

CÁLCULO DE LA FASE EN EL BALANCEO DINÁMICO, EN UN PLANO, DE ROTORES ACOPLADOS DIRECTAMENTE A UN MOTOR DE INDUCCIÓN EMPLEANDO CORRIENTE RESIDUAL

Alfonso C. García Reynoso^{1,2}, Enrique Ladrón de Guevara Durán^{1,2}, Carlos Morales Rergis¹, Evaristo Hernández Marceliz¹, Alfonso García Portilla¹, Alberto P. Lorandi Medina²

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

Resumen

Se efectúan mejoras al método de balanceo dinámico, en un plano, 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 balanceado y de las lecturas con desbalance las magnitudes y los ángulos de los fasores relacionados directamente con dicho desbalance. A continuación se encuentran los coeficientes de influencia y los pesos de balanceo correspondientes a cada línea de la corriente trifásica, obteniendo el promedio que proporciona la masa de balanceo. Este algoritmo se verifica mediante corridas de dos rotores de laboratorio obteniéndose resultados satisfactorios.

Abstract

An improvement to the method for single- 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 behaviour of the data with respect to the unbalance forces. This requires an algorithm to determine, based on readings of residual values for the balanced condition, and the imbalanced rotor, the complex values that directly relate to the imbalance. From here the influence coefficients and balancing masses are calculated. This algorithm was verified by running two study cases, with satisfactory results.

Nomenclatura

F_0 Fuerza producida por la masa de desbalance original equivalente, en el radio de trabajo

F_2 Fuerza producida por la masa de desbalance incluyendo el peso de prueba 2

F_4 Fuerza producida por la masa de desbalance incluyendo el peso de prueba 4

F_6 Fuerza producida por la masa de desbalance incluyendo el peso de prueba 6

W_{p_2} Peso de prueba 2

W_{p_4} Peso de prueba 4

W_{p_6} Peso de prueba 6

N Lectura de corriente, mili-amperios, condición tal cual

N_2 Lectura de corriente, mili-amperios, con peso de prueba 2

N_4 Lectura de corriente, mili-amperios, con peso de prueba 4

N_6 Lectura de corriente, mili-amperios, con peso de prueba 6

θ_i Ángulo de fase

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] estudia 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 el desalineamiento, 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 para luego calcular los coeficientes de influencia y el peso de balanceo.

Instrumentación usada

El sistema de medición usado tiene los siguientes elementos: sensores de corriente eléctrica de efecto Hall, sistema de acondicionamiento de señales, tarjeta de adquisición de datos e instrumento virtual desarrollado en lenguaje G.

A continuación se presenta la información general de los elementos del sistema de instrumentación.

Tabla No. 1 Datos del sensor de corriente FWBELL M-15 [6]

Rango de medición •	15 A
Sensibilidad	0.09 V/A a 0.14 V/A
Capacidad de sobrecarga	• 25 A
Voltaje de alimentación	+5.0 V +/- 0.5 V
Corrimiento de cero	2.5 V +/- 0.3 V
Rango de frecuencias	CD a 20 kHz

El sistema de acondicionamiento de señales se trabaja con un banco de transformadores en estrella para las señales de voltaje y un sistema de control de ganancia a través de amplificadores operacionales. El esquema básico de conexiones de los canales de corriente se presenta en la Figura No.1.

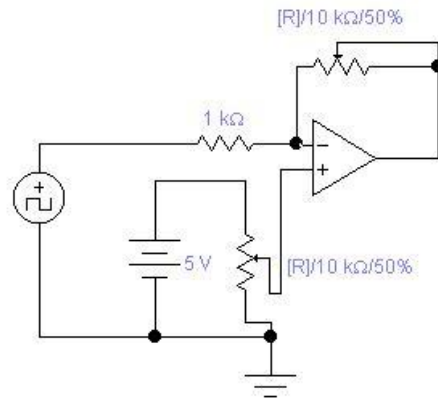


Figura 1 Circuito de acondicionamiento de señal de corriente por canal.

La tarjeta de adquisición de señales se describe en la Tabla No.2.

Tabla No. 2 Datos de la tarjeta de adquisición NI-USB 233

Resolución	24-bit
Rango dinámico	102 dB
Taza por canal	50 kS/s max
Entradas analógicas	4 simultáneas
Rango de entrada	±5 V

El instrumento virtual se desarrolla en Labview 8.6 y tiene pantallas amigables para el usuario, permitiendo la lectura y la captura de la información deseada.

El instrumento se divide en las siguientes partes:

- 1.- Especificación de los datos de captura, de acuerdo a la tarjeta usada y al sistema que se esté midiendo.
- 2.- Calibración del instrumento.
- 3.- Vista de señales capturadas.
- 4.- Configuración del filtro.
- 5.- Vista de señales filtradas.
6. Gráficas del espectro de frecuencia antes y después del filtrado.
- 7.- Vista del diagrama fasorial de armónicas de corriente seleccionadas.
- 8.- Especificación de las condiciones de guardado de información.

A continuación se presentan las Figuras No.2 a la No.9 que muestran las pantallas que ve el usuario:

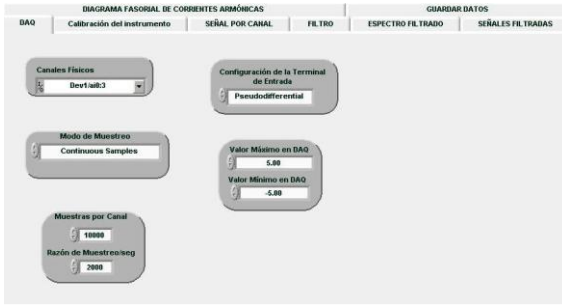


Figura 2 Especificar los datos de captura

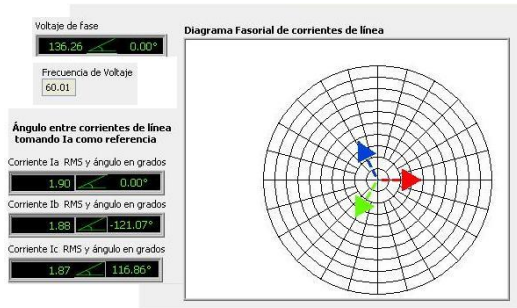


Figura 3 Calibrar el instrumento

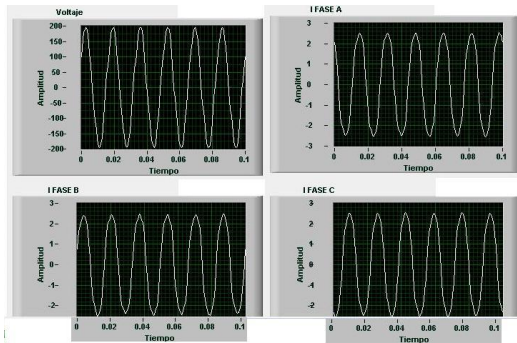


Figura 4 Vista de señales capturadas

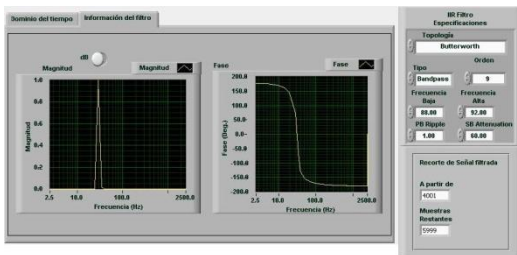


Figura 5 Configuración del filtro

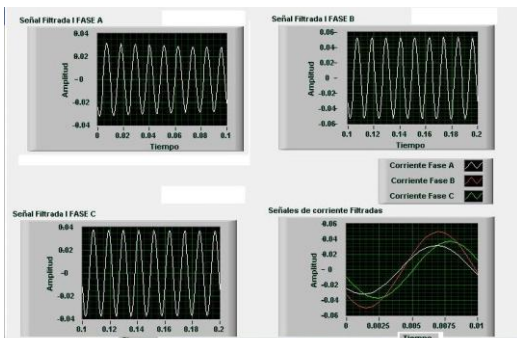


Figura 6 Señales Filtradas

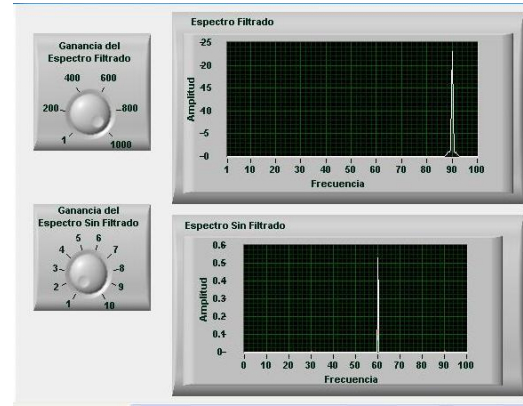


Figura 7 Espectro de señales

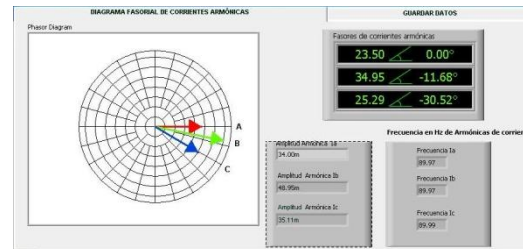


Figura 8 Diagrama fasorial de Armónicas

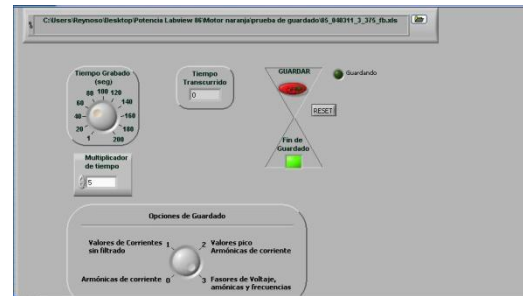


Figura 9 Especificaciones del guardado de información

La experimentación realizada para validar el método propuesto consiste en cientos de pruebas a dos motores de tamaño pequeño cuyas especificaciones se muestran en las Tablas No.3 y No.4.

Tabla 3 Motor de 0.5 h.p 220 V 3φ

Potencia	0.5 h.p
Voltaje	220 V 3φ
Corriente	1.8 A
Vel. nominal	1750
Frecuencia	60 Hz
Marca	Siemens
Conexión	YY

Tabla 4 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 cada una de 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 sensado 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 tiene la capacidad de trabajar en un sistema de alimentación de 220 Voltios y con un rango máximo de 15 Amperes de corriente (pudiéndose fácilmente incrementar el rango). La señal de voltaje se monitorea a través de transformadores conectados en estrella cuyos núcleos magnéticos responden a frecuencias de 10 kHz máximo. La señal de corriente se obtiene a través de sensores de efecto Hall modelo M 15, pudiéndose detectar componentes de directa así como componentes de alterna hasta un valor de 10 kHz.

Dependiendo del orden de los armónicos presentes, se relacionan los mismos con problemas mecánicos o electromagnéticos. De interés particular en este caso, es el análisis de las armónicas que aparecen en el espectro relacionadas con un 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 del circuito electrónico diseñado para acondicionar la señal y a través de software.

Las mediciones realizadas durante las pruebas de balanceo consistieron en muestras de cinco minutos en cada corrida. El tipo de señal se muestra en la Figura No.10. Como puede observarse, la señal es variable y se calcula el valor cuadrado medio y la raíz correspondiente para manejar un valor representativo (RMS).

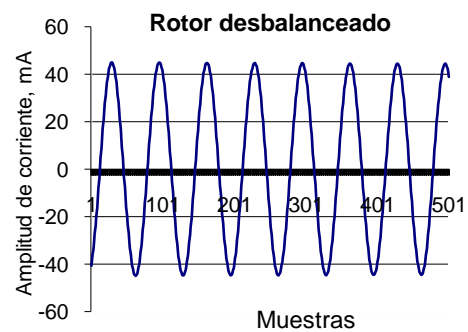


Figura No.10 Señal de corriente

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 siguen 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 como se muestra en la Figura No.11 para un caso de prueba. En esta figura, la curva azul muestra los valores de amplitud de la corriente

residual medidos y la curva roja ya tiene sustraído el valor base (de rotor balanceado), siendo esta resta mediante operaciones con fasores, donde la fase se determina según el procedimiento descrito abajo. Esta curva corregida es casi recta y se proyecta hacia el origen como lo haría un sistema lineal homogéneo del tipo vibratorio producido por desbalance.

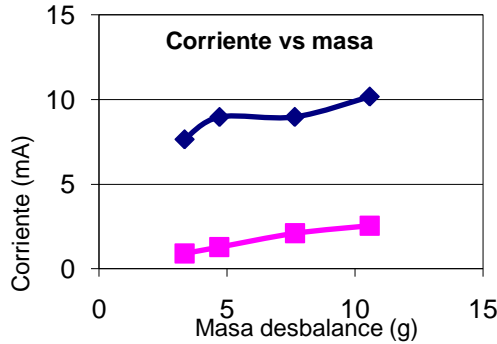


Figura No.11 Comportamiento de las lecturas con la masa de desbalance en gramos.

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.

Cálculo del ángulo de fase

El filtro ocupado para la obtención de las armónicas relacionadas con el peso de desbalance es la estructura analógica Butterworth. Este filtro maximiza una amplitud plana en la banda de paso y la respuesta decae linealmente desde la frecuencia de corte hacia menos infinito. Para un filtro de primer orden son -20 dB por década (aprox. -6dB por octava) y mantiene su forma para órdenes mayores (sólo con una caída de más pendiente a partir de la frecuencia de corte). Esta característica es la más importante por la cual se seleccionó esta estructura de filtrado, pues permite observar con mayor claridad la relación entre los pesos de desbalance y la amplitud de la armónica de corriente.

La respuesta en fase no tiene estas ventajas ya que el retraso de fase por cada orden del filtro es de 45 grados en el punto de corte. Se consideró que ya que el valor de la frecuencia del armónico depende de la velocidad del rotor y de la velocidad del campo magnético en el estator, las cuales para una condición general son constantes, la carga del motor y la frecuencia de alimentación no varían, por lo que el efecto de defasamiento del filtrado sobre las tres corrientes de línea será igual. Esto permite observar la diferencia relativa de fase entre los armónicos de corriente.

En la estructura del instrumento, ya que las señales de las armónicas son senoidales y su frecuencia es la misma, se usó la transformada de Hilbert para determinar el ángulo de fase entre ellas, considerando la fase A, como referencia asignándole un ángulo de cero grados.

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° entre sí (baja frecuencia). 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 No 12 muestra las señales en el tiempo para un peso de desbalance determinado.

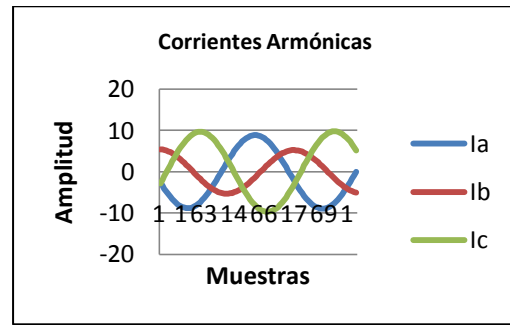


Figura 12 Amplitudes del espectro de cada fase de alimentación variando en el tiempo.

Partiendo de la premisa de que las tres líneas (L_1 , L_2 y L_3) deben acomodarse a 120° 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° , 120° y 240° respectivamente (B_1 , B_2 y B_3). Esto se indica en la Figura No 13.

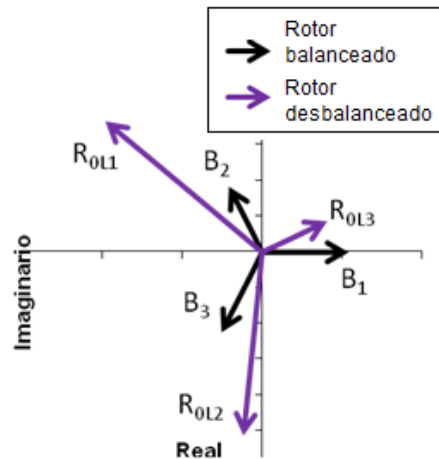


Figura No.13 Vectores de amplitud del espectro.

Si aparece un desbalance, las lecturas observadas corresponden a la suma vectorial que se indica en la Figura No.14. y en las siguientes ecuaciones:

$$P_{OL1} = B_1 + R_{OL1} \quad (3)$$

$$P_{OL2} = B_2 + R_{OL2} \quad (4)$$

$$P_{OL3} = B_3 + R_{OL3} \quad (5)$$

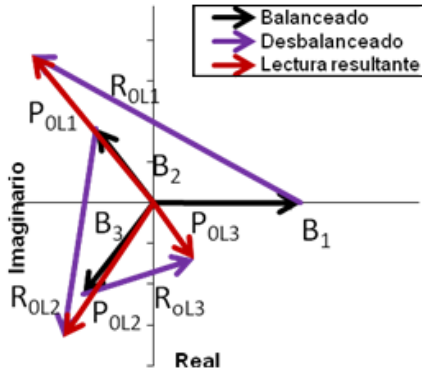


Figura 14 Composición de vectores del espectro.

Para obtener el ángulo de fase de la línea L₁ se utilizan los ángulos de fase relativos entre los vectores P_{OL1}, P_{OL2} y P_{OL3} 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_{OL1}, R_{OL2} y R_{OL3} queden con un desfase de 120° entre sí, estableciendo que se cumplan las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \frac{R_{OL2}}{R_{OL1}} &= \frac{B_2}{B_1} \\ \frac{R_{OL3}}{R_{OL1}} &= \frac{B_3}{B_1} \end{aligned} \quad (6)$$

Solamente hay una combinación de vectores para el desbalance dado y, así quedan determinados los ángulos de fase.

Fórmulas 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 fases, 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 (7) y (8) proporcionan el peso de balanceo cuando se tienen lecturas de amplitud y fase (fasores).

$$A_2 = \frac{N_2 - N}{W_{p_2}} \quad (7)$$

$$W_{c_2} = -\frac{N}{A_2} \quad (8)$$

Cada fase de alimentación tiene su coeficiente de influencia y arroja su masa de balanceo.

El promedio de las masas de balanceo es:

$$W_{prom} = (W_{c_2} + W_{c_4} + W_{c_6}) / 3 \quad (9)$$

Método de balanceo

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Se determina la fase de cada lectura de corriente aplicando las ecuaciones (3) a (6).
2. Se calcula el coeficiente de influencia y las masas de balanceo, una por cada fase de alimentación. Esto se calcula mediante las fórmulas (7) a (9).
3. El promedio de los pesos de balanceo mejora la precisión como se muestra en las pruebas de aplicación.

Aplicaciones

La primera prueba realizada con el aparato de medición fabricado en esta Unidad de Investigación fue sobre un motor con las características mostradas en la Tabla No.3.

Se montó, inicialmente, una polea balanceada en el extremo de la flecha del motor y se tomaron las lecturas del espectro de la corriente con el motor operando en vacío. Después se colocó un peso de desbalance de 8.5 gramos en diversas posiciones angulares como se muestra en Tabla No 2 y se registraron 24 corridas con incrementos de 15°. En cada corrida se tienen 39999 datos para cada fase de alimentación y para alta y baja frecuencia. Tomando los datos de baja frecuencia se calcula la desviación estándar y se obtiene la amplitud que se muestra en la Tabla No.5.

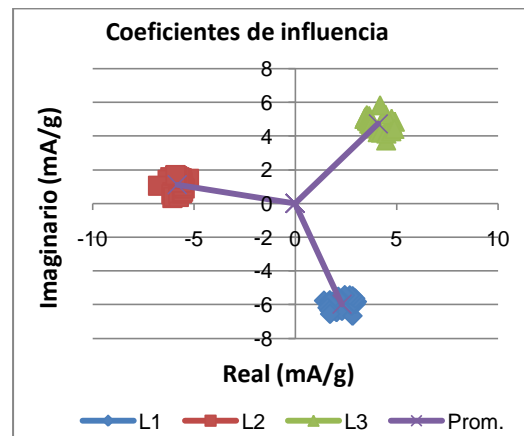


Figura No 15. Coeficientes de influencia calculados para cada corrida con peso de prueba.

Tabla No.5 Lecturas de corriente de las corridas de prueba, mA, alta frecuencia h_1 .

Caso	C ⁺ 90Hz		
	L ₁	L ₂	L ₃
8.5g ∠0°	63.9665	26.1283	78.8703
8.5g ∠15°	62.9611	34.8954	86.1446
8.5g ∠30°	57.2423	42.6974	89.2076
8.5g ∠45°	50.3639	51.5165	90.9024
8.5g ∠60°	43.5482	59.0288	89.8465
8.5g ∠75°	37.6707	65.0294	87.7297
8.5g ∠90°	36.6054	72.4363	87.4850
8.5g ∠105°	27.6120	70.3810	76.3881
8.5g ∠120°	27.9694	74.1862	71.0713
8.5g ∠135°	30.5444	76.0994	63.4475
8.5g ∠150°	35.3333	77.3833	55.1600
8.5g ∠165°	42.0361	75.6699	46.2034
8.5g ∠180°	49.9844	75.0135	38.2035
8.5g ∠195°	55.4830	71.4407	29.1487
8.5g ∠210°	61.3038	67.6013	21.3619
8.5g ∠225°	66.9077	62.4001	18.6300
8.5g ∠240°	71.6353	57.2457	21.5929
8.5g ∠255°	75.8139	50.7012	29.1106
8.5g ∠270°	78.5785	44.5321	38.0906
8.5g ∠285°	79.9388	36.7680	47.2282
8.5g ∠300°	80.5848	30.8797	56.4359
8.5g ∠315°	80.6292	25.9675	65.6722
8.5g ∠330°	79.0303	24.6078	74.1275
8.5g ∠345°	76.2781	26.8263	80.8357
Rotor Balanceado	29.0357	26.7303	32.3696

Tabla No.6 Lecturas de fase relativa, alta frecuencia h_1

Caso	C ⁺ 90Hz		
	Θ ₁₂	Θ ₁₃	Θ ₃₂
8.5g ∠0°	174.82	-77.075	-108.10
8.5g ∠15°	-178.5	-80.305	-98.216
8.5g ∠30°	-175.8	-83.950	-91.846
8.5g ∠45°	-176.6	-89.340	-87.251
8.5g ∠60°	178.25	-96.928	-84.826
8.5g ∠75°	172.29	-105.25	-82.461
8.5g ∠90°	159.86	-117.93	-82.216
8.5g ∠105°	148.63	-131.82	-79.552
8.5g ∠120°	128.03	-152.63	-79.342
8.5g ∠135°	111.84	-167.66	-80.500
8.5g ∠150°	98.180	179.09	-80.910
8.5g ∠165°	90.176	174.50	-84.325
8.5g ∠180°	84.296	172.96	-88.641
8.5g ∠195°	81.020	178.35	-97.332
8.5g ∠210°	78.703	-166.82	-114.46
8.5g ∠225°	77.990	-138.40	-143.51
8.5g ∠240°	77.988	-111.39	-170.62
8.5g ∠255°	79.818	-94.088	173.91
8.5g ∠270°	82.625	-85.618	168.24
8.5g ∠285°	88.713	-81.325	170.04
8.5g ∠300°	97.579	-79.224	176.80
8.5g ∠315°	112.82	-78.629	-168.47
8.5g ∠330°	133.72	-78.833	-147.45
8.5g ∠345°	153.65	-80.298	-126.06
Rotor Balanceado	-12.90	-7.2849	-5.6192

También se registran los ángulos de fase relativos entre las señales de las fases de

alimentación. Estas se muestran en la Tabla No 6.

Se aplica el algoritmo desarrollado para procesar esta información y se obtienen los coeficientes de influencia que se muestran en la Figura No 15.

Cuando se toman los valores promedio de los coeficientes de influencia se obtienen los valores de la Tabla No.7.

Tabla No.7 Coeficientes de influencia promedio

Concepto	B̄ 30Hz		
	L ₁	L ₂	L ₃
Coeficiente De influencia (mA/g)	3.3442 ∠53.6°	3.5159 ∠294°	3.3813 ∠174°

Con los coeficientes de influencia promedio se simula el balanceo del rotor para cada posición angular del desbalance introducido y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla No 8 así como en la Figura No 16.

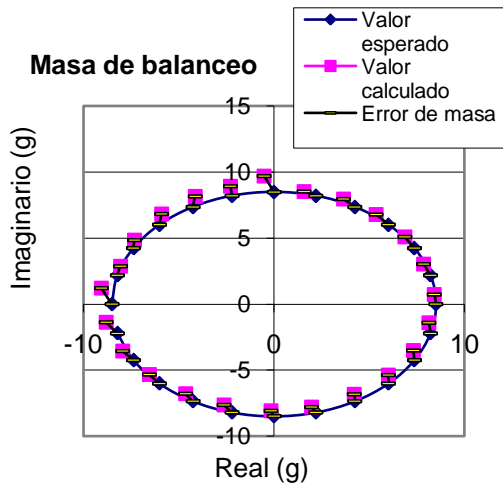


Figura No.16. Masas de balanceo del rotor para cada posición angular del desbalance introducido.

Una segunda aplicación consiste en desbalancear el rotor, cuyos datos se muestran en la Tabla No 4 con una masa de 8.5g ∠0° y aplicar sucesivamente masas de prueba de 4.3g en diversas posiciones obteniéndose las lecturas mostradas en las Tablas No 9 y No.10.

Tabla No 8 Comparación de pesos de balanceo con los pesos de desbalance aplicados a baja frecuencia h_1 .

Peso de desbalance	Peso de Balanceo
8.5g ∠180°	8.51g ∠189°
8.5g ∠195°	8.43g ∠197°
8.5g ∠210°	8.94g ∠197°
8.5g ∠225°	9.63g ∠213°
8.5g ∠240°	9.12g ∠223°
8.5g ∠255°	9.82g ∠242°
8.5g ∠270°	9.58g ∠257°
8.5g ∠285°	9.83g ∠286°
8.5g ∠300°	9.82g ∠311°
8.5g ∠315°	9.51g ∠330°
8.5g ∠330°	9.07g ∠344°
8.5g ∠345°	8.91g ∠355°
8.5g ∠0°	8.28g ∠19°
8.5g ∠15°	8.09g ∠29°
8.5g ∠30°	7.71g ∠47°
8.5g ∠45°	7.57g ∠64°
8.5g ∠60°	7.54g ∠75°
8.5g ∠75°	7.71g ∠86°
8.5g ∠90°	7.68g ∠100°
8.5g ∠105°	7.70g ∠113°
8.5g ∠120°	8.00g ∠126°
8.5g ∠135°	8.24g ∠137°
8.5g ∠150°	8.41g ∠148°
8.5g ∠165°	8.53g ∠159°

Tabla No.9 Amplitudes (mA) del espectro de corriente, alta frecuencia.

Caso	C ⁺ 90Hz		
	L ₁	L ₂	L ₃
4.3g ∠45°	89.1575	64.4496	117.463
4.3g ∠90°	63.7376	49.7091	96.2145
4.3g ∠135°	41.5683	29.2256	69.4842
4.3g ∠180°	41.3958	12.3781	51.6063
4.3g ∠225°	58.5760	4.6720	54.1722
4.3g ∠270°	82.6952	28.7914	80.0129
4.3g ∠315°	102.255	55.2800	111.258
TAL CUAL 8.5g ∠0°	65.8141	25.6717	79.4410
Rotor balanceado	28.5225	27.2468	33.2415

Tabla No.10 Ángulos de fase relativa (°) entre las fases de alimentación.

Caso	C ⁺ 90Hz		
	Θ ₁₂	Θ ₁₃	Θ ₃₂
4.3g ∠45°	158.46	-93.940	-107.60
4.3g ∠90°	175.80	-88.746	-95.452
4.3g ∠135°	-144.7	-121.33	-122.26
4.3g ∠180°	-79.31	-50.673	-28.640
4.3g ∠225°	106.03	-63.670	-190.30
4.3g ∠270°	138.02	-80.653	-141.32
4.3g ∠315°	145.01	-90.501	-124.49
TAL CUAL 8.5g ∠0°	174.85	-77.623	-107.53
Rotor balanceado	-11.44	-5.683	-5.755

Los cálculos de balanceo para este rotor dan los siguientes resultados de la Tabla No 11.

Lo anterior sugiere una aplicación de interés industrial, que es posible guardar en la memoria de la computadora los datos de las corridas de prueba y dejar abierta, para su actualización la lectura "tal cual", de tal manera que se pueda calcular, periódicamente la masa de balanceo actual que se puede comparar con la masa de tolerancia que establece la norma y determinar así cuando se requieran hacer correcciones de

balanceo y cual sería esa masa de balanceo, basándose solamente en las mediciones de corriente.

Tabla No.11 Masas de balanceo (g) para los diferentes desbalances.

Caso	Masa de balanceo
4.3g ∠45°	5.32g ∠178°
4.3g ∠90°	6.97g ∠172°
4.3g ∠135°	8.55g ∠182°
4.3g ∠180°	7.38g ∠182°
4.3g ∠225°	7.78g ∠173°
4.3g ∠270°	8.94g ∠190°
4.3g ∠315°	6.01g ∠208°
Masa esperada	8.5g ∠180°

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, más eficiente, de un rotor acoplado 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 resuelve tomando tiempos de lectura del orden de 3 a 5 minutos y utilizando la raíz del valor medio cuadrado. La otra dificultad es la no-linealidad de los datos al aplicar los pesos 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. El valor residual medido para la condición de rotor balanceado se conoce en su amplitud, y la fase se pone como 0°, -120° y -240° para la línea de alimentación

- L_i correspondiente, esto en el caso de baja frecuencia (h_1). En el caso de alta frecuencia (h_2) se toma como 0° .
5. Las amplitudes de corriente obtenidas durante la corrida del rotor con desbalance (de los vectores \mathbf{P}_{0L1} , \mathbf{P}_{0L2} y \mathbf{P}_{0L3}) tienen su fase que debe calcularse de manera iterativa, dependiendo del parámetro α_1 , que es el ángulo de fase de la línea L_1 y tomando en cuenta las fases relativas entre las tres fases de alimentación.
 6. El procedimiento de cálculo consiste en variar el ángulo de fase α_1 de L_1 hasta que los ángulos de fase relativos entre los tres vectores corregidos \mathbf{R}_{0L1} , \mathbf{R}_{0L2} y \mathbf{R}_{0L3} cumplan las condiciones (6). Así se determinan los ángulos de fase absolutos.
 7. El método de balanceo permite almacenar los coeficientes de influencia de las fases de alimentación para ser aplicados en balanceos futuros al monitorear el espectro de corriente para determinar en qué momento se debe balancear el rotor y cuál es el peso requerido, en magnitud y posición angular.
 8. Los casos de prueba realizados sobre un rotor acoplado directamente a un motor eléctrico de inducción dan como resultado masas cuyo promedio converge a los valores esperados.
 9. 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 applicatio 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