

Evaluación de la severidad de un plano en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren

Assessment of severity of a flat at the rolling surface of the railway wheel

Elkin G. Flórez S^{1}, Salvador Cardona F², Lluïsa Jordi N²*

¹Programa de Ing. Mecánica. Universidad de Pamplona. Campus Universitario, Km 1 Vía B/manga. Pamplona. Colombia.

²Dpto. de Ing. Mecánica. Universidad Politécnica de Catalunya. Campus Diagonal Sur, Edificio H. Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona. España.

(Recibido el 20 de agosto de 2011. Aceptado el 26 de septiembre de 2012)

Resumen

La presencia de planos, aunque incipientes, en la superficie de rodadura es causa de un rápido deterioro del contacto rueda-carril con las consecuencias que ello conlleva tanto para el entorno como para el propio material rodante. Es por ello que la detección de estos planos, antes que se hagan aparentes por sus consecuencias, es de gran interés y motivo de estudio. En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en una extensa campaña de medidas llevadas a cabo en una línea del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona. La vibración del carril al paso de las ruedas se detecta mediante un acelerómetro situado en el pie del carril y el instante exacto de paso de las ruedas por la sección donde se encuentra el acelerómetro se determina mediante la deformación cortante del alma del carril. Se proponen, y aplican a los registros experimentales, distintos indicadores para cuantificar la severidad de los planos. Uno de los aspectos analizados a partir de los datos experimentales es la variación del pico de energía de la vibración detectada en función de la distancia entre la sección donde incide un plano con la vía y el acelerómetro. Este pico debe normalizarse para establecer correctamente la severidad del plano.

----- *Palabras clave:* Planos en la rueda del tren, análisis de vibraciones, transporte ferroviario

* Autor de correspondencia: teléfono: +57+7+5685303 ext: 164, 154. fax: +57+7+5685303 ext: 163. correo electrónico: eflomez@unipamplona.edu.co (E. Flórez)

Abstract

The presence of flat, even though incipient, at the rolling surface causes rapid deterioration of wheel-rail contact with the consequences that this entails for both the environment and for the rolling stock. Therefore the detection of these flats, before they become dangerous, are important as study material. This paper presents some of the results of an extensive measurement task carried out in a line of the Ferrocarril Metropolitano de Barcelona. The rail vibration generated by wheels passage is detected using an accelerometer located at the foot of the rail and their exact moment of passage on section where the accelerometer is located is determined by the shear strain of the soul of the rail. Are proposed, and applied to experimental records, different indicators to quantify the flat severity. One of the issues discussed from the experimental data is the variation of the peak energy of the vibration detected according to the distance between the section where the flat struck with the rail and the accelerometer. This peak should be normalized to set up correctly the severity of the flat.

----- *Keywords:* Rail wheel flat, vibration analysis, rail transportation

Introducción

Uno de los problemas con los que se enfrentan las empresas explotadoras del transporte ferroviario es la presencia de irregularidades en las ruedas del tren; planos, fisuras, desgastes en la superficie de las ruedas pueden estar presentes en los trenes que circulan diariamente por las vías. La presencia de defectos, aunque incipientes, en la superficie de rodadura es causa de un rápido deterioro del contacto rueda-carril con las consecuencias que ello conlleva. Durante el funcionamiento normal del tren, estos defectos generan ruido y vibraciones que disminuyen la calidad del servicio a los usuarios y que afectan al propio tren y al entorno por donde éste circula. Desde hace tiempo, se han estudiado y utilizado diversos métodos para la detección de defectos en la superficie de rodadura pero muchos de ellos requieren sacar de circulación el tren y, en algún caso, desmontar los ejes. Esto hace que el coste económico se incremente notablemente. Así pues, se requiere la implementación de sistemas que, sin afectar al funcionamiento normal de los trenes, permitan detectar dichos defectos. La experiencia del Laboratori de Vibracions del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Politècnica de Catalunya y la mayoría

de investigaciones realizadas [1–7] coinciden en la utilización de sistemas para medir vibraciones –acelerómetros–, fuerzas de contacto –células de carga– y deformación del carril –sensores extensiométricos– mediante un sistema fijo único instalado en la vía que permita la inspección de todos los ejes y las ruedas de un tren a su paso por dicho sistema.

La detección y la caracterización temprana de estos defectos permiten que el personal del servicio de mantenimiento tome las decisiones pertinentes para evitar tanto, daños a los componentes del tren, como paradas no programadas para realizar mantenimientos correctivos de las ruedas.

En este trabajo se establece un procedimiento para la detección y la caracterización de planos en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren. Para ello, se utiliza el análisis de las vibraciones generadas en el contacto rueda-carril en el dominio temporal, en el frecuencial y en el dominio conjunto tiempo-frecuencia. Se parte de los registros obtenidos en una extensa campaña de medidas llevadas a cabo en una línea del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona –FMB– [1, 8]. El trabajo se centra en la detección de planos (zona plana en la superficie de rodadura de la rueda de un vehículo ferroviario, causada

generalmente por patinaje de la rueda en el frenado [2]) en la superficie de las ruedas debido a que este fallo es el que se presenta con mayor frecuencia en ellas. Los defectos puntuales en los carriles suelen localizarse en los puntos de unión entre carriles. En la cuantificación del nivel de vibración producida por un plano, debe tenerse en cuenta que el sistema de medida se encuentra en un punto fijo y que el contacto entre el plano de la rueda y el carril, para diferentes pasos del tren, se produce a distintas distancias del punto de medida. Además, en este trabajo se estudia el efecto de dicha distancia sobre el nivel de vibración medido con el objetivo de establecer una medida normalizada de la severidad del plano [9]. A partir de esta medida normalizada es posible estudiar la evolución temporal del plano.

Experimentación

Durante un largo periodo de tiempo, se ha realizado la adquisición de las de señales de vibración generadas por el contacto rueda-carril al paso de los trenes que circulan por la línea 3 del FMB. Con la finalidad de obtener registros representativos a velocidades de circulación del tren lo más constantes posibles, se ha escogido un punto de medida situado en un tramo recto. Las medidas se han realizado en el carril derecho de la vía en sentido de la estación de Palau Reial hacia Zona Universitària en un punto equidistante entre ambas estaciones. El número de trenes que circulan por la línea 3 en horas no punta es de 24, con una frecuencia de paso de unos 2 minutos entre trenes, y durante las horas punta se incrementa en 4 ó 5 trenes, lo que reduce la frecuencia hasta aproximadamente 1,5 minutos. Los trenes que circulan por la línea 3 son siempre los mismos, aunque se cuenta con un grupo de trenes de reserva que entran en circulación en las horas punta o cuando alguno de los que opera normalmente requiere ser llevado a los talleres para alguna operación de mantenimiento. Los modelos de tren que circulan por la línea 3 están constituidos por 5 coches, correspondientes a 4 coches motor -M- y un coche remolque -R- con la siguiente distribución: M-M-R-M-M. Esto

hace que un tren tenga 10 bogies, que corresponde a 20 ejes de ruedas, de los cuales 16 son motrices.

La adquisición de las señales de vibración se ha llevado a cabo registrando en cada sesión, durante aproximadamente 1 hora, el paso de todos y cada uno de los trenes que han estado circulando por la línea 3. Así se tiene un registro para todas las unidades que circulan habitualmente por dicha línea. La adquisición se ha realizado en horario no punta un día por semana durante, aproximadamente, 8 meses y dividida en dos fases que han correspondido a: toda la primavera y parte del verano del 2008, en su primera fase, y durante los 3 meses del otoño del mismo año, en una segunda fase. En la primera parte del proceso de adquisición de las señales, el procedimiento experimental se ha definido con la finalidad de determinar la presencia de un plano en las ruedas del tren y estudiar su tendencia o evolución de la severidad a través del tiempo. Durante las primeras semanas, se han determinado los trenes que presentan algún plano para poder realizar su seguimiento, sin dejar de registrar la totalidad de los trenes que circulan por la línea. En esta primera fase, se han identificado dos trenes que presentan un plano importante en una de sus ruedas y que han sido utilizados para estudiar la evolución de la severidad del defecto. En total, en la primera fase de la adquisición de señales se han obtenido 448 registros de vibración, lo que corresponde aproximadamente a 18-20 registros por tren.

En la segunda fase del proceso de adquisición, se continúan tomando registros un día por semana para seguir identificando los trenes que presentan algún plano en sus ruedas, pero a diferencia de la primera fase ahora se realizan adquisiciones con una frecuencia diaria para los trenes que presentan planos importantes. Esta toma diaria se hace para evitar que los planos modifiquen notablemente su severidad y así poder caracterizarlos. En esta segunda fase, el número de registros adquiridos para cada uno de los trenes que presentan algún plano ha sido de 20 a 25 por cada tren. Teniendo en cuenta que un mismo tren circula por el punto de medida cada hora aproximadamente -

tiempo promedio que tarda en hacer un recorrido completo por la línea— y que la adquisición de los registros se ha realizado durante 6 horas, han sido necesarios cuatro días seguidos de adquisición de registros.

Las vibraciones se detectan mediante dos acelerómetros montados en el pie de carril y dentro de un utillaje, ya que la compañía FMB impone la premisa de no fijar ningún elemento permanente al carril mediante soldadura o agujereado y atornillado. Este utillaje se ha diseñado para dar protección efectiva a los acelerómetros. El instante exacto de paso de las ruedas por la sección donde se encuentra el acelerómetro se determina mediante la señal generada por un

sensor extensométrico que permite identificar el esfuerzo cortante del alma del carril. El conjunto de bandas extensométricas queda protegido entre la cabeza y el pie del carril. Es robusto frente a agresiones en las operaciones de mantenimiento de la vía y en cuanto a la suciedad, comparado con métodos ópticos como las células fotoeléctricas. Además, la detección del paso de la rueda mediante un sensor extensométrico es más fiable que mediante métodos ópticos de detección de presencia, que podrían detectar el paso de trenes por la vía paralela o el paso de elementos extraños en la zona de vías. Este montaje se realizó en 2005 y ha estado operativo sin problemas hasta el final de la campaña de medidas. La figura 1 muestra parte del montaje experimental utilizado.

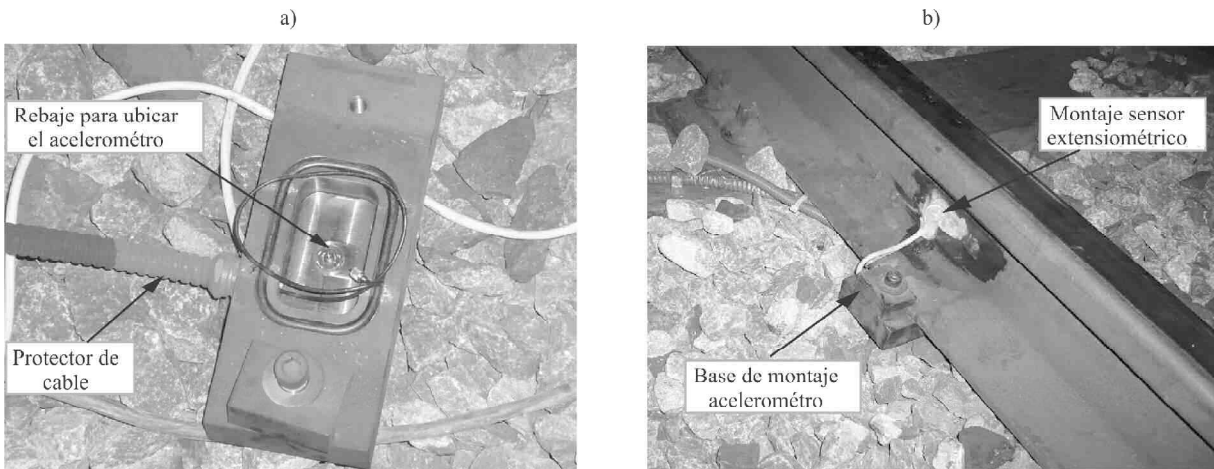


Figura 1 Montaje experimental a) del acelerómetro en el interior del utillaje y b) del sensor extensométrico

La figura 2 muestra un esquema general en el que se describe el montaje de los acelerómetros –A1 y A2– a lo largo del carril y la ubicación del sensor extensométrico en el alma del carril y en la misma posición, a lo largo del carril, en la que se ubica el acelerómetro A1. Los sensores se sitúan

en un único carril de la vía y se supone que no hay acoplamiento entre carriles para el estudio de la vibración generada por la presencia de planos en las ruedas del tren. El estudio se centra, por lo tanto, en las ruedas de un único lado del tren. La vía es balastada con carril UIC56.

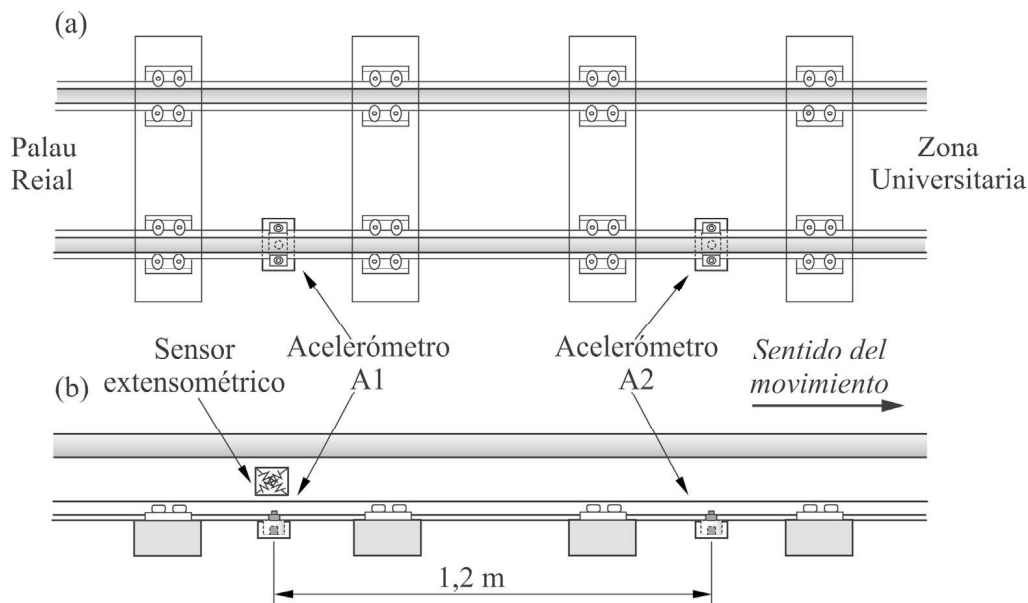


Figura 2 Montaje de transductores sobre la vía, a) vista superior, b) vista lateral

La separación de 1,2 m entre acelerómetros se ha escogido de manera que ambos se sitúan en el centro del tramo entre dos traviesas, con lo cual las características dinámicas de la vía para ambas localizaciones son equivalentes.

El perímetro medio de una rueda del FMB es del orden de 2,5 m, distancia que corresponde a la separación entre dos puntos de impacto sucesivos de un plano con el carril. La separación de 1,2 m entre acelerómetros garantiza que el impacto se produzca a una distancia inferior a 0,65 m de uno de los dos acelerómetros.

Las dos ruedas de un mismo bogie distan entre sí 2,25 m. Esta distancia no es suficiente para que la vibración producida por un plano en una rueda del bogie se atenúe completamente cuando se produce el paso de la otra rueda del mismo bogie. Por lo tanto, se requiere una estrategia para atribuir la vibración generada a una de las dos ruedas del bogie. Las dos ruedas del bogie generan simultáneamente vibraciones que se superponen en los puntos de medida, lo que dificulta la identificación del origen de posibles transitorios de vibración generados por planos. El análisis de las amplitudes de las señales da información para discriminar el origen de dichos

transitorios. Cuando la primera rueda inicia su paso por encima de los acelerómetros, la segunda se encuentra a una distancia superior y por lo tanto la vibración que genera se ve atenuada por la distancia. Por el contrario, cuando sea la segunda rueda la que circula por encima de los acelerómetros es la vibración generada por la primera rueda la que se ve atenuada.

La distancia mínima entre ruedas de bogies contiguos es de 4,34 m. Teniendo en cuenta la atenuación que sufren las vibraciones al propagarse a lo largo de la vía, esta distancia es suficiente para que la vibración generada por una rueda de un bogie interaccione poco con la vibración generada por una rueda de un bogie contiguo. Por lo tanto, se puede suponer que la vibración observada en el punto de medida cuando una rueda pasa por encima de él es debida a las dos ruedas del bogie, sin influencia de las vibraciones generadas por ruedas de bogies colindantes.

Identificación y métrica de los planos

Es evidente que en la dinámica del contacto rueda-carril, la continua repetición de los impactos sobre el carril debido a la presencia de

planos en la superficie de rodadura de las ruedas causan un deterioro tanto del carril como de la rueda; ésta última con mucha mayor rapidez dado que dicho impacto es soportado por la rueda a cada giro completo de la misma, mientras que para el carril el impacto se distribuye a lo largo de toda la línea. El nivel de vibración producido por estos impactos está ligado principalmente a la severidad del plano. En este trabajo se utiliza la determinación de la energía de vibración generada en el contacto plano-carril como una forma de conocer la severidad de dicho plano.

Dominio temporal

Las señales registradas al paso de los distintos trenes muestran gran similitud pero debe

mencionarse que se presentan algunas diferencias entre ellas. La primera es la duración temporal de la señal asociada a la velocidad del tren al paso por el punto de medida. La segunda diferencia es la posición temporal de los picos producidos por los pasos de las ruedas, debido a las diferentes distancias entre ejes de las ruedas de los distintos modelos de tren. La tercera diferencia es la amplitud de las señales de vibración, debida al estado superficial de las ruedas. La figura 3 muestra dos registros de vibración correspondientes al paso de un tren sin planos y un tren con planos en una de sus ruedas. El tren sin planos corresponden al tren de matrícula 2016 y el tren con un plano corresponde al de matrícula 3028. Ambas señales se han registrado el día 25 de noviembre de 2008.

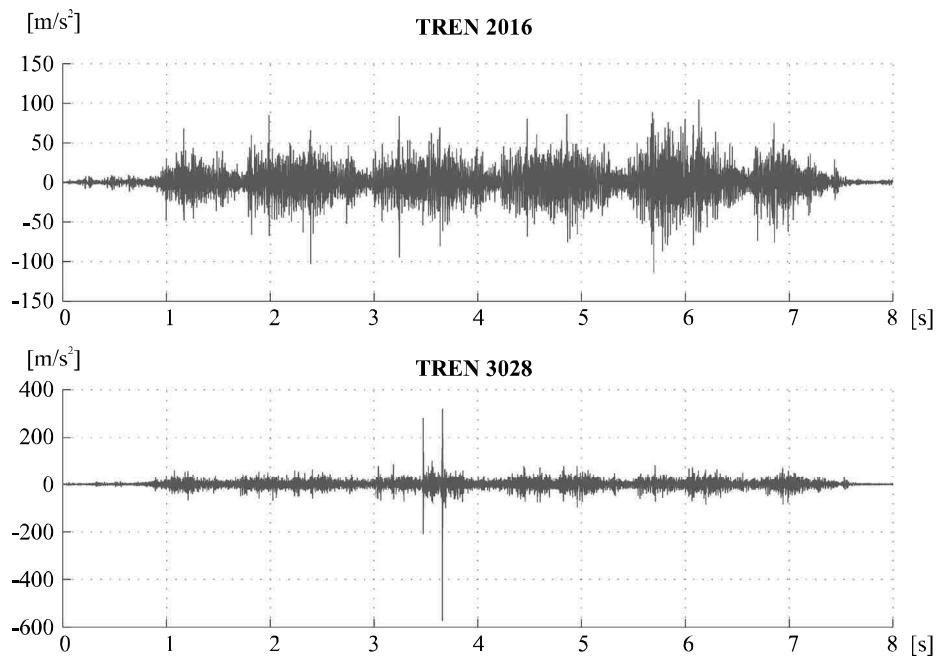


Figura 3 Registros temporales de vibración del a) tren sin planos (2016) y b) tren con un plano (3028)

El análisis de multitud de registros temporales de vibración, asociados al paso de trenes, pone de manifiesto que una buena magnitud para identificar los defectos puntuales de las ruedas es la energía de aceleración calculada mediante una ventana temporal corta. Así, sobresalen los picos frente a los valores medios y se atenúa el efecto

de los picos espurios. La expresión 1 muestra como se realiza su cálculo a partir de un registro de intervalo de muestreo Δt , ésta es:

$$E_i = E(i\Delta t) = \left[\sum_{j=0}^{n-1} a_{i+j}^2 \right] \Delta t \quad (1)$$

Siendo $n \Delta t$ la duración temporal de la ventana.

La experiencia ganada en el análisis de este tipo de señales permite identificar por inspección directa el instante aproximado del paso de cada una de las ruedas del tren por el punto de medida. Sin embargo esta identificación no es precisa. Para obtener el instante exacto de paso de las ruedas por el punto de medida se utiliza el registro del esfuerzo cortante al que está sometido el carril al paso de cada rueda,

determinado mediante el uso de un sensor extensométrico. En la figura 4 se muestra la identificación del instante de paso de cada una de las 20 ruedas del tren 2016 de la figura 3 por el punto de medida a partir de la señal adquirida utilizando el sensor extensométrico. El instante exacto del paso de la rueda se presenta cuando la señal cambia bruscamente de un valor negativo a otro positivo, debido a que la fuerza que la rueda ejerce sobre el carril pasa de un lado a otro de la sección en la que se ubica el sensor.

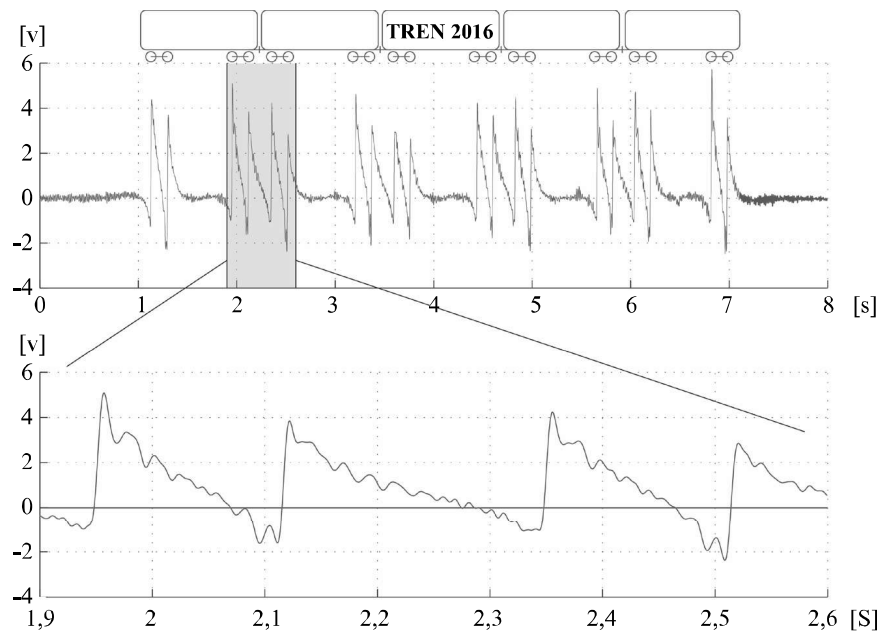


Figura 4 Ubicación del instante de paso de cada rueda del tren a partir de la señal del sensor extensométrico

A partir de las distancias entre los ejes de las ruedas y el registro temporal del esfuerzo cortante es posible determinar la velocidad del tren. Ésta permite establecer la escala entre el tiempo del registro temporal y el desplazamiento de la rueda sobre el carril. Por lo tanto, es posible identificar el tramo de la señal de vibración que describe el paso de un perímetro de rueda a lo largo del carril centrado en el punto de medida. Los resultados obtenidos han permitido determinar que los trenes estudiados aumentan ligeramente su velocidad

cuando circulan por el tramo de vía donde se encuentran instalados los sensores. La figura 5 muestra la velocidad de paso de cada uno de los bogies por el punto de medida. La tendencia al aumento de velocidad reflejada en la gráfica es común en todos los registros analizados. La pequeña irregularidad en el crecimiento de la velocidad se debe a la resolución temporal y a las tolerancias dimensionales de las magnitudes utilizadas en el cálculo de la velocidad. Esta irregularidad corresponde a variaciones de velocidad inferiores al 0,4%.

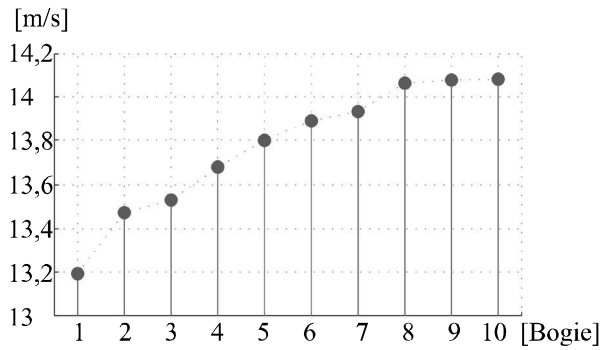


Figura 5 Velocidad de paso de cada uno de los bogies por el punto de medida

Dominio frecuencial

Con el fin de determinar la información que el análisis espectral proporciona en la determinación y caracterización de la presencia de defectos tipo plano en la superficie de rodadura de una rueda, se calculan los espectros de energía de las señales de vibración adquiridas para los trenes 2016 y 3028, que se corresponden con los registros de vibración de la figura 3. En la figura 6 se pueden observar los espectros de energía de aceleración, calculados por bandas de 1 Hz, para dichos trenes.

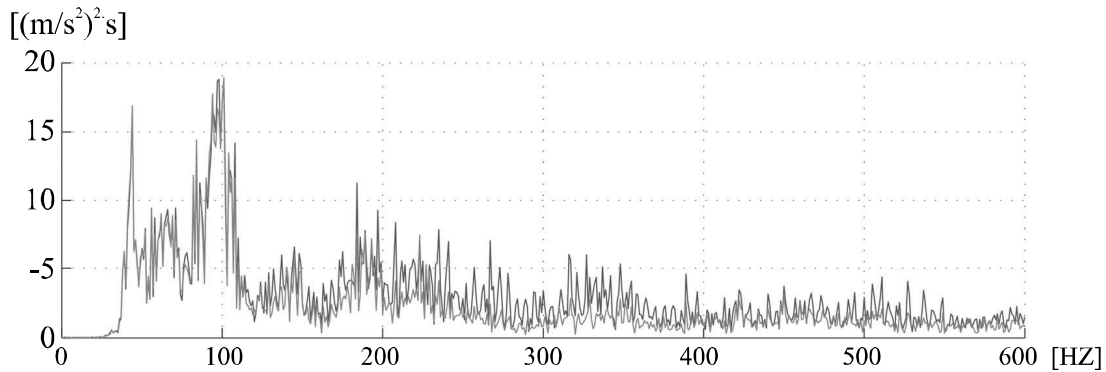


Figura 6 Espectros de energía para el tren 2016 (en rojo) y para el tren 3028 (en azul)

Los resultados obtenidos para los distintos registros muestran, en forma general, un incremento en la magnitud de la energía para las componentes de alta frecuencia. Este hecho está asociado a la energía que gana la vibración debido a la fuente de vibración adicional que representa el contacto plano-carril. Por lo tanto, a mayor amplitud del pico de vibración que describe dicho contacto en la señal mayor es el incremento en las altas componentes de frecuencia. A pesar de esto, el análisis espectral de la señal global de vibración no permite atribuir un indicador de la severidad del plano ni identificar la rueda que lo presenta.

Dominio conjunto tiempo-frecuencia

En el análisis de las vibraciones estudiadas se presenta la necesidad de analizar fenómenos localizados en tiempo y frecuencia [10-15];

es decir, que para su descripción requieren información conjunta de ambos dominios. El análisis de Fourier no es la herramienta adecuada para expresar explícitamente este tipo de información. En el caso de las señales de vibración no estacionarias, la Transformada de Fourier en tiempos cortos –STFT– y la transformada wavelet –CWT– juegan un papel importante en la búsqueda y/o determinación de las irregularidades y/o defectos en elementos mecánicos. Estas herramientas matemáticas son útiles para determinar características específicas de un sistema que presenta un comportamiento dinámico no estacionario. En este trabajo se usa la STFT.

En la STFT, la señal analizada se divide en pequeños tramos, en los que se supone que la señal es estacionaria, y a los que se aplica la Transformada de Fourier. Esto se realiza

utilizando una función ventana de ancho constante que se va desplazando y multiplicando con la señal original. Con la STFT se logra una mejor localización de la aparición de una singularidad en una señal de vibración. Sin embargo, sólo se conoce en qué intervalo de tiempo se produce la singularidad, debido a que la localización depende del ancho elegido para la función ventana. Además, si la vibración o la señal que la describe tiene distintos eventos éstos no pueden ser resueltos correctamente utilizando la STFT si los rangos de frecuencia que los caracteriza es muy amplio, dado que el tamaño de ventana constante restringe el ancho de frecuencias que es posible identificar. De esta forma, la ventana temporal establece el grado de resolución tanto de tiempo como de frecuencia que se desea. Si la ventana es muy estrecha se analiza una porción muy pequeña de la señal lo que permite tener una buena resolución temporal pero una mala resolución frecuencial y si la ventana es muy ancha se tiene una buena resolución frecuencial pero una mala resolución temporal.

Las señales se han adquirido con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz. La SFTF se ha calculado utilizando una ventana Hanning de 256 muestras con un solapamiento 224 muestras. Esto proporciona una resolución frecuencial de 7,8125 Hz y una resolución temporal de 16 ms. La resolución temporal junto con la velocidad de circulación del tren representa una resolución espacial de 220 mm, valor en general demasiado grande para una identificación precisa de la situación del plano.

Una forma común de representar la STFT es el espectrograma, gráfico que muestra en el eje horizontal el tiempo y en el eje vertical la frecuencia. Mediante el uso de una escala de colores se representa la energía del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo. La expresión 2 muestra como se realiza el cálculo del espectrograma, ésta es:

$$s = 20\log_{10}[\text{abs}(X)] \quad (2)$$

Siendo X la Transformada de Fourier de la señal ponderada con la ventana Hanning. En la figura 7 se muestra el espectrograma correspondiente a una señal de vibración producida por el tren 3028.

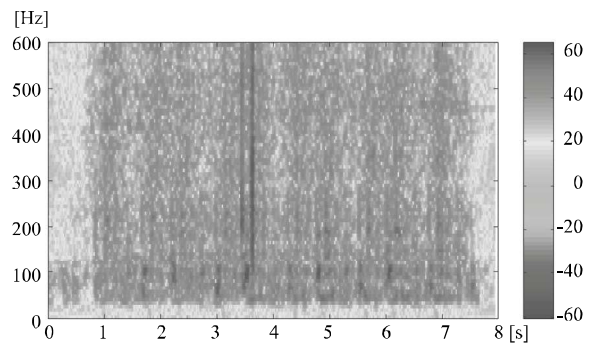


Figura 7 Espectrograma de una señal de vibración producida por el tren 3028

Resultados

La precisión en la determinación del instante exacto de paso de las ruedas por el punto de medida y el cálculo de la velocidad de circulación del tren permiten determinar la distancia entre el punto de medida y el punto de impacto del plano de la rueda sobre el carril.

Se han analizado señales, correspondientes a los trenes 3004 y 3072, adquiridas en días sucesivos de diciembre de 2008 para evitar que la severidad del plano cambiase significativamente. Para tener una cantidad significativa de registros que reflejen diferentes distancias entre la zona de contacto plano-carril y el punto de medida se han utilizado, además, los registros de los dos acelerómetros. La figura 8 muestra la amplitud de vibración en función de la distancia al punto de medida para los dos trenes estudiados que presentan planos. La amplitud de vibración se ha representado mediante el valor máximo de la energía de aceleración.

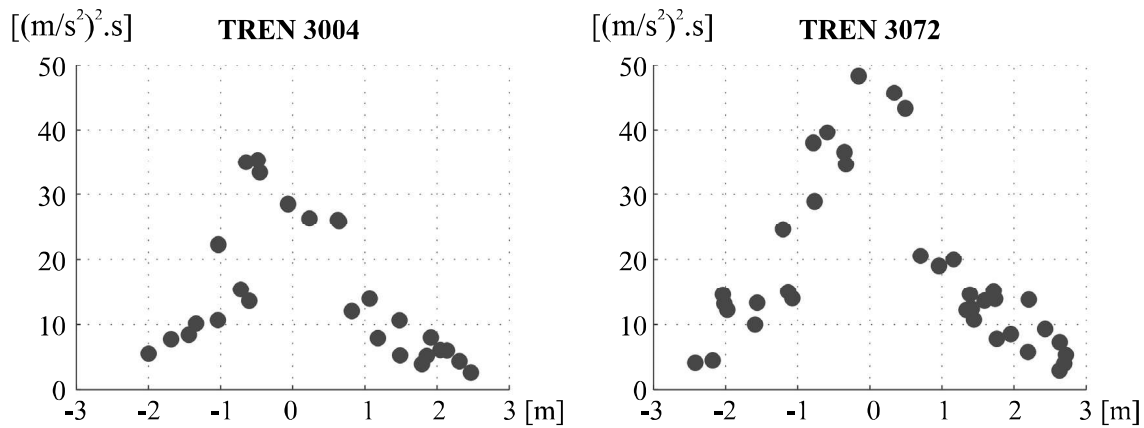


Figura 8 Amplitud de vibración generada por el contacto plano–carril para distintos pasos de la rueda

Como puede observarse, la amplitud depende de la distancia entre el punto de contacto y el de medida y de la atenuación a lo largo del carril. Así pues, se hace necesario conocer la atenuación de la amplitud de vibración a lo largo del carril para poder establecer de forma más precisa la severidad de un plano. Además, la amplitud de los picos no presenta un patrón bien definido.

La caracterización de la severidad de los planos en las ruedas de una manera más precisa necesita buscar modelos que ajusten la variación de la amplitud de la vibración con la distancia entre el punto de contacto y el de medida, así como la atenuación de la vibración a lo largo del carril. Estos son aspectos que se pretenden abordar en futuros trabajos.

Conclusiones

La selección de sensores extensométricos para la determinación del paso de las ruedas por el punto de medida ha demostrado ser una buena elección puesto que permite establecer con precisión el instante exacto de paso de la rueda sobre el punto de medida.

El análisis en el dominio temporal ha demostrado ser el más eficaz a la hora de detectar defectos tipo plano en la superficie de rodadura de las ruedas del tren.

Los resultados obtenidos en el análisis en el dominio conjunto tiempo–frecuencia de las señales adquiridas mediante el uso de STFT ha demostrado que, con una correcta selección de la función ventana, su tamaño y el solapamiento, se proporciona una, relativamente, buena identificación de la presencia de un plano en la superficie de rodadura de una rueda y la identificación de la rueda del tren que lo presenta, así como su caracterización y evolución.

Referencias

- 1 E. Flórez. *Detección y caracterización de planos en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren mediante el análisis de la vibración generada por el contacto rueda-carril*. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 2009. pp. 58-67.
- 2 B. Molina. *Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias*. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Madrid. Madrid, España. 2006. pp. 36-42.
- 3 S. Lechowicz, C. Hunt. *Monitoring and managing wheel condition and loading*. International Symposium Transportation Recorders. Arlington-Virginia (USA). 1999. pp. 205-239.
- 4 J. Melke, S. Kraemer. "Diagnostic Methods in the Control of Railwal Noise and Vibration". *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 87. 1983. pp. 377-386.
- 5 M. Boccione, A. Caprioli, A. Cigada, A. Collina. "A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy". *Mechanical System and Signal Processing*. Vol. 21. 2007. pp. 1242-1254.

- 6 M. Lee, W. Chiu. "Determination of railway vertical wheel impact magnitudes". *Field trials, Structural Health Monitoring: An International Journal*. Vol. 3. 2007. pp. 49-65.
- 7 M. Lee, W. Chiu. "A comparative study on impact force prediction on a railway track-like structure". *Structural Health Monitoring: An International Journal*. Vol. 12. 2005. pp. 355-76.
- 8 E. Flórez, S. Cardona, L. Jordi. *Uso de la STFT y la CWT en el análisis de vibraciones para detectar y caracterizar la presencia de un defecto en la superficie de las ruedas de un tren*. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Las Palmas de Gran Canaria. España. 2009. pp. 55-75.
- 9 D. Thompson. "Experimental analysis of wave propagation in railway tracks". *J. Sound Vib.* Vol. 5. 1997. pp. 867-888.
- 10 S. Mallat. *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, London, UK, 1999, pp.69-72
- 11 I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, USA. 1992, pp. 357
- 12 L. Cohen, "Time-Frequency Analysis", Prentice Hall PTR. New Jersey, USA. 1995. pp. 44-52
- 13 P. W. Tse, W. Yang, H. Tam. "Machine Fault Diagnosis Through an Effective Exact Wavelet Analysis", *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 277. 2004. pp. 1005-1024
- 14 H. Zheng, Z. Li, X. Chen. "Gear Fault Diagnosis Based on Continuous Wavelet Transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 16. 2002. pp. 447-457
- 15 J. Wu, J. Chen. "Continuous Wavelet Transform Technique for Fault Signal Diagnosis of Internal Combustion Engines". *NDT & E International*. Vol. 39. 2006. pp. 304-311