

Identificación de las componentes frecuenciales más destacadas en la firma vibratoria de un tren de alta velocidad

Alejandro Bustos Caballero¹, Rodrigo Gómez Iglesias¹, Marta Zamorano Garzón², Juan Carlos García Prada¹

¹MAQLAB, Departamento de Mecánica, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. Email: albustos@ind.uned.es, rodgomez@madrid.uned.es, jcgprada@ind.uned.es

²MAQLAB, Escuela Politécnica Superior, Universidad Francisco de Vitoria, España. Email: marta.zamorano@ufv.es

Resumen

En la actualidad la Industria Europea continúa con su particular Revolución Industrial hacia una mejora de productividad, y hacia su descarbonización, siendo el transporte ferroviario de alta velocidad una alternativa real al transporte aéreo y su dependencia del petróleo. Tradicionalmente, los elementos del sector ferroviario han tenido un mantenimiento preventivo a través de inspecciones periódicas, basadas en las recomendaciones de los distintos fabricantes de material rodante, lubricante, etc. El análisis de las vibraciones de un sistema ferroviario resulta ser una herramienta de gran utilidad para determinar el estado de elementos mecánicos, si éste se realiza en tiempo real. Este trabajo estudia los datos de un Tren de Alta Velocidad en el trayecto Madrid-Sevilla, con el objetivo de caracterizar su firma vibratoria a través del recuento de las componentes frecuenciales más destacadas. Para ello, se establece un nivel de referencia variable por el usuario que permite localizar rápidamente las componentes frecuenciales que superan el nivel marcado anteriormente. Relacionando estas componentes frecuenciales más repetitivas con su probable origen físico sería posible establecer un indicador del desgaste de los diferentes elementos del sistema, y así poder realizar las consiguientes operaciones de mantenimiento, antes de que se produzca el fallo.

Palabras clave: Componentes frecuenciales destacadas, vibraciones, mantenimiento, tren de alta velocidad.

Abstract

At present, European industry is continuing its particular Industrial Revolution towards improved productivity and decarbonisation, with high-speed rail transport being a real alternative to air transport and its dependence on oil. Traditionally, the elements of the railway sector have been subject to preventive maintenance through periodic inspections, based on the recommendations of the different manufacturers of rolling stock, lubricants, etc. Vibration analysis of a railway system is a very useful tool for determining the condition of mechanical elements if it is carried out in real-time. This work studies the data of a High-Speed Train on the Madrid-Seville route, with the aim of characterising its vibration signature by counting the most important frequency components. To do this, a user-variable reference level is established, which allows the frequency components that exceed the previously established level to be quickly located. By relating these more repetitive frequency components with their probable physical origin, it would be possible to establish an indicator of the wear of the different elements of the system, and thus be able to carry out the consequent maintenance operations before failure occurs.

Keywords: Significant frequency components, vibrations, maintenance, high-speed train.

1. Introducción

Poco falta para que se cumplan 200 años desde que la compañía Stockton and Darlington Railway inaugurase

su primera línea para el transporte de carbón de las minas a las ciudades de Darlington y Stockton –on-tees el 27 de septiembre de 1825, para así ser enviado por barco a diferentes confines necesitados de energía

fósil. Desde entonces el transporte ferroviario ha evolucionado de manera continua. En la actualidad dicho avance sigue activo, tanto en el transporte de mercancías, como en el transporte de viajeros. No en vano, el transporte ferroviario en España respecto al transporte por carretera consume la mitad de energía en el transporte de viajeros por unidad de transporte (viajeros-km) y menos de un tercio en el transporte de mercancías (ton-km) [1]. En la actualidad el sector ferroviario continúa en pleno desarrollo. En 2022 el transporte ferroviario de pasajeros ha superado los niveles de número de viajeros existentes antes de la pandemia del COVID-19 [2]. En esta tendencia está jugando un papel fundamental la Alta Velocidad que nació hace 60 años en Japón, extendiéndose por todo el mundo. El éxito de la Alta Velocidad como medio de transporte se pone de manifiesto en el hecho de que China utilice su tren de Alta Velocidad, Fuxing, como estandarte de sus Juegos Olímpicos de Invierno de Pekín 2022. Este tren unió a las ciudades de Zhangjiakou y Yanqing con la capital Pekín y trasladó a los deportistas con rapidez, confort y seguridad.

Mantener los estándares de seguridad requeridos por las autoridades demanda prestar especial atención al mantenimiento, tanto del material móvil como de las infraestructuras. El mantenimiento industrial inicialmente era un mantenimiento correctivo, el cual puede dar lugar a paradas imprevistas. Posteriormente, se evolucionó al mantenimiento preventivo, que produce gastos innecesarios en la mayoría de los casos, pero no evita que se produzcan accidentes ferroviarios como los de Viareggio [3] y de Eschede [4][5].

La tecnología industrial, llevada al sector ferroviario hace que el mantenimiento esté evolucionando hacia el mantenimiento predictivo, con el objetivo de evitar sucesos como los anteriormente comentados y, además, reducir los costes innecesarios de mantenimiento expuestos.

La industria en general necesita de técnicas de detección de fallas no destructivas [6], para que no suponga la pérdida de unidades. La industria ferroviaria, debido a la magnitud de sus elementos, usa estas técnicas para la detección de posibles defectos. Una de las más estudiadas y utilizadas es el análisis de vibraciones y ruido, las cuales están altamente legisladas [7].

Normalmente, la literatura científica que trata el análisis de vibraciones en el material rodante ferroviario se centra en los bogies y sus elementos, principalmente: las transmisiones [8], las cajas de grasa [9], los ejes [10], defectos en las ruedas [11] como grietas [12] y en los elementos de la suspensión primaria [13]. Estas investigaciones suelen llevarse a cabo en condiciones de laboratorio, sin llegar a las

velocidades de operación, creando modelos numéricos, para posteriores ensayos.

En los últimos años se han comenzado a realizar estudios a las velocidades normales de operación. Así, Wang et al. [14] tiene por objeto el estudio de las vibraciones registradas en la caja de grasa de un Tren de Alta Velocidad a fin de alargar los periodos entre repelidos de las ruedas. Bustos et al. [15] realiza el estudio sobre el comportamiento dinámico de un Tren de Alta Velocidad después de una operación de repelido, obteniendo indicadores frecuenciales de la condición del tren. Lebel et al. [16] realizan simulaciones de dinámica multicuerpo con mediciones in situ, tomadas en un Tren de Alta Velocidad francés, realizando un modelo matemático basado en métodos bayesianos para así detectar cómo evolucionan los elementos de la suspensión del tren. Métodos bayesianos también han sido utilizados por Zhang et al. [17] y Wang et al. [18], en estos casos para determinar el efecto del repelido de la rueda. Respecto al tratamiento de los datos de las señales vibratorias, Bustos et al. [19] propone la aplicación de técnicas EGRSC y ECBF.

En este trabajo se propone la normalización del espectro de potencia de las señales respecto de la amplitud máxima del espectro, determinando las componentes más destacadas en el espectro de frecuencia en base a un nivel de referencia variable por el usuario. Una vez identificadas las componentes más destacadas, se estudia su repetibilidad a fin de caracterizar así el estado operativo del tren en condiciones estándar, pudiendo determinar la necesidad de operaciones de mantenimiento en los elementos del tren.

2. Métodos

Los datos a estudio se obtuvieron a través de un sistema configurado a tal efecto, que se encuentra en el coche remolque extremo de clase turista, describiéndose en este apartado dicho sistema y las técnicas posteriores utilizadas para el procesamiento de las señales.

2.1. Sistema de adquisición de datos

Este estudio tiene como objeto un tren de Alta Velocidad, que realiza el trayecto Madrid-Sevilla, en un tramo con velocidad uniforme en torno a 270 km/h. El tren lo forman dos cabezas motrices y ocho coches articulados que se encuentran entre medias de las cabezas motrices.

El sistema empleado está compuesto por cuatro fases principales: adquisición, acondicionamiento, registro y análisis. La adquisición se realiza a través de los sensores colocados en las cajas de grasa del eje a

estudiar, los parámetros de las señales de medida se indican en la **Tabla 1**. El acondicionamiento de las señales se realiza a través de dos unidades IMx-R de la empresa SKF, procediéndose al registro automático de las medidas a través del software @ptitude Observer. Dichas medidas son tratadas posteriormente con MATLAB®. En la **Figura 1** se ilustra el esquema del sistema de medida.

Tabla 1. Parámetros de las señales de medida.

Parámetro	Valor
Frecuencia de muestreo	5.120 Hz
Tiempo de medida	3,2 s
Rango de velocidades	75-2.000 rpm (13-347 km/h)
Registros por medida	16.384



Figura 1. Esquema del sistema de medida.

Los acelerómetros de medida están situados en las tapas de las cajas de grasa, al igual que el sensor de velocidad, a fin de monitorizar correctamente las vibraciones de los rodamientos del eje, y la interacción con la vía. El acelerómetro es piezoléctrico, ICP, siendo el modelo CMSS-RAIL-9100 de SKF, sus características principales se encuentran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Características del acelerómetro CMSS-RAIL 9100

Parámetro	Valor
Sensibilidad ($\pm 20\%$)	10,2 mV/(m/s ²)
Rango de aceleración	± 490 m/s ²
Rango de frecuencia (± 3 dB)	0,52 Hz to 8 kHz
Frecuencia de resonancia	25 kHz
Linealidad de la amplitud	$\pm 1\%$
Sensibilidad transversal	$\leq 7\%$

2.2. Tratamiento de la señal

El tratamiento de las señales se lleva a cabo utilizando el espectro de densidad de potencia (PSD, *Power Spectral Density*). El espectro de potencia se fundamenta en el transformada de Fourier, que descompone señales complejas en una suma de señales armónicas. Su análisis en el dominio de frecuencia hace que se pueda expresar la potencia a cada una de las frecuencias.

Dada una función dependiente del tiempo, $x(t)$, se define su transformada de Fourier, ecuación (1), como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

donde t es el tiempo, f es la frecuencia, y j es la unidad imaginaria. De una función $x(t)$ real se obtiene $X(f)$ una transformada que es una función compleja de la frecuencia con su espectro propio.

Siempre que exista la integral (1) será posible volver a la función inicial $x(t)$, a partir de la transformada $X(f)$, utilizando la fórmula de la antitransformada (2):

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

Ambas funciones $X(f)$ y $x(t)$ son dos formas de representar los mismos datos, cumpliéndose que las propiedades de la primera las verifica la segunda y viceversa.

La digitalización de la señal para su posterior procesado en equipos informáticos requiere discretizar una señal continua, por lo que se utiliza la transformada discreta de Fourier dada por las ecuaciones (3) y (4).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

En esta transformación se obtienen N componentes de frecuencias, ($N/2$ positivas y $N/2$ negativas), a partir de N componentes en el tiempo con N^2 operaciones en el plano complejo. La transformada discreta de Fourier relaciona la función temporal de las señales monitorizadas, con una función en el espectro de frecuencias.

La caracterización de señales aleatorias se realiza mediante la función de distribución de densidad de potencia. La definición de la PSD se hace a través de la función de distribución general S , ecuación (5), como su integral, para el caso continuo, y como su sumatorio, para el caso discreto. En todo el rango de frecuencias la PSD debe ser igual a la potencia de la señal P , ecuación (6) [20].

$$S(k)_{1lado} = \begin{cases} 2S(k) & k = 1 \dots \frac{N}{2} - 1 \\ S(k) & k = 0, k = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$P = \sum_{k=0}^{N-1} S(fk) \Delta f = \sum_{k=0}^{N/2} S(k)_{1lado} \Delta f \quad (6)$$

El cálculo de la PSD se realiza a través de la Transformada Rápida de Fourier, FFT, como se indica en la ecuación (7).

$$S(k)_{lado} = \frac{1}{N\Delta t} \sum x^2 \Delta t \quad (7)$$

Y debe ser igual a la potencia total, como se indica en la ecuación (8):

$$\sum S\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \sum S \quad (8)$$

Teniendo en cuenta la Ley de Parseval, se obtiene la ecuación (9):

$$S(k) = \frac{\Delta t}{N} |X(k)|^2 \quad (9)$$

Siendo Δt el tiempo de muestreo, $S(k)$ la PSD, N el número de datos de la señal y $X(k)$ la Transformada de Fourier de la señal.

En un rodamiento en movimiento, cada vez que un elemento rodante defectuoso pasa sobre uno de sus defectos, se producen una serie de frecuencias periódicas denominadas frecuencias fundamentales de fallo. Estas frecuencias deben ser tenidas en cuenta en el espectro de potencias. Los defectos que se van a tener en cuenta en este estudio, a través de las ecuaciones (10) a (13) son los siguientes:

BPFI: Frecuencia de paso del elemento rodante por la pista interna, *Ball Pass Frequency Inner Race*.

$$BPFI = \frac{N}{2} F_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (10)$$

BPFO: Frecuencia de paso del elemento rodante por la pista externa, *Ball Pass Frequency Outer Race*.

$$BPFO = \frac{N}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (11)$$

BSF: Frecuencia de giro del elemento rodante sobre sí mismo, *Ball Spin Frequency*.

$$BSF = \frac{D}{2d} F_r \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \beta \right) \quad (12)$$

FTF: Frecuencia característica de defecto en jaula, *Fundamental Train Frequency*.

$$FTF = \frac{F_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \quad (13)$$

En donde N es el número de elementos rodantes del rodamiento, F_r es la frecuencia de giro de la pista interna, d es el diámetro de los elementos rodantes, D es el diámetro medio del rodamiento y β es el ángulo de contacto.

También es relevante conocer la frecuencia de paso por la traviesa (SPF), que viene dada por la ecuación (14).

$$SPF = v/\lambda \quad (14)$$

Siendo λ la distancia entre las traviesas y v la velocidad lineal a la que circula el tren.

2.3. Análisis de datos

Una vez tratadas las señales medidas por el sistema IMx-R con MATLAB®, se procede al estudio de los espectros de potencia de tres formas: sin normalizar, normalizados respecto de la potencia total y normalizados respecto de la potencia máxima. Para la caracterización de las componentes frecuenciales más destacadas, se utilizará el espectro de potencia normalizado respecto de la potencia máxima, fijando un nivel de referencia o umbral en tanto por uno de la potencia máxima que permite seleccionar las componentes frecuenciales cuya amplitud se sitúa por encima de este umbral.

Con el fin de abordar diferentes niveles de detalle, inicialmente se establecen cuatro niveles de referencia: 50% (0,5%), 25% (0,25), 10% (0,1) y 5% (0,05). Además, las componentes frecuenciales por encima del valor de referencia se agrupan en bandas de 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz para, posteriormente, comparar los resultados obtenidos y establecer la agrupación más significativa para el análisis de las señales de vibración.

3. Resultados

Trabajos anteriores [15, 19] han comprobado que las vibraciones verticales son las más representativas del estado operativo del bogie, por lo que este estudio se centrará en el análisis de las señales del acelerómetro vertical. Las señales se recogieron durante la operación normal del tren, en un viaje entre Madrid y Sevilla, a una velocidad media aproximada de 270 km/h.

Antes de comenzar el análisis de las señales, es necesario fijar una serie de parámetros para así poder obtener algunas de las frecuencias que caracterizan al sistema, calculadas para una velocidad de 270 km/h. Los parámetros de interés se recogen en la Tabla 3 y son la frecuencia de giro, las frecuencias de fallo de los rodamientos y la frecuencia de paso por la traviesa

Tabla 3. Frecuencias características para $v=270$ km/h

Fenómeno	Frecuencia (Hz)
Frecuencia de giro (Fr)	25,95
BPFI	329,14
BPFO	267,69
BSF	122,84
FTF	11,65
Paso por la traviesa (SPF)	125

La **Figura 2** muestra una de las señales temporales registradas a bordo del tren a 270 km/h. También se muestra el espectro de densidad de potencia de dicha señal. El resultado de normalizar el espectro de potencia con los métodos anteriormente comentados (respecto de la potencia total y de la máxima amplitud del espectro) se muestran en la **Figura 3**.

En los espectros se pueden distinguir varias zonas activas: la primera abarca desde los 0 Hz hasta los 350 Hz, aproximadamente; la segunda zona se sitúa entre los 400 Hz y los 650 Hz; la tercera comprende las frecuencias entre los 800 Hz y los 900 Hz. Existe una última zona de actividad mucho menor, que se sitúa entre los 2000 Hz y los 2560 y que se puede asociar a fenómenos de corrugación en la rueda [21].

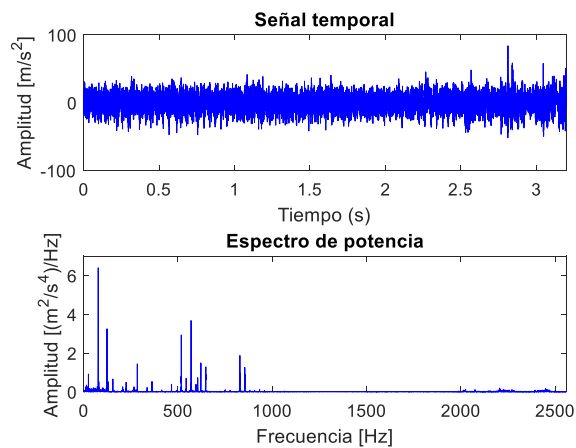


Figura 2. Representación de la señal y el espectro de densidad de potencia.

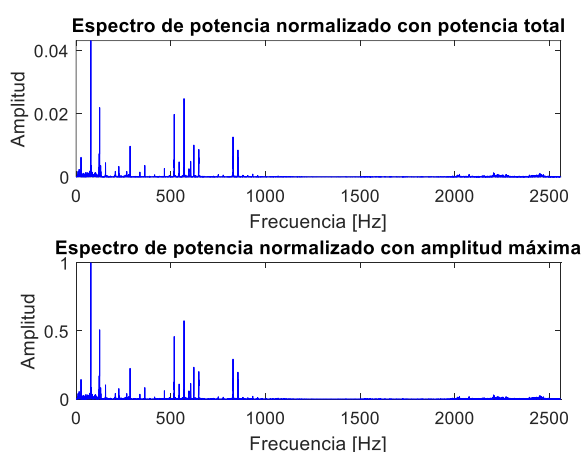


Figura 3. Representación del espectro de potencia normalizado con los dos métodos.

La normalización de los espectros de potencia ofrece la posibilidad de establecer un valor de referencia común para todas las señales analizadas. Ambos espectros

ofrecen una información similar, sin embargo, los valores de amplitud obtenidos al normalizar el espectro respecto de la potencia total son muy pequeños (del orden de la centésima), mientras que la otra normalización ofrece valores de amplitud en el rango de 0 a 1. Este mayor rango de trabajo posibilita establecer un mayor número de valores de referencia y, por tanto, utilizaremos el espectro normalizado respecto a la amplitud máxima.

Se han establecido cuatro niveles de referencia, a saber, 50%, 25%, 10% y 5% de la potencia máxima del espectro. En base estos umbrales, se ha realizado un recuento del número de repeticiones de las componentes frecuenciales más destacadas del espectro en una banda de frecuencia determinada en todas las señales analizadas. Las bandas de frecuencia utilizadas son 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz. La banda de 1 Hz resulta de redondear la frecuencia de las componentes destacadas al entero más cercano. La banda de 3 Hz representa, aproximadamente, 10 veces la resolución en frecuencia del espectro ($\Delta f = 0,3125 \text{ Hz}$). Tanto la banda de 3 Hz como la de 5 Hz permiten agrupar en la misma banda componentes frecuenciales fuertemente dependientes de la velocidad de giro de la rueda y que, por tanto, varían al variar la velocidad del tren.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. a ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En todos los casos, las componentes más destacadas registradas se sitúan entre los 0 Hz y los 1000 Hz, por lo que se especifican estos límites para los ejes de abscisas en todas las figuras. El número de repeticiones de las componentes frecuenciales más destacadas se representan mediante diagramas de barras azules. Encima y en color rojo, se ha superpuesto el espectro de potencia normalizado (respecto de la potencia total) promedio de todas las señales analizadas a modo de comparativa.

Al establecer el valor de referencia en el 50% (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), el número de componentes frecuenciales que cumplen este criterio es limitado, lo que se refleja en el número de repeticiones. Independientemente de la agrupación por bandas de frecuencia, se observa que la componente frecuencial más repetida se sitúa alrededor de 77 Hz, que se corresponde con el tercer armónico de la frecuencia de giro de la rueda F_r . Además de esta componente frecuencial especialmente destacada, también se aprecian componentes significativas en torno a 26 Hz, 123 Hz, 278 Hz, 513 Hz, entre 550 Hz y 650 Hz, y alguna componente más entre 800 Hz y 900 Hz.

Establecer el valor de referencia en el 25% (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) ocasiona que

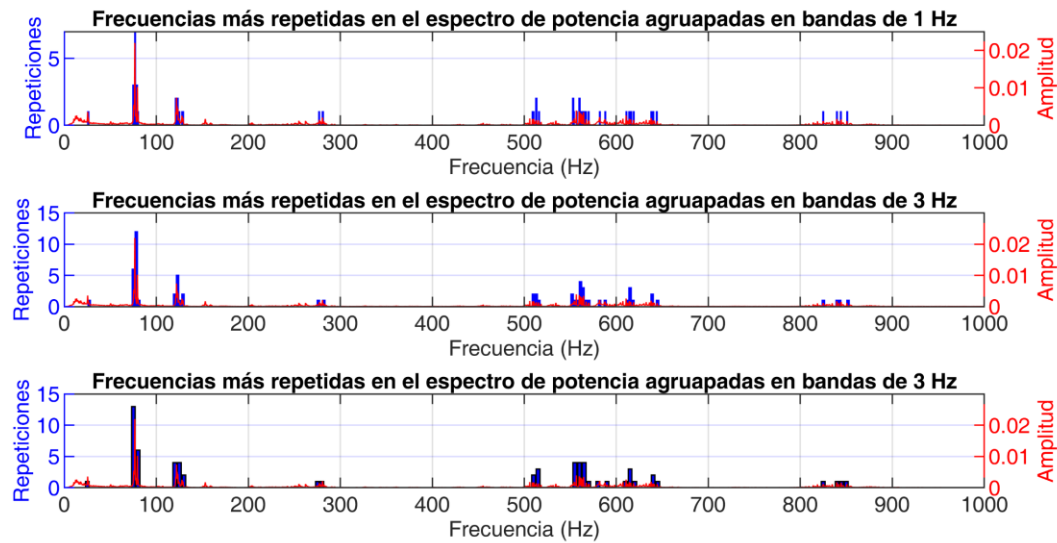


Figura 4. Representación de las componentes frecuenciales más repetidas en los espectros de potencia normalizados respecto a la amplitud máxima, agrupadas en bandas de 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Umbral establecido en el 50% de la amplitud máxima del espectro de potencia

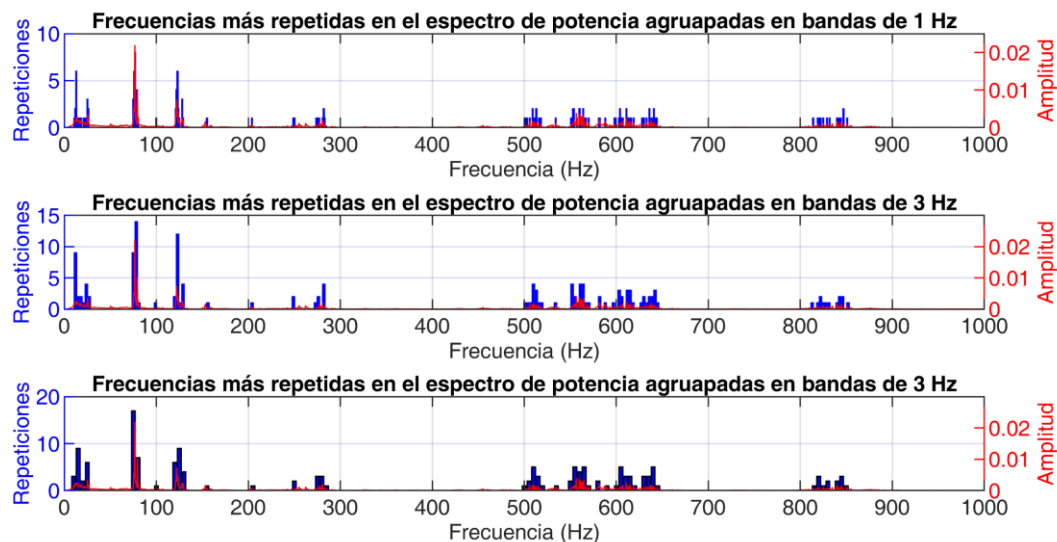


Figura 5. Representación de las componentes frecuenciales más repetidas en los espectros de potencia normalizados respecto a la amplitud máxima, agrupadas en bandas de 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Umbral establecido en el 25% de la amplitud máxima del espectro de potencia

se identifiquen como destacadas componentes frecuenciales que no eran visibles con el nivel de referencia anterior. Concretamente, aparecen componentes frecuenciales destacadas alrededor de los 12 Hz y 13 Hz, que es la mitad de la frecuencia de giro de la rueda. El resto de las componentes destacadas del espectro presenta un aspecto similar. Modificar el valor del umbral tiene un efecto directo en el número de repeticiones de las componentes frecuenciales más

destacadas: reducir el valor de referencia hace que se identifiquen un mayor número de componentes y, por tanto, aumente el número de repeticiones. Por esta razón, el número de repeticiones de las componentes frecuenciales significativas es ligeramente superior al obtenido cuando se fijó el nivel de referencia en el 50% de la potencia máxima del espectro.

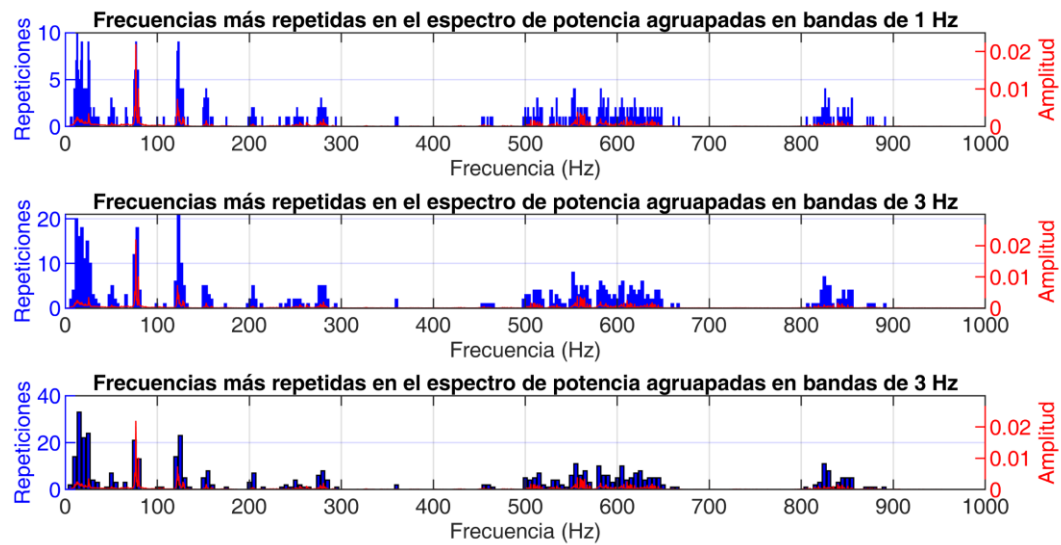


Figura 6. Representación de las componentes frecuenciales más repetidas en los espectros de potencia normalizados respecto a la amplitud máxima, agrupadas en bandas de 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Umbral establecido en el 10% de la amplitud máxima del espectro de potencia

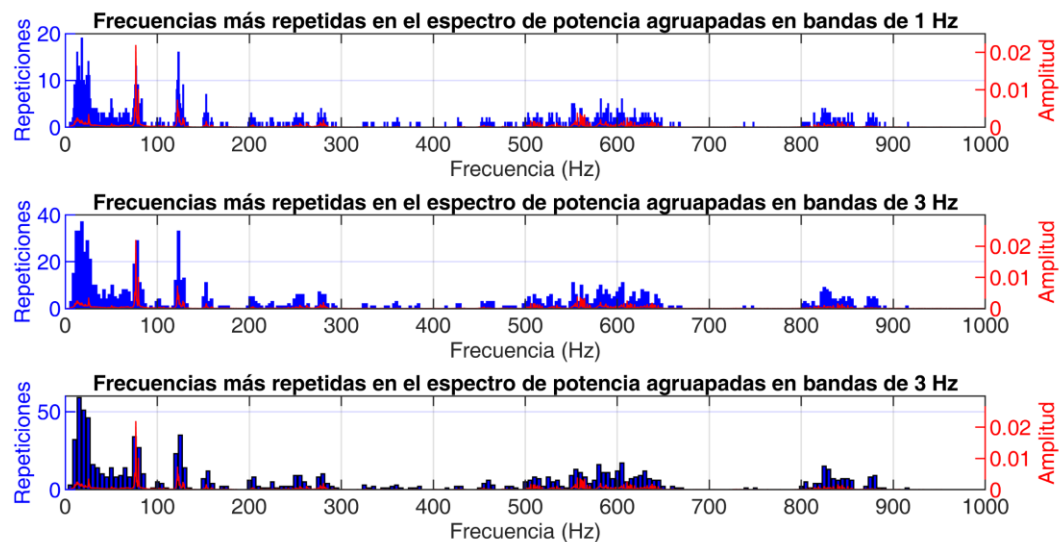


Figura 7. Representación de las componentes frecuenciales más repetidas en los espectros de potencia normalizados respecto a la amplitud máxima, agrupadas en bandas de 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Umbral establecido en el 5% de la amplitud máxima del espectro de potencia

En la **Figura 6**, se ilustra el resultado de establecer el nivel de referencia en el 10% de la potencia máxima. El número de componentes frecuenciales destacadas que superan el umbral es considerablemente mayor que en los casos anteriores. A baja frecuencia, cobran más protagonismo las componentes frecuenciales situadas alrededor de 13 Hz, enmascarando aquellas situadas alrededor de 26 Hz. Siguen identificándose muy bien

las componentes situadas en el entorno de los 76 Hz y los 123 Hz. Adicionalmente, se observan nuevas componentes frecuenciales entre 400 Hz y 500 Hz. Lógicamente, al agrupar las componentes en bandas más anchas se incrementa el número de repeticiones en cada una de las bandas, lo cual se refleja especialmente en las bandas de 5 Hz. Si se compara con el espectro de potencia promediado de todas las señales, se aprecia

que el método propuesto otorga un protagonismo destacado a las componentes de baja frecuencia.

Por último, se establece el valor de referencia en el 5% de la potencia máxima del espectro (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En este caso, la cantidad de componentes frecuenciales identificadas es tal que apenas se simplifica la información mostrada en las gráficas respecto a la del espectro de potencia. Aún así, se observa cómo la selección de componentes frecuenciales según el método propuesto destaca especialmente la zona de baja frecuencia. De hecho, el mayor número de repeticiones se localiza entre los 10 Hz y 30 Hz.

A la luz de estos resultados, se puede concluir que el nivel de referencia establecido en el 50% de la potencia máxima del espectro reduce demasiado la información extraída de los espectros de potencia, mientras que los umbrales del 10% y del 5% muestran demasiada información. Establecer el nivel de referencia en el 25% parece ofrecer el mejor compromiso entre sintetizar la información de los espectros de potencia y no perder información relevante de los mismos.

En cuanto al ancho de banda, aunque la idea de ampliar la anchura de las bandas es agrupar en la misma banda componentes frecuenciales con el mismo origen físico probable que varían ligeramente con la velocidad de giro de la rueda, esto no es siempre posible, aunque se utilice el ancho de 5 Hz. Por ello, 3 Hz parece ser también la mejor opción.

De acuerdo con los datos de la Tabla 3, se pueden relacionar varias de las componentes frecuenciales destacadas identificadas con su posible origen físico. Los valores presentados a continuación se relacionan con los anchos de banda de 3 Hz y un nivel de referencia del 25% de la potencia máxima del espectro.

En la primera zona de actividad, comprendida entre los 0 Hz y 350 Hz, destacan las siguientes bandas de frecuencia más repetidas:

- 12 Hz: se correspondería de forma aproximada con la frecuencia de fallo de elementos rodantes, FTF, cuyo valor es 11,65 Hz a 270 km/h.
- 24 Hz y 27 Hz: se correspondería con la frecuencia de giro de la rueda F_r .
- 75 Hz y 78 Hz: se corresponderían aproximadamente con el tercer armónico de la frecuencia de giro de la rueda F_r .
- 123 Hz: el origen físico de esta banda de frecuencia puede deberse a dos fenómenos muy próximos entre sí: el BSF del rodamiento y la frecuencia de paso por las traviesas.

- $282 \pm 1,5$ Hz: se correspondería con el undécimo armónico de la frecuencia de giro de la rueda F_r .

Dentro de la segunda zona de actividad (entre los 400 Hz y 650 Hz), se observa que las componentes más significativas se localizan entre los 500 Hz y los 650 Hz. Destacan las siguientes bandas de frecuencia más repetidas:

- 510 Hz: coincide aproximadamente con el vigésimo armónico de la frecuencia de giro de la rueda.
- 552 Hz, 561 Hz y 564 Hz: el origen físico probable se relaciona con el 22º armónico de la frecuencia de giro. Las variaciones de velocidad del tren durante el registro de las señales de vibración ocasionan que el mismo fenómeno se clasifique en bandas diferentes.
- Las componentes frecuenciales agrupadas en las bandas que se observan entre 600 Hz y 650 Hz se deben, probablemente, a los armónicos 23º y 24º de la frecuencia de giro de rueda, variando la banda en que se agrupan en función de la variación de la velocidad del tren.

En la tercera zona de actividad, localizada entre los 800 Hz y los 900 Hz, las bandas más destacadas se sitúan en 822 Hz, 843 Hz y 846 Hz. Todas ellas parecen originarse por el séptimo armónico de la BSF del rodamiento, clasificándose en una u otra banda en función de la velocidad del tren cuando se tomaron las medidas vibratorias.

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta un método basado en la selección de componentes frecuenciales significativas para extraer información relevante de los espectros de señales vibratorias con el fin de caracterizar el sistema mecánico de interés en unas condiciones dadas.

Este método se aplica a señales de vibración registrada en dirección vertical por los acelerómetros instalados en un Tren de Alta Velocidad que realiza el trayecto entre Madrid y Sevilla. Con el fin de obtener unas medidas en condiciones lo más similares posibles, el registro de las señales se realiza en una sección específica del trayecto donde la velocidad del tren se sitúa en torno a 270 km/h.

La aplicación del método supone definir un nivel de referencia o umbral respecto de la potencia máxima del espectro para seleccionar las componentes frecuenciales más destacadas. En este trabajo se proponen los niveles de referencia 50% (0,5), 25% (0,25), 10% (0,1) y 5% (0,05). Además, las

componentes frecuenciales seleccionadas se agrupan en bandas de ancho 1 Hz, 3 Hz y 5 Hz.

Los resultados muestran que el mejor compromiso entre la síntesis y la menor pérdida de información relevante se obtiene con un nivel de referencia del 25% y un ancho de banda de 3 Hz.

El método propuesto es útil para localizar dónde se sitúan las componentes frecuenciales destacadas del espectro que más repiten en las medidas tomadas. Es decir, permite identificar las componentes frecuenciales características del sistema mecánico en unas condiciones de operación dadas, obteniendo una firma del sistema. La variación de esta firma en las mismas condiciones de operación indicaría la presencia de un posible fallo.

Se han podido relacionar componentes frecuenciales con su probable origen físico, en la mayoría de los casos, armónicos de la frecuencia de giro de la rueda.

En trabajos futuros se pretende establecer un espectro de potencia promedio de referencia en condiciones normales de operación a partir del cual normalizar el resto. Los niveles de referencia se establecerán en base a este espectro promediado de referencia, de forma que sea más fácil detectar cambios en la condición de operación del sistema mecánico.

5. Agradecimientos

Esta publicación es parte del Proyecto de I+D+I MC4.0 PID2020-116984RB-C21, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Esta publicación es parte del Proyecto de I+D Diagnóstico inteligente de componentes críticos ferroviarios, financiado por la convocatoria Ayudas a Investigadores Tempranos UNED-Santander 2024.

6. Referencias

[1] Observatorio del Transporte y la logística en España, OTLE. "Informe anual 2022", Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2023.

[2] José Manuel Martín. "Estadísticas del INE de transporte por ferrocarril. Revista de Estadística y Sociedad. 2024. n.º 93 pp 22-25.

[3] G. Landucci, A. Tugnoli, V. Busini, M. Derudi, R. Rota, V. Cozzani. "The Viareggio LPG accident: Lessons learnt". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. vol. 24, n.º 4. pp. 466-476. jul. 2011, doi: 10.1016/j.jlp.2011.04.001.

[4] V. Esslinger, R. Kieselbach, R. Koller, B. Weisse. "The railway accident of Eschede – technical

background". *Engineering Failure Analysis*. vol. 11, n.º 4. pp. 515-535. ago. 2004, doi: 10.1016/j.engfailanal.2003.11.001.

[5] H. J. Oestern, W. Quirini & T. Pohlemann. "Facts about the disaster at Eschede". *Journal of orthopaedic trauma*, 2000. pp 287-290.

[6] C. Mafla, C. Castejon, H. Rubio. "Mantenimiento predictivo en tractores agrícolas. Propuesta de metodología orientada al mantenimiento conectado". *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. vol. 26, n.º 1. pp. 63-75. abr. 2022.

[7] J. M. Pertuz Argumedo. Investigación científica sobre normas aplicables al mantenimiento predictivo en máquinas rotativas usando análisis de vibraciones mecánicas. 2021.

[8] L. Ye, X. Xia, Z. Chang. "Dynamic prediction of the performance reliability of high-speed railway bearings". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. vol. 41, n.º 11. p. 532. nov. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2041-z.

[9] Y. Li, X. Liang, Y. Chen, Z. Chen, J. Lin. "Wheelset bearing fault detection using morphological signal and image analysis". *Structural Control and Health Monitoring*. vol. 27, n.º 11. nov. 2020, doi: 10.1002/stc.2619.

[10] M. Hassan, S. Bruni. "Experimental and numerical investigation of the possibilities for the structural health monitoring of railway axles based on acceleration measurements". *Structural Health Monitoring*. vol. 18, n.º 3. pp. 902-919. jul. 2018, doi: 10.1177/1475921718786427.

[11] P. Liu, S. Yang, Y. Liu. "Full-scale test and numerical simulation of wheelset-gear box vibration excited by wheel polygon wear and track irregularity". *Mechanical Systems and Signal Processing*. vol. 167. p. 108515. mar. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108515.

[12] Z. Kalengayi Tshilumbu, H. Rubio Alonso, A. Bustos Caballero, C. Castejón Sisamón, J. Meneses Alonso, J. C. Garcia Prada. "Nueva metodología para el análisis de la evolución de las frecuencias naturales con la presencia de grietas en ruedas ferroviarias". en 13o Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica / Ingeniería Mecánica. Livro de actas, Lisboa, Portugal. oct. 2017.

[13] D. Huang, S. Li, N. Qin, Y. Zhang. "Fault Diagnosis of High-Speed Train Bogie Based on the Improved-CEEMDAN and 1-D CNN Algorithms". *IEEE Transactions on Instrumentation and*

Measurement. vol. 70. pp. 1-11. 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3047922.

[14] J. Wang, C. Song, P. Wu, H. Dai. "Wheel reprofiling interval optimization based on dynamic behavior evolution for high speed trains". Wear. vol. 366-367. pp. 316-324. nov. 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.06.016.

[15] A. Bustos, H. Rubio, C. Castejon, J. C. Garcia-Prada. "Enhancement of chromatographic spectral technique applied to a high-speed train". Structural Control and Health Monitoring. vol. 28, n.o 12. p. e2842. sep. 2021, doi: 10.1002/stc.2842.

[16] D. Lebel, C. Soize, C. Funfschilling, G. Perrin. "High-speed train suspension health monitoring using computational dynamics and acceleration measurements". Vehicle System Dynamics. pp. 1-22. abr. 2019, doi: 10.1080/00423114.2019.1601744.

[17] L.-H. Zhang, Y.-W. Wang, Y.-Q. Ni, S.-K. Lai. "Online condition assessment of high-speed trains based on Bayesian forecasting approach and time series analysis". Smart Structures and Systems. vol. 21, n.o 5. pp. 705-713. 2018, doi: 10.12989/ss.2018.21.5.705.

[18] Y. W. Wang, Y. Q. Ni, X. Wang. "Real-time defect detection of high-speed train wheels by using Bayesian forecasting and dynamic model". Mechanical Systems and Signal Processing. vol. 139. p. 106654. may 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106654.

[19] A. Bustos, M. L. Del Castillo, M. Artés, J.C. García-Prada. "Estudio del comportamiento vibratorio de un tren de alta velocidad en operación real mediante EGRSC y ECBF". en 15º Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica. Libro de actas, Madrid, España, nov 2022.

[20] S. Braun, Procesamiento de señales: guía interactiva para ingenieros. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012.

[21] G. Kouroussis, D. P. Connolly, O. Verlinden. "Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects". International Journal of Rail Transportation. vol. 2, n.o 2. pp. 69-110. abr. 2014, doi: 10.1080/23248378.2014.897791.