

Ubicación y dimensionamiento óptimo de condensadores en sistemas eléctricos de distribución con polución armónica usando recocido simulado

Carlos Alberto Ríos

Ingeniero Electricista, M.Sc., Profesor Auxiliar. Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. alport@utp.edu.co

Ramón Alfonso Gallego

Ingeniero Electricista, Ph.D., Profesor Titular. Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. ragr@utp.edu.co

Mauricio Granada E.

Ingeniero Electricista, M.Sc., Profesor Auxiliar. Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. magra@utp.edu.co

PALABRAS CLAVES

Armónicos, condensadores, cargas no lineales, flujo de carga armónico, optimización combinatoria, Simulated Annealing.

KEYWORDS

Harmonics, capacitor banks, non linear loads, harmonic power flow, combinatorial optimization, Simulated Annealing.

RESUMEN Se emplea el algoritmo de recocido simulado para resolver el problema de la ubicación óptima y la elección del tamaño de bancos de condensadores fijos en sistemas de distribución, cuando existen señales eléctricas con contenido armónico. El modelo matemático contempla como función objetivo el costo de pérdidas en energía y potencia para cada armónico, así como los costos de inversión de los condensadores. Las restricciones incluyen límites de voltaje, calidad de potencia, tamaño, número y ubicación de los bancos de condensadores. Como herramienta de análisis se usa un flujo de carga armónico desarrollado por el grupo de investigación.

ABSTRACT The Simulated Annealing Algorithm is used to solve the problem of optimal placement and sizing of fixed capacitor banks in distribution networks in the presence of harmonic electrical signals. In the mathematical model, the objective function includes the cost of power and energy losses at each harmonic frequency, and the inverting cost of capacitor banks. Constraints include voltage limits, power quality limits, number, size and locations of capacitors banks. A harmonic load flow was implemented as analysis tool.

INTRODUCCIÓN

Los bancos de condensadores, conectados en paralelo, normalmente son instalados en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas de energía y potencia, mejorar el perfil de voltaje, mejorar el factor de potencia, aumentar la capacidad de transporte de las líneas de distribución y de los transformadores, entre otros. Con el incremento de las componentes armónicas en las señales eléctricas, aumentan los problemas técnicos y económicos que disminuyen la eficiencia e incrementan los costos operativos en los sistemas de distribución. Entre los problemas más comunes se encuentran: aumento de pérdidas de potencia, errores en la medición de potencia activa y reactiva, excesiva circulación de corrientes por el neutro, incremento en los niveles de interferencia electromagnética, incorrecta operación en los relés de protección, disminución en la calidad de la potencia, aumento peligroso de las tensiones y las corrientes por condiciones de resonancia.

Los niveles de armónicos en los sistemas de distribución son atenuados, generalmente, con el uso de condensadores, ya que para las frecuencias de orden superior ofrecen una baja impedancia a tierra. Debido a ésta y otras ventajas, los condensadores son considerados como los primeros candidatos para resolver los problemas operativos en los sistemas de distribución para la frecuencia fundamental y para las frecuencias armónicas. Adicionalmente, los condensadores pueden ser ubicados en puntos estratégicos del sistema de distribución para obtener una adecuada relación entre el beneficio y el costo; esto convierte al problema en uno de optimización matemática, para el cual la función objetivo consiste en minimizar las pérdidas de energía, las pérdidas de potencia y la inversión en los bancos de condensadores. Las restricciones incluyen el flujo de carga armónico, los valores *rms* de voltaje, la distorsión armónica máxima por barra y un máximo número de condensadores fijos por barra y por alimentador. Para resolver este problema ma-

temático se utiliza el algoritmo heurístico¹ conocido como recocido simulado o SA (acrónimo en inglés de Simulated Annealing).

MODELOS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Los elementos de un sistema eléctrico pueden representarse a través de impedancias lineales o no lineales. El primer caso corresponde a aquellos elementos en los que existe una relación proporcional entre la tensión y la corriente para las mismas componentes frecuenciales; entre estos elementos se pueden considerar las líneas, los transformadores, las máquinas eléctricas y algunas cargas. En el segundo, los elementos no presentan esta relación proporcional en todo su espectro y corresponden a dispositivos de estado sólido y su técnica de modelado es conocida como modelado por inyección de corriente. Los modelos usados en este trabajo se ajustan a los presentados por Ríos, Aristizábal y Escobar [1].

FLUJO DE CARGA ARMÓNICO

El flujo de carga armónico encuentra las variables desconocidas de un flujo de carga convencional (voltajes y ángulos a frecuencia fundamental) y adicionalmente encuentra los voltajes en cada frecuencia armónica, con lo cual se puede calcular la distorsión de voltaje y la potencia total. Entre los diversos algoritmos existentes para el cálculo del flujo de carga armónico se encuentra el *método de la penetración armónica*, el cual considera que los voltajes armónicos son pequeños y, por lo tanto, se supone que no hay interacción armónica entre la red y los dispositivos no lineales. Esta suposición permite separar el flujo de carga armónico en dos subproblemas: uno a frecuencia fundamental y otro con interacción armónica.

1 Proceso que depende de la probabilidad y el azar.

SUBPROBLEMA UNO: FLUJO DE POTENCIA A FRECUENCIA FUNDAMENTAL

Se utiliza el método de barrido escalonado de suma de corrientes para aprovechar las ventajas de la topología radial del sistema de distribución. Esta metodología se basa en la aplicación, de forma iterativa, de la primera y Segunda Ley de Kirchhoff a través de dos recorridos. El primero es un recorrido que parte desde los nodos más alejados hasta la subestación (barrido hacia atrás), aplicando la primera ley de forma que se calculen las corrientes por las líneas. La segunda ley de Kirchhoff se aplica realizando un barrido hacia delante para encontrar los voltajes nodales. Para conocer la corriente en una línea determinada se requiere el valor de la carga (corriente) en el nodo de llegada y las corrientes por cada una de las ramas que salen de éste.

El proceso se detiene cuando el error entre las pérdidas totales, tanto en potencia activa como en potencia reactiva, y las pérdidas calculadas en la iteración anterior es suficientemente pequeño según una *tolerancia* definida. Las ecuaciones que describen el comportamiento de las pérdidas del sistema son:

$$P_{perdidas(N1-N2)}^{(1)} = \text{real} \left\{ \frac{|\mathbf{V}_{N1} - \mathbf{V}_{N2}|^2}{R_{Linea(N1-N2)} - jX_{Linea(N1-N2)}} \right\} \quad (1)$$

$$Q_{perdidas(N1-N2)}^{(1)} = \text{ima} \left\{ \frac{|\mathbf{V}_{N1} - \mathbf{V}_{N2}|^2}{R_{Linea(N1-N2)} - jX_{Linea(N1-N2)}} \right\} \quad (2)$$

$$P_{perdidas}^{(1)} = \sum_{k=1}^{N-1} P_{perdidas(N1-N2)_k}^{(1)} \quad (3)$$

$$Q_{perdidas}^{(1)} = \sum_{k=1}^{N-1} Q_{perdidas(N1-N2)_k}^{(1)} \quad (4)$$

$$\left| P_{perdidas(anterior)}^{(1)} - P_{perdidas(actual)}^{(1)} \right| < \text{tolerancia} \quad (5)$$

$$\left| Q_{perdidas(anterior)}^{(1)} - Q_{perdidas(actual)}^{(1)} \right| < \text{tolerancia} \quad (6)$$

Donde N = número de nodos del sistema, $N-1$ = número de líneas; $N1$ = nodo de envío, $N2$ = nodo de recibo, $R_{Linea(N1-N2)}$ y $X_{Linea(N1-N2)}$ resistencia y reactancia de la línea entre $N1$ y $N2$ respectivamente, V_N = voltaje polar en cada barra, $P_{perdidas(N1-N2)}^{(1)}$ = pérdidas de potencia activa entre dos nodos, $Q_{perdidas(N1-N2)}^{(1)}$ = pérdidas de potencia reactiva entre dos nodos; $P_{perdidas}^{(1)}$ y $Q_{perdidas}^{(1)}$ pérdidas totales a frecuencia fundamental en el sistema de distribución.

SUBPROBLEMA DOS: INTERACCIÓN ARMÓNICA O BARRIDO EN FRECUENCIA

Se halla la respuesta del sistema a una inyección de corrientes armónicas por medio de la ecuación (7).

$$V^{(h)} = Z_{BUS}^{(h)} \cdot I^{(h)} \quad (7)$$

$$P_{perdidas}^{(h)} = \sum_{k=1}^N \sum_{h=1}^H \text{real} \left\{ \gamma_k^{(h)} \left(\mathbf{I}_k^{(h)} \right)^* \right\} \quad (8)$$

$$Q_{perdidas}^{(h)} = \sum_{k=1}^N \sum_{h=1}^H \text{img} \left\{ \gamma_k^{(h)} \left(\mathbf{I}_k^{(h)} \right)^* \right\} \quad (9)$$

Las pérdidas armónicas se calculan como se muestra en las ecuaciones (8) y (9), donde H corresponde al máximo orden armónico considerado, $P_{perdidas}^{(h)}$ son las pérdidas de potencia “activa” y $Q_{perdidas}^{(h)}$ son las pérdidas de potencia “no activa”. Las pérdidas totales en el sistema se obtienen considerando las pérdidas a frecuencia fundamental $P_{perdidas}^{(1)}$ y a frecuencias armónicas $P_{perdidas}^{(h)}$: $P_{perdidas} = P_{perdidas}^{(1)} + P_{perdidas}^{(h)}$

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de la ubicación de condensadores consiste en determinar el número, el tipo, la localización y el tamaño óptimo de los bancos de condensadores, tales que se logre un mínimo costo anual debido a la reducción en las pérdidas de potencia, en las pérdidas de energía y en el costo de los bancos de condensadores mientras se mantienen las restricciones opera-

tivas y las restricciones de calidad de potencia dentro de los límites requeridos. En la formulación de este problema se consideran las siguientes suposiciones: Voltaje sinusoidal en la subestación, operación en estado estable, compensación en el mismo nivel de voltaje, condensadores con valores fijos, presencia de cargas lineales y no lineales en sistemas trifásicos balanceados, cargas que varían de acuerdo a una curva de duración discreta.

La función objetivo² se plantea según la expresión (10):

$$\min F = F_{perdidas} + F_{costo} + F_{capacidad} \quad (10)$$

$$F_{perdidas} = K_E \sum_{k=1}^{nt} T_k P_{perdidas(k)}(V^{(1)}, \dots, V^{(H)}, Q) \quad (11)$$

$$F_{costo} = \sum_{j \in SC} (K_{cfj} Q_{fj}) \quad (12)$$

$$F_{capacidad} = K_A P_{perdidas}(V^{(1)}, \dots, V^{(H)}, Q) \quad (13)$$

Donde $F_{perdidas}$ es el costo de pérdidas de energía, F_{costo} es el costo de los condensadores, $F_{capacidad}$ es el costo correspondiente a las pérdidas de potencia (capacidad usada en el sistema), $P_{perdidas}$ son las pérdidas totales en el sistema con carga constante, $P_{perdidas(k)}$ son las pérdidas en el sistema en el nivel k de la curva de duración de carga en MW , K_A es la ganancia por MW por reducción en las pérdidas ($K_A = 120.000 \text{ \$/MW}$), K_E costo por MWh ($K_E = 50 \text{ \$/MWh}$), T_k es la fracción de duración de la carga en el nivel k (horas/año) con pérdidas $P_{perdidas(k)}$, nt es el número de niveles de la curva de duración de carga, SC es el conjunto de posibles barras consideradas para la ubicación de condensadores, Q_{fj} es la potencia reactiva de los condensadores fijos conectados en la barra j en kVA . y K_{cfj} es el costo por unidad de condensadores fijos $\text{\$/kVAR}$.

Las restricciones consideran los siguientes aspectos:

- Cumplimiento de las ecuaciones de flujo de carga armónico. Para ello, se utiliza en el modelo la expresión (11).

- Límites máximos y mínimos de tensión en p.u. en cada barra. Generalmente se asume que

$$0.9 \leq V_{rms(j)} \leq 1.1.$$

$$V_{rms(j)} = \sqrt{\sum_{h=1}^H (V_j^{(h)})^2} \quad 1 \leq j \leq N \quad (14)$$

- Distorsión máxima total de voltaje considerando la distorsión armónica total máxima de voltajes (THDV) en la j -ésima barra:

$$THD_{V,j} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{h=1}^H (V_j^{(h)})^2}}{V_j^{(1)}} \right) \cdot 100\% \leq THD_V^{\max} \quad 1 \leq j \leq N \quad (15)$$

- Máximo número de condensadores por barra y máximo número de condensadores en el alimentador del sistema de distribución.

$$u_{fj} \leq u^{\max} \quad 1 \leq j \leq N \quad (16)$$

$$\sum_{j \in SC} (u_{fj}) \leq U^{\max} \quad 1 \leq j \leq N \quad (17)$$

Donde u^{\max} es el máximo número de condensadores conectados en cada barra, u_{fj} es el número de condensadores fijos conectados en la barra j y U^{\max} es el máximo número de condensadores conectados en el alimentador.

ALGORITMO DE RECOCIDO SIMULADO

La idea original que dio lugar a esta técnica se denomina algoritmo de Metrópolis, que a su vez está basado en el método de Monte Carlo y estudia las

² Es la función que se desea optimizar (minimizar o maximizar) y que en este caso obedece a criterios económicos y técnicos.

propiedades de equilibrio en el análisis del comportamiento microscópico de los cuerpos. Este algoritmo consiste en que si se tiene un estado actual del sólido i con energía E_i , entonces el subsiguiente estado j con energía E_j es generado aplicando un mecanismo de perturbación consistente en provocar una pequeña distorsión en el estado actual. Si la diferencia de energía entre estados, $E_j - E_i$, es menor o igual a cero, el estado j es aceptado como el estado actual. Si la diferencia de energía es mayor a cero, el estado j es aceptado con cierta probabilidad, la cual está determinada por:

$$e^{\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right)} \quad (18)$$

Donde T denota la temperatura y K_B es una constante física conocida como constante de Boltzmann. En optimización un movimiento será aceptado si su costo disminuye o, en caso contrario, si su probabilidad de aceptación es mayor que un número aleatorio; este tipo de estrategias permiten que el algoritmo escape de óptimos locales. En la medida en que evoluciona el proceso, disminuye la temperatura, se incrementa la longitud de la cadena y, por lo tanto, disminuye la probabilidad de aceptar soluciones de peor calidad.

Los parámetros a definir en el algoritmo son los siguientes: (i) Temperatura inicial calculada al inicio del proceso, en la primera cadena y una única vez. Su valor depende principalmente del problema tratado y de la probabilidad de aceptación. Valores muy elevados hacen que el proceso tenga un mayor esfuerzo computacional; valores bajos pueden hacer que el algoritmo quede atrapado en soluciones de baja calidad al inicio del proceso. (ii) La tasa de enfriamiento para la cual existen valores típicos propuestos en la literatura especializada entre $[0.9 - 0.5]$. (iii) La temperatura final proveniente de un adecuado criterio de parada. (iv) Una longitud de la cadena de Markov que permita

al proceso alcanzar el cuasi equilibrio en cada nivel de temperatura. Una manera simple de seleccionar la longitud de la cadena es hacerlo de acuerdo con el tamaño del problema. (v) Una tasa de incremento de la cadena para la cual existen valores típicos sugeridos en la literatura entre $[1.0 - 1.2]$.

La estructura de vecindad³ y el mecanismo de generación de alternativas se introducen a través de las siguientes dos definiciones: i) Si se tienen dos soluciones, i (alternativa actual) y j (alternativa i modificada), con valores de la función objetivo $f(i)$ y $f(j)$, respectivamente, entonces, el criterio de aceptación determina si j es aceptado como alternativa actual. Para ello, se aplica la siguiente probabilidad de aceptación:

$$P_c \{\text{aceptar } j\} = \begin{cases} 1 & \text{si } f(j) \leq f(i) \\ e^{\left(\frac{f(i) - f(j)}{C_k}\right)} & \text{si } f(j) > f(i) \end{cases}$$

C_k corresponde al parámetro de control.

ii) Una transición es una acción combinada que transforma la alternativa de solución actual. Dicha acción consiste de los siguientes dos pasos: (a) aplicación del mecanismo de generación y (b) aplicación del criterio de aceptación. Definiendo c_k como el valor del parámetro de control y L_k como el número de transiciones generadas en la k -ésima iteración del algoritmo de Metrópolis, se tiene el algoritmo de enfriamiento simulado mostrado en la figura 2. Los valores adecuados de los parámetros c_0 y L_0 para el problema tratado se discutirán a continuación. La temperatura inicial (T_0) se obtiene en forma constructiva, simulando las transiciones hechas en el inicio del proceso para la primera cadena de Markov (N_0). El tamaño inicial de N_0 es estimado en función del número de condensadores que se pueden adicionar al sistema estudiado, o sea, un valor múltiplo de nc , así: $N_0 = (k_{factor})(nc)$, don-

3 Se refiere a la política usada en la modificación de las alternativas de solución de un problema en procura que el algoritmo realice una búsqueda heurística de soluciones de mejor calidad en regiones cercanas a la actual.

de (k_{factor}) asume valores enteros de 1, 2, 3, etc. N_0 y T_0 tienen una relación inversa; por lo tanto, al utilizar longitudes de cadena más largas, la temperatura inicial será más baja. La temperatura inicial se calcula con la siguiente expresión:

$$T_0 = \frac{\Delta F +}{\ln \left| \frac{m_2}{m_2 X - m_1 (1 - X)} \right|} \quad (20)$$

Siendo X = tasa de aceptación ($85\% \leq X \leq 100\%$); $F(j)$ = valor de la función objetivo en la alternativa j , m_1 = número de transiciones propuestas de i a j para las cuales mejora la función objetivo ($F(j) \leq F(i)$), m_2 = número de alternativas en las que empeora la función objetivo ($F(j) > F(i)$), $\Delta F+$ es el incremento en la función objetivo cuando se aceptan configuraciones de peor calidad. En la literatura especializada se recomienda una tasa de enfriamiento $0.5 \leq \beta \leq 0.99$ la cual actualiza la temperatura según la expresión

$$T_{k+1} = \beta T$$

La temperatura final corresponde a un “sistema frío” y debería ser aquella para la que $T_f = 0$. Sin embargo, antes de que se llegue a este valor, la probabilidad

$e^{((f(i) - f(j))/T)}$ de que se acepte una solución de peor calidad es casi nula, por lo tanto $T_f > 0$. Existen varias maneras de definir el criterio de parada: (1) Fijar un número determinado de valores de temperatura T_k ; (2) parar si para un nivel de T_k no se obtiene una solución que supere la mejor función objetivo encontrada hasta ese instante, (3) cuando en el último nivel de temperatura no se haya encontrando un número mínimo de aceptaciones. El valor de N_k se escoge en función del número de variables del sistema (condensadores candidatos a ser ubicados en las barras) y este valor puede ser mantenido constante o variar con la disminución de la temperatura.

$$N_{k+1} = \rho N_k \quad \rho \geq 1 \quad (21)$$

IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La técnica de optimización usada hace parte de la familia de las técnicas denominadas poblacionales. Por tal motivo se requiere de un conjunto de alternativas iniciales (población) a partir de las cuales el algoritmo de optimización pueda realizar una búsqueda en un espacio de soluciones inicial. Así, es posible usar mecanismos tales como el de análisis de sensibilidades⁴ para construir una población inicial de buena calidad que permita reducir el espacio de alternativas de solución, determinando una lista de los nodos que producen el mayor impacto en las pérdidas de potencia activa cuando les son instalados un banco de condensadores.

Una forma sencilla de encontrar los nodos más sensibles es utilizada en Leiva [2], donde se calcula la derivada parcial de las pérdidas de potencia activa frente a una inyección de reactivos. Las pérdidas del sistema de potencia se expresan como:

$$P_L = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |V_i V_j Y_j| \cos(\theta_j + \delta_j - \delta_i) \quad (22)$$

El nivel de tensión en el nodo de envío se expresa como $V_i e^{j\delta_i}$ y en el nodo de recibo como $V_j e^{j\delta_j}$, conectados a través de la línea con parámetros de $Y_j e^{j\theta_j}$. Luego:

$$\left[\frac{\partial P_L}{\partial Q} \right] = [J_1] \cdot \left[\frac{\partial P_L}{\partial V} \right] + [J_2] \cdot \left[\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right] \quad (23)$$

Donde, $[J_1]$ y $[J_2]$ son respectivamente las transpuestas de las inversas de las submatrices $[J_{22}]$ y $[J_{21}]$ de la matriz jacobiana, y:

4 Se refiere a la medición del impacto de la variación de una variable sobre otra. En este caso interesa saber qué tan sensible son las pérdidas del sistema frente a cambios en la inyección de reactivos en las barras del sistema.

$$\left[\frac{\partial PL}{\partial V} \right] = 2 \cdot \sum_{j=1}^n V_j G_j \cos(\delta_j - \delta_i) \quad (24)$$

$$\left[\frac{\partial PL}{\partial \delta} \right] = -2 \cdot \sum_{j=1}^n V_i V_j G_j \sin(\delta_j - \delta_i) \quad (25)$$

El algoritmo del Enfriamiento Simulado toma una configuración cualquiera, de la población inicial, que contenga los nodos de ubicación preliminares de los condensadores y la cantidad de reactivos (tamaño del banco). Por medio del flujo de carga armónico se obtienen las características operativas del sistema para la configuración evaluada, necesarias para la valoración de la función objetivo. Una alternativa de solución se compone de una agrupación de nf de bancos de tipo fijo. La capacidad instalada para cada uno, sin importar su estado de operación, queda determinado por el número de unidades instaladas N_i , las cuales tienen un límite nb ($0 \leq N_i \leq nb$). De esta manera una alternativa de solución es un arreglo de dimensiones $(nc+1) \times (nf)$, donde nc es el número de niveles de carga comprendidos en el período de estudio.

$$\begin{bmatrix} Barra_1 & \dots & Barra_{nf} & Barra_{(nf+1)} \\ N1 & \vdots & N_{nf} & N_{(nf+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ N1 & \dots & N_{nf} & N_{(nf+1)} \end{bmatrix} S_{nc}$$

Figura 1 Codificación del Problema para una alternativa de solución

La primera fila corresponde al número con el cual se identifican las barras compensadas, mientras que el número de unidades instaladas en cada nivel de carga para cada banco se muestra desde la fila dos hasta la fila $(nc+1)$.

Así, un estado energético E_i en el algoritmo de SA corresponde a la evaluación de la función objetivo de la expresión (10) de una alternativa de solución como la mostrada en la figura 1 a través del flujo de carga armónico. Para seguir el algoritmo mostrado en la figura 2, es necesario establecer la temperatura inicial, la tasa de enfriamiento entre $[0.9 - 0.5]$, la temperatura final proveniente de un adecuado criterio de parada,

una longitud de la cadena de Markov que permita al proceso alcanzar el cuasi equilibrio en cada nivel de temperatura y una tasa de incremento de la cadena para la cual existen valores típicos sugeridos en la literatura entre $[1.0 - 1.2]$. Todos estos parámetros se pueden establecer siguiendo un proceso de prueba y error.

La modificación de una alternativa consiste en aplicar un adecuado criterio de vecindad; es decir, en realizar pequeñas modificaciones que permitan que el algoritmo explore en la vecindad de la alternativa actual. En este caso, la modificación a una alternativa de solución consiste en aumentar o disminuir en un paso al número de unidades instaladas en cada banco fijo. Teniendo en cuenta todo lo anterior, es posible aplicar el algoritmo de recocido simulado al problema de inyección de reactivos propuesto.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 3 muestra un sistema de distribución de 18 nodos con distorsión armónica. En este sistema está conectado un convertidor de seis pulsos de 3 MW en la barra 5. Dieciséis de los nodos están a un voltaje de 12.5 kV y dos barras (50 y 51) están localizadas en el lado de 138 kV del transformador de la subestación. La potencia base del sistema es 10 MVA, Masoum [3]. En la Figura 4 se enseña la curva de carga para las barras, donde T1, T2, T3 son 2500, 3760, 2500 horas/año respectivamente y S1, S2, S3 representan el porcentaje de carga 100%, 80% y 50% respectivamente. En la Tabla 1 aparecen los costos anuales de los bancos de condensadores fijos que son candidatos a ser ubicados en el sistema de prueba.

Los parámetros asociados al algoritmo SA son los siguientes: $T_0 = 7593$; $X_0 = 0.85$ tasa de aceptación; $N_0 = 24$ longitud inicial de la cadena de Markov; niveles de temperatura = 20; $\rho = 1.25$ aumento de la cadena de Markov; $\beta = 0.86$ factor de enfriamiento. Los valores finales de los parámetros son: temperatura final $T_f = 432.3983$; número final de alternativas

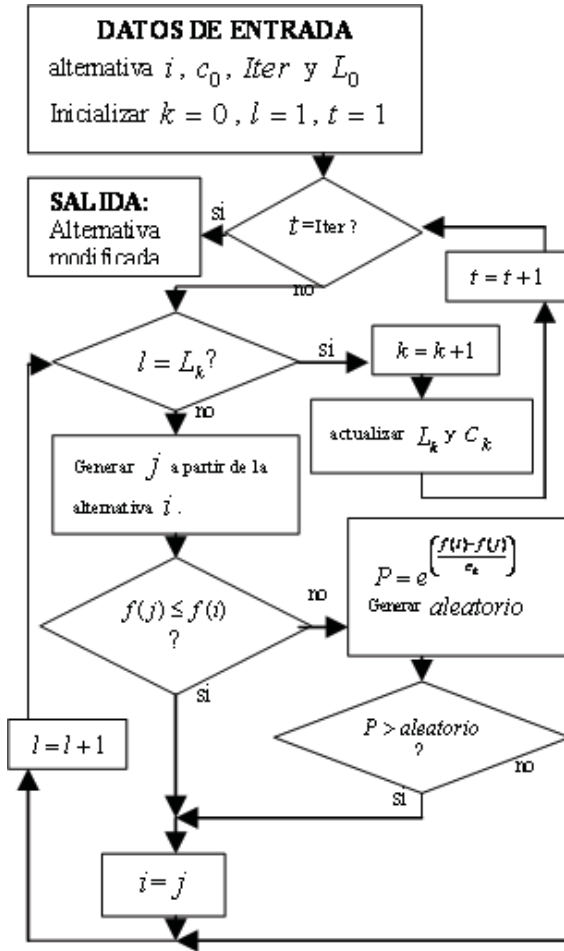


Figura 2. Algoritmo Recocido Simulado

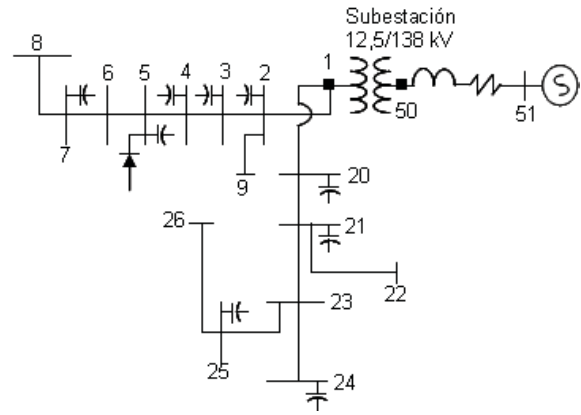


Figura 3. Diagrama unifilar de un sistema de distribución de 18 nodos

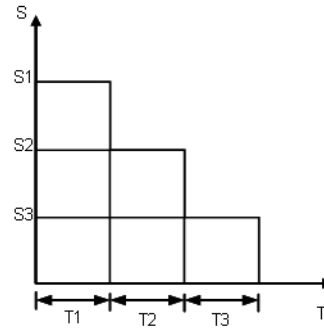


Figura 4. Curva de duración de carga

Q_p [kVAr]	$K_{c,ij}$ [\$/kVAr]	Q_p [kVAr]	$K_{c,ij}$ [\$/kVAr]
150	0.5	1950	0.211
300	0.35	2100	0.176
450	0.253	2250	0.197
600	0.22	2400	0.17
750	0.276	2550	0.189
900	0.183	2700	0.187
1050	0.228	2850	0.183
1200	0.17	3000	0.18
1350	0.207	3150	0.195
1500	0.201	3300	0.174
1650	0.193	3450	0.188
1800	0.187	3600	0.17

Tabla 1. Costo Anual de Condensadores Fijos

CASO	CASO BASE	FUZZY	ALGORITMO GENÉTICO	SIMULATED ANNEALING
Ubicac bancos condens	$Q_2 = 0.105$	$Q_2 = 0.015$	$Q_2 = 0.030$	$Q_1 = 0.12$
	$Q_3 = 0.060$	$Q_3 = 0.030$	$Q_3 = 0.000$	$Q_2 = 0.18$
	$Q_4 = 0.060$	$Q_4 = 0.060$	$Q_4 = 0.165$	$Q_3 = 0.060$
	$Q_5 = 0.180$	$Q_5 = 0.240$	$Q_5 = 0.330$	$Q_4 = 0.045$
	$Q_7 = 0.060$	$Q_7 = 0.210$	$Q_7 = 0.105$	$Q_9 = 0.165$
	$Q_{20} = 0.060$	$Q_{20} = 0.090$	$Q_{20} = 0.060$	$Q_{10} = 0.135$
	$Q_{21} = 0.120$	$Q_{21} = 0.120$	$Q_{21} = 0.090$	$Q_{11} = 0.075$
	$Q_{24} = 0.150$	$Q_{24} = 0.000$	$Q_{24} = 0.015$	$Q_{24} = 0.000$
	$Q_{25} = 0.090$	$Q_{25} = 0.000$	$Q_{25} = 0.015$	$Q_{25} = 0.000$
	$Q_{50} = 0.120$	$Q_{50} = 0.000$	$Q_{50} = 0.030$	$Q_{50} = 0.000$
Tot conde [pu]	$Q_1 = 1.005$	$Q_1 = 0.765$	$Q_1 = 0.840$	$Q_1 = 0.78$
Voltaje min. [pu]	1.051	0.974	0.978	1.030
Voltaje max. [pu]	1.062	1.048	1.048	1.083
THDv max. [%]	8.52	5.983	4.563	4.543
Pérd total [KW]	261.93	258.32	251.5	253.87
Cos cond [\$/año]	1,978.2	1,458.30	1,788.75	1,516
Costo tot [\$/año]	163,050	159,000	146,180	151,125
Gananc [\$/año]	-----	4,050	16,870	11,925
Beneficio/costo	-----	2.2722	9.4312	7.9183

Tabla 2. Comparación de Resultados

$N_{kf} = 2150$; total condensadores ubicados = 7; potencia condensadores = 7,800 KVAR; costo condensadores = \$1,506/año. Las restricciones técnicas son: V_{min} (pu) = 0.9; V_{max} (pu) = 1.1; THDv max (%) = 5.0; máximo número condensadores por barra = 10; máximo número condensadores en el alimentador = 28. En la Tabla 2 aparecen los resultados del proceso de optimización. El caso base corresponde a la topología de la Figura 3, las pérdidas totales son 261.93 KW y tienen un costo de \$163,050/año. Las topologías encontradas en (10) y (11) (algoritmos Fuzzy y algoritmos genéticos) fueron simuladas con los modelos y flujo de carga armónico descritos en este documento y las pérdidas halladas son 258.32 KW y 251.5 KW respectivamente y los costos de las mismas son \$159,000/año y \$146,180/año. Para el algoritmo de SA las pérdidas son 253.87 KW con un costo \$151,125/año, respecto al caso base las ganancias son de \$11,925/año, la relación beneficio/costo es 7.9183.

CONCLUSIONES

El algoritmo de recocido simulado se puede usar de manera eficiente para resolver en forma simultánea los problemas de inyección de reactivos y filtrado de componentes armónicas en sistemas de distribución.

La topología encontrada por el algoritmo de SA corresponde a una solución de buena calidad y muestra en dónde se deberían instalar los condensadores para disminuir las pérdidas y los costos operativos del sistema de distribución mientras se mantienen las restricciones planteadas en este documento.

La elección de los modelos de los elementos del sistema de distribución ejerce una amplia influencia en la calidad de los resultados del flujo de carga armónico, así como la adecuada calibración de los parámetros del algoritmo de Simulated Annealing afecta el desempeño computacional del algoritmo.

REFERENCIAS

- [1] **C. Ríos, M. Aristizábal, A. Escobar, Antonio.**
“Modelado de sistemas eléctricos en presencia de armónicos”, Revista Scientia Et Technica, Año IX, No. 22, oct. 2003; pp. 21-26, UTP, Pereira. ISSN 0122-1701.
- [2] **M. A. Leiva.**
Localización óptima de Condensadores Vía Algoritmos Genéticos. Tesis de grado. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Eléctrica.. 2001
- [3] **M.A.S. Masoum.**
Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

- R. Gallego, A. Escobar, y D. Rodas.**
Algoritmo genético especializado para la localización óptima de condensadores en sistemas de distribución de energía eléctrica. Bogotá-Colombia: I Encuentro Andino y II Congreso Colombiano de Investigación de Operaciones, 2002.
- S. Herraiz.**
Aportaciones al estudio de flujo armónico de cargas. Tesis Doctoral. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D'Enginyeria Elèctrica, 2002.
- S. Herraiz, L. Sainz, J. Clua.**
“Review of harmonic load flow formulations”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, jul. 2003; pp. 1079-1188.
- IEEE**
Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2; pp. 822-829
- A. Ruiz, J. Galvis, R Gallego.**
“Flujo de carga armónico para sistemas radiales.” Revista Scientia Et Technica, Año X, No. 25, agosto 2004; Pereira. ISSN 0122-1701.