



Análisis de sistema de potencia desbalanceado con el empleo de herramientas estadísticas, coeficientes complejos y redes neuronales artificiales

Marcos A. de Armas Percy R. Viego
 Julio R. Gómez Carlos Pérez

Recibido: Octubre del 2007

Aprobado: Diciembre del 2007

Resumen / Abstract

Se caracteriza estadísticamente el desbalance de tensión en un sistema eléctrico de potencia en términos de la IEEE y se señalan algunas informaciones útiles adicionales que se obtienen de esta. Se muestra cuán sostenida puede ser la explotación de un conjunto de potentes motores asincrónicos fuera de las normas internacionales haciéndose énfasis en aspectos energéticos al determinar la potencia demandada y la energía adicional consumida debido a la asimetría. Por último, se presenta una red neuronal cuya función es determinar el desbalance, emitir señales de alarma y producir el disparo del sistema si fuese necesario. Para este propósito se utilizan no solo las tensiones de fase, sino las corrientes de línea y los coeficientes complejos de desbalance. Se concluye con que el desbalance es un problema energético que produce demandas y pérdidas que pueden ser cuantificadas por el coeficiente de asimetría y el análisis estadístico. Las redes neuronales pueden ser entrenadas para ofrecer alarma, protección y otras tareas en los sistemas eléctricos de potencia. También pueden ser incorporadas a los sistemas modernos de mediciones digitalizadas en los servicios industriales. Para la validación de los resultados, se emplean las mediciones recién efectuadas en una estación de bombeo del acueducto de la provincia de Cienfuegos, Cuba.

Palabras clave: Análisis estadístico, redes neuronales sistemas desbalanceados

There are three goals in this article; statistical characterization of an unbalanced power system, show how long an asynchronous group of motors can be exploited out of international unbalance standards focused on power demand and energy consumption due to asymmetry complex defined factor and to present an artificial neural network used to send warning signals or to protect the motors under abnormal unbalanced conditions. As a case, a water supply station in Cienfuegos's province is presented. sequence and the possibilities that this design presents for the increase of the security of the installation!

Key words: Statistical analysis, artificial neural network, unbalanced power systems

INTRODUCCIÓN

El desbalance de tensión y corriente en los sistemas de potencia es una ineficiencia importante que no se debe subestimar dado que las potencias involucradas son superiores a la necesaria en un sistema homólogo

simétrico, en particular, si se alimentan cargas donde predominen las máquinas asincrónicas. Dado que esta potencia es suministrada desde los centros de generación, limitar la demanda controlando el desbalance reduce la capacidad necesaria en

generadores, transformadores, líneas de transmisión y redes de subtransmisión o de distribución, además de producir un efecto positivo en el consumo de energía, los costos y el impacto ambiental.

En la práctica, un sistema perfectamente balanceado tanto en tensión como en corriente no existe y los cálculos tienen un carácter aproximado cuando se ignoran los componentes de secuencia de la potencia demandada.

Aunque el tema no es esencialmente nuevo y ha sido estudiado desde diversas aristas, el enfoque que se presenta, simplifica notablemente los cálculos en circuitos complejos o de variable de topología, aporta criterios de eficiencia energética, permite establecer alertas y protecciones, y es programable en instrumentos digitales. Soportado sobre Matlab, constituye una herramienta sencilla y útil para evaluar las prestaciones de un sistema electroenergético en explotación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La norma IEEE 1159 - 1995 define el desbalance en un sistema trifásico como la máxima desviación de la tensión de una de las fases de la tensión promedio, dividido por la tensión promedio de las tres fases.

$$\% \text{Desb}_{\text{FASE}} = \frac{\text{Máx} [|V_A - V_{\text{PROM}}|; |V_B - V_{\text{PROM}}|; |V_C - V_{\text{PROM}}|]}{V_{\text{PROM}}}$$

$$V_{\text{PROM}} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$$

También se define como la relación entre la componente de voltaje de secuencia negativa y el de secuencia positiva usualmente expresado en porcentaje.

$$\text{FDV} = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| \cdot 100 \%$$

Por su duración esta norma lo define como un fenómeno de carácter estable, cuyos límites se encuentran normalmente entre un 0,5 y un 2 %. En Europa, la norma EN 50160 precisa que: "...en condiciones normales de explotación durante una semana y efectuando mediciones cada 10 min, el 95 % de los valores eficaces calculados de la componente de secuencia negativa de la tensión debe encontrarse entre el 0 y el 2 % de la componente directa". En Francia, EDF estima que este indicador es variable y debe encontrarse entre 0,5 y 2 %.

La norma ANSI C50.41.4.2 establece que un desbalance de tensión superior a un 1% es una condición inusual que debe eliminarse. La norma

IEC 34.1.12.2.1 plantea que los motores deben ser capaces de operar por un largo período de tiempo con un desbalance de un 1 % o por un corto período de tiempo que no exceda varios minutos con un desbalance de 1,5 %. La norma NEMA MG1 14,35 establece una depreciación de los motores en función del desbalance. Todas estas normas están de acuerdo con dos cuestiones básicas; el desbalance es perjudicial y aunque es un fenómeno de carácter estable, su magnitud es continuamente variable. Las mediciones de campo claramente indican que el desbalance de tensión es una magnitud variable debido a la variación continua del estado de carga y la configuración del sistema. Estas variaciones ocurren frecuentemente de forma aleatoria y deben ser procesadas estadísticamente. Aunque las normas mencionadas sitúan el desbalance en estado normal por debajo del 1%, y valores superiores lo consideran una condición inusual que debe evitarse, numerosas empresas desconocen cómo el sistema sirve su energía y también muchas empresas suministradoras no se preocupan por ello ni exigen demandas balanceadas dentro de los límites que hallan sido aceptables para cada tipo de usuario. En Cuba este trabajo está por realizar.

Desde el punto de vista energético el desbalance de tensión solamente, tal y como lo definen las normas, no permite analizar cuánta potencia o energía se transmite por la presencia del desbalance, siendo necesario para este propósito emplear un factor más elaborado dado por el producto del coeficiente complejo de desbalance de tensión por el conjugado del coeficiente complejo del desbalance de corriente. Estos son fáciles de determinar y en un sistema balanceado ambos son cero, como lo es también el coeficiente de asimetría. En caso en que el coeficiente de desbalance de tensión sea cero, pero existan corrientes desbalanceadas, el hecho se debe a la diferencia en las impedancias de las cargas y cada uno de los componentes de secuencia de las corrientes producirá tensiones de secuencia positiva haciendo nulo el coeficiente complejo de desbalance de tensión y también el de asimetría. En el caso más general, se presenta tanto el desbalance de tensión como el de corriente y se transmite potencia debido a la asimetría del sistema.

Componentes simétricas de la potencia compleja

Para desarrollar el análisis de la potencia compleja, se parte de la teoría de la potencia aritmética definida por la IEEE y de las componentes simétricas de Fortescue según la cual tres tensiones o corrientes

desbalanceadas se reducen a un número equivalente de componentes simétricos denominados de secuencia positiva, negativa y cero dados por:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

Donde: V_a, V_b y V_c (V) son las tensiones a neutro e I_a, I_b e I_c (A) son las corrientes de línea independiente de que exista una conexión en el neutro. Se identifica por el operador $\angle 120^\circ$.

Potencia compleja en términos de componentes simétricas

Conociendo las tensiones y corrientes de secuencia positiva y negativa directamente de las mediciones de campo efectuadas con analizadores de redes o de forma más rudimentaria, mediante las tensiones y corrientes y la aplicación de Pitágoras generalizado, la potencia compleja desarrollada por el sistema trifásico se calcula de acuerdo con:

$$S_T = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^*$$

Luego de algunas operaciones matriciales:

$$S_T = 3 \cdot (V_p I_p^* + V_n I_n^* + V_0 I_0^*) \quad \dots (3)$$

A partir de este momento se establecen los coeficientes complejos:

$$\vec{k}_{in} = \frac{I_n}{I_p} = k_{in} \angle \vartheta_i$$

$$\vec{k}_{i0} = \frac{I_0}{I_p} = k_{i0} \angle \vartheta_0$$

Sustituyendo estas expresiones en (3) se obtiene:

$$\vec{k}_{vn} = \frac{V_n}{V_p} = k_{vn} \angle \vartheta_v \quad S_T = 3 \cdot V_p I_p^* (1 + k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*)$$

$$\vec{k}_{v0} = \frac{V_0}{V_p} = k_{v0} \angle \vartheta \quad \dots(4)$$

De acuerdo con (4) existen dos componentes en la potencia compleja. Al primero se asocia la potencia aparente $3 \cdot V_p I_p^* = P + jQ$ y al segundo la potencia aparente de asimetría. $A = 3 \cdot V_p I_p^* (k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*) = M + jN$. El factor de asimetría $\kappa_A = (k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*)$ expresa el grado de desbalance complejo. La potencia real consumida se determina según:

$$P_T = R_E [S_T] \quad (W) \quad \dots(5)$$

La potencia reactiva total:

$$Q_T = \text{Im}[S_T] \quad (\text{VAR}) \quad \dots(6)$$

Y la potencia real de asimetría por:

$$P_A = R_E [A] \quad (W) \quad \dots(7)$$

Cuando las cargas son estáticas, la asimetría conduce a la pérdida de productividad, operaciones defectuosas de convertidores, etc. También se incrementan las pérdidas en líneas y además puede trasladarse el fenómeno a otras cargas vecinas o en las proximidades del sistema donde intervengan equipos dinámicos. El caso más crítico se presenta cuando se alimentan motores asíncronos debido a que el componente de desbalance de corriente es varias veces superior al coeficiente de desbalance de tensión y las pérdidas incrementan por la presencia del campo de secuencia negativa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación estadística

Dado que la tensión y la corriente están variando constantemente en magnitud e incluso en ángulo, y así lo hacen sus componentes de secuencia positiva y negativa, y que los procesos físicos que producen esas variaciones están relacionados con un gran número de factores que no pueden predecirse, es necesario realizar un análisis estadístico transformando un gran volumen de datos en un paquete concentrado para su interpretación.

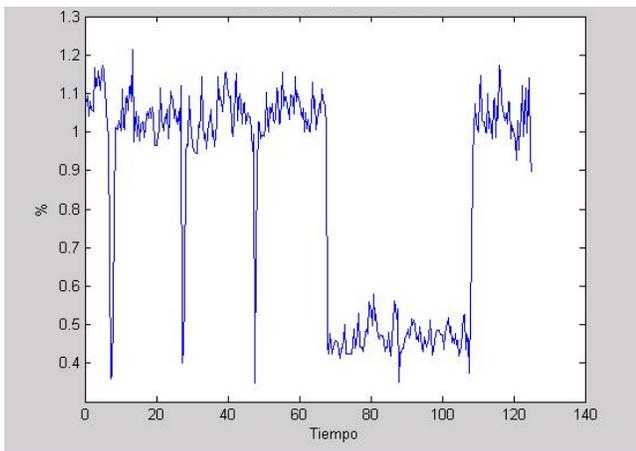
La figura 1 muestra el comportamiento del desbalance de tensión en una estación de bombeo del acueducto de Cienfuegos a partir de las mediciones realizadas durante cinco días aproximadamente, con registros de los parámetros del sistema cada 20 min, y en la figura 2 se observa el histograma donde se puede apreciar que la distribución no es totalmente normal

debido a que existe algún factor determinante en el comportamiento. En efecto, como se muestra en la figura 3, el nivel de desbalance depende del estado de carga y su valor aumenta con la misma.

En la tabla 1 se observa que las máquinas operan con un desbalance igual o superior al 1 % IEEE durante el 61,86 % del tiempo total de explotación, equivalente a 3,22 días de los 5,2 registrados. Y aunque se debe reducir la potencia que desarrollan las máquinas, esta acción no se efectúa reduciendo la vida útil a la vez que existe un exceso de energía consumida para efectuar el bombeo.

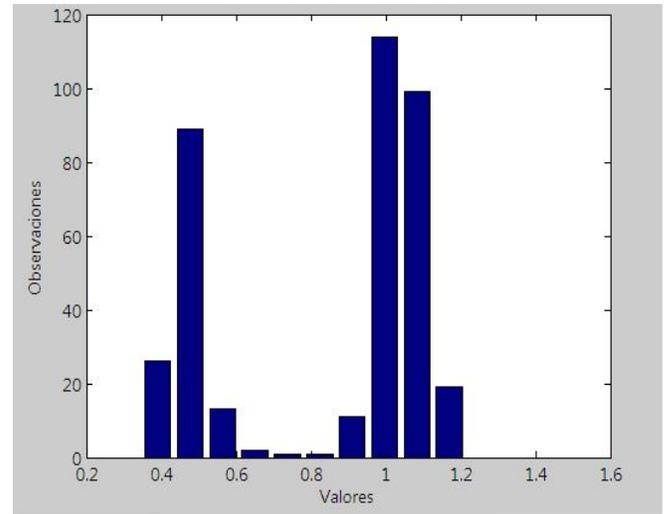
Debe observarse que durante todo el período de mediciones el factor de desbalance (FDV) supera lo recomendado por las normas, alcanzando valores del orden del 3% como muestra la figura 4.

Si se acepta como normal la potencia de asimetría demandada cuando el desbalance es inferior a un 0,6 % IEEE, se verá en la figura 5, que está en el orden de los 4,5 kW y que para desbalances superiores o iguales al 1% se alcanza los 8,5 kW. La diferencia arroja una demanda superior en 4 kW que durante las 82 h en que se opera con este régimen en el registro efectuado, producen un consumo de energía adicional de 328 kWh. Quizás parezca un valor pequeño, insignificante, que no deba llamar la atención. Sin embargo, debe pensarse que solo se han registrado 5,2 días y que esta planta trabaja todo el año, lo cual implica 23 MWh anuales, la quema de más de 7 t de fuel oil y la emisión de aproximadamente 24 t de CO₂ al medio ambiente. Tampoco debe olvidarse que esta no es la única instalación industrial que trabaja en estas condiciones en el país y que todo el tiempo se ha trabajado con un desbalance superior al 2 % del FDV. Ver figura 6.



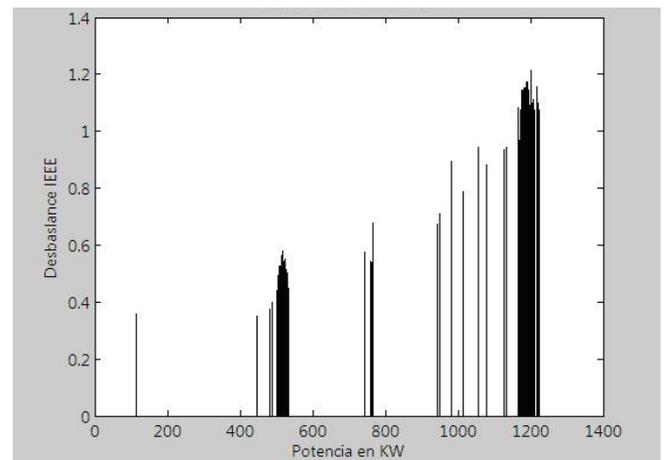
Desbalance IEEE plotado contra el tiempo.

1



Histograma del desbalance IEEE.

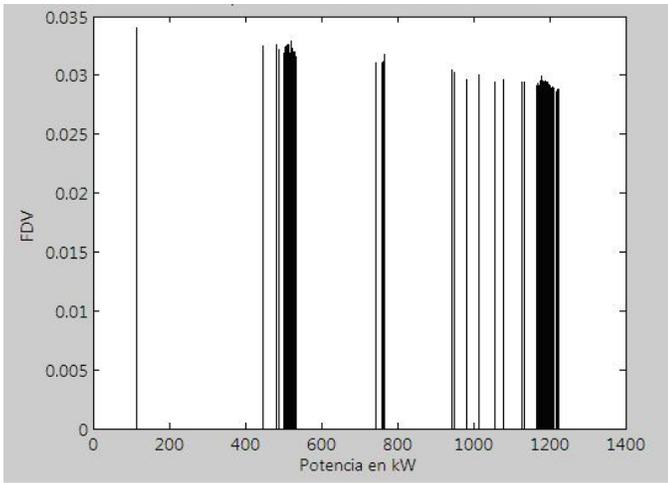
2



Desbalance vs potencia.

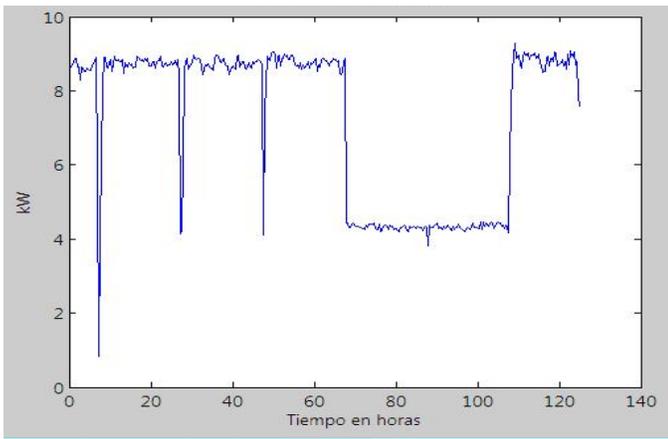
3

Tabla 1 Análisis del histograma de desbalance				
Observaciones	Desbalance IEEE	Tiempo (horas)	Tiempo (%)	Días
26	0,39	8,66	6,93	0,361
89	0,477	29,66	23,73	1,236
13	0,564	4,33	3,46	0,18
2	0,65	0,66	0,533	0,027
1	0,737	0,33	0,266	0,013
1	0,823	0,33	0,266	0,013
11	0,91	3,66	2,933	0,152
114	0,996	38	30,4	1,583
99	1,083	33	26,4	1,375
19	1,169	6,33	5,066	0,263
375	-	125	-	52



Factor de desbalance vs potencia en el sistema.

4



Potencia de asimetría vs tiempo.

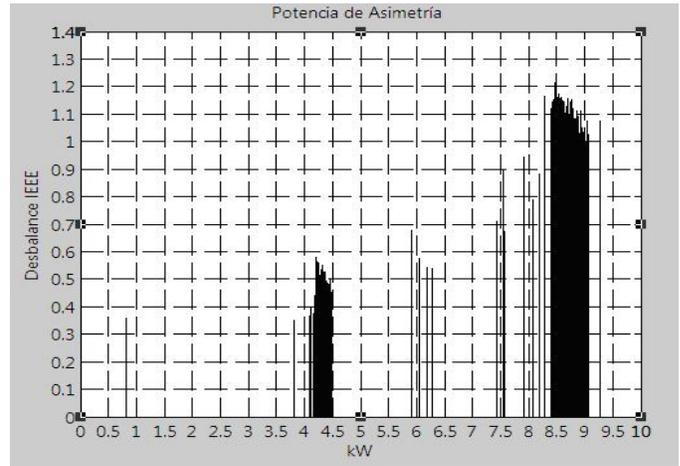
5

Diseño de la red neuronal

Con el propósito de determinar el desbalance y efectuar alertas en caso de presentarse valores que excedan las normas e incluso, proteger a las máquinas mediante el disparo del sistema en caso de falta de una fase o desbalance en exceso del 5 %, se creó un programa que incorpora una red neuronal artificial de tres capas con propagación progresiva y aprendizaje supervisado mediante el mecanismo de retropropagación. La red está diseñada por seis entradas correspondientes a los vectores de tensión de fase y corrientes de línea y una salida el desbalance de la IEEE. La capa oculta se activa por una función logarítmica sigmoidea y la capa de salida por una "pureline" como muestra la figura 7.

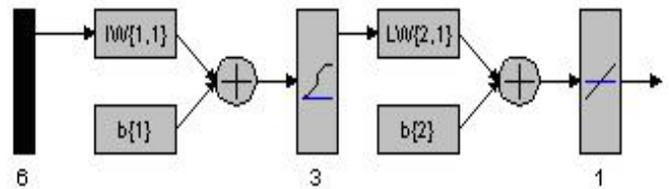
Esta red fue entrenada con trescientos juegos de datos de entradas de un total de trescientos setenta y cinco. Los setenta y cinco restantes fueron utilizados para la validación del proceso de aprendizaje evaluándose estadísticamente el error entre la respuesta de la red neuronal y el experimento para corroborar la calidad

de la predicción. Este análisis se muestra en la figura 8 junto a los resultados numéricos.



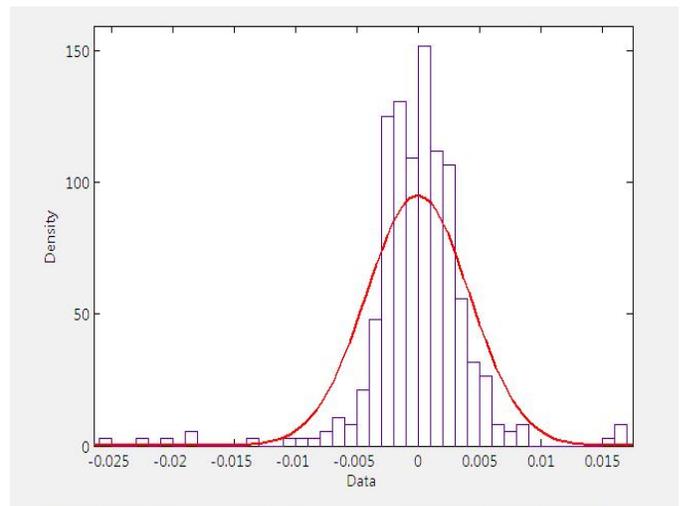
Desbalance vs potencia de asimetría.

6



RNA ANNFFBACFG.

7



Análisis estadístico de la respuesta de la RNA ANNFFBACFG.

8

Distribución: Normal
 Dominio: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Media: -3,790 04e-005
 Varianza: 1,755 13e-005
 Parametro Estimado Std. Err.
 mu -3,790 04e-005 0,000 216 341
 sigma 0,004 189 43 0,000 153 283

Evidentemente el análisis arroja una red eficaz para sus objetivos y ha sido programada en Matlab con vistas a implementar su aplicación en un PLC o en un DSP para el control y la protección en tiempo real.

CONCLUSIONES

1. El desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia que produce demandas y pérdidas de energía adicionales que deben ser atendidos por las compañías y por los usuarios de estos servicios polifásicos.
2. Las herramientas de análisis estadístico son eficaces para caracterizar los sistemas de suministro y pueden incluso constituir medios de diagnósticos.
3. El coeficiente de asimetría es una alternativa para caracterizar energéticamente el desbalance. Con su disminución crece la eficiencia energética en el sistema.
4. Las RNA pueden ser utilizadas para la alarma, protección, predicción, diagnóstico y otras tareas en los sistemas eléctricos de potencia, y deben ser incorporadas a los sistemas más modernos de mediciones digitalizadas.

REFERENCIAS

1. **Armas Teyra, Marcos A. de; Julio Gómez Sarduy y Carlos Pérez Tello:** "Inteligencia artificial aplicada al análisis de sistemas energéticos" (Capítulos 3 y 6), Redes Neuronales y Temas Avanzados, Universidad de Cienfuegos, Cuba, marzo, 2007.

2. **Gómez, J. R.:** "Caracterización de los datos de desbalance de tensión en un sistema de suministro eléctrico industrial", Ingeniería Energética, Vol. XXVII, No. 2, Ciudad de La Habana, 2006.

3. **Yaw - Juen Wang:** "Analysis of Effects of Three Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, September, 2001.

AUTORES

Marcos A. de Armas Teyra

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba
 e-mail: marmas@ucf.edu.cu.

Julio R. Gómez Sarduy

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba
 e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

Percy R. Viego Felipe

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
 e-mail:pviego@ucf.edu.cu

Carlos Pérez Tello

Ingeniero Electricista, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

C I E N C I A Y T É C N I C A



Instituto Superior Politécnico
 José Antonio Echeverría
cujae