

Análisis de vibraciones en banco de ensayo utilizado para simular fallas de equipos industriales

Sergio O. Gangi¹, Daniel A. Pontelli¹, Laura L. Boaglio¹, Juan G. Bollati¹

¹Laboratorio de Ingeniería y Mantenimiento Industrial, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 15/09/2015
Fecha de aceptación del manuscrito: 17/02/2016
Fecha de publicación: 15/03/2016

Resumen— En este artículo se presenta un análisis de vibraciones de un sistema electromecánico rotativo que forma parte de un banco experimental desarrollado con fines didácticos y que permite realizar prácticas asociadas al mantenimiento predictivo, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales. Este banco está instalado en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales -UNC- y fue construido en el Laboratorio de Ingeniería y Mantenimiento Industrial (LIMI). Mediante el análisis realizado se caracteriza el nivel de vibración propia del sistema en condiciones normales de funcionamiento, esto para poder comprender los complejos espectros de vibración que aparecen en este banco cuando varios elementos participan aportando cada uno su particular espectro, es decir para contar con una referencia en futuras prácticas. En esta primera experiencia se realizan 50 ensayos para analizar el espectro que genera el motor eléctrico girando, montado sobre la base estructural del banco. Los resultados obtenidos se comparan con normativa existente y con bibliografía especializada, además a partir de los mismos es posible extraer conclusiones que permitan realizar futuros controles predictivos y establecer límites máximos de vibración.

Palabras clave— Mantenimiento predictivo, vibración en motores, espectro en frecuencias.

Abstract— This article presents an analysis of vibrations of a rotating electromechanical system that is part of an experimental bench developed for teaching purposes and which allows predictive maintenance associated practices widely used in industrial applications. This bench is at the Faculty of Exact, Physical and Natural Sciences -National University of Cordoba- and was built in the Laboratory of Industrial Engineering and Maintenance (LIMI). By using the analysis described in this paper, it is possible to establish the level of vibration of the system itself in normal operating conditions. This is done in order to understand the complex vibration spectra shown in this bench resulting from several intervening elements, each with its particular spectrum; that is to say, the results of the analysis provide a reference for future practices. In this first experience 50 tests are carried out to analyze the spectrum generated by the rotating electric motor mounted on the structural basis of the bench. The results are compared with existing regulations and technical literature. Besides, these results make it possible not only to draw conclusions that will allow future predictive controls but also to establish the maximum values of vibration.

Keywords— Predictive maintenance, vibration motors, spectrum frequencies.

INTRODUCCIÓN

En el LIMI (Laboratorio de Ingeniería y Mantenimiento Industrial) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales -Universidad Nacional de Córdoba-, se ha desarrollado un banco de ensayo de vibraciones, con fines didácticos, para brindar apoyo a la enseñanza de las técnicas asociadas al mantenimiento condicional o predictivo en el marco de la asignatura Mantenimiento Industrial de la Carrera de Ingeniería Industrial. Este Banco de Ensayo de Vibraciones debe permitir simular las diferentes configuraciones y condiciones anómalas de

funcionamiento que pueden presentarse en sistemas electromecánicos rotativos industriales.

El banco fue diseñado y construido (González, Cardona, & Monroy, 2005), por docentes investigadores pertenecientes al LIMI, con el propósito de medir y analizar vibraciones en diferentes situaciones. Para realizar estas experiencias es necesario disponer de referencias confiables que permitan establecer comparaciones, por tanto se requiere caracterizar el nivel de vibración propia del sistema en condiciones de buen funcionamiento y sin ningún tipo de perturbación adicional.

En condiciones normales de funcionamiento todas las máquinas o sistemas mecánicos rotativos vibran debido a las tolerancias inherentes a cada uno de sus elementos constructivos y a pequeñas anomalías (desalineamiento, desbalanceo, otras), muchas veces imperceptibles en el funcionamiento industrial del equipo. Estas causas descriptas son las que proporcionan al sistema una vibración particular propia o básica, por esto es necesario

Dirección de contacto:

Sergio Oscar Gangi, Dumas 13 La Cumbre Córdoba, CP5178, 0351-152022702, sergio.gangi@hotmail.com

realizar mediciones que permitan caracterizar este nivel. Los resultados obtenidos deben permitir fijar referentes para realizar posteriores contrastes en situaciones de vibraciones generadas debido a la incorporación de otros componentes y a la presencia de anomalías.

Las actuales tendencias del análisis de vibraciones caracterizan a estas mediante la velocidad en valor eficaz total r.m.s (*root mean square*) y el espectro en el dominio de las frecuencias. Para poder cuantificar estos parámetros en el banco de ensayo, se diseña e implementa una experiencia consistente en efectuar una serie de mediciones estandarizadas en cuanto a posicionamiento de los sensores y condiciones de entorno. La cantidad de valores obtenidos debe permitir la realización de una prueba estadística y la posibilidad de estimar un límite propio superior de alarma.

Por otro lado, como máquinas similares, que funcionan en buenas condiciones, tienen similares características de vibraciones, se utiliza como referencia la norma internacional de severidad de las vibraciones (ISO 10816-1) para verificar el funcionamiento del banco.

Respecto a la organización de esta exposición, se comienza con la descripción de la experiencia y el equipamiento utilizado, a continuación con las referencias utilizadas, los resultados obtenidos y la discusión de los mismos, finalmente se exponen las conclusiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la experiencia y el equipamiento

La experiencia consiste en una sucesión de 50 (cincuenta) ensayos en un lapso aproximado de 2 horas manteniendo siempre las mismas condiciones de entorno.

Cada ensayo consiste en realizar una medición de vibración del banco en valor eficaz total de velocidad y analizar el espectro en el dominio de la frecuencia, manteniendo controladas todas aquellas variables que puedan producir un cambio en las condiciones de medición, como por ejemplo: velocidad de rotación motor, temperatura ambiente. Cada medición se realiza utilizando el instrumento Analizador de vibraciones data logger COMTEST Vb7 con Software Ascent, ver Fig. 2.

El sensor de vibraciones piezoeléctrico de medición se posiciona en el eje del motor en posición vertical como se puede ver en la Fig. 1, próximo al rodamiento del eje de salida del motor.



Fig. 1: Banco de ensayo con sensor de vibraciones.



Fig. 2: Medidor de vibraciones COMTEST Vb7

El sistema electromecánico ensayado está conformado por:

- Un motor eléctrico asíncrono trifásico de un par de polos y de 0,75 KW, montado sobre una base metálica de fijación
- La estructura del banco de apoyo móvil
- El tablero eléctrico para alimentación, comando y protección

El motor asíncrono trifásico se conecta a una red de alimentación eléctrica estándar con tensiones senoidales de 380V (r.m.s.) y frecuencia 50 Hz, y como consecuencia girando a su velocidad nominal asincrónica.

- Parámetros considerados

Los parámetros de vibración medidos son los siguientes

- Velocidad [mm/s]:
 - Valor eficaz total (r.m.s.)
 - Espectro en frecuencia

Normativa de referencia

La normalización internacional ISO (International Standard Organization) sobre la severidad de las vibraciones cuenta con una extensa serie de normas, para esta trabajo se toma como referencia la norma ISO 10816-1: Mechanical vibration - Evaluation Of Machine Vibration by Measurements on non-rotating parts. (Robichaud y Eng, 2009)

La norma ISO 10816 hace establece lineamientos o recomendaciones para medir y evaluar vibraciones absolutas medidas en las estructuras o partes estáticas de las máquinas, casi siempre en los sitios más cercanos a los apoyos de los ejes. La parte 1, es decir la 10816-1 es la guía general de la norma completa, en esta parte se explican aspectos básicos de la vibración, se sugieren ubicaciones y direcciones de los puntos de medición en partes no giratorias de acuerdo al tipo y montaje de la máquina, se definen criterios de evaluación, se clasifican los equipos de acuerdo a su potencia y tipo de anclaje, se definen umbrales de amplitud de vibración normal, de alarma y de disparo

Los distintos niveles de vibración recomendados por la norma ISO 10816-1 según el tipo de máquina, se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1: TABLA DE SEVERIDAD DE VIBRACIONES SEGÚN NORMA ISO 10861-1

Máquina			Case I	Case II	Case III	Case IV
			Máquina pequeña	Máquina mediana	Máquina grande con fundación rígida	Máquina grande con fundación no rígida
Velocidad de la vibración V rms	[pulg/s]	[mm/s]				
	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71		Bueno		
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		Satisfactorio		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		Insatisfactorio		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		Inaceptable		
1.10	45.0					

- Clase I: motores eléctricos hasta 15 kW
- Clase II: motores eléctricos de 15 a 75 KW
- Clase III: grandes motores
- Clase IV: turbo máquinas

El banco de ensayos descrito es impulsado por un motor eléctrico asíncrono trifásico de 0,75 kW, por esto se encuadra en la Clase I (pequeñas máquinas) según la norma ISO 10861-1 y el máximo nivel de vibración de velocidad permitido es 0,71 mm/s (r.m.s.) para una condición de buen funcionamiento. Conforme a esta normativa las mediciones de vibración se realizaron en el rango de velocidad r.m.s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las mediciones obtenidas en los ensayos, se realiza una prueba estadística de normalidad (Anderson y Darling, 1954), mediante el software estadístico MINITAB, para los valores eficaces totales (r.m.s.) de vibración, medidos en parámetro de velocidad (mm/s) de una muestra de 50 datos Tabla 2. La salida proporcionada por el software se consigna en la Fig.3. La prueba con hipótesis nula de normalidad, con parámetros: media= 0,466 y desvío estándar = 0,05012, arroja un p-valor igual a 0,404 lo que implica que no es posible rechazar la hipótesis nula. Por tanto, es razonable considerar que los valores de velocidad de vibración r.m.s. se comportan conforme a una distribución normal con los parámetros estimados.

Una vez verificado que los valores eficaces totales de vibración de las 50 mediciones representan una distribución normal, es posible establecer que el sistema de medición se mantiene estable sin causas externas de variación.

El nivel de vibración en valor eficaz total en las 50 mediciones realizadas Tabla 2 resulta ser siempre menor a 0,71 por lo que en ningún caso excede el nivel máximo

permitido por la norma de severidad de vibración ISO10816-1, Tabla 1 para este tipo de dispositivo Clase 1. Se propone tomar como límite superior de alarma la media más tres desvíos estándares, estimados en los ensayos

$$\text{Límite superior de alarma} = \text{Media} + 3 \text{ desviación estándar} = 0,466 + 3 * 0,05012 = 0,616 \text{ mm/s (r.m.s.)}$$

TABLA 2: MEDICIONES DE NIVEL EFICAZ TOTAL RMS DE VIBRACIÓN TOTAL. MEDIDO VELOCIDAD [mm/s]

0,4537	0,4519	0,5397	0,51	0,3955
0,4272	0,4087	0,5407	0,5428	0,4661
0,4203	0,4218	0,5037	0,4774	0,4404
0,433	0,4849	0,4829	0,4695	0,3735
0,4448	0,5353	0,5078	0,4749	0,4077
0,4517	0,4929	0,4857	0,4397	0,435
0,4484	0,466	0,5062	0,4356	0,3997
0,4466	0,4842	0,5452	0,4268	0,4029
0,4668	0,5789	0,5455	0,4537	0,3799
0,4591	0,5296	0,551	0,47	0,3858

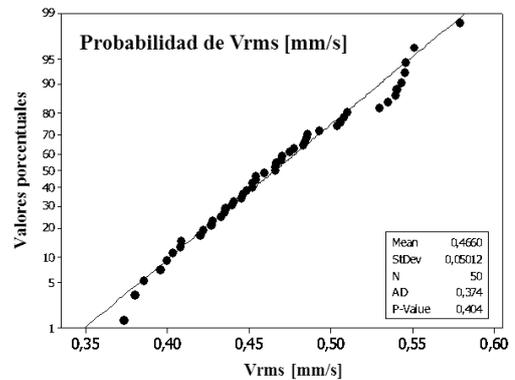


Fig. 3: Gráfico obtenido con software MINITAB

Respecto al espectro de frecuencias, para caracterizarlo, es necesario identificar los componentes (armónicos) de mayor magnitud. Estos muestran ocurrencias muy similares en los 50 ensayos lo que permite tomar una medición como representativa. En la Fig. 4 se presenta un gráfico del espectro de frecuencias que se repite en las distintas observaciones. La escala de abscisas está en orden de armónicos respecto a la frecuencia de giro del motor.

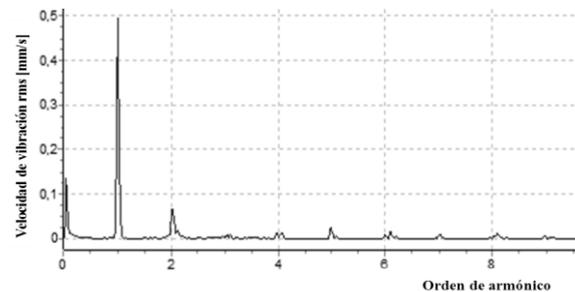


Fig. 4: Espectro de frecuencias

Para poder explicar este espectro se tabularon los valores eficaces de los armónicos de vibración más significativos junto a su frecuencia de aparición y el orden correspondiente Tabla 3.

Como puede observarse en el espectro de frecuencia Fig. 4 y en la tabla de valores Tabla 3, hay 3 armónicos dominantes por su amplitud que son los correspondientes a las frecuencias de: 2,498 - 49,94 - 99,88 Hz

TABLA 3: VALORES MEDIDOS DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN RMS

Frecuencia de armónico [Hz]	Orden de armónico	Velocidad de vibración [mm/s] rms
2,498	0,05082	0,135
49,94	1,016	0,4938
99,88	2,031	0,07035
104,9	2,133	0,01847
194,8	3,961	0,01183
199,8	4,063	0,01597
244,7	4,977	0,02496
299,6	6,094	0,01655
397	8,075	0,01273
948,8	19,3	0,02782

Para establecer el orden de armónicos, se toma como referencia principal de frecuencia (1X) la correspondiente a la velocidad de rotación del motor (n_r) asíncrono.

$$n_s \text{ (velocidad sincrónica)} = 3000 \text{ rpm}$$

$$f_s \text{ (frecuencia sincrónica de línea)} = F_L \text{ (línea)} = 50 \text{ Hz}$$

$$n_r \text{ (velocidad rotación rotor)} = 2950 \text{ rpm}$$

$$f_r \text{ (frecuencia rotación rotor)} = n_r/60 = 49,16 \text{ Hz}$$

De la bibliografía especializada en el tema de vibraciones mecánicas industriales en motores eléctricos (JPS Argentina, 2007) se toman ejemplos como referencia para el análisis del espectro.

El espectro observado corresponde predominantemente al de un motor asíncrono trifásico con excentricidad en el rotor (entrehierro variable) que es un defecto constructivo imperceptible en aplicaciones normales industriales.

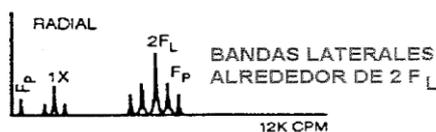


Fig. 5: Espectro típico de un motor con excentricidad del rotor.
Fuente: "Seminario Técnicas Predictivas y Proactivas en Mantenimiento" dictado por JPS Argentina

La excentricidad en los rotores produce un entrehierro variable entre el rotor y el estator que induce una vibración de frecuencia $2F_L$ rodeado por las bandas laterales de la frecuencia de paso de polo (F_P), así como bandas laterales F_P alrededor de la velocidad de funcionamiento. La amplitud de la componente de frecuencia $2F_L$ depende del nivel de excentricidad del rotor.

La frecuencia de paso de polo (F_P) aparece normalmente a baja frecuencia. Los valores comunes de F_P oscilan aproximadamente de 20 a 120 rpm, es decir entre 0,3 y 2,0 Hz.

En base a lo expresado se calculan las frecuencias que deben aparecer en este espectro y luego se comparan con los valores medidos.

$$F_L \text{ (línea)} = f_s \text{ (sincrónica de línea)} = 50 \text{ Hz}$$

$$2F_L \text{ (línea)} = 100 \text{ Hz}$$

F_P (Frecuencia de paso de polo) = Frecuencia de deslizamiento x Numero de polos

$$\text{Frecuencia deslizamiento} = f_s - f_r = 50 - 49,16 = 0,84 \text{ Hz}$$

Para un motor de 2 polos

$$F_P = (50 - 49,16) \times 2 = 1,68 \text{ Hz}$$

Entonces, es posible determinar que la baja frecuencia observada en el espectro Fig. 4, corresponde a la frecuencia de paso de polo sumada a las bajas frecuencias de vibración natural de los componentes de la estructura del banco.

CONCLUSIONES

Se establece un límite superior de alarma, valor de vibración para delimitar la condición de buen funcionamiento del banco.

Se comprueba que el nivel de vibración global del sistema es conforme a la normativa de referencia, lo que valida la utilización del banco de ensayo para los fines propuestos.

Se observa y consigna un espectro característico, que es técnicamente explicable en términos de coincidencias con la bibliografía especializada en temas de análisis de vibraciones industriales.

Por tanto, la experiencia realizada ha permitido fijar referentes propios del banco de ensayo en condiciones de buen funcionamiento, lo que posibilita realizar posteriores contrastes en situaciones de vibraciones generadas debido a la presencia de otros componentes y/o de anomalías.

En próximas experiencias se proyecta evaluar el nivel de vibración y espectro de frecuencia del banco de ensayo con la incorporación de distintas perturbaciones.

REFERENCIAS

- [1] Anderson, T. W., Darling, D. A. (1954). "A Test of Goodness of Fit". *Journal of Statistical Association*, 49(268), 765-769
- [2] González, H. Á., Cardona, J. F., & Monroy, G. A. (2005). "Diseño de un banco de pruebas de desalineamiento y desbalanceo mecánico -Parte I". *Scientia et Technica Año X, N°X, Mes200x. UTP. ISSN 0122-1701*
- [3] JPS Argentina (2007). "Seminario sobre técnicas predictivas y proactivas en mantenimiento, Teoría aplicada y solución de casos reales". *JPS Argentina tecnología en confiabilidad*
- [4] Robichaud J. M. y Eng P.(2009) "Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis" Bretech Engineering Ltd., 70 Crown Street, Saint John, NB Canada E2L 3V6
- [5] Sinais España, Ingeniería de Mantenimiento (2013). "Curso de análisis de vibraciones" tomado de <http://www.sinais.es/Recursos/Curso_vibraciones/motores/diagnostico_motores.html>(28/4/2015)