



## La restricción sobre compensación y la diversidad en estudios de compensación de reactivo

### *Overcompensation restriction to increase solution diversity in the reactive compensation studios*

Raúl Nicolás - Carvajal Pérez

Recibido: Septiembre del 2012

Aprobado: Enero del 2013

#### Resumen/ Abstract

El modelo matemático representativo de un problema de compensación de reactivo en un circuito eléctrico de distribución contiene una restricción que limita el máximo valor de reactivo capacitivo que puede ser instalado en cada nodo para que no exista sobre compensación. Esta restricción se aplica a los bancos de condensadores fijos y controlados. En este trabajo se estudia el problema de la compensación óptima de reactivo utilizando un algoritmo genético de uso específico, se analiza como éste brinda la posibilidad de aumentar la diversidad de soluciones para evitar el estatismo y se argumenta el criterio seguido en la formación de la matriz de los cromosomas de realizar la recombinación sin que los hijos hereden, con obligatoriedad, en cada banco, el tamaño de sus progenitores. Entonces se utiliza la restricción de sobre compensación como límite y se escoge aleatoriamente el tamaño del banco .al final del "Crossover".

**Palabras clave:** algoritmos genéticos, circuitos de distribución, estudios de distribución.

The mathematical Model of reactive compensation model in Electrical Distribution Circuits include a restriction about maximum compensation value in each node. This restriction is applied to fixed a variable capacitor. This work try about the optimal reactive compensation using Genetic algorithm. Analyze diversity of solutions to avoid the statism. Propose realize crossover without consider the capacitor banks magnitude and then using overcompensation restriction to choose this magnitude in random form. Show the resulties to apply this criteria in a real circuit.

**Key Words:** genetic algorithm, distribution circuits, distribution studies.

#### INTRODUCCIÓN

Los estudios de compensación de reactivo de un circuito en su conjunto pretenden ofrecelas mejores soluciones o un grupo de soluciones muy buenas para el circuito. En la actualidad se aplican algoritmos genéticos con estos fines, éstos han demostrado ser una técnica superior a las anteriores; sin embargo, en general hay preocupación por la presencia del fenómeno del estatismo (repetición del mismo líder en generaciones sucesivas) [1-5].

Este fenómeno puede provocar que las soluciones entren a un óptimo local y no salgan de ahí y aunque sea una buena solución no se encuentre en el entorno del óptimo global que se busca. En [6] se presenta un algoritmo híbrido combinando la técnica del gradiente para obtener una primera solución y así garantizar desde el principio individuos más aptos. En [7] se propone un método de aproximación utilizando una técnica llamada Tabú para resolver el problema; sin embargo este problema aún se encuentra en estudio.

En el cálculo de la compensación de reactivo, de alguna forma, se utiliza el principio de recurrencia; los cálculos de un nodo  $i$  están influenciados por los resultados de los cálculos en otro nodo  $j$ ; ( $Q_c(j)$ ), siempre que el nodo  $i$  tenga alguna incidencia con el nodo  $j$ . En los algoritmos genéticos para compensación, generalmente, se genera una solución como consecuencia de un proceso de recombinación. (crossover) utilizando un código binario; cada individuo corresponde con una variante de solución y es representado por un "string" de bits (0s, 1s) en la que se incluyen las capacidades de los bancos.

El *objetivo* de este trabajo es mostrar la influencia de la restricción de sobre compensación en la disminución del estatismo de un algoritmo genético especializado en compensación de reactivo de un circuito de distribución de energía eléctrica.

La codificación representa: los nodos a compensar, si esta es fija o controlada y se puede incluir la capacidad de los vasos. La capacidad total del banco se elige después, de forma aleatoria pero se obliga a que el individuo cumpla la restricción de sobre compensación, se logran hijos que conservando la genética de sus padres pueden tener tamaños diferentes a ellos siendo a la vez factibles.

#### RESTRICCIÓN DE SOBRECENPENSACIÓN

Suponga que se tiene un pequeño circuito de cuatro nodos que pueden ser compensados con dos capacidades de condensadores (25 y 30 kvar) que pueden ser fijos y/o controlados. Cada individuo  $i_{20}$  se corresponde con una variante de compensación y se representa como un cromosoma de 16 bits:

Nodo	1	2	3	4

kvar. (Vasos)	25	30	25	30	25	30	25	30
---------------	----	----	----	----	----	----	----	----

Cij (string)	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
--------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Columnas de C    1    2    3    4    5    6    7    8    9    10    11    12    13    14    15    16

Esta codificación representa una variante de compensación. Significa:

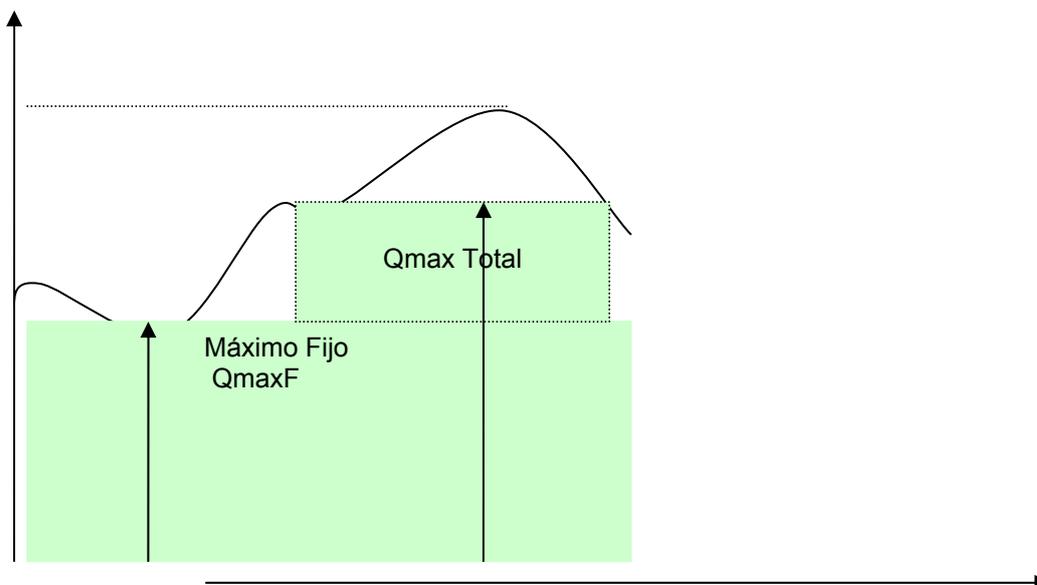
Nodo 1. Compensa con vasos de 30 kvar fijos

Nodo 2 Compensa con vasos de 25 kvar fijos

Nodo 4 Compensa con vasos de 25 kvar controlados.

#### La restricción de sobre compensación

Esta restricción tiene que ser cumplida por todos los cromosomas o variantes de solución para que sean factibles. Se aplica a cada tramo del circuito y establece que la compensación está limitada cuantitativamente por la magnitud del reactivo de las cargas que son alimentadas desde ese tramo. Aquí se contemplan los bancos fijos y controlados. Los primeros trabajan 24 horas diarias y los segundos solo 10 horas por día. Si la curva de carga sin condensadores del tramo  $i$  es la mostrada en la figura 1.



**Fig. 1. Límites de compensación en un tramo con condensadores fijo y total.**

Suponiendo que se acota la compensación al 90 % del reactivo en demanda máxima  $Q_{max}$ ; el límite para condensadores fijos será  $Q_{maxF}$  circulando por el tramo durante 24 horas por día y el límite superior para condensadores controlados mostrado en la ecuación(1).

$$Q_{maxc} = 0,9 * Q_{maxtotal} - Q_{c11} \text{ kvar} \quad (1)$$

Donde:

$Q_{c11}$  es el nivel de compensación fija que se decidió y es menor o igual a  $Q_{maxF}$ .

Esta restricción tiene que ser aplicada a todos los tramos que alimentan los nodos que sean elegidos para compensar.

### Aplicación de la restricción

Los procedimientos de un algoritmo genético deben propiciar una selección aleatoria pero los individuos de mejor "Fitness" o aptitud deben tener más posibilidades. Aquí se sugieren dos pasos en la formación de cada hijo:

Primero: Cada nuevo hijo hereda como genes de sus padres: el nodo que va a tener compensación y si esta es fija y/o controlada.

Segundo: Se aplica la restricción de sobre compensación por capacidad máxima y haciéndola cumplir, se elige de forma aleatoria la capacidad del banco a instalar.

Otro aspecto que se tiene en cuenta para que los hijos sean más competitivos es el orden de asignación de la compensación. Inicialmente se sigue un proceso de asignación de capacidades fijas a todos los nodos elegidos aleatoriamente para compensar. Esto lo justifica el hecho que los condensadores fijos son mucho más baratos que los controlados y ahorran más energía. Después se completa la compensación con bancos controlados. De esta forma no ocurre que condensadores controlados definidos prematuramente en nodos alejados limiten el nivel de compensación fija de nodos más cercanos con incidencia en aquellos como se muestra en la figura 2.

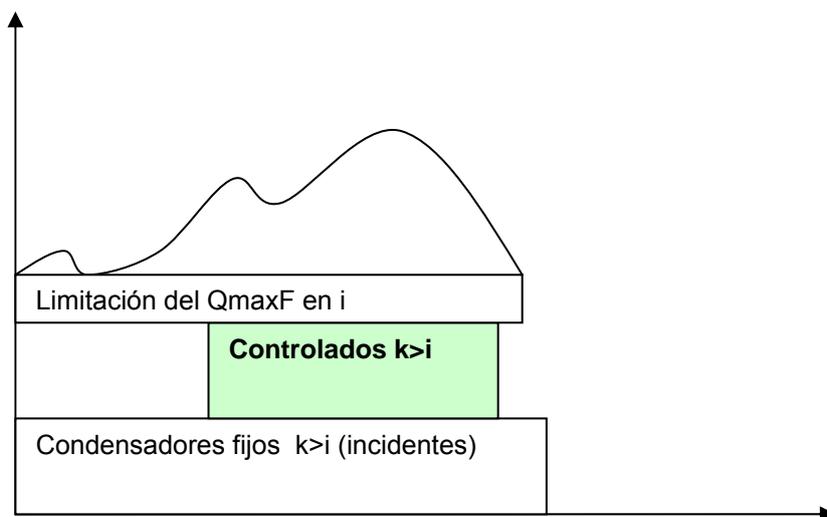


Fig. 2. Ineficiencia de compensar con ambos tipos de condensadores a la vez.

Este proceso se puede detallar con un caso sencillo. Suponga que se trata de un pequeño ramal de un circuito mostrado en la figura 3. En ella se da la demanda de reactivo en cada nodo.

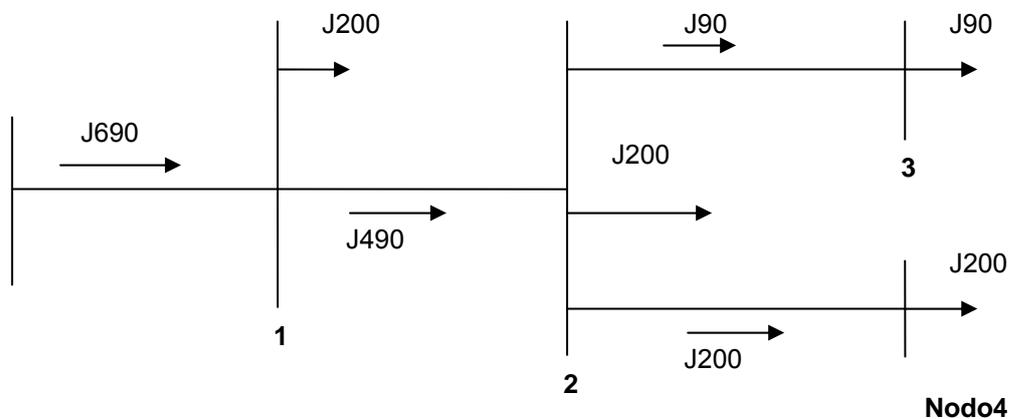


Fig. 3. Demanda de reactivo de un ramal de un circuito a compensar.

Suponga que este circuito tiene los siguientes indicadores de demanda de reactivo:

Factor de carga	$F_c = 0,6$
Demanda mínima	$Q_{min} = 420 \text{ kvar}$
Relación entre demandas extremas	$\text{minmax} = 960/420 = 0,61$

Para decidir la compensación de cada nodo, se sigue un proceso de asignación de capacidades de bancos desde el nodo 4 al nodo 1. Aquí se hace cumplir el convenio mencionado al inicio: todo nodo  $i$  que sea camino del flujo hacia el nodo  $j$  cumple la condición  $i < j$ . Suponga que en la selección previa, ocurrió lo que se expresa en el cromosoma inicial. Quiere decir que habrá dos nodos con compensación fija y uno con bancos controlados.

- a. Compensación fija (Nodos 1 y 2).  
 $Q_{c11}(3) = 0$ ;  $Q_{c11}(4) = 0$

**Nodo 2** es el más alejado con compensación fija.

$$Q_{m11} = \sum_{j=2}^4 a_{ij} \cdot Q_{c11}(j) \quad \text{Fijos desde 2 al final (no hay)}$$

El máximo reactivo fijo posible a compensar en ese tramo será

$$Q_{m1} = Q_{\max}(2) \cdot \min_{\max} - Q_{m11} = 490 \cdot 0,61 = 300 \text{ kvar}$$

Ahora genere un número aleatorio entre 0 y 299 y de él obtenga la cantidad de vasos de 25 kvar que lo aproximen. Suponga que le dio 6 vasos. Entonces

$$Q_{c11}(2) = 150 \text{ kvar}$$

**Nodo 1.** Ya fue compensado el nodo 2 con el que tiene incidencia.

$$Q_{m11} = \sum a_{1j} \cdot Q_{c11}(j) = 150$$

$$Q_{m1} = Q_{l1sc}(1) \cdot \min_{\max} - Q_{m11} = 690 \cdot 0,61 - 150 = 270 \text{ kvar}$$

Ahora genere un número aleatorio entre 0 y 269 y de él obtenga la cantidad de vasos de 30 kvar que lo aproximen. Suponga que le dio 6 vasos. Entonces

$$Q_{c11}(1) = 180 \text{ kVar}$$

Para todo el circuito, la compensación fija es de  $Q_{cF} = 330 \text{ kvar}$ . Queda la posibilidad de compensar con condensadores controlados.

$$Q_{\max c} = 0,9 \cdot Q_{\max} - Q_{cF} = 291 \text{ kvar}$$

Entonces se repiten los cálculos en los nodos a compensar con bancos controlados. En este caso solo se tiene el **nodo 4** con vasos de 25 kvar y con un máximo de 200 kvar puesto que es nodo extremo sin compensación fija.

### Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo de la compensación cumpliendo la restricción de sobre compensación generaliza la secuencia seguida antes:

1. Defina la cuantía máxima a compensar en cada tramo  $j$  con condensadores fijos y el total.
2. Para  $j = N$  a 1
  - a. Si fue elegido para compensar fijo se calcula mediante las ecuaciones (2 y 3):

$$Q_{m11} = \sum_{i=j}^n a_{ij} \cdot Q_{c11}(j) \quad (2)$$

$$Q_{m1} = \min_{\max} \cdot Q_{l1sc}(i) - Q_{m11} \quad (3)$$

Si  $Q_{m1} > 0$  entonces elija  $Q_{m1e} = \text{random}(Q_{m1})$   
 $Q_{c11}(i)$  será el banco más próximo a  $Q_{m1e}$

3. Repita el proceso Para  $j = N$  a 1 Para condensadores controlados utilizando las ecuaciones (4y 5).

$$Q_{m21} = \sum_{i=j}^n a_{ij} * (Q_{c11}(j) + Q_{c12}(j)) \quad (4)$$

$$Q_{m2} = 0,9 * Q_{l1sc}(i) - Q_{m21} \quad (5)$$

Si  $Q_{m1} > 0$  entonces elija  $Q_{m2e} = \text{random}(Q_{m2})$   
 $Q_{c21}(i)$  será el banco más próximo a  $Q_{m2e}$

La posibilidad de situar bancos fijos y controlados en un mismo nodo se mantuvo en el procedimiento, sabiendo que en la práctica esto obligaría a realizar una instalación adicional que es costosa para el banco controlado incluyendo, además del sistema de control horario, otros elementos que sirven de soporte al banco. El criterio seguido para hacer cumplir la restricción de sobre compensación eligiendo para cada nuevo individuo la capacidad del banco de forma aleatoria, dentro de los límites de esta restricción, permite ayudar a disminuir el estatismo pues los hijos heredan de sus padres los genes representativos de los nodos a compensar y hasta el tamaño de vasos; si se quiere, pero su capacidad o tamaño final se hace depender de un número aleatorio acotado por esta restricción. Se imita lo que ocurre con el tamaño de un ser vivo que también está influenciado por condiciones aleatorias relacionadas con el medio en que se desarrolla. Un ejemplo con un circuito real se puede apreciar en la figura 5.

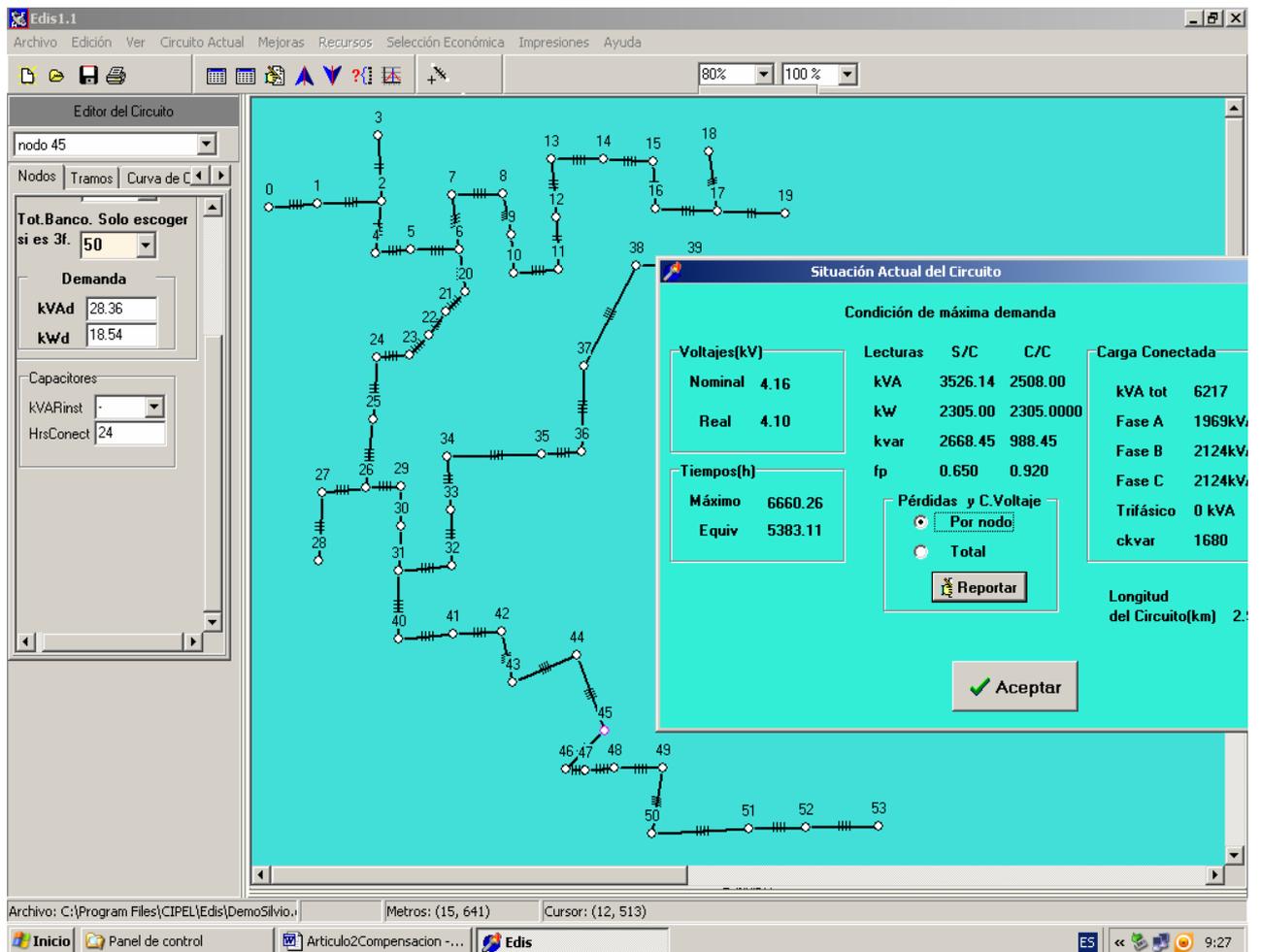


Fig. 5. Ejemplo de un circuito de una zona densamente poblada.

Este circuito tiene una demanda máxima de 3500 kVA y 53 nodos de interés. Tiene conectados 1800 kvar. Los resultados de la aplicación de un algoritmo genético con la restricción de sobre compensación explicada se muestran en la tabla 1. para varias generaciones. Muchas soluciones presentan líderes que se encuentran en un entorno cercano a 450 000 \$/a en 10 años.

<b>Tabla 1. Resultados de la compensación del circuito en las primeras generaciones.</b>									
<b>Gener</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	10
<b>VPN</b>	392618	447923	447919	448222	449124	448061	448563	448586	<b>448489</b>
<b>Nodo2</b> (kvar)	-	150	150	150	225	150	150	150	<b>150</b>
<b>Nodo6</b> (kvar)	450	150	150	150	-	150	75	75	<b>150</b>
<b>Nodo7</b> (kvar)	225	75	-	75	75	-	75	75	-
<b>Nodo8</b> (kvar)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Nodo9</b> (kvar)	-	-	150	-	75	150	-	-	<b>150</b>
<b>Nodo10</b> (kvar)	-	150	75	150	75	75	150	150	<b>75</b>
<b>Nodo11</b> (kvar)	-	-	-	-	75	-	-	-	-
<b>Nodo12</b> (kvar)	-	75	-	-	75	-	-	-	-
<b>Nodo14</b> (kvar)	-	-	75	75	75	150	150	150	<b>150</b>
<b>Nodo15</b> (kvar)	-	75	75	75	150	-	-	-	-
<b>Nodo21</b> (kvar)	-	75	75	75	-	-	150	150	<b>75</b>
<b>Nodo22</b> (kvar)	-	75	-	75	-	-	-	75	<b>75</b>
<b>Nodo23</b> (kvar)	-	-	-	-	-	75	75	-	-
<b>Nodo24</b> (kvar)	600	-	75	-	-	150	-	-	-
<b>Nodo25</b> (kvar)	-	-	-	-	-	150	75	150	<b>150</b>
<b>Nodo30</b> (kvar)	300	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Nodo36</b> (kvar)	300	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Nodo41</b> (kvar)	225	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Nodo49</b> (kvar)	300	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Kva. Total</b>	2400	825	825	825	825	1050	900	975	<b>975</b>

En este ejemplo se destaca la rapidez en alcanzar soluciones que están en la vecindad del óptimo. También se observa que prácticamente no hay estatismo y sin embargo las soluciones diferentes tienen "Fitness" cercanos indicando lo afirmado, se mueven en la vecindad del óptimo

## CONCLUSIONES

En los estudios de optimización del reactivo de circuitos de distribución primaria utilizando algoritmos genéticos, la restricción de sobre compensación aplicada a cromosomas que no contemplen la magnitud final del banco de condensadores y realizando posteriormente la elección de ésta de forma aleatoria es beneficiosa para obtener, con rapidez, soluciones que en su mayoría estén en el espacio de estado del problema y muchas de ellas en las cercanías de la solución óptima flexibilizando la toma de decisión final del proyectista.

## REFERENCIAS

- [1] Golberg, D.E., "The design of innovation: Lesson from Genetic Algorithm, lesson for the real life". Illigal Report No. 98004, University of Illinois at Urbana Champaign, February 1998.
- [2] Baran, M.E.; Wu, F.F., "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems". IEEE Trans. On Power Delivery, January 1989, vol.4, n.3, p. 735-743, ISSN 0885-8977.
- [3] Delfani, M.; *et al.*, "Optimal Capacitor placement using Deterministic and Genetic Algorithm". IEEE Trans. On Power System, August 2000, vol.15, n.3, p. 1041-1046, ISSN 0885-8950.
- [4] Wan, L.S., "Demonstrating an efficient capacitor location and sizing method for distribution system application to the Macau network". Macau Electric company. 2003.
- [5] Leiva, M.A., "Localización óptima de condensadores en un sistema de distribución vía algoritmos genéticos." (Tesis de grado), Universidad de Santiago de Chile, 2001.
- [6] Miranda, V., "Experimenting in the optimal capacitor placement and control problem with hybrid mathematical- Genetic Algorithm". Portugal: INESC. Porto, 2006.
- [7] Huang, Y.; Yang, H., "Solving the capacitor problem in Radial Distribution System using Tabu Search". IEEE Trans. On Power System, November 1996, vol.11, n.4, p. 1868-1873, ISSN 0885-8950.

## AUTOR

### **Raúl Nicolás Carvajal Pérez**

Ingeniero electricista, Profesor Titular, Dr. Ciencias Técnicas, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, CIPEL, Cujae, La Habana, Cuba.  
email rncp@electrica.cujae.edu.cu