

VISIÓN ACTUAL
Clasificación del artículo:
INVESTIGACIÓN

ESTADO DEL ARTE EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES Y ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

Sergio Raúl Rivera Rodríguez*

Resumen

En el presente artículo se presenta una revisión del estado del arte de la ubicación óptima de capacitores en sistemas de distribución, para dar una guía sobre los aspectos que deben tener en cuenta los planificadores en la optimización del perfil de tensión y el control de reactivos en las redes de distribución. Aquí se hace un estudio de la optimización de la solución mediante una búsqueda exhaustiva, en la que se determina la dimensión del problema, se evalúan las diferentes posibilidades de solución, y se visualizan los tiempos y requerimientos computacionales que el algoritmo de solución utilizaría. Se utilizó un sistema ejemplo (IEEE de 9 nodos) para hacer el estudio de la búsqueda exhaustiva, en la que se encontró que los métodos utilizados en la literatura de este tema no siempre llegan a la solución óptima.

Palabras claves

Ubicación de capacitores, sistemas de distribución, optimización combinatorial y búsqueda exhaustiva.

Summary

This paper presents a review of the state of art in optimal capacitor placement for Distribution Systems, in order to give a guide of the aspects that must consider the planners to optimize the voltage profile and the reactive control in distribution networks. Here a study is made of the solution by means of exhaustive search, where the dimension and computational requirements of the problem are determined evaluating the different possibilities of solution. A system example (IEEE 9-Bus) was used to make the exhaustive search, and was found that the methods used in the literature of this subject, not always reach the optimal solution.

Key words

Capacitor placement, distribution systems, combinatorial optimization, exhaustive search.

* Ingeniero Eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Sistemas de Distribución de la Universidad Nacional de Colombia; candidato a doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan Argentina Becario del DAAD (Servicio de Intercambio Académico Alemán).

1. Introducción

El problema ha sido abordado de dos maneras separadas: en primer lugar, mediante el control de reactivos (ubicación óptima de capacitores) y, en segundo, desde los mandos de los dispositivos de control de voltaje (reguladores de tensión), teniendo como énfasis la planificación de los sistemas de distribución, con respecto al perfil de tensión y control de reactivos.

Mediante la ubicación de capacitores en las redes de distribución podemos obtener:

1. Reducción de pérdidas.
2. Corrección del factor de potencia.
3. Mejoramiento del perfil de tensión.
4. Alivio en la capacidad de los alimentadores del sistema.

Por estas razones la ubicación de capacitores juega un papel importante en la planificación y operación de los sistemas de distribución, debido a que estos implican una inversión y se debe proceder de una manera óptima, para obtener el mayor beneficio; así la ubicación óptima de capacitores ha sido formulada como un problema de optimización entera mixta no lineal y no diferenciable en la cual la mayoría de técnicas de optimización convencionales son incapaces de resolverlo, ya que es un problema combinatorial muy complejo, por la cantidad de posibilidades que se pueden presentar.

En este artículo se presenta una revisión de cómo ha sido encarado este problema por diferentes autores y así dar una guía de los diferentes aspectos que deben utilizar los planificadores de las distribuidoras. Además, se utilizó un algoritmo que evalúa todas las posibles combinaciones de solución de este problema, para visualizar la dimensión del problema y, por último, se contrastó la optimización de las soluciones que presenta la literatura de este tema con una búsqueda exhaustiva.

2. Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores

En general, todos los problemas de ubicación óptima de capacitores en sistemas de distribución buscan obtener la cantidad, tipos (fijos o conmutables), ubicación y capacidad de los capacitores, para que se optimicé una función objetivo que varia de un autor a otro, al tener como objetivo obtener el mayor beneficio. A continuación, se presentan las diferentes maneras como ha sido abordado este problema.

2.1 Autores que utilizan métodos analíticos

En Optimal Choice of Fixed and Switched Shunt Capacitor on Radial Distributors by the Method of Local Variations [1] la función objetivo es maximizar tanto la reducción de pérdidas, tomando en cuenta los factores de crecimiento de la demanda y los costos de la energía como el alivio en las capacidades del sistema y minimizar el costo de capacitores. Como restricción se utilizó el incremento de voltaje durante las horas de poca demanda (off peak hours); de igual forma, para resolver el problema se utilizó programación dinámica y el método de variación local.

En Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [2] la función objetivo es reducir las pérdidas de energía y potencia junto con el costo por la compensación (costo de los capacitores) utilizando una función diferenciable para los costos de los

capacitores; como restricciones se utilizaron las ecuaciones de flujo de potencia, límites de tensión, y restricciones de control y capacidad sobre las variables de control (capacitores). Para resolver el problema se usó programación entera mixta mediante niveles jerárquicos y se desacopló el problema en dos problemas: un maestro y un esclavo.

El problema esclavo se trata en Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [3] y consiste sólo en determinar la capacidad óptima de los capacitores minimizando las pérdidas de energía y la función de costo de los capacitores en una ubicación dada, proponiendo un algoritmo de flujo de potencia novedoso. El método de optimización utilizado es el de las direcciones factibles.

2.2 Autores que utilizan heurística y diferentes métodos de inteligencia artificial

En Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and the Overall Problem y Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results [4-5] se tiene la misma función objetivo que en [2], pero los costos asociados con la ubicación de los capacitores es considerado como una función escalera, en vez de una función diferenciable continua, ya que en la práctica están agrupados en bancos estándares de capacidades discretas y, además, la magnitud y los controles de los capacitores son tratados como variables discretas. El costo de la ubicación de capacitores incluye el costo de instalación (costo asociado con la instalación del capacitor en cada locación) y el costo de compra. El problema se soluciona mediante Simulated Annealing.

Debido a que el problema es combinatorial se trata de no evaluar todas las combinaciones posibles, sino utilizar diferentes métodos (analíticos, programación numérica, heurística, inteligencia artificial, lógica difusa), para llegar en lo posible al óptimo global, sin tener que utilizar excesivos recursos computacionales. Sin embargo, algunos autores plantean un análisis de sensibilidad para reducir el espacio de búsqueda.

En Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach [6] se evalúa la variación de las pérdidas con respecto a la variación de reactivo en cada nodo en la fase de inicialización del algoritmo genético que utiliza para resolver el problema; adicionalmente, en la función objetivo se introduce una penalización con tal de reducir el número de posibles locaciones donde pueden ir capacitores. Ahora bien, en Capacitor Placement in Distribution System Using Heuristic Search Strategies [7] se utiliza el mismo criterio de sensibilidad y se utiliza el método de búsqueda tabú. En Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks [8] el análisis de sensibilidad se hace evaluando la variación de los ahorros con respecto a la variación en la compensación de cada nodo y se utiliza esto como método heurístico para resolver el problema.

En Optimal Capacitor Placement for Improving Power Quality [9] se utiliza la misma formulación del problema que los autores anteriores y utiliza un método híbrido para la solución; pero como método principal utiliza la búsqueda tabú ayudado por criterios de otros métodos (simulated annealing, algoritmos genéticos y heurística). El análisis de sensibilidad no sólo

En general, todos los problemas de ubicación óptima de capacitores en sistemas de distribución buscan obtener la cantidad, tipos (fijos o conmutables), ubicación y capacidad de los capacitores, para que se optimicé una función objetivo que varia de un autor a otro, al tener como objetivo obtener el mayor beneficio.

se hace al principio, sino también en cada iteración para determinar el vecindario de cada etapa o iteración del algoritmo, debido a que si sólo se utiliza el análisis de sensibilidad al principio la preselección de los nodos candidatos esto puede afectar la solución óptima.

En Fixed/Switched Type Shunt Capacitor Planning of Distribution Systems by Considering Customer Load Patterns and Simplified Feeder Model [12] se consideran los patrones de carga de los usuarios de una manera más realista en la formulación matemática, mediante el análisis de varias curvas de demanda diarias del sistema para cada estación del año y para diferentes tipos de usuarios; para optimizar la función objetivo utilizan un método heurístico y un índice de sensibilidad (nodo con mayor reducción de pérdidas al adicionar un banco de capacitores) en cada iteración.

2.3 Autores que utilizan lógica difusa y algoritmos genéticos

El problema en la actualidad se ha enfocado hacia la solución mediante algoritmos genéticos y lógica difusa (borrosa) y algunas variaciones de la función objetivo. En Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks [10] se maximizan los ahorros, mediante la minimización de pérdidas de energía, además se diseñó un algoritmo híbrido que utiliza lógica difusa para reducir el espacio de búsqueda y luego se utilizó algoritmos microgenéticos (reducción de población en cada iteración) en la solución.

El problema en la actualidad se ha enfocado hacia la solución mediante algoritmos genéticos y lógica difusa (borrosa) y algunas variaciones de la función objetivo.

De una manera similar en Optimal Capacitor Allocation Using Fuzzy Reasoning and Genetic Algorithms for Distribution Systems [11] se usa lógica borrosa para el análisis de sensibilidad utilizando como conjuntos borrosos la desviación de voltaje, las pérdidas de potencia activa y las pérdidas de potencia reactiva; con estos selecciona los nodos que mediante la adición de capacitores tendrán más efecto en reducir las pérdidas de potencia y energía. Luego de determinar los nodos candidatos se utilizan operadores genéticos (reproducción, crossover y mutación), para determinar el óptimo de la función objetivo que tiene en cuenta que para diferentes niveles de compensación se tienen diferentes costos de reactivos o capacitores.

Una manera novedosa de tratar este tema es formular el problema considerando distintas funciones objetivo. En Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method [17] se utilizan 3 distintos objetivos que son:

1. Minimizar el costo de las pérdidas de energía y capacitores.
2. Incrementar el margen de cargabilidad de los alimentadores.
3. Mejorar el perfil de tensión.

Considerando la naturaleza imprecisa de cada objetivo estos se formulan como conjuntos borrosos en los que entre más alto sea el valor de la función de membresía mayor satisfacción con la solución; para encontrar la solución para este tipo de problemas se debe encontrar el óptimo no inferior o pareto-optimalidad en el que una función objetivo se puede mejorar sólo a expensas del deterioro de otra. En el algoritmo formulado también se utilizan algoritmos genéticos.

2.4 Autores que tienen en cuenta niveles de distorsión armónica

Debido a que la utilización de capacitores puede conducir a problemas de resonancia severos, en Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeder with Distorted Substation Voltages [13] se tienen en cuenta las interacciones de los armónicos tales como: condiciones de resonancia, factor de distorsión armónica y pérdidas de potencia en los diferentes armónicos; encontrándose que en algunos casos los ahorros, debido a reducción de pérdidas de potencia, pueden ser sacrificados por control de Tasa de Distorsión Armónica (THD) a niveles aceptables. La función objetivo se utiliza para minimizar las pérdidas en todos los armónicos y el costo de los capacitores (en un número finito de capacidades estándar y el costo por KVar varia de un tamaño a otro); las restricciones son los límites de THD y limites de tensión. Al igual que en [1] se utiliza el método de variación local.

Una variación de la función objetivo se trabaja en Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm [14], texto en el cual el nivel de armónicos se introduce, se resuelve el problema mediante programación no lineal entera y heurística, y se utiliza un flujo rápido de potencia (una aproximación lineal).

En Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics [15] se tiene en cuenta la calidad del producto técnico (niveles de tensión y distorsión armónica THD) en las restricciones. Utilizando lógica difusa se hace un estudio de sensibilidad de las restricciones y de la función objetivo, para seleccionar los nodos candidatos para la ubicación de bancos capacitores; este estudio de sensibilidad reduce sustancialmente el espacio de búsqueda y se hace para cada iteración de la optimización de la función objetivo.

La mayoría de las formulaciones propuestas en la literatura asumen que todas las cargas del sistema son lineales y desprecian la presencia de niveles de armónicos en el voltaje y la corriente. En A PSO Based Approach to Optimal Capacitor Placement with Harmonic Distortion Consideration [16] en la función objetivo se tienen en cuenta las pérdidas para los diferentes armónicos, las restricciones tienen en cuenta los máximos niveles de distorsión armónica y los limites de tensión para los diferentes armónicos; se emplea un método moderno (desarrollado en 1995) basado en inteligencia artificial llamado Particle Swarm Optimization (PSO) para solucionar el problema de manera novedosa con respecto a la literatura del tema, además utiliza un valor de penalización en la función objetivo si alguna restricción es violada.

Por otra parte, el hecho de introducir en la formulación los efectos de los armónicos en el sistema previene la posible amplificación de estos y la presencia de resonancia en el sistema, además se logra un óptimo y más real para los sistemas de distribución prácticos.

3. Búsqueda exhaustiva en la ubicación óptima de capacitores

La función objetivo consiste en minimizar las pérdidas de potencia en el pico, las pérdidas de energía y el costo de los capacitores. El algoritmo utilizado necesita los datos del sistema, el número máximo de bancos de capacitores a instalar (por presupuesto) y

la ubicación de estos capacitores en la red (análisis de sensibilidad). Luego se hace una matriz con las posibles combinaciones, para cada una de estas combinaciones se realiza un flujo de potencia y se evalúa la factibilidad y si es óptimo.

Si se utilizan capacitores fijos el número de combinaciones posibles será:

$$(h+1)^n \quad (1)$$

en el que n es el número de nodos donde van a ir capacitores y h es el máximo número de capacitores en cada nodo.

Si se utilizan capacitores conmutables el número de combinaciones posibles aumenta drásticamente, junto con el tiempo y los requerimientos computacionales de solución del problema. Las posibles combinaciones están dadas por (deducción de la formula más adelante):

$$\left[(h+1)^j + h^j + (h-1)^j + (h-2)^j + ... + 1\right]^n \quad (2)$$

en el que n es el número de nodos donde van a ir capacitores, h es el máximo número de capacitores en cada nodo y j es el número de niveles de carga.

3.1 Problema IEEE 9 nodos

Como ejemplo base se tomó un sistema de distribución radial de 23 kV y 9 nodos trabajado en los artículos [2], [3], [6], [9], [11] y [13] cuyos datos son presentados en las tablas 1 y 2:

Tabla 1. Datos de carga trifásica

Nodo	PL(kW)	QL(Kvar)
1	1840	460
2	980	340
3	1790	446
4	1598	1840
5	1610	600
6	780	110
7	1150	60
8	980	130
9	1640	200

Tabla 2. Datos de impedancia de la red para el problema IEEE 9 nodos

De nodo i	A nodo i+1	R(i,i+1) (Ω)	X(i,i+1) (Ω)
0	1	0,1233	0,4127
1	2	0,014	0,6051
2	3	0,7463	1,205
3	4	0,6984	0,6084
4	5	1,9831	1,7276
5	6	0,9053	0,7886
6	7	2,0552	1,164
7	8	4,7953	2,716
8	9	5,3434	3,0264

La función objetivo utilizada es:

$$K_e \sum_{j=0}^{2} T_j P_j + K_p P_0 + K_c \sum_{i=1}^{n} C_i \quad (3)$$

Los parámetros utilizados son Ke=0.06 US$/kWh, Kp=168 US$/kW/año, Kc=4.9 US$/kVAr, T0=1000 h, T1=6760 h, T2=1000 h, Pj son las pérdidas de potencia en cada nivel de carga j, Ci es la capacidad de los bancos de capacitores instalados en el nodo i y los niveles de carga son 1.1,0.6,0.3 [6],[9].

4. Resultados

4.1 Capacitores fijos

Cuando no se adicionan capacitores la función objetivo vale US$ 329.020 que difieren ligeramente de lo reportado en [6] de US$

328.922, y en [9] de US$329.039. Para contrastar los resultados con [9] suponemos que se deben instalar capacitores fijos en los nodos 1,3,4,5,6 (n=5) y máximo hasta 5 bancos de capacitores por nodo (h=5) de 300 kVAR cada uno. Se encuentra que se deben evaluar (5+1)5=7776 posibilidades, al evaluar todas estas combinaciones con el algoritmo diseñado se encontró que el mínimo costo se presenta cuando instalamos la combinación presentada en la tabla 3.

Tabla 3. Ubicación óptima de capacitores fijos

Nodo	1	3	4	5	6
Bancos	0	2	5	2	2
Capacidad (kVAR)	0	600	1500	600	600

Esta combinación tiene un costo de US$ 301.250 y un ahorro de US$ 27.765 con respecto al caso sin aplicar compensación. En contraste con el óptimo presentado en [9] que era de US$ 308.909 y un ahorro de US$ 20.130 y cuya combinación es presentada en la tabla 4.

Tabla 4. Ubicación de capacitores fijos presentada en [9]

Nodo	1	3	4	5	6
Bancos	1	0	1	2	4
Capacidad (kVAR)	300	0	300	600	1200

Igual que en [9] en el algoritmo se introdujo un estudio de cercanos al óptimo presentadas en la tabla 5.

4.2. Capacitores variables

Ahora, analizando la dimensión del problema para capacitores conmutables, por ejemplo para j=3 niveles de carga y ubicación de capacitores en n=2 nodos (máximo hasta 5 bancos de capacitores h=5), tendremos 4412 =194.481 posibles combinaciones; este número proviene de que se tienen (h+1)2=(5+1)2=32 combinaciones para 2 capacitores en 2 nodos (nodo A=0, nodo B=0; nodo A=0, nodo B=1; nodo A=0, nodo B=2; ...; nodo A=0, nodo B=5; nodo A=1, nodo B=0;...; nodo A=1, nodo B=5;...; nodo A=5, nodo B=5). Para estas 32 combinaciones se deben evaluar cuántas posibilidades habrá para 3 niveles de carga y t bancos de capacitores encontrándose que se tienen (t+1)3 posibilidades (5 bancos→63→216, 4 bancos→53→125, 3 bancos→43→64, ..., 0 bancos→13→1), cada posibilidad del nodo A se debe multiplicar con cada posibilidad del nodo B en cada una de las 32 posibilidades al hacer este proceso se deduce que se tienen (63+53+43+33+23+13)2=4412 =194.481 combinaciones, que corresponde a la formula general que se dedujo y mostrada en [2].

Tabla 5. Combinaciones cercanas al óptimo

Nodo	1	3	4	5	6	Costo US$
BANCOS	0	2	5	1	3	$301.380
BANCOS	0	2	5	2	2	$301.250
BANCOS	0	2	5	3	1	$301.390
BANCOS	0	3	4	2	2	$301.360
BANCOS	0	3	5	1	3	$301.400
BANCOS	0	3	5	2	2	$301.270
BANCOS	0	4	4	2	2	$301.370

Regresando al ejemplo base, se diseñó un algoritmo que puede evaluar el problema para capacitores conmutables; para 3 capacitores en los nodos 4, 5, 6 (máximo 5 bancos) y 3 niveles de carga se tendrían 4413=85.766.121 combinaciones se corrió el

programa para este caso y después de 2 días tan sólo se llegó a la combinación 3.278.529 que corresponde a la combinación y conmutaciones presentadas en la tabla 6.

Tabla 6. Combinación 3.278.526

	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR
Bancos	0	0	2	4	3
Nivel de carga 1,1	0	0	600	1200	900
Nivel de carga 0,6	0	0	600	1200	900
Nivel de carga 0,3	0	0	600	1200	900

Hasta esta iteración el óptimo de la solución objetivo se encontró para la combinación y conmutaciones presentada en la tabla 7.

Tabla 7. Ubicación capacitores variable

	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR
Nodo	1	2	4	5	6
Bancos	0	0	2	3	5
Nivel de carga 1,1	0	0	600	300	1500
Nivel de carga 0,6	0	0	600	300	300
Nivel de carga 0,3	0	0	600	0	300

Esta combinación tiene un costo de US$ 300.700 y un ahorro de US$ 28.321 con respecto al caso sin aplicar compensación. En contraste con él óptimo para capacitores conmutables presentado en [9] que era de US$ 307.586 y un ahorro de US$ 21.453 y cuya combinación se presenta en la tabla 8.

Con respecto al algoritmo de solución, podemos deducir cuánto tiempo utiliza en cada iteración, es decir, cuánto tiempo se gasta para solucionar cada flujo de potencia. El tiempo utilizado para realizar 3.278.529

Tabla 8. Ubicación capacitores variable presentada en [9]

	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR	kVAR
Nodo	1	2	4	5	6
Bancos	1	1	1	2	4
Nivel de carga 1,1	300	300	300	600	1200
Nivel de carga 0,6	0	300	0	600	1200
Nivel de carga 0,3	0	0	300	0	900

es de 48 horas, es decir, 172.800 segundos, entonces cada flujo de potencia se realizó en promedio en 0.0527 segundos. Se debe tener en cuenta que este tiempo corresponde a un flujo de potencia de un sistema de distribución de 9 nodos. Para el flujo de potencia se utilizó el método propuesto en "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method" [17] el cual se basa en un procedimiento iterativo que utiliza el método lineal de Gauss y usa la matriz de admitancia longitudinal, pero a diferencia de Aplicaciones de tiempo real para el cálculo de estados eléctricos y optimización de redes de distribución [18] no se utiliza la bifactorización sino la factorización LU de la matriz de admitancia ya que esta función viene incorporada en Matlab©, programa que fue utilizado para implementar el algoritmo.

5. Conclusiones

El problema de ubicación óptima de capacitores ha sido objeto de investigaciones durante varias décadas y han sido utilizadas varias técnicas de solución. El presente artículo da una panorámica de los diferentes aspectos que deben utilizar los planificadores de las distribuidoras para solucionar este problema.

Se recomienda que el tratamiento de la demanda debe ser más acorde a los sistemas reales, ya que todos los artículos revisados asumen que la variación de los niveles de carga son iguales en todo el sistema, ninguno trata la carga como dependiente del voltaje ni tienen en cuenta la aleatoriedad de ésta; además, se debe tener en cuenta el contenido de armónicos en la red

Los resultados mostrados permiten concluir que a pesar de que los métodos de solución propuestos en la literatura sobre este problema (métodos analíticos, métodos de programación numérica, métodos heurísticos, métodos basados en inteligencia artificial) son efectivos, en cuanto a tiempo y requerimientos computacionales, no necesariamente llegan al óptimo global.

Referencias bibliográficas

[1] Ponnavaiko, M. y Prakasa Rao K. S. (1983). "Optimal Choice of Fixed and Switched Shunt Capacitor on Radial Distributors by the Method of Local Variations". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1607-1615.

[2] Baran, E. y Wu F. (1989). "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 725-734.

[3] Baran, E. y Wu F. (1989). "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 735-743.

[4] Chiang, Hsiao-Dong, Wang J-C., Cockings O., y Shin H-D. (1990). "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and the Overall Problem". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 634-642.

[5] Chiang Hsiao-Dong, Wang J-C., Cockings O., y Shin H-D. (1990). "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 643-649.

[6] Huang, Yann-Chang. Yang, Hong-Tzer. Y Huang. Ching-Lien. (1996). "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November, pp. 1868-1873.

[7] Chis, M., y Salama M.M.A, Jayaram. (1997). "Capacitor Placement in Distribution System Using Heuristic Search Strategies". IEEE Proc.-Gener.Transm. Distrib., Vol. 144, No. 3, pp. 225-230.

[8] Gallego, R., Monticelli A., y Romero R. (2001). "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 630-637.

[9] Gou, B., y Abur, A. (1999). "Optimal Capacitor Placement for Improving Power Quality". IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, , No. 18-22, pp. 488-492.

[10] Alencar de Souza, B., Helton do Nascimento, Alves y Alves, Ferreira H. (2004). "Microgenetic Algorithms and Fuzzy

Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 942-947.

[11] Su C., T. Lii G. R., y Tsai C. C. (2001). "Optimal Capacitor Allocation Using Fuzzy Reasoning and Genetic Algorithms for Distribution Systems". Mathematic and Computer Modelling, No. 33, pp. 745-757.

[12] Cho M., Y., y Chen Y.W. (1997). "Fixed/ Switched Type Shunt Capacitor Planning of Distribution Systems by Considering Customer Load Patterns and Simplified Feeder Model". IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 6, pp. 533-540.

[13] Cbaghzouz Y., y Ertem S. (1990). "Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeder with Distorted Substation Voltages". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 650-657.

[14] Sundhararajan, S., y Pahwa, A. (1994). "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1499-1507.

[15] Masoum, M. A. S., Jafarian, A., Ladjevardi, M., Fuchs, E. F., y Grady W. M. (2004). "Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 822-829.

[16] Yu, X. M., Xiong, X. Y., y Wu, Y. W. (2004). "A PSO Based Approach to Optimal Capacitor Placement with Harmonic Distortion Consideration". Electric Power Systems Research, No. 71, pp. 27-33.

[17] Hsiao, Y. T., Chen, C. H., y Chien, C. C. (2004). "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy-GA Method". Electric Power and Energy System, No.26, pp. 501-508.

[18] Vargas, Alberto. (2003). Aplicaciones de tiempo real para el cálculo de estados eléctricos y optimización de redes de distribución. Tesis Doctoral, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional.