



## APLICACIONES INDUSTRIALES

### **Operación eficiente de los bloques generador-transformadores en las unidades de generación distribuida**

#### ***Efficient operation of generator-transformers blocks in distributed generations units***

Marcos - de Armas Teyra  
Julio - Gómez Sarduy  
Percy - Viego Felipe

Recibido: Diciembre del 2011  
Aprobado: Mayo del 2012

#### **Resumen/ Abstract**

Este trabajo determinó la operación más eficiente de los bloques generador-transformador que entregan la energía eléctrica generada a una red de tensión superior. Hasta el momento la mayoría de los estudios realizados en este campo se basan en un análisis de la eficiencia relacionado con el estado de carga del conjunto. Este artículo propone un método para evaluar la eficiencia desde un espacio tridimensional que arroja una mejor solución al considerar el factor de potencia en el sistema. La optimización se realiza mediante la técnica de inteligencia artificial denominada enjambre de partículas. El método propuesto puede emplearse para efectuar la compra o la selección del transformador más apropiado y para lograr la operación de estas unidades de la forma más eficiente y económica posible. Se muestra su aplicación a una unidad de 1150 kVA en la Provincia de Cienfuegos, Cuba.

**Palabras clave:** bloques generador-transformador, operación eficiente, optimización por enjambre de partículas.

*In this paper was determined the most efficient operation of generator-transformers blocks of distributed generation unites that are operating to serve the electric power to a higher voltage grid. For this purpose, a tridimensional model of efficiency with better results is proposed taking into account the combined losses of the generator and transformer, the load level and the power factor of the system. In the optimization process a Particle Swarm algorithm was employed. The developed method can be used to select the transformer and to obtain the most efficient operation of these power plants as it is possible in field conditions. As an example its application to a 1150 kVA generation unite of Cienfuegos's Province is shown.*

**Key words:** generator-transformers blocks, efficient operation, particle swarm optimization.

#### **INTRODUCCIÓN**

Con la inserción en el sistema de subtransmisión de unidades de generación distribuida el número de pequeños bloques generador-transformador ha crecido particularmente en Cuba cientos de veces. A escala internacional este tipo de configuración debe aumentar con la incorporación de diversas fuentes renovables de energía en diferentes regiones geográficas y puntos de las redes eléctricas

existentes. Dada la moderada capacidad de estas plantas, el creciente costo del combustible fósil, la importancia de utilizar con eficiencia y con la máxima potencia posible las fuentes alternativas, resulta importante identificar la zona de operación más eficiente de estos bloques de generación de energía eléctrica. Desde hace algún tiempo se han llevado a cabo estudios donde es considerada, tanto para transformadores como para generadores y bloques generador-transformador, la operación eficiente desde una perspectiva bidimensional tomando como variables el estado de carga y las pérdidas operacionales o la eficiencia [1-3]. La crítica que es posible realizar a estos análisis está vinculada al hecho de ignorar la influencia que el factor de potencia puede ejercer al modificar tanto las pérdidas del transformador, como las del generador y el consumo específico de la unidad. Para tratar de encontrar la región más apropiada, en una aplicación dada, se debe adicionar el factor de potencia a las condiciones del bloque convirtiendo la búsqueda en un espacio tridimensional. En otro sentido, recientemente se han desarrollado trabajos para extender el concepto de curva de capacidad del generador al incorporarle el transformador y definiendo el dominio de las posibles zonas de operación en el plano de la potencia activa y reactiva inyectada al sistema. De hecho, el estado de operación queda en función de la posición que se adopte en el cambia “tap” bajo carga del transformador y así se obtiene uno u otro beneficio en el sistema [2]. El estudio que se presenta en este artículo se dirige a grupos de generación que poseen transformadores sin considerar la posibilidad de efectuar modificaciones bajo carga en sus derivaciones. No obstante es posible efectuar estos análisis en el caso que el transformador empleado posea cambia “taps” bajo carga —algo poco probable en estas pequeñas máquinas— si se introducen los datos correspondientes para un estado determinado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para encontrar el punto de operación más eficiente de estos bloques es necesario desarrollar la modelación de cada uno de los elementos que componen el sistema y abordarlos como un conjunto. Conocido el modelo se procede a la optimización para determinar el valor que deben tomar las variables para operar en la zona de mayor eficiencia. Con este propósito en este artículo se empleó un software desarrollado en Matlab fundamentado en la técnica de inteligencia artificial conocida como enjambre de partículas. Para desarrollar el modelo es necesario poseer información experimental y del fabricante tanto del generador como del transformador bajo diferentes condiciones de operación. El sistema analizado se muestra en la figura 1.

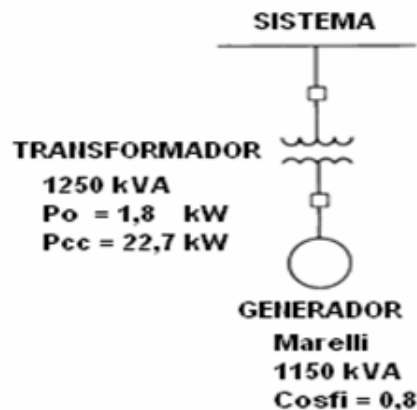


Fig. 1. Bloque generador–transformador.

### Modelo del Generador

El modelo del generador se obtiene a partir de los datos dados por el fabricante. Para el caso bajo estudio estos corresponden a un generador Marelli de 1150 kVA cuyos datos son los mostrados en la

tabla 1. El procedimiento matemático ha sido realizar el ajuste de la eficiencia a una ecuación polinómica de segundo grado dada por:

$$\eta(kc) = p_1 * kc^2 + p_2 * kc + p_3 \quad (1) \quad \text{p.u.}$$

Donde  $kc$  es el estado de carga del generador y  $p_1$ ,  $p_2$  y  $p_3$  son los coeficientes del polinomio característico dados en la tabla 2, para factores de potencia de 0,8 y 1 respectivamente.

Tabla 1. Datos del generador Marelli.						
Tipo	S (kVA)	V (V)	I (A)	Cosfi	Conexión	Paso (τ)
MJB 400 MB4	1150	480	1383	0,8	Yo	2/3
Eficiencia en función de Cosfi y del estado de carga						
$\eta$ a Cosfi = 0,8			$\eta$ a Cosfi = 1			
0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	
95,8	95,8	95,7	96,7	96,7	96,6	

Tabla 2 .Eficiencia del generador a diferentes factores de potencia y estados de carga.					
Cos fi = 0,8					
Tipo	$p_1$	$p_2$	$p_3$	SSE	R <sup>2</sup>
MJB 400 MB4	-0,008	0,01	0,955	9,861e-032	1
Cos fi = 1					
MJB 400 MB4	-0,008	0,014	0,961	6,163e-032	1

La ecuación (1), es transformada para poder evaluar el efecto de diferentes factores de potencia sobre la eficiencia del generador. En la figura 4, se muestra este comportamiento donde se puede observar que en la medida que el factor de potencia aumenta la eficiencia es superior para un mismo estado de carga del generador.

### Modelo del Transformador

La eficiencia del transformador en función de la carga y del factor de potencia se modela según las ecuaciones (2 y 3) a partir de los datos de pérdidas en vacío;  $P_0$ , y pérdidas de cobre nominales;  $P_{cc}$ , dados en la tabla 3, para los dos transformadores evaluados en este estudio. En ellas  $kct$  es el estado de carga del transformador,  $kVA$  es su potencia aparente nominal y  $cosfi$  es el factor de potencia operacional. [3-6].

$$Pérdidas = P_0 + kct^2 * P_{cc} \quad (2)$$

$$\eta_T = 1 - \frac{Pérdidas}{kct * kVA * cos fi + Pérdidas} \quad (3)$$

Tabla 3. Datos de las pérdidas en los transformadores.				
Fabricante	Capacidad (kVA)	Po (kW)	Pcc (kW)	Kc max N
WEG	1250	1,8	22,7	0,28
ALKARGO	1250	2,13	13,05	0,39

Como se sabe, en la ecuación (3), para un factor de potencia determinado, el único valor variable es el coeficiente de carga. Si se deriva esta expresión y se iguala a cero, se obtiene el valor del coeficiente de carga para el cual la eficiencia es máxima. Efectuando esta operación se tiene:

$$P_0 = k_{CARGA\ MAX}^2 \times P_{CC}$$

De donde para el transformador WEG:

$$k_{CARGA\ MAX} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{CC}}} = \sqrt{\frac{1.8}{22.7}} = 0.2815 \quad (4)$$

Este resultado indica que el transformador de 1250 kVA de la firma WEG obtiene su máxima eficiencia para un estado de carga de un 28.15 %. Esta eficiencia es superior en la medida que el factor de potencia de la carga se eleva y se reduce con el incremento de la carga. El gráfico correspondiente de eficiencia del transformador en función del estado de carga y del factor de potencia se muestra en la figura 2. La figura 3, muestra la superficie de este comportamiento. Obsérvese como decrece la eficiencia del transformador con la reducción del factor de potencia y el incremento del estado de carga. Por otra parte, como puede deducirse de las figuras 4 y 5, la eficiencia del generador también crece con el factor de potencia, pero tiene su máximo a un valor de estado de carga superior al donde ocurre la máxima eficiencia del transformador. De esta forma cuando ambos equipos trabajan en bloque para suplir carga en un sistema se presenta un compromiso que depende tanto de las características del generador y del transformador como del comportamiento de la carga y del factor de potencia operacional del conjunto.

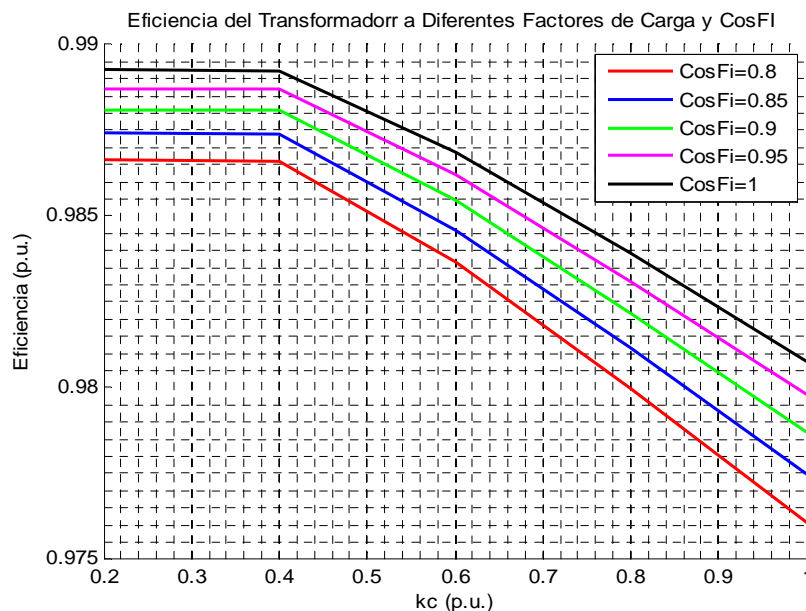


Fig. 2. Eficiencia del transformador.

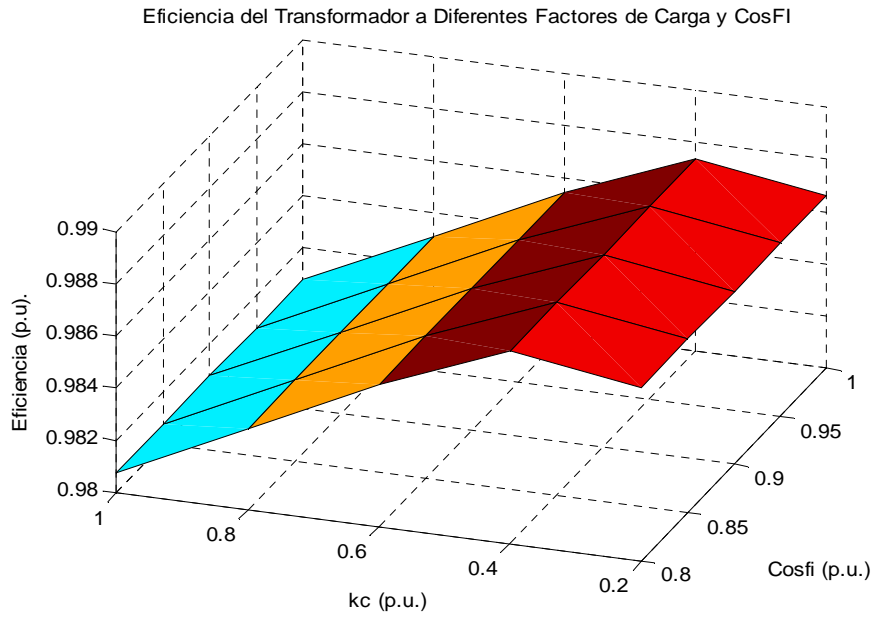


Fig. 3. Superficie del transformador.

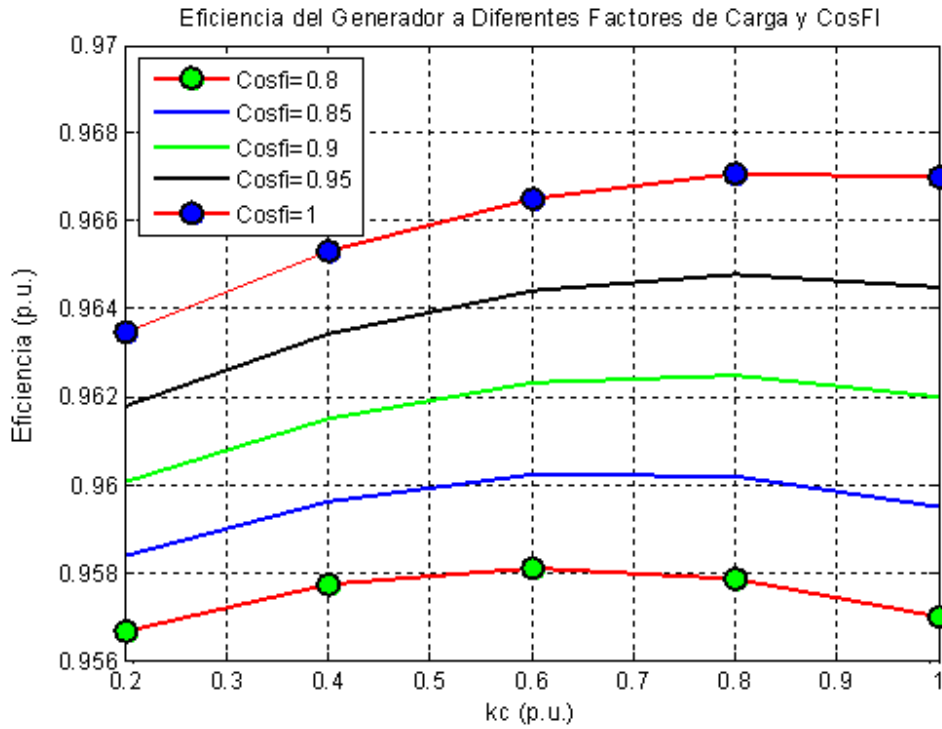


Fig. 4. Eficiencia del Generador.

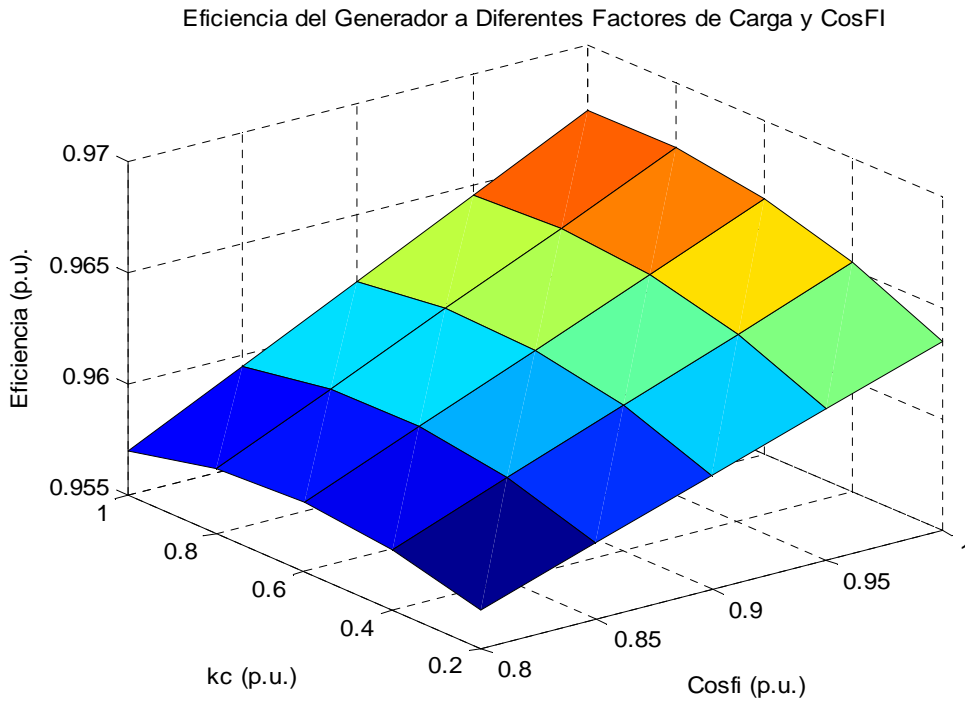


Fig. 5. Superficie del generador.

Para evaluar este compromiso e identificar el punto de operación donde se logra la máxima eficiencia del bloque generador-transformador se desarrolló un programa de optimización aplicando la técnica de inteligencia artificial conocida por enjambre de partículas; PSO [7-8]. El proceso arroja para el transformador WEG los resultados mostrados en las figuras 6 y 7.

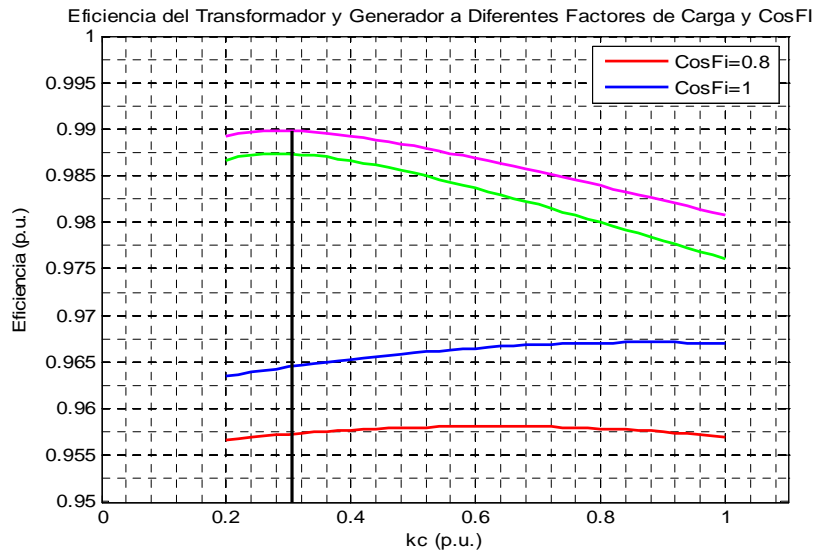


Fig. 6. Punto de máxima eficiencia global con el transformador WEG.

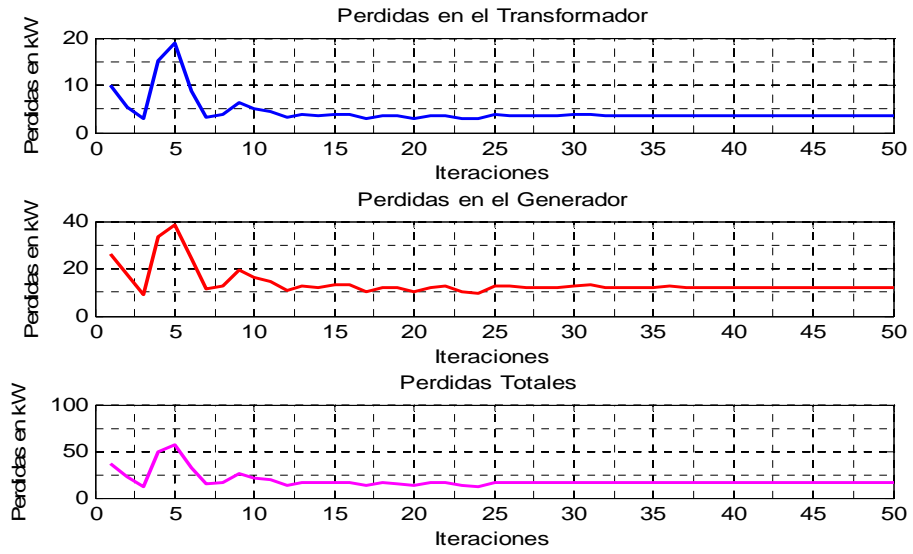


Fig. 7. Pérdidas en generador y transformador WEG vs Iteraciones.

El proceso de optimización del punto de operación para el transformador *ALKARGO* arroja los resultados mostrados en las figuras 8 y 9.

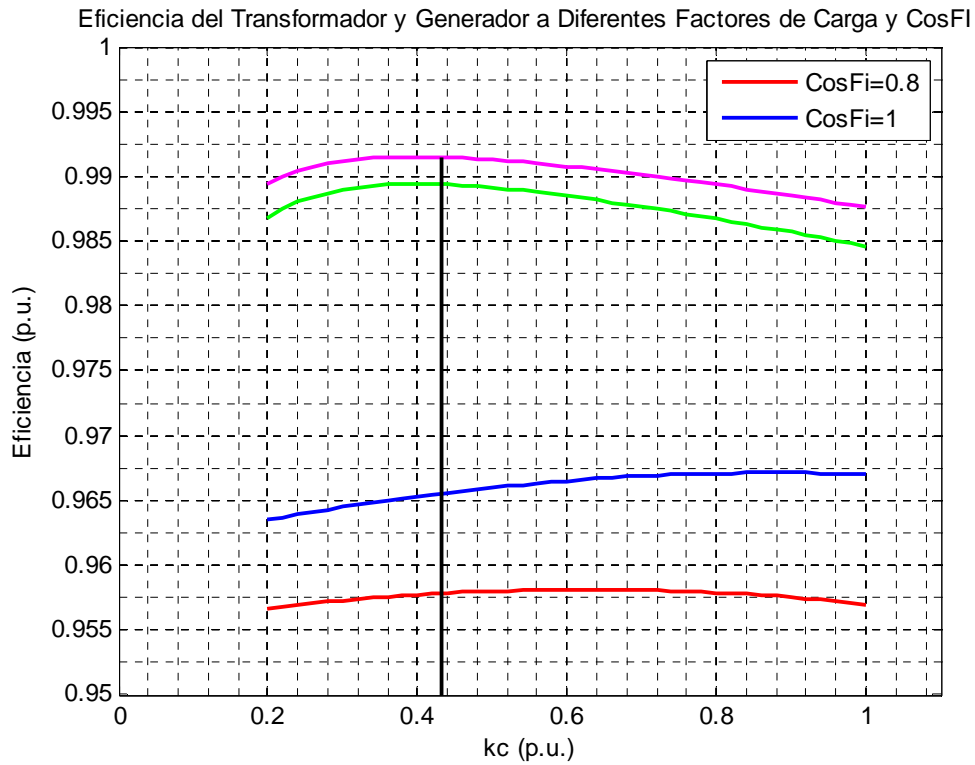


Fig. 8. Punto de máxima eficiencia global con el transformador *ALKARGO*.

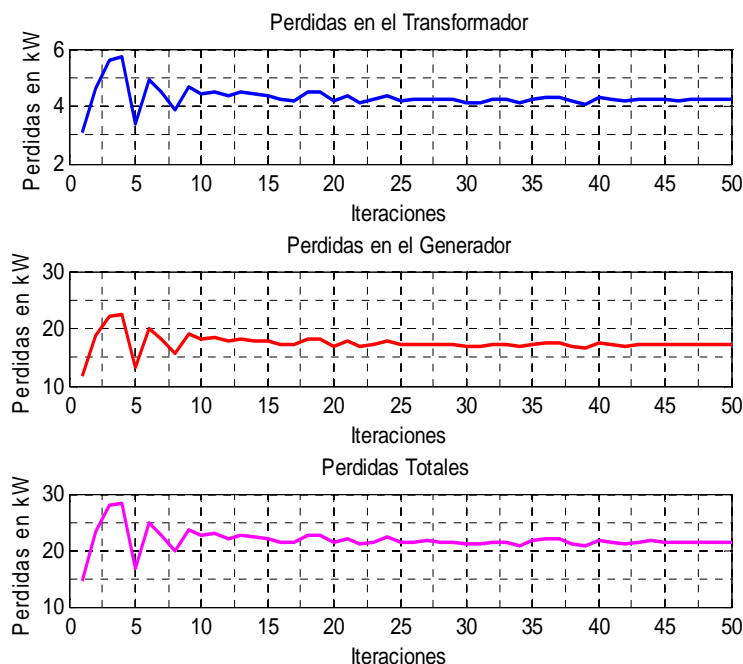


Fig. 9. Pérdidas en generador y transformador ALKARGO vs Iteraciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

De las figuras anteriores, obtenidas como resultado del proceso de optimización por PSO, la mejor solución para alcanzar la máxima eficiencia en cualquier estado de carga es elevar el factor de potencia hasta las proximidades de la unidad. Sin embargo, para el caso evaluado utilizando el transformador *WEG*, este hecho no garantiza que el conjunto no pueda haber sido mejor seleccionado para alcanzar una eficiencia superior. La cuestión radica en que el coeficiente de carga para el cual se desarrolla la máxima eficiencia del transformador *WEG* es a un valor bajo; 0.28 y cuando se opera al generador en un estado de carga próximo a la unidad como es la generalidad de los casos, el transformador lo hace en una zona donde su eficiencia ha disminuido y a una razón superior al incremento que experimenta la eficiencia del generador. Dado que la eficiencia del conjunto es el producto de ambas eficiencias, el resultado total es un valor inferior a la menor de ellas. De este modo, si el transformador se selecciona con una relación de pérdidas donde alcance su máxima eficiencia más próximo al régimen de operación del generador el conjunto operaría más eficientemente.

Por supuesto, con la disminución del factor de potencia, tanto la eficiencia del generador como la eficiencia del transformador se deterioran y la eficiencia total se reduce para un mismo estado de carga. Estos resultados pueden ser observados numéricamente en las tablas 4 y 5, donde se muestran los cálculos para dos transformadores de igual capacidad pero de diferentes relaciones de pérdidas y a factor de potencia unitario que es donde se experimenta la máxima eficiencia tanto para el generador como para el transformador. Debe observarse que el punto  $k_{max}$ , donde se alcanza la máxima eficiencia del conjunto es para un caso al 31% de la capacidad del generador y para el segundo a un 43 % de la misma.



<b>Tabla 4. Transformador WEG 1250 kVA Cosfi=1.</b>				
<i>kcg</i>	<i>kct</i>	Pérdidas G	Pérdidas T	Pérdidas Totales
0,31	0,28	12,36	3,61	15,97
0,75	0,69	29,91	12,43	42,34
1	0,92	39,88	20,64	60,52
kcmáx=0,31	0,28	12,21	3,56	15,77

<b>Tabla 5. Transformador ALKARGO Cosfi=1.</b>				
<i>kcg</i>	<i>kct</i>	Pérdidas G	Pérdidas T	Pérdidas Totales
0,31	0,28	12,36	3,20	15,56
0,75	0,69	29,91	8,47	38,38
1	0,92	39,88	13,40	53,28
kcmáx=0,43	0,40	17,22	4,22	21,45

En el caso del transformador **ALKARGO** el proceso de optimización converge hacia un punto de operación en un estado de carga superior; 0,43, algo más próximo a la realidad operacional del generador. Otros tipos transformadores darían otro punto de operación donde se desarrolla la máxima eficiencia. Es superior la eficiencia del conjunto para aquel transformador que desarrolla su máxima eficiencia más próxima al punto de operación del generador. Como se observa en este simple ejemplo, la diferencia de pérdidas al emplear un transformador u otro, incrementa con el estado de carga para un mismo factor de potencia y, aunque el valor absoluto puede parecer bajo, -del orden de los 8 kW a plena carga-, en realidad en otros casos puede ser superior. Este aspecto es importante si la unidad de generación distribuida es accionada por energías renovables ya que obtener menores pérdidas y la máxima eficiencia posee un valor adicional dado el limitado potencial de algunas de estas fuentes. En otras tecnologías es importante además por el costo de los fósiles y el impacto ambiental asociado a las mismas. En el caso de máquinas Diesel, como la tomada de ejemplo, esa diferencia de 8 kW en pérdidas representa unos 1,7 kg de combustible por hora en exceso lo que equivale también a lanzar a la atmósfera unos 2,5 kg de CO<sub>2</sub> / h y adicionalmente, a un costo de 600 USD/T de combustible unos 1,02 USD sin beneficios al aire. Por supuesto, este resultado depende tanto del tipo de generador como del transformador empleado. El artículo llama la atención sobre la correspondencia que debe existir entre el generador y la correcta selección del transformador para obtener la máxima eficiencia en la operación del conjunto.

## CONCLUSIONES

- La eficiencia operacional de un bloque generador-transformador y los costos asociados en términos de combustible, impacto ambiental y economía están relacionados con las características técnicas del generador, las del transformador, el estado de carga del conjunto y el factor de potencia operacional.
- La selección del transformador debe ser evaluada previamente de acuerdo al estado de carga esperado del sistema o al que se pretende operar la unidad de generación para obtener de ello los mayores beneficios. Debe seleccionarse un transformador que desarrolle su máxima eficiencia más cerca del punto operacional del generador.

## REFERENCIAS

- [1] Minghao Yang, *et al.*, "Efficient Operation Regions of Power Distribution Transformers". IEEE Transactions on Power Delivery, October 2004, vol.19, n.4 p. 1713 -1717, ISSN 08858977.
- [2] A., Losi, *et al.*, "Optimal Exploitation of Generator-Transformer Units". IEEE Transactions on Energy Conversion, March 1998, vol.13, n.1, p. 90-95, ISSN 08858977.
- [3] S.B.Sadati, *et al.*, "Comparison of Distribution Transformer Losses and Capacity under Linear and Harmonic Loads". IEEE 2nd International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia.
- [4] de Armas Teyra, Marcos A., "Selection of Asymmetrical Transformers Banks with Emphasis in Losses and Efficiency". IEEE Latin America Transactions, December 2010, vol.8, n.6, p. 678-684, ISSN 1548-0992.
- [5] Fitzgerald, Kingsley and Umans, "Electric Machinery". McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-123010-6.
- [6] Stevenson and Grainger. "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia". McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-113338-0.
- [7] Jin S. Heo, Kwang Y. Lee, *et al.*, "Multiobjective Control of Power Plants Using Particle Swarm Optimization Techniques". IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2006, vol.21, n.2, p. 552-561.
- [8] John G. Vlachogiannis and Kwang Y. Lee. "A Comparative Study on Particle Swarm Optimization for Optimal Steady-State Performance of Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, November 2006, vol. 21, n. 4, p. 1718-1728, ISSN 0885-8950.

## AUTORES

### Marcos A. de Armas Teyra

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos, Cuba.  
e-mail: marmas@ucf.edu.cu

### Julio R. Gómez Sarduy

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos, Cuba.  
e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

### Percy R. Viego Felipe

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, CEEMA. Universidad de Cienfuegos, Cuba.  
e-mail: pviego@ucf.edu.cu