

Reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas

Reconfiguration of electrical distribution systems using an ant colony optimization algorithm

SANDRA X. CARVAJAL

Ingeniera electricista y magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Integrante del grupo de investigación en redes de distribución y potencia de la misma universidad. Profesora de dedicación exclusiva de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. sxcarvajalq@unal.edu.co

JESÚS M. LÓPEZ

Ingeniero electricista y magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Integrante del grupo de investigación en manejo eficiente de la energía (GIMEL). Profesor del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. lezama@udea.edu.co

CÉSAR A. LEMOINE

Ingeniero electricista y especialista en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Profesor de dedicación exclusiva y director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación de la misma universidad. carangol@unal.edu.co

Clasificación del artículo: investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: 19 de abril de 2009

Fecha de aceptación: 21 de julio de 2009

Palabras clave: reconfiguración de sistemas de distribución, optimización basada en colonia de hormigas.

Key words: *distribution network reconfiguration, ant colony optimization.*

RESUMEN

Este artículo presenta una adaptación del algoritmo de optimización basado en colonias de hormigas, aplicado al problema de reconfiguración de circuitos de distribución de topología radial. El problema de reconfiguración es modelado como un problema de programación no lineal entero mixto. En este caso, la función objetivo

es la reducción de pérdidas. La principal ventaja del algoritmo propuesto es la utilización de un vector de memoria para cada individuo, haciendo que solamente se evalúen soluciones factibles. Para mostrar el desempeño del algoritmo propuesto, se realizaron ensayos en dos sistemas de distribución de pequeño y mediano porte ampliamente conocidos en la literatura.

ABSTRACT

This paper presents an adaptation of the ant colony optimization algorithm applied to the reconfiguration of radial electrical distribution networks. The reconfiguration problem is modeled as a mixed integer nonlinear programming problem. The objective function considered is the loss reduction. The main

advantage of the proposed algorithm is the use of a memory vector for each agent, which guarantees that only feasible solutions are evaluated. To show the performance of the proposed algorithm two tests were carried out in small and medium-size well known distribution systems.

* * *

1. Introducción

La reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica consiste en alterar la topología de las redes a través de la abertura o cierre de interruptores. Normalmente, este procedimiento se hace para aislar fallas, minimizar pérdidas activas, balancear carga entre alimentadores o para mejorar los niveles de tensión. El problema de reconfiguración se puede clasificar como un problema de programación no lineal entero mixto, que presenta el fenómeno de explosión combinatorial.

La mayoría de los sistemas de distribución son construidos de forma mallada y operados de forma radial. La restricción de radialidad es uno de los factores más complejos del problema de reconfiguración. Esta restricción no se puede representar mediante relaciones algebraicas simples, lo cual dificulta el uso de algoritmos basados en técnicas analíticas.

El problema de reconfiguración de circuitos fue propuesto por primera vez por Merlin y Back en 1975 [8]. En este primer trabajo se desarrolla un método heurístico constructivo y se propone como función objetivo la minimización de pérdidas de potencia, sin incluir restricciones operativas. Posteriormente, Shirmohammadi y Hong proponen una modificación a esta metodología mediante un análisis de flujo de potencia óptimo [10]. Esta metodología consiste en correr un flujo óptimo con todos los interruptores cerrados y después volver

a la topología radial abriendo los interruptores que presentan menor corriente.

A partir de 1990, aparecen nuevas técnicas de reconfiguración de circuitos basadas en redes neuronales artificiales [7], algoritmos genéticos [9] y sistemas expertos [11]. Las redes neuronales artificiales pueden ser utilizadas para aplicaciones en línea, debido a su rápido desempeño computacional; sin embargo, su mayor inconveniente es que requieren una cantidad considerable de datos para entrenamiento, el cual se debe hacer para cada red de distribución. Los algoritmos genéticos pueden encontrar una buena solución, pero los tiempos de cálculo para redes de grande porte resultan ser elevados. Las metodologías basadas en sistemas expertos presentan básicamente el mismo desempeño que los métodos basados en técnicas heurísticas.

La técnica de solución adoptada en este trabajo es conocida como ACO (*Ant Colony Optimization*). Esta técnica se encuentra dentro de las denominadas técnicas metaheurísticas. El primer algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas fue aplicado al *Problema del Viajante* [5]. A partir de dicho algoritmo, se han desarrollado varias aplicaciones a problemas clásicos de optimización, como problemas de enrutamiento, asignación, programación de horarios, etc. Una revisión bibliográfica de estas aplicaciones se puede consultar en [6]. En este artículo, se presenta una adaptación del algoritmo ACO aplicado al problema de reconfiguración de redes de distribución para mi-

nimización de pérdidas. Para adecuar el algoritmo AOC al problema de reconfiguración, se introdujo una modificación a la forma como los agentes buscan las propuestas de solución. Esto hace que el algoritmo sea más general y aumente el conjunto de soluciones factibles explorado.

2. Formulación del problema

El problema de reconfiguración de redes de distribución consiste en obtener dentro de todas las configuraciones posibles aquella que presente la menor pérdida de potencia activa y cumpla con un conjunto de restricciones, las cuales incluyen: radialidad, capacidad máxima de los alimentadores y límites de tensión. Este problema se puede expresar matemáticamente como se indica en las ecuaciones (1) a (6). En este caso, se ha utilizado la misma notación presentada en [2]. La primera restricción –ecuación (2)– corresponde a la condición de radialidad, la cual es mostrada de forma genérica, ya que no existe una forma eficiente de representar la radialidad usando relaciones algebraicas simples. Las ecuaciones (3) y (4) representan la ley de corrientes y voltajes de Kirchhoff respectivamente.

$$\text{Minimizar } f_c = \sum_{j=1}^n u_j R_j |I_j|^2 \quad j \in Nr \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\varphi(u) = 0 \quad (2)$$

$$g_i(I, u) = 0 \quad (3)$$

$$g_v(V, u) = 0 \quad (4)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad \forall i, i \in Nb \quad (5)$$

$$u_j |I_j| \leq I_{j\max} \quad \forall j, j \in Nr \quad (6)$$

Donde

Nr : número de ramos del sistema.

R_j : resistencia de la j-ésima rama del sistema.

I_j : corriente del j-ésimo rama del sistema.

u_j : variable binaria que indica si el j-ésimo rama está energizado o no.

Nb : número de barras del sistema.

V_i : voltaje de la i-ésima barra del sistema.

Para evaluar las pérdidas activas del sistema es necesario calcular un flujo de carga para redes radiales. A continuación, se describe el algoritmo de flujo de carga implementado.

3. Flujo de carga en redes de distribución

Existen diferentes métodos para calcular flujos de carga en sistemas de distribución. Estos métodos se pueden clasificar en dos grandes grupos: 1) modificaciones de los métodos utilizados en sistemas de potencia y 2) métodos de barrido. Dentro de los métodos de barrido –conocidos también como métodos Backward/Forward Sweep– se encuentran: el método de la suma de corrientes, método de la suma de potencia y método de la suma de impedancias. En [12] se presenta una revisión de estos métodos; en este caso, se implementó un método de suma de corrientes. Este método es uno de los más utilizados, debido a su velocidad de convergencia y fácil implementación [13]. El método implementado consiste en un proceso iterativo que recorre las barras extremas en dirección a la subestación y viceversa.

Inicialmente, se asigna a todas las barras una tensión igual a la tensión de la subestación. Con esta tensión inicial, se calculan las corrientes partiendo desde las barras finales en dirección a la subestación (proceso backward). Posteriormente, estas corrientes se utilizan para actualizar los valores de tensión, partiendo desde la subestación hasta las barras finales (proceso forward). Este proceso es repetido de manera iterativa hasta que se cumpla

con un criterio de parada. En este caso, el criterio de parada utilizado es la diferencia de los valores de tensión entre dos iteraciones seguidas. En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo utilizado. Una descripción detallada de este método se puede consultar en [3].

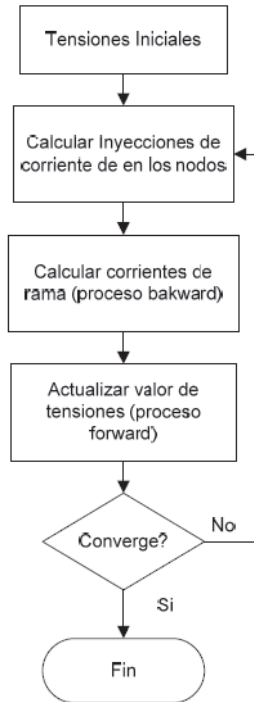


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo de flujo de potencia.

A continuación, se describen las ecuaciones usadas para el cálculo de corrientes, tensiones y pérdidas en el flujo de potencia. En la figura 2 se ilustra una rama que une las barras k-m de un sistema de distribución. En este caso, las diferentes variables involucradas (tensiones, potencias y corrientes) se han expresado en coordenadas rectangulares, en las cuales los subíndices *r* e *i* hacen referencia a las partes real e imaginaria, respectivamente.

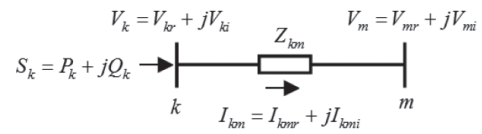


Figura 2. Rama de un sistema de distribución.

La corriente conjugada de carga en la barra I_k^* se puede calcular como la razón entre la potencia aparente y la tensión, como se muestra en la ecuación (7).

$$I_k^* = \frac{S_k}{V_k} = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) - j(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (7)$$

Haciendo e igualando con la expresión (7) se encuentran las expresiones (8) y (9).

$$I_{kr} = \frac{P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (8)$$

$$I_{ki} = \frac{P_k V_{ki} + Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (9)$$

Por otro lado, la tensión V_k se puede expresar en función de la corriente y la impedancia de la línea como se indica en la ecuación (10).

$$V_k = V_m + Z_{km} I_{km} \quad (10)$$

Expresando todas las variables en sus componentes real e imaginario se obtienen las ecuaciones (11) y (12).

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km} I_{kmr} + x_{km} I_{kmi} \quad (11)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km} I_{kmi} + x_{km} I_{kmr} \quad (12)$$

Las pérdidas activas y reactivas del sistema se pueden expresar mediante las ecuaciones (13) y (14), donde L es el conjunto de todos los ramos del sistema de distribución.

$$P_i = \sum_{(k,m) \in L} r_{km} I_{km}^2 \quad (13)$$

$$i = \sum_{(k,m) \in L} I_{km}^2 \quad (14)$$

4. Algoritmo de solución

El algoritmo ACO está inspirado en el comportamiento real de las hormigas. Estos insectos son capaces de encontrar la ruta más corta entre su colonia y una fuente de alimento. Esto se debe a que las hormigas pueden “transmitir información” entre ellas, gracias a un rastro de feromona que cada una de ellas deja al desplazarse. Cuando una hormiga descubre una fuente de alimento retorna a la colonia, siguiendo el rastro de feromona, reforzando el depósito de ésta. La concentración mayor de esta sustancia en este camino atrae a otras hormigas de la colonia, las cuales en su recolección de alimento siguen el mismo camino y refuerzan la feromona sobre éste. Si existen varios caminos de feromona que conducen a la misma fuente de alimento, las hormigas seleccionan el camino que va a ser recorrido:

Paso 1: se define el número de hormigas de la colonia y se posicionan todas en los nodos iniciales de los alimentadores. Se establecen los valores iniciales para la intensidad de feromona de todos los ramos del sistema.

Paso 2: cada individuo selecciona un camino por seguir, teniendo en cuenta la intensidad de feromona y una función de mérito preestablecida, de acuerdo con las características físicas y topológicas de los sistemas de distribución.

Paso 3: después de construir las configuraciones, la función objetivo es evaluada con las restricciones

del problema de reconfiguración (se debe calcular un flujo de carga), analizándose el desempeño de cada individuo separadamente.

Paso 4: se actualiza la intensidad de feromona. De la misma forma que acontece con las hormigas reales, la feromona virtual se evapora con el pasar del tiempo, perdiendo intensidad. Por otro lado, si una topología dada es establecida, la intensidad de la feromona se incrementa a través de una regla de transición.

Paso 5: se verifica la convergencia del algoritmo, finalizando el proceso si el número máximo de iteraciones es alcanzado, o cuando todas las hormigas seleccionen la misma configuración.

En la figura 3 se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo de reconfiguración descrito.

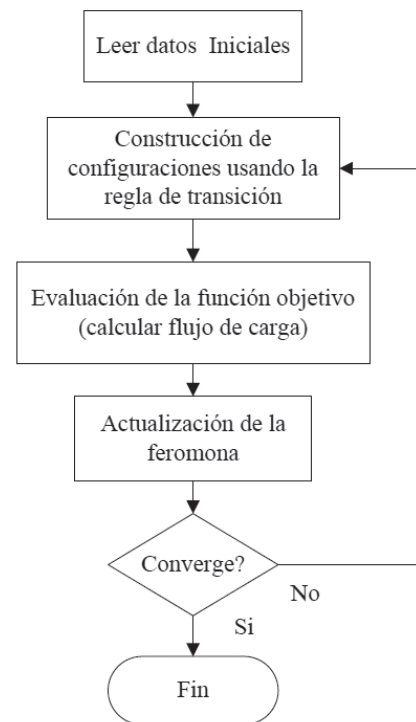


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de reconfiguración.

4.1 Regla de transición

En el modelo propuesto, la transición de la hormiga k desde la barra i hasta la barra j en la iteración t , depende de los siguientes factores:

1. Si la barra j ya fue visitada por la hormiga k . Existe una memoria para cada individuo, la cual es representada por el conjunto J^k . Este conjunto contiene todas las barras que la k -ésima hormiga visitó. Cuando una barra j es visitada por la hormiga k , ésta es adicionada al conjunto para evitar una nueva visita y de este modo conservar la radialidad del sistema. Inicialmente, el conjunto J^k sólo contiene los nodos iniciales.
2. La intensidad de feromona $\tau_{ij}(t)$ presente en los ramos que conectan dos barras. Esta intensidad es actualizada en cada iteración para reflejar las experiencias adquiridas en la construcción de una configuración radial.
3. Parámetro de visibilidad n_{ij} , definido como el inverso de la impedancia del ramo entre las barras i y j .

De manera general, la regla de transición representa la probabilidad de la hormiga k de ir de la barra i para la barra j en la iteración t , la cual está dada mediante la ecuación (15).

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [n_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in J^k, j \notin J^k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [n_{ij}]^\beta} & \text{si } i \in J^k \text{ y } j \notin J^k \\ 0 & \text{si } i \notin J^k \text{ o } j \in J^k \end{cases} \quad (15)$$

Donde α y β son parámetros ajustables que controlan el peso relativo de la feromona y la visibilidad, respectivamente. En la figura 4 se ilustra el proceso de transición para un sistema de 16 barras y tres alimentadores principales. Inicialmente, el conjunto J^k sólo contiene los nodos iniciales de los alimentadores; esto es $J^k = [1 \ 2 \ 3]$. A partir de este punto, se debe hacer la transición para uno de los nodos

adyacentes, los cuales, en este caso, son los nodos [4 8 13]. Al aplicar la regla de transición se encuentra que la hormiga debe desplazarse al nodo 4. En este caso, el conjunto J^k es actualizado $J^k = [1 \ 2 \ 3 \ 4]$ y el nuevo conjunto de nodos adyacentes a los cuales se debe aplicar nuevamente la regla de transición es [5 6 8 13]. El proceso se repite de manera iterativa hasta que todos los nodos sean visitados formando una configuración radial.

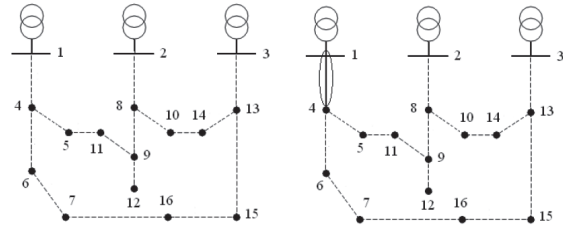


Figura 4. Proceso de transición.

4.2 Actualización de la feromona

La actualización de la feromona se ha implementado como se sugiere en [14]. Después de encontrar el conjunto de las m soluciones factibles construidas por las hormigas, se ejecuta la subrutina de flujo de potencia para calcular la función objetivo. Entonces, las m hormigas adicionan cierta cantidad de feromona $\Delta\tau_{ij}(t)$ a los ramos (i, j) que hacen parte de J^k , esto hace que los ramos sean más atractivos para las futuras hormigas en la construcción de nuevas soluciones. En la iteración t , la hormiga k adiciona una cantidad de feromona $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ en la rama (i, j) dado por la ecuación (15):

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} K / r_{ij} & \text{si } (i, j) \in S^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin S^k(t) \end{cases} \quad (15)$$

Donde $S^k(t)$ es el conjunto de circuitos energizados pertenecientes a la configuración radial encontrada por la hormiga k en la iteración t , y r_{ij} es la resisten-

cia del ramo entre las barras i y j . K es un parámetro ajustable usado para determinar la tasa de feromona que es adicionada a las líneas.

Con el paso del tiempo cierta cantidad de feromona se evapora, por tanto, se debe utilizar un coeficiente de reducción de intensidad de feromona denominado ρ cuyos valores se encuentran en el intervalo $[0, 1]$. La regla de actualización de la cantidad de feromona resultante es aplicada en todos los ramos y está dada por la ecuación (16):

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (16)$$

En este caso, $\Delta \tau_{ij}(t)$ está dado por la expresión (17):

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (17)$$

Donde m representa el número de hormigas. Inicialmente, se establece una pequeña cantidad de feromona igual en todas las ramas dada por τ_0 .

5. Pruebas y resultados

El desempeño de la metodología propuesta de reconfiguración se verificó utilizando dos sistemas de prueba de pequeño y mediano porte ampliamente utilizados en la literatura. El algoritmo se implementó en Matlab y se utilizó un computador de doble núcleo de 2,0 GHz y 2GB de RAM.

5.1 Sistema de 14 barras¹

Este sistema consta de 14 barras, una carga total de 28,9 MW y tres interruptores de interconexión normalmente abiertos distribuidos en tres alimentadores

¹ Basado en [4].

principales. Para distinguir los interruptores de los nodos, los primeros están precedidos por la letra s . En la figura 5 se muestra el esquema de conexiones inicial.

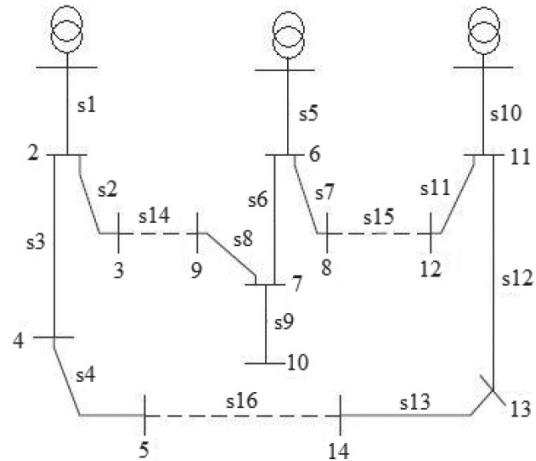


Figura 5. Sistema de 16 barras.

Los parámetros utilizados en el algoritmo fueron $\alpha=1$, $\beta=1$, $\rho=0.4$, $K=1$, $\tau_0=0.2$. El número de hormigas utilizadas fue diez y el número de iteraciones veinte. En este caso, el tiempo de procesamiento fue pequeño y el algoritmo convergió después de 1,54 segundos (en la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos). En este caso se obtuvieron tres esquemas de reconfiguración, dentro de los cuales se ha destacado con asterisco la mejor solución reportada en la literatura. Se puede observar que en este sistema es posible lograr una reducción de las pérdidas del 8,86%, solamente intercambiando dos interruptores.

Tabla 1. Resumen de resultados de reconfiguración para el sistema de 14 barras.

Configuración	Interruptores abiertos	Pérdidas (kW)	% Reducción
Inicial	14, 15, 16	511,44	---
*Solución 1	7, 8, 16	466,13	8,86
Solución 2	7, 8, 13	492,81	3,64
Solución 3	4, 7, 8	479,27	6,29

5.2 Sistema de 33 barras²

Este sistema tiene una carga total de 3.715 kW y presenta cinco interruptores normalmente abiertos. Los parámetros utilizados en este caso fueron $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0,4$, $K=1$, $\tau_0=0,2$, el número de hormigas utilizadas fue veinte y el número de iteraciones cien. Los resultados obtenidos de las mejores configuraciones se muestran en la tabla 2.

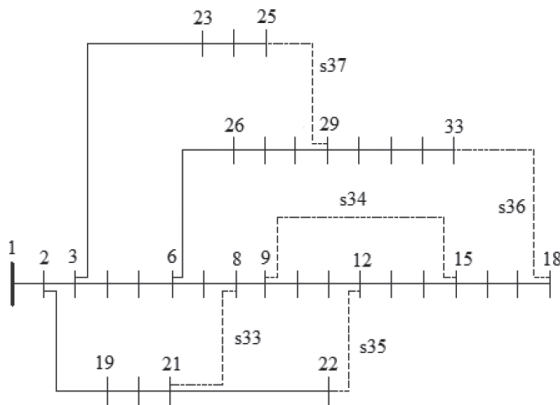


Figura 6. Sistema de 33 barras.

Tabla 2. Resumen de los resultados de reconfiguración para el sistema de 33 barras.

Configuración	Interruptores abiertos	Pérdidas (kW)	% Reducción
Inicial	33, 34, 35, 36, 37	202,676	--
*Solución 1	7, 9, 14, 32, 37	139,548	31,146
Solución 2	7, 9, 14, 28, 32	139,976	30,936
Solución 3	7, 10, 14, 32, 37	140,277	30,787
Solución 4	7, 10, 14, 28, 32	140,704	30,577

En este caso, el algoritmo propuesto también ha encontrado la mejor solución reportada en la literatura (solución 1). En este caso, el tiempo de cálculo fue de 12,75 segundos. El aumento en el tiempo de cálculo está estrechamente relacionado con el tamaño del espacio de búsqueda, que es mucho mayor comparado con el primer caso (existen 2^{37} configuraciones posibles entre factibles e infactibles). Además, se puede observar que las soluciones encontradas son bastante similares entre sí y todas representan un porcentaje importante en la reducción de pérdidas.

6. Conclusiones

En este artículo se presentó un algoritmo de reconfiguración de sistemas de distribución de topología radial, basado en colonia de hormigas. Al utilizarse un vector de memoria para cada individuo se garantiza que se conserve la radialidad del sistema. El algoritmo implementado, a partir de la metaheurística ACO, fue testado en dos sistemas de distribución de pequeño y mediano porte. En ambos casos, el algoritmo encontró la mejor solución reportada en la literatura. Es importante recalcar que dada la naturaleza del método no se puede garantizar que se encuentre siempre el óptimo global del problema, sin embargo, se pueden encontrar soluciones de muy buena calidad. El algoritmo propuesto muestra ser robusto y rápido y puede ser aplicado en sistemas reales. En una etapa posterior se pretende adaptar el algoritmo para aplicarlo al problema de restauración del servicio en tiempo real.

² Basado en [1].

Referencias bibliográficas

- [1] M.E. Baran and F.F. Wu. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No 2, pp. 1401-1407, 1989.
- [2] E.M. Carreño, N. Moreira and R.A. Romero. "Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm". *IEEE Power Engineering Society, General Meeting, 2007*, pp. 1-6.
- [3] C.S. Cheng and D. Shirmohammadi. "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, 1995, pp. 671-679.
- [4] S. Civanlar, J. Grainger and S. Lee. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3 No. 3, 1988, pp. 1217-1223.
- [5] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Corloni A. "Ant System: optimization by a colony of cooperating agents". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, 1992, pp. 1484-1491.
- [6] M. Dorigo, M. Birattari and T. Stutzle. "Ant Colony Optimization". *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 1, 2006, pp. 28-39.
- [7] K. Kim, Y. Ko and K.H. Hung. "Artificial neural network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, 1993, pp. 1356-1366.
- [8] A. Merlin and G. Back "Search for a minimum loss operational spanning tree configuration for an urban power distribution system". *Proceedings of the fifth Power System Conference (PSC)*. Cambridge, pp. 1-18.
- [9] K. Nara, T. Satoh and M. Kitagawa. *Distribution system loss minimum re-configuration by genetic algorithm*. Proceedings of the 3rd Symposium on Expert Systems Application to Power System (ESAPS). Tokyo and Kobe, Japan, 1991, pp. 724-730.
- [10] Shirmohammadi D. and Hong H.W. (1989). *Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reductions*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 4, No 2, pp. 1492-1498.
- [11] T. Taylor and D. Lubkeman. "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 5, 1990, pp. 239-246.
- [12] M.S. Srinivas. "Distribution load flows: a brief review". *Proceedings of IEEE Winter Meeting*, Vol. 2, 2000, pp. 942-945.
- [13] J.H. Teng. "Modelling distributed generators in three-phase distribution load flow". *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 2, No 3, 2008, pp. 330-340.
- [14] P.S. Waldemar, L.G. Da Silva, R. Romero and J.R. Mantovani. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais utilizando algoritmo baseado em colônia de formigas*. XXXIX Brazilian Symposium of Operational Research. Fortaleza (Brasil), 2007, pp 1-11.