



Análisis de métodos heurísticos de reconfiguración de sistemas de distribución para la reducción de pérdidas de potencia

Heuristics analysis of distribution system reconfiguration for power loss reduction

Jorge Enrique - Carrión González

Recibido: Febrero del 2011

Aprobado: Mayo del 2011

Resumen/ Abstract

La dependencia cada vez mayor del consumo de energía eléctrica para las diferentes actividades humanas, ha traído como consecuencia que los usuarios exijan mayor calidad del servicio, por tal motivo las empresas suministradoras en todo el mundo buscan mejorar los esquemas de operación de las redes de distribución primaria, con las que distribuyen la energía eléctrica, para mejorar su confiabilidad. La reconfiguración de una red de distribución es un proceso que altera las estructuras topológicas de los alimentadores, cambiando el estado de apertura/cierre de los seccionadores e interruptores, bajo condiciones de operación normal, los objetivos son disminuir las pérdidas del sistema. En el presente artículo se tiene como objetivos presentar el concepto de reconfiguración de sistemas de distribución y describir dos metodologías de reconfiguración para la reducción de pérdidas de potencia. Se realizará un análisis de las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos.

Palabras clave: Sistemas de distribución, reconfiguración, pérdidas de potencia, operación de sistemas de distribución, minimización de pérdidas resistivas.

The increasing dependence on electrical energy consumption for various human activities, has resulted in the users demand higher quality of service for that reason supplying companies worldwide seeking to improve operational schemes of distribution networks primary with distributing electric power to improve its reliability. The reconfiguration of a distribution network is a process that alters the topological structures of the feeders, changing the state of opening / closing of breakers and switches, under normal operating conditions, the objectives are to reduce system losses. In the present article aims to introduce the concept of reconfiguration of distribution systems and describe two methods for reconfiguration to reduce power losses. An analysis of the advantages and disadvantages of each method.

Keywords: Distribution systems, reconfiguration, loss of power distribution system operation, minimize resistive losses.

INTRODUCCIÓN

Una red de distribución como la que se muestra en la figura1 se compone fundamentalmente de subestaciones, líneas de distribución, barras (o nodos) de carga e interruptores. La red se construye de forma mallada (L11/L12/L15/L19/L18/L16) y se explota de forma radial [1]. Las líneas que permanecen abiertas se denominan líneas de enlace (L15, L21, L26), cada línea de enlace se encuentra entre dos nodos (L15 se encuentra entre Nodo5 y Nodo11).

Para cambiar la forma de operación de un sistema de distribución se debe modificar el estado abierto/cerrado de los interruptores de la red cerrando L15 y abriendo L19 (esto implica transferir la carga del Nodo11 de la Subestación II a la subestación I), por simplicidad se usará la notación (L15, L19) para indicar esta transferencia de carga o intercambio de ramas. En los métodos de reconfiguración que se presentaran se asume la existencia de interruptores en todos los tramos de la red.

La reconfiguración de sistemas de distribución se hace normalmente persiguiendo un objetivo específico que puede ser: balance de carga en la red, restauración de servicio, o para la reducción de las pérdidas resistivas. En este caso el objetivo es la reducción de pérdidas.

Para hallar la configuración con mínimas pérdidas surge la opción de evaluar todas las configuraciones posibles, infortunadamente esto no es factible por dos razones fundamentales: para evaluar las pérdidas de una configuración determinada es necesario resolver un sistema de ecuaciones, con tantas incógnitas como nodos y por otro lado el número de formas de operación para un sistema real es inmenso. Es por estas razones que es necesario encontrar una metodología que permita encontrar una configuración de red que reduzca las pérdidas de potencia con una carga computacional que sea racional y aplicable.

En la literatura se han planteado diversas metodologías de reconfiguración, entre las más relevantes se pueden mencionar: a) técnicas de programación evolutiva, las cuales hacen uso de, sistemas expertos [2], redes neuronales [3-4], simulated annealing [5-6], algoritmos genéticos [7-8] y lógica fuzzy [9]; b) las técnicas que hacen uso de criterios heurísticos entre las cuales se pueden mencionar [10 -17], de estas, las dos últimas son analizadas en el presente documento.

A continuación se presentarán y analizarán dos metodologías de reconfiguración.

DESARROLLO

METODO DE CIVANLAR

Este método es frecuentemente descrito en la literatura de reconfiguración de redes eléctricas por la simplicidad de la metodología y rigurosidad de la formulación.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR CIVANLAR Y DEMAS

Este método establece una técnica heurística atractiva para reducir pérdidas en la red por medio de la reconfiguración. Derivan una expresión algebraica simple basada en algunas suposiciones simplificadoras para calcular la reducción de pérdidas al transferir carga entre un par de alimentadores, a una fórmula para estimar la reducción de pérdidas producidas por la acción de apertura y cierre de los interruptores, sin cambiar la radialidad del sistema, este tipo de solución se llama "algoritmo de intercambio de ramas".

Este método establece una expresión que permite calcular el cambio en las pérdidas activas cuando se hace un intercambio de ramas, esta expresión se obtiene suponiendo un modelo de corriente constante.

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left\{ 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{\text{lazo}} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (1)$$

Donde para mayor claridad se supondrá que se desea calcular el ΔP de (L15, L18).

D: Conjunto de cargas que se transfieren de un lado del lazo a otro {11,9,12}

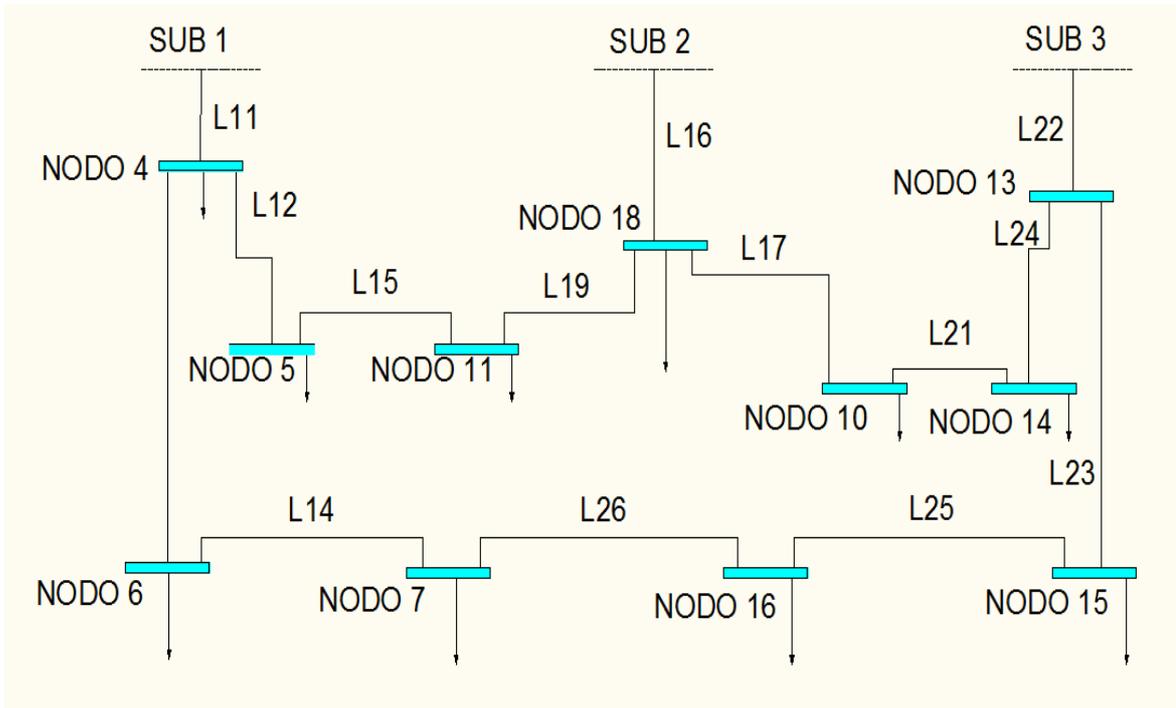


Fig. 1 Red de distribución.

E_m : Componente de $E_{bus}=R_{bus}I_{bus}$ que corresponde al Nodo m , $E5$
 E_n : Componente de $E_{bus}=R_{bus}I_{bus}$ que corresponde al Nodo n , $E11$
 $Re \{.\}$, $(.)^*$, $|.\|$: Operadores Parte real de, conjugado de y magnitud de, respectivamente.

Al deducir esta expresión se concluye que, para que el ΔP sea negativo (que implica reducción de pérdidas) se requiere que el nodo que cede carga (Nodo11) tenga mayor caída de tensión que el nodo que recibe carga (Nodo5). Por lo tanto, en un lazo solo es necesario evaluar aquellas transferencias que se hacen del nodo de mayor caída de tensión al de menor caída de tensión, las restantes se desprecian, con esto se reduce el espacio de búsqueda.

El planteamiento general de la metodología (o búsqueda) se puede realizar como se muestra en la figura 1.

m : Nodo del interruptor de enlace que recibe carga, $m=5$
 n : Nodo del interruptor de enlace que cede carga, $n=11$
 I_i : Corriente compleja en el nodo i .
 R_{lazo} : Sumatoria de resistencias que conforman el lazo que se está analizando, $\{Re(ZL11+ZL12+ZL15+ZL19+ZL18+ZL16)\}$, donde ZLm es la impedancia de la línea m

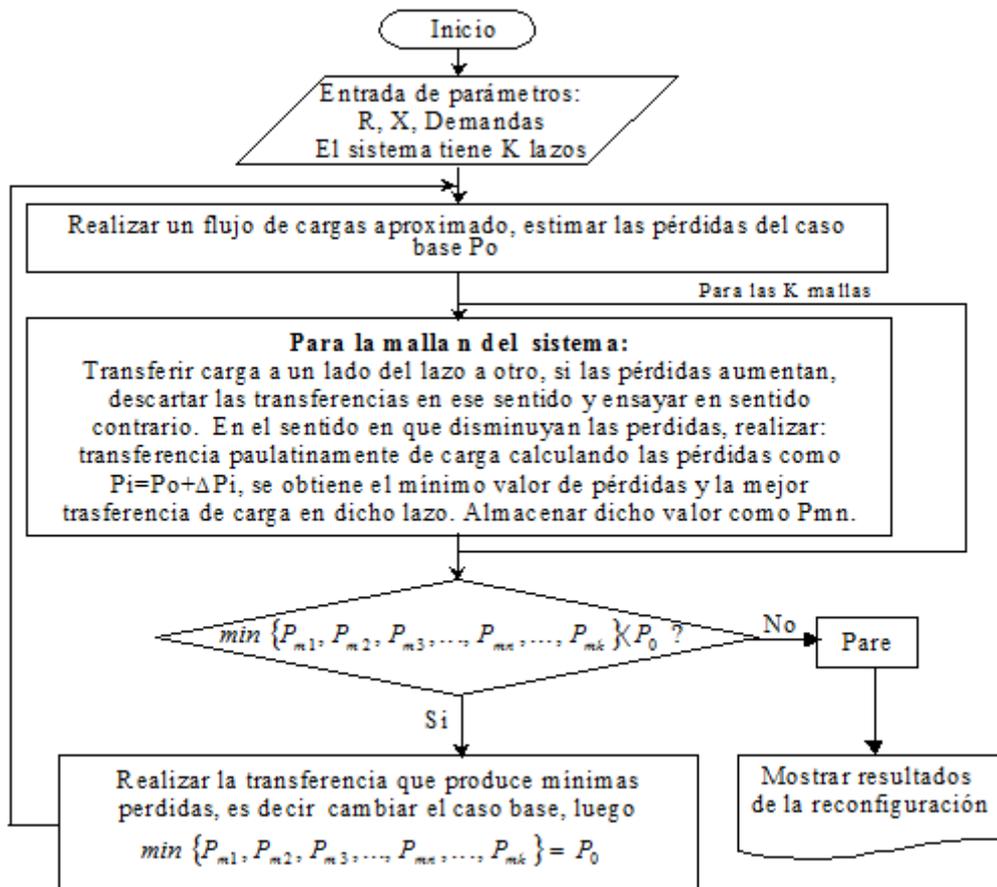


Fig. 1. Algoritmo de la metodología de Civanlar.

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA CIVANLAR Y DEMAS

De un minucioso análisis de la metodología se hacen algunas apreciaciones como son:

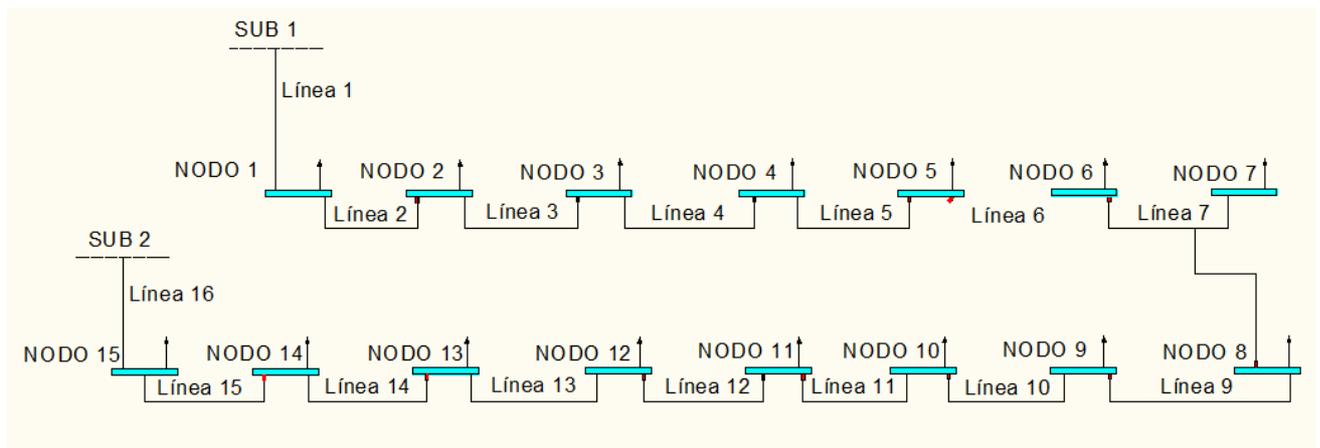


Fig. 2. Sistema utilizado para sistema Civanlar.

1. Al modelarse la carga como corriente constante el ΔP es exactamente el valor en el cual cambian las pérdidas con el intercambio de ramas, es lógico que para modelos de carga diferente la formula no de valores exactos. Esto se ve en la figura 2, gráfico 1 y la tabla 1. Es claro que para el modelo de corriente constante las corrientes son independientes de las tensiones y por lo tanto las pérdidas en la red, en dicho modelo son independientes de la tensión en los nodos, situación diferente a los modelos de impedancia constante y potencia constante. Cuando la tensión en las cargas son cercanas a 1 (en pu) los modelos de carga se asemejan, por lo tanto, se puede concluir: para un

sistema con buenos perfiles de tensión el error cometido por la metodología Civanlar es menor que para un sistema con malos perfiles de tensión.

Tabla 1. Resultados comparativos de las pérdidas por Civanlar							
Interruptor a abrir	Pérdidas de Civanlar [kW]	Pérdidas FC(lcte) [kW]	% error: FC(lcte) vs. Civanlar	Pérdidas FC(Zcte) [kW]	% error: FC(Zcte) vs. Civanlar	Pérdidas FC(Scte) [kW]	% error: FC(Scte) vs. Civanlar
L1	6188.45	6188.45	0	4751.15	23.23	9044.79	46.16
L2	4446.7	4446.7	0	3569.31	19.73	5955.04	33.92
L3	3278.28	3278.28	0	2725.62	16.86	4136.73	26.19
L4	2284.22	2284.22	0	1972.54	13.64	2724.09	19.26
L5	1566.73	1566.73	0	1404.78	10.34	1776.81	13.41
L6 (N.A)	947.14	947.14	0	892.95	5.72	1010	6.64
L7	828.02	828.02	0	791.27	4.44	869.19	4.97
L8	755.35	755.35	0	728.83	3.51	783.98	3.79
L9	774.92	774.92	0	746.56	3.66	805.67	3.97
L10	848.44	848.44	0	812.61	4.22	887.88	4.65
L11	940.54	940.54	0	895.08	4.83	991.28	5.39
L12	1108.67	1108.67	0	1044.42	5.80	1181.99	6.61
L13	1246.2	1246.2	0	1165.43	6.48	1339.88	7.52
L14	1502.82	1502.82	0	1388.13	7.63	1639.76	9.11
L15	1715.94	1715.94	0	1569.97	8.51	1894.35	10.40
L16	2021.6	2021.6	0	1825.85	9.68	2268.81	12.23

*F.C.: Flujo de carga
N.A = Normalmente abierto

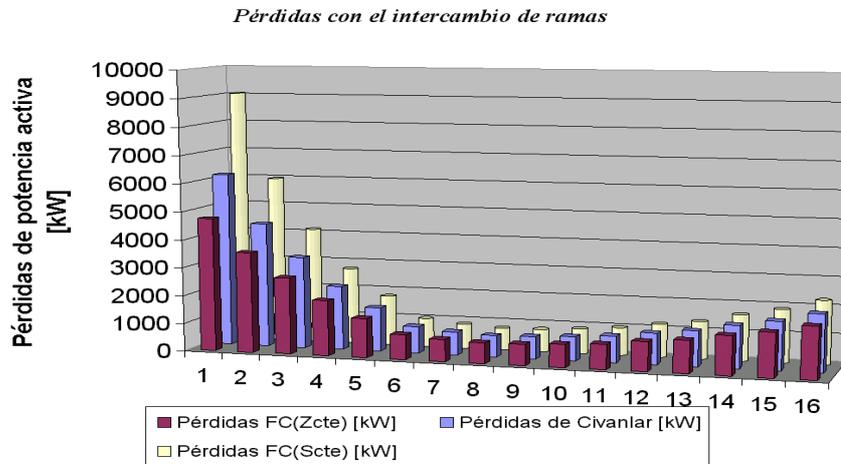


Grafico 1 Pérdidas al realizar intercambios de rama.

- La búsqueda se da en profundidad, es decir solo se toma siempre la mejor opción, con lo cual (en teoría) es posible quedar siempre en valores óptimos, luego no se puede garantizar alcanzar óptimos globales.
- Cada intercambio de rama implica un nuevo caso base, para el cual se evalúan de nuevo las tensiones E_m y en los nodos de los enlaces; este cálculo es la solución de un sistema lineal, por lo tanto esta técnica es más rápida que aquellas que emplean flujos de cargas.
- Mediante el criterio de caídas de tensión, es posible eliminar opciones de swicheo, con lo cual se reducen las posibilidades a evaluar, por consiguiente se tiene rapidez computacional.

METODO BARAN

Esta metodología está basada en estimar de modo aproximado el valor de las pérdidas al intercambiar ramas. Solo toma aquellas opciones que parecen ser las mejores. El autor de esta metodología también presenta un análisis de los errores cometidos con este método.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR BARAN Y DEMAS

El artículo de Baran y demás tiene una propuesta similar a la de Civanlar, pero aborda algunos tópicos adicionales, como son metodologías de flujo de carga y restauración de servicio. La metodología de reconfiguración para la reducción de pérdidas se puede describir de la siguiente forma.

El método realiza una exploración similar a la de Civanlar y calcula la variación en las pérdidas mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = 2P_m \left(\sum_{l \in L} r_l P_l - \sum_{l \in R} r_l P_l \right) + 2Q_m \left(\sum_{l \in L} r_l Q_l - \sum_{l \in R} r_l Q_l \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \left[\sum_{l \in R \cup L} r_l \right] \quad (2)$$

Donde:

Para mayor claridad se supondrá que se desea calcular el ΔP de (L15, L18).

r_l : resistencia de la rama l

P_l : Potencia activa de la rama l

Q_l : Potencia reactiva de la rama l

P_m : Potencia activa de salida, de la línea que va a ser abierta (P del Nodo 8 al Nodo9)

Q_m : Potencia reactiva de salida, de la línea que va a ser abierta (P del Nodo 8 al Nodo9)

L : Conjunto de líneas que conforman el lado del lazo en el cual se encuentra la línea a ser abierta (no incluye la línea del enlace) {L16, L18, L19}

R : Conjunto de líneas que conforman el lado del lazo opuesto a L , (incluye la línea del enlace) {L15, L12, L11}

$L \cup R$ {L16, L18, L19, L15, L12, L11}

En este caso un ΔP positivo implica reducción de pérdidas. Como se observa en (3) el valor de la variación de pérdidas depende de la potencia que circula por la línea a abrir. Este valor de potencia se obtiene de un flujo de carga aproximado. Para una malla dada, (3) se puede presentar en términos de la potencia a transferir, así:

$$\Delta P = 2 P_m drp + 2 Q_m drq - \left(P_m^2 + Q_m^2 \right) tr \quad (3)$$

Con ayuda de (3) es posible plantear una metodología de reconfiguración, dicha metodología se describe en la figura 3.

Se presenta adicionalmente, una evaluación del error de la expresión (3), este se puede resumir así:

- Cuando el delta de pérdidas calculado sea positivo y grande (esto implica que se reducen fuertemente las pérdidas), el valor real de este delta es mayor, esto es, las pérdidas se reducen aún más de lo calculado.
- Cuando el delta de pérdidas aproximado sea negativo y grande (esto implica que se aumentan fuertemente las pérdidas), el valor real de este delta es menor, esto es, las pérdidas se aumentan menos de lo estimado por el delta.

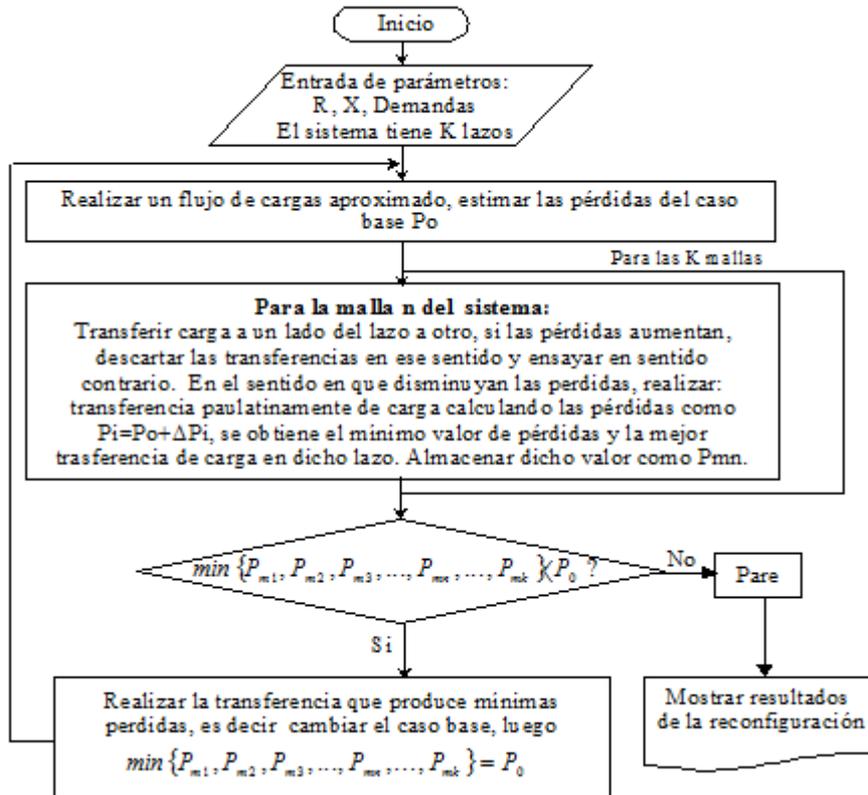


Fig. 3. Algoritmo de la metodología de Baran.

Para el análisis gráfico de las pérdidas en relación con la potencia de la línea a ser abierta, se presenta la figura 4.

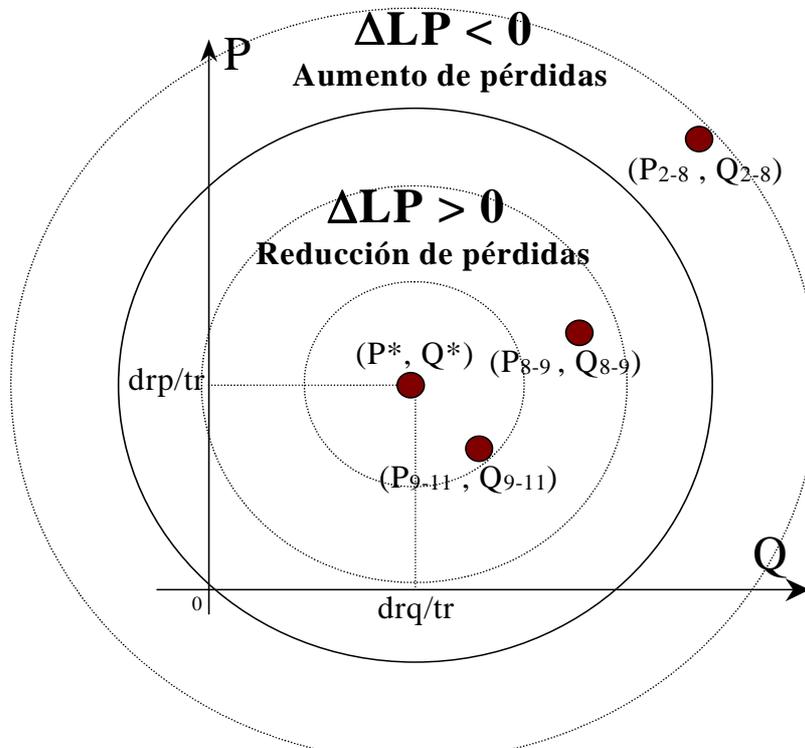


Fig. 4. Relación entre las pérdidas activas y la potencia transferida.

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA BARAN Y DEMAS

La metodología Baran presenta muchos elementos que se prestan para un análisis minucioso, a continuación se describen los más importantes:

1. En la figura 4; (está referida al ejemplo de la figura 1) se puede observar que el círculo continuo delimita el lugar geométrico de las potencias transferidas P_m y Q_m que no producen reducción de pérdidas. Las parejas (P_m, Q_m) que estén por fuera del círculo incrementan las pérdidas y viceversa. Los valores óptimos de P_m^* y Q_m^* son drp/tr y drq/tr respectivamente. Entonces, se puede tener un criterio para saber en cada lazo cual es la potencia óptima a transferir. El inconveniente es que por ninguno de los lazos de la red circula $P_m = drp/tr$ y $Q_m = drq/tr$, en teoría estos valores pueden estar en cualquier lugar geométrico, luego sería necesario calcular la distancia desde cada punto de estos hasta (P_m^*, Q_m^*) el cual puede ser un problema complicado. Pero si se hacen las siguientes consideraciones: a) las cargas del sistema tienen el mismo factor de potencia, b) las pérdidas del sistema o bien no son significativas frente a la demanda o tienen el mismo factor de potencia de esta última. Esto garantiza que tanto los flujos por las ramas, como P_m^* y Q_m^* tienen el mismo factor de potencia de la demanda. El equivalente de la figura 4 para las condiciones indicadas se muestra en la figura 5 (este ejemplo está referido a la figura 2). Como se observa todos los flujos por la red se encuentran sobre la recta del factor de potencia de la demanda. Utilizando esta característica se puede establecer la transferencia óptima de carga muy fácilmente.

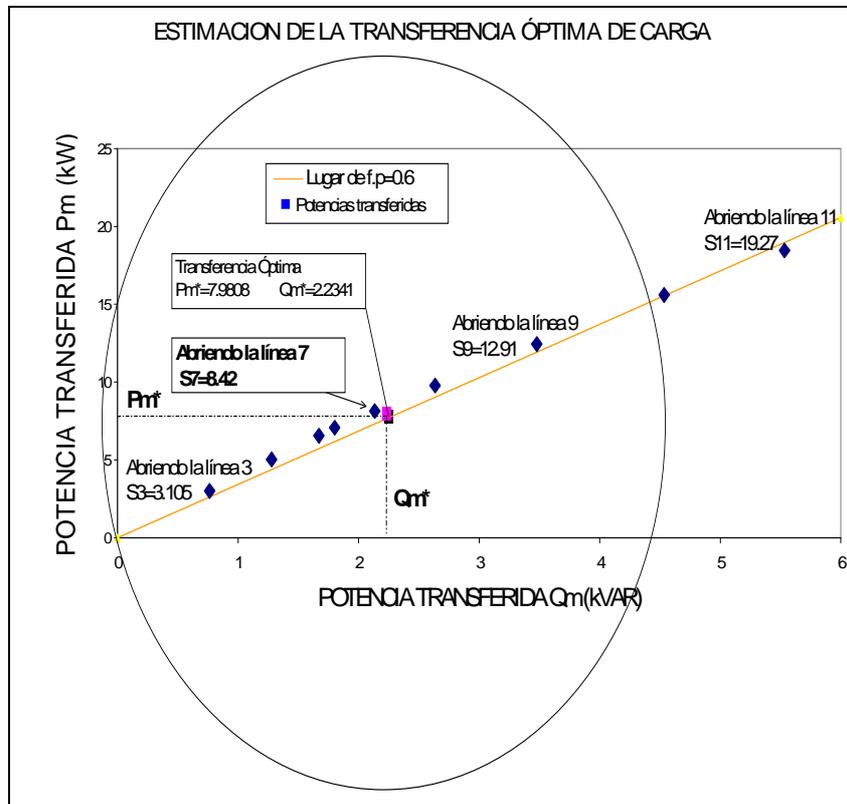


Fig. 5. Lugar geométrico de las potencias pérdidas y las potencias transferidas.

2. Dadas las consideraciones hechas en el flujo de carga, es posible, que en una transferencia que el ΔP se muestra como favorable no lo sea, y viceversa. Es importante tener esto en cuenta ya que puede conducir a errores.
3. El método realiza búsquedas únicamente en profundidad, su flujo de carga simplificado es rápido.
4. Se realiza una búsqueda más extensa (tal vez menos adecuada) que la realizada por Civanlar.

CONCLUSIONES

Al examinar lo planteado en el presente documento se puede concluir lo siguiente:

1. La reconfiguración de sistemas de distribución es una alternativa real de reducción de pérdidas con mínimas inversiones y resultados inmediatos.
2. Cada metodología tiene ventajas y desventajas que ya se mencionaron. La elección de cual es más útil para el operador de red depende de la forma como se modele el sistema, y optimalidad deseada en la solución.

REFERENCIAS

- [1] I.ROYTELMAN, V. M., S.S.H. LEE, R. L. LUGTU. "Multi-objetive Feeder Reconfiguration by Distribution Management System". *EEE Transactions on Power Systems*. May 1996, vol. 11, No 2, p. 661-667.
- [2] CHEN-CHING LIU, S. J. L., S. S. VENKATA. "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Systems*. May 1988, vol. 3, No 2. p.619-626.
- [3] GRADOBLES, J. F. D., G. CAICEDO. . "Estado del arte en reconfiguración de sistemas de distribución, Energía y computación". *Ingeniería y Ciencia*. Colombia, Marzo 2006, vol. 2 No3, p 39 - 50. ISSN 1794 - 9165.
- [4] AOKI, K., SATOH, T., ITOH, M., KUWABARA, H AND KANEZASHI, M. "Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 2000, vol.3, No3, p.1267-1274.
- [5] HSIAO-DONG CHIANG, R. J.-J. "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and Solution Methodology" *.IEEE Transactions on Power Delivery*.November 1990, vol. 5, No 4, p. 1902-1909.
- [6] HSIAO-DONG CHIANG, R. J.-J. "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 2: Solution and Numerical Results". *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 1990, vol. 5, No 3, p. 1568-1573.
- [7] CASTRO, C. H. A. F., A.L.M. Automatic Power Distribution Reconfiguration Algorithm Including Operating Constraints. En: *IFAC Symposium on Planning and Operating of Electric Energy Systems*.Rio de Janeiro 2000. p. 181-186.
- [8] DAI-SEUB CHOI, C.-S. K., JUN HASEGAWA. "An Aplication of Genetic Algorithms to the Network Reconfiguration in Distribution for Loss Minization and Load Balancing Problem". *IEEE Catalogue No 95TH8130*. November 2002, p. 376-381.
- [9] Y. H. SONG, G. S. W., A. T. JOHNS, P. Y. WANG. "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionanary Programming". *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*. July 2000, vol.144, No 4, p. 345-350.
- [10] SARFI, R. J. E. A. Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: A New Algorithm Based on a Set of Quantified Heuristic Rules. In Proceedings of the 1994 En: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2003. p. 125-130.
- [11] LIU, C. C., LEE S.J. AND VENKATA, S.S. . "An expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Systems*. May 2002,vol. 3, No 2, p. 619-626.
- [12] RODRÍGUEZ, M. "Heurística : Un criterio para el Reestablecimiento de Energía en Sistemas Eléctricos de Distribución". *II Seminario IEEE, Concepción*. 2002,
- [13] SARFI, R. J. E. A. "A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction." *Electric Power Systems Research*. 2000, vol. 31(1):61-70.
- [14] AOKI, K., KUWABARA, H., SATOH T. AND KANEZASHI, M. . "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in large Scale Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*. October 2001, vol. 3, No 4. p. 1865-1872.
- [15] SARFI, R. J. E. A. "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory". *IEEE Trans Power Systems*. 2002, vol. 11(1), nº. p. 504-510.
- [16] S. CIVANLAR, J. J. G., H. YIN, S. S. H. LEE,. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction". *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 1988, vol. 3, No 3, p. 1217-1223.
- [17] MESUT E. BARAN, F. F. W. "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing". *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 1989, vol. 4, No 2. p. 1401-1407.

AUTOR

Jorge Enrique Carrión González

Ingeniero Electromecánico. Desde 2009 profesor de la Universidad Nacional de Loja-Ecuador

e-mail: jorgecarriiong@yahoo.com