



## TRABAJO TEORICOEXPERIMENTAL

### **Algoritmo Heurístico para la Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas**

#### ***Heuristic Algorithm for Distribution Systems Reconfiguration By Means of Branches Exchange***

José Angel - González Quintero  
Ismael - Lisan Mesa  
Johannes - Hifikepunje Kandjungulume

Recibido: Diciembre del 2011  
Aprobado: Abril del 2012

#### **Resumen/ Abstract**

La reconfiguración de la red de distribución es también parte de la operación de los sistemas eléctricos de potencia. El problema de reconfiguración de la red de distribución, conocido en la literatura como DNRC (Distribution Network Reconfiguration), es encontrar una estructura de operación radial que minimice las pérdidas de potencia del sistema satisfaciendo las restricciones de operación. Este trabajo presenta un algoritmo heurístico basado en el método de intercambio de rama simple. La ventaja de este método radica en que es fácil de programar y poner en práctica por su simplicidad para producir siempre variantes radiales. Procediendo de esta manera se evitan las demoras de los chequeos de radialidad que realizan otras implementaciones del algoritmo. La desventaja fundamental consiste en que la solución obtenida es un óptimo local que no necesariamente tiene que ser el óptimo global. Un ejemplo numérico se emplea para explicar los pasos fundamentales de la metodología propuesta.

**Palabras clave:** DNRC, intercambio de rama, métodos heurísticos, optimización, pérdidas, reconfiguración, sistemas de distribución.

*The reconfiguration of the distribution net is also part of the operation of the electric systems of power. The problem of reconfiguration of the distribution net, well-known in the literature like DNRC (Distribution Network Reconfiguration), it is to find a structure of radial operation that minimizes the power system losses while satisfying the operation restrictions. This work presents a heuristic algorithm based on the simple branch exchange method. The advantage of this method resides in its easy understanding and its simplicity to always produce radial variants. Coming this way the delays of the radiality checkups that carry out other algorithms are avoided. The main disadvantage consists in that the obtained solution is a local optimum that not necessarily has to be the global optimum. A numeric example is used to explain the fundamental steps of the proposed methodology.*

**Key words:** DNRC, branch exchange, heuristic methods, optimization, losses, reconfiguration, distribution systems.

#### **INTRODUCCION**

Los sistemas de distribución son operados radialmente para facilitar la coordinación de los sistemas de protección y la detección de fallas. Sin embargo, estos sistemas se diseñan de forma mallada para realizar transferencias de carga durante procesos de mantenimiento y reparación de roturas. Los operarios también pueden realizar estas

operaciones para minimizar pérdidas, balancear la carga entre los transformadores y entre los alimentadores. Este proceso presenta numerosas ventajas y es denominado reconfiguración.

El problema de reconfiguración de la red de distribución, conocido en la literatura como DNRC (Distribution Network Reconfiguration), tradicionalmente es formulado para encontrar una estructura de operación radial que minimice las pérdidas de potencia del sistema satisfaciendo las restricciones de operación [1][2][3]. Otras formulaciones permiten además hacer balances de carga, restaurar el servicio, mejorar los índices de fiabilidad o de calidad de la energía y compensar el reactivo [4][5][6][7]. Esto depende del objetivo impuesto al problema.

Merlin y Back propusieron el método discreto de "branch and bound" para reducir las pérdidas en una red de distribución [2]. Debido a la naturaleza combinatoria del problema, este requiere revisar una gran cantidad de configuraciones para un sistema de tamaño verdadero. Shirmohammadi y Hong [8] emplearon el mismo método heurístico mencionado por Merlin y Back.

Baran y Wu [9] presentaron una metodología de reconfiguración heurística basada en el método de intercambio de rama para reducir pérdidas y balancear cargas en los alimentadores. Para ayudar en la búsqueda, son usados dos flujos de carga aproximados para redes radiales con diferentes grados de exactitud. También, ellos proponen una expresión algebraica que permite la estimación de la reducción de pérdidas para un cambio topológico dado.

Recientemente Carrión [10] realizó un análisis de las ventajas y desventajas de dos métodos heurísticos muy citados en la literatura. Estos son los métodos presentados por Cinvalar [11] y por Baran [9].

Según Caicedo [12], de acuerdo al desarrollo histórico, los métodos computacionales de búsqueda pueden ser clasificados en tres grandes grupos: Los métodos basados en el conocimiento, los métodos basados en las técnicas evolutivas y los métodos mixtos [1].

*A. Métodos basados en el conocimiento.* Están basados en la experiencia de los operadores en el funcionamiento del sistema. Basado en este conocimiento, se han diseñado algoritmos para facilitar la búsqueda de la nueva configuración de red de distribución, intentando encontrar una opción cercana a la óptima. Los métodos heurísticos [9][11], la programación lineal, los sistemas de expertos [13] y la lógica difusa están bajo esta categoría [1][12][10].

*B. Métodos basados en Técnicas Evolutivas.* Están basados en la imitación de los procesos físicos, biológicos y neurológicos presentes en la naturaleza. Tienen una característica importante: la falta de una formulación matemática rigurosa que permite establecer su funcionamiento en cada situación con certeza. Ejemplos de técnicas en esta categoría son: las técnicas de recocido simulado, los algoritmos genéticos y las redes neuronales. Estas técnicas empiezan con una solución y la mejoran progresivamente [14][15].

*C. Métodos Mixtos.* Estos métodos están en uso desde 1996 y son combinaciones de métodos anteriores para cosechar sus fuerzas combinadas; por tanto se obtienen mejores resultados [12].

Cada método tiene sus ventajas y desventajas según el propósito para el que fue formulado [1]. Algunos tienen una formulación que resulta difícil de entender, otros presentan una implementación que tiene numerosos requerimientos [12]. Dentro de los algoritmos encontrados en la literatura varios autores emplean el método llamado intercambio de rama. Este permite trabajar siempre sobre una red radial evitando los chequeos relativos a esta restricción impuesta al problema [16][3].

En este trabajo se desarrolla una técnica heurística basada en el método de intercambio de rama que tiene como ventajas la de ser fácil de programar y poner en práctica al trabajar siempre sobre una red radial. Este proceder evita los chequeos de radialidad de otros métodos basados en el principio de intercambio de ramas [4,2]. La misma puede ser combinada con otras técnicas para lograr mayor potencialidad en el proceso de reconfiguración [17][18][19].

## DESARROLLO

### A. Modelo Matemático

El modelo matemático de DNRC puede expresarse lo mismo por corriente que por potencia de rama. Empleando variables de corriente el problema se plantea de esta forma:

$$\text{Min } f = \sum_{l=1}^{NL} k_l \cdot R_l \cdot I_l^2 \quad l \in NL \quad (1)$$

Sujeto a:

$$k_l \cdot |I_l| \leq I_{l \text{ Max}} \quad l \in NL \quad (2)$$

$$V_{i \text{ Min}} \leq |V_i| \leq V_{i \text{ Max}} \quad i \in N \quad (3)$$

$$g_l(I, k) = 0 \quad (4)$$

$$g_i(V, k) = 0 \quad (5)$$

$$\varphi(k) = 0 \quad (6)$$

donde:

$I_l$ : Corriente a través de la rama " $l$ ".

$R_l$ : Resistencia de la rama " $l$ ".

$V_l$ : Voltaje en el nodo " $l$ ".

$k_l$ : Representa el estado topológico de la rama. Si la rama  $l$  está cerrada  $k_l = 1$  y si está abierta  $k_l = 0$ .

$N$ : Representa el conjunto de nodos.

$NL$ : Representa el conjunto de ramas.

En el modelo anterior, la ecuación (2) establece las restricciones de las corrientes de rama. La ecuación (3) establece las restricciones de voltaje de nodo. La ecuación (4) representa la primera ley de Kirchhoff (KCL), y la ecuación (5) representa la segunda ley de Kirchhoff (KVL). La ecuación (6) establece las restricciones topológicas que aseguran la estructura radial de cada circuito candidato. Consisten en dos restricciones estructurales:

(a) Viabilidad: Todos los nodos en la red deben estar conectados mediante algunas ramas, es decir, no hay ningún nodo aislado.

(b) Radialidad: El número de ramas en la red debe ser más pequeño que el número de nodos en una unidad ( $k_l * NL = N - 1$ )

Por consiguiente, la configuración final de la red debe ser radial y todas las cargas deben permanecer conectadas.

## B. Método de Intercambio de Rama Simple

La idea básica del método de intercambio de rama heurístico es calcular el cambio de pérdidas de potencia operando un par de interruptores (cerrando uno y abriendo el otro al mismo tiempo). La meta es reducir las pérdidas de potencia. En este proceso las líneas de la red pueden ser consideradas como interruptores por sí mismas.

Algoritmo propuesto:

- 1) Obtener una red inicial de configuración radial.
- 2) Obtener el conjunto de interruptores abiertos (y cerrados) que se manipularán.
- 3) Correr un flujo de cargas para todas las posibles combinaciones de este conjunto tomando nota de sus pérdidas de potencia y del cumplimiento de las restricciones impuestas.
- 4) Mostrar los resultados de la configuración topológica con menor *función objetivo* (Pérdidas de Potencia) y que cumple con las restricciones impuestas al problema.

Se hace necesario realizar algunos comentarios.

El paso número uno parece trivial, pero resulta no serlo si se toma en cuenta que se parte de una red enmallada en la que se debe obtener o descubrir de forma automatizada una o varias configuraciones válidas con características puramente radiales. Los detalles relativos a este problema se salen del alcance del presente desarrollo y bastará con señalar que rozan aspectos relacionados con la Teoría de Grafos y el algoritmo de Prim para la obtención de árboles en expansión dentro de un bosque [16].

El paso número dos comienza con la formación de tantos conjuntos como interruptores abiertos tenga la red radial inicial que cumplan con cierta condición. Esta condición es la de tener al menos un vértice (nodo o barra) de orden dos. Estos son los nodos a los que llegan solamente dos líneas.

Posteriormente a cada conjunto por separado se le van agregando los interruptores de orden dos que tiene el interruptor de partida por ambos extremos y que por la lógica de la red radial estarán cerrados. Este proceso se inicia por un extremo del interruptor de partida (dígase por el lado del nodo ' $k$ ') agregando todos los interruptores (líneas) adyacentes hasta llegar a un nodo que no es de orden dos. Luego se continúa el proceso por el otro extremo del interruptor de partida (dígase por el lado del nodo ' $m$ ') agregando interruptores hasta terminar en un nodo que no sea de orden dos. Los nodos finales de los ramales, los nodos raíces y a los que llegan más de dos líneas pueden considerarse como que no son de orden dos.

Al final del proceso anterior quedan conformados los conjuntos de interruptores a manipular. En cada conjunto habrá un *interruptor abierto* que podrá intercambiar su estado con cualquiera de los demás *interruptores cerrados* sin que se cambie el principio de radialidad de la red. Esto permite conformar un problema combinatorio con todas las posibles enumeraciones de estos conjuntos que presenten dentro de sí solamente un miembro en estado abierto. Matemáticamente, la cantidad de variantes posibles es igual al producto de los tamaños (número de elementos o interruptores) de cada conjunto y resulta fácil asignarle un orden enumerativo a cada variante. Este orden enumerativo es esencial al realizar una búsqueda exhaustiva de todas las variantes posibles y poder asignarle un número diferente a cada una.

Cuando se tengan los conjuntos de interruptores a manipular, se analizan en el paso número tres todas las combinaciones posibles de estos conjuntos. Para cada caso se corre un flujo de carga y se chequean las restricciones (voltaje, corriente y potencia) impuestas al problema. Si la variante corriente es mejor que la variante almacenada de menor *función objetivo* y cumple las restricciones, la sustituye.

Finalmente se muestran los resultados del proceso de optimización tanto en forma de tablas como de figuras con la topología resultante del proceso.

### C. Ejemplo Numérico

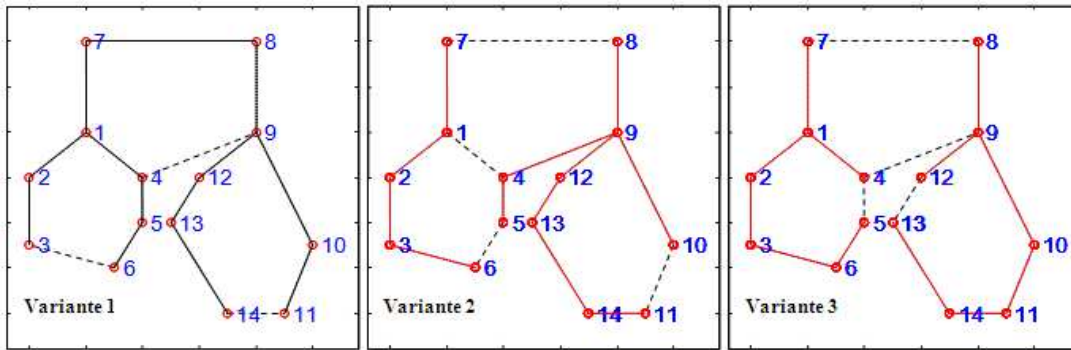
El algoritmo propuesto se experimentará en el sistema de prueba IEEE de 14 nodos cuyos datos se muestran en las tablas 1 y 2, [1].

Nodo	P(MW)	Q(MVAR)	Nodo	P(MW)	Q(MVAR)
1	0.00	0.00	8	-2.20	-1.08
2	0.90	0.70	9	0.30	0.20
3	0.70	0.55	10	0.60	0.45
4	0.00	0.00	11	0.90	0.75
5	0.90	0.76	12	0.00	0.00
6	0.40	0.30	13	0.80	0.65
7	0.00	0.00	14	0.30	0.22

El análisis se efectuará suponiendo que el sistema presenta dos puntos de alimentación correspondientes a los nodos siete y ocho los cuales son denominados en la literatura como *nodos raíces*. Para demostrar la dependencia de la metodología propuesta con la configuración inicial de la red se emplearán las tres configuraciones de arranque mostradas en la figura 1.

Línea Núm.	Desde Nodo i	Hasta Nodo j	Resistencia R(Ohm)	Reactancia X(Ohm)	Línea Núm.	Desde Nodo i	Hasta Nodo j	Resistencia R(Ohm)	Reactancia X(Ohm)
1	7	1	0.00575	0.00893	9	9	10	0.03076	0.04567
2	1	2	0.02076	0.03567	10	10	11	0.02284	0.03163
3	2	3	0.01284	0.01663	11	12	13	0.09385	0.11457
4	1	4	0.01023	0.01567	12	13	14	0.02810	0.04085
5	9	12	0.01023	0.01976	13	7	8	0.02420	0.42985
6	4	5	0.09385	0.11457	14	14	11	0.02500	0.04885
7	5	6	0.03220	0.04985	15	4	9	0.02300	0.04158
8	8	9	0.00575	0.00793	16	6	3	0.02105	0.04885

La primera red requiere un comentario relacionado con su radialidad. La topología representada puede ser alimentada lo mismo por el nodo siete (sin necesidad del ocho) que por el ocho (sin necesidad del siete). Sin embargo aparece en la referencia [1] como si fuese alimentada por ambos nodos raíces estando estos enlazados por la línea número 13 de la tabla 2. Si se es riguroso con este aspecto inherente al tema de la reconfiguración, hay que decir que si la red es alimentada por ambos nodos raíces enlazados, entonces no es radial propiamente. Si en cambio se alimenta por siete (o por ocho), entonces se trabajaría con una red radial que ha asumido toda la carga de su circuito vecino. Se ha dibujado en negro para resaltarla sobre las siguientes que no dan lugar a dudas sobre su carácter radial.



**Fig. 1. Topología Inicial del Sistema de Distribución de 14 nodos.**  
**Note que los interruptores abiertos aparecen en línea de puntos.**

**Paso (1):** En la figura 1, se muestran las configuraciones topológicas iniciales con los interruptores a ser analizados. En las tres variantes el sistema de 14 nodos contiene dos nodos raíces o fuente (nodos 7 y 8) y 12 nodos de carga.

**Paso (2):** Los interruptores inicialmente abiertos se muestran en la tabla 3. De ellos el correspondiente a la línea número 15 (“4-9”) en las variantes dos y tres y el número 4 (“1-4”) en la variante dos no cumplen la condición de tener al menos un nodo de orden dos.

Tabla 3. Interruptores Abiertos del Circuito IEEE de 14 nodos.				
Variante	Interruptores Abiertos	Orden		Cumple Condición
		nodo ‘k’	nodo ‘m’	
1	14 (“14-11”)	2	2	Si
	16 (“6-3”)	2	2	Si
	15 (“4-9”)	3	4	No
2	4 (“1-4”)	3	3	No
	7 (“5-6”)	2	2	Si
	10 (“10-11”)	2	2	Si
	13 (“7-8”)	raíz	raíz	No
3	6 (“4-5”)	3	2	Si
	11 (“12-13”)	2	2	Si
	13 (“7-8”)	raíz	raíz	No
	15 (“4-9”)	3	4	No

Los conjuntos de interruptores a manipular relacionados con los interruptores abiertos que cumplen la condición se muestran en la tabla 4. El ordenamiento del conjunto responde a la lógica de colocar primero a los del lado ‘k’, luego el interruptor abierto y luego los del lado ‘m’. En el caso de los del lado ‘k’ se invierte el orden en que fueron encontrados para que al final se comience el proceso de apertura/cierre (intercambio de ramas) escalonadamente desde el extremo del lado “k” hacia el extremo del lado “m”.

**Paso (3):** Contando todas las enumeraciones posibles donde puede aparecer un interruptor abierto en los conjuntos conformados en el paso anterior, se obtienen un total de  $6 \times 6 = 36$  posibles circuitos en cada variante. Las correspondientes a la variante tres se muestran en la tabla 5. Los interruptores que presenten su estado en “1” están cerrados y los que lo tengan en “0” están abiertos.

Variante	Interruptores Abiertos	Interruptores Colindantes		Conjunto Ordenado
		lado 'k'	lado 'm'	
1	14 ("14-11")	12 ("13-14") 11 ("12-13") 5 ("9-12")	10 ("10-11") 9 ("9-10")	{5, 11, 12, 14, 10, 9}
	16 ("6-3")	7 ("5-6") 6 ("4-5") 4 ("1-4")	3 ("2-3") 2 ("1-2")	{4, 6, 7, 16, 3, 2}
2	7 ("5-6")	6 ("4-5") 15 ("4-9")	16 ("6-3") 3 ("2-3") 2 ("1-2")	{15, 6, 7, 16, 3, 2}
	10 ("10-11")	9 ("9-10")	14 ("14-11") 12 ("13-14") 11 ("12-13") 5 ("9-12")	{9, 10, 14, 12, 11, 5}
3	6 ("4-5")	4 ("1-4")	7 ("5-6") 16 ("6-3") 3 ("2-3") 2 ("1-2")	{4, 6, 7, 16, 3, 2}
	11 ("12-13")	5 ("9-12")	12 ("13-14") 14 ("14-11") 10 ("10-11") 9 ("9-10")	{5, 11, 12, 14, 10, 9}

Número	Estado de los Interruptores		Número	Estado de los Interruptores	
	{4, 6, 7, 16, 3, 2}	{5, 11, 12, 14, 10, 9}		{4, 6, 7, 16, 3, 2}	{5, 11, 12, 14, 10, 9}
1	{0,1,1,1,1,1}	{0,1,1,1,1,1}	19	{0,1,1,1,1,1}	{1,1,1,0,1,1}
2	{1,0,1,1,1,1}	{0,1,1,1,1,1}	20	{1,0,1,1,1,1}	{1,1,1,0,1,1}
3	{1,1,0,1,1,1}	{0,1,1,1,1,1}	21	{1,1,0,1,1,1}	{1,1,1,0,1,1}
4	{1,1,1,0,1,1}	{0,1,1,1,1,1}	22	{1,1,1,0,1,1}	{1,1,1,0,1,1}
5	{1,1,1,1,0,1}	{0,1,1,1,1,1}	23	{1,1,1,1,0,1}	{1,1,1,0,1,1}
6	{1,1,1,1,1,0}	{0,1,1,1,1,1}	24	{1,1,1,1,1,0}	{1,1,1,0,1,1}
7	{0,1,1,1,1,1}	{1,0,1,1,1,1}	25	{0,1,1,1,1,1}	{1,1,1,1,0,1}
8	{1,0,1,1,1,1}	{1,0,1,1,1,1}	26	{1,0,1,1,1,1}	{1,1,1,1,0,1}
9	{1,1,0,1,1,1}	{1,0,1,1,1,1}	27	{1,1,0,1,1,1}	{1,1,1,1,0,1}
10	{1,1,1,0,1,1}	{1,0,1,1,1,1}	28	{1,1,1,0,1,1}	{1,1,1,1,0,1}
11	{1,1,1,1,0,1}	{1,0,1,1,1,1}	29	{1,1,1,1,0,1}	{1,1,1,1,0,1}
12	{1,1,1,1,1,0}	{1,0,1,1,1,1}	30	{1,1,1,1,1,0}	{1,1,1,1,0,1}
13	{0,1,1,1,1,1}	{1,1,0,1,1,1}	31	{0,1,1,1,1,1}	{1,1,1,1,1,0}
14	{1,0,1,1,1,1}	{1,1,0,1,1,1}	32	{1,0,1,1,1,1}	{1,1,1,1,1,0}
15	{1,1,0,1,1,1}	{1,1,0,1,1,1}	33	{1,1,0,1,1,1}	{1,1,1,1,1,0}
16	{1,1,1,0,1,1}	{1,1,0,1,1,1}	34	{1,1,1,0,1,1}	{1,1,1,1,1,0}
17	{1,1,1,1,0,1}	{1,1,0,1,1,1}	35	{1,1,1,1,0,1}	{1,1,1,1,1,0}
18	{1,1,1,1,1,0}	{1,1,0,1,1,1}	36	{1,1,1,1,1,0}	{1,1,1,1,1,0}

Los gráficos de barras de las pérdidas correspondientes a las enumeraciones de cada variante se muestran en la figura 2. Cada barra se corresponde con un circuito radial diferente dado por el estado (abierto o cerrado) de los interruptores manipulados. Se puede comprobar que para la variante tres, la configuración número 15 es la que presenta menores pérdidas activas (columna de menor tamaño).

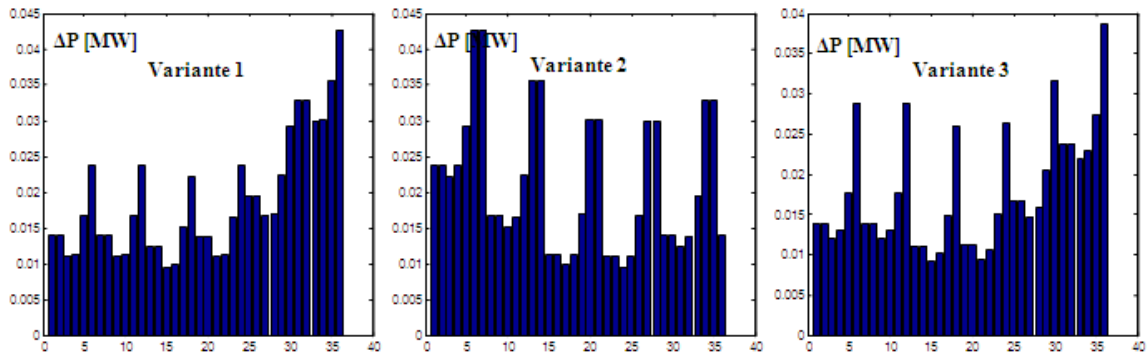


Fig. 2. Pérdidas activas de los circuitos explorados para cada variante topológica inicial.

**Paso (4):** La configuración de red brindada por el algoritmo que menores pérdidas presenta es la mostrada en la figura 3. De las tres variantes de red inicial analizadas, la última resulta ser la de menor función objetivo.

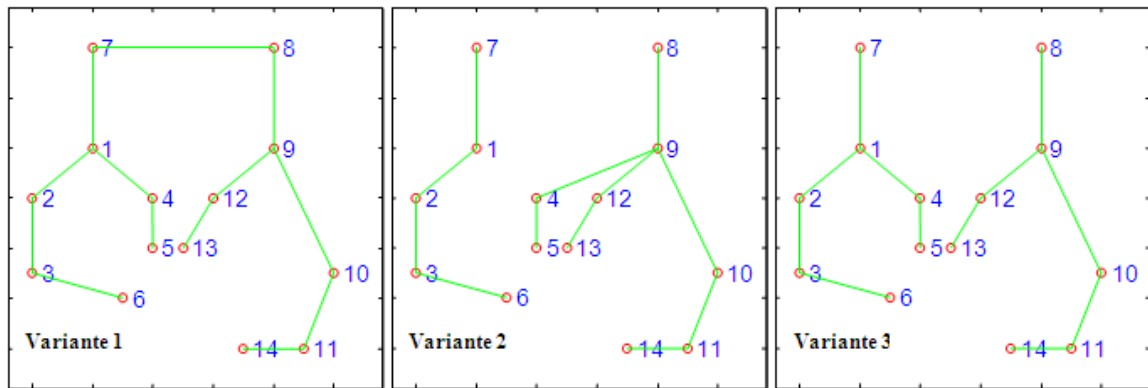


Fig. 3. Configuración óptima resultante del algoritmo.

### 1. Análisis de Resultados

Las redes óptimas o de menor valor de pérdidas brindadas por el algoritmo presentan en común que las líneas “5-6” y “13-14” están abiertas, pero resultan ser topológicamente diferentes. Por tanto, se puede inferir que el algoritmo propuesto tiene la dificultad de depender de la configuración inicial.

De las tres redes óptimas obtenidas, la correspondiente a la tercera variante presenta menores pérdidas. Esto indica que las redes de las variantes uno y dos son óptimas localmente, pero la tercera lo es globalmente en el espacio de búsqueda explorado.

Por espacio explorado se debe entender el conjunto total de las 108 (36 de cada variante) redes analizadas. Esta enumeración exhaustiva consume tiempo y esfuerzo de cálculo, pero brinda la seguridad de poder decir con certeza cual es verdaderamente la mejor red en cuanto a disminución de pérdidas que ha sido la Función Objetivo impuesta al problema de reconfiguración de este trabajo.

Los gráficos de barras permiten visualizar la lógica del proceso enumerativo. Durante el mismo, se producen variantes topológicas que provocan saltos en la función objetivo. Estos saltos se explican por la naturaleza combinatoria del problema al abrir o cerrar un determinado interruptor. Al recorrer los elementos de uno de los conjuntos a manipular, se producen valores en la función de pérdidas que pasan por un mínimo local que no necesariamente tiene que ser global.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un algoritmo heurístico que implementa una variante del método de intercambio de rama simple. La ventaja de este método radica en lo fácil que resulta su programación y su simplicidad para producir siempre variantes radiales. Otras implementaciones del método de intercambio necesitan de una comprobación de la radialidad de las topologías obtenidas si los interruptores a manipular son escogidos al azar o enumerando cada combinación posible.

Efectuando la selección de los interruptores según la metodología propuesta se evitan las demoras de los chequeos de radialidad.

Las desventajas son:

- (1) La configuración final depende de la configuración inicial de la red.
- (2) La solución puede resultar ser un óptimo local, en lugar del óptimo global.
- (3) Consume mucho tiempo al analizar todas variantes posibles así como calcular el flujo de carga de las redes radiales correspondientes.

La solución a las dos primeras desventajas puede estar en aplicar el algoritmo a más de una configuración inicial de la red como se ha hecho en este trabajo. Este proceder aumenta el espacio de búsqueda y por tanto el tiempo de procesamiento, haciendo más crónica la tercera desventaja. Trabajos futuros se encaminarán a resolver esta importante cuestión.

## REFERENCIAS

- [1] Zhu, Jizhong, "Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution Network". En: Optimization of power system operation. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2009, p. 503-543, ISBN 978-0-470-29888-6.
- [2] Merlin, A.; Back, H., "Search for minimum-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System". *Proc. 5th Power System Computation Conference*. Cambridge, England, September 1975, Paper 1.2/6.
- [3] González Quintero, José Angel; *et al.*, "Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas". En: Memorias de la XIV Convención de Ingeniería Eléctrica CIE 2011, Villa Clara, Cuba, del 14 al 18 de junio de 2011.
- [4] Castro, C.H.; Franca, A.L.M., "Automatic power distribution reconfiguration algorithm including operating constraints". En: *IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems*. Rio de Janeiro, 1985, p. 181-186.
- [5] Castro, C.H.; *et al.*, "Generalized Algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Marzo/Abril 1980, vol.99, n.2, p. 549-557, ISSN 0885-8950.
- [6] Glamocanin, V., "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks". *IEEE Transactions on Power Systems*. 1990, vol.5, n.3, p. 774-782, ISSN 0885-8950.
- [7] Goswami, S.K., "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Julio 1992, vol.17, n.3, p. 1484-1491, ISSN 0885-8977.
- [8] Shirmohammadi, D.; Hong, H.W., "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction". *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1989, vol.4, n.2, p. 1492-1498, ISSN 0885-8977.
- [9] Baran, M.F.; Wu, F., "Network Reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Abril 1989, vol.4, n.2, p. 1401-1407, ISSN 0885-8977.
- [10] Carrión González, Jorge Enrique. "Análisis de métodos heurísticos de reconfiguración de sistemas de distribución para la reducción de pérdidas de potencia". *Ingeniería Energética*. Agosto/Noviembre 2011, vol.32, n.3, p. 9-17, ISSN 1815-5901.
- [11] Civanlar, S. *et al.*, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Julio 1988, vol.13, n.3, p. 1217-1223, ISSN 0885-8977.
- [12] Caicedo, G., *et al.*, "Nueva Propuesta en Reconfiguración de Alimentadores utilizando Programación con Restricciones". Ph.D. Thesis, Universidad del Valle, 2004, [consulta: noviembre del 2010], Disponible en: <http://opac.univalle.edu.co/cgi-olib?oid=614971>.



- [13] Liu, C.C; *et al.*, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems". *IEEE Transactions on Power Systems*. Mayo 1988, vol.3, n.2, p. 619-626, ISSN 0885-8950.
- [14] Nara, K.; *et al.*, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration". *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992, vol. 7, n.3, p. 1044-1051, ISSN 0885-8950.
- [15] Souza, B.A.; *et al.*, "Genetic Algorithm for Optimal Feeders Configuration". In: Proceedings of the Brazilian Symposium of Intelligent Automation—SBAI, Bauru, Brazil. 2003.
- [16] Zhu, J.Z., "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm". *Electric Power Systems Research*. 2002, vol.62, n.1, p. 37-42, ISSN 0885-8950.
- [16] Ahuja, A., *et al.*, "An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration". Ketan Panigrahi, Bijaya, Ajith Abraham and Swagatam Das (Eds.). En: Computational Intelligence in Power Engineering. SCI 302. Berlin: Springer, 2010, p. 19-73.
- [17] Nahman, J.; Strbac, G., "A New Algorithm for Service Restoration in Large-scale Urban Distribution Systems". *Electric Power Systems Research*. 1994, vol.29, p. 181-192, ISSN 0885-8950.
- [18] Ross, D.W; *et al.*, "New Methods for Evaluating Distribution Automation and Control System Benefits". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Junio 1981, vol.100, p. 2978-2986, ISSN 0885-8950.
- [19] Zhu, J.Z.; *et al.*, "A comprehensive method for reconfiguration of electrical distribution network". IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, June 24-28 2007, p. 1-7, ISSN: 1932-5517.

## AUTORES

### José Angel González Quintero

Ingeniero Electricista Máster en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas Profesor Titular del Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE) de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba.

e-mail: [pepe@uclv.edu.cu](mailto:pepe@uclv.edu.cu)

### Ismael Lisan Mesa

Ingeniero Electricista, Especialista en redes y sistemas de la Empresa Eléctrica de la Provincia Villa Clara, Cuba.

e-mail: [lisan@elecvccl.une.cu](mailto:lisan@elecvccl.une.cu)

### Johannes Hifikepunje Kandjungulume

Nacido en Namibia. Ingeniero Electricista, trabaja en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

e-mail: [hkandjung@uclv.edu.cu](mailto:hkandjung@uclv.edu.cu)