



Diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo y a la desalineación

Diagnosis of early failures of bearing within mechanisms susceptible to unbalance and misalignment

María Eugenia Moreno-Sánchez^{1a}, Junes Abdul Villarraga-Ossa^{1b}, ^{1a} Ricardo Moreno-Sánchez^{1c}

¹Grupo de Diseño Mecánico, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: ^a eugenia.moreno@udea.edu.co, ^b junes.villarraga@udea.edu.co, ^c ricardo.moreno@udea.edu.co

Recibido: 9 junio, 2018. Aceptado: 14 noviembre, 2018. Versión final: 10 febrero, 2019.

Resumen

En este trabajo se estudian los efectos que el desbalanceo y la desalineación causan en los parámetros de vibración de aceleración, comúnmente utilizados en el diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos. Esta investigación proporciona un parámetro de diagnóstico que se llamó AFC. Las medidas del parámetro AFC son sensibles a la existencia del defecto, pero la desalineación, el desequilibrio y sus interacciones no causan un efecto estadísticamente significativo en sus valores. El propósito de encontrar este parámetro es evitar falsas alarmas o el encubrimiento de fallas en rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo y a la desalineación. Entre los métodos estudiados se encuentran el análisis espectral; el estudio de valores globales de la medición de la aceleración con diferentes procesamientos, como la detección de alta frecuencia HFD; la envolvente de aceleración ENV; la curtosis K; el factor de cresta FC; la asimetría de la señal Ske, entre otros parámetros propuestos por los autores. Para realizar la evaluación de los parámetros se construyó un banco experimental y se diseñó un experimento factorial multinivel (2^3), en el que los factores fueron daño del rodamiento, desequilibrio y desalineación. Se realizaron 3 réplicas (24 unidades experimentales).

Palabras clave: diagnóstico de fallas en rodamientos; desbalanceo; desalineación; medidas de vibración.

Abstract

In this paper, we study the unbalance and misalignment effect on the acceleration vibration parameters commonly used in the diagnosis of early bearing failures. This research provides a diagnostic parameter called AFC. Measurements of the AFC parameter are sensitive to the existence of the defect; however, misalignment, unbalance and their interactions do not cause a statistically significant effect in their values. The purpose of finding this parameter is to avoid false alarms or cover up faults in bearings within mechanisms susceptible to unbalance and misalignment. Among the methods studied, there are the spectral analysis, the study of global values of the acceleration measurement with different processing like the high-frequency detection HFD, the acceleration envelope ENV, the kurtosis K, the crest factor FC and the asymmetry of the signal Ske, among other parameters proposed by the authors. In this regard, an experimental device was built, and a multilevel factorial experiment (2^3) was designed where the factors were bearing damage, unbalance and misalignment. Three replicates were performed (24 experimental units).

Keywords: diagnosis of bearing failures; unbalance; misalignment; vibration measurements.



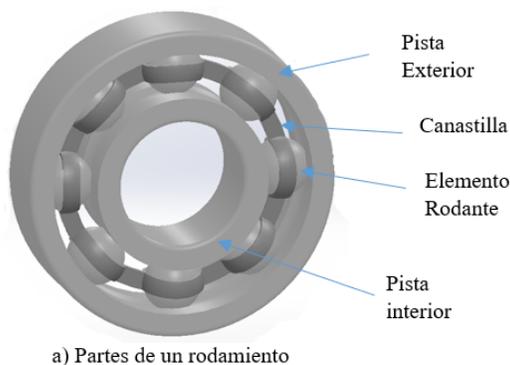
1. Introducción

Dentro del mantenimiento predictivo se presta especial interés a las fallas en rodamientos, debido a su alto costo y al interés de aprovechar la mayor parte de su vida útil [1]. La falla de un rodamiento es una de las principales causas de daños en la maquinaria rotativa. Estas fallas pueden ser catastróficas y pueden ocasionar tiempos de inactividad costosos [2], [3], [4]. En los motores eléctricos el 41 % de las averías prematuras son atribuidas a fallas en los rodamientos [5]. Debido a lo sensible de algunos parámetros utilizados en la evaluación de la condición de rodamientos, en la práctica se ha evidenciado que pueden generarse falsas alarmas de rodamientos, a causa de cambios en la alineación, desbalanceo o lubricación. Por tal motivo, es importante establecer modelos de diagnóstico que tengan en cuenta alteraciones en la condición de operación, como la desalineación y el desbalanceo.

2. Antecedentes

2.1. Modo de falla de los rodamientos

Los rodamientos pueden ser considerados como un elemento complejo de la máquina, cuya función es transmitir carga de una parte en movimiento a otra parte estacionaria o con movimiento relativo entre ellas. Para poder realizar esta función, el rodamiento cuenta con cinco componentes, la pista exterior, la pista interior, los elementos rodantes y la canastilla (véase figura 1). El comienzo de una falla podría empezar por alguno de estos elementos, y dependiendo de donde comience la falla, esta puede crecer lenta o aceleradamente hasta la pérdida total de la función del rodamiento.



La fatiga de contacto rodante en la superficie y la fatiga subsuperficial son dos formas de fallas típicas de los rodamientos, ambos se deben a los esfuerzos de contacto que se presentan en la rodadura. La primera es una falla que comienza en la superficie y que se propaga por el efecto de paso continuo de los elementos rodantes, la segunda es una falla iniciada por debajo de la superficie donde los esfuerzos de contacto tangenciales son máximos y los esfuerzos cíclicos causan el crecimiento de la grieta hasta el exterior de la superficie. Desde ahí la grieta crece hasta generar el desconchado de la superficie, y crecerá por el paso continuo de los elementos rodantes (véase figura 1b).

Todo factor que aumente las cargas en la zona de contacto, diferente a la fuerza de trabajo, colabora en la aparición de una falla temprana, como es el caso de la desalineación, el desbalanceo, la contaminación, las fuentes de vibración y la viscosidad del lubricante [6]. Al analizar todas las variables que inciden en la vida de los rodamientos, y contemplar los riesgos de equivocarse al estimar la vida de servicio, se llega a la conclusión de que es importante afinar los métodos de diagnóstico predictivo o por condición de fallas tempranas en rodamientos.

2.2. Análisis de fallas en rodamiento utilizando vibraciones mecánicas

Los rodamientos son elementos que generan vibración. Cuando el elemento rodante del rodamiento pasa por la zona de carga, se genera un pequeño impacto, que hace que los rodamientos se comporten como una campana en resonancia. Esto ocurre tanto en los rodamientos en buen estado como en los rodamientos deteriorados por el uso

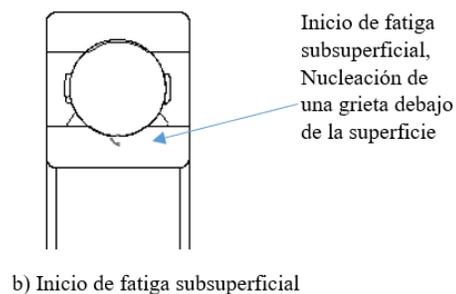


Figura 1. (a) Partes del rodamiento. (b) Inicio de fatiga subsuperficial. Fuente: elaboración propia.

o por falla. El estudio de las vibraciones mecánicas es la técnica más empleada para el diagnóstico de fallas en rodamientos, y se usa para monitorear el desgaste o la detección de fallas localizadas en los rodamientos. Además, ayudan a diagnosticar problemas en otros elementos mecánicos o problemas estructurales, como desbalanceo, desalineación y solturas, entre otros [7].

2.2.1. Detección de alta frecuencia [HFD]

A fin de obtener el parámetro HFD, se realiza un filtro paso alto (5 kHz - 60 kHz) a la señal, para dejar en la medida solo los picos generados por pequeños defectos. HFD generalmente se mide en Gs (gravidades) con valores pico o RMS [7].

2.2.2. Envolvente de aceleración [ENV]

El objetivo del parámetro conocido como envolvente de aceleración es filtrar las bajas frecuencias y detectar los componentes repetitivos relacionados con los impactos generados por los defectos en los rodamientos en el rango de las frecuencias típicas de fallo. Este parámetro ha mostrado ser útil para determinar el progreso del fallo en rodamientos [8].

SKF patentó esta técnica y ha publicado artículos en los que muestra su efectividad para identificar fallos, aun en rodamientos que trabajan a baja velocidad [8].

SKF Condition Monitoring publicó, en el año 2003, un artículo en el cual proporciona una guía para la asignación de alarmas, utilizando valores globales de ENV. En esta investigación se hallan estadísticamente fórmulas para encontrar niveles de alarma y peligro, utilizando bases de datos de mediciones en motores y bombas que giran a 3.600 rpm. Esta carta es una recomendación general y siempre se recomienda fijar los niveles de severidad de acuerdo con el análisis de una tendencia en el tiempo del nivel de vibración [9].

2.2.3. Asimetría de la señal (*skewness*) Ske

La asimetría de la señal se calcula a partir de la forma de onda en el tiempo, y da información sobre el grado de simetría de la señal con respecto a su valor medio. Se espera que la simetría de la onda cambie al aparecer un defecto [10].

2.2.4. RMS de la señal de aceleración

RMS es la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de la señal, y ayuda a identificar la desviación estándar de la señal. Se han realizado estudios donde se

ha encontrado fuerte correlación con el tamaño del defecto [11], [12], [13].

2.2.5. Curtosis K

La curtosis es el cuarto momento normalizado de la señal. El momento es normalizado por la raíz cuadrada de la varianza. Es una medida relacionada con la cantidad y la amplitud de picos presentes en la señal. Estudios han demostrado que el valor de la curtosis tiene normalmente un valor de 3, y aumenta conforme aumenta el defecto [11].

2.2.6. Factor de cresta

El factor de cresta es la medida del pico máximo, dividida por el valor normalizado (por la RMS) de la señal. Su valor aumenta con la presencia de pocos picos de gran amplitud, causados por daños localizados en el rodamiento; el numerador se vuelve de alto valor por la magnitud del pico y el denominador toma un bajo valor al tener relativamente pocos picos [12].

2.3. Evolución de la falla en un rodamiento en espectros de vibración

En la tabla de diagnóstico espectral, realizada por la asociación de técnicos de Charlotte, se plantean cuatro etapas de daño en los rodamientos. En la primera y la segunda etapa del daño, los técnicos exponen que se evidencia el aumento de vibración por encima de 30 kHz en los espectros de aceleración, y esto puede evidenciarse con el seguimiento de parámetros como HFD [13].

En los espectros de frecuencia de la onda de aceleración pueden identificarse las frecuencias de falla de los componentes de los rodamientos. Además, se puede realizar el seguimiento del incremento de las amplitudes en estas frecuencias específicas, para hacer seguimiento del aumento en la severidad de la falla [14], [15].

3. Metodología del diseño experimental

Se realizó un diseño multifactorial 2^3 , las variables respuesta fueron los diferentes parámetros de diagnóstico obtenidos de la onda de aceleración de la vibración, a saber: ENV, HFD, RMS, FC, K, Ske. Los factores fueron desalineación, desbalanceo y defecto. Los niveles de presencia del factor se pueden observar en la Tabla 1.

La notación utilizada para el diseño es la siguiente (defecto, desalineación, desbalanceo), por ejemplo: (0,0,0). Respuesta para los tres factores en el nivel inferior.

(0,0,1.). Respuesta para defecto en el rodamiento y desalineación en el nivel inferior en el nivel superior.

(1,1,1). Respuesta para los tres factores en el nivel superior.

Tabla 1. Selección de los niveles para el experimento.

Nivel	Defecto en el rodamiento	Niveles desbalanceo 1x Espectro horizontal	Nivel desalineación. Valor global RMS de la onda de aceleración en dirección axial
0	Sin defecto	0.48 m/s ²	1.07 m/s ² , 0 mm de desalineación entre apoyos
1	Defecto de 1 mm en la pista exterior	0.9 m/s ²	1.28 m/s ² , desalineación medida con galgas de 0.6 mm entre soportes

Fuente: elaboración propia.

El rodamiento utilizado es de referencia 6305- 2RS/C3. El defecto en el rodamiento se generó perforando la pista exterior en todo el centro hasta el canal de rodadura, utilizando la técnica de microperforado por electroerosión (véase Figura 2).

Se seleccionó la falla en pista exterior porque esta falla es la que suele aparecer primero en los rodamientos donde la pista exterior es estacionaria y la interior es rotatoria. Esto se debe a que la misma sección de esta pista está siempre en la zona de carga del rodamiento, mientras que las demás partes, como los elementos rodantes y la pista interior, entran y salen de la zona de carga.

Para variar la desalineación y el desbalanceo, se construyó un banco de pruebas que se observa en la figura 3.

Los aspectos más importantes en el diseño del banco fueron los siguientes:

- Permitir desmontar fácilmente el rodamiento sin modificar tensión de correa, para lo cual uno de los apoyos tiene dos rodamientos.
- La fijación de las pistas del rodamiento al eje y al alojamiento es axial y los ajustes con el eje y el alojamiento son deslizantes, esto con el objetivo de mantener los ajustes constantes y

que no dependieran del número de veces en que se monta y desmonta el rodamiento en el eje.

- Tornillos de ajuste para desplazar los apoyos de los rodamientos a ambos lados y permitir una desalineación controlada.
- Facilidad para agregar masas para el desbalanceo controlado.



Figura 2. Perforaciones generadas en los rodamientos en la pista exterior. Fuente: elaboración propia.

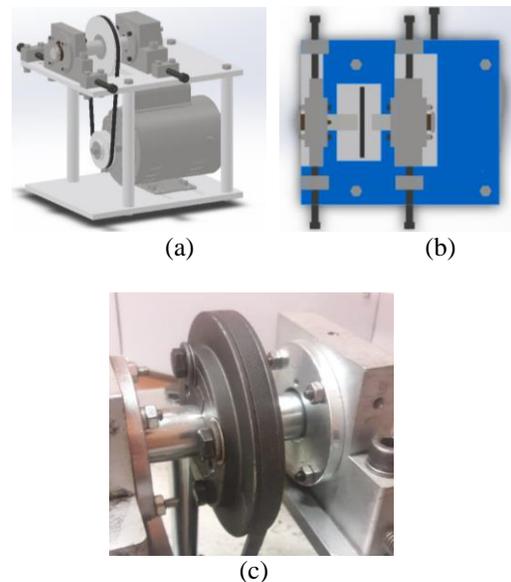


Figura 3. Partes del banco de experimentación: (a) isométrico del banco, (b) imagen superior de los tensores para generar desalineación. Fuente: elaboración propia.

Para este experimento el tamaño de defecto alto se tomó de 1 mm, el nivel de desbalanceo alto se eligió poniendo peso en la plega, de forma que en los espectros en dirección vertical se evidenciara un incremento en la

frecuencia fundamenta 1X de más del doble (véase figura 4). Para el nivel alto de la desalineación se desalinearon los soportes hasta incrementar la vibración global axial entre un 10 y 12 %.

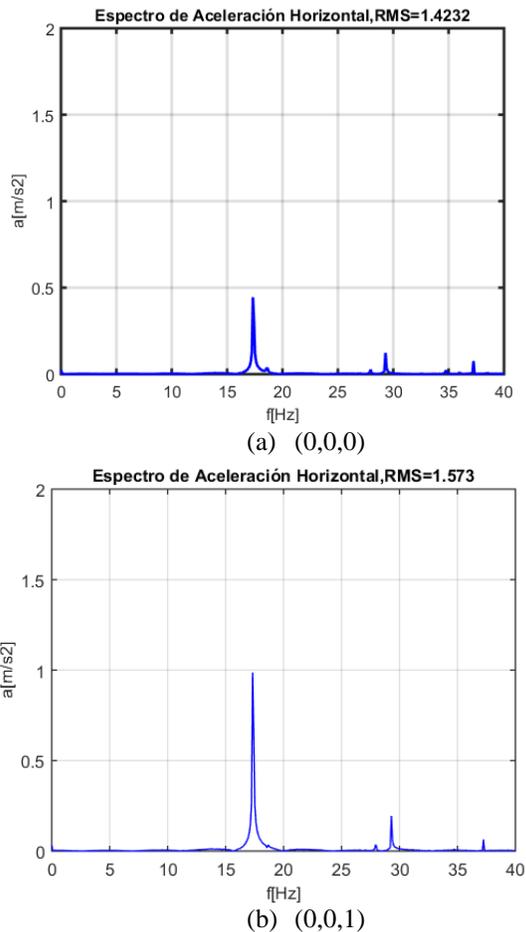


Figura 4. Espectros tomados como ejemplo para indicar modificación vibracional al variar el nivel de desbalanceo: a) desbalanceo nivel 0 y b) desbalanceo nivel 1. Fuente: elaboración propia.

Los equipos utilizados para adquirir la señal fueron una tarjeta de adquisición de datos National Instruments, referencia NI 9234, en un chasis NI cDAQ-9172 y tres acelerómetros de propósito general de sensibilidad 100 mV/g. La interfaz de adquisición y el procesamiento de los datos se realizó en Python®. La calibración de los acelerómetros utilizados para la adquisición de datos se realizó utilizando un *shaker*, marca Hardy Instruments, con una frecuencia de 100 Hz y una amplitud de 9.8 m/s² (valor RMS).

En la Figura 5 se muestra una foto del banco construido con el sistema de adquisición.



Figura 5. Fotografía del banco de pruebas con el sistema de adquisición. Fuente: elaboración propia.

Los valores globales analizados se obtuvieron a partir de procesamientos matemáticos que se realizan a la señal de aceleración y se esquematizan en la figura 6.

4. Resultados

4.1. Análisis de los espectros de frecuencia de la aceleración

En Figura 7 se muestra la afectación que el desbalanceo y la desalineación hacen en el espectro de un rodamiento con falla.

Los espectros de frecuencia en aceleración y envolvente cambian al introducir cambios de condición, como desalineación y desbalanceo. En el espectro de aceleración se evidencia la disminución de la amplitud en el valor de la frecuencia de falla BPFO. Se puede afirmar que al introducir desbalanceo y la desalineación al sistema es posible encubrir el crecimiento del defecto. El espectro en HFD aumenta las amplitudes en las frecuencias de fallo al introducir desbalanceo y desalineación.

4.2. Análisis de valores globales para el experimento

En Figura 8 se relacionan los diagramas Pareto, obtenidos para los efectos de los factores en las variables respuesta, y se relaciona el R² del modelo. El desbalanceo afecta los valores globales de envolvente de aceleración disminuyéndolos, y para los valores de HFD el desbalanceo tienden a aumentar estos valores.

Parámetros globales como RMS, Ske, K son afectados por los factores, como desbalanceo y desalineación, con más efecto que el defecto en el rodamiento, mientras que el factor de cresta se ve afectado especialmente por el desbalanceo.

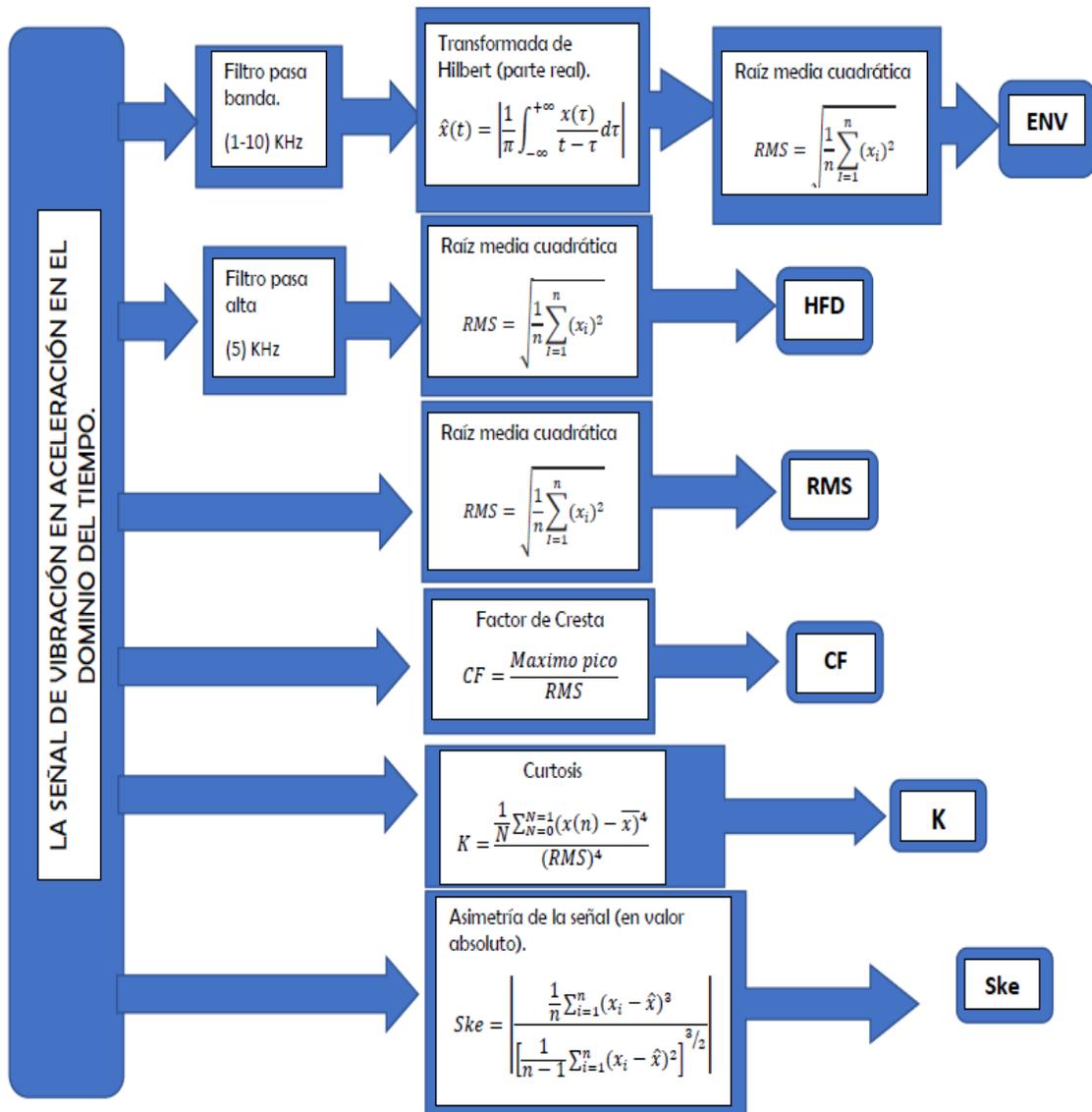


Figura 6. Procesamiento para obtener los valores globales. Fuente: elaboración propia.

Delos parámetros contemplados hasta ahora, el filtro de alta frecuencia HFD resulta ser el más indicado para la detección de fallos en rodamientos, dado que es estadísticamente más significativa la afectación del defecto en el rodamiento que la afectación que pueden causar el desbalanceo y la desalineación.

Las interacciones del defecto con el desbalanceo tienen también efecto estadísticamente significativo para este parámetro, lo que podría activar falsas alarma mientras que la desalineación tiende a disminuir la respuesta y podría encubrir el defecto si este existe.

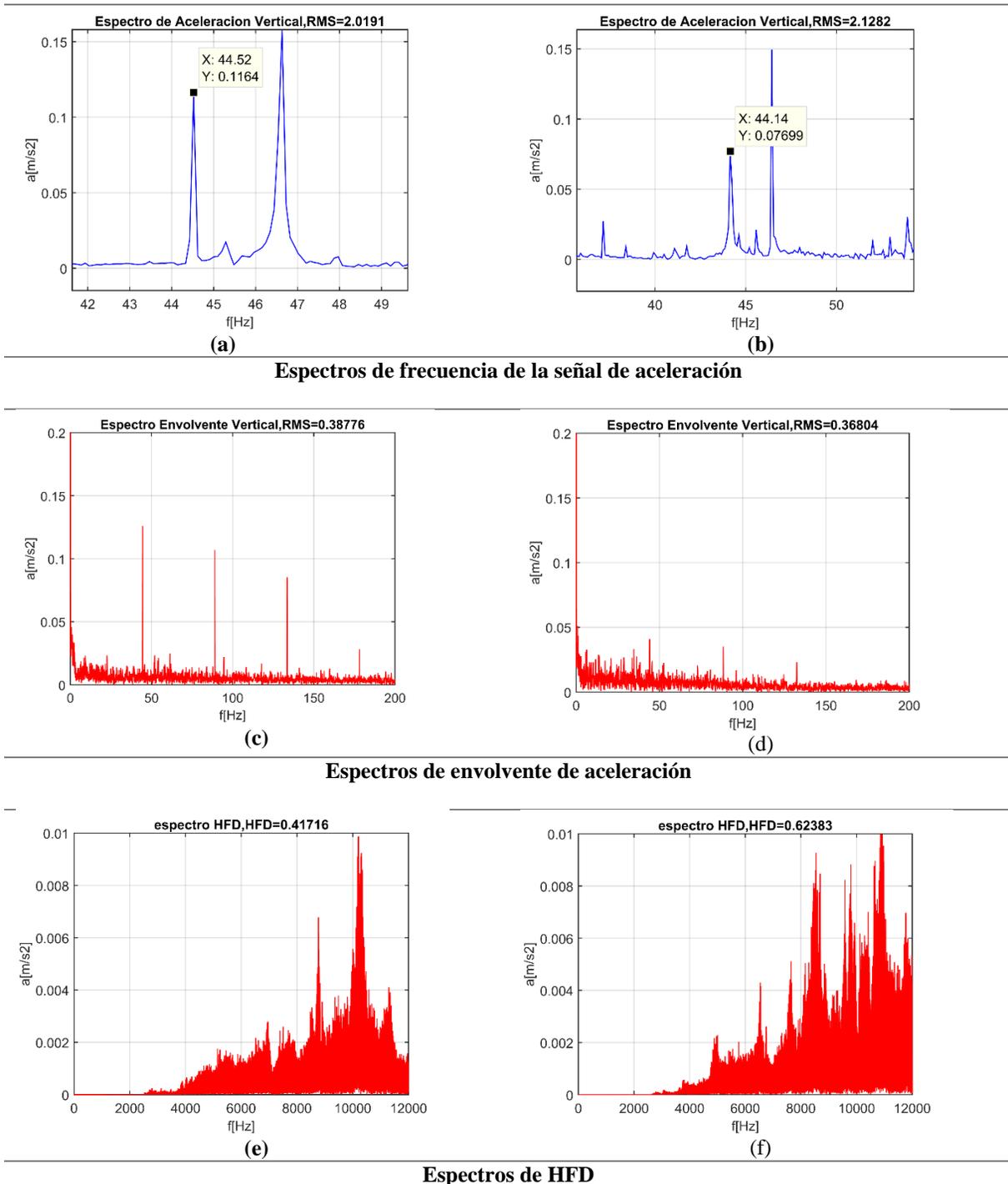


Figura 7. Comparación de espectros de falla de rodamientos al introducir desbalanceo y desalineación al sistema. (a) Espectro de frecuencia de aceleración (1,0,0), (b) espectros de frecuencia de aceleración (1,1,1), (c) espectro de frecuencia de envolvente de aceleración (1,0,0), (d) espectro de frecuencia de envolvente de aceleración (1,1,1), (e) espectro de frecuencia de HFD (0,0,0), (f) espectro de HFD (1,1,1). Fuente: elaboración propia.

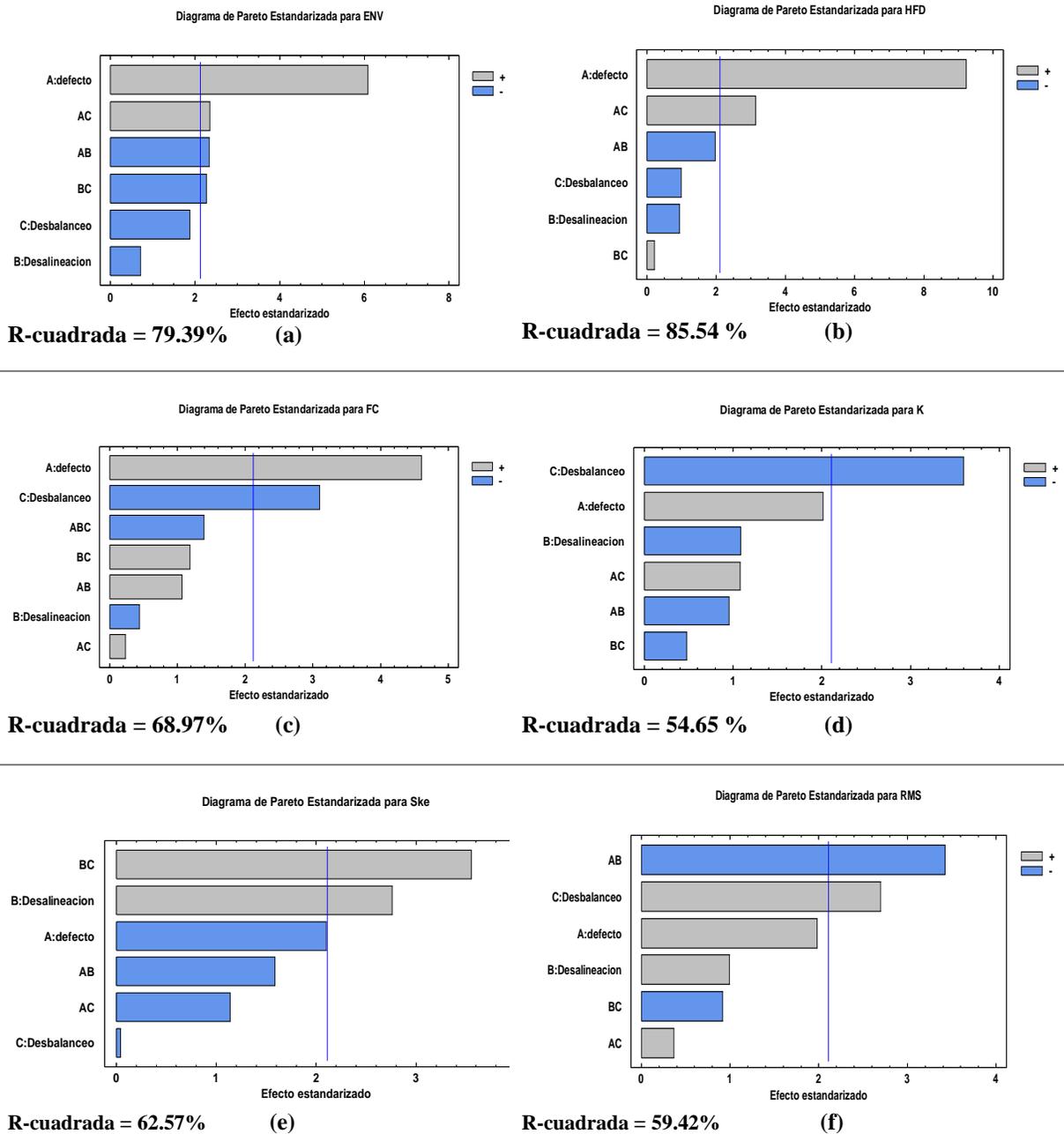


Figura 8. Diagrama Pareto estandarizado para los efectos de los factores principales y sus interacciones sobre las variables estudiadas. (a) Diagrama Pareto estandarizado para ENV, (b) diagrama Pareto estandarizado para HFD, (c) diagrama Pareto estandarizado para FC, (d) diagrama Pareto estandarizado para K, (e) diagrama Pareto estandarizado para Ske, (f) diagrama Pareto estandarizado para HFD.

5. Discusión

Con base en el análisis espectral realizado a la envolvente de la aceleración, se decidió obtener nuevas variables respuesta aplicando un filtro a la envolvente de aceleración cerca de la frecuencia de falla. En este caso, como la frecuencia de falla es BPFO = 44.52, se escogió el filtro pasabanda entre 43 y 45 Hz que se llamó (band2). En la figura 9 se especifica cómo se obtuvieron las nuevas variables.

Los diagramas de Pareto estandarizados para RMSenvband2, FCenvband2, Kurtosisenvband2, Peakenvband2 se encuentran en la Figura 10. Después de analizar este resultado, se ensayó un parámetro que reuniera el factor de cresta de la envolvente en la banda 43 Hz a 45 Hz, pero que le diera más peso al valor del pico. El parámetro se llamó AFC (factor de cresta ajustado), el cual se obtiene a partir de la ecuación (1).

$$AFC = \frac{\ln(\text{peakenvband2})^2}{\text{RMSenvband2}} \tag{1}$$

Donde:

Peakenvband2 = valor máximo del pico de la envolvente de aceleración, filtrando la señal cerca a la frecuencia del defecto. Véase en la figura 8 el proceso de obtención matemática de esta variable.

RMSenvband2 = valor RMS de la envolvente de aceleración en la banda cerca al defecto. Véase en la figura 8 la obtención matemática de esta variable.

En la figura 11 se encuentra el diagrama de Pareto del nuevo factor propuesto AFC para el monitoreo de rodamientos de equipos susceptibles al desbalanceo y la desalineación.

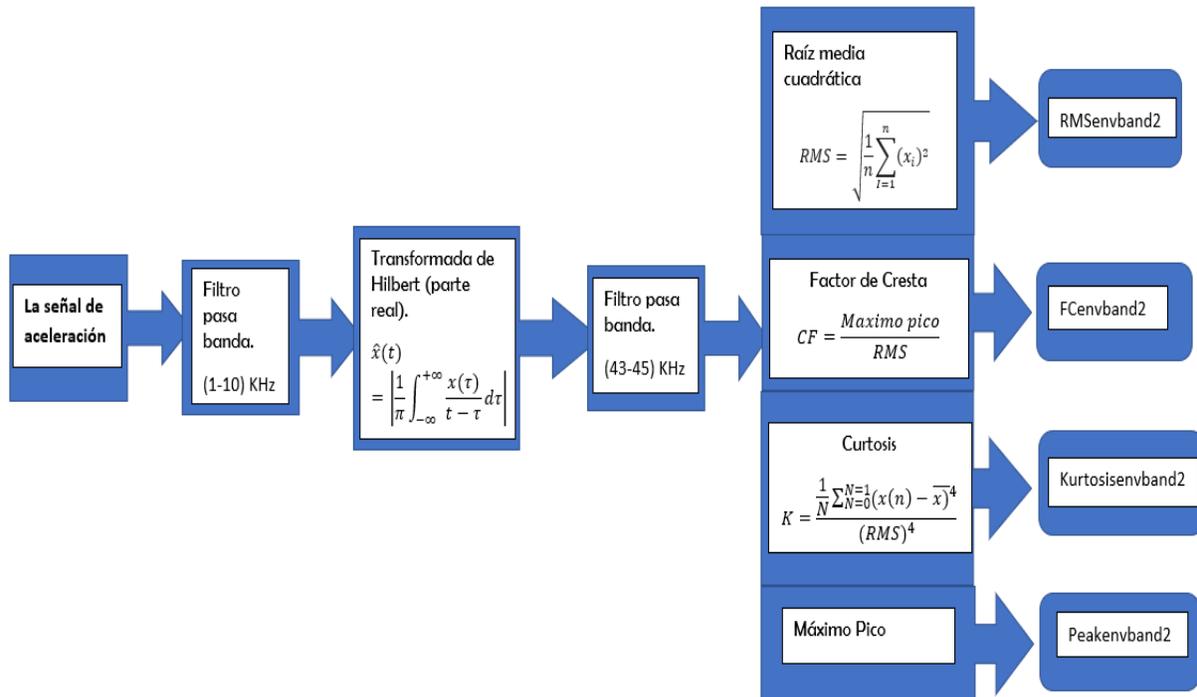


Figura 9. Proceso matemático para obtener las nuevas variables respuesta. Fuente: elaboración propia.

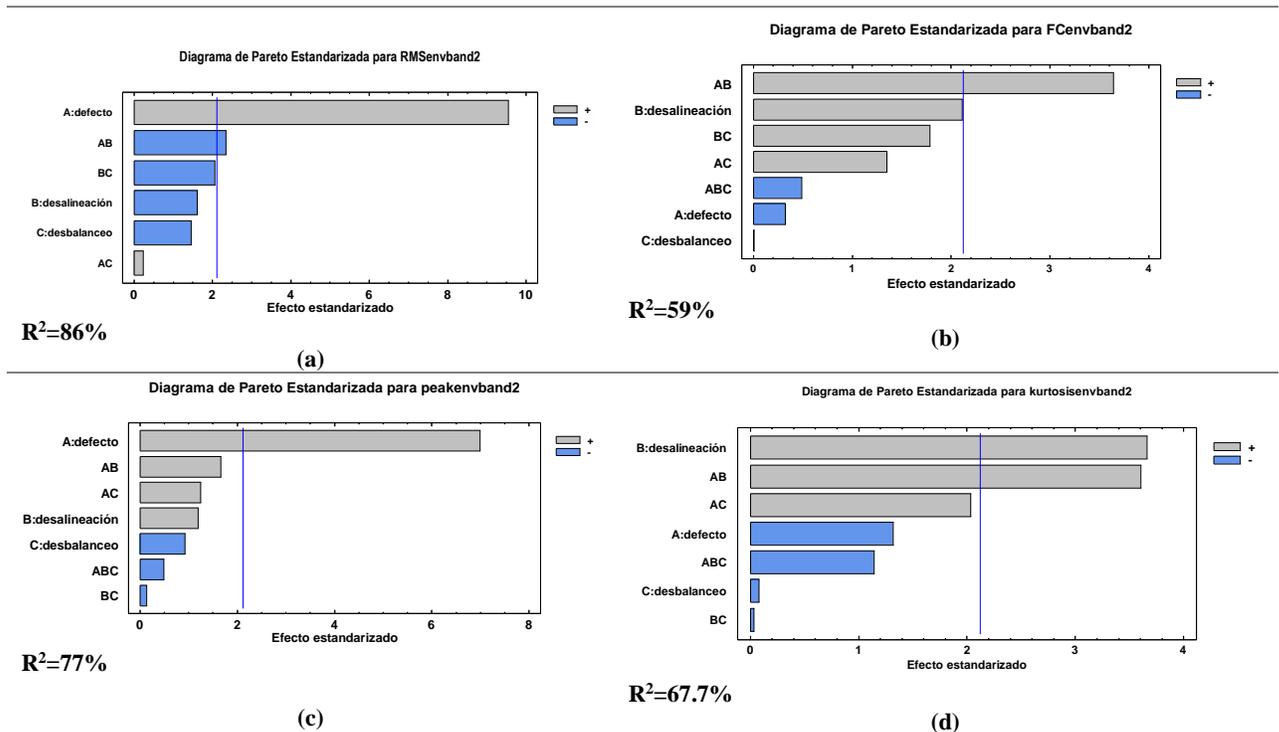


Figura 10. Diagramas de Pareto estandarizados de los efectos para las nuevas variables propuestas. Fuente:

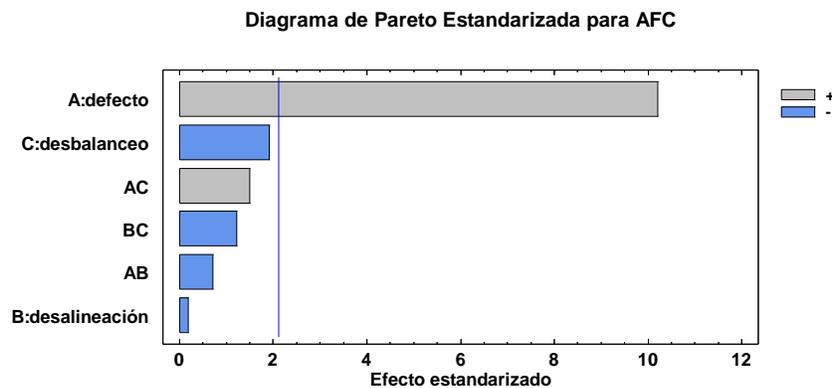


Figura 11. Diagrama Pareto estandarizado para el parámetro AFC de $R^2 = 86.7\%$. Fuente: elaboración propia.

6. Conclusión

En este estudio se analizó la eficacia de diversos parámetros existentes en la detección de fallas localizadas en rodamientos. Parámetros globales comúnmente usados, como RMS en aceleración, RMS en la envolvente, RMS en señal filtrada de alta frecuencia, factor de cresta, curtosis, *skewness* y amplitudes en las frecuencias de defecto de los espectros de aceleración, no

permitieron predecir con certeza los fallos en los rodamientos, debido a que el desbalanceo y la desalineación también tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre estos parámetros, lo que ocasionó falsas alarmas o impidió la correcta detección de los fallos.

El parámetro HFD, dentro de los parámetros existentes, resultó ser el más indicado para la detección de fallos en

rodamientos en mecanismos susceptibles a la desalineación y el desbalanceo, ya que es estadísticamente más significativa la afectación del defecto en el rodamiento que la afectación que puede hacer el desbalanceo y la desalineación. Las interacciones dobles del defecto con el desbalance en el parámetro HFD aumentan la respuesta y no encubre el defecto si este existe. Sin embargo, la desalineación tiende a disminuir el valor encubriendo el defecto.

En esta investigación se propuso un parámetro global muy sensible al defecto del rodamiento, que fue llamado AFC y puede predecir por sí solo el defecto con una correlación alrededor del 86 %, y para el cual es estadísticamente insignificante el efecto del desbalanceo y la desalineación.

La utilización del parámetro propuesto AFC en conjunto con HFD y el análisis espectral de aceleración permiten predecir fallos en rodamientos con probabilidades mayores al 90 %.

Recomendaciones

El parámetro propuesto para el diagnóstico de fallas de rodamientos susceptibles al desbalanceo y la desalineación AFC demostró ser útil para evitar falsas alarmas o el encubrimiento del defecto por esas anomalías. Se recomienda ampliar el estudio involucrando cambios en la lubricación como otro factor.

Referencias

- [1] C. Scheffer y P. Girdhar, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", en *Mach. Vib. Anal. Predict. Maint.*, Elsevier, 2004, pp. 115-124.
- [2] T. Williams, X. Ribadeneira, S. Billington, y T. Kurfess, "Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 5, pp. 979-993, 2001. doi: 10.1006/mssp.2001.1418
- [3] F. Cong, J. Chen, G. Dong, y M. Pecht, "Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis", *J. Sound Vib.*, vol. 332, no. 8, pp. 2081-2097, 2013. doi: 10.1016/j.jsv.2012.11.029
- [4] B. P. Graney y K. Starry, «Rolling element bearing analysis crosses threshold», *Mater. Eval.*, vol. 70, no. 1, pp. 78-85, 2011.

[5] A. Castellino, P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, y G. García, "Diagnóstico de fallas en los rodamientos de motores eléctricos empleando variables eléctricas", en *XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, 2007, p. 6.

[6] I. El-Thalji y E. Jantunen, "Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings", *Tribol. Int.*, vol. 84, pp. 90-99, 2015. doi: 10.1016/j.triboint.2014.11.021

[7] H. Sanchez, F. Nova, y J. Madrigal, "Metodología para el balanceo de rotores empleando un analizador de vibraciones", *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 291-308, 2018. doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018025

[8] M. Barratt, "Low speed bearing monitoring a case study of low speed bearing monitoring in a paper board plant", *J. SKF @ptitud Exch.*, 2002.

[9] J. Wei, "General alarm Guidelines for Enveloped Acceleration Measurements", *SKF Reliability Syst.*, 2003.

[10] H. R. Martin y F. Honarvar, "Application of statistical moments to bearing failure detection", *Appl. Acoust.*, vol. 44, no. 1, pp. 67-77, 1995. doi: 10.1016/0003-682X(94)P4420-B

[11] D. Dyer y R. M. Stewart, "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis", *J. Mech. Des.*, vol. 100, no. 2, pp. 229-235, 1978. doi: 10.1115/1.3453905

[12] N. Tandon y B. Nakra, "Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring", *Inst. Eng. (India), Journal, Mech. Eng. Div.*, n.º 0020-3408, pp. 271-282, 1993.

[13] Técnicos Asociados de Charlott, "Cartas de Diagnóstico". [En línea]. Disponible en: [http://es.scribd.com/doc/58748416/carta de Charlotte](http://es.scribd.com/doc/58748416/carta-de-Charlotte). [Accedido: 27-oct-2016].

[14] S. Kulkarni y A. Bewoor, "Vibration based condition assessment of ball bearing with distributed defects", *J. Meas. Eng.*, vol. 4, no. 2, 2016.

[15] N. Tandon, "A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings", *Measurement*, vol. 12, no. 3, pp. 285-289, 1994. doi: 10.1016/0263-2241(94)90033-7