

## MÉTODO DE BALANCEO DINÁMICO, EN DOS PLANOS, DE ROTORES ACOPLADOS DIRECTAMENTE A UN MOTOR DE INDUCCIÓN EMPLEANDO DATOS DE CORRIENTE RESIDUAL

Alfonso C. García Reynoso<sup>1,2</sup>, Enrique Ladrón de Guevara Durán<sup>1,2</sup>, Alberto Lorandi Medina<sup>2</sup>, Alfonso García Portilla<sup>1</sup>,  
Guillermo Hermida Saba<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Veracruz, Miguel Ángel de Quevedo 2779, C.P. 91860, Veracruz, Ver. México  
Tel. y Fax (229) 9385764, <sup>2</sup>Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, Juan Pablo II s/n Boca del Río, Veracruz, 94294 México, e-mail: garreynoso@hotmail.com

### RESUMEN

Se desarrolla un método de balanceo dinámico, en dos planos, que utiliza información de algunas componentes del espectro de la corriente eléctrica de cada fase de alimentación del motor obtenidas mediante filtrado. Las lecturas del espectro, que son cantidades escalares, reflejan un valor residual complejo (magnitud y fase) cuando no hay desbalance, lo cual hace que el comportamiento sea no-lineal con respecto a las fuerzas desequilibradas. Basado en esto se desarrolla un algoritmo que determina, a partir de las mediciones del valor residual correspondiente al rotor con desbalance las magnitudes y los ángulos de los fasores relacionados directamente con dicho desbalance. La existencia de errores, propios de los sensores de efecto Hall para medir las componentes del espectro de la corriente se corrige mediante ajustes a las lecturas a través de un sistema de ecuaciones de perturbación y de ecuaciones de compatibilidad que se aplican a los datos. Este algoritmo se verifica mediante corridas de varios casos de desba-

lance en un rotor de laboratorio obteniéndose resultados satisfactorios.

### ABSTRACT

A method for two- plane rotor balancing which requires some components of the electric-signal spectrum from each phase of the electric motor to which it is directly coupled is developed. The signal readings, which are scalar quantities that reflect residual complex values (offset with magnitude and phase) when there is no imbalance, produce a nonlinear behavior of the data with respect to the unbalanced forces. This requires an algorithm to determine, based on readings of residual values for the imbalanced rotor, the complex values that directly relate to the imbalance. The signal errors that are inherent to these readings, which are more pronounced in these Hall-type sensors, are corrected by means of a system of equations of perturbations and compatibility relations that are applied to these data. This algorithm was verified by running several study cases, with satisfactory results.

## NOMENCLATURA

- $W_p$  Peso de prueba  
 $W_c$  Peso de balanceo  
 $W_d$  Peso de desbalance  
 $W_{dp}$  Peso resultante  
 $\theta_d$  Angulo de fase del peso de desbalance  
 $\theta_{dp}$  Angulo de fase del peso resultante  
 $N$  Lectura de corriente, mili-amperios, condición tal cual  
 $N_2$  Lectura de corriente, mili-amperios, con peso de prueba  
 $\theta_i$  Ángulo de fase de cada lectura de corriente  
 $\theta_{ij}$  Ángulo de fase relativa entre un par de lecturas de corriente  
 $B_i$  Lectura de corriente de rotor balanceado  
 $R_{oi}$  Lectura de corriente de rotor desbalanceado que incluye offset  
 $R_{oLi}$  Lectura de corriente de rotor desbalanceado sin offset  
 $\varepsilon_i$  Perturbación de magnitud, cantidad pequeña con respecto a 1.0  
 $\delta_i$  Perturbación de fase, cantidad pequeña con respecto a 1.0 radian  
 $\Theta'$  Parámetro, ángulo de transformación  
 $\Theta''$  Parámetro, ángulo de transformación

## INTRODUCCIÓN

La relación entre los armónicos presentes en el espectro de una corriente eléctrica y los problemas mecánicos o electromagnéticos es bien conocida. En 1995 Dorrell [1] estudian la relación entre las magnitudes de los armónicos de la corriente y las magnitudes de los armónicos de la vibración mecánica encontrando una fuerte relación con las fallas que se presentan en los motores, explorando en forma particular su relación con la excentricidad. Riley [2], [3] y [4] en 1997 estudia estas relaciones con el fin de determinar límites en las corrientes armónicas relacionadas con la vibración, concluyendo en la existencia de una relación monótona entre estas dos variables. Caryn en 1997 establece que basándose en análisis teóricos y experimentales se encuentra una relación lineal entre armónicos de corriente específicos y la vibración mecánica. A su vez en 1999 presenta un estudio entre los armónicos que se encuentran en el espectro de corriente y las vibraciones mecánicas pero incluyendo el efecto de vibraciones inducidas externamente. Finley [5] en el 2000 presenta ya un estudio completo de relación entre los armónicos de corriente eléctrica y los problemas mecánicos, por citar algunos la desalineación, el

desbalance, falla en los rodamientos, barras de rotor fracturadas, etc.. En el 2004 Kral [6] propone una técnica para evaluar el desbalance, pero usando los armónicos presentes en la señal de potencia eléctrica, mostrando resultados positivos en la evaluación de la excentricidad estática y la excentricidad dinámica. En el 2007 Neelam [7] presenta el análisis de la corriente eléctrica como el método más popular para la detección de fallas tanto eléctricas, fallas entre espiras de devanados, barras de rotor rotas o sueltas, etc., así como fallas mecánicas y muestra la efectividad del método para detectar condiciones anormales en las aplicaciones de los motores de inducción, incluyendo en su análisis situaciones como la influencia de caja de engranes. En el 2008 Bellini [8] presenta los resultados de los artículos publicados en los últimos diez años mostrando una lista de referencias y actividades de investigación clasificados en cuatro tópicos a) fallas eléctricas b) fallas mecánicas c) Procesamiento de señales para análisis y monitoreo y d) Técnicas de decisión usando inteligencia artificial. En el 2009 Camargo [9] presenta resultados obtenidos con los valores de los armónicos de corriente de línea relacionados con el desbalance, al balancear un rotor con un desbalance en un solo plano. García [10] en 2010 desarrolla un algoritmo que determina, a partir de las mediciones del valor residual correspondiente al rotor balanceado, los ángulos de fase de las lecturas con pesos de prueba que encuentra los coeficientes de influencia y el peso de balanceo.

García et al [11] presentan un nuevo método de cálculo de la fase basado en mediciones de las fases relativas entre las armónicas del espectro. García et al [12] presentan un método que utiliza perturbaciones para ajustar los datos a que cumplan las condiciones de compatibilidad que se desarrollan para este caso.

El método propuesto en este artículo extiende el método de balanceo en un plano a los casos de rotores en dos planos cubriendo así el balanceo de cualquier rotor acoplado a un motor de inducción.

## INSTRUMENTACIÓN USADA

El sistema de medición usado tiene los siguientes elementos: pinzas de corriente eléctrica de efecto Hall, tarjeta de adquisición de datos e instrumento virtual desarrollado en lenguaje G que acondiciona, filtra, mide, presenta y guarda la información capturada. La información general de los elementos del sistema de instrumentación se presentó en [11].

El instrumento virtual se actualizó de Labview 8.6 a Labview 2010, tiene pantallas amigables para el usuario (figuras 1, 2 y 3), permitiendo la lectura y la captura de la información deseada.

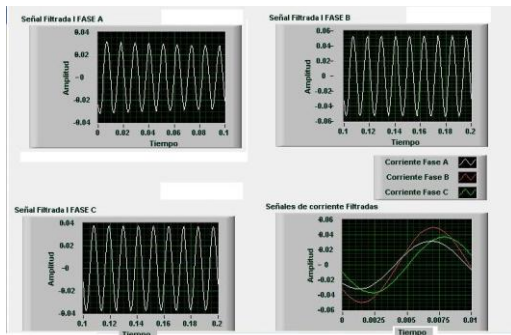


Figura 1 Señales Filtradas

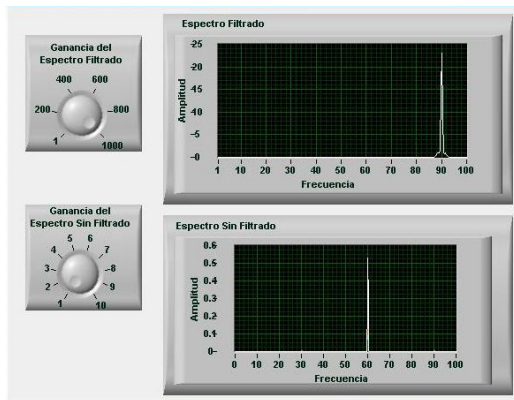


Figura 2 Espectro de señales

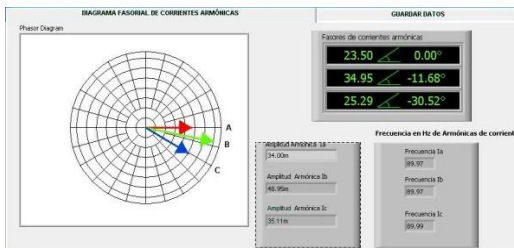


Figura 3 Diagrama fasorial de Armónicas

La experimentación realizada para validar el método propuesto consiste en cientos de pruebas a un motor de tamaño pequeño cuyas especificaciones se muestran en la tabla 1.

Tabla1 Motor de 0.75 h.p 220 V 3φ

Potencia	0.75 h.p
Voltaje	220 V 3φ
Corriente	3.0 A
Vel. Nominal	1730
Frecuencia	60 Hz
Marca	Siemens
Conexión	YY

### MEDICIÓN DE LAS SEÑALES DE CORRIENTE RESIDUAL

Se considera corriente residual a todas las componentes armónicas que se presentan en el motor al restar la corriente fundamental de la corriente total circulando en los devanados. Estas armónicas se deben a diferentes efectos tanto mecánicos como eléctricos y su relación ha sido estudiada durante largo tiempo. [5][8].

Estas corrientes se pueden considerar como el resultado de la deformación del campo electromagnético del entrehierro producto de la fuerza de desbalance sobre el rotor. Sin embargo, la condición residual también se obtiene en un motor balanceado como producto de la excentricidad que los motores tienen en su fabricación así como de la asimetría que se presenta en la estructura electromagnética de los devanados tanto del rotor como del estator; en general de irregularidades estáticas o dinámicas en el entrehierro [2][8].

Mediante el sistema de medición se detecta la corriente fundamental consumida por el motor, así como las armónicas relacionadas con los problemas electromagnéticos y mecánicos. Luego se desarrolla un espectro de Fourier a la señal capturada para corroborar la existencia de armónicas relacionadas con el fenómeno de desbalance y se procede a filtrar la señal para visualizar solamente dichos armónicos.

El equipo de medición, con respecto a lo presentado en [11], se modificó en la etapa de captura de las señales. Ahora tiene la capacidad de trabajar en un sistema de baja tensión limitada por el aislamiento de las pinzas a 600 Volts y con un rango máximo de 20 Amperes de corriente (pudiéndose fácilmente cambiar el rango, cambiando las pinzas). La señal de corriente se obtiene a través de pinzas de corriente efecto Hall modelo Fluke 30s, pudiéndose detectar componentes de directa así como componentes de alterna hasta un valor de 100 kHz. Las características generales de estas pinzas son:

- Rango de corriente 20 A CA rms o CC
- Rango de medida  $\pm 30$  A
- Sensibilidad de salida 100 mV/A
- Precisión (a +25 °C)  $\pm 1\%$  de lectura  $\pm 2$  mA
- Resolución  $\pm 1$  mA
- Impedancia de carga  $> 100$  k $\Omega$
- Sensibilidad de la posición del conductor  $\pm 1\%$  respecto a lectura central
- Rango de frecuencias CC a 100 kHz (-0,5 dB)
- Cambio de fase por debajo de 1 kHz  $< 2$  grados

De interés particular en este caso, es el análisis de las armónicas que aparecen en el espectro relacionadas con el desbalance mecánico. Estas corrientes armónicas son dependientes del deslizamiento del rotor, la frecuencia de alimentación del motor y ocurren a las frecuencias  $h_1$  y  $h_2$  dadas por las siguientes expresiones:

$$h_1 = f_s + f_r \quad (1)$$

$$h_2 = f_s - f_r \quad (2)$$

donde:

$f_r$  = Frecuencia de giro del rotor en revoluciones por segundo.

$f_s$  = Frecuencia de alimentación del motor.

$h$  = Frecuencia del armónico relacionado con el desbalance del rotor.

Detectadas las frecuencias relacionadas con el desbalance mecánico se procede a filtrar la señal con un filtro IIR en configuración similar al filtro analógico Butterworth, y con esto poder observar con mayor exactitud el comportamiento de dichos armónicos.

El instrumento fue validado con amperímetros comerciales en relación con el valor de la señal fundamental de las corrientes de fase. El ajuste del mismo es a través de software.

Las mediciones realizadas durante las pruebas de balanceo consistieron en muestras de dos minutos en cada corrida. El tipo de señal se muestra en la figura 4. Como puede observarse, la señal es variable y se calcula el valor cuadrado medio y se extrae raíz para manejar un valor representativo (RMS).

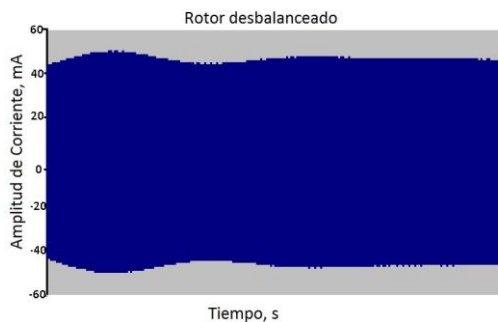


Figura 4 Señal de corriente

### NATURALEZA DE LOS VALORES DEL ESPECTRO DE CORRIENTE ELÉCTRICA

En virtud que los datos de corriente para el rotor balanceado no convergen hacia cero como los datos de vibración, sino que tienen un valor

residual diferente para las tres líneas del motor, el comportamiento de las lecturas para los casos en que hay un desbalance no tienen una relación lineal con las fuerzas de desbalance aplicadas. Sin embargo, al hacer el ajuste de las lecturas, restando el valor residual (amplitud y fase), se obtiene un comportamiento aproximadamente lineal que converge a cero

Este ajuste de los datos requiere conocer las fases, tanto de las lecturas de prueba como de los valores residuales, las cuales no se miden con los sensores de corriente utilizados en estas pruebas. Esto se determina según el procedimiento descrito abajo.

### AJUSTE DE LECTURAS PARA REMOVER EL OFFSET

Observando las señales en el tiempo para el caso del rotor balanceado se miden los ángulos de fase entre las armónicas de  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  y se obtienen valores de  $120^\circ$  entre sí. Sin embargo, al medir los ángulos entre las armónicas para los casos que incluyen pesos de desbalance, estos ángulos relativos cambian debido a que se obtienen los efectos de la suma vectorial del offset y del desbalance. La figura 5 muestra las señales en el tiempo para un peso de desbalance determinado.

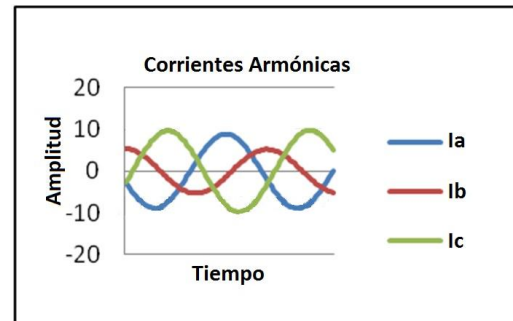


Figura 5 Amplitudes del espectro de cada fase de alimentación variando en el tiempo.

Partiendo de la premisa de que las tres líneas ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ ) deben acomodarse a  $120^\circ$  entre sí, cuando se ha removido el offset ( $R_{0L1}$ ,  $R_{0L2}$  y  $R_{0L3}$ ), con un ángulo de fase absoluto que depende del desbalance, se toma como referencia el caso del rotor balanceado con las líneas arregladas en las posiciones angulares de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$  respectivamente ( $B_1$ ,  $B_2$  y  $B_3$ ). Esto se indica en la figura 6.

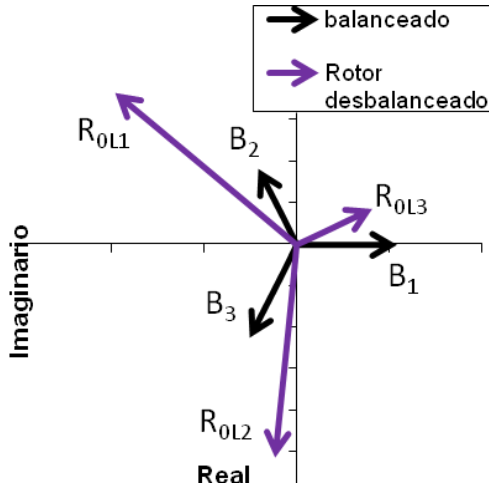


Figura 6 Vectores de amplitud del espectro.

Si aparece un desbalance, las lecturas observadas corresponden a la suma vectorial que se indica en la figura 7. y en las siguientes ecuaciones:

$$R_{01} = B_1 + R_{0L1} \quad (3)$$

$$R_{02} = B_2 + R_{0L2} \quad (4)$$

$$R_{03} = B_3 + R_{0L3} \quad (5)$$

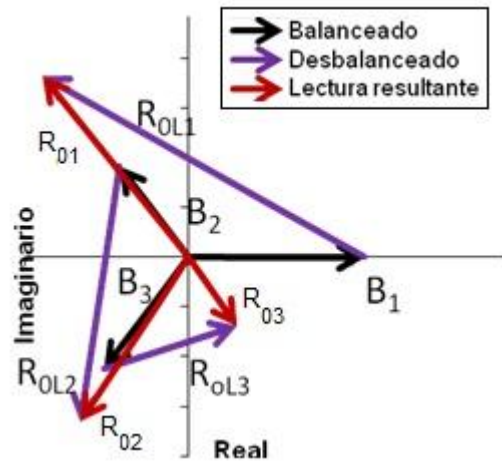


Figura 7 Composición de vectores del espectro.

Para obtener el ángulo de fase de la línea L<sub>1</sub> se utilizan los ángulos de fase relativos entre los vectores  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  y  $R_{03}$  que se obtienen de las señales del tiempo leídas durante las pruebas. Entonces, con un algoritmo se itera el ángulo de fase hasta obtener que los vectores  $R_{0L1}$ ,  $R_{0L2}$  y  $R_{0L3}$  queden con un desfase de 120° entre sí. Solamente hay una combinación de vectores para el desbalance dado y, así quedan determinadas las magnitudes y los ángulos de fase.

## FÓRMULAS TRADICIONALES DE BALANCEO

Las fuerzas de inercia totales que tiene el rotor en la corrida con peso de prueba se componen de la fuerza del desbalance original más el peso de prueba agregado de manera provisional.

Conocidas las magnitudes y fases de las lecturas ajustadas para restarles el offset, es posible calcular el coeficiente de influencia así como la masa de balanceo para la combinación de peso de prueba con la lectura tal cual (sin peso de prueba). En el método tradicional de coeficientes de influencia, las fórmulas (6) y (7) proporcionan el peso de balanceo cuando se tienen lecturas de amplitud y fase (fasores).

$$A = \frac{N_2 - N}{W_p} \quad (6)$$

$$W_c = -\frac{N}{A} \quad (7)$$

## FÓRMULAS PROPUESTAS

De las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\frac{R_{0L2}}{R_{0L1}} = \frac{-B_2 + R_{02}}{-B_1 + R_{0L1}} \quad (8)$$

Pero,

$$R_{01} = \bar{R}_{01} e^{i\theta_1}$$

$$R_{02} = \bar{R}_{02} e^{i\theta_2}$$

$$R_{03} = \bar{R}_{03} e^{i\theta_3}$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta_{12}$$

$$R_{02} = \bar{R}_{02} e^{-i\theta_{12}} e^{i\theta_1}$$

Substituyendo en la ecuación (8) se obtiene:

$$\frac{R_{0L2}}{R_{0L1}} = \frac{-B_2 + \bar{R}_{02} e^{-i\theta_{12}} e^{i\theta_1}}{-B_1 + \bar{R}_{01} e^{i\theta_1}} \quad (9)$$

Ahora se hace la transformación:

$$e^{i\theta_1} = \frac{\bar{R}_{01} + \bar{B}_1 e^{i\theta'}}{\bar{B}_1 + \bar{R}_{01} e^{i\theta'}} \quad (10)$$

Substituyendo resulta:

$$\frac{R_{0L2}}{R_{0L1}} = \frac{-B_1 B_2 + R_{01} R_{02} e^{-i\theta_{12}} + (-R_{01} B_2 + R_{02} B_1 e^{-i\theta_{12}}) e^{i\theta'}}{-B_1^2 + R_{01}^2} \quad (11)$$

Así el centro del círculo es:

$$\frac{-B_1 B_2 + \bar{R}_{01} \bar{R}_{02} e^{-i\theta_{12}}}{-B_1^2 + \bar{R}_{01}^2}$$

Y el radio del círculo es:

$$\frac{-R_{01} B_2 + R_{02} B_1 e^{-i\theta_{12}}}{-B_1^2 + R_{01}^2}$$

El círculo  $C + \text{Re}^{i\theta'}$  representa el lugar geométrico de las posibles relaciones  $R_{0L2}/R_{0L1}$  y el punto correcto  $\frac{B_2}{B_1} e^{-i120^\circ}$  debe estar sobre la circunferencia.

Similarmente hay otro círculo  $C + \text{Re}^{i\theta'}$  que representa el lugar geométrico de las posibles relaciones  $R_{0L3}/R_{0L1}$  y el punto correcto  $\frac{B_3}{B_1} e^{-i120^\circ}$  debe estar sobre la circunferencia.

Si hay errores deben ajustarse las lecturas de acuerdo a las siguientes perturbaciones:

$$R_{01} = \bar{R}_{01} (1 + \varepsilon_1)$$

$$R_{02} = \bar{R}_{02} (1 + \varepsilon_2)$$

$$R_{03} = \bar{R}_{03} (1 + \varepsilon_3)$$

$$\theta_{12} = \bar{\theta}_{12} + \delta_1$$

$$\theta_{13} = \bar{\theta}_{13} + \delta_2$$

La función a minimizar es:

$$S = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2 \quad (12)$$

En el proceso de iteración al irse aproximando entre sí los valores de  $\theta'$  y  $\theta''$  se aproximan también los valores de  $\varepsilon_2$ . Al terminar el proceso de ajuste se tiene la solución óptima de los parámetros del rotor para el valor de  $\theta'$  dado.

Para determinar cuál de los valores del parámetro  $\theta'$  es el correcto, tanto para la prueba "tal cual" de desbalance original como para las corridas con pesos de prueba, se requiere el siguiente análisis:

La suma del vector de masa de prueba con la masa de desbalance es igual al vector resultante:

$$\vec{W}_p + \vec{W}_d = \vec{W}_{dp}$$

Desarrollando la ecuación vectorial se obtienen las siguientes ecuaciones algebraicas:

$$W_p \cos \theta_p + W_d \cos \theta_d - W_{dp} \cos \theta_{dp} = 0$$

$$W_p \text{sen} \theta_p + W_d \text{sen} \theta_d - W_{dp} \text{sen} \theta_{dp} = 0$$

Se escribe en forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\cos \theta_{dp} \\ \text{sen} \theta_d & -\text{sen} \theta_{dp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_d \\ W_{dp} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -W_p \cos \theta_p \\ -W_p \text{sen} \theta_p \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Dados los ángulos del vector resultante y de desbalance (según las iteraciones) y de la masa de prueba se obtienen las magnitudes de las masas de desbalance y resultante:

$$\begin{Bmatrix} W_d \\ W_{dp} \end{Bmatrix} = \frac{W_p}{\text{sen}(\theta_d - \theta_{dp})} \begin{Bmatrix} \text{sen}(\theta_{dp} - \theta_p) \\ \text{sen}(\theta_d - \theta_p) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

El ángulo de transformación del desbalance menos el ángulo de transformación del rotor balanceado debe ser igual al ángulo del vector resultante:

$$\theta'_d - \theta'_0 = \theta_{dp} \quad (15)$$

## MÉTODO DE BALANCEO

El procedimiento de cálculo consiste en lo siguiente:

1. Inicia ciclo de iteración para el parámetro  $\theta'_0$  de la prueba "tal cual". Calcula los valores de los fasores  $R_{0L1}$ ,  $R_{0L2}$  y  $R_{0L3}$  asociados al desbalance original. Esto lo realiza de acuerdo a las perturbaciones que minimizan la función dada por la ecuación (12). Las perturbaciones no se aplican al ajuste de las lecturas, sino que se utilizan para construir un indicador de aceptación del parámetro que se itera.
2. Inicia ciclo de iteración para el parámetro  $\theta'$  de la corrida con peso de prueba  $W_{pp}$ . Calcula los valores ajustados de los fasores  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  y  $R_{03}$  asociados al desbalance resultante del desbalance original más el peso de prueba.

Esto lo realiza de acuerdo al mismo esquema del punto anterior.

3. Calcula el coeficiente de influencia y la masa de desbalance  $W_{cp}$  correspondiente a las lecturas ajustadas.
4. Inicia iteración del ángulo de la masa de desbalance y calcula la masa de desbalance  $W'_{cp}$  correspondiente a la ecuación (14) buscando la mejor aproximación con la masa de desbalance  $W_{cp}$  de las lecturas.
5. Recicla iteración al paso 2, ahora con el parámetro  $\theta'$  de la corrida con los pesos de prueba  $W_{par1}$ . Repite los pasos 3 y 4 para obtener los pesos de balanceo  $W_{cp}$ .

Los pesos  $W_{cp}$  se colocan, uno en cada disco, con el mismo ángulo y sirven para corregir el desbalance estático. Por otro lado, los pesos  $W_{cp}$  van en sentido contrario uno del otro y corrigen el desbalance dinámico.

La figura 8 muestra los valores de  $W_{cp}$  que se calculan variando los parámetros (ángulos de transformación) aplicando, por un lado, las perturbaciones y por otro el esquema de las ecuaciones (14) que equivale a condiciones de compatibilidad. En la intersección se aplica el promedio ponderado según el índice de perturbación del punto en cuestión.

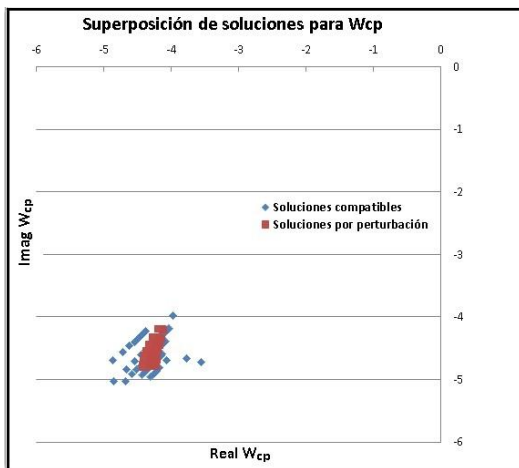


Figura 8 Superposición de soluciones para  $W_{cp}$

La figura 9 muestra los valores de  $W_{cp1}$  que se calculan variando los parámetros, similar a la figura anterior.

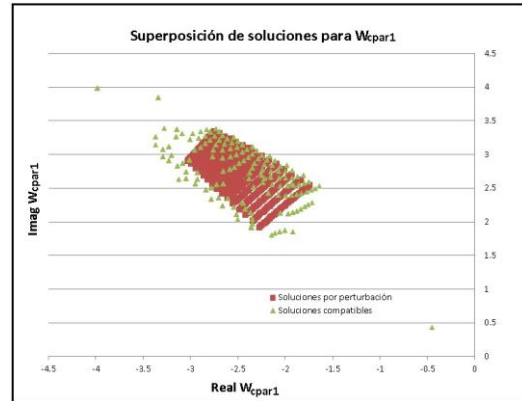


Figura 9 Superposición de soluciones para  $W_{cp1}$

De esta manera, el algoritmo reporta los promedios ponderados que corresponden a  $W_{cp}$  y  $W_{cp1}$  para el balanceo en dos planos.

## APLICACIONES

El rotor de pruebas consiste en una flecha que conecta dos discos y se acopla directamente a un motor de inducción como se muestra en la figura 10. Su diseño está hecho para el balanceo en dos planos ya que sus dimensiones son 10.0 cm de diámetro y 14.5 cm de largo dando una relación  $L/D=1.45$ . Las masas de desbalance inicial del rotor son como sigue:

- 8.0 g  $\angle 0^\circ$  en la polea interna.
- 8.0 g  $\angle 90^\circ$  en la polea externa.



Figura 10 Rotor de prueba e instrumentos de medición.

Los casos de prueba, en los cuales se agregan masas de prueba para registrar la respuesta del

rotor, adicionales al desbalance inicial, se hicieron de la siguiente manera:

- a) La corrida con  $W_{pp}$  indica que se pusieron dos pesos iguales y en la misma posición angular, uno en el disco interno y el otro en el disco externo.
- b) La corrida con  $W_{par1}$  indica que se pusieron dos pesos iguales pero el ángulo especificado corresponde al disco interno y en el disco externo se pone el peso a  $180^\circ$  del anterior.

Las pruebas realizadas con los amperímetros de gancho fueron sobre un motor con las características mostradas en la tabla 1. Las lecturas obtenidas con el instrumento virtual se muestran en las tablas 2 y 3.

La tabla 2 muestra los valores de amplitud en mili-amperios a la frecuencia de 30 Hz.

Tabla 2 Lecturas de magnitud (mA)

Caso	C 30Hz		
	$L_1$	$L_2$	$L_3$
4_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 45°	148.481	147.704	143.499
4_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 135°	47.0815	48.8216	47.0243
9_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 225°	17.7316	18.8079	17.829
9_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 45°	95.6636	95.9803	92.712
15_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 315°	59.0061	60.424	60.2585
15_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 315°	93.3054	93.4782	90.2067
TAL CUAL 8.0g $\angle$ 0° INT 8.0g $\angle$ 90° EXT	45.7207	48.7919	47.1627
Rotor Balanceado	13.6248	13.4417	12.1460

La tabla 3 muestra los valores de fase relativa en grados a la frecuencia de 30 Hz.

Los cálculos de balanceo para este rotor empleando el algoritmo desarrollado en este proyecto dan los resultados de la tabla 4.

Los pesos de balanceo se especifican de la siguiente manera:

- a) El valor  $W_{cp}$  indica dos pesos iguales y en la misma posición angular, uno en el

disco interno y el otro en el disco externo.

- b) El valor  $W_{cpar1}$  indica dos pesos iguales pero el ángulo especificado corresponde al disco interno y en el disco externo se pone el peso a  $180^\circ$  del anterior.

Tabla 3 Ángulos de fase relativa ( $^\circ$ ) entre las fases de alimentación.

Caso	C 30Hz		
	$\Theta_{12}$	$\Theta_{13}$	$\Theta_{32}$
4_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 45°	120.74	-119.71	-119.55
4_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 135°	120.07	-118.31	-121.62
9_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 225°	119.00	-118.19	-122.81
9_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 45°	120.68	-119.42	-119.9
15_ $W_{pp}=$ 4.0 $\angle$ 315°	118.27	-119.84	-121.89
15_ $W_{par1}=$ 4.0 $\angle$ 315°	120.83	-119.55	-119.62
TAL CUAL 8.0g $\angle$ 0° INT 8.0g $\angle$ 90° EXT	119.34	-118.73	-121.93
Rotor Balanceado	-128.86	118.95	128.19

Tabla 4 Masas de balanceo (gr) para los diferentes desbalances.

CASO	PESOS DE PRUEBA		PESOS DE BALANCEO	
	$W_{pp}$	$W_{par1}$	$W_{cp}$	$W_{cpar1}$
4	4.0 $\angle$ 45	4.0 $\angle$ 135	4.2 $\angle$ 225	3.2 $\angle$ 132.
9	4.0 $\angle$ 225	4.0 $\angle$ 45	4.1 $\angle$ 223	3.6 $\angle$ 123.
15	4.0 $\angle$ 315	4.0 $\angle$ 315	6.6 $\angle$ 231	6.2 $\angle$ 134.
REF			5.6 $\angle$ 225	5.6 $\angle$ 135

Los valores marcados como referencia son pesos calculados por el método tradicional de balanceo usando datos de vibración del rotor. Estos pesos balancean el rotor a niveles muy bajos de vibración y sirven como referencia para estimar el error de los pesos calculados en el presente trabajo.

Lo anterior muestra que las masas de balanceo  $W_{cp}$  presentan fluctuaciones menores a 1.5 gr en magnitud y su posición angular con  $\pm 6^\circ$  de precisión. Con respecto a las masas de balanceo



$W_{\text{cparl}}$  éstas tienen un error de  $\pm 2$  gr y la fase está fuera de  $-12^\circ$  a  $-1^\circ$ .

Una ventaja del método presente es que al estar basado en la medición de la corriente eléctrica que se consume, es posible incorporar en el monitoreo del equipo un sistema de medición y de cálculo de la masa de desbalance del rotor.

## CONCLUSIONES

1. Basado en los trabajos realizados con anterioridad donde se demuestra la relación entre el desbalance mecánico y los armónicos de corriente, se desarrolla en este artículo un método de balanceo en dos planos de rotores acoplados directamente al motor, usando la información de los valores r.m.s. de corriente de los armónicos así como la fase relativa entre las tres fases de alimentación.
2. La técnica de balanceo enfrenta dos dificultades, una es la variabilidad de los datos en la muestra, lo que se aminora tomando tiempos de lectura del orden de 3 a 5 minutos y utilizando la raíz del valor medio cuadrado. La otra dificultad es la presencia de un offset de los datos que se obtienen en cada corrida de prueba.
3. Los datos de amplitud de la señal del espectro de corriente, para cada fase de alimentación, corresponden a la suma vectorial del valor residual del rotor balanceado (offset) y el valor relacionado directamente con el desbalance. Estos vectores resultantes se miden solamente en su magnitud así como los ángulos de fase relativos entre las líneas  $L_i$ .
4. Las amplitudes de corriente obtenidas durante la corrida del rotor con desbalance (de los vectores  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  y  $R_{03}$ ) tienen su fase que debe calcularse de manera iterativa, tomando en cuenta las fases relativas entre las tres líneas de alimentación.
5. El procedimiento de cálculo consiste en iterar los ángulos de transformación  $\theta_0'$  y  $\theta'$  y perturbando las lecturas para hacer cumplir las condiciones de compatibilidad. Al final de las iteraciones se obtiene el promedio ponderado de las soluciones posibles de acuerdo con los mínimos cuadrados de las perturbaciones.
6. Se calculan por separado los pesos de balanceo estático  $W_{\text{cp}}$  y los pesos de balanceo dinámico  $W_{\text{cparl}}$ . En cada caso se encuentra el traslape de dos conjuntos de soluciones, uno que se basa en las perturbaciones y otro que se basa en la compatibilidad entre los pesos de prueba y los ángulos de transformación.
7. Los casos de prueba realizados sobre un rotor, con una relación largo/diámetro de 1.45, acoplado directamente a un motor eléctrico de inducción dan como resultado, para el balanceo estático, masas cuyo error con respecto al valor esperado es menor a 1.5 gr en magnitud y su posición angular con  $\pm 6^\circ$  de precisión.
8. Para el balanceo dinámico, las masas tienen un error de  $\pm 2$  gr y la fase está fuera de  $-12^\circ$  a  $-1^\circ$ .
9. Una de las ventajas de este método, con respecto al método tradicional de balanceo, es que las lecturas de las armónicas, a diferencia de la vibración, no se afectan por la diferencia entre la vibración del estator y la del rotor, causada por la holgura en las chumaceras. Para establecer las ventajas y desventajas entre ambos métodos de balanceo es necesario realizar un estudio comparativo.
10. El instrumento de medición es de bajo costo y puede tener ventajas en su aplicación industrial.

## REFERENCIAS

- [1] Dorrell D. G. W.T.Thomson S. Roach. Analysis of airgap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3 phase induction motors. IAS 95 Conference record of the 1995 IEEE Industry applications Conference Vol 1 pp 563-70 1995.
- [2] Riley, C.M; Lin B.K; Habetler T.G and Kliman G.B. Stator current based sensorless vibration monitoring of induction motors. Applied power Electronics conference and exposition 1997 Vol 1 pp 142-7 Feb 1997.
- [3] Riley C.M, Brian K. Lin Thomas G. Habetler. A method for sensorless on-line vibration monitoring of induction machines. IEEE transactions on industry applications, vol. 34, no. 6, november/december 1998.
- [4] Riley C.M, Brian K. Lin Thomas G. Habetler. Stator current Harmonics and their causal vibrations: A preliminary investigation of sensorless vibration Monitoring applications. IEEE Transaction on industry applications Vol 35 No 1 January//February 1999.
- [5] Finley W, Hodowanec M. Holter W. An analytical approach to solving motor vibration problems. IEEE Transaction on industry applications Vol 36 No 5 Sep/Oct 2000.

[6] Kral C, Haebetler T. Harley R. Detection of mechanical imbalance of induction machines without spectral analysis of time domain signals. IEEE Transaction on industry applications Vol. 40 No 4 Jul/Aug 2004.

[7] Neelam M, Dahiya R. Motor current signature analysis and its applicatios in induction motor fault diagnosis. International Journal of systems, applications, engineering & development. Vol 2 Issue 1 2007.

[8] Bellini A., Filippeti F., Tassoni C., Capolino G. A. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines IEEE Transactions on industrial electronics Vol 55 No 12 Dec. 2008.

[9] Camargo M., José, García R., Alfonso C., Ladrón de Guevara D., Enrique, Hernández M., Evaristo; “Balanceo dinámico de motores de inducción utilizando componentes de corriente eléctrica”, XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Cd. Obregón, Son., 23, 24 y 25 de septiembre, 2009, No. de registro: A4\_21.

[10] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Ceballos G. Rocío, Camargo M. José, Hernández M. Evaristo, García P. Alfonso. Método de balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual. XVI Congreso internacional anual de la SOMIM 22 al 24 de septiembre, 2010 Monterrey, Nuevo León, México A4-94.

[11] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Morales Rergis, Carlos, Hernández M. Evaristo, García P. Alfonso, Lorandi Medina, Alberto. Cálculo de la Fase en el Método de balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual. XVII Congreso internacional anual de la SOMIM 21 al 23 de septiembre, 2011 San Luis Potosí, SLP, México A4-44

[12] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Hernández M. Evaristo, Lorandi Medina, Alberto García P. Alfonso, Hermida Saba, Guillermo, “Método eficiente de balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual”. XVIII Congreso internacional anual de la SOMIM 19 al 21 de septiembre, 2012 Salamanca, Guanajuato, México A4-140.