



# Operación con criterios múltiples para la compensación de potencia reactiva en redes industriales de suministro eléctrico. Parte II

Iliana González  
José Arzola

Secundino Marrero  
Aristides Legrá

Recibido: Octubre del 2006  
Aprobado: Diciembre del 2006

## Resumen / Abstract

Se exponen los resultados obtenidos en el desarrollo de un sistema concebido para la operación de redes eléctricas industriales utilizando los métodos de preparación y toma de decisiones. Como algoritmo se utiliza la búsqueda aleatoria del mínimo de una función de un código variable, el sistema genera regímenes de compensación del reactivo y reducción de armónicas próximas al mejor compromiso del decisor entre diferentes indicadores de eficiencia del sistema y los nodos de la red. Este artículo corresponde a la segunda parte de un trabajo, en él se analizan las diferentes vías utilizadas para la evaluación de la ponderación, así como la validación del procedimiento de optimización utilizado.

Palabras clave: Compensación, potencia reactiva, operación multicriterial, optimización discreta, metaheurística

*In the present work the results obtained in the development of a system conceived for the industrial electric nets operation using methods for preparing and making decisions are exposed. As solution algorithm the Random Search of the Minimum of a Variable Code algorithm is used. Developed system generates compensatory regimens of the reagent and reduction of harmonic close to the best commitment between different efficiency indicators selected by the decider for all the net and for each it node. This article is in correspondence to the second part of the work, it's analyzed the different utilized ways for the evaluation of weighting, and also the validation of the optimization procedure.*

*Key words:* Compensation, reactive power, multiple criteria decision making, discrete optimization,

## INTRODUCCIÓN

La compensación de potencia reactiva desempeña un papel importante en la planificación y explotación de los sistemas eléctricos.<sup>1</sup> Su objetivo principal consiste en proporcionar una colocación apropiada de los dispositivos compensadores. Entre las posibles consecuencias de un bajo factor de potencia en los sistemas eléctricos se tiene el funcionamiento inadecuado de las máquinas y el aumento de las

pérdidas, lo que se traduce en una reducción de la disponibilidad y eficiencia del sistema.

En el presente trabajo se aborda la compensación de reactivo como una tarea de preparación y toma de decisiones con criterios múltiples. Este trabajo corresponde a la segunda parte, se aborda la evaluación de la ponderación así como la validación del procedimiento de optimización utilizado.

## CODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

En el trabajo, la codificación se realiza a través de una cadena de números reales del 0 al 9 y la letra A donde:

- [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], los números del 1 al 9 representan los diferentes estados de los elementos del sistema y el 0 indicará el estado de desconectado para condensadores y filtros.
- [A], la letra A representa el estado conectado de los elementos (condensadores y filtros).

Independientemente de estas configuraciones de codificación, existe una opción para la optimización donde es posible mantener siempre los filtros en estado de conexión, esto trae como consecuencia que se reduzca la población en dependencia de la cantidad de filtros previstos y se garantice en el sistema el filtrado de armónico. Por ejemplo: Para tres elementos conectados en el sistema con los siguientes estados:

$T_1$  [3, 4, 5, 6, 7] con un total de 5 estados.  
 $T_2$  [1, 2, 3, 4] con un total de 4 estados.  
 $C_1$  [0, 2, 3, A] con un total de 4 estados.  
 Las combinaciones totales serán  $5 \cdot 4 \cdot 4 = 80$

## BÚSQUEDA DE LA POBLACIÓN INICIAL

Para generar la población inicial, se procede a la implementación del pseudocódigo siguiente, donde en cada iteración se realiza la búsqueda del mínimo de una función de códigos variable (Z).<sup>2,3</sup>

$i = 0$

Repetir

$h = \text{Dime mínimo } (i, T)$

Si  $h \notin$  a la población inicial entonces la incluye en la población inicial

$INC(i)$

Hasta que  $i = k$

donde:

$h$ : Expresa el índice de la solución que se incorporará a la población inicial.

Para la búsqueda del mínimo de una función de códigos variable (Z) se utiliza el pseudocódigo.

Función Dime mínimo ( $x^{\text{inf}}, x^{\text{sup}}$ ): Entero

Si  $|x^{\text{inf}}, x^{\text{sup}}| \leq \text{Cota búsqueda de mínimo}$ , entonces:

Si  $|x^{\text{inf}}, x^{\text{sup}}| = 1$

Si  $Zx^{\text{inf}} < Zx^{\text{sup}}$  entonces resultado =  $x^{\text{inf}}$

En caso contrario resultado =  $x^{\text{sup}}$

En caso contrario

Resultado = Número aleatorio entre  $x^{\text{inf}}$  y  $x^{\text{sup}}$

En caso contrario

$x_1$ : Número aleatorio entre  $x^{\text{inf}}$  y  $x^{\text{sup}} - 1$

$x_2$ : Número aleatorio entre  $x_1$  y  $x^{\text{sup}}$

Si  $Zx_1 < Zx_2$ , entonces

Resultado = Dime mínimo ( $x^{\text{inf}}, x_2$ )

En caso contrario

Resultado = Dime mínimo ( $x_1, x^{\text{sup}}$ )

## EVALUACIÓN DE LA PONDERACIÓN DURANTE LA OPTIMIZACIÓN

La tarea formulada de optimización multiobjetivo se convierte, en una serie de tareas de optimización de un solo objetivo, con el fin de muestrear poblaciones de soluciones próximas al conjunto de soluciones eficientes.<sup>4,5</sup> La minimización de la diferencia máxima ponderada de los diferentes objetivos con respecto al valor deseado asegura el muestreo de conjuntos de soluciones próximas a las eficientes.

Para redes de suministro eléctrico de gran magnitud se concilian siete objetivos para un gran número de nodos, los que pueden superar el número de 50, como es el caso de la Empresa Niquelífera Ernesto Che Guevara. Así, el número de coeficientes puede superar ampliamente los 350. Evidentemente, la búsqueda de combinaciones adecuadas de valores para un número tan elevado de coeficientes constituye una ardua tarea, por lo que para cada red en particular se requiere realizar un gran número de ensayos que permitan obtener valores de coeficientes que aporten un compromiso razonable entre los criterios para los diferentes nodos.

De tal forma, se establece un conjunto de valores de coeficientes de ponderación entre los objetivos y entre los nodos del sistema.

En la función objetivo es necesario definir los valores deseados para cada uno de los indicadores de eficiencia declarados en la función objetivo. Según se fundamentó, para la tensión el valor deseado será el valor nominal de cada nodo, para el THDv y el THDi se tomó el valor mínimo admitido, según las normas IEEE 519,<sup>6</sup> para las pérdidas activas y reactivas se asume el valor mínimo que esta puede alcanzar en el

sistema. Como valor deseado del costo de los medios correctores se asume el menor valor que se alcanza durante todo el proceso evolutivo. Como valor inicial de este parámetro se asume 0,01.

### EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES

Para evaluar el comportamiento de la ponderación se analizó su influencia en la obtención de soluciones eficientes. Para ello se utilizó el esquema mostrado en la figura. 1.

Asimismo, en la tabla 1 se muestran los parámetros nominales de las cargas sin la instalación de condensadores y en la tabla 2 se dan los resultados de la instalación de condensadores y filtros.

Para el análisis de la ponderación se consideró solo la ubicación de los bancos de condensadores en los nodos de carga 4, 5 y 6 con vistas a lograr en el nodo de entrada un valor de  $\cos \phi$  igual o superior a 0,92, sin la instalación de condensadores en este nodo. Las secuencias de pasos siguientes para analizar la incidencia que tiene las diferentes ponderaciones de indicadores y nodos en la determinación de coeficientes que aportan soluciones satisfactorias, de acuerdo con los conceptos establecidos para las redes de suministro industriales:

1. Pesos iguales para todos los indicadores y nodos.
2. Ajuste de los pesos para los indicadores.
3. Ajuste de los pesos para los nodos.

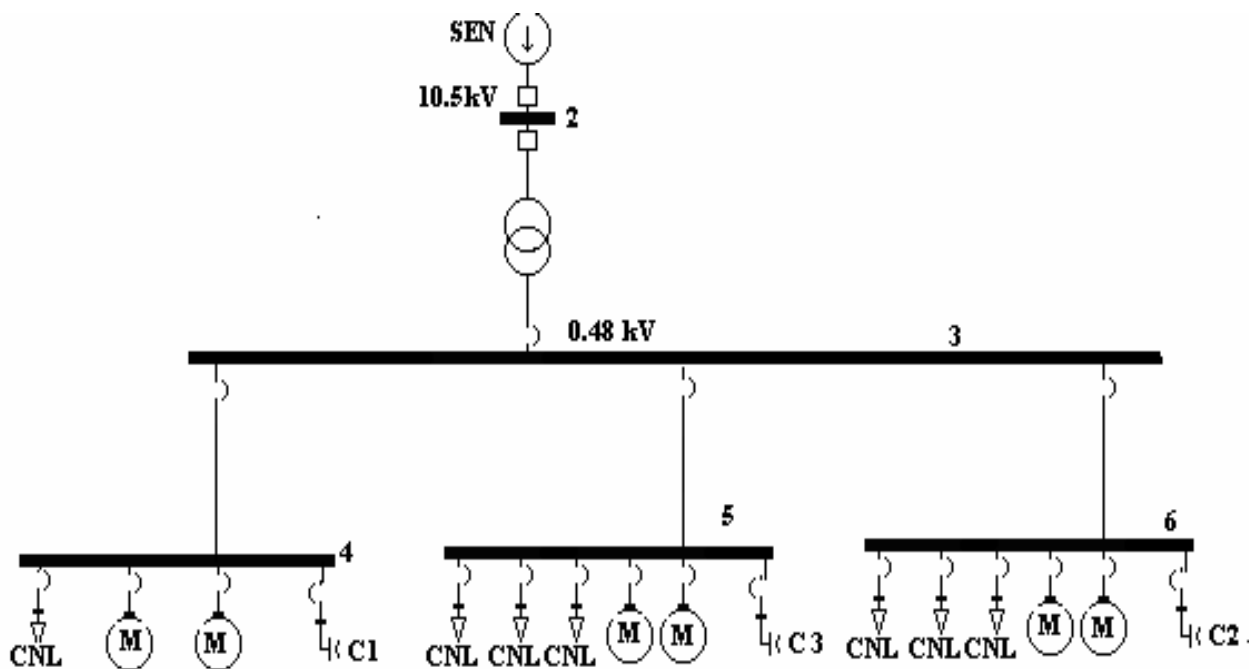
A continuación se dan las soluciones para diferentes pesos, teniendo en cuenta que pueden tomar valores entre 0 y 1.

#### 1. Pesos iguales para todos los indicadores de eficiencia (0,125 ) y todos los nodos (0,2)

Como se puede observar en la tabla 3, las soluciones garantizan una reducción de las pérdidas en comparación con los valores de la tabla 1 pero en algunos nodos los valores de  $\cos \phi$  no se encuentran dentro del rango deseado de 0,92 y, en particular, el nodo de entrada no logra alcanzar este valor sin la presencia de un banco de condensadores.

**TABLA 1**  
**Parámetros del esquema anterior sin compensación**

Nodos	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	Cos $\phi$	V (kV)	Pérdidas Totales	
					(MW)	(MVA <sub>r</sub> )
2	4,33	6,02	0,62	10,5	0,42	1,44
4	0,89	0,86	0,71	0,42		
5	1,75	1,85	0,68	0,38		
6	1,75	1,85	0,68	0,38		



Caso de estudio para la búsqueda de valores racionales de los coeficientes de pesos.

Esto significa, que se debe incrementar la prioridad (el peso) otorgado al  $\cos \phi$ , y para todos los nodos. Por otra parte, y directamente vinculadas al  $\cos \phi$ , las pérdidas tienen valores superiores a los deseables.

## 2. Ajuste de los pesos para los indicadores de eficiencia

En este caso se garantiza una elevación del  $\cos \phi$  y reducción de las pérdidas en general adecuadas, debido al incremento del peso del  $\cos \phi$  hasta 0.9. Aún en estas condiciones, se observan valores por debajo de lo admitido del  $\cos \phi$  por las reglamentaciones en la entrada. Este es el caso de la solución código 819.

Las pérdidas se redujeron a niveles adecuados como resultado de variar tan solo el peso del  $\cos \phi$ .

## 3. Ajuste de los pesos para los nodos

Al concederle mayores pesos al  $\cos \phi$  y a los nodos de cargas, se obtienen soluciones con resultados superiores, los que garantizan valores de este indicador deseables para todos los nodos del sistema y valores razonablemente buenos para los restantes indicadores en todos los nodos. De forma tal, se puede concluir, que al iniciarse la corrida del sistema se deben establecer como pesos por defecto para el  $\cos \phi$  y los nodos de carga el valor 0,9 y dejar los pesos de los restantes indicadores y nodos para "retocar" las soluciones.

En otras palabras, para redes de grandes dimensiones, con un elevado número de nodos la selección de los pesos, aunque compleja, puede ser acelerada mediante la adopción de los valores recomendados para la primera aproximación y, con posterioridad, pasar al ajuste paulatino de soluciones, mediante variaciones alrededor de los valores recomendados por defecto.

## VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN UTILIZADO

Aunque en el software elaborado se utiliza como criterio de parada la condición mixta que se realice un número de generaciones de opciones de solución, sin que se modifique la composición de la población, superior a un valor preestablecido. Además la diferencia entre el valor de Z de la peor solución y el de la mejor solución sea inferior a un valor predeterminado, para la validación del método de optimización utilizado resulta suficiente (y más sencillo) la aplicación de la condición del transcurso de un número previamente asignado de generaciones de códigos de solución.

Con este fin se aplicó el algoritmo propuesto a la generación de opciones de solución del circuito anterior, el que tiene un total de 6 860 códigos posibles, variando la cantidad de códigos generados por el algoritmo, y evaluando el valor mínimo alcanzado por Z en cada experimento en porcentaje con respecto a este mismo valor obtenido por búsqueda exhaustiva desde el 4 al 25 % de generaciones con respecto al número total de posibles soluciones. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.

**TABLA 2**  
**Parámetros del esquema anterior con compensación**

Nodos	P (MW)	Q (MVar)	Qc (cMVar)	Cos $\phi$	V (kV)	Pérdidas	
						(MW)	(MVar)
2	4,33	1,88	0	0,92	10,5	0,17	0,58
4	0,89	0,26	0,60	0,95	0,45		
5	1,75	0,51	1,34	0,95	0,44		
6	1,75	0,51	1,34	0,95	0,44		

**TABLA 3**  
**Mejores soluciones obtenidas para pesos iguales para todos los indicadores de eficiencia (0,125) y todos los nodos (0,2)**

Código	Nodos	Qc (cMVar)	P. Liberada (MW)	Cos $\phi$	V (kV)	Pérdidas	
						MW	MVAR
3 544	2	2,17	2,91	0,82	10,5	0,23	0,78
	4			0,84	0,43		
	5			0,82	0,40		
	6			0,93	0,42		
2 330	2	2,34	3,06	0,83	10,5	0,24	0,80
	4			0,95	0,44		
	5			0,95	0,42		
	6			0,76	0,40		
1 821	2	2,17	2,91	0,83	10,5	0,21	0,73
	4			0,84	0,45		
	5			0,93	0,44		
	6			0,82	0,43		

El estudio del comportamiento del valor medio de  $Z$  en la población generada por el algoritmo utilizado, con respecto a la generada por búsqueda exhaustiva mantiene una relación semejante.

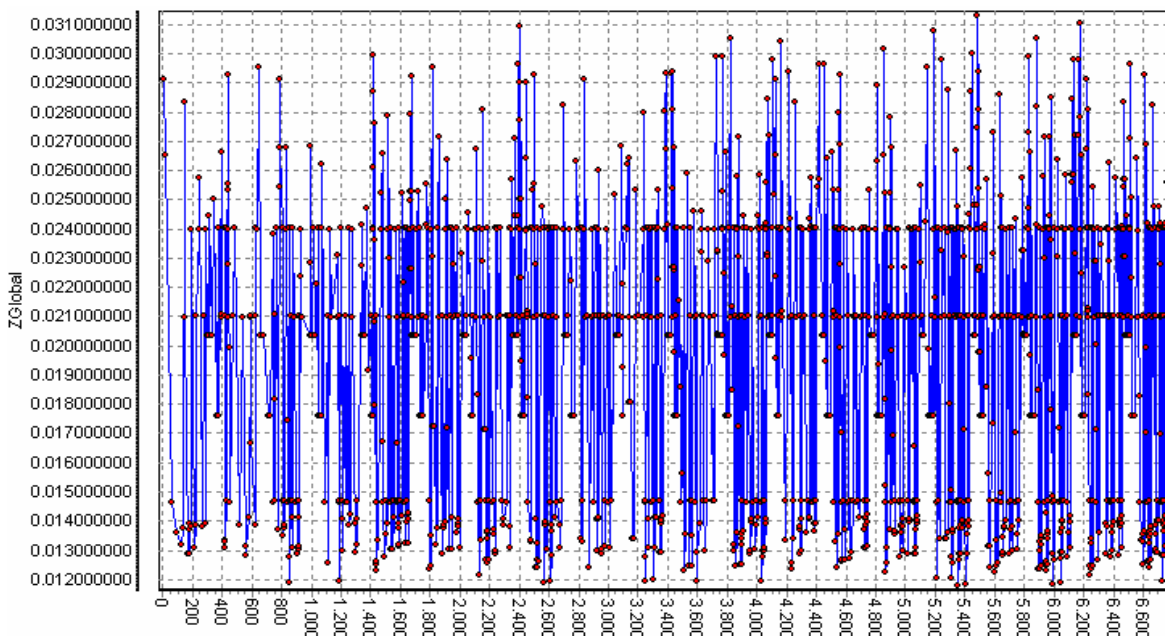
En la figura 3, en la columna central, aparecen los 10 primeros códigos de solución correspondientes a la búsqueda de la población inicial de un total de 6 860 códigos posibles. En la misma se puede observar el carácter aleatorio de su composición. Este comportamiento también se aprecia en la columna derecha, donde se da un conjunto de soluciones eficientes, halladas a partir de la población inicial luego de calcularse 1 758 códigos, lo que representa un 25 % del total. Si para este porcentaje de códigos calculados, se determina el comportamiento de la búsqueda, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 2. Los puntos representan la distribución aleatoria de las distintas soluciones halladas en todo el intervalo, mientras que la línea es utilizada para mostrar la variabilidad de la función objetivo ( $Z$ ) de estas soluciones, uniendo los mismos de forma ascendente por sus códigos, y no por el orden de aparición.

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la  $Z$  global durante la búsqueda exhaustiva. Aquí aparecen los valores de  $Z$  obtenidos para las mejores soluciones, evaluadas para los mismos pesos del caso anterior a partir de todas las combinaciones y estados posibles de los elementos del sistema.

Según se puede observar, los valores de  $Z$  obtenidos en ambos casos prácticamente coinciden, lo que refleja que el algoritmo de optimización utilizado permite aproximarse al óptimo teórico alcanzable, muestreando una parte reducida del conjunto de posibles soluciones. Es decir, la calidad de las soluciones encontradas con la utilización del algoritmo de búsqueda por exploración aleatoria del extremo de una función de un código variable no difiere prácticamente de las mejores posibles.

Según puede observarse en la figura 3, la calidad de las soluciones obtenidas difiere en menos de 1 % a partir de generar opciones de solución por encima del 11 % del total de soluciones posibles. La experimentación realizada para poblaciones de 20 miembros permite estimar que este resultado se alcanza para valores del parámetro  $k$  (cantidad de iteraciones seguidas sin que se altere la composición de la población final) igual a 80 (figura 5).

También se presentan los resultados para los pesos de  $\cos \varphi$  igual a 0,9 con reducción proporcional de estos a los restantes indicadores y nodos de carga igual a 0,20 (tabla 4); así como los resultados obtenidos pero esta vez para los nodos de carga iguales a 0,9 con reducción proporcional a los restantes nodos (tabla5).



Comportamiento de  $Z$  para un 25 % de la búsqueda.

**Z Globales Calculadas**  
 6860

Orden	Z
1508	
1509	
1510	
1511	0.0138943614145799
1512	
1513	
1514	
1515	
1516	
1517	0.0240036984535333
1518	0.0240036983174307
1519	0.027879532476796
1520	0.022991844133291
1521	0.0209889455374586
1522	0.0209889457277312
1523	

**Población Inicial** 10  10

Orden	Z
825	0.0138409216396129
1307	0.0140858453999647
6725	0.0146413001193049
1091	0.014641300267601
2999	0.0146413007537498
996	0.0203511755664014
4707	0.0209889457133546
1996	0.021031157667026
5026	0.0240442702657298
393	0.0266265675809235

**Población Mejorada**  
 Mejorar Población Actual 120

Orden	Z
5358	0.0117802541199391
5995	0.0118081393947861
5407	0.011821604185509
2565	0.0118708960423316
6044	0.0118712508354022
850	0.0119082822051804
4035	0.0119122791199872
3594	0.0119173761918581
3251	0.011924292934839
1193	0.0119257727349761

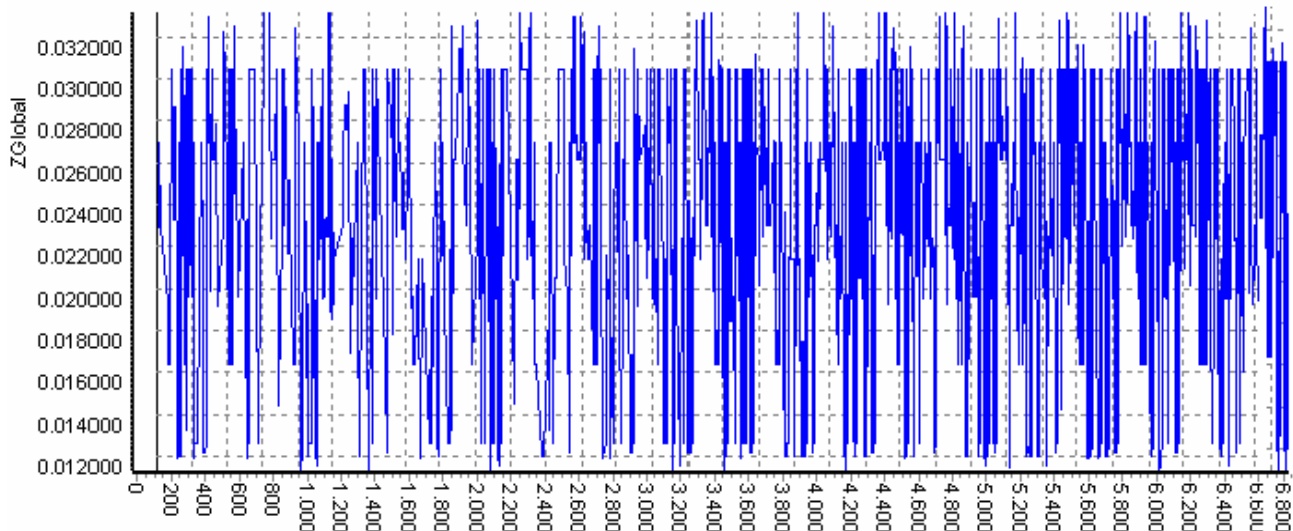
☒ Auto

Total Calculados: 1758 MemUsada=6567812

Orden de aparición de la población.

3

Valores de ZGlobal contra los valores de la Variable Integradora



Comportamiento de Z durante la búsqueda exhaustiva.

4



**TABLA 4**

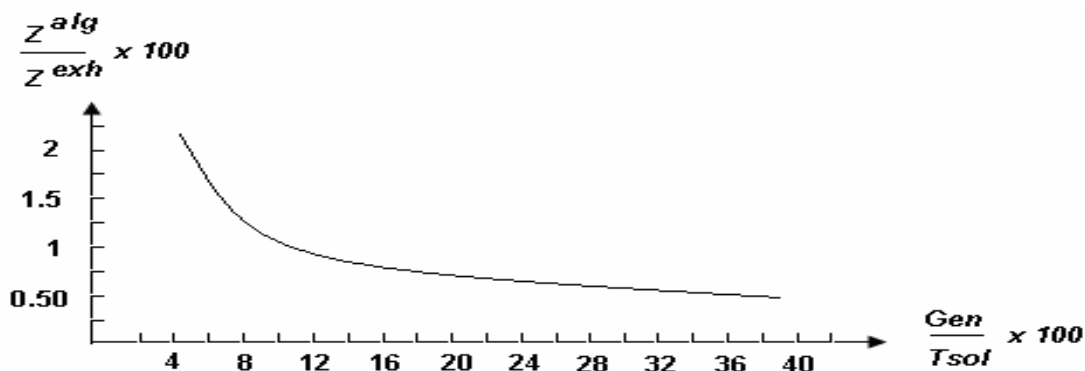
**Resultados obtenidos para los pesos de  $\cos\phi$  iguales a 0,9, con reducción proporcional a los restantes indicadores y nodos de carga iguales a 0,20**

Código	Nodos	Qc (cMVAR)	P. Liberada (MW)	Cos $\phi$	V (kV)	Pérdidas	
						MW	MVAR
526	2	2,51	3,17	0,90	10,5	0,18	0,62
	4			0,95	0,45		
	5			0,93	0,43		
	6			0,93	0,43		
1 858	2	2,64	3,27	0,92	10,5	0,17	0,63
	4			0,94	0,46		
	5			0,93	0,44		
	6			0,93	0,44		
819	2	2,61	3,29	0,86	10,5	0,19	0,66
	4			0,95	0,47		
	5			0,95	0,45		
	6			0,90	0,43		

**TABLA 5**

**Resultados obtenidos para los pesos de  $\cos\phi$  iguales a 0,9, con reducción proporcional a los restantes indicadores y nodos de carga iguales a 0,9 con reducción proporcional a los restantes nodos**

Código	Nodos	Qc (cMVAR)	P. Liberada (MW)	Cos $\phi$	kV	Pérdidas	
						MW	VAR
2 916	2	2,95	3,58	0,92	10,5	0,17	0,60
	4			0,94	0,46		
	5			0,93	0,44		
	6			0,93	0,44		
3 210	2	2,71	3,38	0,92	10,5	0,18	0,63
	4			0,94	0,46		
	5			0,93	0,44		
	6			0,93	0,44		



Precisión de la mejor solución de la población generada por el algoritmo utilizado en comparación con la búsqueda exhaustiva.

5

## CONCLUSIONES

El carácter de la tarea formulada para la compensación de potencia reactiva y de distorsión de armónicos sugiere la necesidad de utilización de procedimientos de generación de soluciones basados en la evolución de códigos, es decir, de alguno de los algoritmos propios del método de *integración de variables*.

- El empleo del método de búsqueda por exploración aleatoria del extremo de una función de un código variable permite generar poblaciones de solución al problema de optimización asociado de forma rápida y efectiva, lo que permite evaluar diferentes opciones de conexión de los elementos correctores, para que el decisor elija la más adecuada de acuerdo con la situación estudiada.

- Dada la gran cantidad de coeficientes de peso cuyos valores deben ser determinados en cada aplicación de la herramienta computacional, se determinó, mediante ensayos experimentales, como valores a establecer por defecto de estos pesos normalizados como 0,9 para el  $\cos \phi$  y para los nodos de carga.

- Cada aplicación concreta requiere la determinación de los valores definitivos de los pesos sobre la base del sistema de preferencias específico al que responde la aplicación concreta.

## REFERENCIAS

1. **González I. y S. Marrero:** "Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos", *Revista Geología y Minería*, 1999.
2. **González Palau, Iliana y José Arzola Ruiz:** *Seminario Internacional de la Red Alfa: Aceros inoxidables para América Latina*, La Habana, Cuba, 2004.
3. **Arzola R., J.:** *Sistemas de Ingeniería*, Ed. Felix Varela, Ciudad de La Habana, 2000.
4. **Steuer, R. E.:** *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*, Willey and Sons, New York, 1986.

5. **Coello, C.A.:** "Introducción a la computación evolutiva", Notas del curso. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación, Instituto Politécnico Nacional, México, 2004.

6. **Norma IEEE 519.** *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*.

7. **Díaz, A.y otros:** *Optimización heurística y redes neuronales*, Ed. Paraninfo, Madrid, 1996.

## AUTORES

### Iliana González Palau

Ingeniera Electricista, Máster en Electromecánica, Profesora Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, (ISMM), Holguín, Cuba  
e-mail: igonzalez@ismm.edu.cu

### José Arzola Ruiz

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas, Renovables (CETER), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail: jarzola@ceter.cujae.edu.cu

### Secundino Marrero Ramírez

Ingeniero Electrónico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica ISMM, Holguín, Cuba  
e-mail: smarrero@ismm.edu.cu

### Arístides Legrá Lobaina

Licenciado en Educación, Especialidad Matemáticas, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Departamento de Matemática y Computación, ISMM, Holguín, Cuba  
e-mail: alegra@ismm.edu.cu