

# Comprobación de la eficacia de métodos de reconfiguración de redes de distribución

Juan Jesús Puga Mora  
Sección de Estudios de Posgrado e  
Investigación, ESIME Zacatenco  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
jpugam1200@alumno.ipn.mx

Ricardo Octavio Mota Palomino  
Sección de Estudios de Posgrado e  
Investigación, ESIME Zacatenco  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
rmotap@ipn.mx

Iván Archundia Aranda  
Sección de Estudios de Posgrado e  
Investigación, ESIME Zacatenco  
Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México  
iarchundia@ipn.mx

**Resumen**—En este trabajo se verifica mediante experimentos virtuales si el método de reconfiguración para minimización de pérdidas técnicas de Shirmohammadi y Hong, proporciona la solución óptima para una red de prueba monofásica de diez nodos, trece líneas. El método se basa en una solución de flujos de potencia para redes de distribución y en la solución del patrón de flujo óptimo. El proceso de reconfiguración se lleva a cabo mediante la remoción de las ramas de la red de prueba y termina cuando la configuración final es radial y todos los nodos de la red permanecen conectados, mientras se respetan las restricciones de corriente máxima en los alimentadores y caída de voltaje en los nodos. Los experimentos virtuales con los que se verifica la eficacia, son las soluciones de flujos de potencia de todas las configuraciones posibles de la red en cuestión, a este conjunto de experimentos se le llama método Exhaustivo. Los resultados obtenidos muestran que al aplicar el método de Shirmohammadi y Hong en la red de prueba se llega a la solución óptima y se mejora el perfil de voltaje en la mayoría de los nodos de la red.

**Palabras Clave**—árbol de expansión, minimización de pérdidas, redes de distribución, reconfiguración de redes de distribución

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución típicamente comienzan con la subestación de distribución, alimentada por una o más líneas de transmisión, cada subestación suministra energía a uno o más alimentadores primarios. Salvo alguna excepción, la configuración de los alimentadores es radial, esto significa que existe un sólo camino para el flujo de potencia entre la subestación de distribución (nodo raíz) y el usuario [1]. Este tipo de configuración tiene la facilidad para aislar las ramas ante una falla y volver a transferir parcial o totalmente las ramas aisladas, ya sea a otro alimentador o a otra rama del mismo alimentador.

La reconfiguración de redes de distribución se define como el proceso de modificación de la topología de los alimentadores de distribución mediante la apertura y el cierre de pares de ramas o interruptores de la red [2], [3].

El problema de reconfiguración de redes de distribución fue propuesto por primera vez por Merlin y Back en [5] (citado por Shirmohammadi y Hong en [4]), es definido como: “La búsqueda de una red radial que minimice las pérdidas  $I^2R$  en las ramas mientras se satisfacen las restricciones (por ejemplo, corriente máxima de los alimentadores y caída de voltaje en los nodos) del sistema”. Asimismo, Ahmadi y Martí en [6]

definen el problema de reconfiguración como: “La búsqueda de un árbol de expansión que imite, tanto como sea posible, el mismo patrón de flujo de la red mallada”.

Aunque los métodos analíticos proveen varias ventajas en cuanto a la formulación matemática (por ejemplo: se pueden agregar más restricciones, pueden ser multiobjetivos, se conoce la brecha de optimalidad en cada iteración, entre otras) y pueden obtener la solución óptima bajo restricciones de operación específicas, no tienen una buena solución inicial para comenzar el proceso iterativo, resultando imprácticos para redes de gran escala [2], [4], [6], siendo más adecuados los métodos heurísticos para resolver este tipo de problemas.

Taylor y Lubkeman en [7] mencionan que evaluar cada posible configuración de los alimentadores para la reconfiguración de redes de distribución no es práctico, ya que podrían existir demasiadas configuraciones. Para reducir el tamaño de estas evaluaciones, son utilizados los métodos heurísticos. Estos métodos tienen ventajas en términos de velocidad, facilidad de uso, y aplicabilidad [8].

Entre los métodos heurísticos más citados y antiguos, se encuentra el método de Shirmohammadi y Hong [4], que tiene como objetivo reconfigurar la red de distribución mediante la apertura y cierre de ramas. En este método, se cierran inicialmente todas las ramas de la red. Posteriormente es calculado el patrón de flujo óptimo considerando todas las mallas para la toma de decisiones sobre qué rama remover, con la finalidad de minimizar las pérdidas  $I^2R$  de los alimentadores. Los autores llaman patrón de flujo óptimo al conjunto de flujos de corriente en las ramas de una red mallada que resultan en las pérdidas resistivas mínimas de los alimentadores. Los autores garantizan que se llega a una solución óptima o cercana a la óptima, esta afirmación genera controversia, debido a que los métodos heurísticos no tienen criterios que garanticen la optimalidad, razón que motiva a la búsqueda exhaustiva (búsqueda del árbol con menores pérdidas evaluando todas las posibilidades) de la solución óptima.

Con el paso del tiempo han surgido diferentes métodos para resolver el problema de reconfiguración, muchos han utilizando como base el método de Shirmohammadi y Hong. Por ejemplo, en 1992, Goswami y Basu en [9] proponen un método basado en el patrón de flujo óptimo de Shirmohammadi

y Hong, dicho método elimina el efecto de manipular múltiples mallas simultáneamente y se puede llegar al mismo resultado o a uno mejor al ser calculado un patrón de flujo óptimo en el que se abre y se cierra una rama a la vez, sin considerar esencial la exactitud absoluta. A esto se le suma la interrogante sobre cómo saber a qué solución se llega si los métodos heurísticos no garantizan la solución óptima.

Por otra parte, Zhu en [10] confirma lo mencionado por Goswami y Basu en [9], en donde el método elimina el efecto de manipular múltiples mallas a la vez. Esto ha generado controversia sobre qué método utilizar para la reconfiguración de las redes de distribución pues ambos garantizan una solución óptima o cercana a la óptima. Goswami y Basu mencionan en [9] que la limitante que tiene el método de Shirmohammadi y Hong es que, el patrón de flujo óptimo es calculado para una red mallada, argumentando que no corresponde a la operación de las redes de distribución. La alternativa inmediata a esa limitante es considerar una malla a la vez, y regresar a la configuración radial abriendo la rama por la que fluye la menor corriente resultante del patrón de flujo óptimo mejorado. Pero considerar una malla a la vez contradice al método de Shirmohammadi y Hong, donde es un hecho que las pérdidas mínimas son obtenidas cuando se cierran todas las ramas simultáneamente. Un ejemplo más reciente es el método de Ahmadi y Martí en [6], donde critican el método de Shirmohammadi y Hong, mencionando que para cada acción de los interruptores se necesita un estudio nuevo de flujos de potencia, a diferencia del método que proponen, en el que sólo es necesario hacer el estudio una vez. Además, afirman que Shirmohammadi y Hong en [4] no mencionan explícitamente cómo se verifica el cumplimiento de la condición de radialidad.

El problema que se aborda en este trabajo es que, pese a que sigue siendo utilizado el método de Shirmohammadi y Hong para resolver el problema de reconfiguración de redes de distribución desde finales de los años ochenta, en la literatura se han realizado trabajos de reconfiguración de redes de distribución utilizando métodos heurísticos, sin garantizar que la solución sea óptima [2]–[4], [9].

En la siguiente sección se describen el método Exhaustivo, y el método de Shirmohammadi y Hong; en la sección III se muestra la información del caso de estudio utilizado para el proceso de reconfiguración; los resultados del proceso de reconfiguración son mostrados en la sección IV; y las conclusiones obtenidas con la investigación realizada en este artículo son mostradas en la sección V.

## II. MÉTODOS DE RECONFIGURACIÓN

### A. Método Exhaustivo

La finalidad de este método es encontrar el árbol óptimo mediante la solución de flujos de potencia de cada árbol de expansión posible para los dos escenarios de carga. La importancia de conocer el árbol óptimo radica en la certeza de saber si al aplicar el método de reconfiguración de Shirmohammadi y Hong se llega a la solución óptima. La reconfiguración por el método Exhaustivo utilizada en este artículo es dividida

en dos partes; la primera se centra en la teoría de grafos aplicada a redes de distribución, que consiste en encontrar la cantidad de árboles de expansión posibles del sistema de prueba y enumerarlos, empleando el Matrix-Tree Theorem (MTT) [11]; y la segunda en realizar las simulaciones de flujos de potencia para cada árbol de expansión y encontrar el árbol óptimo (un árbol es un grafo conectado sin ciclos, y un grafo es un conjunto de vértices  $X$  conectados por líneas  $U$ , así pues,  $G = (X, U)$ ), considerado como el que tiene menores pérdidas  $I^2R$  mientras permanecen conectados todos los nodos de la red y se respeten las restricciones de corriente máxima en las ramas, y caída de voltaje en los nodos de la red.

El proceso del cálculo de los árboles de expansión y su enumeración se menciona a continuación, según Trent en [12], primero se le debe asignar una etiqueta arbitrariamente a cada nodo y arco del grafo, de la misma manera a cada arco se le debe asignar un sentido, el cual puede ser representado por la punta de una flecha y se siguen los siguientes pasos:

- 1) Definición de las matrices de incidencia y de incidencia reducida. Considerando un grafo que contiene  $\beta$  arcos y  $v+1$  nodos, éste puede ser representado como una matriz rectangular  $M$  de orden  $((v+1)*\beta)$ , a la que se le llama Matriz de incidencia (MI), donde los elementos de la matriz son asignados como se menciona a continuación. Siendo  $jk$  un elemento de la matriz  $M$ , el cual ocupa la  $j$  –ésima fila y la  $k$  –ésima columna. Entonces  $M_{jk} = 1$  si la  $k$  –ésima rama sale del nodo  $j$  –ésimo,  $M_{jk} = -1$  si la  $k$  –ésima rama entra al nodo  $j$  –ésimo, y  $M_{jk} = 0$  si la  $k$  –ésima rama no intersecta el nodo  $j$  –ésimo. La Matriz de incidencia reducida (MIR) se representa por una matriz rectangular  $N$  de orden  $(v*\beta)$ . Para determinarla se debe eliminar cualquier fila de la MI.
- 2) Cálculo del número total de árboles posibles. El número de árboles posibles es igual al determinante del producto de  $NN'$ , donde  $N'$  es la transpuesta de  $N$ .
- 3) Cálculo de la lista de árboles posibles. Es necesario definir una matriz diagonal cuadrada,  $B$ , de orden  $\beta$ , en la cual los elementos de la diagonal principal sean las etiquetas de cada arco. Ahora, la lista de árboles posibles es igual al determinante del producto de las matrices  $NBN'$ , en donde cada sumando representa un árbol de expansión diferente.

La segunda parte del método Exhaustivo, correspondiente a la solución de flujos de potencia de cada árbol de expansión se resuelve utilizando el método de flujos de potencia descrito por Shirmohammadi et al. en [13]. Finalmente se identifica el árbol con menores pérdidas.

### B. Método de Shirmohammadi y Hong

Este método consta de los siguientes pasos: (1) leer la información de la red, (2) cerrar todas las ramas de la red, (3) calcular el patrón de flujo óptimo, y (4) apertura de la rama con la menor corriente, mientras se respetan las restricciones

de la red. El método concluye cuando la red se vuelve radial y todos los nodos permanecen conectados.

Para determinar el patrón de flujo óptimo, el problema de optimización es definido de la siguiente manera [4],

$$\underset{\underline{J}}{\text{Min}} \sum_{b=1}^m R_b |J_b|^2 \quad (1)$$

sujeto a

$$[A]\underline{J} = \underline{I}$$

donde,

$R_b$  : resistencia de la rama  $b$ ,

$J_b = J_b^r + jJ_b^i$  : flujo de corriente compleja en la rama  $b$ ,

$\underline{J} = \underline{J}^r + j\underline{J}^i$  : vector- $m$  de las corrientes de rama complejas,

$\underline{J}_b$ ,

$\underline{I} = \underline{I}^r + j\underline{I}^i$  : vector- $n$  de inyecciones de corriente nodales complejas,  $I_p$

$[A]$  : matriz  $n \times m$  de incidencia de red, cuyas entradas  $(a_{p,b})$  son:

- = 1 si la rama  $b$  empieza del nodo  $p$ ,
- = -1 si la rama  $b$  termina en el nodo  $p$ , o
- = 0 si la rama  $b$  no está conectada al nodo  $p$ ,

$m$  : número total de ramas,

$n$  : número total de nodos de la red,

$r$  : componente real,

$i$  : componente imaginaria.

Las inyecciones de corriente nodal ( $I_p$ ) son calculadas de la técnica de flujos de potencia en corriente alterna (CA). En este artículo se utilizó el método de flujos de potencia para redes de distribución débilmente malladas descrito por Archundia-Aranda y Mota-Palomino en [15].

La ecuación (1) puede ser descompuesta en componentes real e imaginaria:

$$\underset{\underline{J}^r}{\text{Min}} \sum_{b=1}^m R_b |J_b^r|^2 \quad (2)$$

sujeto a

$$[A]\underline{J}^r = \underline{I}^r$$

y

$$\underset{\underline{J}^i}{\text{Min}} \sum_{b=1}^m R_b |J_b^i|^2 \quad (3)$$

sujeto a

$$[A]\underline{J}^i = \underline{I}^i$$

Los Lagrangeanos asociados a (2) y (3) son:

$$\underset{\underline{J}^r, \underline{\lambda}^r}{\text{Min}} F^r = \sum_{b=1}^m R_b (J_b^r)^2 - \underline{\lambda}^r ([A]\underline{J}^r - \underline{I}^r) \quad (4)$$

y :

$$\underset{\underline{J}^i, \underline{\lambda}^i}{\text{Min}} F^i = \sum_{b=1}^m R_b (J_b^i)^2 - \underline{\lambda}^i ([A]\underline{J}^i - \underline{I}^i) \quad (5)$$

donde  $\underline{\lambda}^r$  y  $\underline{\lambda}^i$  son los vectores fila de los multiplicadores de Lagrange teniendo dimensión  $n$ . La solución para (4) y (5) puede ser obtenida de:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^r}{\partial J_b^r} = 0; & \quad \frac{\partial F^r}{\partial \lambda_p^r} = 0 & b = 1, 2, \dots, m \\ \frac{\partial F^i}{\partial J_b^i} = 0; & \quad \frac{\partial F^i}{\partial \lambda_p^i} = 0 & p = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

De (4), (5) y (6) las derivadas parciales con respecto a  $J_b$  dan como resultado:

$$\begin{aligned} 2R_b J_b^r + \lambda_p^r - \lambda_q^r &= 0 \\ 2R_b J_b^i + \lambda_p^i - \lambda_q^i &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$b = 1, 2, \dots, m$

donde  $p$  y  $q$  denotan los nodos de salida y llegada de la rama  $b$ , respectivamente. La sumatoria de (7) sobre todas las mallas de la red resulta en:

$$\sum_{b \in L} R_b J_b^r = 0 \quad (8)$$

y

$$\sum_{b \in L} R_b J_b^i = 0 \quad (9)$$

donde  $L$  es el conjunto de ramas que están en las mallas de la red. Multiplicando (9) por el operador  $j$  y sumándolo a (8), resulta:

$$\sum_{b \in L} R_b (J_b^r + jJ_b^i) = 0 \quad (10)$$

o

$$\sum_{b \in L} R_b J_b = 0 \quad (11)$$

La ecuación (11) es la Ley de Kirchhoff de Voltaje (KVL) para las mallas de la red con las impedancias de rama reemplazadas por sus componentes resistivas. Por lo tanto, las corrientes de rama para el patrón de flujo óptimo puede ser determinado, resolviendo la KVL y la Ley de Kirchhoff de Corriente (KCL) de una red puramente resistiva, cuyas resistencias de rama son igual a la componente resistiva de las impedancias de rama.

El proceso de solución para determinar el patrón de flujo óptimo de la red mallada se puede resumir de la siguiente manera:

- 1) Solución de flujos de potencia en CA de la red débilmente mallada para determinar las inyecciones de corriente nodales.

- 2) Convertir la red débilmente mallada en una red puramente resistiva, eliminando la componente reactiva de la impedancia de cada rama.
- 3) Calcular los flujos de corriente de las ramas de la red puramente resistiva para las inyecciones de corriente nodales calculadas en el paso 1.

Una vez que se conoce el patrón de flujo óptimo, se abre la rama que lleve la corriente menor. Si la configuración resultante de la red viola alguna restricción, la rama que fue abierta se debe de cerrar, y se debe de abrir la rama con la siguiente corriente menor. Por último, el proceso concluye cuando la red se vuelve radial.

### III. CASO DE ESTUDIO

El sistema de prueba utilizado en este artículo para el proceso de reconfiguración es una red monofásica de distribución débilmente mallada a potencia constante de 10 nodos, 13 líneas, con un nodo raíz con voltaje de  $5.7735\angle 0^\circ$  kV (tomada de [14]), se muestra en la Figura 1. La impedancia en serie de las secciones del alimentador es  $(0.391 + j0.106)$  en  $\Omega/km$  por fase a  $60$  Hz. Las restricciones para reconfiguración son: corriente máxima ( $I_{max} < 194A$ ) en las ramas y caída de tensión ( $E_{max} \leq 5\%$ ) en los nodos de la red.

La información de las cargas de cada nodo se muestran en la Tabla I.

TABLA I  
DATOS DE LAS CARGAS

Nodos	Demanda de las cargas	
	P (kW)	Q (kVAr)
A	0.00	0.00
B	200.00	133.33
C	166.67	100.00
D	33.33	30.00
E	200.00	133.33
F	433.33	366.67
G	433.33	333.33
H	33.33	30.00
I	266.67	200.00
J	100.00	33.33

### IV. RESULTADOS

#### A. Método Exhaustivo

Para el cálculo de los árboles de expansión del sistema de prueba se sigue el procedimiento descrito en la sección II-A. Como resultado se tiene un total de 214 árboles de expansión posibles para el sistema de prueba, de los cuales también es conocida su etiqueta. La importancia de encontrar estos árboles de expansión es que, permite realizar la solución de flujos de potencia para todas las posibilidades de red que pudiesen existir, con la finalidad de encontrar el árbol de expansión con las menores pérdidas  $I^2R$ .

En la Figura 2 se muestran los resultados gráficos de las pérdidas en los árboles que cumplen con al menos una restricción y en la Figura 3 se muestra el perfil de voltaje de cada uno.

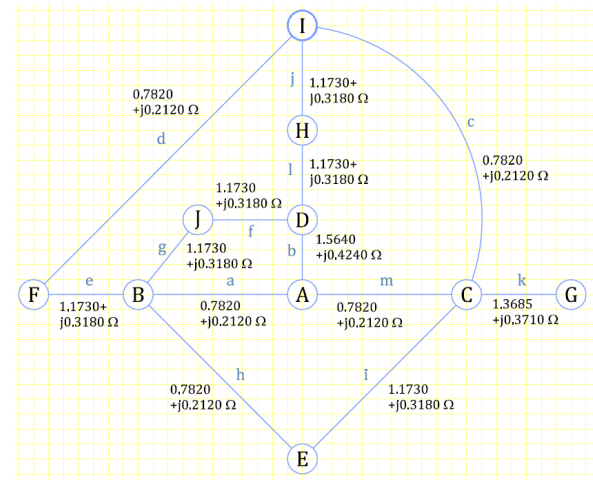


Fig. 1. Sistema de prueba de 10 nodos, 13 líneas con impedancias.

Es utilizado un programa para la solución de flujos de potencia que tiene un límite definido de 50 iteraciones. En la Tabla II se muestran los resultados del árbol (29) con menores pérdidas, siendo los más relevantes las pérdidas de potencia activa, el nodo con la tensión más baja, y la rama con la corriente más alta. Este árbol es considerado el óptimo al cumplir con las restricciones de la red.

#### B. Método de Shirmohammadi y Hong

El método descrito en la sección II-B es aplicado al sistema de prueba de la Figura 1. Se considera que todas las ramas de la red son removibles. Las cargas nodales son consideradas a potencia constante, a excepción del nodo raíz que no tiene carga, la capacitancia de los elementos de distribución se desprecia, y no se considera generación distribuida.

TABLA II  
ÁRBOL ÓPTIMO DEL SISTEMA DE PRUEBA

Árbol	Pérdidas	Tensión más baja	Corriente más alta
Número	Líneas	(kW)	Nodo (p.u.) Rama (A)
29	abcefhklm	89.416	G 0.9519 m 193.589

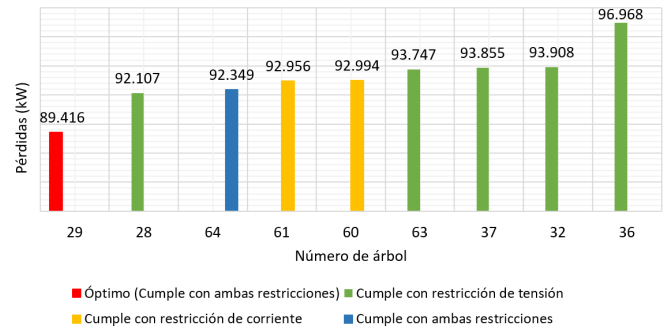


Fig. 2. Pérdidas en los árboles que cumplen con al menos una restricción.

El proceso de reconfiguración se realizó en 4 iteraciones. En la Tabla III se muestra el orden de apertura de las ramas

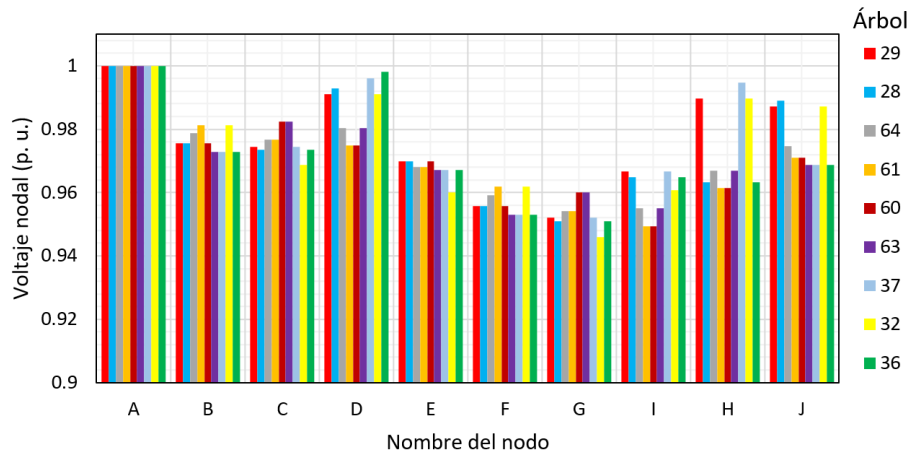


Fig. 3. Perfil de voltaje.

en cada iteración con su respectiva corriente de rama. El proceso de reconfiguración resulta en el mismo árbol obtenido del método Exhaustivo, garantizando que el árbol resultante, mostrado en la Figura 4, es la solución óptima.

TABLA III  
REMOCIÓN DE RAMAS DEL SISTEMA DE PRUEBA

Iteración	Rama	Corriente (A)
1	g	2.002
2	i	2.598
3	d	19.654
4	j	17.507

Es importante mencionar que en las iteraciones 3 y 4, la rama f es por la que fluye la menor corriente, pero al quedar aislado el nodo J, son abiertas las ramas d y j, respectivamente.

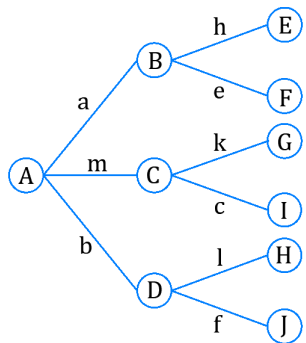


Fig. 4. Árbol óptimo.

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo con la investigación realizada en este artículo sobre el método de Shirmohammadi y Hong, para minimizar pérdidas  $I^2R$  en redes de distribución y con los resultados obtenidos de la red de prueba, se concluye lo siguiente:

- Con el método Exhaustivo se encuentra la configuración óptima que Glamocanin reporta en [14], siendo importante porque da la certeza de que se ha encontrado la

configuración con menores pérdidas  $I^2R$ , mientras se respetan las restricciones de la red.

- Se verifica experimentalmente la eficacia del método de reconfiguración de Shirmohammadi y Hong al aplicarse al sistema de prueba con el que se trabaja en este artículo, teniendo como resultados la red óptima, misma que resulta del método Exhaustivo y que reporta Glamocanin en [14].
- Se concluye que el método de reconfiguración de Shirmohammadi y Hong, minimiza las pérdidas  $I^2R$  y mejora el perfil de voltaje en la mayoría de los nodos del sistema de prueba.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

## REFERENCIAS

- [1] W. H. Kersting, Distribution system modeling and analysis, Third Edition, CRC Press, 2012.
- [2] S. Civanlar, J. Grainger, H. Yin, and S. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE PES Winter Meeting, 1987.
- [3] M. Baran, J. Grainger, H. Yin, and S. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction and load balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, 1989.
- [4] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, 1989, pp. 1492-1498.
- [5] D. Merlin and H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," Proceedings of 5th Power System Computation Conference (PSCC), 1975, pp. 1-18.
- [6] H. Ahmadi and J. R. Martí, "Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 1, 2015, pp. 1-9.
- [7] T. Taylor and D. Lubkeman, "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 1, 1990.
- [8] C. Wang and H. Z. Cheng, "Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 1, 2008, pp. 119-126.

- [9] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for los minimization," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, 1992, pp. 1484-1491.
- [10] J. Zhu, *Power systems applications of graph theory*, 1st ed., New York, United States: Nova Science Publishers, 2009.
- [11] R. J. Duffin, "An analysis of the Wang algebra of networks," *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 93, no. 1, 1950, p. 114.
- [12] H. M. Trent, "A note on the enumeration and listing of all possible trees in a connected linear graph," *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1954, pp. 1004-1007.
- [13] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, 1988, pp. 753-762.
- [14] V. Glamocanin, "Optimal loss reduction of distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, 1990.
- [15] I. Archundia-Aranda and R. O. Mota-Palomino, "Harmonic penetration in weakly meshed distribution networks," *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2014*, pp. 190-193.