

Uso de la STFT en el análisis de vibraciones para detectar y caracterizar la presencia de un defecto en la superficie de las ruedas de un tren

Use of the STFT in the Vibration Analysis to Detect and Characterize Defects at the Wheels Surface of a Train

Elkin G. Flórez Serrano⁽¹⁾, Foix S. Cardona^{(2)*}, Luisa Jordi Nebot^{(3)*}

⁽¹⁾ Doctor en Ingeniería Mecánica, Fluidos y Aeronáutica. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Industrial y Mecatrónica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, eflorez@unipamplona.edu.co

⁽²⁾ Doctor en Ingeniería Mecánica, salvador.cardona@upc.edu

⁽³⁾ Doctora en Ingeniería Mecánica, lluisa.jordi@upc.edu

^(*) Universidad Politécnica de Cataluña, Dpto. Ing. Mecánica, Barcelona, España

Recibido 13 de julio de 2011, modificado 24 de enero de 2012, aprobado 10 de julio de 2012

Palabras claves

Vibraciones, STFT, mantenimiento predictivo

Key words

Vibrations, STFT, predictive maintenance

Resumen

El artículo muestra el procedimiento experimental utilizado para registrar las vibraciones que genera el paso de un tren por un punto fijo del carril. Igualmente muestra la forma de identificar y caracterizar un defecto en la superficie de una rueda, mediante el análisis en el dominio conjunto tiempo–frecuencia de dichas vibraciones utilizando la transformada de Fourier en tiempos cortos –STFT. Los resultados demuestran las ventajas de la STFT en esta aplicación, y cómo el uso de un sistema de monitorizado de las vibraciones generadas en el carril es eficiente y práctico en el mantenimiento predictivo de las ruedas de los trenes.

Abstract

The paper shows the experimental procedure used to record the vibrations generated by the passage of a train in a fixed point of the rail. Moreover, it also shows how to identify and characterize a defect on the surface of a wheel, by analyzing the joined time–frequency domain of these vibrations, using the short time Fourier transform –STFT. The results demonstrate the advantages of the STFT in this application, and that the use of a monitoring system of the vibration generated on the railway line is efficient and practical to implement a predictive maintenance of the train wheels.

INTRODUCCIÓN

La industria del transporte público ferroviario busca constantemente mejorar factores tales como calidad y seguridad del servicio prestado, tanto para los usuarios como para el entorno por donde circula el tren [1, 2]. Por lo tanto, se han dedicado muchos esfuerzos para evitar y/o detectar y caracterizar la presencia de defectos en los distintos elementos mecánicos que componen el sistema ferroviario –tren y carril–. Algunos trabajos preliminares [3, 4] establecen la importancia de monitorizar las condiciones de las ruedas y del carril como parte integral del funcionamiento general de este tipo de sistema de transporte. Uno de estos defectos, y de los más comunes, es la presencia de un plano en la superficie de cualquiera de las ruedas del tren. Éstos, en su mayoría, se generan por el deslizamiento de la rueda sobre el carril que se produce por

el bloqueo de las ruedas en el momento del frenado [5]. El plano, dependiendo del estado de gravedad, al hacer contacto con el carril genera tensiones elevadas, sobre todo superficiales en la rueda y en el carril, que aumentan la fatiga de rueda y carril. Por lo tanto, pueden propiciar el desarrollo más rápido de fisuras, grietas e incluso fracturas. Aunque en el transporte ferroviario no es común que se produzca un plano repentino en una rueda –normalmente evoluciona con el tiempo de circulación del tren– éste puede provocar un descarrilamiento que, aun sin producir víctimas, produce un elevado costo asociado de material y del servicio prestado. Además, la presencia de un plano en alguna de las ruedas afecta a las condiciones ambientales –aumento de las vibraciones y del ruido– del entorno por donde circula el tren. La

detección temprana de planos en las ruedas permite tomar las decisiones necesarias o realizar acciones oportunas, como por ejemplo, tornearse la superficie de la rueda con el fin de evitar daños en los componentes del tren, que pueden afectar la prestación del servicio, y llevar a paradas no programadas para realizar mantenimientos correctivos de las ruedas con los respectivos costos que esto genera.

Las empresas explotadoras del transporte ferroviario están encarando los problemas de generación de los defectos en las ruedas desde dos frentes. Por un lado, mejorando los sistemas de protección anti-patinaje y, por otro, mejorando las características de dureza y resistencia de los aceros [6,7]. En España, Molina [8] presentó la necesidad de contar con un sistema 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. Además, el sistema debe ser automático que no precise de un operario para que se ponga en funcionamiento.

El análisis de señales de vibración es, muy a menudo, utilizado para determinar la presencia de defectos y caracterizar el estado de los mismos en elementos mecánicos, máquinas o sistemas [9]. El análisis de señales de vibración se puede realizar en el dominio temporal mediante el cálculo del nivel de amplitud (rms, pico, etc), de la función densidad de probabilidad, de la correlación, etc., o alternativamente, en el dominio frecuencial ya sea mediante el uso de la TF (Transformada de Fourier) u otras funciones relacionadas con ella como la DEE (Densidad Espectral de Energía), o la DEP (Densidad Espectral de Potencia) dependiendo del tipo de señal que se analiza –transitorio o estacionario–. Cada uno de estos análisis –temporal o frecuencial– muestra excelentes resultados en la caracterización de los eventos contenidos en una señal cuando ésta tiene un comportamiento estacionario dentro del intervalo de tiempo finito de análisis. Sin embargo, presentan algunas deficiencias cuando, en dicho intervalo, la señal tiene un comportamiento no estacionario, principalmente, si se quiere conocer en qué instante hace presencia un componente de frecuencia específica. Los defectos superficiales en las ruedas del tren, como los planos, generan vibraciones de tipo impulsivo y aunque pueden ser detectados utilizando el análisis de las señales en el dominio temporal, en la mayoría de casos es difícil caracterizarlos totalmente.

Diferentes autores han utilizado el análisis de las vibraciones que genera el contacto rueda–carril para identificar defectos en las ruedas y en el carril. Algunos de ellos como Bocciolone et al., en [10], y C. Madriota et al., en [11], utilizan el cálculo del valor rms y la transformada de Gabor de las vibraciones del carril para identificar secciones corrugadas del mismo. De igual forma Caprioli et al., en [12], identifican las diferencias entre el uso del análisis de Fourier tradicional y la transformada *wavelet* sobre las señales de vibración generadas por el contacto rueda–carril como herramienta de diagnóstico del sistema.

En el presente estudio, se hace el análisis en el dominio conjunto tiempo–frecuencia, utilizando la transformada de

Fourier en tiempos cortos STFT, de las señales de vibración adquiridas para realizar una caracterización de dichos defectos. Esta herramienta matemática ha demostrado ser eficiente en el análisis de vibraciones no estacionarias. Por ejemplo, Vulli et. al., en [13], utilizaron la STFT para caracterizar la combustión normal de un motor e identificar el impacto sobre la misma del movimiento de las válvulas, los pulsos en los inyectores y los demás golpeteos.

En el caso de los defectos tipo plano, dependiendo del tamaño del mismo, se pierde el contacto entre la rueda y el carril en cortos intervalos de tiempo. Cuando no hay contacto, la rueda está cayendo –debido a la fuerza que gravita sobre ella– y el carril está subiendo –recuperándose de su deformación– hasta que el contacto se recupera, lo que genera grandes fuerzas de impacto [6]. En [1] y [2] se concluye que la presencia de planos o cualquier otro tipo de defecto superficial en la rueda es la principal causa de las fuerzas de impacto sobre el carril.

TRANSFORMADA DE FOURIER EN TIEMPOS CORTOS –STFT

Una forma de obtener el contenido frecuencial, alrededor de un instante deseado $t = b$, de una señal de vibración $x(t)$, es utilizar una ventana temporal apropiada $\phi(t)$ que al ser multiplicada por la señal original genere la función $f_b(t) = f(t) \cdot \phi(t - b)$. Esta función enmarca la porción de señal deseada y permite aplicar localmente la transformada de Fourier. De este modo, se obtiene la información del contenido frecuencial localizado temporalmente en el dominio efectivo de la ventana. Este último, al igual que en los filtros, se define como el ancho o tramo de la ventana rectangular con una ganancia de referencia que transmitiría la misma potencia que la ventana utilizada [14]. Desplazando temporalmente la ventana, se cubre la totalidad de la señal de vibración y se obtiene la información tiempo–frecuencia de la misma. Ésta es la metodología que define la transformada de Fourier en tiempos cortos –STFT.

La STFT de una señal $x(t)$, con respecto a la función ventana real y simétrica $\phi(t) = \phi(-t)$ definida por:

$$\phi_{b,\omega}(t) = \phi(t - b)e^{i\omega t} \quad (1)$$

normalizada $\|\phi\| = 1$ de modo que $\|\phi_{b,\omega}\| = 1$ para cualquier $(b, \omega) \in \mathcal{R}^2$, el cual es trasladada por el factor b y modulada por la frecuencia ω , se define por [14, 15, 16].

$$G_{\phi}x(b, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \phi(t-b)e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

Por lo tanto, $G_{\phi}x(b, \omega)$ produce el espectro de $x(t)$ en el intervalo alrededor de $t = b$. Resumiendo, en la STFT la señal analizada se divide en pequeños tramos a los que se aplica la transformada de Fourier. Ésto se realiza utilizando una función ventana de ancho constante y que se va desplazando y multiplicando con la señal original.

ADQUISICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN

Las señales de vibración analizadas en el presente estudio se generan por el contacto rueda–carril al paso de los trenes, que circulan en la línea 3 del FCMB (Ferrocarril Metropolitano de Barcelona), y se adquieren mediante el uso de acelerómetros montados al pie del carril en un tramo de línea recta entre las estaciones de Palau Reial y Zona Universitaria. Además, se utilizan sensores extensiométricos para determinar –mediante la medición de la deformación del alma del carril– el instante exacto del paso de cada una de las ruedas por el punto de medida y así poder atribuir a la rueda correspondiente la presencia de un defecto en su superficie. Los sensores están ubicados sobre un único carril, de los dos que tiene un tramo de vía. La justificación radica, además de las aplicaciones propias de la investigación, en el hecho de considerar que no hay acoplamiento entre los dos carriles de una vía [16].

Dado que el montaje del acelerómetro debe afectar lo mínimo posible a la geometría del carril, y debe evitarse que las señales eléctricas que por él circulan se vean afectadas –exigencias de la empresa explotadora del servicio–, éste se ubica en un soporte rígidamente unido al pie del carril, que, además, aísla y protege el acelerómetro y el cableado que transporta las señales desde el mismo. La figura 1–a muestra el soporte y el punto central donde se ubica el acelerómetro; posteriormente, el soporte se une al pie del carril mediante pernos, como se observa en la figura 1–b. Además, la figura 1–b muestra el montaje del sensor extensiométrico, unido al alma del carril.

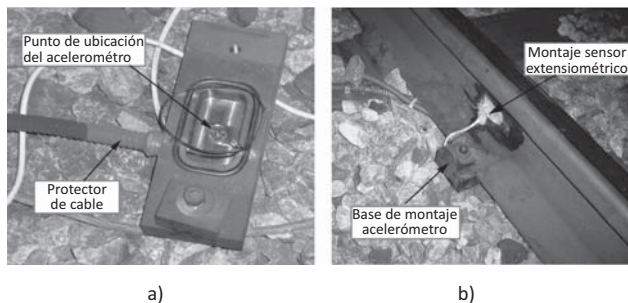


Figura. 1. a) Base metálica del acelerómetro; b) Montaje del acelerómetro y del sensor extensiométrico

La adquisición de las señales de vibración se ha llevado a cabo registrando el paso de todos los trenes que durante la sesión de toma de datos estaban circulando por la línea 3. Se ha realizado una sesión por semana durante aproximadamente 8 meses. Durante toda la fase de la adquisición o toma de datos se registraron 848 señales de vibración, lo que corresponde a aproximadamente 36–40 registros por tren.

Las señales procedentes de los sensores se han conducido, mediante un tendido de cable eléctrico fijado a la pared del túnel, hasta el extremo más cercano del andén de la estación de Palau Reial. Allí, se ha colocado una caja de conexiones para el equipo de acondicionamiento y adquisición de datos.

La adquisición se ha realizado mediante el equipo Pimento de 8 canales de la firma LMD, con software propio, del que dispone el Laboratori Vibracions de la UPC. Para el análisis de los registros de vibración adquiridos, se han desarrollado diferentes aplicaciones en el entorno *Matlab*[®]. Para el desarrollo de éstos se han aprovechado las principales funciones predefinidas y propias del software, utilizadas para estudiar señales en el dominio conjunto tiempo–frecuencia, y así poder determinar y caracterizar la presencia de uno o varios planos en la superficie de las ruedas de un tren en dicho dominio.

RESULTADOS

En la implementación de la STFT se requiere seleccionar la ventana temporal. Si la ventana seleccionada es muy estrecha, se analizan segmentos de señal pequeños que permiten tener una buena resolución temporal pero una mala resolución frecuencial, ya que sólo se podrán observar las componentes de frecuencias igual y mayores al inverso del tamaño de la ventana. Por otro lado, si la ventana seleccionada es muy ancha se tendrá una buena resolución frecuencial pero una mala resolución temporal; es decir, una ventana de ancho infinito o ancho igual al tamaño de la señal es nada más y nada menos que la TF clásica. Por lo tanto, con el uso de la STFT no se puede obtener una alta resolución temporal y frecuencial de manera simultánea. La raíz de este problema se basa en el principio de incertidumbre de Heisenberg [14, 16], que establece que es imposible conocer una representación exacta tiempo–frecuencia de una señal; es decir, es posible saber qué valor de frecuencia existe en un instante de tiempo determinado, asimismo, sólo es posible conocer qué componentes de frecuencia existen dentro de un intervalo de tiempo dado. Las ventanas desplazadas y moduladas $g(t-\tau) e^{-j\omega t}$ de la expresión (2) están bien localizadas en el dominio conjunto tiempo–frecuencia. Cada ventana se localiza en el rectángulo centrado en el punto (τ, f) de dimensión $\Delta t \Delta f$. Así pues, es importante determinar la relación ideal entre el ancho temporal y frecuencial de la ventana en función de la exigencia del análisis que se pretenda realizar.

Con el fin de identificar la forma en cómo influyen la selección del tamaño o longitud de la ventana –número de muestras– y su solapamiento, en la aplicación de la STFT, se realizó un estudio previo en el que se calculó el espectrograma de una señal tipo *chirp*. La tabla 1 muestra, de forma gráfica, los resultados obtenidos utilizando una ventana firma *LMD*, con tres longitudes de ventana diferentes –0,032 s, 0,064 s, y 0,128 s– y para cuatro solapamientos distintos –0%, 25%, 50%, 75%, los cuales son función del tamaño o longitud de la ventana. Los espectrogramas de la tabla 1 muestran en la coordenada horizontal el tiempo de duración de la señal, en s, desde 0 s hasta 1 s y en la coordenada vertical la frecuencia en Hz, que varía desde 0 Hz a 500 Hz.

La figura 2–a muestra el comportamiento de la implementación de la STFT, en su parte superior, y la densidad espectral de potencia media DEP, en la parte inferior de una señal de

vibración generada por el paso de un tren sin presencia de planos en la superficie de sus ruedas. La *DEP* se ha obtenido a partir de una técnica no paramétrica basada en el cálculo del periodograma. Para el mismo tren, las figuras 2-b, 2-c y 2d muestran cómo la *STFT* y la *DEP* revelan la presencia de un plano en la superficie de la primera rueda del tercer coche del tren (resaltado por recuadros en blanco). Hay que tener en cuenta que, tanto en la descripción de la *STFT* como en la de la *DEP*, el instante donde se presenta la distorsión de la figura coincide con el instante en el que pasa la primera rueda del tercer coche por el punto de medida (aproximadamente en los 3,8 s). Estas figuras también muestran la evolución de este plano con el paso del tiempo, aproximadamente durante

3 meses y aunque la evolución de un plano con el tiempo no es el objetivo de la investigación (la presencia del mismo sí), es importante mostrar esta característica, identificada por los autores durante la investigación. Teniendo en cuenta que el contacto de un plano con el carril se ve reflejado en la señal de vibración como una fuente de vibración tipo pulso [17, 18], para poder resaltar el plano se ha seleccionado una función ventana gaussiana, de ancho o tamaño 0,012 s y un solapamiento del 75%.

Para el caso del tren utilizado en el estudio de la tendencia de la severidad del plano, éste fue identificado en las primeras tomas de datos y semana a semana se le realizó seguimiento.

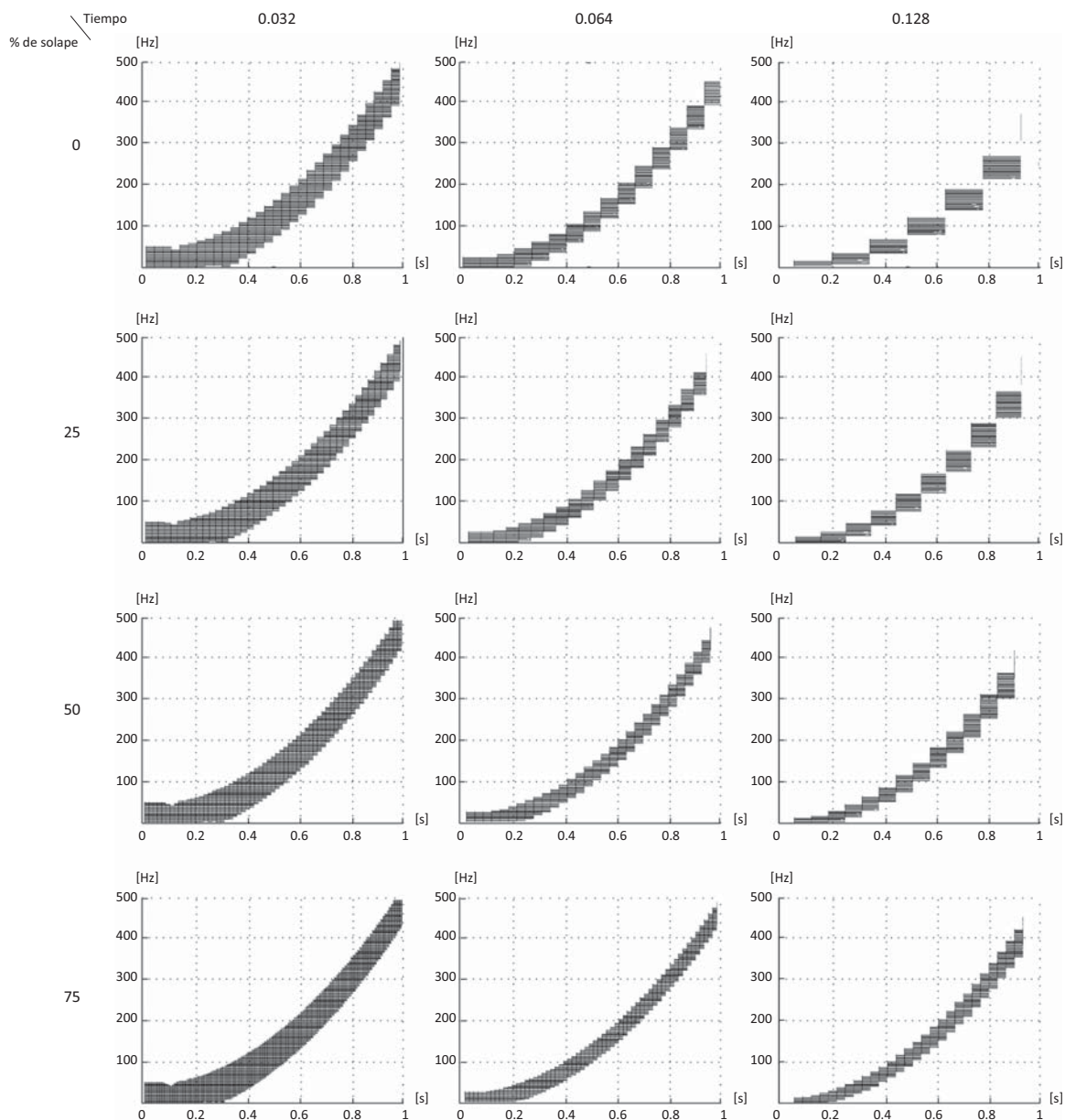


Tabla 1. Descripción gráfica de la influencia en la resolución del tamaño de la ventana y su solapamiento al aplicar la STFT a una señal tipo chirp

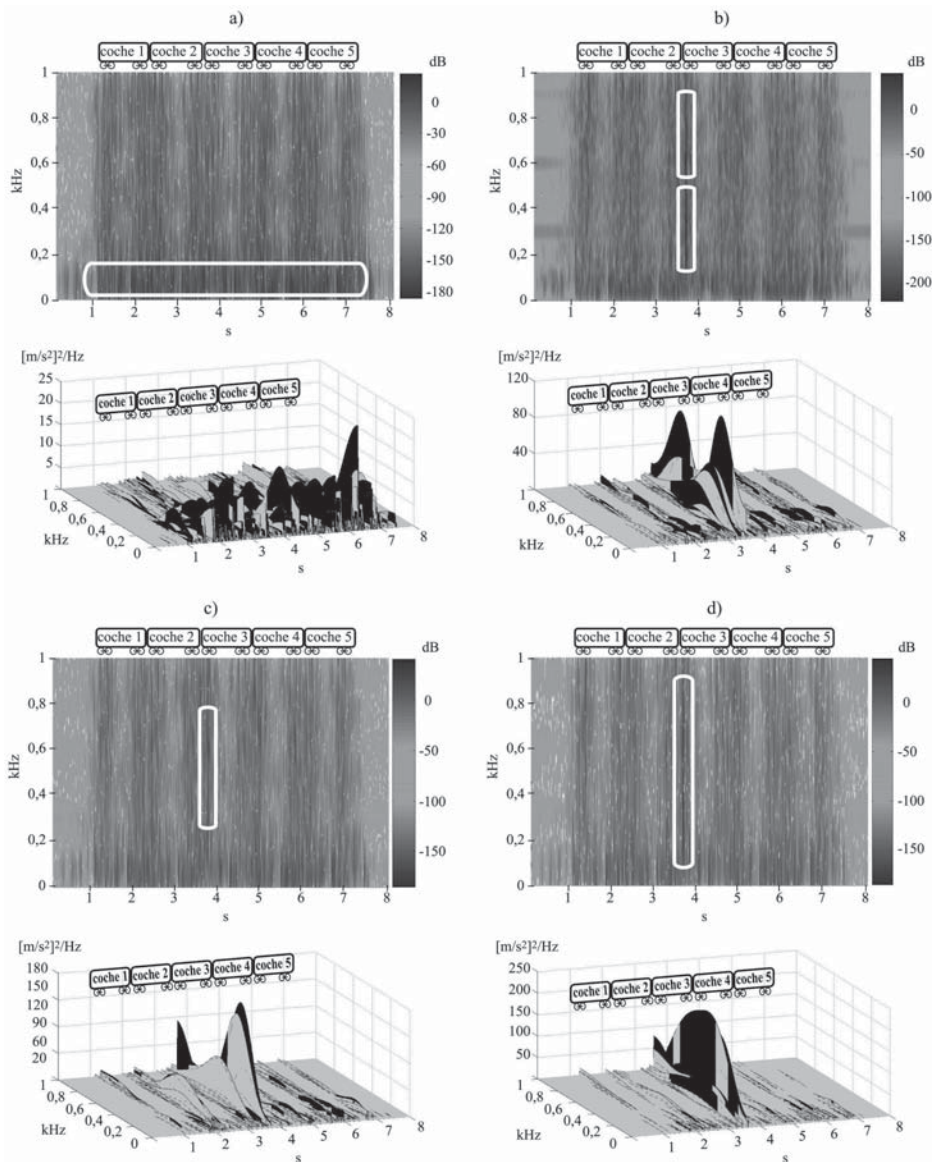


Figura 2. STFT y la DEP de la señal de vibración generada por el paso de un tren. a) Sin defectos en sus ruedas; b) con un plano en la primera rueda del coche 3 un mes después de ser identificado; c) el mismo plano dos meses después; d) el mismo plano 3 meses después.

DISCUSIÓN

La utilización de la STFT proporciona una buena localización de una singularidad o evento puntual en una señal. Sin embargo, sólo se conoce en qué intervalo de tiempo se produce esta singularidad, debido a que la localización depende del ancho elegido para la función ventana. Para dos o más eventos en una misma señal es posible, si éstos se encuentran a una distancia igual o cercana al tamaño de la ventana utilizada y, el solapamiento no es el adecuado, no puedan ser distinguidos o identificados en el mismo análisis.

En función del tipo de señal que se esté analizando y la información que se quiera extraer hay que elegir la función

ventana apropiada para el análisis; si la ventana es estrecha, la resolución temporal es buena pero la resolución frecuencial es pobre, y es difícil conocer exactamente los componentes frecuenciales de la señal; si la ventana es ancha, mejora la resolución frecuencial, pero la resolución temporal es pobre. Además, una vez que la función ventana se ha fijado, las resoluciones frecuenciales y temporales son constantes para todas las frecuencias durante todo el análisis.

Aunque en el desarrollo experimental se han utilizado dos acelerómetros ubicados en el pie del carril, los resultados obtenidos han demostrado que para caracterizar la presencia de un plano en la superficie de una de las ruedas sólo es neces-

ria la utilización de uno. Esto siempre y cuando se pueda determinar el instante exacto del paso de cada una de las ruedas del tren por el punto donde se ubica el acelerómetro –en el caso mostrado en el trabajo mediante el uso de los sensores extensiométricos–.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una forma de identificar y clasificar un defecto tipo plano en la superficie de la rueda de un tren a partir del análisis de señales de vibración en el dominio conjunto tiempo–frecuencia mediante la implementación de la STFT.

La STFT ha mostrado, utilizando los parámetros seleccionados (ventana gaussiana, ancho de ventana de 0,012 s y solape del 75%), –presentes en esta investigación– que son adecuados y suficientes para hacer una identificación de la presencia de un plano y la caracterización de su evolución en la superficie de la rueda de un tren.

Se ha concluido que la utilización de un sistema de monitoreo, como el utilizado en la presente investigación, es una herramienta efectiva para identificar defectos tipo plano en las ruedas de los trenes y que el uso del análisis en el dominio conjunto tiempo–frecuencia de las señales adquiridas, utilizando la STFT, hace un aporte significativo al diagnóstico de dichos defectos.

REFERENCIAS

- [1] D. Skarlatos, K. Karakasis, A. Trochidis. “Railway wheel fault diagnosis using a fuzzy–logical method”. *Applied Acoustics*, Vol., 65 No. 10, October, 2004, pp. 951–966.
- [2] M.L. Lee, W.K. Chiu, “Determination of railway vertical wheel impact magnitudes: Field trials”, *Structural Health Monitoring*. Vol., 4 No.3, March 2007, pp. 49–65.
- [3] D. Barke, W.K. Chiu, “Structural health monitoring in the railway industry: a review”, *Structural Health Monitoring*. Vol., 4 No.1, March 2005, pp. 81–93.
- [4] A. Johansson, J.C.O Nielsen, “Out–of–round railway wheels–wheel–rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations”. *J. Rail and Rapid Transit, Proc. Instn Mech. Engrs*, Vol., 217 No. 2, March 2007, pp. 135–146.
- [5] J. Nielsen, A. Igeland, “Vertical dynamic interaction between train and track –influence of wheel and track imperfections”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol., 187 No.5, November 1995, pp. 825–839.
- [6] T. Makino, T. Fujimura, M. Yamamoto. (September, 2001). “Spalling Properties of railroad wheel steel (investigation on skid flat an rolling contact fatigue properties)”. Presented in: *13th International Wheelset Congress, Roma (Italia)*.
- [7] J. R. Snell, Septiembre–2001, “Reducing the cost of ownership of rail vehicle wheelsetsk, *The UK experiencek*”. *13th International Wheelset Congress, Roma (Italia)*.
- [8] B. S. Molina, Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias. *Tesis de Doctorado*, Universidad Politécnica de Madrid, 2006
- [9] S. Gade, H. Herlufsen, “Use of weighting functions in DFT/FFT analysis (part I)”, In *Technical Review*, New York: Brüel & Kjaer, 1987
- [10] M. Bocciolone, A. Caprioli, A. Cigada, A. Collina, (Oct. 2001) “A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy. Presented in: *Mechanical System and Signal Processing*, Vol., 21, No. 3, April 2007, pp. 1242–1254
- [11] C. Mandriota, E. Stella, M. Nitti, N. Ancona, A. Distanto, ()“Rail corrugation detection by Gabor filtering”, Presented in: *International Conference on Image Processing*, IEEE, Thessaloniki, Greece, pp.626–628
- [12] A. Caprioli, A. Cigada, D. Raveglia, “Rail inspección in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol., 21 No. 2, February 2007, pp. 631–652.
- [13] S. Vulli, J.F. Dunne, R. Potenza, D. Richardson, P. King, “Time–frequency analysis of single–point engine–block vibration measurements for multiple excitation–event identification” *Journal of Sound and Vibration*, Vol., 321 No. 3–5 April, 2009, pp. 1129–1143
- [14] L. Cohen, *Time–Frequency Analysis*, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995, pp. 44–52
- [15] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, pp. 357
- [16] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*, London UK: Academic Press, 1999, pp. 69–72
- [17] E. Fernández, *Contribució a l’estudi de la detecció i l’anàlisi de les vibracions produïdes pels bogis d’un ferrocarril*. Tesis de Doctorado, ETSEIB, UPC, Barcelona, 2000
- [18] E. Flórez, S. Cardona, L. Jordi. Selecting the temporal window in the Short Time Fourier Transform used in the vibration signal analysis to determine flats at train’s wheels, *Revista Facultad de Ingeniería–Universidad de Antioquia*, 50, pp. 136–149 2009