

# Método simplificado de balanceo dinámico de rotor acoplado a motor de inducción mediante fasores de desbalance mecánico obtenidos de corriente eléctrica residual

Alfonso C. García Reynoso<sup>ab</sup>, Enrique Ladrón de Guevara Durán<sup>ab</sup>, Alberto P. Lorandi Medina<sup>b</sup>  
Guillermo Hermida Saba<sup>b</sup>, G. Valeria Villalobos Medina<sup>a</sup>, Bonifacio Peña Pardo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto Tecnológico de Veracruz, Miguel Ángel de Quevedo 2779, C.P. 91860, Veracruz, Ver. México, Tel. y Fax (229) 9385764

<sup>b</sup>Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, Juan Pablo II s/n Boca del Río, Veracruz, 94294 México.

\*garreynoso@hotmail.com.

## Resumen

Se plantea un procedimiento simplificado de determinación de fasores de desbalance a partir de mediciones de corriente residual de un motor de inducción que se acopla directamente a un rotor con desbalance mecánico. Este procedimiento no necesita de ninguna prueba preliminar de caracterización del rotor, simplemente toma las mediciones del desbalance actual del rotor. En particular, se obtienen las armónicas de 30 y 90hz que tienen relación indirecta con el desbalance mecánico. Un algoritmo ajusta estos datos para obtener fasores proporcionales al desbalance. El rotor de pruebas se utiliza en dos series de experimentos. En la primera serie se parte de un rotor balanceado, al cual se le adiciona un par de pesos iguales, uno en cada plano y se determina el coeficiente de influencia al ir variando las magnitudes y las posiciones angulares, esto para comprobar que el coeficiente de influencia es invariante con el desbalance del rotor. En la segunda serie de experimentos, se parte de un rotor con desbalance estático y dinámico y se efectúan corridas con pesos de prueba y se mide la corriente residual. Al final se obtiene un rotor balanceado y se compara con el resultado que proporciona la medición de vibraciones.

## Abstract

A procedure is developed to determine the unbalance phasors, equivalent to the vibration vector, based on residual current measurements of an induction motor directly coupled to a test rotor. This method does not require any previous rotor test or characterization, it just employs actual unbalance measurements. In particular, the 30hz and 90hz harmonics are determined because they have an indirect relation to mechanical imbalance. An algorithm is developed to obtain the unbalance phasors that are proportional to imbalance. A test rotor with two balance planes is used to conduct two series of experiments. In the first one, a closely balanced rotor is added with a pair of equal masses, one on each plane, and the influence coefficient is obtained for each pair of masses where magnitude and angular position are varied. These first tests prove that influence coefficients are invariant with rotor imbalance. In the second series of experiments, a rotor is unbalanced on both planes providing static and dynamic imbalance, and several test runs are conducted with trial masses to calculate the balancing weights. Results are compared with those obtained with vibration measurements.

## Palabras clave:

Balanceo de rotores, corriente residual

## Keywords:

Rotor balancing, residual current

## Introducción

El presente trabajo establece un nuevo procedimiento para manejar las mediciones del espectro de la corriente eléctrica que alimenta a un motor de inducción que está acoplado directamente a un rotor con desbalance mecánico. Las componentes de 30hz y 90hz se asocian a dicho desbalance aunque no en una forma proporcional por lo que tienen un "offset" que se manifiesta al estar el rotor balanceado. En este procedimiento que se desarrolla, se prueba la hipótesis de que la relación de los fasores de desbalance de 90hz a 30hz se mantiene constante sin importar el desbalance mecánico. Estos fasores se forman de las componentes del espectro al abstraer dicho offset.

El método de balanceo que se prueba en este artículo, apli-

cable a rotores rígidos cortos o largos, se basa en utilizar una corrida de pesos de prueba para efectuar el balanceo estático y una corrida de prueba adicional para el balanceo dinámico. Con esto se desarrolla un esquema donde la convergencia a niveles pequeños de vibración es posible.

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. Riley et al., en 1997, establecen 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], desarrollan un procedimiento de ajuste de los datos medidos basado en perturbaciones para cumplir con determinadas condiciones de compatibilidad.

Posteriormente, García et al. [13], aplican el método de balanceo basado en datos de corriente residual al problema de balanceo dinámico, en dos planos, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción.

García et al. [14] retoman el problema de balanceo en un plano mediante datos de corriente residual, esta vez empleando ángulos de transformación y condiciones de compatibilidad que proporcionan una solución única del balanceo.

García et al. [15] retoman el problema de balanceo en dos planos mediante datos de corriente residual, considerando varias corridas de prueba y analizando la convergencia del proceso de balanceo.

García et al. [16] desarrollan un algoritmo para determinar fasores de desbalance a partir de mediciones del espectro de corriente eléctrica que se alimenta al motor de inducción. Se valida mediante dos series de experimentos, uno para probar que el coeficiente de influencia no varía con el desbalance del rotor. Otra serie para probar que se puede balancear en dos planos mediante esta técnica. Sin embargo, se requiere una prueba preliminar con el rotor balanceado para determinar el "offset".

### Fórmulas tradicionales de balanceo

Para el balanceo en un plano se realizan dos corridas, una con el desbalance original (tal cual) y otra con peso de prueba agregado que sirve para ver cómo cambia la respuesta del rotor en su vibración. Con estos datos se calcula el coeficiente de influencia  $A$  mediante la ecuación (1)

$$A = \frac{N_2 - N}{W_p} \quad (1)$$

Donde  $N$  es la lectura de vibración tal cual y  $N_2$  es la lectura de vibración cuando se corre con un peso de prueba  $W_p$ . Luego se procede a calcular el peso de balanceo  $W_c$  con la ecuación (2):

$$W_c = -\frac{N}{A} \quad (2)$$

Nomenclatura de fórmulas (1) y (2):

$N$ = fador de vibración en la condición de desbalance original.

$N_2$ = fador de vibración cuando se ha agregado un peso de prueba

$W_p$ = peso de prueba, en magnitud y posición angular.

$A$ =coeficiente de influencia, en magnitud y ángulo.

$W_c$ =peso de balanceo, en magnitud y ángulo.

Para el balanceo en dos planos se calculan dos pesos que, al colocarse en dos planos separados, logran reducir la vibración en los dos apoyos donde se mide la vibración. En el caso de corrientes residuales, no hay dos puntos de medición y se procede de otra manera. Primero se hace el balanceo estático que consiste en aplicar la técnica de balanceo en un plano poniendo dos pesos iguales y orientados en la misma dirección, uno en cada plano de balanceo. A continuación se realiza el balanceo dinámico que calcula un par de pesos iguales pero en sentido contrario que producen un par centrífugo. Al final

se tienen dos pesos en cada plano de balanceo, cuya resultante coincide con lo que se obtendría por el método tradicional.

**Fórmulas propuestas**

Este análisis se efectúa para establecer el algoritmo que define, para un conjunto de pruebas de desbalance, cuales son los fasores asociados para cada fase de la corriente de alimentación. Los tres fasores de desbalance que se van a determinar son:

$$R_{0L1} = R_1 e^{i\phi_1} - B$$

$$R_{0L2} = R_2 e^{i\phi_2} - B$$

$$R_{0L3} = R_3 e^{i\phi_3} - B$$

Las cantidades que se miden en el espectro de Fourier son las amplitudes  $R_1, R_2, R_3, \phi_1, \phi_2$  y  $\phi_3$ . El fador de “offset”  $B$  corresponde al rotor cuando está balanceado y es una cantidad muy variable y difícil de medir con precisión, razón por la que se determina en el proceso numérico.

A continuación se ajusta un círculo para los tres puntos dados en un diagrama como se muestra en las Figs. 1 y 2.

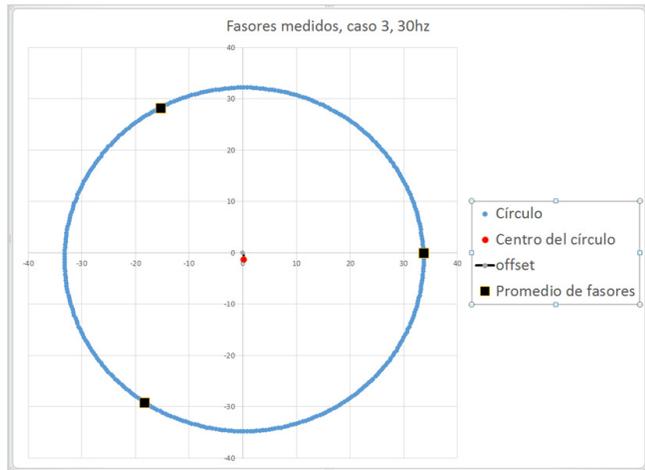


Figura 1. Fasores medidos del caso 3, 30hz

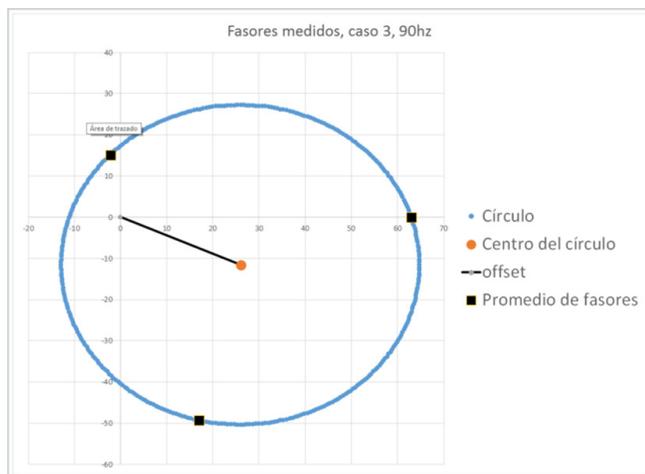


Figura 2. Fasores medidos del caso 3, 90hz

En estas figuras se determina el fador de “offset” que va del origen al centro del círculo y varía con cada prueba. El vector que va del centro del círculo a un punto de medición representa el vector de desbalance para esa fase. Sin embargo hay que corregir su ángulo de inclinación restándole la inclinación del offset para tener como referencia, en todas las determinaciones, que el ángulo de fase del offset sea de 0°.

Así se obtienen los fasores de desbalance  $R_{0L1}, R_{0L2},$  y  $R_{0L3}$  para las tres fases de alimentación.

**Pruebas**

La experimentación realizada para validar el método propuesto consiste en varias pruebas a un motor de tamaño pequeño cuyas especificaciones se muestran en la tabla 1, Acoplado al motor se tiene un rotor de 146 mm de largo y 101 mm de diámetro, el cual se balancea inicialmente.

Tabla 1 – Datos del motor de inducción.

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

Las lecturas se obtienen con un instrumento virtual que filtra las señales de corriente de las tres fases y toma las armónicas de 30hz y de 90hz. Las mediciones dan los valores de amplitud en mili-amperios y la fase relativa tomando como referencia la corriente de la fase 1 (0°) para obtener el desfaseamiento entre las armónicas. Los valores son promediados de una muestra de alrededor de 40,000 registros, que corresponden a cerca de 500 ciclos.

En la primera serie de experimentos se parte de un rotor bien balanceado y se van colocando pares de pesos iguales y al mismo ángulo, aunque en los planos interior (1) y exterior (2) de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 2 Pares de pesos en misma dirección

CASO	MASA_PLANO 1 (g)	MASA_PLANO 2 (g)
1	6.31 ∠0°	6.31 ∠0°
2	6.31 ∠30°	6.31 ∠30°
3	6.31 ∠105°	6.31 ∠105°
4	6.31 ∠165°	6.31 ∠165°
5	6.31 ∠180°	6.31 ∠180°
6	6.31 ∠210°	6.31 ∠210°
7	6.31 ∠285°	6.31 ∠285°
8	6.31 ∠345°	6.31 ∠345°

También se colocan pares de pesos en dirección opuesta como muestra la tabla 3.

Para sintetizar las tres fases de un caso de desbalance en un solo fasor equivalente, se gira +120° el fasor  $R_{0L2}$  y se gira -120° el fasor  $R_{0L3}$  para sumar los tres como sigue:

$$R_{0L} = R_{0L1} + R_{0L2}e^{i2\pi/3} + R_{0L3}e^{-i2\pi/3}$$

Ahora se forma el coeficiente de influencia

$$A = \frac{R_{0L}}{W_p}$$

**Tabla 3-**Pares de pesos en dirección opuesta

CASO	MASA_PLANO 1 (g)	MASA_PLANO 2 (g)
9	6.31 ∠0°	6.31 ∠180°
10	6.31 ∠30°	6.31 ∠210°
11	6.31 ∠105°	6.31 ∠285°
12	6.31 ∠165°	6.31 ∠345°
13	6.31 ∠180°	6.31 ∠0°
14	6.31 ∠210°	6.31 ∠30°
15	6.31 ∠285°	6.31 ∠105°
16	6.31 ∠345°	6.31 ∠165°

Las Figs 3-4 muestran los tres coeficientes de influencia desglosados en sus tres fases, tanto para 30hz como 90hz y las Figs. 4-7 los coeficientes sintetizados, referidos al fasor de desbalance de fase 1.

Corriendo caso por caso de la primera serie de experimentos se determinan los fasores de desbalance y los coeficientes de influencia. Las tablas 4-7 muestran, para ocho pesos diferentes, los fasores obtenidos por el método descrito, divididos por el peso de prueba para dar el coeficiente de influencia, el cual debe conservarse constante (idealmente) en cada fase. Estos fasores se grafican en las figura 4 y 5 para 30hz y en las Figs 6 y 7 para 90hz, mostrando alguna dispersión de los resultados.

**Tabla 4** Coeficientes de influencia, pesos en la misma dirección (30hz).

Caso	$R_{0L1}/W_p$ 30hz	$R_{0L2}/W_p$ 30hz	$R_{0L3}/W_p$ 30hz	$R_{0L}/W_p$ 30hz
1	4.94 ∠155	4.94 ∠35	4.94 ∠-90	4.94 ∠154
2	4.10 ∠163	4.10 ∠46	4.10 ∠-81	4.10 ∠163
3	5.30 ∠173	5.30 ∠58	5.30 ∠-61	5.30 ∠183
4	4.71 ∠150	4.71 ∠30	4.71 ∠-83	4.70 ∠153
5	6.05 ∠129	6.05 ∠7	6.05 ∠-108	6.04 ∠129
6	4.22 ∠170	4.22 ∠41	4.22 ∠-69	4.20 ∠167
7	5.98 ∠197	5.98 ∠67	5.98 ∠-63	5.92 ∠187
8	5.93 ∠150	5.93 ∠29	5.93 ∠-94	5.93 ∠148

**Tabla 5 –** Coeficientes de influencia, pesos en dirección opuesta(30hz).

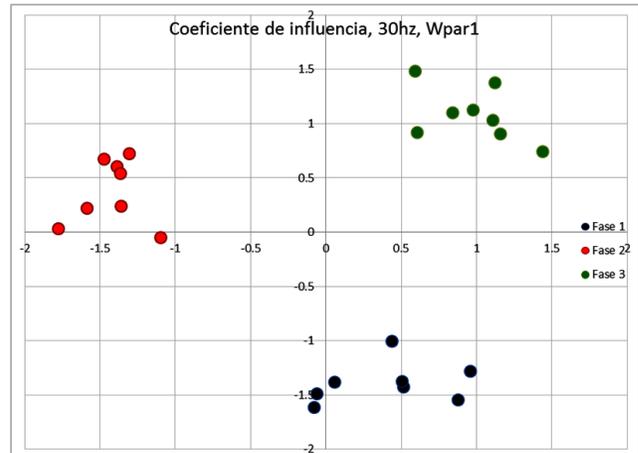
Caso	$R_{0L1}/W_p$ 30hz	$R_{0L2}/W_p$ 30hz	$R_{0L3}/W_p$ 30hz	$R_{0L}/W_p$ 30hz
1	4.94 ∠155	4.94 ∠35	4.94 ∠-90	4.94 ∠154
2	4.10 ∠163	4.10 ∠46	4.10 ∠-81	4.10 ∠163
3	5.30 ∠173	5.30 ∠58	5.30 ∠-61	5.30 ∠183
4	4.71 ∠150	4.71 ∠30	4.71 ∠-83	4.70 ∠153
5	6.05 ∠129	6.05 ∠7	6.05 ∠-108	6.04 ∠129
6	4.22 ∠170	4.22 ∠41	4.22 ∠-69	4.20 ∠167
7	5.98 ∠197	5.98 ∠67	5.98 ∠-63	5.92 ∠187
8	5.93 ∠150	5.93 ∠29	5.93 ∠-94	5.93 ∠148

**Tabla 6 –** Coeficientes de influencia, pesos en la misma dirección (90hz).

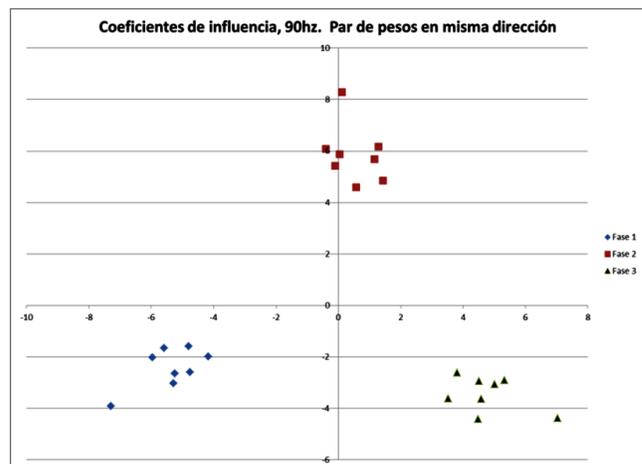
Caso	$R_{0L1}/W_p$ 30hz	$R_{0L2}/W_p$ 30hz	$R_{0L3}/W_p$ 30hz	$R_{0L}/W_p$ 30hz
1	5.18 ∠-163	5.18 ∠72	5.18 ∠-48	5.17 ∠-166
2	4.56 ∠-153	4.56 ∠84	4.56 ∠-33	4.56 ∠-154
3	6.15 ∠-146	6.15 ∠95	6.15 ∠-26	6.15 ∠-146
4	5.92 ∠-153	5.92 ∠90	5.92 ∠-31	5.92 ∠-151
5	8.33 ∠-152	8.33 ∠89	8.33 ∠-32	8.33 ∠-152
6	5.20 ∠-147	5.20 ∠86	5.20 ∠-37	5.18 ∠-153
7	5.92 ∠-163	5.92 ∠79	5.92 ∠-39	5.92 ∠-161
8	9.40 ∠-166	9.40 ∠129	9.40 ∠-97	6.88 ∠-165

**Tabla 7 –** Coeficientes de influencia, pesos en dirección opuesta (90hz).

Caso	$R_{0L1}/W_p$ 30hz	$R_{0L2}/W_p$ 30hz	$R_{0L3}/W_p$ 30hz	$R_{0L}/W_p$ 30hz
9	1.60 ∠-22	1.60 ∠-133	1.60 ∠ 102	1.60 ∠-18
10	1.86 ∠-35	1.86 ∠-145	1.86 ∠ 86	1.85 ∠-31
11	1.47 ∠-38	1.47 ∠-166	1.47 ∠ 85	1.47 ∠-39
12	0.78 ∠-31	0.78 ∠-164	0.78 ∠ 83	0.77 ∠-37
13	0.70 ∠-17	0.70 ∠-147	0.70 ∠ 103	0.70 ∠-20
14	1.05 ∠ 0.5	1.05 ∠-124	1.05 ∠ 157	1.00 ∠ 11
15	1.52 ∠-24	1.52 ∠-140	1.52 ∠ 116	1.50 ∠-16
16	1.55 ∠-32	1.55 ∠-141	1.55 ∠ 98	1.54 ∠-25



**Figura 3a.** Coeficientes de influencia para los ocho casos, 30hz, pesos en direcciones opuestas, desglosados por fase.



**Figura 3b.** Coeficientes de influencia para los ocho casos, 90hz, par de pesos en la misma dirección, desglosados por fase

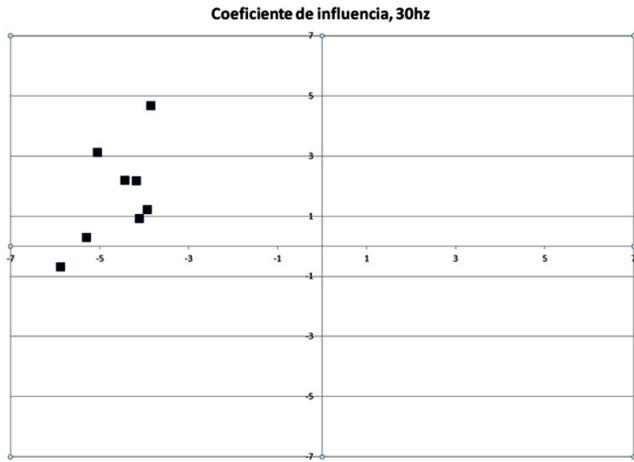


Figura 4. Coeficientes de influencia para los ocho casos, 30hz, pesos en la misma dirección

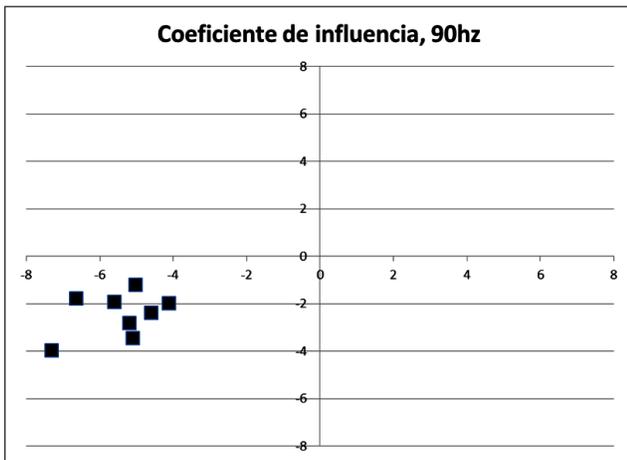


Figura 5. Coeficientes de influencia para los ocho casos, 90hz, pesos en la misma dirección.

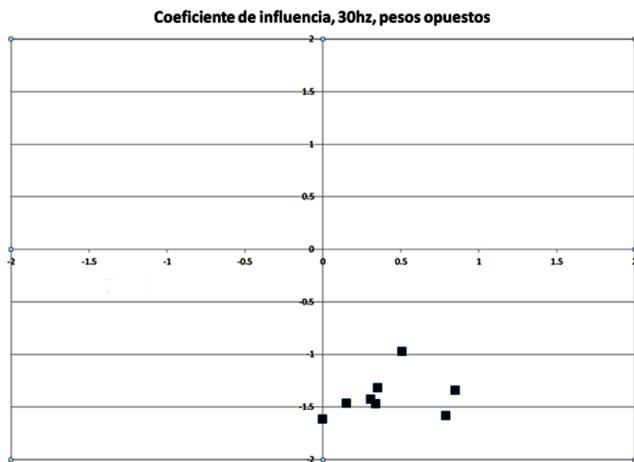


Figura 6. Coeficientes de influencia para los ocho casos, 30hz, pesos en direcciones opuestas

En la segunda serie de experimentos se trata de balancear un rotor utilizando los fasores de desbalance como si fueran datos de vibración. El desbalance aplicado de 9.01g  $\angle 5.6^\circ$  en el plano interior (1) y 9.06 g  $\angle 287.5^\circ$  en el plano exterior (2), el cual equivale a un par de pesos de balanceo estático de 5.69 g  $\angle 237^\circ$  en cada plano y un par de pesos de balanceo

dinámico de 7.02 g  $\angle 146^\circ$  en el plano interior y 7.02g  $\angle 326^\circ$  en el exterior.

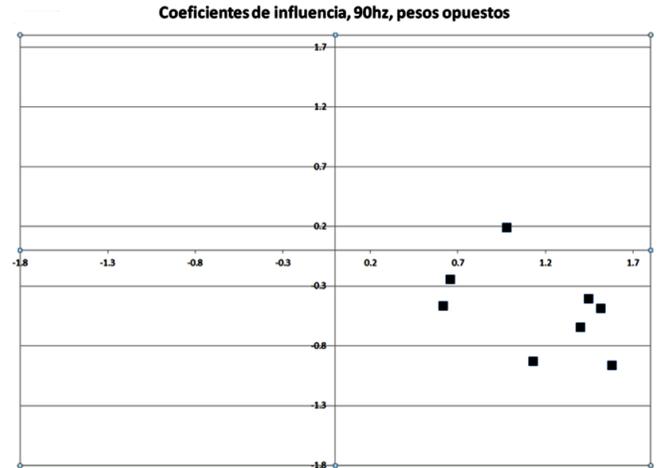


Figura 7. Coeficientes de influencia para los ocho casos, 90hz, pesos en direcciones opuestas.

La Tabla 8 muestra los detalles del proceso de balanceo. En la corrida 1 se pone un par de pesos de prueba iguales y en la misma orientación, montados en los planos interior y exterior. El peso calculado se pone como un segundo par de pesos de prueba para aproximarse más al peso de balanceo estático esperado.

Estando balanceado estáticamente, se redefine la condición tal cual (nuevo tal cual) y después de tomar las lecturas de las tres fases, se procede a efectuar la corrida de prueba con pesos que forman un par centrífugo (corrida 3). Se calculan los pesos de balanceo dinámico lográndose también una aproximación a lo esperado.

Tabla 8 – Proceso de balanceo estático y dinámico.

Corrida	Pesos de prueba	Peso balanceo Calculado(g)	Peso balanceo Exacto(g)
1	4.01 g $\angle 165^\circ$	4.2gr $\angle 243^\circ$	5.69 $\angle 237^\circ$
	4.01 g $\angle 165^\circ$	4.2gr $\angle 243^\circ$	5.69 $\angle 237^\circ$
2	5.2 g $\angle 240^\circ$	4.77gr $\angle 237^\circ$	5.69 $\angle 237^\circ$
	5.2 g $\angle 240^\circ$	4.77gr $\angle 237^\circ$	5.69 $\angle 237^\circ$
3	6.0 g $\angle 240^\circ$	7.5 gr $\angle 125^\circ$	7.02 $\angle 146^\circ$
	6.0 g $\angle 60^\circ$	7.5 gr $\angle 305^\circ$	7.02 $\angle 326^\circ$
4	3.9 g $\angle 135^\circ$	8.8 gr $\angle 139^\circ$	7.02 $\angle 146^\circ$
	3.9 g $\angle 315^\circ$	8.8 gr $\angle 319^\circ$	7.02 $\angle 326^\circ$
TOTAL		9.15 $\angle 166^\circ$	9.01 $\angle 185^\circ$
		10.7 $\angle 290^\circ$	9.06 $\angle 287^\circ$

También se tomaron lecturas de vibración con un analizador de vibraciones IRD880 en diferentes etapas del proceso como se muestra en la Tabla 9. Los puntos de medición fueron en el extremo del acoplamiento (punto 1) y en el extremo opuesto (punto 2). La condición del rotor al momento de la medición se refiere a los pesos agregados en el plano interior (primer valor) y en el plano exterior (segundo valor). La vibración final resulta en valores pequeños, en ambos puntos de medición, lo que muestra la efectividad del método propuesto.

**Tabla 9** – Proceso de balanceo estático y dinámico con vibraciones.

Caso	Pesos colocados (g)	Vibración punto 1 (micras)	Vibración punto 2 (micras)
Tal cual <sup>1</sup>	9.01 $\angle 5.6^\circ$	125	88.5
(desbalance)	9.06 $\angle 107.5^\circ$		
Pesos de balanceo estático <sup>2</sup>	4.77 $\angle 237^\circ$ 4.77 $\angle 237^\circ$	55.6	49.5
Pesos de balanceo dinámico <sup>3</sup>	8.8 $\angle 139^\circ$ 8.8 $\angle 319^\circ$	22.8	26

<sup>1</sup> Estos pesos producen el desbalance original y se dejan colocados durante todas las pruebas.

<sup>2</sup> Estos pesos corrigen el desbalance estático y se dejan colocados durante las siguientes corridas.

<sup>3</sup> Estos pesos corrigen el desbalance dinámico al producir un par de fuerzas centrífugas

## Conclusiones

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 procedimiento simplificado para determinar los fasores de desbalance, equivalentes a los datos de vibración, esta vez sin emplear datos de rotor balanceado como caracterización de cada a rotor a balancear, el cual era un requisito en algoritmos desarrollados con anterioridad.

Las mediciones del espectro de la corriente residual enfrentan 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 está presente en cada corrida de prueba, mismo que es de magnitud variable, quizá aleatorio.

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 corrientes  $I_i$ .

El algoritmo desarrollado ajusta las lecturas del espectro para formar fasores de desbalance que son proporcionales a las fuerzas desbalanceadas. Con datos de una misma corrida, donde se supone que la variación lenta del offset permite registrar lecturas de las tres fases en tiempo real compatibles entre sí, se ajusta un círculo a los tres puntos ( uno por cada vector de fase) y se determinan los fasores midiendo desde el centro del círculo a cada punto, siendo la posición del centro el extremo del fador del offset.

Las pruebas con el rotor inicialmente balanceado y con un peso conocido permiten validar que el coeficiente de influencia muestra una tendencia a la invariancia, aunque sometidos a errores normales de las mediciones.

La técnica de balanceo en dos planos aplicada con estos fasores consiste en efectuar una corrida con dos pesos iguales

y en la misma dirección, en los planos de balanceo, para tener datos que proporcionen los pesos de balanceo estático. Al colocar estos pesos, se redefine el nuevo desbalance del rotor y se repite el proceso, esta vez usando dos pesos iguales en magnitud pero opuestos en dirección, esto para tener datos que proporcionen los pesos de balanceo dinámico. Con estos cuatro pesos, dos en cada plano, se logra balancear el rotor.

Los casos de prueba realizados sobre un rotor acoplado directamente a un motor eléctrico de inducción dan como resultado masas cuyo error con respecto al valor esperado es del 16% en magnitud (0.92 gr) y  $0^\circ$  en la posición angular en el balanceo estático y del 25% en magnitud (1.64 gr) y  $7^\circ$  en la fase en el balanceo dinámico. Sin embargo en el balanceo completo se tiene un error en magnitud de 1.5% (0.14gr) y  $19^\circ$  en la masa 1 y 18% en magnitud (1.64 gr) y  $3^\circ$  en la fase de la masa 2.

## REFERENCIAS

- [1] Dorrell D. G. W.T.Thomson S. Roach. *Analysis of air-gap 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 (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 (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 (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 (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 (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., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G. A. *Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines* IEEE Transactions on industrial electronics Vol 55 No 12 (2008).
- [9] Camargo M., José, García R., Alfonso C., Ladrón de Guevara D., Enrique, Hernández M., Evaristo; *Balaceo 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. No. de registro: A4\_21 (2009).
- [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, Monterrey, Nuevo León, México A4-94 (2010).
- [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, San Luis Potosí, SLP, México A4-44 (2011).
- [12] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Hernández M. Evaristo, Lorandi M. Alberto, García P. Alfonso, Hermida S. 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, Salamanca, Guanajuato, México A4-140 (2012).
- [13] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Lorandi M. Alberto, García P. Alfonso, Hermida S. Guillermo, *Método de balanceo dinámico, en dos planos, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual*, XIX Congreso internacional anual de la SOMIM, Pachuca, Hgo. (2013)
- [14] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Lorandi M. Alberto, García P. Alfonso, Hermida S. Guillermo, *Simplificación del método de balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual*, XX Congreso internacional anual de la SOMIM, Juriquilla, Qro. (2014).
- [15] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Lorandi M. Alberto, Hermida S. Guillermo, Pedro J. García Ramírez<sup>2</sup>, L.J. Hernández H2, J.B. Santaella G2 *Balaceo dinámico en dos planos y su convergencia cuando se aplica a un rotor acoplado a motor de inducción utilizando datos de corriente residual*, XXI Congreso internacional anual de la SOMIM, Coahuila, Ver. (2015).
- [16] García R. Alfonso C, Ladrón de Guevara D. Enrique, Lorandi M. Alberto, Hermida S. Guillermo, G. Valeria Villalobos Medina, Rubí A. Romero Pérez, Oscar J. Morales Sánchez, *Determinación de fasores de desbalance mecánico obtenidos de corriente eléctrica residual de motor de inducción acoplado a rotor desbalanceado*, XXII Congreso internacional anual de la SOMIM, Mérida, Yuc. (2016).