

Selección óptima de conductores en sistemas de distribución empleando el algoritmo búsqueda tabú

Optimal selection of conductors in distribution systems using tabu search algorithm

O.D. Montoya G.^{1*} A. Grajales² R.A. Hincapié I.¹

Recibido 30 de junio de 2016, Aceptado 27 de marzo de 2017
Received: June 30, 2016 Accepted: March, 27, 2017.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología eficiente para la selección óptima de conductores en sistemas de distribución (SD) por medio de la implementación de la técnica de optimización metaheurística búsqueda tabú (BT). Para representar el problema es empleado un modelo matemático monoobjetivo del tipo no lineal entero mixto. Como función objetivo, es considerada la minimización de los costos de inversión en conductores en conjunto con las pérdidas técnicas de la red para un período de estudio de un año, considerando un equivalente de red monofásico. El conjunto de restricciones corresponde a las características técnicas y operativas del sistema, las que son evaluadas por medio de un flujo de potencia del tipo barrido iterativo. Para construir la configuración inicial para el BT, es empleado un algoritmo heurístico constructivo que garantiza factibilidad de la solución inicial y para la generación del vecindario, son utilizadas estrategias de búsqueda en árbol y teoría de grafos. Con el fin de verificar aplicabilidad y eficiencia, se emplearon dos sistemas de la literatura especializada, obteniendo resultados de mejor calidad que los reportados en la literatura especializada.

Palabras clave: Algoritmos constructivos, búsqueda tabú, dimensionamiento de conductores, optimización monoobjetivo, sistemas de distribución.

ABSTRACT

An efficient methodology for the optimal selection of conductor in distribution systems through the implementation of the metaheuristic optimization technique called Tabu Search is presented in this paper. To represent the problem a mono-objective mathematical model of nonlinear mixed integer type is used. The minimization of investment costs of conductors and operating costs (power losses) for a study period of one year is considered as objective function. A single-phase equivalent system is used for the evaluation. The set of constraints relates to technical and operational characteristics of the system, which are assessed through a backward/forward sweep load flow. Initial configuration to tabu search algorithm is created by using a constructive heuristic that ensures feasibility of the initial solution; to generate the neighborhood strategies of tree searching and graph theory are used. In order to verify its applicability and efficiency, two test feeders of specialized literature are employed, obtaining better quality results than those reported in the literature.

Keywords: Constructive algorithm, tabu search, conductors sizing, mono-objective optimization, distribution systems.

¹ Programa de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar, Km 1 vía Turbaco, Cartagena, Colombia. E-mail: omontoya@utb.edu.co

² Programa de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica de Pereira. Carrera 27 #10-02 Barrio Álamos Pereira, Colombia. E-mail: agrajales87@gmail.com; ricardohincapie@utp.edu.co

* Autor de correspondencia.

NOMENCLATURA

Conjuntos

Ω_c	Conjunto que contiene todos los tipos de conductores disponibles.
Ω_L	Conjunto que contiene todos los tramos de red del SD.
Ω_H	Conjunto que contiene los períodos de duración de carga.
Ω_N	Conjunto que contiene todos los nodos del SD.
S	Espacio de soluciones factibles asociadas a un problema de optimización.

Parámetros, subíndices y superíndices

b_{ij}^c	Suceptancia asociada al tramo de red ij con calibre tipo c [km/Ω].
C	Superíndice asociado al tipo de calibres de conductores disponibles.
CIC^c	Costo de instalación por kilómetro del conductor con calibre tipo c [US\$/km].
C_{Wh}	Costo de la energía [US\$/Wh].
DCC_h	Duración de la curva de demanda para el período h [h].
g_{ij}^c	Conductancia asociada al tramo de red ij con calibre tipo c [km/Ω].
h	Subíndice asociado a los intervalos de la curva de carga discretizada.
i, ij, kl	Subíndices asociados a los nodos y los tramos de red del SD, respectivamente.
$I_{ij}^{c, \max}$	Capacidad térmica de conducción de corriente para el conductor c con calibre tipo c asociado al tramo de red ij [A].
L_{ij}	Longitud del tramo de red ij [km].
$P_{i,h}^D$	Potencia activa demandada en el nodo i en el período h [W].
$Q_{i,h}^D$	Potencia reactiva demandada en el nodo i en el período h [VAr].
r_{ij}^c	Resistencia del conductor con calibre tipo c conectado entre los nodos i y j [Ω/km].
V_i^{\max}	Límite máximo de regulación de tensión en el nodo i [V].
V_i^{\min}	Límite mínimo de regulación de tensión en el nodo i [V].
$T_{ij,kl}$	Matriz que indica si el tramo de red ij es la línea inmediatamente aguas arriba del tramo de red kl .
x_{ij}^c	Reactancia inductiva del conductor con calibre tipo c conectado entre los nodos i y j [Ω/km].
α_c	Parámetro que indica el calibre asociado al conductor tipo c .

Variables

$I_{ij,h}^c$	Magnitud de la corriente que circula por el tramo de red ij con calibre tipo c en el período h [A].
$I_{ij,h}^{i,c}$	Componente imaginaria de la corriente que circula por el tramo de red ij con calibre tipo c en el período h [A].
$I_{ij,h}^{r,c}$	Componente real de la corriente que circula por el tramo de red ij con calibre tipo c en el período h [A].
$P_{i,h}^G$	Potencia activa generada en el nodo i en el período h [W].
$P_{ij,h}^c$	Flujo de potencia activa por el tramo de red ij con calibre tipo c en el período h [W].
$Q_{i,h}^G$	Potencia reactiva generada en el nodo i en el período h [VAr].
$Q_{ij,h}^c$	Flujo de potencia reactiva por el tramo de red ij con calibre tipo c en el período h [W].
$V_{i,h}$	Magnitud de la tensión en el nodo i en el período h [V].
$V_{j,h}$	Magnitud de la tensión en el nodo j en el período h [V].
x	Variables de decisión de un problema genérico de optimización.
$\delta_{ij}^c, \delta_{kl}^c$	Variable de decisión que indica si un conductor con calibre tipo c es instalado en el tramo de red ij (kl). (valor de 1 indica que si se instala, valor de 0, que no se instala).
$\theta_{i,h}$	Ángulo de la tensión en el nodo i en el período h [rad].
$\theta_{j,h}$	Ángulo de la tensión en el nodo j en el período h [rad].
$\theta_{ij,h}$	Diferencia angular entre las tensiones de los nodos i y j en el período h [rad].

Funciones

$f(x)$	Función genérica de un problema de optimización correspondiente a la función objetivo.
$g(x)$	Función genérica de un problema de optimización que corresponde al conjunto de restricciones de desigualdad.
$h(x)$	Función genérica de un problema de optimización que corresponde al conjunto de restricciones de igualdad.
\tilde{z}	Función objetivo con penalizaciones [US\$].
z	Función objetivo [US\$].
$\max(\cdot)$	Función que maximiza/minimiza la cantidad

$\min(\cdot)$ la función contenida en el paréntesis.
 $\max\{a, \cdot\}$ Función que calcula el máximo o el
 $\min\{a, \cdot\}$ mínimo de las cantidades contenidas entre
las llaves, es decir, si a es mayor que b ,
entonces $\max\{a, b\}=a$ y $\min\{a, b\}=b$.

INTRODUCCIÓN

El creciente aumento de la demanda de energía eléctrica impulsada por el constante crecimiento de las ciudades y la expansión de las capacidades productivas del sector industrial, generan una inevitable expansión del sistema eléctrico para poder atender de manera oportuna, eficiente y confiable toda la demanda requerida [1].

Bajo este escenario, las compañías de distribución (DisCo) están en la necesidad de expandir sus sistemas eléctricos en el corto y mediano plazo, de forma que se obtengan los menores costos en inversión y operación para el período de tiempo considerado en el horizonte de estudio; la expansión del sistema puede ser proyectada de manera estática o dinámica y esto depende de los criterios que cada DisCo aplique en sus proyectos de expansión [2].

En los procesos de planeación de la expansión de SD, siempre son considerados como objeto de minimización, los costos de inversión en nuevas subestaciones y tramos de red, así como su aumento de capacidad, además de los costos asociados a las pérdidas [1-3]. Dentro de este problema existe un subproblema relacionado con la selección óptima de los conductores que serán instalados en la red, ya que esto impacta directamente los costos de inversión y operación [4].

La selección de los mejores conductores para las redes de distribución depende claramente de las consignas operativas de la DisCo; sin embargo, en términos generales, este es susceptible de ser aplicado para redes nuevas y existentes. Para las redes nuevas, se seleccionan los conductores dentro de un grupo de candidatos disponibles (diferentes calibres) siendo ya conocidas las rutas de los alimentadores (topología fija) [5]. Para las redes existentes se aplica para mejorar características operativas como perfiles de tensión o reducción de pérdidas por efecto *joule*, o para sustituir de manera eficiente redes que han cumplido su vida útil [4].

Dada la importancia que tiene el sistema de distribución para la correcta atención de la demanda, es necesario que las DisCo cuenten con herramientas eficientes para apoyar a los expertos de planeación en la toma de decisiones sobre la ampliación del sistema a un mínimo costo, de forma que sea eficiente y confiable [4]. De acuerdo con esto, la selección óptima de conductores ha sido un problema de amplia acogida en la literatura especializada. Dentro de los trabajos más destacados en este campo se resalta la aplicación de algoritmos heurísticos [6-7], técnicas de optimización combinatorial como algoritmos genéticos [4] y estrategias evolutivas [8-10]. Otros autores han propuesto modelos lineales [11] y no lineales [12] para representar el problema, los que son resueltos por medio de técnicas exactas disponibles en *software* de optimización comercial.

A diferencia de los trabajos anteriores, en este artículo se propone una metodología de solución al problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución (SD) empleando la técnica de optimización búsqueda tabú (BT) que considera la curva de duración de carga anual del sistema de distribución discretizada en tres períodos, ya que en contraste con los algoritmos genéticos, esta técnica es menos susceptible a caer en espacios infactibles, debido a que el recorrido por el espacio de solución se hace de manera controlada mediante los criterios de vecindad y no por medio de mutaciones o combinaciones aleatorias de los individuos, que en general producen altos índices de infactibilidad en este tipo de problemas.

Los resultados presentados en este trabajo son de mejor calidad que los reportados en la literatura especializada [4], muestran la eficiencia, robustez y aplicabilidad de la metodología propuesta en SD con una o múltiples fuentes, garantizando siempre la radialidad de la red. Adicionalmente, el modelo matemático desarrollado es fácilmente adaptable a los períodos de análisis que la DisCo considere adecuados en sus planes de expansión y/o reposición de redes.

Finalmente, este documento está organizado como sigue. En la sección 2 se presenta la formulación matemática del problema. En la sección 3 se describe la técnica de optimización BT y sus principales características. En la sección 4 se muestra la aplicación de la metodología propuesta a dos

sistemas de prueba de la literatura y los resultados obtenidos. La sección 5 presenta las conclusiones derivadas de este trabajo y, por último, se encuentran las referencias bibliográficas.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para describir matemáticamente el problema de selección óptima de conductores en sistemas de distribución, es empleado un modelo de programación no lineal entero mixto no convexo monoobjetivo como el presentado en [3].

El modelo matemático propuesto se describe de (1) a (8).

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

s.a.

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

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

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

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

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

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

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

La función objetivo presentada en (1) corresponde a una función de costos de inversión y operación evaluados para el período de estudio (un año), en donde la primera componente representa las pérdidas técnicas producidas por el calentamiento de los conductores debido a la circulación de corriente y la segunda componente el costo de inversión asociado a los calibres de los conductores. 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), la regulación de tensión en los nodos y la capacidad térmica de los tramos de red se determina según (4) y (5), respectivamente.

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*.

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.

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.

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

$$Q_{ij,h}^c = -V_{i,h}^2 \cdot b_{ij}^c - V_{i,h} \cdot V_{j,h} \cdot \left(g_{ij}^c \cdot \sin(\theta_{ij,h}) - b_{ij}^c \cdot \cos(\theta_{ij,h}) \right) \quad (10)$$

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

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

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

ALGORITMO BÚSQUEDA TABÚ

Descripción general del BT

El algoritmo BT es una técnica de optimización matemática perteneciente a la familia de las técnicas metaheurísticas de optimización, que en términos generales fue diseñada para encontrar configuraciones óptimas (solución global) o soluciones de buena calidad (solución local), en problemas de alta complejidad matemática (problemas no convexos, no diferenciables y con variables mixtas), y de característica combinatorial, en los que su espacio de solución crece exponencialmente con el tamaño del problema [13-14]. En general, el algoritmo BT resuelve problemas de optimización monoobjetivo de la forma (14). Es de notarse que la función objetivo puede tratarse de una función a maximizar o minimizar, según sea la naturaleza del problema [1-2].

$$z = \min(f(x))$$

s.a. (14)

$$h(x) = 0 \wedge g(x) \leq 0 \{ \forall x \in S \}$$

El algoritmo BT realiza una búsqueda por el espacio de solución por medio de un recorrido de trayectoria, como lo hace un algoritmo heurístico de búsqueda local [2]. Así, dada la configuración actual x^t se define el vecindario $N(x^t)$ como el conjunto de elementos adyacentes a x^t tal que $x^t \in N(x^t)$; cuando el vecindario es muy grande, se emplean criterios basados en el conocimiento del problema para obtener de $N(x^t)$ un vecindario reducido $N'(x^t)$. Este conjunto de vecinos puede ser obtenido por medio de estrategias heurísticas guiadas o mediante un proceso de generación aleatorio. Sin embargo, el BT se diferencia de un algoritmo heurístico de búsqueda local en tres aspectos esenciales [13-14]:

- En la selección de la configuración siguiente x^{t+1} se selecciona el mejor vecino encontrado, si este tiene mejor función de adaptación que la configuración asociada x^t , aplicando lo que se

denomina criterio de aspiración; en caso contrario, se selecciona aquel individuo del vecindario que tenga menos atributos bloqueados por los criterios tabú, lo que permite degradaciones en la función de adaptación, con el fin de escapar de soluciones locales y explorar otras regiones.

- Son empleadas memorias de corto y largo plazo que impiden que la búsqueda regrese a espacios de solución anteriormente explorados en las búsquedas locales.
- Es empleada una estrategia de reinicio para comenzar de nuevo la búsqueda local, con la que se busca explorar el espacio de solución desde puntos de arranque diversos, que garanticen alcanzar una solución de buena calidad.

La solución óptima (mejor solución encontrada) se encuentra contenida en la lista élite, la cual almacena las mejores soluciones obtenidas en las búsquedas locales efectuadas según el proceso antes mencionado. El pseudocódigo presentado en la Figura 1 muestra el proceso básico del BT mientras recorre el espacio de solución.

```

BEGIN Algoritmo BT
- Inicializar lista élite.
FOR  $i = 1$  TO número de búsquedas locales DO
- Inicializar memorias.
FOR  $t = 1$  TO número de iteraciones DO
IF  $t == 1$  THEN
- Seleccionar la configuración inicial  $x^t$ .
END IF
- Asignar incumbente local como  $f(N'(x^t))$ .
- Generar el vecindario reducido  $N'(x^t)$ .
- Evaluar la función de adaptación  $f(N'(x^t))$ .
IF Mejora incumbente local THEN
- Actualizar la incumbente local.
- Seleccionar la configuración  $x^{t+1}$  por atributos tabú.
ELSE
- Seleccionar la configuración  $x^{t+1}$  por atributos tabú.
END IF
- Actualizar memorias.
END FOR
- Actualizar lista élite.
END FOR
END
    
```

Figura 1. Pseudocódigo del algoritmo BT [1].

En el algoritmo BT existen otras estrategias de búsqueda avanzada, entre las que se destacan la oscilación estratégica y el encadenamiento de trayectorias, cuyos detalles y la forma de implementación pueden ser consultadas en [13-14].

Configuración inicial

Como el problema de asignación óptima de conductores en SD dada su naturaleza, conserva una configuración topológica invariante en el tiempo (las rutas de las líneas no son una variable de decisión, sino un parámetro de entrada), la configuración inicial para los calibres se determina de dos formas diferentes:

- Es evaluado un flujo de potencia del tipo barrido iterativo [15] asumiendo como valores de resistencia y reactancia para cada tramo de red ij , igual al promedio de los valores de entrada asociados a los calibres de conductores disponibles; una vez conocidas las corrientes promedio en cada línea, se procede a asignar los calibres por cada alimentador, desde el nodo fuente hacia los nodos finales, tomando como referente el calibre con capacidad térmica inmediatamente superior al valor de corriente registrada en la línea.
- Es asignado de manera aleatoria un calibre para toda la red, con base en los datos disponibles en los conductores de entrada y posteriormente evaluado el flujo de potencia para verificar capacidades en conductores; si la capacidad no es excedida en ningún tramo de red, esta se toma como la configuración inicial, en caso contrario, se asigna el siguiente calibre (mayor capacidad de conducción) para todos los tramos de red y nuevamente se verifica la capacidad térmica. La configuración inicial será aquella que con calibre uniforme no viole los límites de corriente en los conductores.

Generación del vecindario reducido

Para la generación del vecindario reducido $N'(x^t)$ asociado a la configuración actual x^t , son empleados cuatro estrategias heurísticas basadas en las características operativas de la red [1-2], las que se describen a continuación:

- Es creada una lista con todos los recorridos que existen entre los nodos finales y la subestación. Para cada recorrido es seleccionado de manera aleatoria un tramo de red y es variado su calibre;

posteriormente son cambiados los demás calibres de dicho alimentador, hasta garantizar una configuración telescópica.

- Son determinados los nodos con peor regulación. Para los recorridos entre cada nodo y la subestación es incrementado el calibre al siguiente de mayor capacidad.
- Es seleccionado el tramo de red con menor cargabilidad porcentual. Para cada tramo es disminuido el calibre al siguiente de menor capacidad; aguas abajo de este son modificados todos aquellos que violen la característica de red telescópica.
- Es escogido de forma aleatoria un alimentador y luego a sus tramos de red se les asigna el mismo tipo de conductor.

Si el total de vecinos supera un número máximo permitido k , este es reducido por medio de la selección aleatoria de los primeros k vecinos; si el vecindario generado es menor que el número k , para esa generación se trabaja con dicha cantidad. Lo anterior indica que el BT implementado tiene un tamaño dinámico en el vecindario, variando este entre 2 y k vecinos.

Codificación empleada

Para representar adecuadamente el problema de selección óptima de conductores en SD, es empleado un vector binario con dimensiones $N_L * N_C$, donde N_L es el número de tramos de red y N_C es el número total de calibres disponibles. La Figura 2 muestra la codificación empleada.

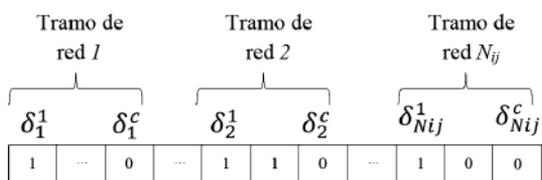


Figura 2. Codificación empleada [1].

Criterios de parada

En el algoritmo BT son empleados dos estrategias de exploración sobre el espacio de solución conocidas como búsqueda global y búsqueda local. Las búsquedas globales corresponden a la cantidad de puntos diferentes sobre el espacio de solución que son generados como punto de partida para las búsquedas locales. Por otro lado, las exploraciones

locales corresponden a múltiples búsquedas realizadas desde el mismo punto de inicialización.

En este sentido, son empleados dos criterios de parada en cada búsqueda local. El primero corresponde al límite de generaciones de cada búsqueda definido en la parametrización del BT y el segundo criterio emplea el número de veces en que el algoritmo no mejora la incumbente. La mejor solución encontrada en la búsqueda local es almacenada en la lista élite global [14].

Para el caso de las búsquedas globales son realizadas como mínimo dos sobre el espacio de solución, en caso de la segunda búsqueda obtenga una mejor función objetivo que la primera, se inicia una nueva búsqueda global y este proceso continúa hasta que la incumbente global desmejore en alguna de las búsquedas globales.

Función de adaptación

Dado que una de las estrategias del BT es explorar espacios de solución con algún grado de infactibilidad, la función de adaptación empleada para la evolución del BT es manejada por medio de penalizaciones [1-2]. La ecuación (15) muestra la función de adaptación implementada, donde z es la función objetivo definida en (1).

$$\tilde{z} = \min \left(\begin{array}{l} z + \alpha_1 \cdot \max \{ 0, I_{ij,h}^c - I_{ij}^{c,max} \} \\ + \alpha_2 \cdot \max \{ 0, V_i^{min} - V_{i,h} \} \end{array} \right) \quad (15)$$

α_1 y α_2 corresponden a los factores de penalización asociados a la máxima desviación por corrientes y por tensiones, respectivamente. La penalización que se propone es del tipo diferencial, es decir, en cuanto menor es la diferencia en corrientes y/o voltajes, menor es la penalización. La función $\max \{ 0, I_{ij,h}^c - I_{ij}^{c,max} \}$ determina el tramo ij con mayor diferencia entre la corriente obtenida por medio de la evaluación del flujo de potencia y su límite térmico, para cada período h ; de igual forma se realiza para los voltajes en todos los nodos del sistema.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Para implementar la metodología propuesta, es empleado el *software* MATLAB 2015a, en un

computador con procesador *intel core i3*, 4 Gb de RAM y *Windows 7 Professional*.

Escenarios de simulación y parámetros considerados

Para evaluar la metodología propuesta son considerados dos escenarios para la potencia demandada. El primer escenario (E_1) corresponde a la operación en demanda pico para todo el año de estudio. El segundo escenario (E_2), corresponde a la evaluación de las pérdidas bajo una curva de carga discretizada en tres períodos de demanda, así como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Curva de carga de discretizada.

Parámetro	Alta	Media	Baja
Demanda [%]	100	60	30
Duración [h]	1.000	6.760	1.000

Los escenarios se proponen con el fin de realizar diversos análisis comparativos entorno a respuestas disponibles en la literatura especializada y como posible herramienta para implementación dentro de un problema de planeación de mayor envergadura.

Los tipos de conductores, costos y características técnicas para efectos comparativos, fueron tomadas de [4] y se muestran en la Tabla 2.

Es importante resaltar que la información asociada a los costos de los conductores ha sido convertida de reales brasileños a dólares americanos con una tasa de cambio correspondiente a US\$ 1 = R\$ 3.22.

Para la implementación del algoritmo BT y la metodología propuesta son empleados los parámetros que se presentan en la Tabla 3.

Es de tener en cuenta que los parámetros presentados en la Tabla 3 han sido ajustados mediante un algoritmo heurístico de ensayo y error después de realizar múltiples simulaciones con diferentes valores de entrada.

Sistemas de prueba

Para validar la metodología propuesta son empleados dos sistemas de prueba disponibles en la literatura especializada. El primero corresponde a un sistema de 13,8kV, con una subestación, 3 alimentadores, 8 nodos de demanda con factor de potencia unitario y 7 tramos de red propuestos. La Tabla 4 muestra la información de los tramos de red y su topología se observa en la Figura 3.

Tabla 2. Características de los conductores.

Tipo α^c	Calibre	R [Ω /km]	X [Ω /km]	I _{max} [A]	Costos [USD\$]
1	2	0,8763	0,4133	180	1.986
2	1	0,6960	0,4133	200	2.790
3	1/0	0,5518	0,4077	230	3.815
4	2/0	0,4387	0,3983	270	5.090
5	3/0	0,3480	0,3899	300	8.067
6	4/0	0,2765	0,3610	340	12.673
7	336	0,0966	0,1201	600	23.419
8	556	0,0853	0,0950	720	30.070

Tabla 3. Parámetros empleados en el BT.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
α_1	2,000	Iteraciones	30
α_2	1,000	Parador local	1,000
B_L	100	Regulación de tensión [%]	± 5
Costo energía [US\$/kWh]	0,078	Tamaño del vecindario	2-10

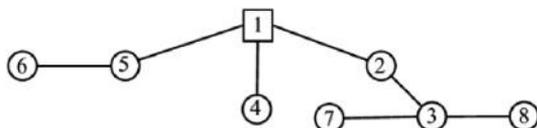


Figura 3. Sistema 8 nodos [4].

Tabla 4. Información de tramos de red y demanda para el sistema de prueba 1.

N_i	N_j	L_{ij} [km]	PD_j [kW]	QD_j [kVAr]	E_1 Calibre	E_2 Calibre
1	2	1	1.054,2	0	6	6
2	3	1	806,50	0	5	4
1	4	1	2.632,5	0	4	3
1	5	1	609	0	4	3
5	6	1	2.034,5	0	4	2
3	7	1	932,80	0	1	1
3	8	1	1.731,4	0	3	2

El segundo sistema de prueba corresponde a una adaptación del sistema de 13.2kV con 202 nodos. Este sistema cuenta con 2 subestaciones y 5 alimentadores. La topología de este sistema puede ser consultada en [17] y los datos de demanda y tramos de red se presentan en las Tablas 5 y 6.

Resultados E_1

Para el sistema de prueba 1 se encontraron 9 soluciones con menor valor respecto a los reportados

en [4], en la Tabla 7 se muestran los resultados comparativos, respecto a la referencia.

Al observar los datos de la Tabla 7 es claro que todas las soluciones tienen un costo total inferior al presentado en [4]; sin embargo, al detallar la segunda columna (costo de las pérdidas), se nota que todas las soluciones tienen un mayor valor en esta componente de la función objetivo. No obstante, la tercera columna (costo de los conductores) muestra un comportamiento opuesto, situación que es natural, ya que un menor calibre de conductor presenta mayores pérdidas.

La mejor solución encontrada (respuesta 1 de la Tabla 7), presenta, en relación con [4], una reducción en el costo operativo equivalente a 1,11% y su configuración en conductores se observa en la columna E_1 de la Tabla 4, mientras que la respuesta 7 de la Tabla 7 presenta una reducción de tan solo el 0,03%.

Por otro lado, para todas las respuestas presentadas en la Tabla 4 la peor regulación de tensión es menor al 2%, lo que garantiza calidad y eficiencia en los perfiles de tensión con los que se atiende la demanda.

En el caso del sistema de prueba 2, la mejor solución encontrada tiene como función objetivo US\$ 924.379,65 distribuidos US\$ 413.169,44 asociados a pérdidas técnicas y US\$ 511.210,21

Tabla 5. Información de los tramos de red para el sistema de prueba 2.

N _i	N _j	L _{ij} Z[km]	N _i	N _j	L _{ij} [km]
201	91	1.064	19	50	240
201	189	600	102	109	210
201	122	70	100	99	160
91	1	933	105	110	180
91	86	44	6	5	110
189	158	1.000	8	7	260
189	188	200	140	129	160
122	119	1.250	140	152	250
1	12	110	153	133	270
1	13	45	153	155	110
158	183	620	150	151	150
158	181	280	150	154	190
158	160	230	22	27	190
158	198	740	52	25	275
188	197	300	43	31	700
188	192	64	43	24	350
119	93	1.076	50	51	190
12	3	155	50	53	150
13	15	270	99	101	150
183	186	120	5	4	135
183	162	260	7	18	60
181	182	90	129	130	150
181	185	250	152	131	240
160	184	360	133	138	410
160	171	240	155	136	230
198	196	190	151	134	210
198	191	40	154	137	290
197	195	100	27	35	250
93	118	290	25	29	150
93	97	110	31	36	290
93	112	90	24	34	350
3	11	230	51	55	320
186	166	290	4	17	335
182	161	230	130	156	100
185	165	160	131	135	410
184	163	250	138	142	170
171	187	250	136	143	260
196	190	30	134	194	25
118	121	140	137	193	35
118	199	210	29	38	320
118	120	35	36	41	185
97	115	170	55	26	260
112	113	210	156	132	310
11	14	360	135	141	220
166	174	310	143	147	260
165	169	160	26	30	280
163	164	90	147	56	400
121	117	550	147	149	60
199	157	60	56	148	190

N _i	N _j	L _{ij} Z[km]	N _i	N _j	L _{ij} [km]
199	200	20	56	146	430
115	96	120	56	124	250
113	114	130	148	145	150
14	10	455	146	139	420
174	180	290	145	144	90
169	173	100	202	69	850
164	172	380	69	65	175
117	83	110	69	58	147
157	123	280	65	67	180
96	116	110	58	76	1060
114	111	110	58	68	58
10	9	160	67	66	236
10	85	120	67	84	80
180	159	250	67	92	230
180	177	160	76	72	210
83	103	200	76	77	140
83	108	130	66	63	123
83	98	360	72	71	270
83	32	115	72	79	200
83	106	180	77	78	60
123	126	80	63	61	165
116	95	215	71	73	60
111	94	90	71	20	530
9	87	375	79	81	200
9	2	295	78	82	660
159	128	780	61	57	354
159	179	120	73	74	290
103	104	170	20	46	230
108	107	170	20	48	370
32	54	120	20	49	100
32	21	120	82	89	331
32	19	180	57	59	30
106	102	150	74	80	230
126	127	740	46	33	475
95	100	290	46	39	250
94	105	230	48	44	120
87	88	220	49	47	200
2	6	142	49	45	100
2	8	40	59	60	120
128	140	110	33	28	315
128	153	120	47	42	220
128	150	90	60	62	300
179	176	150	28	23	260
54	22	210	42	40	320
21	52	110	62	70	62
19	43	40	70	64	195

Tabla 6. Información de demanda para el sistema de prueba 2.

Nodo i	PD_i [kW]	QD_i [kVA]	Nodo i	PD_i [kW]	QD_i [kVA]	Nodo i	PD_i [kW]	QD_i [kVA]
1	0	0	102	37	19	50	81	41
2	81	41	103	25	13	51	200	120
3	80	60	104	14	7	52	28	14
4	50	30	105	80	100	53	81	41
5	76	38	106	52	26	54	8	4
6	34	17	107	81	41	55	52	26
7	55	28	108	25	13	56	33	17
8	0	0	109	81	41	57	0	0
9	81	41	110	18	9	58	40	20
10	14	7	111	43	22	59	47	24
11	52	26	112	0	0	60	81	41
12	0	0	113	0	0	61	52	26
13	45	23	114	0	0	62	64	32
14	47	24	115	0	0	63	80	40
15	90	40	116	53	26	64	52	26
16	52	26	117	164	82	65	68	34
17	20	10	118	0	0	66	35	17
18	8	4	119	40	30	67	38	19
19	12	10	120	80	30	68	114	57
20	130	65	121	90	50	69	80	40
21	52	26	122	150	40	70	26	13
22	52	26	123	52	26	71	79	40
23	52	26	124	81	41	72	32	16
24	81	41	125	41	21	73	33	17
25	70	35	126	70	35	74	29	15
26	90	10	127	81	41	75	55	28
27	52	26	128	52	26	76	88	44
28	162	81	129	52	26	77	130	65
29	52	26	130	0	0	78	60	20
30	52	26	131	56	28	79	81	41
31	0	0	132	5	3	80	2	1
32	80	40	133	81	41	81	35	17
33	130	65	134	23	12	82	68	34
34	81	41	135	37	19	83	14	7
35	52	26	136	102	51	84	14	7
36	100	60	137	211	106	85	14	7
37	64	32	138	70	35	86	4	2
38	81	41	139	13	7	87	0	0
39	47	23	140	63	32	88	14	7
40	38	19	141	25	13	89	12	6
41	150	120	142	55	28	90	81	41
42	81	41	143	34	17	91	77	39
43	81	41	144	52	26	92	5	2
44	81	41	145	81	41	93	43	22
45	58	29	146	68	34	94	32	16
46	52	26	147	40	20	95	11	5
47	0	0	148	52	26	96	52	26
48	81	41	149	130	65	97	79	40
49	81	41	150	37	19	98	47	24
						99	52	26
						100	130	65
						101	81	41
						201	0	0
						202	0	0

Tabla 7. Mejores respuestas para el sistema de prueba 1.

Respuesta	Pérdidas [US\$]	Conductores [US\$]	Total [US\$]
1	222.045,34	125.436,09	347.481,44
2	211.263,24	138.192,94	349.456,18
3	234.619,43	116.506,30	351.125,73
4	216.324,91	134.365,88	350.690,79
5	216.514,82	134.365,88	350.880,70
6	227.296,93	121.609,04	348.905,97
7	220.001,80	131.293,07	351.294,87
8	211.100,71	138.192,94	349.293,65
9	214.907,99	134.747,66	349.655,65
Referencia [4]	208.313,60	143.081,51	351.395,11

correspondientes a la inversión en calibres de conductores. En esta solución debido a la baja demanda de los nodos existen únicamente tres tramos de red con calibre tipo 2 y el resto del sistema con calibre tipo 1.

Con respecto a la regulación de tensión, para este sistema de prueba se obtiene una regulación de tensión para todos los nodos inferior al 3,85%, es decir, que todos los nodos se encuentran dentro de los límites operativos establecidos.

Resultados E_2

La mejor solución encontrada para el sistema de prueba 1 en el escenario de variación de demanda fue de US\$ 206.134,06 equivalente a unas pérdidas de US\$ 107.254,54 con un costo de inversión de US\$ 98.879,51. El nodo con mayor caída de

tensión registró una regulación del 2,15%. Los calibres asociados a la mejor solución encontrada, se presentan en la columna E_2 de la Tabla 4.

La mejor solución encontrada para el sistema de prueba 2 en el escenario de variación de demanda fue de US\$ 633.518,67 equivalente a unas pérdidas de US\$ 196.139,38 con un costo de inversión de US\$ 437.379,29. El nodo con mayor caída de tensión registró una regulación del 4,49%.

Análisis comparativo

Al observar las diferencias en términos de función objetivo que presentan los escenarios de demanda E_1 y E_2 , se nota que influye considerablemente en la componente de la función objetivo asociada a la inversión en conductores, debido a que unas pérdidas anuales divididas en tres niveles asociados a máxima, media y mínima demanda, implican que una combinación más económica de calibres de conductores, lo que permite minimizar los costos de inversión y operación del sistema.

Las variaciones porcentuales entre ambos escenarios de demanda (reducción de E_2 con respecto a E_1) corresponde al 40,68% y 31,47%, para los sistemas de prueba 1 y 2, respectivamente. Estas reducciones tan significativas en la función objetivo implican que las DisCo deben tener en cuenta al momento de realizar la expansión de sus redes de distribución, información confiable de la demanda, ya que grandes diferencias entre el valor proyectado y el valor real pueden causar sobrecostos en la inversión y, por tanto, pérdidas económicas notables para la DisCo.

Tabla 8. Comparación del tipo de calibre empleado, según el escenario de demanda.

Calibre	Sistema de prueba 1		Sistema de prueba 2	
	E_1	E_2	E_1	E_2
1	1	1	145	145
2	0	2	15	23
3	0	2	10	12
4	3	1	10	3
5	1	0	7	5
6	1	1	0	0
7	0	0	3	2
8	0	0	0	0
Costo [US\$]	125.436,09	98.879,51	511.210,21	437.379,29

Según lo anterior, en la Tabla 8 se muestran las diferencias en el tipo de calibre según el sistema de prueba y el escenario analizado y la variación en los costos de inversión para cada caso.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología eficiente que permite la selección óptima de los calibres de los conductores para SD con una o varias fuentes, por medio de la implementación de la técnica metaheurística de optimización BT, con la que se alcanzaron soluciones de mejor calidad que las reportadas en la literatura especializada.

Se comprobó que la implementación de una técnica de optimización metaheurística, depende ampliamente del conocimiento que posea el investigador sobre el problema y del objetivo que se trace, razón por la que se requiere de procesos de parametrización heurística y de múltiples simulaciones para poder encontrar soluciones de buena calidad, que en algunos casos pueden corresponder a la solución óptima del problema.

Se propone para las DisCo, una herramienta de utilidad para proyectar la expansión de sus redes, principalmente a mediano y corto plazo, con el fin de que pueda ser atendida de forma eficiente y oportuna toda su demanda, además de que es útil para cumplir las políticas regulatorias vigentes relacionadas con reducción de pérdidas técnicas.

El modelo presentado en este trabajo queda como un punto de partida para futuras investigaciones en las que se consideren redes de distribución trifásicas, con presencia de generación distribuida y escenarios de generación y demanda para períodos de 24 horas, con el fin de que se puedan tener costos más cercanos a la realidad, en términos de inversión y operación para los SD.

Los resultados obtenidos, en términos de pérdidas técnicas, corresponden en realidad a un indicador operativo del sistema, y aunque su cálculo es exacto en función de los datos de demanda considerados, las DisCo no pueden esperar reducciones tan significativas en las pérdidas técnicas, debido a que la demanda es una variable estocástica y sus valores pico se presentan en intervalos muy breves de tiempo. Por lo anterior, para obtener un valor más

cercano a la realidad, se requiere el uso de curvas de carga discretizadas en períodos de 24 horas y para varios días de la semana.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Becas Doctorados Nacionales del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS), según convocatoria 727 de 2015 y al programa de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira.

REFERENCIAS

- [1] O.D. Montoya-Giraldo, "Planeación óptima de sistemas de distribución considerando reconectores automáticos para aislamiento de fallas y transferencia de carga", Master's thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Feb. 2014.
- [2] A. Grajales-Otalvaro, "Algoritmo búsqueda tabú aplicado al problema de la planeación de sistemas de distribución considerando ubicación y dimensionamiento de condensadores y reguladores de tensión", Master's thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Augu. 2014.
- [3] 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 N° 1, pp. 172-180. Feb. 2012. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2161349
- [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". In Simpósio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). Foz do Iguaçu, Brasil. Apr. 2014.
- [5] 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". In Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA). Medellín. Colombia. Sept. 2014. DOI: 10.1109/TDC-LA.2014.6955232
- [6] Zhuding Wang, Haijun Liu, D.C. Yu, Xiaohui Wang and Hongquan Song. "A practical

- approach to the conductor size selection in planning radial distribution systems". In IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 15 N° 1, pp. 350-354, Jan. 2000. DOI: 10.1109/61.847272
- [7] H. Falaghi, M. Ramezani, M.R. Haghifam and K.R. Milani, "Optimal selection of conductors in radial distribution systems with time varying load". 18th International Conference and Exhibition Electricity Distribution. Turin, Italy, 2005. DOI: 10.1049/cp: 20051351
- [8] F. Mendoza, D. Requena, J.L. Bernal-Agustin and J.A. Domínguez-Navarro. "Optimal Conductor Size Selection in Radial Power Distribution Systems Using Evolutionary Strategies". In IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. Caracas. Venezuela. 2006. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311451
- [9] S. Sivanagaraju, N. Sreenivasulu, M. Vijayakumar and T. Ramana. "Optimal conductor selection for radial distribution systems". In Electric Power Systems Research. Vol. 63 N° 28, pp. 95-103, Sept. 2002.
- [10] Damanjeet Kaur and Jaydev Sharma. "Optimal conductor sizing in radial distribution systems planning". In International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 30. N° 4, pp. 261-271. May 2008.
- [11] J.F. Franco, M.J. Rider, M. Lavorato and R. Romero. "Optimal Conductor Size Selection and Reconductoring in Radial Distribution Systems Using a Mixed-Integer LP Approach". In IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 28 N° 1, pp. 10-20. Feb. 2013. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2201263
- [12] G. Bakkabulindi, M.R. Hesamzadeh, M. Amelin and I.P. Da Silva. "Models for conductor size selection in Single Wire Earth Return distribution networks". In AFRICON. Port Louis. Mauricio. 2013. DOI: 10.1109/AFRCON.2013.6757773
- [13] F. Glover. "Tabu search fundamentals and uses", pp. 1-85. Fecha. 16/01/207 URL: <http://leeds-faculty.colorado.edu/glover/TS%20-%20Fundamentals%26Uses.pdf>
- [14] B.M. Batista and F. Glover, "Introducción a la búsqueda tabú", pp. 1-36. Fecha. 16/01/207 URL: [http://leeds-faculty.colorado.edu/glover/fred%20pubs/329%20-%20Introduccion%20a%20la%20Busqueda%20Tabu%20TS_Spanish%20w%20Belen\(11-9-06\).pdf](http://leeds-faculty.colorado.edu/glover/fred%20pubs/329%20-%20Introduccion%20a%20la%20Busqueda%20Tabu%20TS_Spanish%20w%20Belen(11-9-06).pdf)
- [15] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen and G.X. Luo. "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks". In IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 3 N° 2, pp. 753-762. May. 1988. DOI: 10.1109/59.192932
- [16] A.M. Eldurssi and R.M. O'Connell. "A Fast Nondominated Sorting Guided Genetic Algorithm for Multi-Objective Power Distribution System Reconfiguration Problem". In IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 30 N° 2, pp. 593-601. March. 2015. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2332953
- [17] O.D. Montoya, R.A. Hincapié and M. Granada. "Nuevo enfoque para la localización óptima de reconectores en sistemas de distribución considerando la calidad del servicio y los costos de inversión". In Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Vol. 24 N° 1, Jan. 2016, pp. 55-69.