

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,
Volumen 9, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5

**MÉTODO DE BALANCEO EN DOS PLANOS DE
ROTORES ACOPLADOS A UN MOTOR DE
INDUCCIÓN, MEDIANTE MEDICIONES DEL
ESPECTRO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y CON
MINIMIZACIÓN DEL OFFSET EN LAS ARMÓNICAS
DE 30HZ Y 90 HZ.**

**TWO-PLANE BALANCING METHOD FOR ROTORS
COUPLED TO AN INDUCTION MOTOR, USING
MEASUREMENTS OF THE ELECTRIC CURRENT SPECTRUM
AND MINIMIZING THE OFFSET IN THE 30 HZ AND 90 HZ
HARMONICS**

Alfonso García Reynoso

TecnM Campus Veracruz

Enrique Ladron de Guevara Durán

TecnM Campus Veracruz

José Cruz Molina Zenteno

TecnM Campus Veracruz

Gabriela Valerio Canales

TecnM Campus Veracruz

Método de balanceo en dos planos de rotores acoplados a un motor de inducción, mediante mediciones del espectro de la corriente eléctrica y con minimización del offset en las armónicas de 30hz y 90 hz.

Alfonso García Reynoso¹

alfonso.gr@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2112-6951>

Tecnm Campus Veracruz
México

Enrique Ladron de Guevara Durán

enrique.ld@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0001-3008-110X>

Tecnm Campus Veracruz
México

José Cruz Molina Zenteno

jose.mz@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0004-1566-2194>

Tecnm Campus Veracruz
México

Gabriela Valerio Canales

gabriela.vc@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0004-1566-2194>

Tecnm Campus Veracruz
México

RESUMEN

Se trabaja con un rotor largo que tiene dos planos de balanceo y se encuentra acoplado a un motor de inducción trifásico. Las lecturas que se toman para el balanceo corresponden a la corriente residual de alimentación en cada fase, dadas en mili-amperios. Las mediciones se efectúan con amperímetros de gancho en cada línea de alimentación. El propósito es remplazar los acelerómetros de vibración y ofrecer otra alternativa para el balanceo. Para el rotor de prueba, las armónicas de interés son a 30 hz y 90 hz, las cuales presentan dos dificultades, una es la variabilidad de las señales y, la otra, es la presencia de un offset que se muestra aún en la ausencia de desbalance. Mediante un adecuado tratamiento de los datos se obtiene un resultado aproximado para el balanceo. El procedimiento de balanceo en dos planos, el cual se describe más abajo, no es más que la aplicación de la técnica de balanceo en un plano utilizando pares de pesos para corregir primero el desbalance estático y después el desbalance dinámico.

Palabras clave: balanceo de rotores, rotor acoplado a motor de inducción, armónicas, corriente residual

¹ Autor principal.

Correspondencia: alfonso.gr@veracruz.tecnm.mx

Two-plane balancing method for rotors coupled to an induction motor, using measurements of the electric current spectrum and minimizing the offset in the 30 Hz and 90 Hz harmonics

ABSTRACT

This project is worked with a long rotor which has two balancing planes, and it is coupled to a trifasic induction motor. In order to balance it, readings of residual current for each phase line are taken. Measurements are made with current clamps, one for each of the three input phases. The purpose is to replace vibration accelerometers and offer another alternative to balancing. For the test rotor, harmonics of interest are at 30 hertz and 90 hertz which present two difficulties, one is the variability nature of the signals, and the other is the presence of an offset which shows even in the absence of unbalance. By an adequate treatment of data, a good result of single plane balancing is obtained. The two-plane balancing procedure, as described below, applies, firstly a pair of masses to correct the static unbalance, and secondly to correct the dynamic unbalance.

Keywords: rotor balancing, coupled rotor copled to an inductions motor, harmonics, residual current

*Artículo recibido 24 septiembre 2025
Aceptado para publicación: 29 octubre 2025*



INTRODUCCIÓN

La Este proyecto realiza el análisis del espectro de frecuencias de la corriente eléctrica que alimenta a un motor de inducción, para extraer información útil para el balanceo dinámico del rotor acoplado al mismo. Esto requiere de la utilización de sensores de corriente eléctrica, los cuales se colocan alrededor de los cables de alimentación del motor. Con lo antes mencionado se pretende eliminar el factor humano en la colocación y manejo de los sensores, además de reducir el error en las lecturas producido por este mismo factor en los sensores de vibración tradicionales.

El presente trabajo se relaciona con temas de diferentes áreas de la ingeniería mecánica y la ingeniería eléctrica, siendo los más importantes:

- Análisis de espectros de frecuencia para la detección de fallas.
- Motores de inducción.
- Métodos de balanceo para rotores rígidos.
- Instrumentación virtual para la detección y/o corrección de fallas mecánicas.

La vibración mecánica debida al desbalance se relaciona con algunas de las componentes del espectro armónico de la corriente eléctrica que se alimenta al motor de inducción. El procesamiento numérico de estas armónicas conduce al cálculo de los pesos de balanceo.

Las referencias bibliográficas señalan algunas formas de desarrollar el algoritmo de balanceo. Una posibilidad es calcular el peso de balanceo a colocar en el rotor acoplado al motor de inducción sin tomar en cuenta la fase entre los vectores de corriente. Otra forma calcula la fase entre las armónicas de la corriente residual para manejar mejor los datos y lograr mejores estimaciones del balanceo.

Hasta ahora se han logrado resultados satisfactorios para el balanceo en un solo plano del rotor utilizando armónicas de 90hz, sin embargo, para 30hz queda pendiente su procesamiento debido a la dispersión de los datos. En el presente estudio se aborda otro procedimiento que consiste en minimizar el offset que afecta a las mediciones para obtener el peso de balanceo tanto para 30hz como para 90 hz.

El algoritmo desarrollado se verifica mediante corridas de varios casos de desbalance en un rotor de laboratorio.



METODOLOGÍA

Los filtros pasa-banda se ajustan a 28-31 hz y 88-91 hz tomando de 2 a 6 minutos de registros. Aunque los datos son muy variables, es posible hacer un promediado en los programas subsiguientes.

Se miden las señales de corriente residual, es decir, 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 (Gomez Lozano, Lara Sanchez, & Hernández Jiménez , 2007) (Shreve, 1995). 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 (Mobley, 1999) (Shreve, 1995). 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. Se determina el 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 medir dichas armónicas. El equipo de medición desarrollado para este proyecto está constituido por un instrumento virtual y un sistema de sensado y acondicionamiento de señales. El instrumento virtual fue desarrollado en Labview 8.6 @ de National Instruments. El sistema de acondicionamiento de señales y sensado se construyó para un sistema trifásico. Este instrumento tiene la capacidad de trabajar en un sistema de alimentación de 220 voltios y con un rango máximo de 15 amperios 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 corriente directa, así como componentes de corriente alterna hasta de 10 kHz. El instrumento virtual desarrollado se operó con dos tarjetas de adquisición de señales la NI USB 6009 y la NI USB 9233. Dicho instrumento se configuró para capturar solamente las señales de corriente de las tres fases de alimentación permitiendo observar el espectro de las corrientes de línea. Dependiendo del



orden de las armónicas presentes, se relacionan las mismas con problemas mecánicos o electromagnéticos. El caso de interés particular en este proyecto, 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 f_1 y f_2 dadas por las siguientes expresiones:

$$f_1 = f_e \left[1 - m \left(\frac{1-s}{0.5p} \right) \right]$$

$$f_2 = f_e \left[1 + m \left(\frac{1-s}{0.5p} \right) \right]$$

donde: $m=1$, p = número de polos del motor, s =deslizamiento del rotor con respecto al estator f_e = frecuencia de alimentación del motor y f_1 , f_2 = frecuencias de las armónicas relacionadas con el desbalance del rotor. En el motor de pruebas, estas frecuencias son de 30 Hz y 90 Hz. 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 dichas armónicas. 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. El aparato de medición tiene un costo muy bajo, así como la tarjeta de adquisición de datos requerida es de las más sencillas y se maneja con una computadora portátil y el software Lab-View. Las mediciones realizadas durante las pruebas de balanceo consistieron en muestras de cinco minutos en cada corrida. El tipo de señal es muy variable y se calcula el valor cuadrado medio y se extrae raíz para manejar un valor representativo (RMS). Estas armónicas se miden en períodos de 4 a 6 minutos siendo la corriente muy pequeña (mAmperios). 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 1 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 substraído el valor base (de

rotor balanceado), 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. Este ajuste de los datos requiere conocer las fases, tanto de las lecturas de prueba como de los valores residuales, y estas fases no se miden con los sensores de corriente utilizados en estas pruebas. Esto se determina según el procedimiento numérico descrito más adelante.

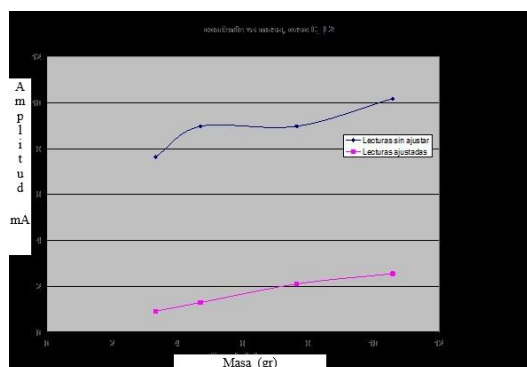


Figura 1. Comportamiento de las lecturas con la masa de desbalance

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. 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 2 muestra las señales en el tiempo para un peso de desbalance determinado.

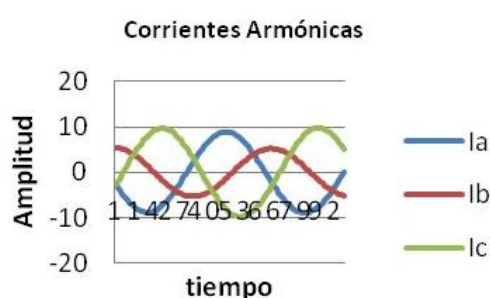


Figura 2. Amplitudes del espectro de cada fase de alimentación variando en el tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la compatibilidad de datos

A continuación, se desarrolla el procedimiento para la verificación de la compatibilidad entre los datos obtenidos en las corridas con los pesos de prueba W_{p1} y W_{p2} de las tres fases.

Debido a la variabilidad de los datos, es necesario procesarlos para encontrar las combinaciones compatibles, es decir, que en cada fase resulte el mismo valor del coeficiente de influencia. Típicamente se procesan 30,000 series de datos para encontrar que un 25% de éstas cumplen con la condición de compatibilidad, dicha condición puede verse en la tabla 1.

Tabla 1. Denominación de datos compatibles de la corriente			
Corrida	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Desbalance original	b_1	b_3	b_5
Con peso de prueba W_{p1}	b_2	b_4	b_6
Con peso de prueba W_{p2}	b_{22}	b_{44}	b_{66}

Las fórmulas para determinar datos compatibles, con magnitud y fase, son:

El coeficiente de influencia asociado a la corrida con peso de prueba W_{p1} se puede escribir como:

Coeficiente de influencia.

$$A = \frac{b_2 - b_1}{W_{p1}} \quad \text{y} \quad W_c = \frac{b_1 - O_1}{A}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$W_c = -\frac{b_1 - O_1}{b_2 - b_1} W_{p1} \quad \text{donde:} \quad -\frac{W_c}{W_{p1}} = \frac{b_1 - O_1}{b_2 - b_1} = a_1$$

Similarmente también se puede obtener:

$$A = \frac{b_{22} - b_1}{W_{p1}} \quad \text{y} \quad W_c = -\frac{b_1 - O_1}{b_{22} - b_1} W_{p2} \quad \text{donde:} \quad -\frac{W_c}{W_{p2}} = \frac{b_1 - O_1}{b_{22} - b_1} = a_2$$

Ahora se expresan los coeficientes a_1 y a_2 incluyendo el ángulo de fase de las lecturas.

$$a_1 = \frac{b_1 e^{i\theta_{01}} - O_1}{b_2 e^{i\theta_{11}} - b_1 e^{i\theta_{01}}}$$

Similarmente para la corrida de W_{p2}

$$a_2 = \frac{b_1 e^{i\theta_{01}} - O_1}{b_{22} e^{i\theta_{111}} - b_1 e^{i\theta_{01}}}$$

Ahora se introducen

$$r = \frac{W_{p1}}{W_{p2}} = \frac{a_2}{a_1}$$

$$\theta_{d1} = \theta_{11} - \theta_{01}$$

$$\theta_{d2} = \theta_{111} - \theta_{01}$$

Se forma el cociente

$$\frac{a_2}{a_1} = r = \frac{b_2 e^{i\theta_{11}} - b_1 e^{i\theta_{01}}}{b_{22} e^{i\theta_{111}} - b_1 e^{i\theta_{01}}} = \frac{b_2 e^{i\theta_{d1}} - b_1}{b_{22} e^{i\theta_{d2}} - b_1}$$

Reacomodando se obtiene

$$e^{i\theta_{d2}} = \frac{b_1(r-1) + b_2 e^{i\theta_{d1}}}{b_{22}r}$$

El 1er miembro de esta ecuación es un círculo unitario con centro en el origen que se obtiene al ir variando el ángulo y el 2do. miembro es otro círculo con centro en:

$$C = \frac{b_1(r-1)}{b_{22}r} \quad \text{y con radio} \quad R = \frac{b_2}{b_{22}r}$$

Si hay intersección de los dos círculos entonces los datos de esa fase son compatibles y se determinan los ángulos de fase θ_{d1} y θ_{d2} .

Similarmente se hacen los cálculos para los datos de las fases 2 y 3, si las tres fases resultan ser compatibles, entonces ese registro de datos se toma para los cálculos posteriores.

Procesamiento de los datos

A continuación, se define el coeficiente de influencia a_1 y se desarrolla el cálculo para el offset.

Para balanceo en un plano por el método tradicional, que mide la amplitud de vibración y la fase, se utilizan los datos de la tabla 2.

Tabla 2. Datos de vibración en método tradicional	
Corrida	Vibración (amplitud y fase)
Desbalance original	N
Con peso de prueba W_{p1}	N_2

Se define el coeficiente de influencia como

$$a_1 = \frac{N}{N_2 - N}$$

Y se calcula el peso de balanceo:



$$W_c = -a_1 W_{p1}$$

Este coeficiente de influencia se mantiene el mismo para mediciones de corriente, en sus tres fases, de 30 hz y de 90 hz.

Cuando se trabaja con mediciones de corriente eléctrica hay que tomar en cuenta el offset de cada fase y ajustar los datos para formar los fasores proporcionales al desbalanceo del rotor. Puesto que los datos presentan mucha variabilidad, también los offsets son variables, por lo que se manejan de modo que su magnitud sea proporcional a la amplitud de la corriente que se mide. Es decir:

$$|O_1| = K_{frac} |b_1|$$

Entonces, los fasores de desbalance que se utilizan en el balanceo se obtienen sustrayendo los offsets de las mediciones de corriente eléctrica como sigue, esto por cada fase

$$N_{01} = b_1 - O_1$$

$$N_{02} = b_3 - O_2$$

$$N_{03} = b_5 - O_3$$

Esto se realiza cuando se hayan calculado los offsets, de acuerdo a lo siguiente:

De las fórmulas del coeficiente de influencia de las tres fases que son:

$$a_1 = \frac{b_1 - O_1}{b_2 - b_1}$$

$$a_1 = \frac{b_3 - O_2}{b_4 - b_3}$$

$$a_1 = \frac{b_5 - O_3}{b_6 - b_5}$$

De aquí se forma un sistema de tres ecuaciones

$$a_1(b_2 - b_1) = b_1 - O_1$$

$$O_2 + a_1(b_4 - b_3) = b_3$$

$$O_3 + a_1(b_6 - b_5) = b_5$$

Se resuelve este sistema lineal suponiendo Inicialmente que el ángulo de fase de O_1 es de 0° .

$$\begin{bmatrix} (b_2 - b_1) & 0 & 0 \\ (b_4 - b_3) & 1 & 0 \\ (b_6 - b_5) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ O_2 \\ O_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 - O_1 \\ b_3 \\ b_5 \end{Bmatrix}$$



Luego se va iterando al variar el ángulo de O_1 a cada 10° y se grafica a_1 obteniéndose una serie de círculos concéntricos en el plano complejo como muestra la figura 3.

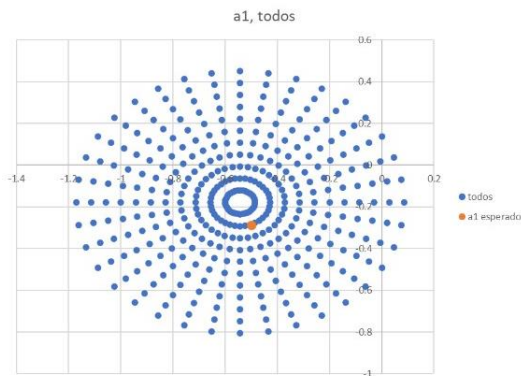


Figura 3. Coeficiente de influencia a_1 90 hz, balanceo en un plano

Debido a esta propiedad, es posible expresar el coeficiente de influencia mediante las fórmulas:

$$a_{1r} = C_x + R_1 K_{frac} 10 \cos(\theta)$$

$$a_{1i} = C_y + R_1 K_{frac} 10 \sin(\theta)$$

Donde las coordenadas del centro son C_x y C_y y el valor de R_1 corresponde a $K_{frac} = 0.1$

Igualmente se observa que al definir la resultante de los offsets

$$sumabs = O_1 + O_2 + O_3$$

La gráfica en el plano complejo está formada también por círculos concéntricos como muestra la figura 4.

Entonces tenemos también una fórmula para sumabs como sigue:

$$sumabs_r = C_{Ox} + R_{O1} K_{frac} 10 \cos(\theta_O)$$

$$sumabs_i = C_{Oy} + R_{O1} K_{frac} 10 \sin(\theta_O)$$

Donde las coordenadas del centro son C_{Ox} y C_{Oy} y el valor de R_{O1} corresponde a $K_{frac} = 0.1$

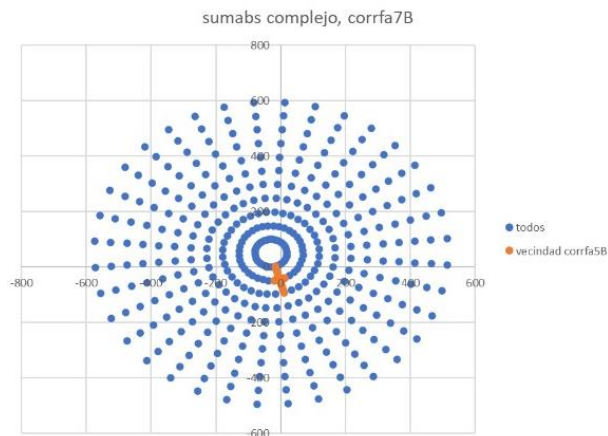


Figura 4. Sumabs complejo para 90 hz, balanceo en un plano.

RESULTADOS

La secuencia de cálculos consta de tres programas en Scilab que realizan lo siguiente:

1. Se procesa cada archivo de captura obtenido con Lab-View de las tres señales en el tiempo de las armónicas filtradas a 30hz y 90hz con el programa “Lector de archivos 14A.sce” obteniéndose los fasores (magnitud y fase) de cada fase de alimentación del motor de inducción. El archivo es una matriz de aproximadamente 800 renglones por 9 columnas (magnitud, ángulo de fase y frecuencia). Se obtiene una matriz por cada corrida.
2. Se utiliza el algoritmo “compatib7.sce” en Scilab para procesar tres corridas, una correspondiente al rotor con su desbalance original y dos con pesos de prueba y lo que se determina son las combinaciones de datos que son compatibles, de acuerdo con el análisis visto en la sección de datos compatibles. Se obtiene un archivo o matriz con los fasores compatibles.
3. Se utiliza el algoritmo “compatibility_90hz.sce” para procesar la información según el análisis visto en la sección de procesamiento de datos. Se obtienen archivos que se grafican en Excel para mostrar el modo en que se obtienen las masas de balanceo.

• Procedimiento de balanceo en dos planos

Primero se provoca un desbalance conocido en ambos planos y, a continuación, se procede de la siguiente forma:

- Se hace una corrida con ese desbalance para tomar el primer conjunto de datos (tal cual), el cual presenta desbalance estático y dinámico.

- Se hacen dos corridas de prueba colocando dos pesos iguales, en la misma posición angular. Una corrida con un par de pesos iguales, de prueba, en ambos planos la segunda corrida con otro par de pesos en ambos planos.
- Se calculan los pesos de balanceo W_{cm} , iguales en cada plano, que corrigen el desbalance estático. Se colocan esos pesos en el rotor y se hace la cuarta corrida, que corresponde al nuevo tal cual, el cual solamente tiene un desbalance dinámico.
- Se hacen dos corridas de prueba más, colocando dos pesos iguales, en posiciones angulares opuestas. Una corrida con el par de pesos de prueba en el plano 1 y su opuesto en el plano 2 y la segunda corrida con otro par de pesos opuestos en ambos planos.
- Se calculan los pesos de balanceo W_{cp} , iguales pero opuestos, en cada plano. Estos pesos corrigen el desbalance dinámico.

El desbalance aplicado con pesos conocidos se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Masa de desbalance y su composición			
PLANO	MASA DESBALANCE	W_{cm}	W_{cp}
1	6g en 90°	4.2426 en 225°	$W_{cp1}=4.2426$ en 315°
2	6g en 0°	4.2426 en 225°	$W_{cp2}=4.2426$ en 45°

Combinando un par de pesos iguales en ambos planos W_{cm} con un par de pesos opuestos W_{cp} dan como resultado, al sumarlos, los pesos de balanceo esperados.

De manera que al sumar se obtienen

Plano 1: $W_{cm}+W_{cp1}=6$ g en 270°

Plano 2: $W_{cm}+W_{cp2}=6$ g en 180°

El programa “compatibility_90hz” realiza una iteración de K_{frac} , en magnitud y en ángulo para calcular los valores posibles de a_1 asociado con W_{cm} como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Cálculo de a_1 asociado con Wcm.

También se muestra el valor esperado de a_1 . Los valores marcados en amarillo corresponden a las primeras 10 líneas cuando se ordena la columna de sumabs de menor a mayor. Esto se muestra en la Tabla 4. Con el promedio de Kfrac=0.95 en -2° se obtiene un valor de $a_1=0.15 -1.3i$ y la masa correspondiente es Wcm=5.23g en 216.6° .

Tabla 4. Resultado de las 10 primeras líneas del cálculo de Wcm

90hz	kfrac	ang	OO1	O1ang	OO2	O2ang	OO3	O3ang	a1r	a1i	sumabs	angsum
Wcm	1	0	127.1212	-23.1483	35.3491	165.5442	56.9001	-127.532	0.2909	-1.417	98.7218	-60.9128
	1	-10	127.2222	-33.1109	147.571	144.2153	85.6997	147.2412	0.2362	-2.0415	106.0768	143.4532
	0.9	0	114.4515	-23.1793	61.8208	84.6462	24.8137	-50.5848	-0.0688	-1.417	126.7642	-1.2061
	0.9	-10	114.5525	-33.1378	149.3208	118.4635	65.6647	105.8278	-0.118	-1.9791	132.0032	87.0274
	1.1	0	139.7909	-23.123	86.2395	-149.398	110.8636	-140.126	0.6505	-1.417	172.6346	-100.261
	1.1	-10	139.892	-33.089	173.256	166.2057	129.6466	166.8159	0.5904	-2.104	177.3686	-178.226
	0.8	0	101.7818	-23.218	123.1017	68.1747	66.5209	5.8515	-0.4285	-1.417	220.8443	21.4985
	0.8	-10	101.8827	-33.1712	177.6968	97.3132	87.8094	65.6176	-0.4722	-1.9166	223.5559	63.7403
	0.9	10	114.3377	-13.2115	93.8489	3.8185	113.6226	-56.2	-0.118	-0.8549	291.5033	-23.0856
	1	10	127.0073	-13.1773	82.3974	-39.6898	129.9925	-82.0135	0.2362	-0.7924	293.7808	-45.7139
	promedio	promedio							promedio	promedio		
	0.95	-2							0.07987	-1.53565		

Cuando se realizaron las siguientes corridas del rotor, se había colocado los pesos de balanceo estático Wcm, quedando solamente el desbalance dinámico. Se corrieron los tres algoritmos y se obtiene la Fig. 6.



Figura 6. Gráfica de a_1 al calcular Wcp.

También se muestra el valor esperado de a_1 en rojo. Los valores marcados en amarillo corresponden a las primeras 10 líneas cuando se ordena la columna de sumabs de mayor a menor. Esto puede ser observado en la Tabla 5. Con el promedio de $K_{frac}=1.26$ en 55° se obtiene un valor de $a_1=0.4+0.25i$ y la masa correspondiente es $W_{cp}=3.77g$ en 332° .

Tabla 5. Resultados de las 10 primeras líneas del cálculo de Wcp

kfrac	ang	OO1	O1ang	OO2	O2ang	OO3	O3ang	a1r	a1i	sumabs	angsum
1.3	50	310.6568	-10.1923	186.5664	-8.1682	194.981	11.868	0.6741	0.2535	682.4969	-3.476
1.3	60	310.6717	-0.2462	182.3312	-8.9981	193.5565	8.234	0.3055	0.5117	682.3207	-0.1789
1.3	40	310.5918	-20.1398	191.2238	-7.6104	199.2452	15.2536	0.9923	-0.0647	678.0835	-6.7624
1.3	70	310.6359	9.7004	178.6809	-10.0862	195.0771	4.6044	-0.1024	0.7019	677.5566	3.1057
1.3	30	310.4786	-30.0901	196.137	-7.3245	206.0491	18.1859	1.2505	-0.4334	669.1261	-10.0145
1.3	80	310.5506	19.6488	175.7661	-11.4025	199.4303	1.2307	-0.5371	0.8183	668.254	6.3542
1.2	50	286.8878	-10.1888	187.5741	-8.7706	200.3085	11.505	0.5465	0.1014	665.1959	-3.3954
1.2	60	286.9027	-0.2471	183.6895	-9.5437	199.0292	8.2402	0.2062	0.3397	665.029	-0.2729
1.2	40	286.8228	-20.1319	191.8546	-8.2439	204.1452	14.5612	0.8402	-0.1924	661.0165	-6.5065
1.2	70	286.8669	9.695	180.348	-10.5491	200.3948	4.979	-0.1704	0.5152	660.5176	2.8363
pomedio	pomedio							pomedio	pomedio		
1.26	55							0.40054	0.25512		

En el procesamiento de los datos se obtienen los siguientes resultados aproximados que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos

PLANO	Wcm	Wcp	MASA RESULTANTE		ERROR
			CALCULADA	ESPERADA	
1	5.23 en 216.6°	3.77 en 332°	4.96g en 260°	6g en 270°	1.04g, 10°
2	5.23 en 216.6°	3.77 en 152°	7.65g en 190.2°	6g en 180°	1.65g, 10.2°

CONCLUSIONES

La variabilidad de los datos capturados aunado a la presencia de un offset que se obtiene, aunque no haya desbalance tiende a hacer este problema de balanceo complicado y sujeto a errores. Para manejar esta situación se establece la hipótesis que el offset es proporcional a las lecturas de desbalance original. Esto da como resultado que las figuras No.3 y No.4 dan líneas rectas radiales al mantenerse constante el ángulo del offset. Por esta razón se itera el offset en el proceso para mostrar las posibles soluciones del balanceo.

Para determinar la zona donde se encuentra el valor esperado a_1 , se ordena el archivo resultante de acuerdo a la columna de sumabs (valor absoluto), que es la resultante de la suma de los tres fasores de offset de cada línea. El ordenamiento es como sigue:

- De menor a mayor en el caso de Wcm
- De mayor a menor en el caso de Wcp

Se promedian los primeros 10 valores de Kfrac para calcular a_1 y Wcm o Wcp.

Los resultados tienen errores del orden de 0.5g a 2g en magnitud y de 10° en la fase.

Los resultados mostrados corresponden a las armónicas de 90hz, ya que para 30 hz no se obtienen buenos resultados debido, probablemente, a la variabilidad de los datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bellini, A., Filippeti, F., Tazón, K., & Capolino, G. A. (December de 2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12).



- García Reynoso, A. C., Ladrón de Guevara Duran, E., Lorandi Medina, A., Hermida Saba, G., & García Ramírez, P. (Septiembre de 2014). Simplificación del método de balanceo dinámico en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual. *Memorias del XX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- García Reynoso, A. c., Ladrón de Guevara D., E., Ceballos Gutiérrez, R., Camargo Méndez, J., Hernández Marceliz, E., & García Portilla, A. (22 a 24 de Septiembre de 2010). Método de balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando datos de corriente residual. *Memorias del XXI Congreso Internacional de la SOMIM*, A4 -A94.
- García Reynoso, A. C., Ladrón de Guevara D., E., Morales Rergis, C., Hernández marceliz, E., García Portilla, A., & Lorandi Medina, A. P. (21 a 23 de Septiembre de 2011). Cálculo de la fase en el balanceo dinámico, en un plano, de rotores acoplados directamente a un motor de inducción empleando corriente residual. *Memoria del XXII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- García Reynoso, A. C., Ladrón de Guevara Durán, E., lorandi Medina, A., Hermida Saba, A., Villalobos medina, G. V., Romero Pérez, R. A., & Morales Sánchez, Ó. (21 a 23 de Septiembre de 2016). Determinación de fasores de desbalance mecánico obtenidos de corriente eléctrica residual de motor de inducción acoplado a rotor desbalanceado. *memorias del XXII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- García Reynoso, A. c., Ladrón de Guevara Durán, E., Lorandi Mediana, A., Hermida Saba, G., & García Ramírez, P. (23 a 25 de Septiembre de 2015). *Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- Gomez Lozano, I., Lara Sanchez, A., & Hernández Jiménez, H. (Octubre de 2007). Análisis de vibraciones en elementos rotacionales con variación de temperatura, para la determinación de la vida útil. *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*.
- holopainen, T. P., Aatola, S., & Arkkio, A. (September de 2004). Vibration Measurements for Validation of Electromechanical Rotor Model for Cage Induction Motor. *Eighth International Conference on Vibration in Rotating machinery*.



- Kral, C., Habetler, T., & Harley, R. (July/August de 2004). Detection of Mechanical Imbalances of Induction Machines Without Spectral Analysis of time-Domain Signals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4).
- Meroño Pérez , P., Serrano Molina, E., & Gómez de León , F. C. (23 a 25 de Octubre de 2007). Analisis Comparativo de Técnicas de Procesamiento de Señales de Vibración en Transmisiones de Engranés. *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Me.*
- Mobley, R. K. (1999). *Vibrations Fundamentals*. Newnes.
- Shreve, D. H. (1995). *Signal Processing for Effective Vibration Analysis*. Columbus Ohio: IRD Mechanalysis.

