

## ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE POTENCIA DESBALANCEADO MEDIANTE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS. EMPLEO DE COEFICIENTES COMPLEJOS Y MODELACIÓN POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES.

Marcos A. de Armas Teyra\* PhD., Julio R. Gómez Sarduy\* PhD. & Carlos Pérez Tello\*\* PhD.

\*Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos, Cuba.

\*\*Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.

marmas@ucf.edu.cu; jgomez@ucf.edu.cu, carlosperez@uabc.mx

Recibido para evaluación: 05 de Marzo de 2007

Aceptación: 03 de Julio de 2007

Entrega de versión final: 18 de Julio de 2007

### Resumen

El presente artículo posee varios propósitos; el primero es caracterizar estadísticamente el desbalance de tensión en un sistema eléctrico de potencia en términos de los criterios del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y señalar algunas informaciones útiles adicionales que se obtienen de ésta. El segundo es mostrar 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 artificial cuya función es caracterizar el desbalance, emitir señales de alarma y producir el disparo del sistema si fuese necesario. Para este propósito se utilizan no sólo las tensiones de fase, sino las corrientes de línea y los coeficientes complejos de desbalance. Se concluye que el desbalance es un problema energético que produce demandas y pérdidas que pueden ser cuantificadas por el coeficiente de asimetría. Las redes neuronales bien entrenadas poseen la capacidad de ofrecer alarma, protección y realizar otras tareas en los sistemas eléctricos de potencia. 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 Claves:* Análisis estadístico, redes neuronales, sistemas desbalanceados.

### Abstract

This paper covers different objects. The first part reviews the problems associated with the characterization of the recorded data in an unbalanced power system according to the IEEE definition in statistical terms and illustrates some useful additional information derived from it. The second is to show how long a powerful induction motor load can operate out of international standards related to unbalance and how much additional demand and energy consumption due to asymmetry is supplied by the power systems. This energy and demand is calculated according to the asymmetry and complex factor. Finally an artificial neural network is designed to predict the unbalance of the system receiving the phase voltage and line current as input vector. This neural network can be used to send warning and shut down signals protecting the motor load and avoiding the extra energy consumption when it is necessary. As a study case a recent analysis of a aqueduct station in Cienfuegos's city is presented.

*Key Words:* Statistical analysis, neural networks, unbalanced systems

## 1. INTRODUCCIÓN

El desbalance de tensión y corriente en los sistemas de potencia es una ineficiencia importante que no debe subestimarse dado que las potencias involucradas son superiores a la necesaria en un sistema homólogo simétrico, particularmente 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, en 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 fundamentalmente desde el punto de vista de las afectaciones que provocan en los motores asincrónicos, el ajuste de las protecciones de los sistemas, las afectaciones al ciclo de vida de las máquinas, el efecto de la secuencia negativa sobre el rotor de los generadores, etc, el enfoque que se presenta, es diferente y simplifica notablemente los cálculos de las pérdidas en circuitos complejos o de topología variable, aporta criterios de eficiencia energética, permite alertar y proteger y es de muy fácil programación. Soportado sobre MATLAB, constituye una herramienta sencilla y útil para evaluar las prestaciones de un sistema electroenergético en explotación.

El artículo se concibe en cuatro secciones; una primera dedicada a Introducción; la segunda a Materiales y Métodos donde se exponen las definiciones establecidas y condiciones normadas para el análisis del desbalance y sus limitaciones para determinar las pérdidas de energía que se producen en los sistemas por esta causa. Adicionalmente se desarrollan las ecuaciones de

la potencia de asimetría en base a los coeficientes complejos obtenidos a partir de la descomposición en componentes simétricas de los fasores actuantes de tensión y corriente. Más adelante, en la sección III, se caracteriza estadísticamente y se diseña una red neuronal para simplificar y reproducir el patrón de comportamiento del sistema mostrando su viabilidad en estos casos. Finalmente en la sección IV, se expresan las conclusiones.

## 2. 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.

$$\%Desb_{FASE} = \frac{\text{Max}[|V_A - V_{PROM}|, |V_B - V_{PROM}|, |V_C - V_{PROM}|]}{V_{PROM}}$$

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

También, como la relación entre la componente de voltaje de secuencia negativa y el de secuencia positiva usualmente expresado en por ciento.

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

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 minutos, 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 en dos cuestiones básicas; primero, el desbalance es perjudicial y segundo, aunque es un fenómeno de carácter estable, su magnitud es continuamente variable. Las mediciones de campo claramente indican esta naturaleza del desbalance de tensión 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 citadas sitúan el desbalance en estado normal por debajo del 1%, a valores superiores lo consideran una condición inusual que debe evitarse, numerosas empresas desconocen cómo el sistema entrega su energía y también muchas empresas suministradoras no se preocupan por ello ni exigen demandas balanceadas dentro de los límites que hayan determinado 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 es transmitida por los componentes de secuencia negativo o se pierde por la presencia del desbalance. Para este propósito se propone emplear un factor más elaborado y no utilizado hasta el momento para este caso dado por el producto del coeficiente complejo de desbalance de tensión por el conjugado del coeficiente complejo del desbalance de corriente. Estos factores son fáciles de determinar en un sistema estrella o delta y en un sistema balanceado ambos son cero como lo es también el coeficiente de asimetría. Cuando el coeficiente de desbalance de tensión es cero pero existen corrientes desbalanceadas, ello se debe a 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 y surgen pérdidas debido a la asimetría del sistema.

## 2.1. 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 el 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:

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

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

Donde  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  son las tensiones a neutro e  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  son las corrientes de línea, independientemente que exista una conexión en el neutro. Se identifica por al operador  $1\angle120^\circ$

## 2.2. 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:

$$S_T = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (2)$$

Luego de algunas operaciones matriciales

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

Siendo  $V_p, V_n$  y  $V_o$ , las tensiones e  $I_p, I_n$  y  $I_o$ , las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente.

A partir de este momento se establecen los coeficientes complejos:

$$\begin{aligned}\vec{k}_{in} &= \frac{\vec{I}_n}{\vec{I}_p} = k_{in} \angle \vartheta_i & \vec{k}_{vn} &= \frac{\vec{V}_n}{\vec{V}_p} = k_{vn} \angle \vartheta_v \\ \vec{k}_{i0} &= \frac{\vec{I}_0}{\vec{I}_p} = k_{i0} \angle \vartheta_0 & \vec{k}_{v0} &= \frac{\vec{V}_0}{\vec{V}_p} = k_{v0} \angle \vartheta_0\end{aligned}$$

Sustituyendo estas expresiones en (3) se obtiene:

$$S_T = 3 \times V_p I_p^* (1 + k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*) \quad (4)$$

De acuerdo con (4) existen dos componentes en la potencia compleja. Al primero se asocia la potencia aparente  $3 \times V_p I_p^* = P + jQ$

y al segundo la potencia aparente de asimetría.

$$A = 3 \times V_p I_p^* (k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*) = M + jN$$

El factor de asimetría  $KA = (k_{vn} k_{in}^* + k_{v0} k_{i0}^*)$  expresa el grado de desbalance complejo. La potencia real consumida se determina entonces como:

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

La potencia aparente total:

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

La potencia real de asimetría:

$$PA = R_E [A] \quad (7)$$

Cuando las cargas son estáticas, la asimetría conduce a 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 asincrónicos debido a que el componente de desbalance de corriente es varias veces superior al coeficiente de desbalance de tensión y las pérdidas se incrementan considerablemente en las máquinas por la presencia del campo de secuencia negativa. En un sistema balanceado, el coeficiente de asimetría; KA, es cero y por consiguiente la

potencia de asimetría es cero. Cuando se alimentan cargas tipo motor, la potencia de asimetría se traduce en puras pérdidas en la máquina y el sistema además de una demanda en exceso. Evidentemente un sistema es más perfecto y más eficiente en la medida que su coeficiente de asimetría se approxima a cero.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. 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, 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 de un acueducto de Cienfuegos donde se alimentan sólo seis motores asincrónicos; cuatro de 240 y dos de 158 KW a partir de las mediciones realizadas durante cinco días aproximadamente con registros efectuados cada 20 minutos.

En la Figura 2 se muestra el histograma donde se puede apreciar que la distribución no es totalmente normal debido a que existe algún factor determinístico en el comportamiento. En efecto; como se muestra en el gráfico de la Figura 3, el nivel de desbalance depende del estado de carga y su valor aumenta con la misma.

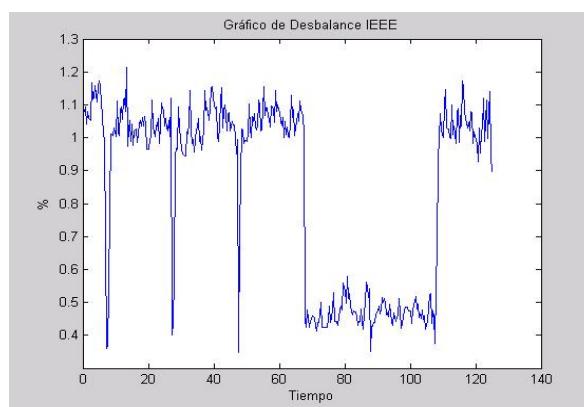


Figura 1. Desbalance IEEE Ploteado contra Tiempo

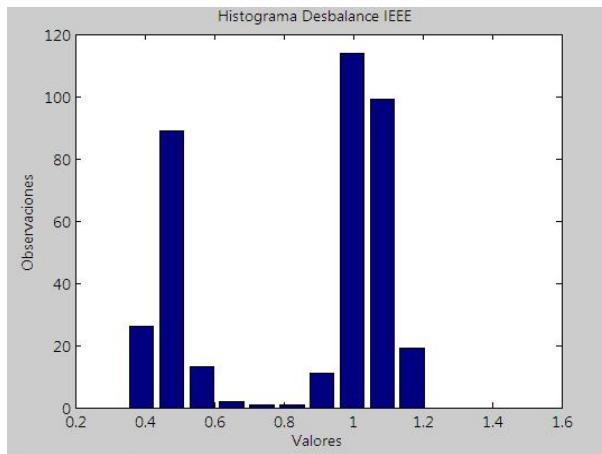


Figura 2. Histograma del desbalance IEEE

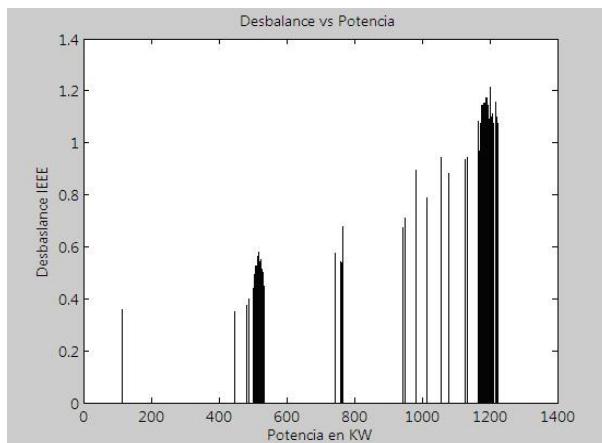


Figura 3: Desbalance vs Potencia

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.

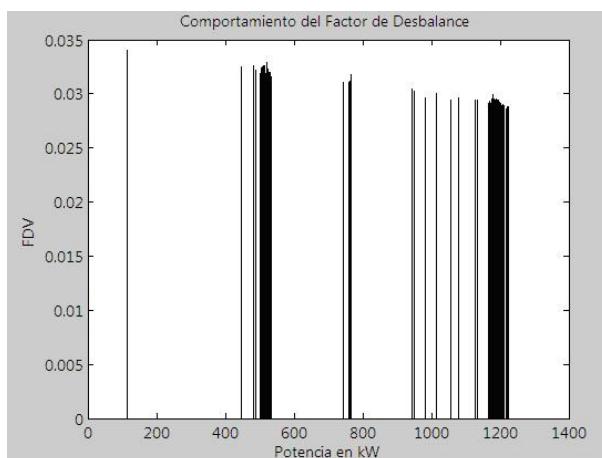


Figura 4. Factor de desbalance vs Potencia en el sistema

En la Tabla 1 se observa que los motores de esta instalación 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 limitar la potencia que desarrollan las máquinas como recomiendan las normas, esta acción no se efectúa reduciendo la vida útil a la vez que existe un exceso de energía consumida para efectuar el bombeo.

Tabla 1. Análisis del Histograma de Desbalance				
Observaciones	Desbalance IEEE	Tiempo en Horas	% del 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	-	5,2

Si se acepta como normal la potencia de asimetría demandada cuando el desbalance es inferior a un 0.6% IEEE, se verá en la Figuras 6 que su valor es del orden de los 4.5 kW y que para desbalances superiores o iguales al 1% se alcanzan los 8.5 kW. La diferencia indica una demanda superior en 4 kW, que durante las 82 horas en que se operó con este régimen durante el registro, producen un consumo de energía adicional de 328 kWh. Quizás parezca un valor pequeño, insignificante, que llama la atención. Sin embargo, debe pensarse que sólo se han registrado 5.2 días y que la planta trabaja todo el año, lo que equivale a 23 MWh anuales, a la quema de más de 7 T de fuel oil, y la emisión de aproximadamente 24 T de CO<sub>2</sub> al medioambiente. Tampoco debe olvidarse que toda esta potencia se desarrolla en pérdidas, que 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.

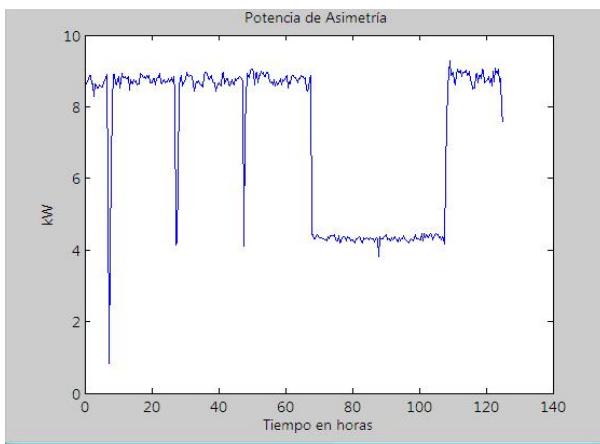


Figura 6: Potencia de Asimetría vs Tiempo

### 3.3. 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 la 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 sigmoidal y la capa de salida por una "pureline" como muestra la Figura 7.

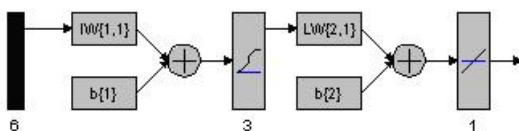


Figura 7. RNA ANNFFBACFG

Esta red fue entrenada con trescientos juegos de datos de entrada 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 y de la reproducción del comportamiento del sistema. Este análisis se muestra en la Figura 8 junto a los resultados estadísticos que reflejan la calidad del trabajo de la red.

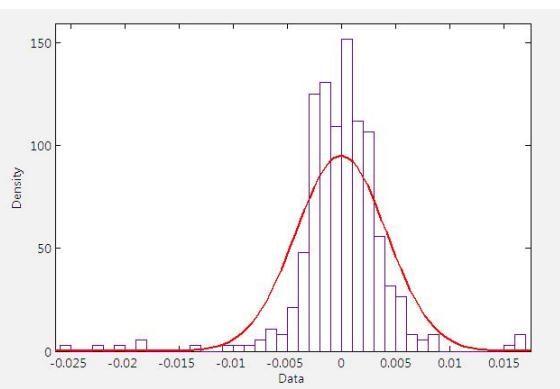


Figura 8. Análisis estadístico de la respuesta de la RNA ANNFFBACFG

Distribution: Normal

Log likelihood: 1521.59

Domain:  $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean:  $-3.79004\text{e-}005$

Variance:  $1.75513\text{e-}005$

Parameter Estimate Std. Err.

mu  $-3.79004\text{e-}005$  0.000216341

sigma 0.00418943 0.000153283

Estimated covariance of parameter estimates:

mu	sigma
----	-------

mu	$4.68036\text{e-}008$	$5.00842\text{e-}025$
----	-----------------------	-----------------------

sigma	$5.00842\text{e-}025$	$2.34958\text{e-}008$
-------	-----------------------	-----------------------

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 para la señalización y la protección en tiempo real.

## 4. CONCLUSIONES

1.- El desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia que produce demandas y pérdidas de energía adicionales generalmente desatendidos por las compañías y por los usuarios de los servicios polifásicos.

2.- El coeficiente de asimetría es una alternativa que permite caracterizar energéticamente el desbalance. Con su disminución crece la eficiencia energética en el sistema.

3.- Las RNA pueden ser utilizadas para caracterizar y reproducir el comportamiento

de un sistema con vistas a establecer la alarma, proteger, predecir, diagnósticar y otras tareas en los sistemas eléctricos de potencia y son fáciles de incorporar a los sistemas más modernos de mediciones digitalizadas en los servicios industriales.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

De Armas T., M. A.; Gómez S., J. y Pérez T., C. 2007. Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis de Sistemas Energéticos. Capítulos 3 y 6; Redes Neuronales y Temas Avanzados. Universidad de Cienfuegos, Cuba. 240 P.

De Abreu, J.P.G, Emanuel, A.E., 2002. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 1, pp. 12-20.

Chen, T.-H., 1995. Evaluation of line loss under load unbalance using the complex unbalance factor. Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings-, Volume: 142, Issue: 2, pp. 173-178.

Ching-Yin L., 1999. Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor. IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp. 202-208.

Ching-Yin L. y Col., 1997. Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1997., Conference Record, Papers Presented at the 1997 Annual Meeting, IEEE 1997, 11-16 May 1997., pp.51 - 59.

Chin-Yin L.; Bin Kwie C.; Wei J., L. y Yeng F., H. 1997. Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. IEEE Publication.

Costa M., A.; López F., X. M., 2004. Effects of Unbalanced Power Supply on Efficient Performance of Three Phase Induction Motors",

Proceedings of XL International Symposium on Electrical Machines SME'2004, 15 - 18 June 2004, Hajnowka, Poland.

Gómez Sarduy Julio, de Armas Teyra Marcos A., Viego Felipe Percy, Costa Montiel Ángel, 2006 "Caracterización de los datos de desbalance de tensión en un sistema de suministro eléctrico industrial. Artículo presentado a Ingeniería Energética.

Yaw-Juen Wang 2001 "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.

