



Estudio experimental sobre la identificación de defectos en rodamientos de bolas mediante el análisis de vibraciones de baja frecuencia

José Luis Aguirre Martínez¹, Gregorio Munuera Saura²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales y fabricación, UPCT, jose Luis.aguirre@upct.es

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales y fabricación, UPCT, gregorio.munuera@upct.es

Este trabajo constituye la continuación de otro titulado “Análisis de la vibración de baja frecuencia en el proceso de degradación de rodamientos de bolas” presentado en el XXIV CNIM celebrado en Las Palmas de Gran Canaria en el año 2023.

El objetivo de esta nueva investigación es contrastar algunas de las conclusiones obtenidas en el estudio previo y explorar la posibilidad de diferenciar, a través del análisis de vibraciones de baja frecuencia, la degradación generalizada de un rodamiento de bolas de otros defectos que puedan coexistir en el mismo equipo, tales como holgura, desalineación o deformación del eje.

Para ello, se sometieron a ensayo dos rodamientos de bolas hasta su fallo, en condiciones ambientales controladas que aceleran su envejecimiento y degradación. Durante las pruebas, el equipo también experimentó otros defectos.

Las mediciones sobre los rodamientos se realizaron utilizando técnicas de verificación ampliamente aceptadas, como ultrasonidos (US) y espectros de vibración de alta frecuencia (SPV-HF). Además, se llevó a cabo un seguimiento de las vibraciones de baja frecuencia (por debajo de 20 Hz) y se registraron videos de alta velocidad tanto del eje como de los rodamientos.

El resultado obtenido del ensayo se analiza comparando los valores medidos con las imágenes de alta velocidad, procesadas mediante filtros de magnificación de movimiento en bandas de frecuencia, y con el estado de degradación de los elementos evaluados.

1. Introducción

Los rodamientos de bolas son componentes esenciales en los equipos dinámicos rotativos (EDRs), siendo su correcto funcionamiento crucial para la operatividad de las máquinas. El fallo de un rodamiento puede tener consecuencias catastróficas, tanto en términos de funcionalidad como de seguridad, además de implicar elevados costos asociados a reparaciones. Por ello, es fundamental monitorizar y diagnosticar el estado de los rodamientos durante su funcionamiento para prevenir fallos imprevistos.

Actualmente, las técnicas más utilizadas para la verificación del estado de los rodamientos están basadas en la medida de los ultrasonidos (US), los impulsos de choque (SPM) y el espectro de vibraciones de alta frecuencia (SPV-HF). Todas estas técnicas se centran principalmente en seguimiento de vibraciones de alta frecuencia emitidas por los rodamientos durante su funcionamiento, y han sido ampliamente analizadas y contrastadas en multitud de estudios. Sin embargo, existe una escasa bibliografía que relacione las vibraciones de baja frecuencia con el estado de los rodamientos.

Estudios previos realizados por el grupo de investigación en diseño, mantenimiento y disponibilidad de sistemas mecánicos de la UPCT han observado que los defectos generalizados en los rodamientos pueden provocar un aumento en ciertas bandas de vibración de baja frecuencia. En un trabajo anterior [1], se verificó la relación entre el deterioro de rodamientos de bolas y el aumento de las vibraciones de baja frecuencia durante el proceso de degradación acelerada y generalizada del rodamiento. Los resultados indicaron que el desgaste de los rodamientos genera un aumento en las bandas de vibración de baja frecuencia, aunque no de manera tan temprana ni tan significativa como en las bandas de alta frecuencia.

El objetivo del presente estudio es corroborar los resultados obtenidos en el trabajo anterior y evaluar si el nivel de vibración de baja frecuencia está influenciado por otros defectos del sistema mecánico, como la desalineación, la deformación del eje o la degradación del soporte del rodamiento. Este estudio es de especial relevancia para la industria, ya que podría aportar nuevos indicadores que ayuden a diagnosticar de forma más evidente el estado de rodamientos y así aumentar la fiabilidad de los EDRs

Desde la publicación del estudio anterior [1], no se han encontrado nuevos trabajos que analicen las vibraciones de baja frecuencia para conocer el estado de los rodamientos. Sin embargo, se han hallado investigaciones que estudian las señales de vibración para el diagnóstico de fallos en rodamientos. En [2], se analiza la dificultad del diagnóstico cuando existen sistemas de transmisión o perturbaciones de componentes cercanos que introducen un ruido de fondo que impide determinar con fiabilidad el estado del rodamiento. En [3, 4], se presentan fusiones de técnicas de análisis en tiempo-frecuencia con aprendizaje profundo y métodos de extracción de curvas para diagnosticar fallos de rodamientos a velocidades variables y con niveles de ruido cambiantes. En [5], se proporciona una revisión exhaustiva de los métodos de diagnóstico de fallos existentes hasta la fecha para los rodamientos.

Este trabajo plantea la hipótesis de que las vibraciones de baja frecuencia aumentan en presencia de defectos generalizados en los rodamientos y de otros defectos mecánicos. Las preguntas a responder en este estudio incluyen: ¿Existe una correlación significativa entre el grado de defecto del rodamiento y el nivel de vibraciones de baja frecuencia? ¿Son las vibraciones de baja frecuencia sensibles a otros defectos mecánicos, como la desalineación, la deformación del eje o la degradación del soporte del rodamiento? ¿Podría utilizarse el nivel de amplitud de ciertas bandas de baja frecuencia como indicador del estado de un rodamiento?

Para responder a estas preguntas, se midieron las vibraciones y los ultrasonidos en dos rodamientos de bolas idénticos, sometidos simultáneamente a las mismas condiciones de funcionamiento, pero con defectos de diferente naturaleza en cada uno.

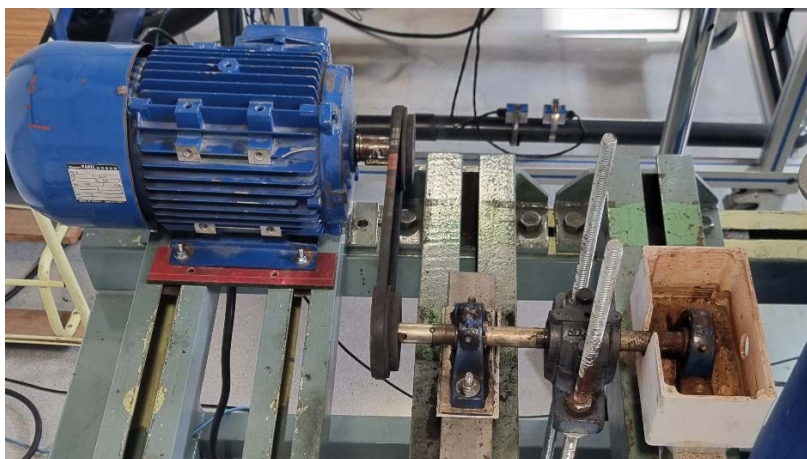


Figura 1: Imagen del banco de ensayos.

2. Banco de ensayos

2.1. Sistema mecánico

El banco de ensayos utilizado en este trabajo es similar al descrito en [1], pero con una modificación en la forma en que se introduce el movimiento al eje sobre el cual se encuentran los rodamientos a estudio. En el experimento anterior, la transmisión entre el motor y eje de ensayo se realizaba mediante una doble junta Cardan; en este caso, la transmisión se realiza mediante una correa trapecial cuya configuración se muestra en la Figura 1.

En la Figura 2 se presenta el modelo en *SolidWorks*® del banco de ensayos. Los elementos principales se designan con números en la imagen. En la Tabla 1 se describe cada uno de ellos.

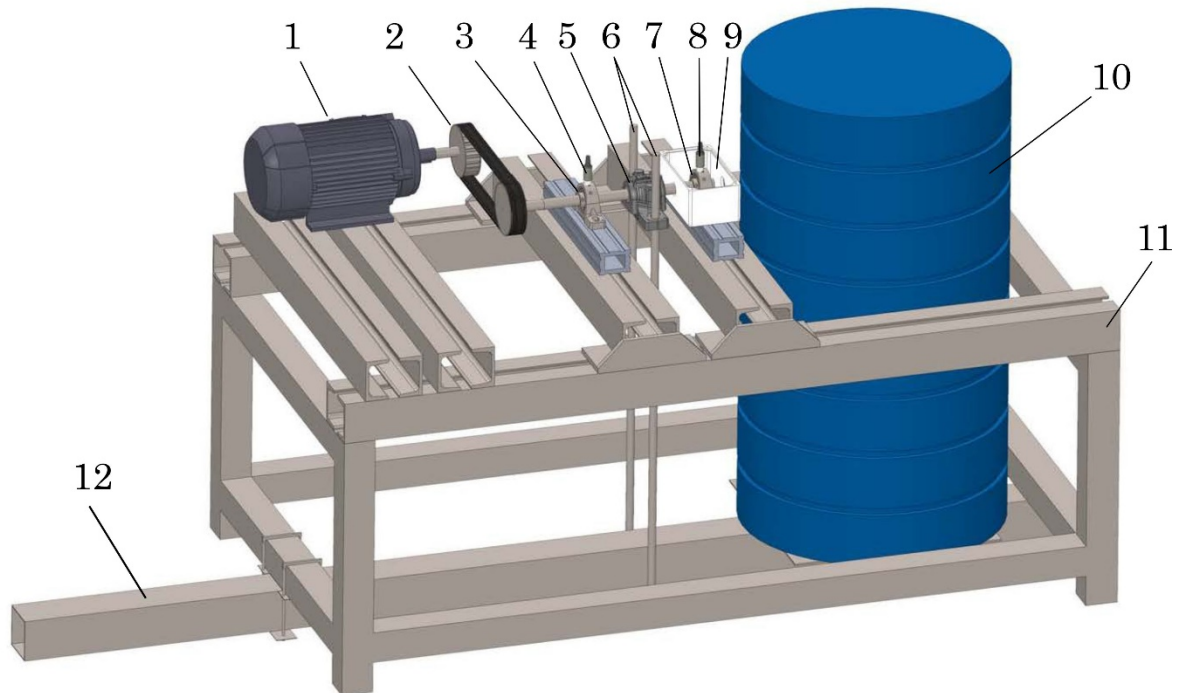


Figura 2: Modelo del banco de ensayos con sus elementos principales numerados.

Tabla 1: Elementos del banco de ensayo.

Elemento	Descripción
1	Motor eléctrico asíncrono de 2.2 kW y 1420 rpm.
2	Transmisión por correa trapecial de la marca SKF compuesta por dos poleas iguales modelo PHP 1SPZ85TB de 85 mm de diámetro nominal y una correa modelo PHG SPZ825 con 825 mm de longitud.
3	Soporte SY504 M con rodamiento de bolas SKF YAR 204-2F. Sobre el soporte se ha instalado un acelerómetro que mide vibración en dirección vertical. Este rodamiento que se encuentra en el lado más cercano a la polea y se denominará RLP. En la Figura 3 se muestra una imagen con más detalle.
4	Acelerómetro RLP.
5	Soporte SNH 505 con rodamiento de doble hilera de rodillos a rótula SKF 22205 EK/C3. Este rodamiento se designa como RCARGA, y sirve para introducir carga radial sobre el eje y sobre los dos rodamientos de bolas. En la Figura 3 se muestra una imagen con más detalle.
6	Varillas roscadas de acero que actúan de tirantes. Transmiten la fuerza que se desarrolla en la viga-palanca (12) como consecuencia del peso del barril (10). En la Figura 3 se muestra una imagen con más detalle.
7	Soporte SY504 M con rodamiento de bolas SKF YAR 204-2F. Sobre el soporte se ha instalado un acelerómetro que mide vibración en dirección vertical. Este rodamiento que se encuentra en el lado contrario a la polea y se denominará RLCP. En la Figura 3 se muestra una imagen con más detalle.
8	Acelerómetro RLCP.
9	Recipiente en el que se introducen los agentes de degradación del rodamiento.
10	Barril con el que se introduce la carga radial a los rodamientos a través de la viga palanca (12), los tirantes (6) y el soporte con rodamiento (5).
11	Bancada de perfiles soldados de acero.
12	Viga-palanca que sirve para transmitir y multiplicar la fuerza del peso del barril (10) a las varillas (6).

El motor (1) mueve, mediante la transmisión de correa (2), al eje soportado por los rodamientos a ensayar, RLP (3) y RLCP (7). Mediante el soporte (5), los tirantes (6), la viga-palanca (12) y el barril (10), se introduce entre los dos apoyos una carga radial vertical en el eje. Como se explicó en el trabajo anterior [1], la fuerza radial F_R ejercida sobre el eje se calcula mediante la ecuación (1).

$$F_R = 1.767 \cdot P + 94.57 \text{ (N)} \quad (1)$$

Siendo P el peso del agua que se introduce en el barril. Debido a que la carga está centrada entre los apoyos RLP y RLCP, la carga radial aplicada a los dos rodamientos de prueba es la misma: $\frac{F_R}{2}$.

El rodamiento RLCP (7) se coloca sobre un recipiente (9) que se llena de líquido, para que el rodamiento quede sumergido parcialmente y se produzca una degradación acelerada en sus pistas de rodadura y elementos rodantes.

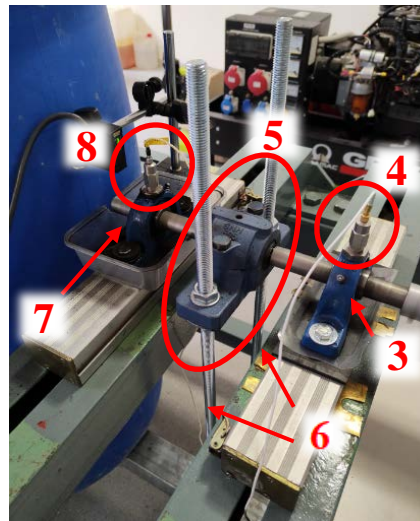


Figura 3: Imagen de algunos de los elementos del banco de ensayo: RLP (3) con su acelerómetro (4), RLCP (7) con su acelerómetro (8), RCARGA (5) y tirantes de varilla roscada (6)

2.2. Instrumentación

Para la medición de ultrasonidos, se utilizó la pistola *UE-Sistems Ultraprobe 10000* con palpador de contacto, ajustada a una frecuencia de medición de 40 kHz, como se muestra en la Figura 4(a). Para las mediciones de vibración, se emplearon dos acelerómetros PCB 302A07 instalados en posición vertical sobre los soportes de los rodamientos RLP (4) y RLCP (8), tal y como se presenta en la Figura 2 y 3. La señal de estos acelerómetros se filtra y digitaliza con la tarjeta de adquisición NI 4451. Las señales digitales se transmiten a un PC y se procesan con un software desarrollado en *LabView*. Este programa, denominado *Analizador de Señales v5*, permite configurar la tarjeta de adquisición, procesar y visualizar las mediciones tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, almacenar espectros y señales temporales, y detener el equipo de ensayos en caso de superar ciertos umbrales de vibración. La Figura 5 muestra la ventana principal de la herramienta.

Se utilizaron videos a alta velocidad (1000 fps) con la cámara *Sony RX0II* (Figura 4(b)), cuyo tratamiento se realizó con el software libre *evm (Eulerian Video Magnification)*, que amplifica los movimientos en una banda de frecuencias determinada. Más detalles sobre esta herramienta se pueden encontrar en [6].



Figura 4: Instrumentación utilizada para la medida de US y videos en alta velocidad.

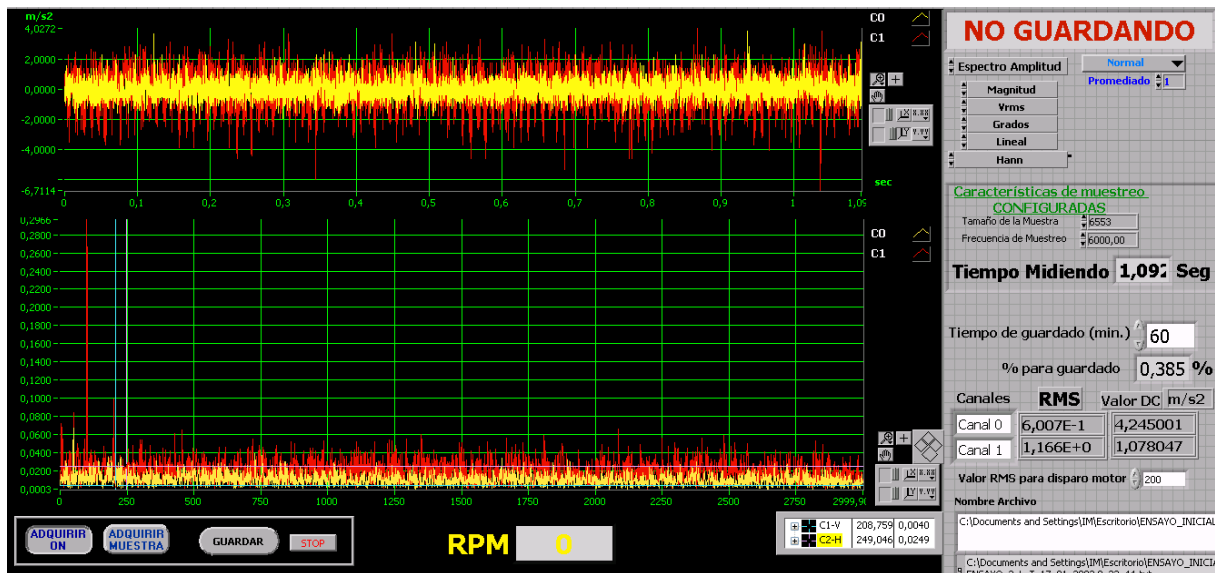


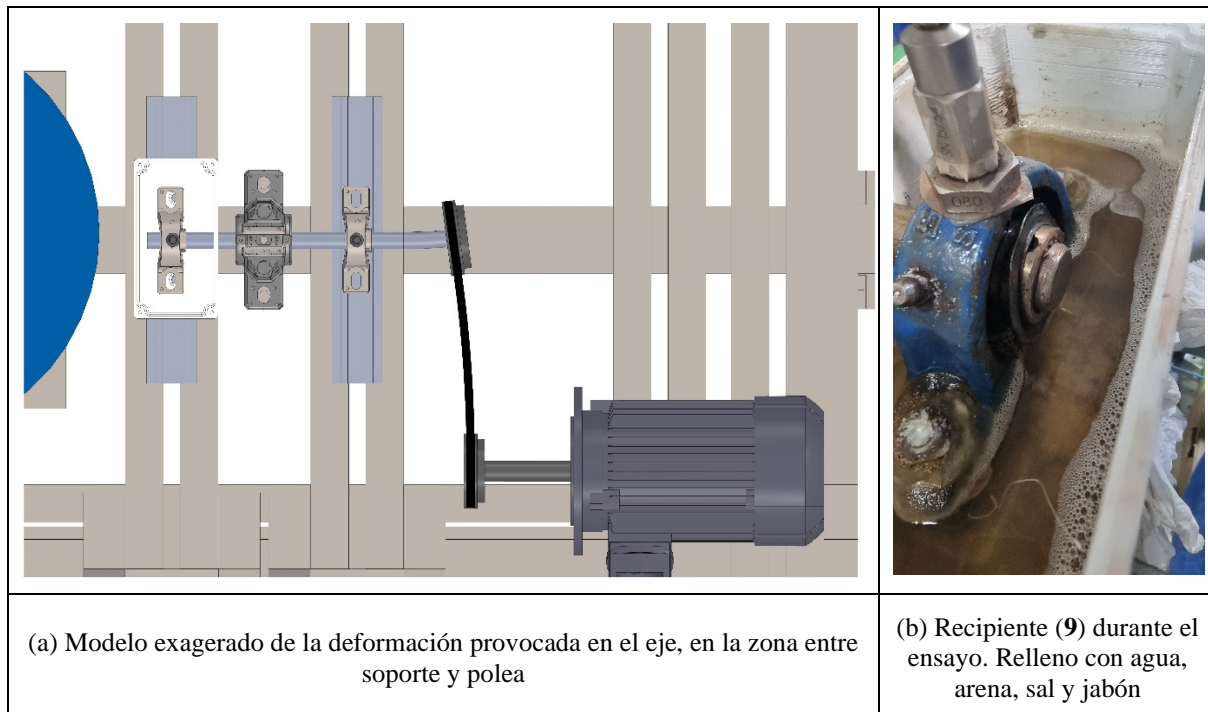
Figura 5: Herramienta software *Analizador de Señales v5*.

3. Metodología experimental

El sistema mecánico se montó con rodamientos nuevos y con el eje deformado en el extremo del RLP. Esta deformación provoca una desalineación dinámica del rodamiento dentro de su alojamiento y de la polea transmisora con la correa. En la Figura 6(a), se muestra de forma exagerada la deformación inducida sobre el eje.

El recipiente (9), donde se encuentra el soporte del rodamiento RLCP, se llenó con una mezcla de agua, arena, sal y jabón (Figura 6(b)).

Durante el ensayo, el motor (1) operó a 1498 rpm y sobre el rodamiento RCARGA (5) se aplicó una carga radial de 2054 N, lo que representó una carga de 1027 N en cada uno de los rodamientos de prueba.



(a) Modelo exagerado de la deformación provocada en el eje, en la zona entre soporte y polea

(b) Recipiente (9) durante el ensayo. Relleno con agua, arena, sal y jabón

Figura 6: Defectos y agentes de degradación con los que se realizó el ensayo.

De forma continua se captaban 10 registros de vibración de 10.923 segundos de duración a una frecuencia de muestreo de 6000 muestras/s. Con cada uno de los registros de 65536 muestras se obtenía el espectro mediante la FFT y se realizaba el promediado de los valores. Los ultrasonidos y los videos en alta velocidad se captaban de manera no periódica.

El equipo funcionó sin vigilancia humana, pero se habilita un sistema de protección que detuvo el equipo por exceso de vibraciones en varias ocasiones.

Como resultado de la deformación del eje, el anillo exterior del RLP experimentó un movimiento de precesión sobre el soporte, lo que generó un importante rozamiento y desgaste de la superficie del soporte. Por otra parte, el RLCP fue deteriorándose de forma generalizada debido a la inmersión en el fluido corrosivo. Este proceso continuó hasta que, a las 96 horas y 20 minutos, el RLCP sufrió una rotura catastrófica de la jaula, lo que llevó a la parada del equipo.

En la Figura 7 (a) y (b) se presentan imágenes que ilustran el estado final del RLCP tras el fallo. En ellas se puede apreciar, por un lado, la corrosión de las pistas de rodadura, atribuida a la contaminación causada por los elementos introducidos en el rodamiento. Por otro lado, se observa la rotura de la jaula y la acumulación de elementos rodantes, lo que resalta el grado de degradación sufrido por el componente.

En la Figura 7 (c) se muestra el estado final del RLP, en el cual se evidencia la presencia de una considerable cantidad de polvo metálico alrededor del rodamiento, producto del desgaste sufrido por el soporte. Finalmente, en la Figura 7 (d), se puede distinguir claramente la holgura generada durante el ensayo, la cual refleja el deterioro progresivo del rodamiento a lo largo del tiempo.



Figura 7: Imágenes del estado en el que quedaron los rodamientos después del ensayo.

4. Resultados y discusión

En este apartado se presentan algunos de los resultados más relevantes obtenidos durante el ensayo, aquellos que contribuyen significativamente al análisis de los objetivos establecidos.

La Figura 8 muestra la evolución de la emisión de ultrasonidos (US) a lo largo del tiempo de funcionamiento para ambos rodamientos evaluados. Se observa un aumento en la emisión conforme avanza la degradación en ambos rodamientos, aunque con una diferencia importante: el incremento es más pronunciado en el RLCP, donde las pistas de rodadura y los elementos rodantes experimentan daños más severos. En el caso del RLP, se detecta un aumento inicial significativo en la emisión, el cual posteriormente se estabiliza. Este comportamiento puede explicarse por el mayor rozamiento entre el anillo exterior del rodamiento y el soporte al principio, debido a la rugosidad de las superficies y los estrechos ajustes entre ambas. A medida que el soporte se desgasta, el ajuste pierde precisión y las superficies se suavizan, lo que conduce a la estabilización de la amplitud de los US.

La Figura 9 presenta la evolución de la vibración en la banda de 0 a 3 Hz (denominada a partir de ahora como B03) a lo largo del ensayo. Se muestran, además, los periodos de tiempo durante los cuales el ensayo se detuvo, indicados con líneas negras entre las mediciones. Para el RLP, los valores de la banda B03 permanecen prácticamente constantes durante todo el ensayo. En cambio, para el RLCP, los valores aumentan de manera notable con el tiempo, llegando a triplicar el valor inicial en el momento de la rotura. Este aumento es particularmente evidente en la fase final de la degradación del rodamiento. Asimismo, se observa que los valores de la banda B03 disminuyen temporalmente después de una parada, retornando a niveles previos tras un período de tiempo. Este fenómeno es más notorio en el rodamiento más dañado.

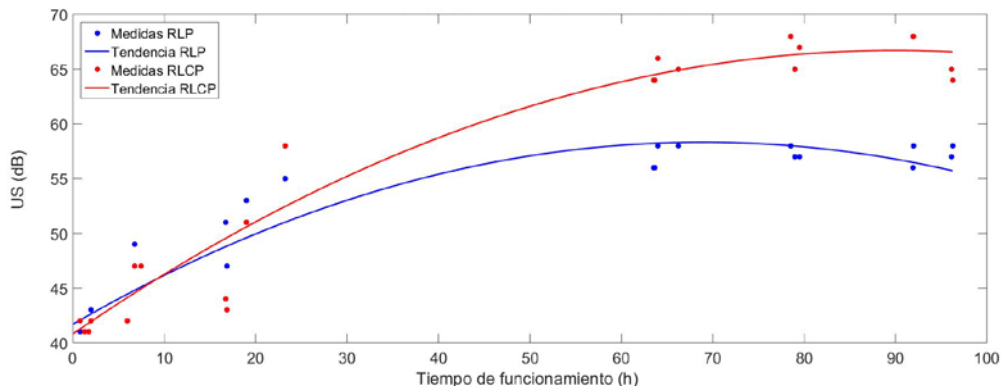


Figura 8: Evolución de los valores de US a lo largo de las horas para los dos rodamientos ensayados.

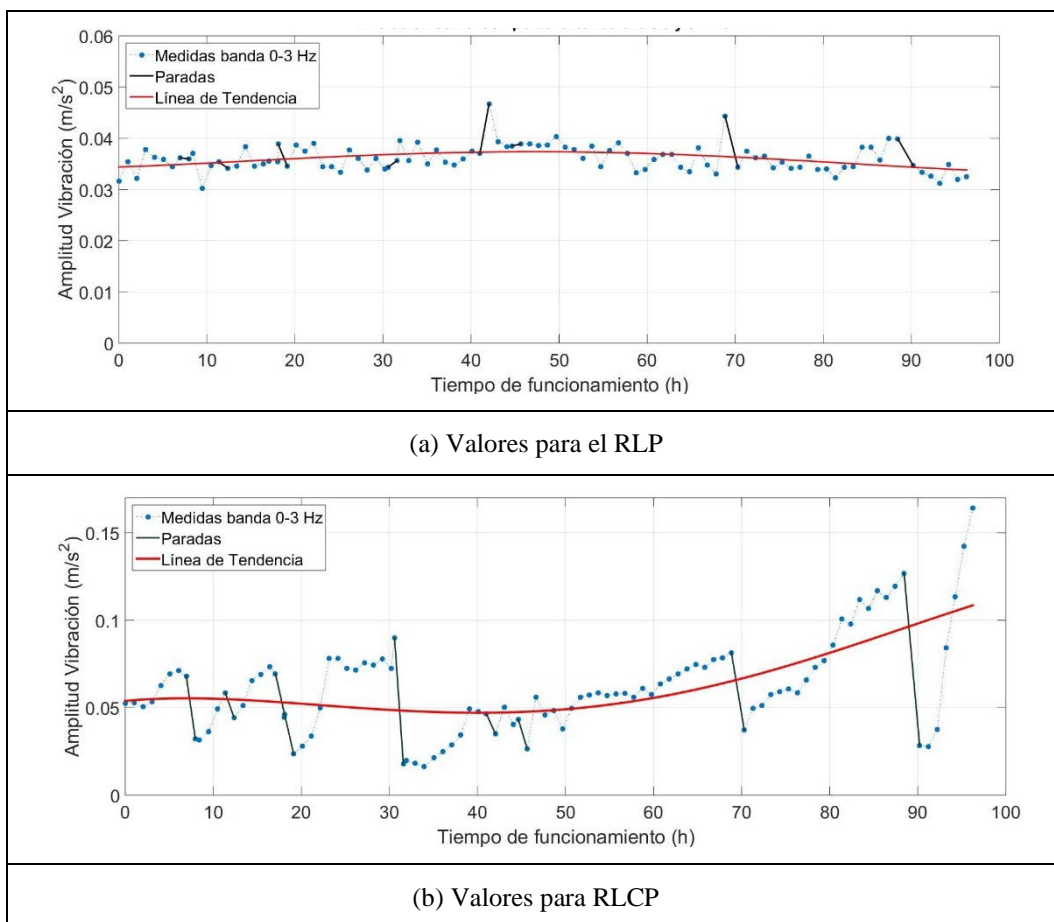


Figura 9: Evolución de los valores B03 a lo largo de las horas para los rodamientos ensayados.

Si se excluyen las primeras mediciones de B03 después de las paradas, se obtiene un comportamiento más estable en las medidas para el RLP, mientras que, para el RLCP, la tendencia ascendente en la banda B03 se vuelve más pronunciada en la última fase del ensayo, como se muestra en la Figura 10.

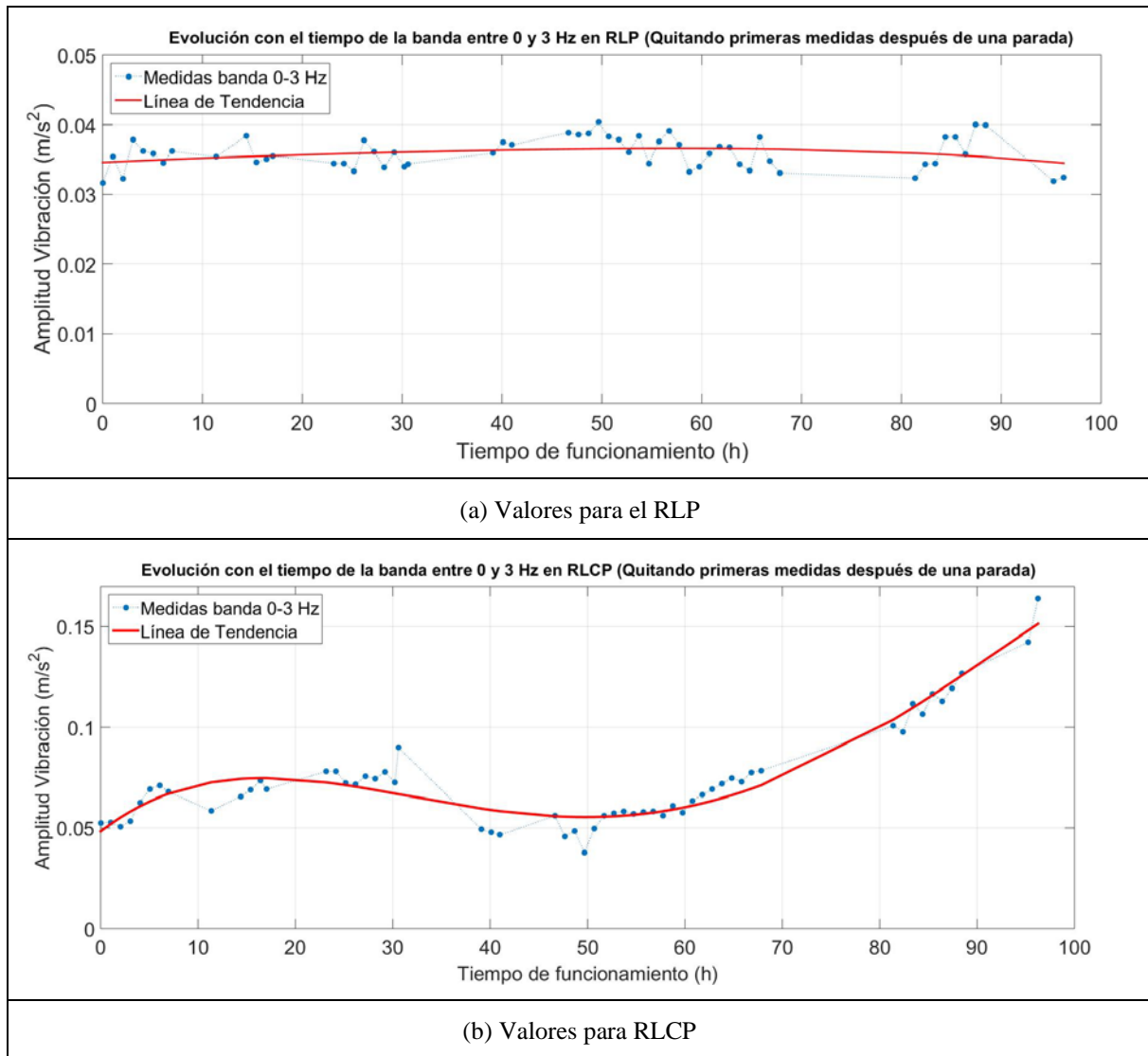


Figura 10: Evolución de los valores B03 a lo largo de las horas para los rodamientos ensayados eliminando las medidas iniciales después de una parada.

Al comparar los resultados obtenidos con los ultrasonidos (Figura 8) y los de la banda B03 (Figuras 9 y 10), se percibe que los ultrasonidos aumentan desde el inicio del ensayo, es decir, en una etapa temprana del daño en las pistas de rodadura del RLCP. Sin embargo, en la fase final, este parámetro tiende a saturarse. En contraste, la banda B03 muestra un aumento más pronunciado solo cuando el daño en las pistas de rodadura ya es considerable.

Por otro lado, al comparar las mediciones para el RLP, se observa que los US también son sensibles al deslizamiento entre el anillo exterior del rodamiento y su alojamiento, lo cual no es detectado de ninguna manera por la banda B03

La Figura 11 ilustra el comportamiento de las vibraciones en alta frecuencia, específicamente en la banda de 1 a 1.5 kHz. Para el RLP, se observa un aumento claro y continuo en los valores de esta banda. En el RLCP, el aumento se produce solo cuando la degradación de las pistas de rodadura es avanzada, y disminuyen cuando el daño es ya muy severo. Estos resultados sugieren que el análisis de las vibraciones en alta frecuencia, representado en el SPV-HF, es un indicador útil para evaluar el estado de los rodamientos. Sin embargo, se debe tener precaución, ya que el aumento de las vibraciones de alta frecuencia no siempre indica un problema directamente relacionado con el rodamiento, y en casos de degradación avanzada puede no comportarse de manera coherente.

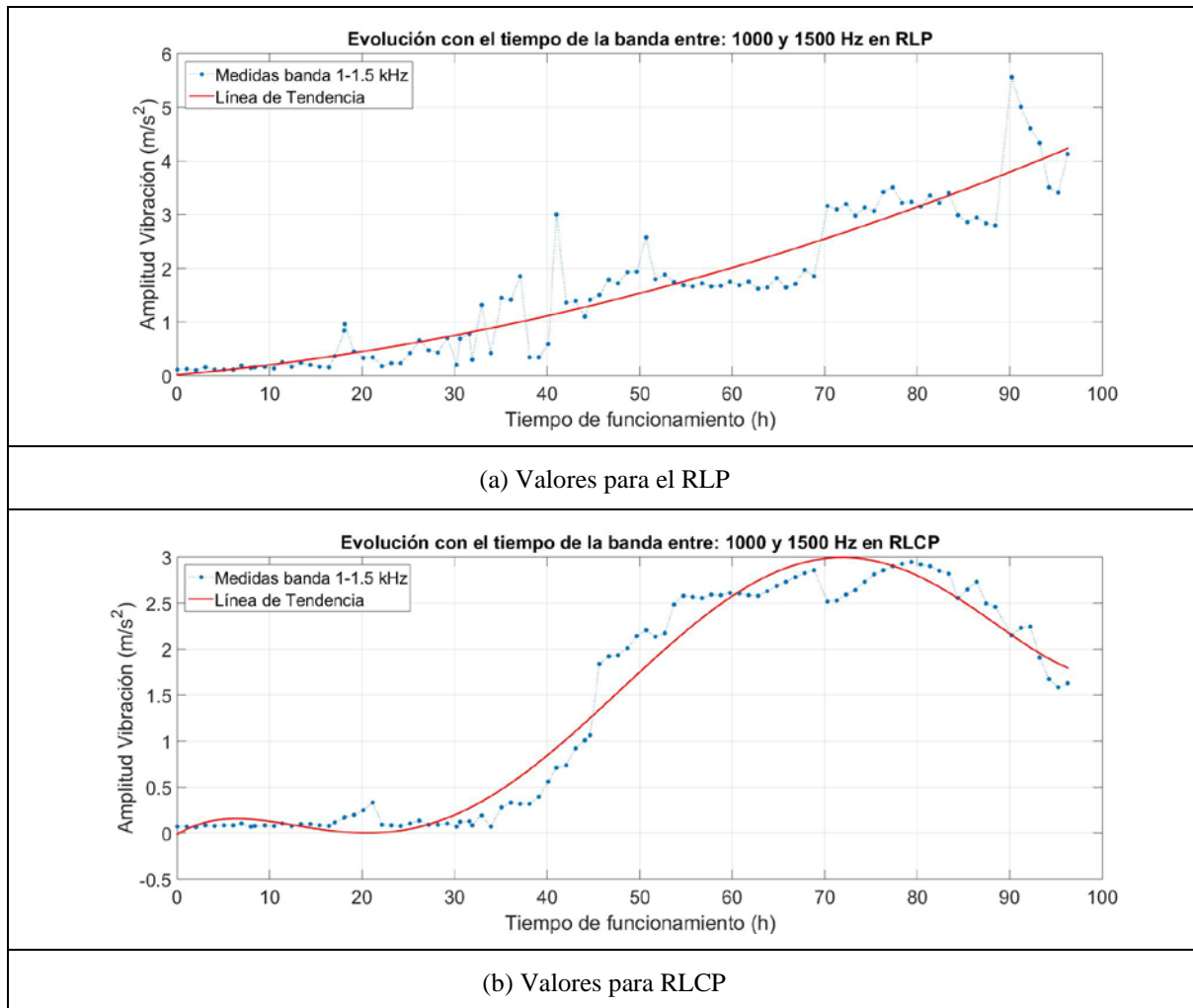


Figura 11: Evolución de los valores vibración en la banda B1-1.5k a lo largo de las horas para los rodamientos ensayados eliminando las medidas iniciales después de una parada.

La Figura 12 presenta los mapas espectrales de vibración en el rango de 0 a 150 Hz a lo largo del ensayo. Se observa que, para ambos rodamientos durante todo el tiempo de funcionamiento, existen valores elevados en los armónicos de la velocidad de giro, especialmente en las componentes 2x, 4x y 5x, siendo más evidentes en el RLCP. Estos armónicos están asociados al problema de eje flectado y a la desalineación entre eje y soporte y entre polea y correa. Las amplitudes de estas componentes no experimentan un aumento significativo durante el ensayo, ya que el defecto estaba presente desde el inicio.

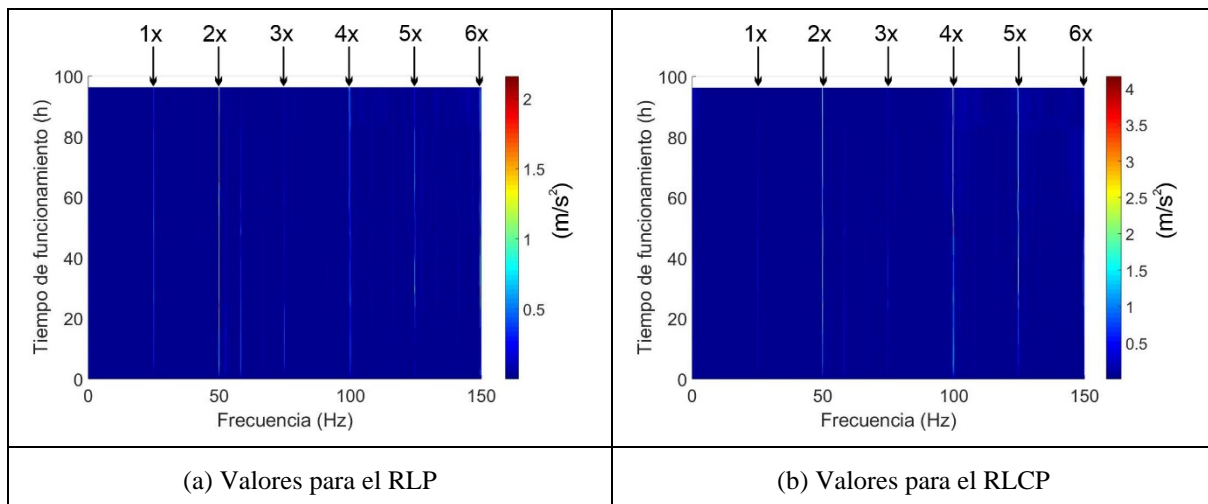


Figura 12: Mapa espectral de vibración en el rango de 0 a 150 Hz en función del tiempo para los dos rodamientos del ensayo.

En las gráficas de la Figura 13, se muestra el mapa espectral de vibración en el rango de frecuencias de 0 a 40 Hz para ambos rodamientos. Se observa que el comportamiento del mapa espectral es muy similar para ambos rodamientos, salvo en la banda B03, donde se aprecia un incremento progresivo en todas sus frecuencias a lo largo del tiempo solo en el RLCP.

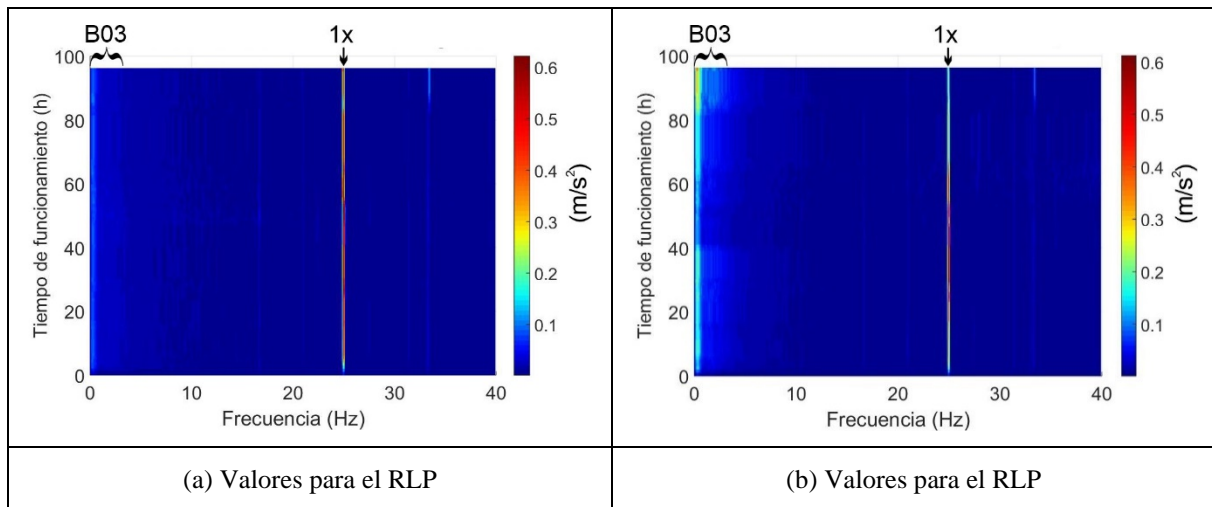


Figura 13: Mapa espectral de vibración en el rango de 0 a 40 Hz en función del tiempo para los dos rodamientos del ensayo.

Los resultados obtenidos tanto en el estudio previo [1] como en el presente trabajo fortalecen la hipótesis de que la amplitud en la banda de vibración B03 tiende a incrementarse ante la presencia de una degradación generalizada significativa en rodamientos de bolas.

Se modela la hipótesis como una variable aleatoria que sigue una distribución de Bernoulli con parámetro “ p ” desconocido. Mediante la aplicación del método de intervalo de confianza de Clopper-Pearson, fijando el nivel de confianza en el 90 %, y a partir de los tres ensayos realizados, se obtiene un intervalo de confianza del parámetro “ p ” de [0.37, 1]. Este resultado indica que, con dicho nivel de confianza, en al menos el 37 % de los casos en los que se presenta una degradación generalizada en el rodamiento se observará un aumento en la amplitud de la vibración correspondiente a la banda B03.

Para incrementar el límite inferior de dicho intervalo por encima del 75 % sería necesario realizar al menos siete ensayos adicionales y que estos confirmen la hipótesis planteada. Con la intención de generalizar la relación entre la degradación del rodamiento y el incremento en la amplitud de la banda B03 para diferentes tipos de rodamientos y condiciones operativas se considera indispensable que los siguientes estudios incluyan rodamientos con diferentes características geométricas y operando a diversas velocidades de rotación.

Finalmente, cabe mencionar que los videos capturados a alta velocidad y procesados mediante filtros de amplificación de movimiento en bandas de frecuencia no ofrecieron resultados útiles para la detección de defectos en las pistas y los elementos rodantes. No obstante, esta técnica permitió observar claramente el problema de eje flectado y el movimiento relativo entre el RLP y su soporte.

5. Conclusiones

Según los resultados obtenidos, se ha encontrado una correlación significativa entre el grado de deterioro de las pistas de rodadura del rodamiento y el nivel de vibraciones de baja frecuencia en la banda de 0 a 3 Hz. Las vibraciones en esta banda parecen no ser sensibles a otros defectos mecánicos, como la desalineación, la deformación del eje o el deslizamiento y la degradación entre el rodamiento y su soporte.

Se observa cierta correspondencia entre las mediciones de ultrasonidos y las vibraciones de baja frecuencia cuando el rodamiento experimenta un proceso de degradación generalizada de sus pistas de rodadura. Sin embargo, los ultrasonidos muestran un incremento en sus valores en etapas más tempranas que las vibraciones, aunque estas últimas aumentan de manera más clara poco antes del fallo.

Con los resultados obtenidos en este estudio y los de [1], se podría concluir que la amplitud de las vibraciones en la banda de 0 a 3 Hz puede ser utilizada como un indicador de defectos generalizados en un rodamiento de bolas. A pesar de que los resultados experimentales son claros en cuanto a la relación entre las vibraciones de baja

frecuencia y la degradación generalizada del rodamiento, se considera necesario realizar más ensayos para verificar que, en otros rodamientos de bolas y en diferentes condiciones de funcionamiento, los resultados mantengan la misma coherencia.

6. Referencias

- [1] Aguirre-Martínez J. L., Munuera Saura G., Hidalgo Martínez M., Salmerón Lucas J.D., “Análisis de la vibración de baja frecuencia en el proceso de degradación de rodamientos de bolas”, *Actas del XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica* **10**, 1-12, Las Palmas (2023)
- [2] Wang Y., Yang H., Zhao S., Fan Y., Dong R., “Vibration characterization of rolling bearings with compound fault features under multiple interference factors”, *PLOS ONE* 19(2): e0297935. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297935> (2024)
- [3] Al-Sa'd M., Jalonen T., Kiranyaz S., Gabbouj M., “Quadratic Time-Frequency Analysis of Vibration Signals for Diagnosing Bearing Faults”, *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.01172> (2024)
- [4] Liu X., Yan C., Lv M., Li S., Wu L., “Multi-rolling element faults diagnosis of rolling bearing based on time-frequency analysis and multi-curves extraction.” *Meas. Sci. Technol.*, 35, 106113. (2024)
- [5] Sun, B.; Sheng, Z., Song, P., Sun, H., Wang, F., Sun, X., Liu, J., “State-of-the-Art Detection and Diagnosis Methods for Rolling Bearing Defects: A Comprehensive Review”, *Applied Sciences*, 15(2), 1001, <https://doi.org/10.3390/app15021001> (2025)
- [6] Wu H.Y., Rubinstein M, Shih E., Gutttag J, Durand F. Freeman W. “Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Volume 31, Issue 4, Article No.: 65, (2012)