



## APLICACIONES INDUSTRIALES

### Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución primaria de energía, aplicando algoritmos genéticos

#### Reactive compensation in primary distribution power systems, applying genetic algorithms

Davel Eduardo – Borges Vasconcellos<sup>1</sup>  
Yoel – Concepción Céspedes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz, UCIAL, Camagüey, Cuba.

<sup>2</sup> Oficina Territorial de Uso Racional de la Energía, Las Tunas, Cuba.

#### RESUMEN/ABSTRACT

En el trabajo se trata el problema de la compensación de la potencia reactiva en los sistemas de distribución primaria de energía eléctrica, teniendo en consideración los efectos del desbalance. En tal sentido, se abordan los diferentes aspectos para la compensación de potencia reactiva y se discuten las diferentes técnicas empleadas para tales fines. Partiendo de modelos y flujos de carga trifásicos, se expresan los efectos de la compensación de potencia reactiva, integrados en una función de optimización económica, modelada en el Valor Actual Neto (VAN). Aplicando la técnica de algoritmo genético, se logró formular el problema y maximizar la función VAN en el entorno preestablecido, determinando como solución los parámetros de los bancos de condensadores fijos simétricos y/o asimétricos. El método propuesto, programado en MATLAB, fue aplicado en el circuito de distribución primaria TK-9 de la ciudad de Las Tunas, con la obtención y discusión de los resultados.

**Palabras clave:** compensación de potencia reactiva, compensadores de reactivo.

*In the work it is the problem of the reactive power compensation in the primary distribution systems of electric power, having in consideration the effects of the unbalanced. In such a sense, the different aspects are approached for the reactive power compensation. The different technical used for such ends are discusses. Using models and three phasic load flows are expressed the effects of the reactive power compensation, integrated in an economic optimization function, modelled in the Net Current Value (VAN). Applying the technique of genetic algorithm is possible to formulate the problem and to maximize the VAN function in the preset environment, determining as solution the parameters of the capacitors banks fixed symmetrical or asymmetric can settle down. The proposed method, programmed in MATLAB, it is applied in the primary distribution circuit TK-9 of the city of Las Tunas, with the obtaining and discussion of the results.*

**Key words:** reactive power compensation, reactive compensators.

#### INTRODUCCIÓN

La compensación de potencia reactiva constituye un procedimiento general para el control de las condiciones de operación de una red eléctrica. Sin embargo, dependiendo del subsistema eléctrico difiere en el propósito principal que se persigue. La localización óptima de bancos de condensadores en sistemas eléctricos de distribución, generalmente es planteada como un problema de planeación. Las recomendaciones generales para la instalación de bancos de condensadores contemplan la inclusión de sus efectos y el establecimiento de los objetivos y políticas para su incorporación en el diseño del sistema, con el propósito de cumplir con

normas y estándares globales. Sin embargo, los métodos de compensación de potencia reactiva, basados en la selección y ubicación de bancos de condensadores para circuitos de distribución primaria, no siempre aseguran una solución óptima y, por ende, eficiente. En este tipo de instalaciones pueden existir grandes desbalances en la carga y el sistema.

Como objetivo principal de la investigación se planteó obtener un método de optimización para la compensación de potencia reactiva que resulte en la selección y ubicación de bancos de condensadores fijos (simétricos y asimétricos) para sistemas de distribución primaria de energía. Teniendo como premisas que los sistemas de distribución primaria se pueden caracterizar por su asimetría y el carácter desbalanceado de la carga, los bancos de condensadores asimétricos pueden proporcionar mejores resultados técnico-económicos en los sistemas con desbalance, se puede conformar la siguiente hipótesis:

Un método de compensación de potencia reactiva para sistemas de distribución primaria, que considere el efecto del desbalance y utilice los bancos de condensadores asimétricos para al mismo tiempo compensar la potencia reactiva y el desbalance, debe resultar más efectivo para este tipo de sistema, en relación con los métodos tradicionalmente empleados en los sistemas trifásicos balanceados.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Compensación reactiva en redes de distribución**

El sistema de distribución es el último eslabón en la cadena formada para hacer llegar la energía hasta los consumidores más pequeños.

- Las redes de distribución de energía se pueden clasificar de las formas siguientes:
- Por su ubicación o tipo de construcción: aéreas, soterradas, mixtas.
- Por el servicio que prestan: residenciales, industriales, comerciales, alumbrado, mixtas.
- Por la densidad de carga o tipo de área servida: rurales, urbanas, mixtas.
- Por su configuración: radiales, lazo, malla.

En el caso de estas redes, la compensación se entiende fundamentalmente como un procedimiento de ahorro energético, aunque también se considera su efecto de liberar capacidad eléctrica y mejorar el perfil de tensión en el circuito. En general, se utilizan bancos de condensadores fijos y se ubican a la salida de las subestaciones de distribución o en las líneas primarias en conexión serie [1], o más usualmente, paralelo. Se utiliza en este último caso técnicas básicas como la conocida regla de los dos tercios, entre otras. En determinadas ocasiones se han utilizado bancos de condensadores controlados por tiempo, con el fin de reducir la compensación y el nivel de la tensión, principalmente durante los horarios de menor demanda [2].

Esta mejora se realiza usualmente a través de bancos de condensadores simétricos en conexiones estrella o delta dependiendo de la topología del circuito, así como las capacidades de unidades disponibles.

### **Técnicas de optimización utilizadas en la compensación de potencia reactiva**

Como es conocido la selección de la capacidad y el tipo de compensadores a utilizar, así como su ubicación en el sistema eléctrico, constituyen un problema de optimización. A lo largo de los años se han empleado diferentes técnicas para la solución de este problema, las cuales pueden clasificarse en cuatro categorías: analíticas, de programación numérica, heurísticas y basadas en la inteligencia artificial. La introducción de cada una de estas técnicas ha estado relacionada en buena medida con el desarrollo progresivo de los medios de cómputo y procesamiento de la información [3]. Las técnicas de inteligencia artificial son meta heurísticas, es decir, incorporan a los procesos de optimización parámetros probabilísticos de conjunto con mecanismos inteligentes para guiar la búsqueda.

Debido a su desarrollo actual han ganado una categoría aparte en la solución de problemas de optimización complejos. Dentro de estas técnicas se pueden citar los sistemas de expertos, las redes neuronales artificiales, la lógica Fuzzy, el recocido simulado y los algoritmos genéticos, siendo esta última de las más empleadas en la actualidad para la solución del problema de la compensación de potencia reactiva.

Como ejemplo de esta técnica aplicada a la solución de problemas de los sistemas eléctricos se puede mencionar la metodología para la solución simultánea de los problemas de ubicación de condensadores y reconfiguración de alimentadores en sistemas eléctricos de distribución radiales, con el fin de mejorar el perfil de tensión de la red y, al mismo tiempo, reducir los costos asociados a las pérdidas de energía y potencia [4].

Otro método propone la selección y localización de bancos de condensadores, sujeto a restricciones técnicas y operativas, a partir de un modelo de maximización de ahorros económicos obtenidos, que tiene en cuenta los gastos asociados a las pérdidas de energía, así como los costos de instalación y mantenimiento de los condensadores. Las restricciones operacionales están dadas por las magnitudes de las tensiones en los nodos del circuito y la preservación de la naturaleza inductiva [5].

Esta técnica ha sido utilizada además para la solución de otros problemas de operación de las redes de distribución primaria, como es el caso del balance de carga entre las fases [6] y la reconfiguración de circuitos para la reducción de pérdidas y mejora de los perfiles de tensión [7,8].

En el caso de la compensación de potencia reactiva se han desarrollado procedimientos que se basan en modelos económicos que consideran todos los efectos de la compensación [9]. En el caso de los sistemas de uso final de la energía eléctrica, resulta indispensable considerar las regulaciones existentes en cuanto a las tarifas eléctricas [10], así como normativas para la explotación de los mismos [11]. En general, los métodos empleados en la compensación de potencia reactiva están caracterizados por los aspectos siguientes:

Se aplican mayoritariamente sobre la consideración de modelos de cargas balanceadas.

- En todos los casos, los registros de mediciones de los gráficos de carga son aproximados y se consideran constantes en los años de explotación (comportamiento patrón de la carga).
- Los bancos de condensadores resultantes son balanceados en la mayoría de los casos.
- El modelo de función de optimización no considera todos los efectos de la compensación de forma exacta dado fundamentalmente porque:
  - La estandarización de las unidades condensadoras en la mayoría de los casos es aproximada e incluso únicamente para múltiplos de una misma unidad de compensación.
  - Presentan aproximaciones al considerar los costos de instalación y accesorios auxiliares.
- El modelo de función de optimización de tipo económica, no siempre considera conceptos tales como el valor tiempo del dinero y la inflación.
- Los modelos de cargas que se han utilizado son aproximados en la mayoría de los casos.

De este análisis se concluye que no existe documentado ningún método de compensación de potencia reactiva que reúna las características siguientes:

- Posibilidad de seleccionar y ubicar bancos de condensadores simétricos y/o asimétricos.
- Consideración más exacta de las variaciones diarias de la carga.
- Consideración más exacta de los estados de operación de la red, antes y después de la compensación, empleando flujos de potencia trifásicos.
- Representación exacta de todos los efectos que tienen lugar en la compensación y, por ende, una evaluación económica más exacta del proceso inversionista para la toma de decisiones.

### **Modelación del sistema de distribución**

Un aspecto básico para el método presentado, descansa en la obtención del modelo de la red, lo que se traduce en la formación de la matriz admitancia de la misma.

Esta matriz se compone adicionando todas las submatrices admitancia de los diferentes elementos que integran el sistema eléctrico: transformadores, alimentadores y otros elementos pasivos como bancos de condensadores, etc.

## Formulación del problema de optimización. Análisis y planteamiento del problema

En el caso de la compensación de potencia reactiva, el problema real puede ser enunciado de la manera siguiente:

Determinar la cantidad de unidades de compensación de cada capacidad disponible y el lugar de ubicación, necesarias para compensar (de forma fija simétrica y/o asimétrica) la potencia reactiva en el sistema de distribución primaria, de forma tal que se obtenga el máximo de Valor Actual Neto (VAN).

Como consideraciones del problema aproximado (condiciones iniciales) se plantean las siguientes:

- Serán considerados en el análisis todos los efectos de la compensación de reactivo que puedan ser expresados desde el punto de vista económico.
- Los análisis de carga serán considerados en cada una de las fases, ya que se tiene en cuenta la existencia de desbalances en el sistema.
- Para la compensación se utilizarán bancos de condensadores fijos simétricos y/o asimétricos.
- La compensación se aplicará en todos los posibles nodos del sistema.
- Se limitará la cantidad de unidades condensadoras disponibles para la compensación.
- Se limitará la capacidad de compensación de potencia reactiva para los estados de máxima demanda.
- Los efectos sobre la tensión del sistema (baja o alta) deberán ser considerados en el análisis, de modo tal que no se excedan los límites de desviaciones establecidos en las normas [11].

## Construcción del modelo matemático

Como variables de decisión del problema se consideran las cantidades de unidades de compensación de cada capacidad monofásica disponible a ubicar en cada nodo. Por lo tanto, los cromosomas estarán representados por la matriz  $[x]$ , compuesta por los elementos (cadena de genes)  $x_{ij}$ , donde  $i$  es el número de nodos por fases y  $j$  la cantidad de capacidades disponibles. Debido a lo anterior, los elementos  $x_{ij}$  de la matriz  $[x]$  deben ser positivos y enteros ( $x \in N$ ). Esta condición deberá tenerse en cuenta a la hora de generar cada individuo de la población. Para esto, como alternativa cada elemento  $x_{ji}$  a su vez, es codificado en forma binaria por una cadena de  $n$  bit.

Como función de adaptación (*Fitness*) en primera instancia se toma el  $-VAN$ , añadiendo una función de penalización (*Penal*) incrementada por una cantidad suficientemente grande ( $10^7$ ), tal y como se presenta en la ecuación (1).

$$Fitness = -VAN + 10^7 \cdot Penal = K_t - (Bc - Cp - Ca) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+TD)^j} + 10^7 \cdot Penal \quad (1)$$

Esto se hace porque las herramientas computacionales empleadas en este caso solo hayan mínimo de funciones.

El objetivo será minimizar la función de adaptación.

La función de penalización se compone de la suma de penalizaciones especificadas cuando se incumplen las condiciones siguientes:

1. El número de unidades de compensación de un tipo ( $x_{unitj}$ ) excede de la cantidad de unidades disponibles de ese tipo ( $x_{disj}$ ), expresado en la ecuación (2).

$$\text{Si } x_{unitj} > x_{disj}, \text{ Penal}_1 = \sum_{\substack{j=1 \\ x_{unitj} > x_{disj}}}^k (x_{unitj} - x_{disj})^2 \quad (2)$$

Esta restricción permite tener en cuenta la cantidad disponible de unidades compensadoras de cada tipo.

2. El máximo valor de potencia reactiva de compensación a ubicar en una fase de forma global ( $Q_{Cf\acute{m}ax}$ ) es mayor que el máximo valor de potencia reactiva de fase global del sistema ( $Q_{f\acute{m}ax}$ ) en cualquier período de medición, expresado en la ecuación (3).

$$\text{Si } Q_{Cf\acute{m}ax} > Q_{f\acute{m}ax}, \text{ Penal}_2 = (Q_{Cf\acute{m}ax} - Q_{f\acute{m}ax})^2 \quad (3)$$

3. El máximo valor de potencia reactiva de compensación a ubicar en una fase para cada nodo ( $Q_{c_{f_{máx}i}}$ ) es mayor que el máximo valor de potencia reactiva de fase global del sistema ( $Q_{f_{máx}}$ ) en cualquier período de medición, expresado en la ecuación (4).

$$\text{Si, } Q_{c_{f_{máx}i}} > Q_{f_{máx}}, \text{ Penal}_3 = \sum_{\substack{i=1 \\ X_{f_{máx}i} > Q_{f_{máx}}}}^n (Q_{c_{f_{máx}i}} - Q_{f_{máx}})^2 \quad (4)$$

Las tres restricciones anteriores se consideran excluyentes del algoritmo, por lo que los individuos (soluciones) formados bajo esas condiciones tendrán una función de adaptación igual al valor de las penalizaciones acumuladas, tal y como se expresa en la ecuación (5).

$$\text{Fitness} = 10^7 \cdot (\text{Penal}_1 + \text{Penal}_2 + \text{Penal}_3) \quad (5)$$

El mayor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{imáx}$ ) es mayor que la máxima tensión permisible ( $V_{máx}$ ), expresado en la ecuación (6).

$$\text{Si } V_{imáx} > V_{máx}, \text{ Penal}_4 = \sum_{\substack{i=1 \\ V_{imáx} > V_{máx}}}^n (V_{imáx} - V_{máx})^2 \quad (6)$$

El menor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{imín}$ ) es menor que la mínima tensión permisible ( $V_{mín}$ ), expresado en la ecuación (7).

$$\text{Si } V_{imín} < V_{mín}, \text{ Penal}_5 = \sum_{\substack{i=1 \\ V_{imín} < V_{mín}}}^n (V_{imín} - V_{mín})^2 \quad (7)$$

Las últimas dos condiciones permiten amonestar a aquellos individuos (soluciones) no deseados, luego de la evaluación de los efectos de la compensación.

Se asumen como valores límites de las desviaciones de tensión -10% a +10% de la tensión del sistema en el nodo de entrega del suministro. De esta forma, la función *Fitness* para los individuos (soluciones) en este caso quedará definida según la ecuación (8).

$$\text{Fitness} = \begin{cases} 10^7 \cdot (\text{Penal}_1 + \text{Penal}_2 + \text{Penal}_3) \\ K_t - (Bc + Cs - Cp - Ca) \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1 + TD)^j} + 10^7 \cdot (\text{Penal}_4 + \text{Penal}_5) \end{cases} \quad (8)$$

Para las condiciones especificadas en cada caso.

Todas las condiciones fijadas por la función *Penal* permiten restringir el espacio de búsqueda, lo que favorece el tiempo de corrida del algoritmo.

Finalmente el modelo de optimización, quedaría expresado de la siguiente forma:

Datos del sistema:

- Diagrama monolineal de conexiones de los nodos y fases (incluye sistema de potencia).
- Datos de los elementos del sistema (transformadores y conductores).

Para transformadores: nodos de ubicación, topología de conexión de los devanados, capacidad nominal, resistencia y reactancia en % y valores de las derivaciones (*tap*).

Para conductores: nodos de ubicación, fases, secciones por fase, longitud, tensión permisible y tipo de conductor.

- Tensiones en los nodos.

- Datos del comportamiento de las cargas:
- Matriz potencia activa y reactiva de fase compuesta por los elementos  $P_{ik}$  y  $Q_{ik}$  donde  $i$  es el número de nodos y  $k$  la cantidad de estados de carga de comportamiento regular.
- Intervalos de medición  $\Delta t_k$ .
- Datos de los bancos de condensadores disponibles:  
Unidades fijas de compensación disponibles.  
Cantidades disponibles de las unidades fijas.  
Costo de inversión de las unidades fijas disponibles.  
Costos de inversión de los accesorios.  
Costo de inversión de la instalación.
- Datos de análisis económico:  
Años de explotación ( $n$ ).  
Tasas de descuento ( $TD$ ).

Se necesita minimizar la función de adaptación (*Fitness*) de la ecuación (8).

### **Método de compensación de la potencia reactiva**

A partir de la formulación del problema de optimización y el modelo matemático obtenido se puede establecer el método de compensación, que se compone de los aspectos siguientes:

1. Obtención de los datos necesarios para la aplicación.
2. Establecimiento del modelo de optimización deseado para determinar la cantidad de unidades de cada tipo necesarias para compensar bajo las condiciones previamente especificadas:  
Con bancos fijos simétricos.  
Con bancos fijos simétricos y asimétricos.
3. Ajuste de los parámetros de corrida del algoritmo genético de optimización, para asegurar la convergencia. En este caso se sugiere iniciar con los parámetros de referencia sugeridos por la herramienta computacional y bajo el criterio de corridas sucesivas del algoritmo, comprobar la convergencia de la solución ante la variación de los parámetros. Es recomendable realizar corridas iniciales bajo condiciones de frontera donde sean conocidos los resultados.
4. A partir de la cantidad de unidades de compensación de cada tipo y bajo las condiciones de compensación especificadas, seleccionar los parámetros técnicos de los dispositivos para cada alternativa de solución que maximice la función objetivo del modelo con una desviación máxima preestablecida. Fundamentar en cada caso la factibilidad a partir del análisis económico, donde se emplea como sugerencia los métodos del Valor Actual Neto (VAN), así como los indicadores económicos que lo avalan (costos de inversión, gastos de explotación y beneficios por la liberación de carga).
5. Efectuar la toma de decisiones por parte del especialista acerca de cuál alternativa considerar, para lo cual se toman en consideración factores principalmente relacionados con la disponibilidad real del proveedor de bancos de condensadores y la menor inversión inicial a realizar. Un criterio recomendado para la toma de decisión a partir de las alternativas, puede ser el Plazo de Recuperación de la Inversión (*PRI*).
6. Proceder a la adquisición y montaje de la variante de bancos de condensadores seleccionada.

### **Programación del procedimiento de solución del problema a partir del AGS**

Con ayuda del MATLAB, versión 7.8 (R2010a), se programó el modelo de compensación, se utilizan las estructuras de programación de la *Global Optimization Toolbox*.

Se seleccionó un algoritmo genético simple con selección estocástica universal (SUS), en el cual se considerará el elitismo en un rango moderado y bajo prueba.

Los parámetros del algoritmo fueron ajustados mediante corridas sucesivas de prueba y error, evaluando la convergencia, el número de evaluaciones de la función de adaptación y el tiempo de ejecución.

En la codificación del algoritmo se implementaron los bloques siguientes:

- *example (m-file)*: Programa principal del algoritmo de compensación.
- *objfunc (f-file)*: Implementación de la función objetivo (de adaptación) del algoritmo.
- *datasystem (f-file)*: Datos de los elementos del sistema eléctrico y de los receptores (estados de carga por fase de las potencias activas y reactivas en los nodos).
- *datacost (f-file)*: Datos los bancos de condensadores y datos del análisis económico.
- *createmapping (f-file)*: Determinación de las impedancias del sistema eléctrico.
- *formYmatrix (f-file)*: Formación de la matriz admitancia del sistema eléctrico.
- *loadflow (f-file)*: Implementación del flujo de carga trifásico.

Otros bloques secundarios fueron codificados para cálculos específicos.

### Caso de estudio: Circuito TK-9 de la ciudad de Las Tunas

El circuito TK-9 se encuentra emplazado a partir de la subestación eléctrica Tunas II. Se alimenta de un transformador de 25 MVA con tensiones de 110/13,8kV y está constituido por 22,84 km de líneas de 150 mm<sup>2</sup> y 2/0 AWG en su rama principal. Cuenta con 159 nodos. Se clasifica entre los circuitos largos de la provincia con un 4% de pérdidas eléctricas con respecto a las pérdidas totales. Posee un total de 152 transformadores, agrupados en 117 bancos para una capacidad instalada total de 6 525 kVA. De los 117 bancos de transformadores, 35 son exclusivos, 11 son mixtos y 71 del sector residencial. Este circuito presta servicio eléctrico a más de 4 062 viviendas. Como parte de este trabajo fueron actualizados previamente los esquemas eléctricos del circuito objeto de aplicación. Con ayuda del instrumento de medida instalado en el interruptor TI 510 fueron tomadas las mediciones de la potencia activa y reactiva por fase según se especifica en días característicos de comportamiento a la salida de la subestación que alimenta al circuito TK-9, lo cual se presenta en la figura 1.

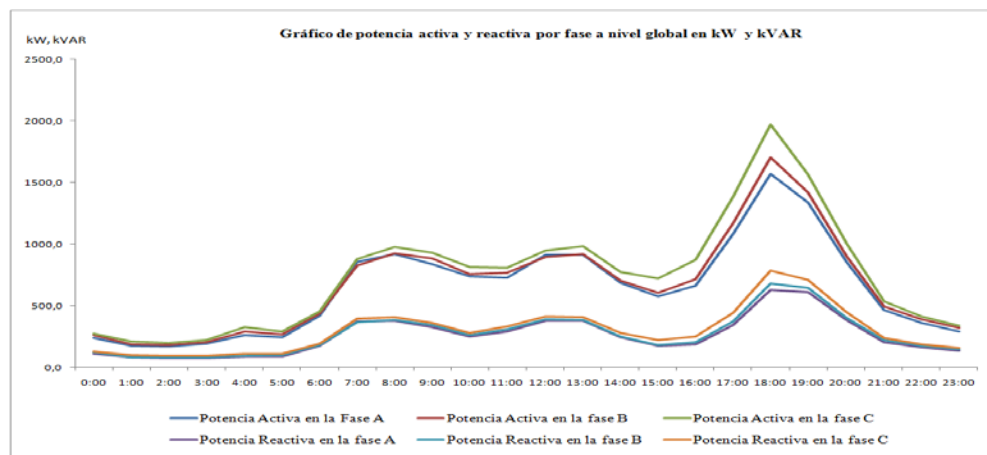


Fig. 1. Gráfico de carga a la salida de la subestación que alimenta el circuito TK-9.

El análisis del gráfico de carga expresa un comportamiento basado en un modelo de carga residencial. Sobre la base de esta consideración, los valores de potencia fueron derivados a cada uno de los nodos teniendo en cuenta la cantidad de viviendas ubicadas en cada nodo y fase.

Adicionalmente fueron considerados los gráficos de carga de los clientes no residenciales de importancia, los cuales fueron obtenidos con un analizador de redes y adicionados a los nodos correspondientes.

## RESULTADOS

Se realizaron 5 corridas del algoritmo considerando la disponibilidad de unidades monofásicas en ese momento de 25 y 50 kVAr. En la tabla 1, aparecen los resultados asociados a la ubicación de bancos de condensadores para la variante simétricos y asimétricos. Para bancos simétricos los resultados de todas las corridas fueron iguales. En el caso de los bancos asimétricos las corridas arrojan diferentes resultados en cuanto a capacidad y ubicación pero con una desviación en el VAN no superior al 5 %.

**Tabla 1.** Resultados de la selección y ubicación de bancos de capacitores

| Nodo                  | Bancos simétricos |                 |                 |     | Bancos asimétricos* |                 |                 |     |
|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|-----|
|                       | QC <sub>a</sub>   | QC <sub>b</sub> | QC <sub>c</sub> | QC  | QC <sub>a</sub>     | QC <sub>b</sub> | QC <sub>c</sub> | QC  |
| 21                    | 25                | 25              | 25              | 75  | 50                  | 25              | 25              | 100 |
| 61                    |                   |                 |                 |     | 25                  | 25              | 25              | 75  |
| 76                    |                   |                 |                 |     | 25                  | 25              | 25              | 75  |
| 82                    |                   |                 |                 |     | 25                  | 25              | 25              | 75  |
| 84                    |                   |                 |                 |     |                     | 25              |                 | 25  |
| 118                   | 25                | 25              | 25              | 75  | 25                  | 25              |                 | 50  |
| 153                   |                   |                 |                 |     | 50                  | 50              | 100             | 200 |
| 154                   | 25                | 25              | 25              | 75  | 25                  |                 |                 | 25  |
| Reactivo total (kVAr) | 75                | 75              | 75              | 225 | 225                 | 200             | 200             | 625 |

\* Resultados para una de las corridas.

Como se puede observar, en la variante asimétrica los bancos de condensadores se han considerados fijos, independientemente de la variabilidad del gráfico de carga. Esto supone la colocación de estructuras de soporte que sean capaces de asimilar diferentes tamaños y pesos de unidades capacitadoras. Por su parte en la tabla 2, se presentan los principales indicadores resultantes para la ubicación de bancos simétricos y asimétricos.

**Tabla 2.** Principales indicadores resultantes para la ubicación de bancos de capacitores

| Indicadores                               | Simétricos | Asimétricos |
|-------------------------------------------|------------|-------------|
| Inversión (pesos)                         | 900,00     | 2 440,00    |
| Pérdidas de energía antes (MWh anuales)   | 3 291,00   | 3 291,00    |
| Pérdidas de energía después (MWh anuales) | 3 266,00   | 3 236,00    |
| Pérdidas de energía después (%)           | 15,50      | 15,30       |
| Ahorro de energía (MWh anuales)           | 25,00      | 56,00       |
| Beneficios (pesos)                        | 6 220,00   | 14 055,00   |
| Tensión mínima (kV)                       | 13,00      | 13,00       |
| Tensión máxima (kV)                       | 13,80      | 13,80       |
| Valor Actual Neto (pesos)                 | 24 822,00  | 52 839,00   |

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Un resumen de los principales resultados obtenidos permiten considerar que:

- El ahorro de energía activa promedio como resultado de la reducción de las pérdidas es mayor 2,2 veces cuando se ubican bancos simétricos y asimétricos en relación a la ubicación de bancos simétricos. Esto se debe a que la compensación por fases permite una mayor reducción de pérdidas al compensar el desbalance.
- Se logra una reducción del desbalance promedio de las tensiones, al mitigarse la sobrecompensación.
- La magnitud de compensación de reactivo así como la cantidad de nodos a ubicar es mayor cuando se ubican bancos simétricos y asimétricos en relación con la ubicación de bancos simétricos.
- En consecuencia el VAN se incrementa en 2,1 veces con la combinación de bancos simétricos y asimétricos, ajustados a las demandas de potencia reactiva por fase en relación con las asimetrías del sistema y la potencia reactiva equivalente.
- Para estas aplicaciones, el tiempo de optimización del algoritmo estará en función de la complejidad del problema a resolver (principalmente de la topología del sistema, número de nodos y estados de carga). El mayor tiempo de demora del algoritmo en cada iteración (aproximadamente el 80 %) se destina a la obtención del flujo de potencia trifásico del sistema para cada estado de carga.
- Se asegura una correcta convergencia con una ubicación de la compensación por fases y nodos que puede variar en cada corrida en el caso de la combinación de bancos simétricos y asimétricos, pero con un valor de desviación de la función VAN entre corridas inferior al 5%.
- Los límites de tensión en todos los casos se mantienen en los valores de tolerancia establecidos del 10 %, siendo de 5,8%.
- El tiempo de corrida se mantiene alrededor de las 4 horas para este caso de estudio.



## CONCLUSIONES

Se ha realizado el desarrollo de un método de compensación de potencia reactiva, basado en un modelo de optimización con el empleo de la técnica de algoritmo genético simple, que resulta en la selección y ubicación de bancos de condensadores fijos (simétricos y asimétricos), para sistemas de distribución primaria.

La efectividad del método se demuestra de manera explícita en una aplicación en el circuito TK-9 de la ciudad de Las Tunas.

La compensación a través del método propuesto resulta más efectiva en el objeto de investigación, en relación con otros métodos encontrados en la bibliografía, debido entre otros aspectos, a la posibilidad de seleccionar y ubicar bancos de condensadores asimétricos fijos, para mitigar adicionalmente el desbalance. Además, ofrece diferentes alternativas de solución para la toma de decisiones empresariales por parte de los especialistas.

Los beneficios económicos obtenidos para el circuito TK-9 se incrementan en 7739,80 pesos con la ubicación de bancos simétricos y asimétricos en relación con la ubicación de bancos simétricos, para 5 años de explotación.

Teniendo en consideración el total de circuitos de distribución de la provincia de Las Tunas, el aporte económico anual estimado por reducción de las pérdidas de energía asciende a 46 806 pesos, de los cuales 35 847 son en pesos cubanos convertibles (CUC).

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la dirección de la Empresa Eléctrica de la provincia de Las Tunas, por el apoyo brindado para el desarrollo y aplicación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Miske, S. A. "Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits". *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001, vol. 16, n. 2, p. 306-318. ISSN 0885-8977.
- [2] Haghifam, M. R. Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2007, vol. 1, n. 2, p. 244-252.
- [3] Ng, H. N. "Classification of capacitor allocation techniques". *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000, vol. 15, n. 1, p. 387-392. ISSN 0885-8977.
- [4] Díaz R., Horacio. "Reconfiguración y ubicación de condensadores en sistemas de distribución: Metodología de solución simultánea usando algoritmos genéticos". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 2010, v. 18, n. 1, p. 144-153. ISSN 0718-3305.
- [5] Gómez Sarduy, Julio. "Solución del problema de localización de condensadores en circuitos de distribución primaria mediante algoritmo genético". *Revista Ingeniería Energética*. 2011, vol. 32, n. 3, p. 65-74. ISSN 1815-5901.
- [6] Pérez Abril, Ignacio. "Algoritmo genético para el balance de carga en circuitos de distribución primaria". *Revista IEEE América Latina*. 2010, vol. 8, n. 5.
- [7] Carvajal Pérez, Raúl Nicolás. "Un algoritmo genético especializado en planeamiento de redes de distribución. Parte I. Fundamentos técnicos del algoritmo". *Revista Ingeniería Energética*. 2011, vol. 32, n. 1, p. 72-76. ISSN 1815-5901.
- [8] Carvajal Pérez, Raúl Nicolás. "Un algoritmo genético especializado en planeamiento de redes de distribución. Parte II. Detalles del algoritmo y su aplicación". *Revista Ingeniería Energética*. 2011, vol. 32, n. 1, p. 77-85. ISSN 1815-5901.
- [9] Borges Vasconcellos, Davel E. "Modelación de los efectos de la compensación de potencia reactiva en sistemas de suministro eléctrico". *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. 2012, vol. 20, n. 2. ISSN 0718-3305.
- [10] MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS. *Consideraciones sobre las tarifas para determinados servicios*. Resolución 277/2014. Cuba, 2014.
- [11] COMITÉ ELECTROTÉCNICO CUBANO. *Código Electrotécnico Cubano. Parte I: Baja Tensión*. NC 800-1:2011. Primera Edición. Cuba, 2011.

## **AUTORES**

### **Davel Eduardo Borges Vasconcellos**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz, UCIAL, Cuba.

E-mail: [davel.borges@reduc.edu.cu](mailto:davel.borges@reduc.edu.cu)

### **Yoel Concepción Céspedes**

Ingeniero Electricista, Master en Ingeniería Eléctrica, Jefe del Grupo de Supervisión Energética, Oficina Territorial de Uso Racional de la Energía, Las Tunas, Cuba.

E-mail: [Concepcion@electu.une.cu](mailto:Concepcion@electu.une.cu)