Selección Óptima de Conductores en Sistemas de Distribución utilizando la Versión Discreta del Algoritmo de Senos y Cosenos.

Optimal Selection of Conductors in Distribution Networks using the Discrete Version of the Sine-Cosine Algorithm

W. Contreras-Sepúlveda; L. M. Riaño-Enciso; O. D Montoya-Giraldo

***Abstract*— The problem of the optimal selection of the calibers of conductors in radial distribution networks is addressed in this research through the application of the discrete-continuous version of the sine-cosine algorithm. The implementation of proposed optimization algorithm is made in the MATLAB programming environment for two test feeders composed of 8 and 27 nodes, respectively. The numerical results for both test feeders are validated in the DigSILENT simulation tool than ensures the feasibility of the optimal solutions obtained through the evaluation of the classical Newton-Raphson power flow method. Comparative results with the Chu & Beasley Genetic Algorithm and the solution on the exact Mixed-Integer Nonlinear Programming Model in the GAMS software corroborate the effectiveness of the proposed optimization method.**

***Index Terms*— Sine-Cosine Algorithm, Optimal conductor selection, Metaheuristic optimization, Mixed integer nonlinear programming.**

***Resumen*— El problema de selección óptima de calibres de conductores para sistemas de distribución de energía eléctrica se abordó en este artículo mediante la aplicación de la versión discreta del algoritmo de senos y cosenos (ASC). La implementación de la metodología se solución propuesta se realiza en el software y e MATLAB para dos alimentadores de prueba compuestos de 8 y 27 nodos con topología radial. Para validar los resultados se emplea el software DigSILENT para obtener los perfiles de tensión y el costo de las pérdidas de energía mediante la aplicación del método de Newton-Raphson para flujo de potencia. Para comparar la eficiencia y robustez de la metodología propuesta se emplean el algoritmo genético de Chu & Beasley y la solución del modelo exacto de programación no lineal en el software GAMS.**

Este manuscrito fue enviado el día diciembre 17, 2021 y aceptado en diciembre 30, 2021

L. M. Riaño-Enciso estudiante de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. (e-mail: lmrianoe@correo.udistrital.edu.co).

W. Contreras-Sepúlveda estudiante de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. (e-mail: wcontrerass@correo.udistrital.edu.co).

O. D. Montoya-Giraldo docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. (e-mail: odmontoyag@correo.udistrital.edu.co).

***Palabras claves*— Algoritmo de Senos y Cosenos, Optimización metaheurística, Programación no lineal entera mixta, Selección óptima de conductores.**

I. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia se encuentran en continua evolución y expansión debido a que la demanda crece continuamente a los largo del tiempo [1]. Este crecimiento está impulsado por diversos factores como: el crecimiento de las ciudades y la expansión de las capacidades productivas del sector industrial e inclusive la expansión del sistema buscando conectar a más usuarios en zonas no interconectadas o zonas rurales [2]. Esto produce grandes bloques de carga que se deben atender, con el objetivo de maximizar atributos como: economía, confiabilidad, seguridad y calidad de servicio, según las políticas regulatorias de cada país [3][4].

Debido al crecimiento de la demanda, los sistemas de distribución requieren una mayor robustez y eficiencia en la atención de las necesidades energéticas del usuario final [5]. Por lo anterior, las empresas distribuidoras se ven en la necesidad de buscar metodologías eficientes para expandir de manera apropiada sus sistemas eléctricos, incrementando la calidad y confiabilidad en el servicio, al tiempo que se minimizan los costos de inversión, operación y mantenimiento de estas redes [6].

El problema de selección óptima de conductores en redes de distribución corresponde a un subproblema clásico de la expansión eficiente de redes distribución de característica no lineal y no convexo de difícil solución que ha sido ampliamente estudiando en la literatura especializada [3]. En este problema se explora la selección del subconjunto de calibres de conductores que permiten atender la demanda de energía proyectada al minino costo, cumpliendo con capacidades de conducción de corriente, y regulación de tensión, entre otros aspectos técnicos [7].

La selección óptima de conductores en alimentadores de distribución es quizá, una de las etapas más importantes de la planeación óptima de redes eléctricas, puesto que esta define

para una ruta de construcción seleccionada, el calibre de los conductores que atenderán a los consumidores actuales y futuros por las próximas dos décadas [8]. Esto implica, que la solución obtenida en esta etapa influenciará directamente los costos de operación del sistema asociados a las pérdidas de energía eléctrica en forma de calor [9].

El problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución de energía eléctrica ha sido ampliamente abordado en la literatura especializada. Los autores de [4] propusieron la comparación entre el algoritmo genético clásico y su versión mejorada conocida como algoritmo genético de Chu & Beasley. Los resultados numéricos demuestran las ventajas de la versión mejorada del algoritmo para dos sistemas de prueba compuestos de 8 y 54 nodos, respectivamente. Los autores de [8] proponen la aplicación de la versión del algoritmo de vórtices en su versión discreta para la selección óptima de conductores en sistemas trifásicos desbalanceados. Los resultados numéricos en sistemas de 8 y 27 nodos demuestran la efectividad de la metodología propuesta, cuando se compara con métodos exactos disponibles en GAMS. Montoya et al. en [2] y [10] propusieron la aplicación del algoritmo de optimización conocido como búsqueda tabú al problema de selección óptima de conductores en sistemas trifásicos con estructura radial. Los resultados números demostraron su superioridad cuando se comparó con el algoritmo genético de Chu & Beasley. Los autores de [1] propusieron un modelo matemático exacto para la solución del problema de selección óptima de conductores usando el software AMPL, los resultados demuestran la eficiencia del modelo propuesto, sin embargo, no se proveen comparaciones con otros métodos de optimización. Otras de las metodologías comunes para la selección óptima de conductores en sistemas de distribución son: recocido simulado [11], optimización por enjambre de partículas [12], y algoritmo de optimización de murciélagos [13], entre otros.

A diferencia de las metodologías anteriores, en este trabajo se propone la aplicación de una versión discreta del algoritmo de senos y cosenos (ASC) originalmente propuesta en [5]. En la versión discreta que se propone en este trabajo se propone una etapa de evolución mejorada para el algoritmo de senos y cosenos que permite una mejor exploración y explotación del espacio de soluciones. La eficiencia de la metodología propuesta se compara con el algoritmo genético de Chu & Beasley (AGCB), así como con la solución del modelo exacto en GAMS.

El resto de este documento se organiza como sigue: la Sección II presenta la formulación matemática del problema de selección óptima de conductores en redes de distribución con topología radial; la Sección III presenta la metodología de solución propuesta basada en la discretización del algoritmo de senos y cosenos; la Sección IV presenta los resultados de simulación en dos sistemas de prueba compuestos de 8 y 27 nodos con topología radial, así como su comparación con reportes de la literatura especializada. La Sección V presenta un análisis comparativo de los perfiles de tensión para los sistemas de prueba; mientras que la Sesión VI describe las principales conclusiones obtenidas de esta investigación.

II. Formulación Matemática

En el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución tiene como objetivo seleccionar el tamaño y tipo de conductor de un conjunto de conductores disponibles de manera que el costo total se minimice mientras se satisfacen las restricciones propuestas sobre los límites de voltaje de los nodos y las ampacidades máximas de los conductores [2]. Para describir matemáticamente este problema se emplea un modelo de programación no lineal entero mixto no convexo mono-objetivo como el presentado en [3].

En esta formulación matemática, la función objetivo presentada en (1) corresponde a una función de costos de inversión tales como la construcción de los circuitos y costos de operación evaluados para el período de estudio correspondiente a un año [4]. La primera componente de esta función representa las pérdidas técnicas producidas por el calentamiento de los conductores, mientras que la segunda componente corresponde al costo de inversión asociado a los calibres de los conductores.

Función objetivo:

$$\min z = 3\left(\begin{array}{c} C_{Wh}\cdot\sum_{ij\epsilon\Omega_L}\sum_{c\epsilon\Omega_C}\sum_{h\epsilon\Omega_H} L_{ij}\cdot\delta_{ij}^{c}\cdot DCC_h\cdot r_{ij}^{c}\cdot\left(I_{ij\cdot h}^{c}\right)^2 \\ +\sum_{ij\epsilon\Omega_L}\sum_{c\epsilon\Omega_C} L_{ij}\cdot\delta_{ij}^{c}\cdot CIC^{c} \end{array}\right) \quad (1)$$

Por otro lado, para la correcta operación del sistema de distribución, son consideradas las restricciones de balance de potencia activa y reactiva, así como se muestra en (2) y (3), teniendo en cuenta que la función objetivo representa las pérdidas de potencia del sistema de distribución y las componentes $P_{ij,h}$ y $Q_{ij,h}$ representan el flujo de potencia activa y reactiva que sale del nodo *i* hasta el nodo *j* respectivamente. De igual forma, la regulación de tensión en los nodos y la capacidad térmica de los tramos de red se determina según (4) y (5), respectivamente.

Es importante mencionar que la nomenclatura empleada para este modelo matemático puede ser consultada en [3].

Conjunto de restricciones:

$$P_{i,h}^{G} - P_{i,h}^{D} = \sum_{j\epsilon\Omega_L}\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{ij}^{c}\cdot P_{ij,h}^{c}\{\forall i\epsilon\Omega_N,\forall h\epsilon\Omega_H\} \quad (2)$$

$$Q_{i,h}^{G} - Q_{i,h}^{D} = \sum_{j\epsilon\Omega_L}\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{ij}^{c}\cdot Q_{ij,h}^{c}\{\forall i\epsilon\Omega_N,\forall h\epsilon\Omega_H\} \quad (3)$$

$$V_i^{min} \le V_{i,h} \le V_i^{max}\{\forall i\epsilon\Omega_N,\forall h\epsilon\Omega_H\} \quad (4)$$

$$\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{ij}^{c}\cdot\left(\left(I_{ij,h}^{r,c}\right)^2+\left(I_{ij,h}^{i,c}\right)^2\right) \le \sum_{c\epsilon\Omega_c}\left(I_{ij}^{c,max}\right)^2\delta_{ij}^{c},\ \ \{\forall ij\epsilon\Omega_L,\forall h\epsilon\Omega_H\} \quad (5)$$

Para garantizar que la red resultante sea de naturaleza telescópica se propone la expresión (6) la que determina el

conjunto necesario de ecuaciones asociadas al número de tramos de red *kl* que se encuentra inmediatamente aguas arriba del tramo de red *ij* [2]. Además, la restricción (7) implica que en cada tramo de red *ij* debe existir un conductor con calibre tipo *c*. Por último, (8) define la naturaleza binaria de las variables de decisión [3].

$$\sum_{kl\epsilon\Omega_L}\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{kl}^{c}\cdot a^{c}\cdot T_{ij,kl} \geq \left(\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{ij}^{c}\cdot a^{c}\right)\left(\sum_{kl\epsilon\Omega_l}T_{ij,kl}\right)\{\forall ij\epsilon\Omega_L\} \quad (6)$$

$$\sum_{c\epsilon\Omega_c}\delta_{ij}^{c}=1\{\forall ij\epsilon\Omega_L\} \quad (7)$$

$$\delta_{ij}^{c}\epsilon\{0,1\}\{\forall ij\epsilon\Omega_L\} \quad (8)$$

En el conjunto de ecuaciones (9) – (13) se presenta la forma de calcular los flujos de potencia activa y reactiva, además de las componentes real e imaginaria de la corriente, respectivamente, como una función de la variable de decisión y las variables de estado del sistema de distribución, es decir, las magnitudes y los ángulos de los voltajes en cada nodo [3].

$$P_{ij,h}^{c}=V_{i,h}^{2}\cdot g_{ij}^{c}-V_{i,h}\cdot V_{j,h}\cdot\begin{pmatrix}g_{ij}^{c}\cdot\cos\left(\theta_{ij,h}\right)+\\ b_{ij}^{c}\cdot\text{sen}\left(\theta_{ij,h}\right)\end{pmatrix} \quad (9)$$

$$Q_{ij,h}^{c}=-V_{i,h}^{2}\cdot b_{ij}^{c}-V_{i,h}\cdot\begin{pmatrix}g_{ij}^{c}\cdot\cos\left(\theta_{ij,h}\right)-\\ b_{ij}^{c}\cdot\text{sen}\left(\theta_{ij,h}\right)\end{pmatrix} \quad (10)$$

$$I_{ij,h}^{r,c}=\begin{Bmatrix}g_{ij}^{c}\cdot\left(V_{i,h}\cdot\cos\left(\theta_{i,h}\right)-V_{j,h}\cdot\cos\left(\theta_{j,h}\right)\right)-\\ b_{ij}^{c}\cdot\left(V_{i,h}\cdot\text{sen}\left(\theta_{i,h}\right)-V_{j,h}\cdot sen\left(\theta_{j,h}\right)\right)\end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$I_{ij,h}^{i,c}=\begin{Bmatrix}g_{ij}^{c}\cdot\left(V_{i,h}\cdot\text{sen}\left(\theta_{j,h}\right)V_{j,h}\cdot\text{sen}\left(\theta_{j,h}\right)\right)+\\ b_{ij}^{c}\cdot\left(V_{i,h}\cdot\cos\left(\theta_{i,h}\right)V_{j,h}\cdot cos\left(\theta_{j,h}\right)\right)\end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$g_{ij}^{c}=\frac{1}{L_{ij}}\cdot\frac{r_{ij}^{c}}{\left(r_{ij}^{c}\right)^{2}+\left(x_{ij}^{c}\right)^{2}} \quad (13)$$

$$b_{ij}^{c}=-\frac{1}{L_{ij}}\cdot\frac{x_{ij}^{c}}{\left(r_{ij}^{c}\right)^{2}+\left(x_{ij}^{c}\right)^{2}}$$

III. ALGORITMO SENOS Y COSENOS

El SCA es un algoritmo de optimización metaheurística, basado en la población desarrollado por Mirjalili en [14], el cual se basa en proponer múltiples soluciones candidatas aleatorias iniciales para abordar problemas de optimización continua y luego hacer que fluctúen alrededor de la mejor solución utilizando reglas de evolución constituidas por funciones seno y coseno [15].

En la Figura 1 se muestra la trayectoria de la población del algoritmo SCA y sus fluctuaciones alrededor de la posición de destino [14]. Se observa que cuando el rango de una función seno-coseno está en el intervalo de [-1,1] entonces, la función de aptitud se mueve hacia la posición de destino y el algoritmo explota el espacio de búsqueda. Sin embargo, fuera del intervalo [-1,1], la función de aptitud desvía la posición de destino; por tanto, el algoritmo explora el espacio de búsqueda [14].

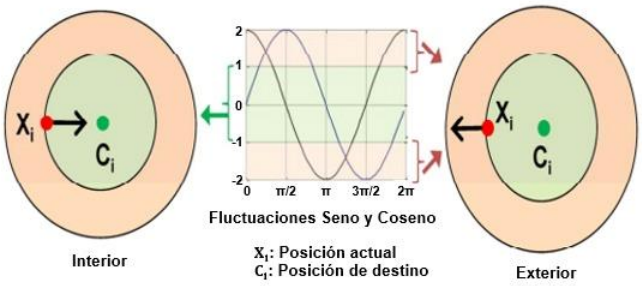


Figura 1. Trayectoria de la población del algoritmo SCA

Es importante tener en cuenta que la trayectoria cíclica de las funciones seno y coseno permite evaluar diferentes soluciones hasta llegar al destino. Lo anterior garantiza la explotación del espacio de búsqueda de manera eficiente [16].

De forma general, el SCA se compone de dos fases. La primera fase corresponde a la exploración y la segunda la fase de explotación. Para ello, se formulan las ecuaciones (14)-(15), en donde se presenta que el parámetro Y_i^{t+1} indica la posición actual de la *i*-ésima población en la iteración *t*, α es el parámetro de naturaleza sinusoidal que decide el movimiento de la próxima posición la cual puede estar en el espacio entre la solución y destino o fuera de él, β es un número aleatorio entre un rango de [0,2π] que define la amplitud del movimiento hacia el destino o fuera de este, C_i^t es la proposición del punto de destino, φ y ψ son números aleatorios entre [0,1], en donde el primero de ellos es un parámetro que puede cambiar entre las funciones seno y coseno y el segundo, es decir, ψ, proporciona un peso aleatorio para enfatizar el destino (si $\psi>1$) o restar importancia (si $\psi<1$), a es la constante natural sinusoidal y *D* es el número máximo de iteraciones.

$$Y_i^{t+1}=\begin{cases}X_i^t+\alpha\cdot sen(\beta)\cdot\left|\psi\cdot C_i^t-X_i^t\right|;\ si\ \varphi<0.5\\ X_i^t+\alpha\cdot cos\ (\beta)\cdot\left|\psi\cdot C_i^t-X_i^t\right|;\ si\ \varphi\geq 0.5\end{cases} \quad (14)$$

$$\alpha=a-t\cdot\frac{a}{D} \quad (15)$$

Nótese que la expresión (14) es quien da el nombre a esta técnica de optimización.

Para el caso del SCA es importante mencionar el vector X_i^t representa el *i*-ésimo vector solución en la iteración *t*. En el caso del problema estudiado este vector toma una forma discreta de la siguiente forma [3]:

$$X_i^t=[5\ \ 1\ \ 6\ \ \cdots\ \ 4\ \ c\ \ 1\ \ \cdots\ \ 2]$$

donde cada número entero presenta el número asignado a un calibre específico, siendo *c* el calibre de mayor tamaño del sistema. Es importante mencionar, que una vez se genera un individuo descendiente mediante la aplicación de la regla de evolución (14), este se debe redondear al entero más cercano; además, si los números obtenidos en este vector superan el calibre máximo o es un número menor o igual a cero, entonces, cada posición debe ser corregida mediante la generación de un número entero aleatorio entre 1 y c.

Nótese que el SCA obtendrá la solución X_i^{t+1} si se cumple uno de los siguientes criterios [17].

- Si función de adaptación del individuo Y_i^{t+1}es mejor que la función de adaptación de X_i^t, entonces, $X_i^{t+1} = Y_i^{t+1}$.
- En caso contrario, $X_i^{t+1} = X_i^t$.

Una de las características principales de los algoritmos de optimización metaheurística (incluido el ASC) es que explora y explota en espacio de solución a través de una función de adaptación, la cual corresponde a una modificación de la función objetivo para incluir las restricciones de desigualdad como penalizaciones en ella [16]. Sin embargo, la función de adaptación tiene como ventaja de que cuando existe una solución que cumple todo el conjunto de restricciones, i.e., una solución factible, entonces esta es idéntica a la función objetivo del problema original [17].

En la figura 2 se resumen los principales aspectos del algoritmo de SCA aplicado al problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución [15].

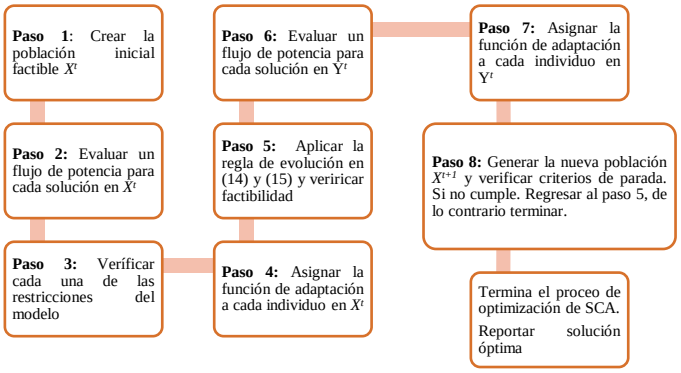


Figura 2. Principales aspectos del algoritmo de senos y cosenos aplicado al problema bajo estudio.

IV. Aplicación y Resultados

Para evaluar la metodología propuesta se emplean dos sistemas de prueba típicos de la literatura especializada, los cuales se componen de 8 y 27 nodos, respectivamente, los cuales fueron recientemente empleados en [3] para validar el algoritmo de optimización de búsqueda por vórtices en su versión discreta para sistemas trifásicos desbalanceados. Las principales características de estos sistemas de prueba se presentan a continuación.

A. Sistema de prueba de 8 nodos

La conexión eléctrica para este sistema de prueba se presenta en la figura 3. El sistema de 8 nodos es un sistema eléctrico de media tensión de naturaleza radial que opera en la subestación con una tensión nominal de $13800\sqrt{3}$ V. Los datos de este sistema de prueba fueron tomados de [4].

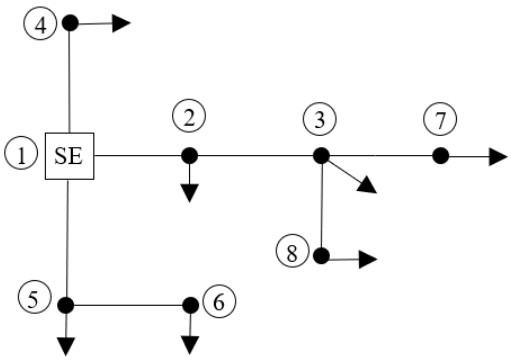


Figura 3. Conexión eléctrica entre nodos para el sistema de 8 nodos

Para evaluar la metodología propuesta se considera el escenario de simulación propuesto en [4], donde se considera una operación anual, i.e., 8760 horas, con la demanda de potencia presentada en la Tabla I. Es importante mencionar que para este sistema de prueba se considera factor de potencia unitario.

TABLA I
DEMANDA PARA EL SISTEMA DE 8 NODOS

NODO	DEMANDA [kW]
1	0.0
2	3162.6
3	2419.5
4	7897.5
5	1827.0
6	6103.5
7	2798.4
8	5194.2

En la Tabla II se presenta el conjunto de calibres disponibles para instalar en el sistema de 8 nodos. Es importante tener en cuenta que cada tramo de red mide 1 km para este sistema. Además, se consideran desde calibre número 2 hasta calibre 556 [3].

TABLA II
CONDUCTORES DISPONIBLES PARA EL SISTEMA DE 8 NODOS

CALIBRE	R $/KM	I (A)	R (Ω/KM)	X (Ω/KM)
2	6400	180	0.8763	0.4133
1	8990	200	0,6960	0.4133
1/0	12290	230	0.5518	0.4077
2/0	16400	270	0.4387	0.3983
3/0	25990	300	0.3480	0.3899
4/0	40830	340	0.2765	0.3610
336	58140	450	0.1865	0.2405
556	75450	600	0.0966	0.1201

Con el fin de comparar la eficiencia del método de senos y cosenos propuesto se comparan sus resultados con el algoritmo genético de Chu & Beasley [4]. En la Tabla III se presentan los resultados de los calibres obtenidos para el AGCB.

TABLA III
RESULTADOS OBTENIDOS POR EL AGCB REPORTADO EN [CITA]

CALIBRE	KILÓMETROS	PRECIO [US$]
2	3	19200
1	0	0
1/0	0	0
2/0	12	196800
3/0	0	0
4/0	6	244980

Al evaluar los conductores listados en la Tabla III para el sistema de 8 nodos en el software DigSILENT considerando un costo del kilovatio-hora al año de US$/kWh-año 0.25, se obtienen unos costos anuales asociados a las pérdidas de energía de US$ 306458.40. En la Tabla IV se resumen los resultados del AGCB reportado en [4].

TABLA IV
RESUMEN DE RESULTADOS DEL AGCB REPORTADO EN [CITA]

COSTO TOTAL	US$ 1132123.90
COSTO DE PÉRDIDAS	US$ 671143.90
COSTO DE CONDUCTORES	US$ 460980.00

Una vez evaluado el ASC propuesto, se obtienen los calibres reportados en la Tabla V para el sistema de 8 nodos.

TABLA V
RESULTADOS OBTENIDOS POR EL ASC

CALIBRE	KILÓMETROS	PRECIO (US$)
2	3	19200
1	0	0
1/0	6	73740
2/0	6	98400
3/0	3	77970
4/0	3	122490

Con los calibres reportados en la Tabla V se evalúa el flujo de potencia en el software DigSILENT empleando el método de Newton-Raphson, con lo cual se obtiene un costo de pérdidas anuales de US$ 334385.10 para el ASC. En la Tabla VI se resumen los resultados obtenidos para este el algoritmo propuesto.

TABLA VI
RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASC

COSTO TOTAL	US $ 1124103.37
COSTO DE PÉRDIDAS	US $ 732303.37
COSTO DE CONDUCTORES	US $ 391800.00

Al comparar los resultados reportados en la Tabla IV (resultados del AGCB) con los resultados de la Tabla VI (solución óptima del ASC), es posible observa que la metodología propuesta mejora la solución reportada en [CITA] en US$ 8020.53, lo cual implica que el ASC explora y explota de mejor manera el espacio de soluciones del problema estudiado en comparación con el AGCB.

Finalmente, para comprobar que la metodología de solución propuesta asegura que la red de distribución final obtenida es de naturaleza telescópica, se reporta de manera gráfica los resultados de la Tabla V en la Figura 4.

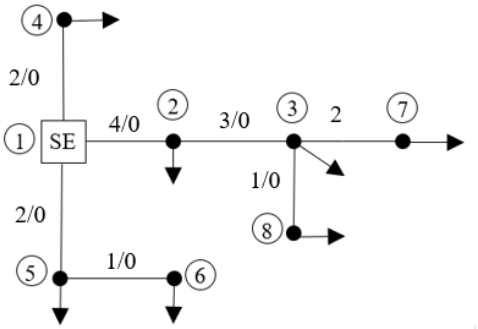


Figura 4. Solución óptima obtenida mediante el ASC.

B. Sistema de prueba de 27 nodos

El sistema de prueba de 27 nodos es un sistema de distribución de naturaleza radial que opera con tensión nominal en el nodo subestación de $13800\sqrt{3}$ V. Los datos de tramos de red y consumo en los nodos de demanda se reportan en la Tabla VII. Además, la configuración eléctrica de este se presenta en la Figura 5.

TABLA VII
DATOS DE LOS TRAMOS DE RED Y LAS DEMANDAS EN EL SISTEMA DE 27 NODO

TRAMO	NODO I	NODO J	L_{ij}[KM]	P [KW]	Q[KVAR]
1	1	2	0.55	0.0	0.0
2	2	3	1.50	0.0	0.0
3	3	4	0.45	892.5	553.2
4	4	5	0.63	0.0	0.0
5	5	6	0.70	765	474
6	6	7	0.55	0.0	0.0
7	7	8	1.00	637.5	395.1
8	8	9	1.25	0.0	0.0
9	9	10	1.00	798.3	494.7
10	2	11	1.00	255	158.1
11	11	12	1.23	1020	632.1
12	12	13	0.75	892.5	553.2
13	13	14	0.56	573.9	355.5
14	14	15	1.00	318.9	197.4
15	15	16	1.00	765	474
16	3	17	1.00	765	474
17	17	18	0.60	382.5	237
18	18	19	0.90	892.5	553.2
19	19	20	0.95	1020	632.1
20	20	21	1.00	255	158.1
21	4	22	1.00	318.9	197.4
22	5	23	1.00	165.9	102.6
23	6	24	0.40	209.1	129.6
24	8	25	0.60	765	474
25	8	26	0.60	191.4	118.5
26	26	27	0.80	510	316.2

Para este sistema de prueba es importante mencionar que se considera el mismo conjunto de conductores reportado en la Tabla II. Además, para el cálculo de los costos de las pérdidas se considera que este sistema opera durante las 8760 horas del año con los datos de demanda presentados en la Tabla VII.

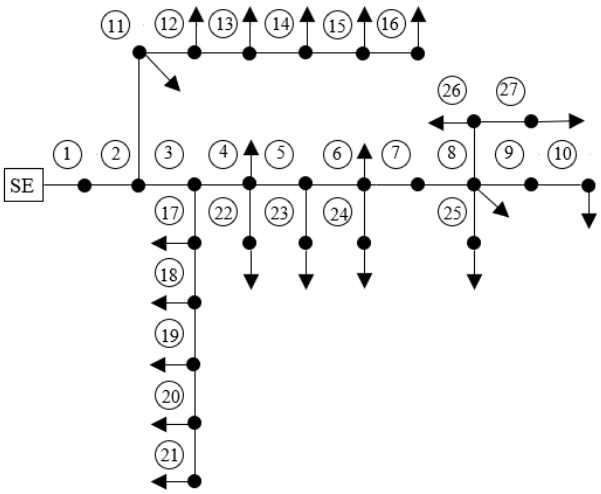


Figura 5. Configuración eléctrica del sistema de prueba de 27 nodos.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos por el ASC con respecto a los reportes de la literatura especializada, en este caso se presenta la solución del modelo de PNLEM exacto en el software GAMS según lo reportado en [3]. Los costos de inversión y operación para este sistema se presentan en la Tabla VIII.

TABLA VIII
SOLUCIÓN ÓPTIMA DEL MODELO DE PNLEM SEGÚN [3]

COSTO DE CONDUCTORES	US$ 669530.10
COSTO DE PÉRDIDAS	US$ 733886.08
COSTO TOTAL	US$ 1403416.18

Una vez implementada la metodología de optimización por senos y cosenos propuesta en esta investigación, se encuentran los calibres óptimos que se presentan en la Tabla IX.

TABLA IX
TIPOS DE CALIBRE Y COSTOS DE INVERSIÓN

TRAMO	CALIBRE	COSTO POR KM (US$)	COSTO POR LÍNEA (US$)
1	556	75450	124492.5
2	3/0	25990	116955
3	1	8990	12136.5
4	1	8990	16991.1
5	1	8990	18879
6	1	8990	14833.5
7	1	8990	26970
8	2	6400	24000
9	2	6400	19200
10	1	8990	26970
11	1	8990	33173.1
12	2	6400	14400
13	2	6400	10752
14	2	6400	19200
15	2	6400	19200
16	2/0	16400	49200
17	1/0	12290	22122
18	2	6400	17280
19	2	6400	18240
20	2	6400	19200
21	2	6400	19200
22	1	8990	26970
23	2	6400	7680
24	2	6400	11520
25	2	6400	11520
26	2	6400	15360

La solución provista por el ASC se implementa en el software DigSILENT para determinar mediante el método de flujo de potencia de Newton-Raphson el costo total de las pérdidas para el período de estudio. Los resultados del ASC para el sistema de 27 nodos se resumen en la Tabla X.

TABLA X
RESULTADOS DEL ASC EN EL SISTEMA DE 27 NODOS

COSTO DE CONDUCTORES	US$ 716444.70
COSTO DE PÉRDIDAS	US$ 681606.62
COSTO TOTAL	US$ 1398051.32

Al comparar los resultados reportados en [3] mediante la solución del modelo exacto en GAMS y los resultados obtenidos por el ASC propuesto, se puede notar claramente que la solución del ASC presenta un menor costo total anual, logrando una mejora de US$ 5364.86 respecto del modelo de PNLEM.

Con el fin de demostrar que la metodología propuesta garantiza la regulación de tensión en todas las barras del sistema, en la siguiente sección se presenta una comparativa de los voltajes para ambos sistemas de prueba considerando lo reportado por el AGCB y la solución en GAMS.

C. Resultados en perfiles de tensión

A continuación, se presenta en las Tablas XI y XII los resultados comparativos entre perfiles de tensión para los sistemas de prueba de 8 y 27 nodos teniendo como referencia el voltaje obtenido en los artículos de referencia.

TABLA XI
COMPORTAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN EL SISTEMA DE 8 NODOS

NODO	AGCB [KV]	AGCB [PU]	ASC [KV]	ASC [PU]	DIFERENCIA [%]
SE	23.90230	1	23.90230	1	0.000%
2	23.74073	0.9932403	23.74040	0.993226	0.001%
3	23.61742	0.9880813	23.58502	0.986726	0.136%
4	23.75609	0.9938831	23.75609	0.993883	0.000%
5	23.75449	0.9938158	23.75433	0.993809	0.001%
6	23.64100	0.9890680	23.61146	0.987832	0.124%
7	23.51290	0.9837084	23.48036	0.982347	0.136%
8	23.52037	0.9840213	23.46269	0.981608	0.241%

Para el caso del sistema de 8 nodos, según los resultados de la Tabla XI, es posible notar que:

- Ambas metodologías de optimización garantizar una regulación de tensión menor al 2% en todas barras del sistema, lo cual cumple plenamente con las especificaciones operativas del sistema planteadas en un ±10%, respecto del valor de referencia para la subestación.
- El ASC presenta un error máximo de 0.241% en el barraje 8 cuando se compara con el AGCB, lo cual se debe a que la solución ASC invierte sólo US$ 391800 en conductores, mientras que el AGCB invierte US$ 460980, lo cual implica que algunos tramos de red en la metodología propuesta son de menor calibre conllevando a caídas de tensión adicionales.

TABLA XII
COMPORTAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN EL SISTEMA DE 27 NODOS

NODO	GAMS [KV]	GAMS [PU]	ASC [KV]	ASC [PU]	DIFERENCIA [%]
1	23.9023	1	23.90230	1	0.000%
10	22.88041	0.9572469	22.93571	0.959560	-0.231%
11	23.62319	0.9883226	23.69668	0.991397	-0.307%
12	23.44407	0.9808290	23.51805	0.983924	-0.310%
13	23.36592	0.9775595	23.42533	0.980045	-0.249%
14	23.32074	0.9756694	23.38027	0.978159	-0.249%
15	23.26794	0.9734601	23.32760	0.975956	-0.250%
16	23.23065	0.9718999	23.29040	0.974400	-0.250%
17	23.23633	0.9721377	23.42779	0.980147	-0.801%
18	23.17316	0.9694947	23.37488	0.977934	-0.844%
19	23.07727	0.9654832	23.27983	0.973957	-0.847%
2	23.75490	0.9938333	23.85215	0.997901	-0.407%
20	23.01767	0.9629897	23.22075	0.971486	-0.850%
21	23.00512	0.9624645	23.20831	0.970965	-0.850%
22	23.28718	0.9742650	23.41261	0.979513	-0.525%
23	23.21866	0.9713984	23.31609	0.975474	-0.408%
24	23.14172	0.9681795	23.20665	0.970896	-0.272%
25	22.94665	0.9600186	23.00180	0.962325	-0.231%
26	22.94852	0.9600969	23.00366	0.962403	-0.231%
27	22.92837	0.9592537	22.98356	0.961562	-0.231%
3	23.37296	0.9778540	23.52532	0.984228	-0.637%
4	23.30268	0.9749136	23.42804	0.980158	-0.524%
5	23.22675	0.9717368	23.32286	0.975757	-0.402%
6	23.14581	0.9683507	23.21073	0.971066	-0.272%
7	23.08981	0.9660079	23.14461	0.968300	-0.229%
8	22.96931	0.9609663	23.02440	0.963271	-0.230%
9	22.91992	0.9589000	22.97513	0.961209	-0.231%

Los resultados de los perfiles de tensión para el sistema de 27 nodos muestran que:

- La regulación de tensión para la solución reportada por el AGCB es de 4.27 % y corresponde a la caída de tensión máxima del sistema registrada en el nodo 10. En el caso del ASC la regulación de tensión es de 4.04 % en el mismo nodo.
- La diferencia en los perfiles de tensión tiene signo negativo debido a que en este sistema de prueba el ASC tiene mejores perfiles de tensión que el método exacto en GAMS, siendo la menor diferencia de 0.231% y la mayor diferencia de 0.850 %. Esto se debe a que para este sistema de prueba el ASC invierte más en conductores cuando se compara con el modelo de PNLEM, tal como se observa en las Tablas XIII y X, respectivamente.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se solucionó el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución de energía eléctrica mediante la aplicación de la versión discreta del ASC. Los resultados numéricos demostraron su superioridad numérica en dos alimentadores de prueba compuestos de 8 y 27 nodos cuando se comparan los resultados con el AGCB y la solución exacta del modelo de PNLEM en GAMS. En el caso del sistema de prueba de 8 nodos se encontró un óptimo de mejor calidad que el reportado por el AGCB con una mejora adicional de US$ 8020.53; mientras que en el caso de prueba de 27 nodos la mejora respecto del GAMS fue de US$ 5364.86.

Los resultados obtenidos mostraron que para ambos sistemas de prueba se obtiene regulaciones de tensión menores al 4.5 % respecto el voltaje de referencia de la subestación, lo cual demuestra que la restricción de regulación de tensión se cumple plenamente para ambos alimentadores de prueba; sin embargo, un hecho importante durante la validación computacional es que los resultados reportados por el modelo exacto en GAMS son infactibles al realizar su implementación en el software DigSILENT, debido a que el primer tramo de red queda con un 108.30 % de cargabilidad.

Como trabajo futuro se recomiendan las siguientes investigaciones derivadas: (i) realizar un análisis multi-horario para tener una mejor estimación de las pérdidas de energía durante el período de estudio; y (ii) aplicar nuevos algoritmos de optimización metaheurística como el método de búsqueda de cuervos y el algoritmo metaheurístico de Newton para resolver el problema abordado en este artículo.

VI. REFERENCIAS

[1] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider and R. Romero, "Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 1, pp. 172-180, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2161349.

[2] O. D. Montoya, A. Grajales, and R. A. Hincapié I., "Selección óptima de conductores en sistemas de distribución empleando el algoritmo búsqueda tabú," Ingeniare. Rev. Chil. Ing., vol. 26, no. 2, pp. 283–295, 2018, doi: 10.4067/s0718-33052018000200283.

[3] O. D. Montoya, A. Garces and C. A. Castro, "Optimal Conductor Size Selection in Radial Distribution Networks Using a Mixed-Integer Non-Linear Programming Formulation," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 8, pp. 2213-2220, Aug. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8528237.

[4] J. Castilho Neto, and A. M. Cossi, "Alocação de Cabos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média Tensão (MT) Utilizando Algoritmo Chu-Beasley," Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE, 2012, http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/95891.PDF

[5] S. M. Ismael, S. H. E. A. Aleem and A. Y. Abdelaziz, "Optimal selection of conductors in Egyptian radial distribution systems using sine-cosine optimization algorithm," 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2017, pp. 103-107, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301170.

[6] M. Granada-Echeverri, R. A. Hincapié-Isaza, and R. A. Gallego-Rendón, "Planeamiento de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando Branch and Bound," Ingeniería, 10(2), 44–50. https://doi.org/10.14483/23448393.2716

[7] O. D. Montoya, A. Grajales, R. A. Hincapié, M. Granada and R. A. Gallego, "Methodology for optimal distribution system planning considering automatic reclosers to improve reliability indices," 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition – Latin America (PES T&D-LA), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955232.

[8] J. F. Martínez-Gil, N. A. Moyano-García, O. D. Montoya, and J. A. Alarcon-Villamil, "Optimal Selection of Conductors in Three-Phase Distribution Networks Using a Discrete Version of the Vortex Search Algorithm," Computation 2021, 9(7), 80; https://doi.org/10.3390/computation9070080

[9] A. Y. Abdelaziz, and A. Fathy, "A novel approach based on crow search algorithm for optimal selection of conductor size in radial distribution networks," Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20(2), pp. 391-402; https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.02.004

[10] O. D. Montoya, F. M. Serra, C. H. De Angelo, H. R. Chamorro, and L. Alvarado-Barrios, "Heuristic Methodology for Planning AC Rural Medium-Voltage Distribution Grids," Energies 2021, 14(16),

5141; https://doi.org/10.3390/en14165141

[11] F. Mendoza, D. Requena, J. L. Bemal-agustin and J. A. Dominguez-navarro, “Optimal Conductor Size Selection in Radial Power Distribution Systems Using Evolutionary Strategies,” 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDCLA.2006.311451.

[12] S. Manikandan, S. Sasitharan, J. V. Rao and V. Moorthy, “Analysis of optimal conductor selection for radial distribution systems using DPSO,” 2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 2016, pp. 96-101, doi: 10.1109/ICEES.2016.7510623.

[13] I. Kabir, I. Musa and A.D. Usman, "Optimal Conductor Selection in Radial Distribution Network Using Bat and Genetic Algorithm." Computing and Information Systems, vol. 23, no. 1, Feb. 2019, pp. 26+. Gale Academic.

[14] Seyedali Mirjalili, “SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems,” Knowledge-Based Systems, vol. 96, 2016, pp. 120-133, https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022.

[15] Abualigah, L., Diabat, A. “Advances in Sine Cosine Algorithm: A comprehensive survey,” Artif Intell Rev 54, 2567–2608 (2021). https://doi.org/10.1007/s10462-020-09909-3

[16] O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, H. R. Chamorro, L. Alvarado-Barrios, and E. Rivas-Trujillo, “A Hybrid Approach Based on SOCP and the Discrete Version of the SCA for Optimal Placement and Sizing DGs in AC Distribution Networks,” Electronics 2021, 10(1), 26; https://doi.org/10.3390/electronics10010026

[17] S. Y. Bocanegra, O. D. Montoya, and A. Molina, “Sine-cosine optimization approach applied to the parametric estimation in single-phase transformers by considering voltage and current measures», DYNA, vol. 88, no. 219, pp. 19–27, nov. 2021. https://doi.org/10.15446/dyna.v88n219.93670