



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## LA IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO FERROVIARIO PARA EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES

PACS: 43.40 Tm

Autores: Cardona, Joan<sup>1</sup>; Arcos, Robert<sup>2</sup>; Galceran, Salvador<sup>3</sup>; Torres, Rafa<sup>1</sup>; Subirà, Ada<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> AV Ingenieros, c/ Joan XXIII, 23, 08173 – St. Cugat del Vallès. Tel: 93.674.31.91. E-mail: [icg@avingenieros.com](mailto:icg@avingenieros.com)

<sup>2</sup> Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, Universidad Politécnica de Cataluña, LEAM-UPC. c/ Colom, 11, 08222 – Terrassa. E-mail: [robert.arcos@upc.edu](mailto:robert.arcos@upc.edu)

<sup>3</sup> Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, FGC. c/ dels Vergós, 44, 08017 – Barcelona. E-mail: [sgalceran@fgc.cat](mailto:sgalceran@fgc.cat)

**Palabras Clave:** vibraciones, tren, mantenimiento, rugosidad

### ABSTRACT

Vibrations generated due to railway infrastructures are generated at the wheel-rail contact zone and are caused by forces or loads generated there. One of the mechanisms that generate these loads is the roughness of the wheel and rail surfaces.

In this paper, experimental rail and wheel roughness contribution to the overall vibration level are determined separately. These results shows how important is the maintenance of these elements in order to control railway induced vibrations.

### RESUMEN

Las vibraciones ocasionadas durante la explotación de líneas ferroviarias se generan en el contacto rueda-carril debido a la aparición de fuerzas en dicho contacto, siendo uno de los mecanismos de generación la rugosidad de las superficies de rueda y carril.

En el presente artículo se determina de forma experimental la aportación de la rugosidad de rueda y la de carril, por separado, en el nivel de vibración global generado, lo que demuestra la importancia del mantenimiento ferroviario de estos elementos para el control de las vibraciones.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

### INTRODUCCIÓN

Particularmente desde los años 60, es conocido que el ruido y las vibraciones son origen de molestias e insatisfacción de las personas que lo sufren [1], más aún si esta molestia tiene lugar en las zonas de descanso, especialmente en las viviendas. Tal como se escribió en el Wilson Report de 1963 [2], existe una evidencia considerable de que a medida que el estándar de vida aumenta, la gente está menos dispuesta a tolerar el ruido.

El ruido y las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario tienen su origen en el contacto rueda-carril, con lo que una parte del nivel global de ruido y vibración la aportará el carril mientras que la otra parte la aportará la rueda. La dificultad de separar la aportación de cada uno de los dos elementos ha sido uno de los motivos por los que se ha tardado tanto en la introducción de unos límites, que en Europa y para el vector acústico se introdujeron en 2002 a través de las *Technical Specifications for Interoperability*, TSI [3,4].

Por tanto, para determinar la aportación de cada uno de los elementos que intervienen en la generación de vibraciones (como de ruido) para su control, el primer paso consiste en identificar las fuentes que causan dichas vibraciones, el segundo paso consiste en la cuantificación de la contribución de las diferentes fuentes, mientras que el tercer paso consiste en entender los mecanismos de generación para, consecuentemente, actuar de forma eficiente sobre las fuentes.

Mediante el mantenimiento se debe asegurar la operación ferroviaria en condiciones de seguridad, así como en condiciones de mínima afectación sobre el entorno de la infraestructura, con lo que las actuaciones sobre los mecanismos de generación se deben realizar para minimizar la aportación de las diferentes fuentes de vibración sobre las viviendas y vecinos próximos.

### GENERACIÓN DE VIBRACIONES

Las vibraciones se generan en el contacto rueda-carril debido a dos mecanismos distintos como son la excitación quasi-estática, debido a la carga de los ejes del tren circulando por una vía que presenta diferencia de rigideces del soporte a lo largo del trazado ferroviario, y la excitación dinámica, debido principalmente a la rugosidad de las superficies de contacto, es decir, la rugosidad de las ruedas del material móvil y el carril [9].

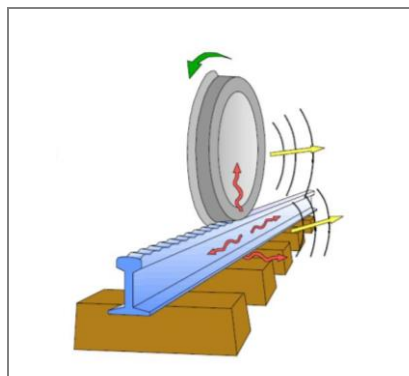


Figura 1. Ilustración del mecanismo de generación de vibraciones referente a la excitación dinámica [9].

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

De lo anterior se deduce que el efecto combinado de las rugosidades de rueda y carril es uno de los mecanismos principales de generación de vibraciones [5,6]. Ambos elementos constituyen un sistema mecánico expuesto al desgaste, que se traduce en una pérdida progresiva de la forma original de rueda y carril y en un incremento de la irregularidad de las superficies de contacto.

Por tanto, manteniendo en óptimas condiciones las superficies de rueda y carril, así como sus geometrías, se conseguirá un control óptimo de las vibraciones generadas por la explotación ferroviaria.

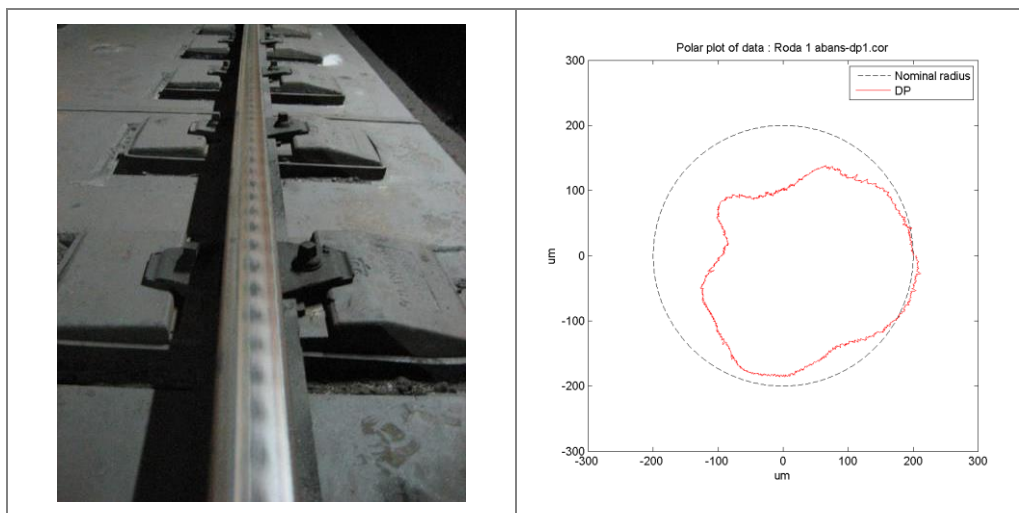


Figura 2. Ejemplo de desgaste ondulatorio de carril y de deformación de la geometría de la rueda (out-of-roundness). Fuente propia.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con el objetivo de demostrar la importancia del mantenimiento de las superficies de contacto de las ruedas y el carril para el control de las vibraciones generadas por la explotación ferroviaria, AV Ingenieros desarrolló un proyecto de investigación cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del programa Torres Quevedo en el que se determinó de forma experimental la aportación de la rugosidad de la rueda y del carril por separado sobre el nivel de vibración global en un punto de control.

Para ello, se contó con la colaboración de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya que cedió su infraestructura, así como sus instalaciones de mantenimiento de material móvil para que AV Ingenieros desarrollara la parte experimental del proyecto.

Por un lado, se eligió una unidad concreta que explota una de las líneas de los FGC y se determinó el perfil y la rugosidad de las ruedas de dicha unidad antes y después de que se realizara el mantenimiento ordinario sobre dicha unidad. Para ello, se contó con la colaboración del taller de mantenimiento que FGC alberga en el Centro de Operaciones de Rubí.

Por otro lado, se determinó la rugosidad de carril en diferentes estados de desgaste, desde un carril nuevo sin estrenar a un carril recién reperfilado y esmerilado, pasando por diferentes estadios intermedios de desgaste del carril.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

La Figura 3 muestra una vista de las medidas de rugosidad de carril (izquierda) y de rugosidad y perfil de rueda (derecha) llevadas a cabo en el marco del proyecto, mientras que la Figura 4 muestra un ejemplo del perfil de rugosidad de un carril (izquierda) y de una rueda (derecha).

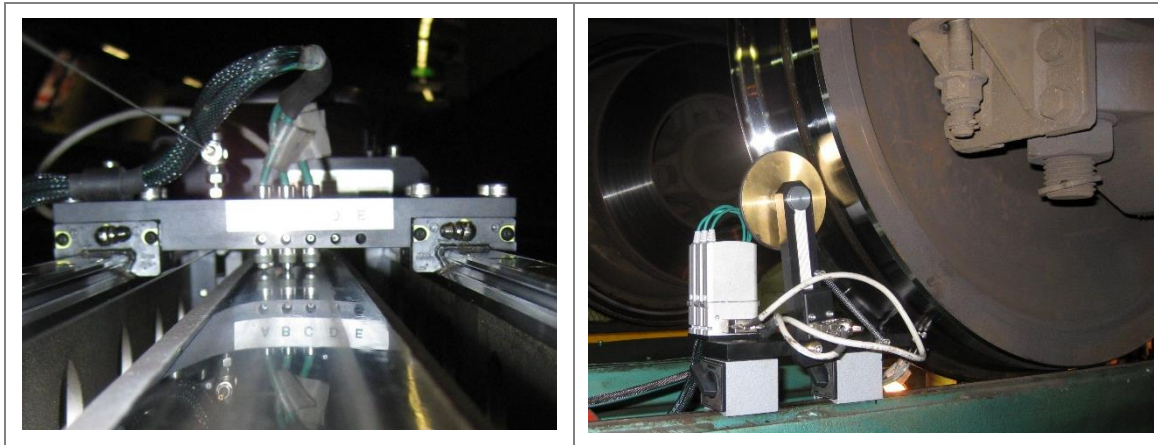


Figura 3. Vista de la medida de la rugosidad de carril así como de la rugosidad y perfil de la rueda.

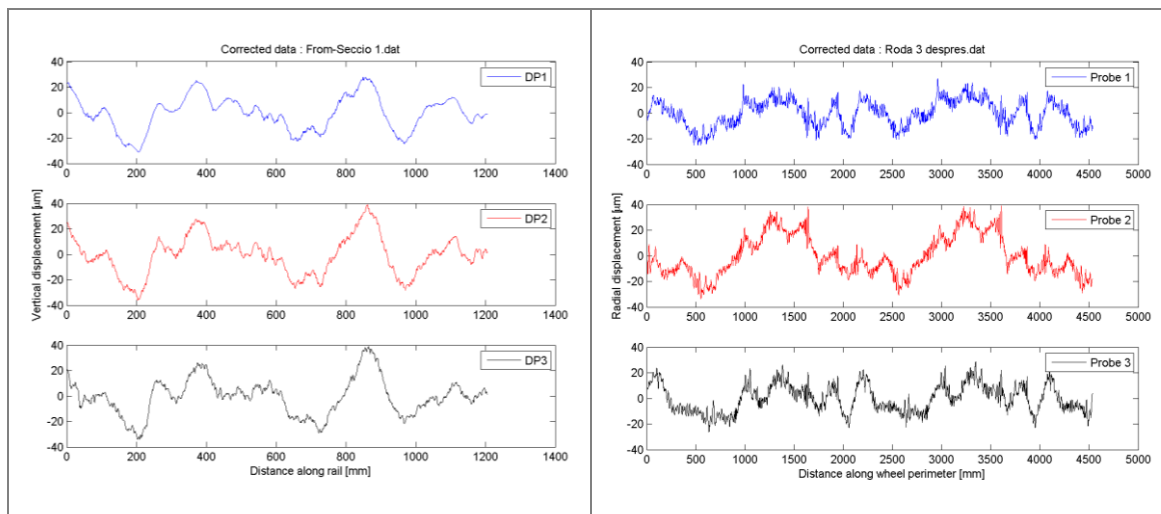


Figura 4. Ejemplos de rugosidad de carril (izquierda) y de rueda (derecha).

Finalmente, se registraron los niveles de vibración en el hastial del túnel durante la explotación comercial de la infraestructura ferroviaria, con tracking de posición de la unidad móvil de control, para los diferentes estados de mantenimiento del carril. Se registró la señal temporal de la aceleración de vibración en las tres direcciones ortogonales (x,y,z) de forma simultánea. Estas señales se recortaron convenientemente para la obtención de los espectros de vibración en bandas de tercio de octava correspondientes al tiempo de paso de tren.

La Figura 5 muestra una vista de los acelerómetros utilizados para la medida de las vibraciones inducidas en el hastial del túnel (izquierda) así como un ejemplo de la señal temporal de aceleración de vibración registrada (azul) y recortada para considerar sólo el tiempo de paso de tren (rojo), a la derecha.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

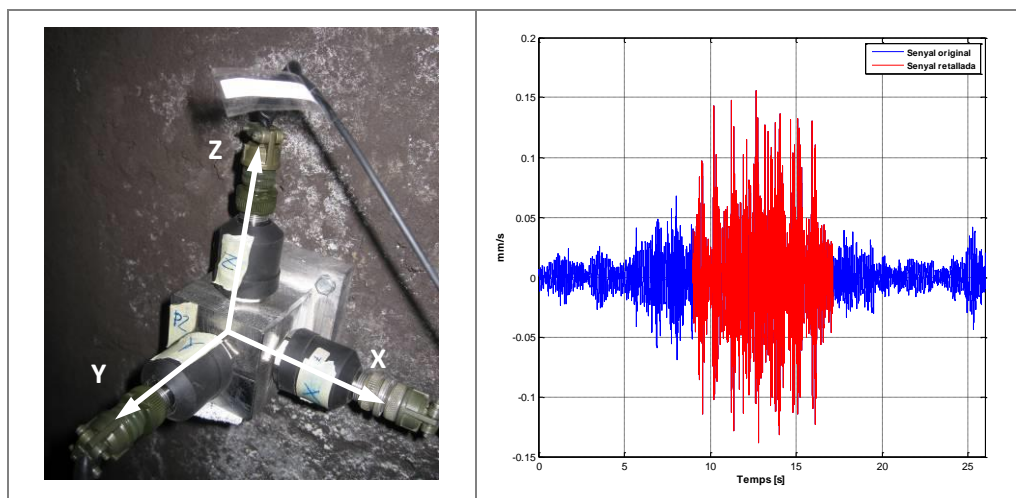


Figura 5. Vista de la medida de la rugosidad de carril así como de la rugosidad y perfil de la rueda.

## RESULTADOS

### Rugosidades

La Figura 6 representa los espectros de rugosidad en bandas de tercio de octava de los diferentes carriles caracterizados respecto el límite normativo (izquierda) así como una comparativa de los espectros registrados en el marco del proyecto de investigación respecto espectros de rugosidad disponibles en la bibliografía especializada (derecha). Tal como se observa en estas figuras:

- Un carril nuevo a estrenar presenta una rugosidad elevada en la zona de bajas longitudes de onda (alta frecuencia) debido a las irregularidades del acabado superficial.
- El desgaste del carril provoca una disminución de la rugosidad a bajas longitudes de onda y un aumento de la rugosidad en la zona de longitudes de onda elevadas. Este comportamiento es debido a la eliminación de las pequeñas irregularidades del carril a medida que se producen circulaciones, ya que el contacto de la rueda con el carril alisa la superficie de éste, y a la aparición de desgaste ondulatorio causado por el movimiento de lazo del tren.
- Finalmente, después de un reperfilado estándar del carril la rugosidad disminuye en todas las longitudes de onda del espectro, aunque esta disminución es más pronunciada en la zona de altas longitudes de onda. Este comportamiento evidencia que el reperfilado del carril es más eficiente para reducir el desgaste ondulatorio, conocido como corrugación, que no para reducir la rugosidad en la zona de bajas longitudes de ondas.

Comparando los espectros de rugosidad registrados en la red ferroviaria de los FGC respecto a los espectros consultados de la bibliografía, se observa que la red de los FGC presenta un buen estado de mantenimiento de los carriles puesto que su rugosidad está muy por debajo de la rugosidad máxima bibliográfica y ligeramente por encima de la mínima rugosidad hallada en la bibliografía.

Por lo que respecta a las ruedas, la Figura 7 muestra los espectros de rugosidad de las ruedas antes y después de ser sometidas al torneado para devolverles la geometría original, es decir, después de un tratamiento estándar no orientado a la reducción de su rugosidad. Asimismo, en esta figura (derecha) se presenta la comparativa de la geometría de las ruedas antes y

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

después del torneado, donde se aprecia los buenos resultados del torneado para minimizar el out-of-roundness de las ruedas.

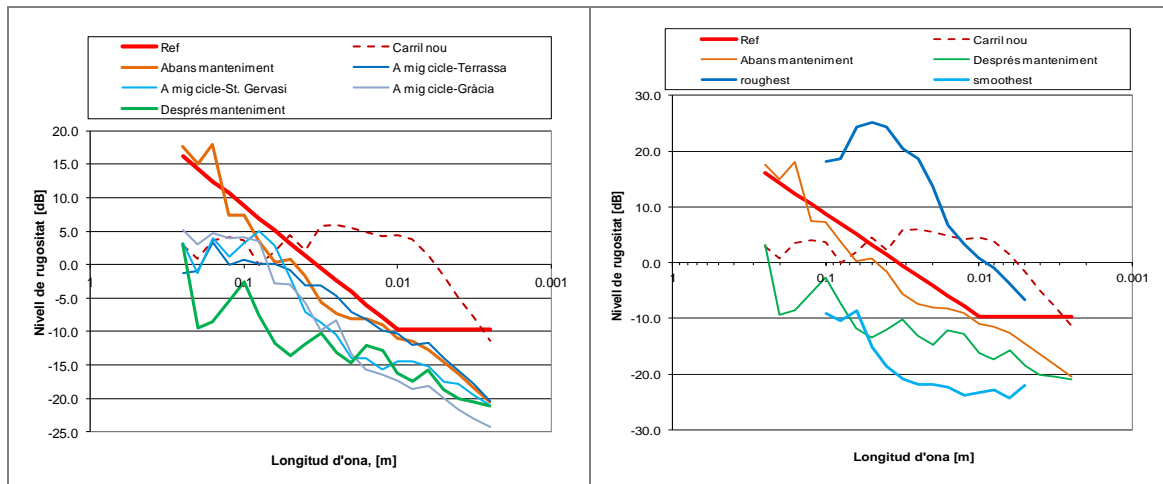


Figura 6. Espectros de rugositat de carril respecte al límit indicat per la normativa [3,7,8].

El torneado de las ruedas, además de devolverle su geometría original, provoca una disminución de la rugosidad en la zona de altas longitudes de onda, efecto coherente con el anterior, pero aumenta la rugosidad en la zona de bajas longitudes de onda. Este último efecto es debido a las marcas que deja el paso de la herramienta. Este efecto negativo del torneado de las ruedas es poco preocupante puesto que con los primeros kilómetros que realice la unidad, esta rugosidad desaparece debido al contacto rueda-carril.

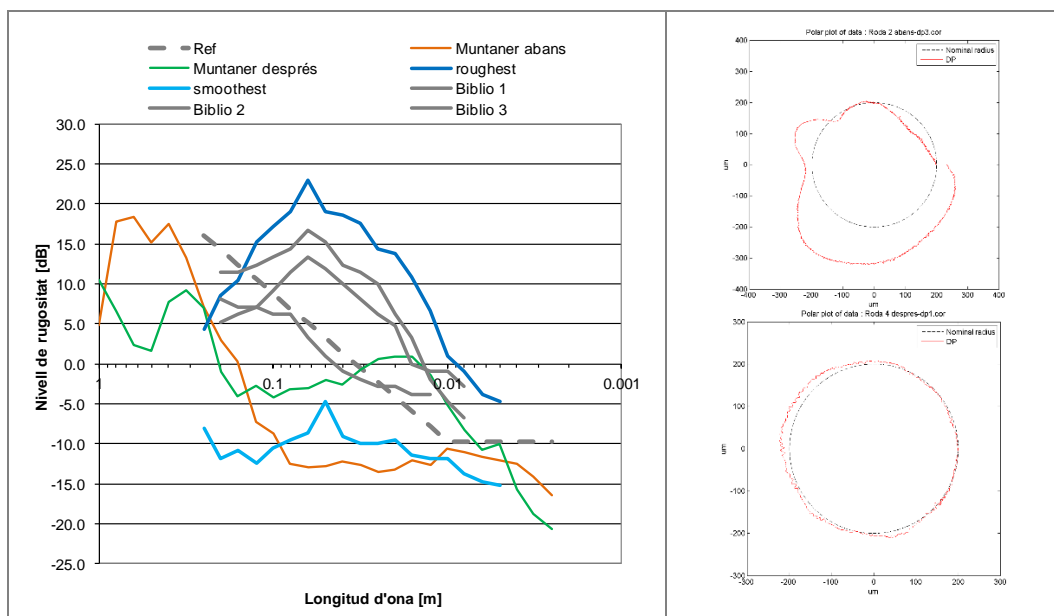


Figura 7. Espectros de rugositat de roda (izquierda) y ejemplo de la geometría de rueda antes y después del torneado (derecha).

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Como se puede apreciar en la figura anterior, las ruedas del material móvil de FGC antes de ser mantenidas presentan una rugosidad menor que la mayor parte de las rugosidades halladas en la bibliografía científica, mientras que la rugosidad de las después de ser torneadas es ligeramente superior a la mínima rugosidad bibliográfica.

### Vibración

La Figura 8 muestra los espectros de vibración en bandas de tercio de octava registrados en el hastial del túnel para diferentes estados de mantenimiento del carril. En rojo se representa el espectro de vibración inducido por circulaciones sobre carril en estado de máximo desgaste mientras que en azul se representa el espectro generado por circulaciones sobre carril recién reperfilado. Los dos espectros en gris de la figura izquierda se corresponden a circulaciones sobre carriles en estados de mantenimiento intermedios.

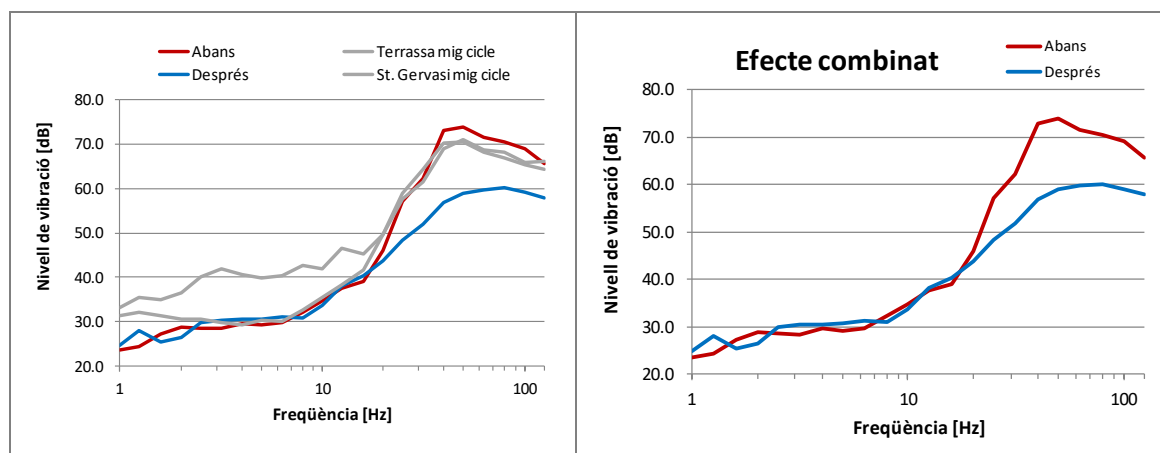


Figura 8. Espectros de vibración i ducidos por circulac i ones sobre difedrentes estados de mantenimiento de carril.

Como puede apreciarse en la figura anterior izquierda, las tareas de mantenimiento ordinario de los carriles provocan una reducción efectiva de los niveles de vibración en la zona de medias y altas frecuencias, a partir de la banda de 16 Hz, siendo ésta la frecuencia a partir de la cual el tren empieza a excitar el sistema.

En la Figura 8 derecha se presenta el efecto combinado del reperfilado de carril y del torneado y mejora de la geometría de las ruedas sobre el nivel de vibración. La efectividad de estas tareas de mantenimiento muy importante ya que es del orden de -13 dB.

En la Figura 9 se presenta la aportación parcial y por separado del carril y de las ruedas sobre el espectro de vibración. Como puede apreciarse en la Figura 9 izquierda, el carril aporta unos 8.5 dB al nivel de vibración global, siendo especialmente evidente esta aportación en el rango 30-63 Hz. Por su lado, en la Figura 9 derecha se presenta la aportación de la rugosidad y la geometría de las ruedas sobre el nivel de vibración. En este caso, las ruedas aportan unos 4.5 dB al nivel de vibración global.

A la vista de estos resultados, se puede establecer que el estado de mantenimiento de los carriles es el responsable de un 65% de las vibraciones inducidas por la circulación ferroviaria mientras que el estado de desgaste y falta de geometría de las ruedas aporta el 35% restante.

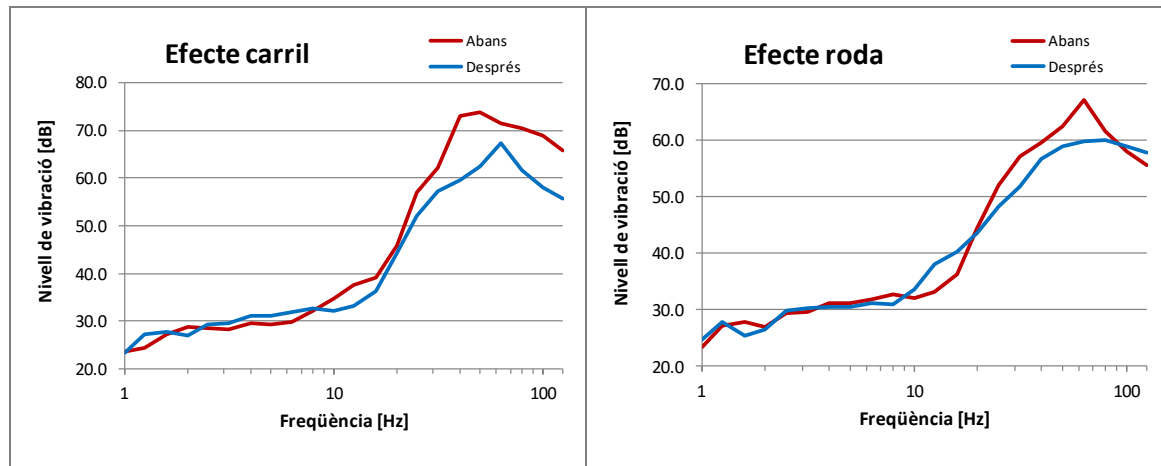


Figura 9. Aportación parcial del carril y las ruedas sobre el nivel de vibración.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan de esta investigación son las siguientes:

- El estado de mantenimiento de las superficies de contacto de rueda y carril puede aportar hasta 13 dB al nivel de vibración global generado por la explotación ferroviaria.
- De estos 13 dB, un 65% (8.5 dB) vienen dados por el estado de mantenimiento de la superficie del carril mientras que el 35% restante (4.5 dB) vienen dados por el estado de la superficie y la geometría de las ruedas.
- Teniendo en cuenta la dificultad para la reducción efectiva de la vibración generada por la explotación ferroviaria una vez ejecutada la infraestructura, esta investigación arroja unos resultados que dejan claro que el mantenimiento de la infraestructura y del material móvil es de vital importancia a la hora de tener un control sobre los niveles de vibración de la explotación ferroviaria, evitando que ésta genere molestias sobre la población cercana a la infraestructura.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la subvención recibida para el desarrollo del proyecto de referencia PTQ-08-03-08174 a través del programa Torres Quevedo.

Asimismo, agradecer a Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, FGC, su colaboración en el desarrollo de las campañas de medidas experimentales, poniendo a disposición del proyecto su infraestructura a instalaciones de mantenimiento.

## REFERENCIAS

- [1] D. Thompson. *Railway noise and vibration. Mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier, 2009.
- [2] A.H.Wilson et al. *Committee on the problem of noise – final report, Cmmd 2056*. HMSO, London, 1963.





## FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

- [3] Commission Decision 2002/735/EC concerning the Technical Specifications for Interoperability (TSI) relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system. *Official Journal of the European Communities*, L245, 402-506, 2002.
- [4] Directive 2001/16/EC of the European Parliament and of the Council of 19 March 2001 on the interoperability of the trans-European conventional rail system. *Official Journal of the European Communities*, L110, 1-27, 2001.
- [5] V.V. Krylov. Generation of ground vibrations by superfast trains. *Applied Acoustics*, 1995, 44, 149-164.
- [6] M. Hussein. Vibration from underground railways. PhD Thesis, University of Cambridge, 2004.
- [7] ISO 3095:2005. Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles.
- [8] ISO 3381:2005. Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles.
- [9] D.J. Thompson. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 1996, 149-160