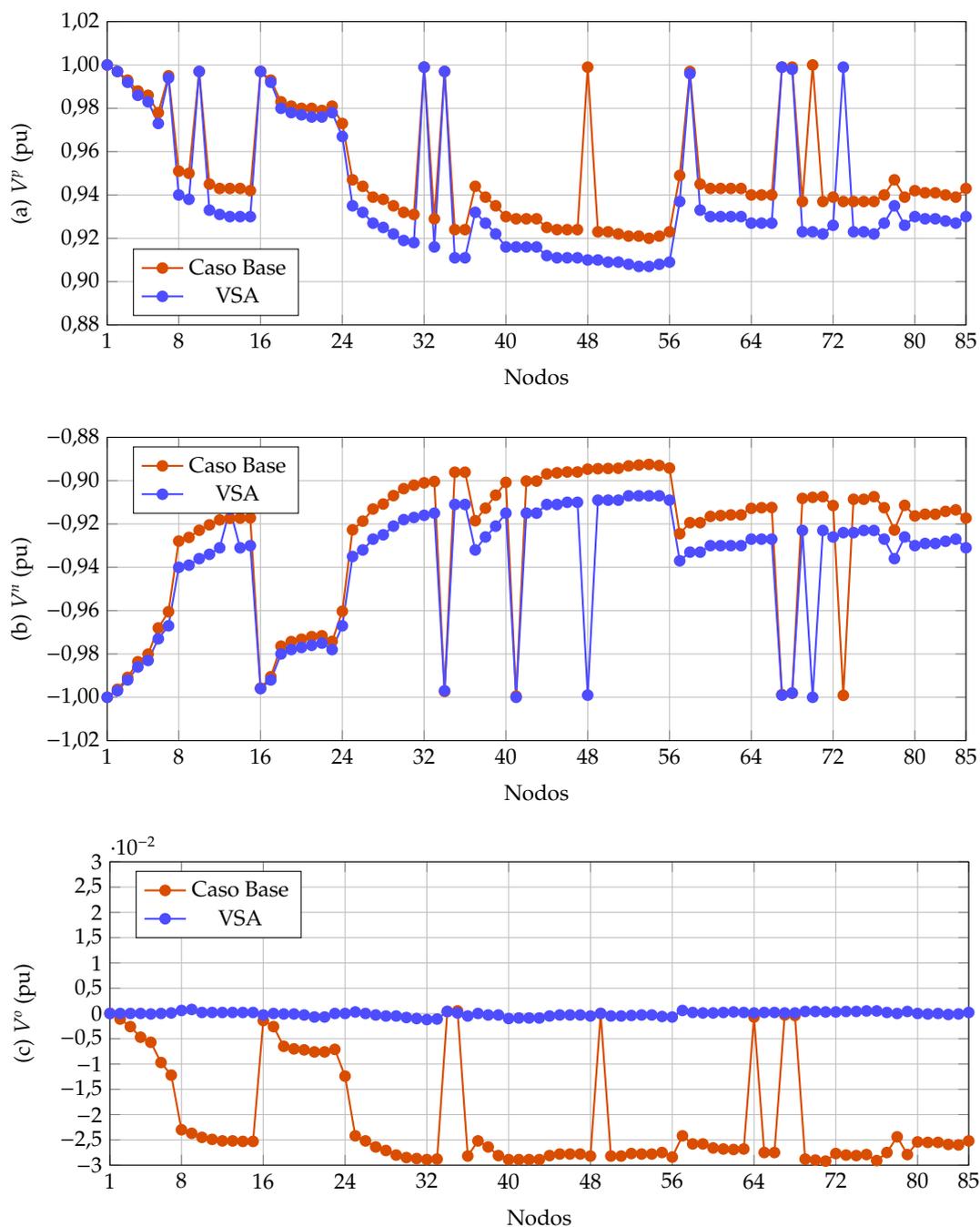


Figura 6: Comportamientos de tensión para el sistema de 85 nodos con el optimizador metaheurístico VSA: (a) Valores de tensión en el polo positivo, (b) Valores de tensión en el polo negativo, y (c) Valores de tensión en el polo neutro.

goritmo genético de Chu & Beasley (CBGA, por sus siglas en inglés), el algoritmo de senos y cosenos (SCA, por sus siglas en inglés) y el algoritmo de optimización agujeros negros (BHO, por sus siglas en inglés). Para garantizar una comparación efectiva, los algoritmos se aplican exclusivamente a las configuraciones 0 y 1, es decir, mantener la configuración original o realizar intercambio de cargas ente polos.

Debido a que los autores de [14] únicamente reportaron resultados considerando las variables binarias x_k^p y x_k^n , es

decir, las configuraciones 0 ó 1, la metodología propuesta en esta monografía se ha adaptado a este escenario de prueba. En las Tablas 5 y 6 se presentan las comparaciones para ambos sistemas de prueba. De los resultados presentados en las Tablas 5 y 6 se observa que:

- i. En el sistema de 21 nodos, es evidente que el VSA presenta un valor menor de pérdidas en comparación con el SCA. Sin embargo, se observa que el SCA realiza menos modificaciones y logra menores tiempos

Tabla 5: Comparación de resultados para el sistema de 21 nodos.

Método	Nodos con Modificación	Numero de Modificaciones	p_{loss} (kW)	Reducción (%)	Tiempo (s)
Caso de Referencia	—	0	95.4237	—	—
SCA	[4, 6, 11, 16, 21]	5	91.6630	3.9411	8.8340
BHO	[3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 21]	10	91.6628	3.9413	16.2323
CBGA	[5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 21]	10	91.6628	3.9413	2.2620
VSA	[5, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 21]	8	91.6628	3.9413	10.2018

Tabla 6: Comparación de resultados para el sistema de 85 nodos.

Método	Nodos con Modificación	Numero de Modificaciones	p_{loss} (kW)	Reducción (%)	Tiempo (s)
Caso de Referencia	—	0	489.5759	—	—
SCA	[6, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 22, 23, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 44, 45, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 68, 71, 81, 83]	33	440.0133	10.1236	68.4910
BHO	[3, 6, 7, 9, 11, 14, 16, 17, 19, 22, 23, 24, 29, 31, 34, 37, 39, 43, 44, 49, 55, 56, 57, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 82, 84]	42	440.1445	10.0968	133.2345
CBGA	[2, 4, 5, 9, 12, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 29, 31, 33, 34, 35, 38, 39, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 53, 54, 55, 57, 62, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85]	43	439.8161	10.1639	15.5741
VSA	[4, 5, 9, 12, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 29, 31, 33, 38, 39, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 53, 54, 55, 57, 62, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85]	40	439.8161	10.1639	112.503

de ejecución. En contraste con el BHO, el VSA logra igualar el valor de pérdidas y, además, reduce a ocho la cantidad de nodos modificados, lo que a su vez conlleva a una disminución en el tiempo de ejecución del programa. Por su parte, el CBGA, el VSA iguala las pérdidas obtenidas por el CBGA y además reduce la cantidad de modificaciones del sistema a ocho. Sin embargo, es importante notar que el tiempo de ejecución del programa es menor en el CBGA en comparación con el VSA. Lo cual es de esperar para un CBGA, ya que realiza un número considerablemente menor de evaluaciones de flujo de potencia en comparación con el VSA.

- ii. En el caso del sistema de 85 nodos, el SCA logra reducir las modificaciones a solo 33 en un tiempo de ejecución de 68.5 segundos, por otro lado, en el VSA se reducen a 40 las modificaciones, con un tiempo de ejecución de 112.5 segundos. No obstante, el VSA logra pérdidas menores en comparación con el SCA. Comparado con el BHO, el VSA muestra una disminución tanto en el número de modificaciones realizadas como en el tiempo de ejecución, además de lograr una reducción en el valor de las pérdidas. Adicionalmente, el VSA disminuye las modificaciones requeridas en los nodos y consigue igualar el valor de pérdidas del CBGA. No obstante, presenta un tiempo de ejecución mayor en comparación con el tiempo de ejecución en el CBGA.

6. Conclusiones

En este artículo, se abordó el desafío del intercambio eficiente de polos en redes de distribución de CC bipolares con cargas asimétricas mediante la aplicación de una metodología de solución con una estructura maestro-esclavo. En la etapa maestra, se empleó el algoritmo metaheurístico de búsqueda de vórtices, que demostró ser una herramienta efectiva para determinar las conexiones más aptas para las cargas en cada nodo, mientras que la etapa esclava se encargó de evaluar las pérdidas totales de potencia de la red utilizando una formulación de flujo de potencia de base triangular especializada para redes de CC bipolares radiales.

Los resultados numéricos en la red de 21 nodos mostraron que el método de optimización permitió reducciones de alrededor del 3.94 % con respecto al caso de referencia, mientras que, para la red de 85 buses, estas reducciones se sitúan en un 10.16 %. Estos resultados se obtuvieron con la combinación e implementación de las cuatro posibles configuraciones planteadas en este trabajo.

En cuanto a la comparación con otras técnicas de optimización metaheurística (i.e., CBGA, BHO o SCA) reportados en la literatura especializada, la utilización de las configuraciones que realiza la modificación en paralelo de las cargas no muestra mayores reducciones en las pérdidas de los ya obtenidos con la configuración binaria que modifica las cargas en los polos positivo y negativo de la red en los sistemas evaluados. Sin embargo, la utilización del VSA muestra un número menor de nodos que sufren modificaciones para obtener

estos resultados de pérdidas, lo que significa una reducción en el número de acciones necesarias por el operador de red para poner en funcionamiento el plan obtenido en comparación con reportes previos de la literatura especializada, implicando una menor inversión en equipos de trabajo.

Como posibles trabajos de investigación, se pueden realizar las siguientes contribuciones a futuro: (i) plantear un modelo de optimización para la reducción de pérdidas en sistemas de distribución de CC bipolares que considere la asignación óptima de los nodos de puesta a tierra, con el fin de seleccionar el subconjunto de nodos más adecuado para realizar la implementación de sistemas de puesta a tierra y (ii) extender la metodología de optimización propuesta hacia la integración de recursos energéticos distribuidos en redes de CC bipolares teniendo en cuenta comportamientos típicos esperados para la generación renovable y las proyecciones de demanda.

Referencias

- [1] H. Saboori, R. Hemmati, and M. A. Jirdehi, "Reliability improvement in radial electrical distribution network by optimal planning of energy storage systems," *Energy*, vol. 93, pp. 2299–2312, 2015.
- [2] R. Pegado, Z. Ñaupari, Y. Molina, and C. Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective bpsol," *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 206–213, 2019.
- [3] S. Rivera, R. L. F., S. Kouro, T. Dragicevic, and B. Wu, "Bipolar dc power conversion: State-of-the-art and emerging technologies," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, pp. 1192–1204, 2021.
- [4] J. O. Lee, Y. S. Kim, and J. H. Jeon, "Optimal power flow for bipolar dc microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 142, 2022.
- [5] O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, and W. Gil-González, "A mixed-integer convex approximation for optimal load redistribution in bipolar dc networks with multiple constant power terminals," *Results in Engineering*, vol. 16, 2022.
- [6] Ángeles Medina-Quesada, O. D. Montoya, and J. C. Hernández, "Derivative-free power flow solution for bipolar dc networks with multiple constant power terminals," *Sensors*, vol. 22, 2022.
- [7] S. Shuhuai, Z. Yanlin, Z. Zhuan, C. Sheng, Z. Nan, Z. Fang, W. Feng, and Z. Tianhua, "a novel topology and operation mechanism of unipolar-to-bipolar dc transformer," *IEEE*, 2019.
- [8] J. Liao, N. Zhou, Q. Wang, and Y. Chi, "Load-switching strategy for voltage balancing of bipolar dc distribution networks based on optimal automatic commutation algorithm," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, pp. 2966–2979, 2021.
- [9] B. S. H. Chew, Y. Xu, and Q. Wu, "Voltage balancing for bipolar dc distribution grids: A power flow based binary integer multi-objective optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, pp. 28–39, 2019.
- [10] J. Kim, J. Cho, H. Kim, Y. Cho, J. Kim, J. Cho, H. Kim, Y. Cho, and H. Lee, "Power flow calculation method of dc distribution network for actual power system," *KEPCO Journal on Electric Power and Energy p*, vol. 6, pp. 419–425, 2020.
- [11] L. Jianquan, Q. Zian, P. Pavel, Z. Niancheng, W. Qiang-gang, and B. Pavol, "Unbalanced voltage/power control in bipolar dc distribution using power flow controller," *IEEE*, 2020.
- [12] C. Guo, Y. Wang, and J. Liao, "Coordinated control of voltage balancers for the regulation of unbalanced voltage in a multi-node bipolar dc distribution network," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, 2022.
- [13] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, and W. Gil-Gonzalez, "Optimal pole-swapping in bipolar dc networks with multiple cpls using an miqp model," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023.
- [14] O. D. Montoya, Ángeles Medina-Quesada, and J. C. Hernández, "Optimal pole-swapping in bipolar dc networks using discrete metaheuristic optimizers," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, 2022.
- [15] J. O. Lee, Y. S. Kim, and J. H. Jeon, "Generic power flow algorithm for bipolar dc microgrids based on newton–raphson method," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 142, 2022.
- [16] O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, and J. C. Hernández, "A Comparative Study on Power Flow Methods Applied to AC Distribution Networks with Single-Phase Representation," *Electronics*, vol. 10, no. 21, p. 2573, 2021.
- [17] A. Garces, O. D. Montoya, and W. Gil-Gonzalez, "Power Flow in Bipolar DC Distribution Networks Considering Current Limits," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 5, pp. 4098–4101, 2022.
- [18] S. Sepúlveda-García, O. D. Montoya, and A. Garcés, "Power Flow Solution in Bipolar DC Networks Considering a Neutral Wire and Unbalanced Loads: A Hyperbolic Approximation," *Algorithms*, vol. 15, no. 10, p. 341, 2022.
- [19] Á. Medina-Quesada, O. D. Montoya, and J. C. Hernández, "Derivative-Free Power Flow Solution for Bipolar DC Networks with Multiple Constant Power Terminals," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2914, 2022.
- [20] P. D. O.-D. Jesus, M. Alvarez, and J. Yusta, "Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix," *Electric Power Systems Research*, vol. 95, pp. 148–159, 2013.
- [21] L. F. Grisales-Noreña, O. D. Garzón-Rivera, J. A. Ocampo-Toro, C. A. Ramos-Paja, and M. A. Rodriguez-

- Cabal, "Metaheuristic Optimization Methods for Optimal Power Flow Analysis in DC Distribution Networks," *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 13–31, 2020.
- [22] B. Dolan and T. Ölmez, "A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex search algorithm," *Information Sciences*, vol. 293, pp. 125–145, 2015.
- [23] B. Cortés-Caicedo, F. Molina-Martin, L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, and J. C. Hernández, "Optimal Design of PV Systems in Electrical Distribution Networks by Minimizing the Annual Equivalent Operative Costs through the Discrete-Continuous Vortex Search Algorithm," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 851, 2022.
- [24] M. A. Ramli and H. R. Boucekara, "Estimation of solar radiation on PV panel surface with optimum tilt angle using vortex search algorithm," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 10, pp. 1138–1145, 2018.
- [25] M. Coban and S. S. Tezcan, "Feed-forward neural networks training with hybrid taguchi vortex search algorithm for transmission line fault classification," *Mathematics*, vol. 10, no. 18, p. 3263, 2022.
- [26] B. Cortés-Caicedo, L. S. Avellaneda-Gómez, O. D. Montoya, L. Alvarado-Barrios, and H. R. Chamorro, "Application of the vortex search algorithm to the phase-balancing problem in distribution systems," *Energies*, vol. 14, 2021.
- [27] A. Fathy, M. A. Elaziz, and A. G. Alharbi, "A novel approach based on hybrid vortex search algorithm and differential evolution for identifying the optimal parameters of PEM fuel cell," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1833–1845, 2020.
- [28] O. D. M. Giraldo, K. J. Bohórquez-Bautista, D. A. Moreno-Arias, and W. Gil-González, "Comparative methods for solving optimal power flow in distribution networks considering distributed generators: Metaheuristics vs. convex optimization," *Tecnura*, vol. 26, pp. 87–129, 2022.
- [29] O. D. Montoya, W. Gil-González, and C. Orozco-Henao, "Vortex search and chu-beasley genetic algorithms for optimal location and sizing of distributed generators in distribution networks: A novel hybrid approach," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, pp. 1351–1363, 2020.
- [30] O. D. Montoya, W. Gil-Gonzalez, and L. F. Grisales-Noreña, "Vortex search algorithm for optimal power flow analysis in dc resistive networks with cpls," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, pp. 1439–1443, 2020.
- [31] F. S. Gharehchopogh, I. Maleki, and Z. A. Dizaji, "Chaotic vortex search algorithm: metaheuristic algorithm for feature selection," *Evolutionary Intelligence*, vol. 15, pp. 1777–1808, 2022.
- [32] A. Garces, "On the convergence of newton's method in power flow studies for dc microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 5770–5777, 2018.