



Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia

ISSN: 0120-6230

revista.ingenieria@udea.edu.co

Universidad de Antioquia
Colombia

Flórez, Elkin; Cardona, Salvador; Jordi, Lluïsa

Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren

Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 50, diciembre, 2009, pp. 145-158

Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43016338013>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren

Selecting the temporal window in the short time Fourier transforms used in the vibration signal analysis to determine flats at train's wheels

Elkin Flórez^{1}, Salvador Cardona², Lluïsa Jordi²*

¹Programa de Ingeniería Mecánica. Universidad de Pamplona Km 1 vía B/manga, Ciudad Universitaria. Pamplona, Colombia

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya. Av. Diagonal, 647, planta 0. Barcelona, España

(Recibido el 14 de noviembre de 2008. Aceptado el 26 de mayo de 2009)

Resumen

Uno de los problemas comunes que se presentan en las ruedas de los trenes, es la presencia de planos. Éstos generan un impacto suficiente como para afectar el funcionamiento normal del tren. La detección temprana de planos en las ruedas permite realizar las correcciones necesarias (tornear la superficie de la rueda) a fin de evitar daños a los componentes del tren que degraden la prestación del servicio a los usuarios. Aunque existen muchos sensores de vibración en el mercado para detectar vibraciones generadas por el paso de un tren, no hay aún una herramienta estándar que permitan detectar la presencia de planos en las ruedas del mismo. Este estudio presenta la selección apropiada de una ventana temporal para utilizar la Transformada de Fourier en Tiempos Cortos (STFT, por sus siglas en inglés) en el análisis de señales de vibración, tomadas al pie del carril y generadas al paso de un tren, que permita determinar la presencia de dichos planos. Para ello, en primer lugar se generó, utilizando la herramienta Matlab, una señal que simule la presencia de un plano y que permita conocer como la STFT, implementando diferentes ventanas temporales (Rectangular, Gauss, Hanning y Chebyshev), permite descubrir la presencia del mismo, en el dominio conjunto tiempo-frecuencia. Seguidamente, se aplica la STFT a señales tomadas en campo. Los resultados obtenidos demuestran que la STFT es una herramienta efectiva para detectar

* Autor de correspondencia: teléfono: + 034 + 69 + 625 33 44, fax: + 034 + 93 + 401 58 13, correo electrónico: eflorez@unipamplona.edu.co (E. Flórez).

planos en la rueda de los trenes, si la función ventana y sus parámetros se seleccionan correctamente al realizar un análisis tiempo-frecuencia.

----- *Palabras clave:* Planos en la rueda del tren, transformada de Fourier en tiempos cortos, ventana temporal, señales de vibración.

Abstract

One of the most typical problems in the wheels rail is the presence of flats. They can generate sufficient impact to cause bad operation of the train. Early detection of flat wheels allows the necessary corrections (turning surface of the wheel) before they cause serious damage to components of the train and degrade the performance of services to users. Although there are many vibration sensors in the market to detect vibrations, generated by the pass of a train, there are not powerful tools to detect the presence of flats on the wheels of the train, through analysis of these signals. This study presents the appropriate selection of the temporal window to use the Short Time Fourier Transform (STFT) in the analysis of vibration signals taken at the foot of the rail and generated by the pass of the train, which allows to determine the presence of these flats. To do this, a signal, using Matlab, was built to simulate the presence of flats and for knowing how the STFT, implementing different window functions (Rectangular, Gaus, Hanning, Chebyshev), reflects the presence of it, in both time and frequency domain. Finally, the STFT is implemented to real signals. The results show that the STFT is an effective tool to detect the presence of flats at the rail wheels wheter the temporal window and its parameters are properly selected to perform a time-frequency analysis.

----- *Keywords:* Rail wheel flat, short time fourier transform, temporal window, vibration signal

Introducción

Es bien conocido que el análisis de señales de vibración es, muy a menudo, utilizado para determinar la presencia de fallos y el estado de los mismos en elementos mecánicos, máquinas o sistemas [1]. En el análisis de señales de vibración, este se puede realizar en el dominio del tiempo mediante el *nivel de amplitud*, o, alternativamente, en el dominio de frecuencia ya sea por la *Transformada de Fourier* (TF), u otras funciones relacionadas con ella como son la *Densidad Espectral de Energía* (DEE) y la *Densidad Espectral de Potencia* (DEP). Cada uno de estos análisis –temporal o frecuencial– muestra excelentes resultados en la caracterización de los

eventos contenidos en una señal, cuando la señal que se analiza muestra, dentro del intervalo de tiempo finito de análisis, un comportamiento estacionario, pero presentan deficiencias cuando, dentro del intervalo de tiempo de análisis, tienen un comportamiento no estacionario. Esto último dado que con la simple caracterización en tiempo o en frecuencia, por separado, no se pueden definir o caracterizar totalmente los eventos contenidos en la señal.

Las señales de vibración producidas por el contacto rueda-carril al paso de un tren son señales transitorias [2, 3] y no estacionarias [4, 5], lo que ratifica la utilidad de realizar un análisis conjunto en tiempo-frecuencia, que permita hacer un apor-

te en la detección y caracterización de información contenida en este tipo de señales.

En la industria, la mayoría de señales de vibración son tomadas en diferentes condiciones de operación y durante un intervalo de tiempo determinado; por lo tanto, las señales transitorias son a las que con mayor frecuencia se enfrentan los ingenieros para su análisis. Algunas de estas señales pueden ser, el golpe en un troquel, la forma de vibración de una máquina arrancando o terminando de funcionar, así como la señal de la vibración producida en el pie del carril al paso de un tren. Estas últimas son las utilizadas en el presente estudio. Por lo anterior, en el presente artículo se muestra como la correcta selección de la ventana temporal utilizada en la STFT para el análisis tiempo-frecuencia, simultáneamente, de este tipo de señales hace de la STFT una buena herramienta para determinar la presencia de planos en las ruedas de un tren.

Transformada de Fourier en tiempos cortos

La Transformada de Fourier (TF) permite conocer todas las componentes de frecuencia de una señal y su respectivo aporte energético. Lo anterior determina que la TF tenga una gran resolución en el dominio frecuencial pero una resolución en el dominio temporal nula [6], debido a que la TF requiere, para su cálculo, la utilización de todos los datos temporales de la señal o del tramo de señal considerado, por lo que no se puede determinar en qué instante de la señal hace presencia una componente de frecuencia concreta. Por lo tanto, la TF es una herramienta bastante exitosa en el análisis de señales estacionarias. Sin embargo, ésta no puede ser aplicada con el fin de obtener información precisa de cuando las diferentes componentes de frecuencia hacen su aparición en la señal, como es el caso de las señales no estacionarias cuyo contenido espectral varía con el tiempo. Para resolver el problema de resolución en tiempo de la transformada de Fourier, Denis Gabor (1946) adaptó la transformada utilizando un procedimiento llamado ventaneado. Este procedimiento consiste en dividir una señal

$x(t)$ en pequeños segmentos a través del tiempo de forma que se pueda asumir que para cada segmento la señal es estacionaria y así calcular la TF en cada uno de ellos. La forma de dividir la señal se realiza mediante lo que se denomina una *ventana temporal* $g(t)$, cuyo ancho corresponde a la longitud del segmento o tramo en los que se divide la señal total. Matemáticamente hablando, se multiplica la señal total por la *ventana temporal* que tiene un valor definido dentro del intervalo de la ventana y un valor nulo fuera de él. Con la *ventana temporal* se encuadra la señal alrededor de un instante de tiempo τ y se calcula su transformada de Fourier; luego trasladando temporalmente la ventana se cubre un nuevo segmento de la señal al que se le vuelve a calcular la TF. Dicho procedimiento se realiza hasta cubrir la totalidad de la señal. Según lo anterior, se define la STFT para la señal $x(t)$ como

$$X_g(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1)$$

Se puede asumir que la ventana $g(t)$ es bien localizada en el intervalo centrado en el tiempo $t = 0$, y de longitud Δt y su transformada de Fourier $X_g(\tau, f)$ está también localizada en una banda de frecuencia centrada en $f = 0$ y de ancho Δf . Los valores obtenidos de $X_g(\tau, f)$ representan un esquema del dominio tiempo-frecuencia y muestra la información que contiene la señal en dicho dominio. Finalmente, se puede definir una ventana ideal como aquella que permita determinar unívocamente el contenido frecuencial y la energía total del tramo de señal donde es impuesta; es bien conocido y pesa que este tipo de ventana al igual que los filtros ideales no son físicamente realizables [7, 8]. Por tanto, para una eficiente aplicación de la STFT, se ha de determinar la ventana temporal y sus respectivos parámetros que mejor se ajusten al tipo de señal que se pretende analizar.

Función ventana

Para hablar de la resolución en tiempo-frecuencia de la STFT, se requiere hablar de la selección de la ventana temporal. Si la ventana seleccio-

nada es muy estrecha se analizan segmentos de señal pequeños que permiten tener una buena resolución en tiempo pero una mala resolución en frecuencia 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 en frecuencia pero una mala resolución en tiempo, i.e; 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, un defecto de la STFT es el no poder dar una alta resolución tanto en tiempo como en frecuencia de manera simultánea. La raíz de este problema se basa en el principio de incertidumbre de Heisenberg [9, 10], el cual establece que es imposible conocer una representación exacta tiempo-frecuencia de una señal; es decir, no podemos saber qué valor de frecuencia existe en un instante de tiempo determinado, sólo podemos conocer qué componentes de frecuencia existen dentro de un intervalo de tiempo dado. Las ventanas desplazadas y moduladas $g(t-\tau) e^{-j\omega\tau}$ de la ecuación (1) están bien localizadas en el dominio conjunto tiempo-frecuencia. Cada ventana se localiza en el rectángulo centrado en el punto (τ, f) con dimensión igual a $\Delta t \Delta f$. Por lo anterior, 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. Esta relación está limitada y satisface que [10]

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{2}. \quad (2)$$

La igualdad en la ecuación (2) se da cuando la ventana $g(t)$, utilizada es una ventana Gauss, caso para el que la STFT se conoce como la *Transformada Gabor*.

En la figura 1 se muestran la forma en el dominio temporal y la respectiva respuesta frecuencial de las ventanas comúnmente utilizadas, tanto en el análisis de vibración (Hanning y Gauss) como en el análisis general (Rectangular

y Chebyshev), en la STFT y que se utilizan en el desarrollo del presente trabajo. El número de muestras utilizado (ancho de la ventana) para los ejemplos de la figura 1, es $\Delta t = 64$ (línea punteada) y $\Delta t = 128$ (línea continua). El beneficio de conocer el comportamiento de las diferentes ventanas radica en que el usuario puede seleccionar la más idónea para la aplicación de la STFT a la señal a analizar y, así, minimizar los errores que se presentan debido al hecho de no utilizar una ventana ideal. A continuación se definen los principales parámetros que caracterizan a una ventana temporal y en la tabla 1 se muestran los respectivos valores de los mismos, tanto de las ventanas utilizadas en el desarrollo del presente trabajo como las de otras comúnmente usadas en el análisis de señales.

- a) *El ancho de banda a 3 dB* es la diferencia entre las frecuencias en las que su atenuación, al aplicar la ventana, se mantiene igual o inferior a 3 dB comparada con la frecuencia central del pico (máximo). Este parámetro da información acerca de la habilidad que tiene la ventana para separar componentes de similar amplitud; por lo tanto, determina la resolución del análisis.
- b) *Selectividad* es un descriptor que indica la habilidad de la ventana para separar componentes de niveles ampliamente diferentes. El parámetro básico para conocer la selectividad es el *factor de forma*, que se obtiene de la relación entre el ancho de banda a 60 dB y a 3 dB.
- c) *Altura del lóbulo-lateral principal*. Los lóbulos laterales de gran magnitud producen efectos de rizado en la respuesta frecuencial del tramo de señal ventaneado.
- d) *Magnitud del rizado en la banda de paso*. La banda de paso se define como Δf centrada alrededor de la frecuencia central f_0 . Este rizado define la capacidad de la ventana para describir la magnitud real de las componentes frecuenciales.

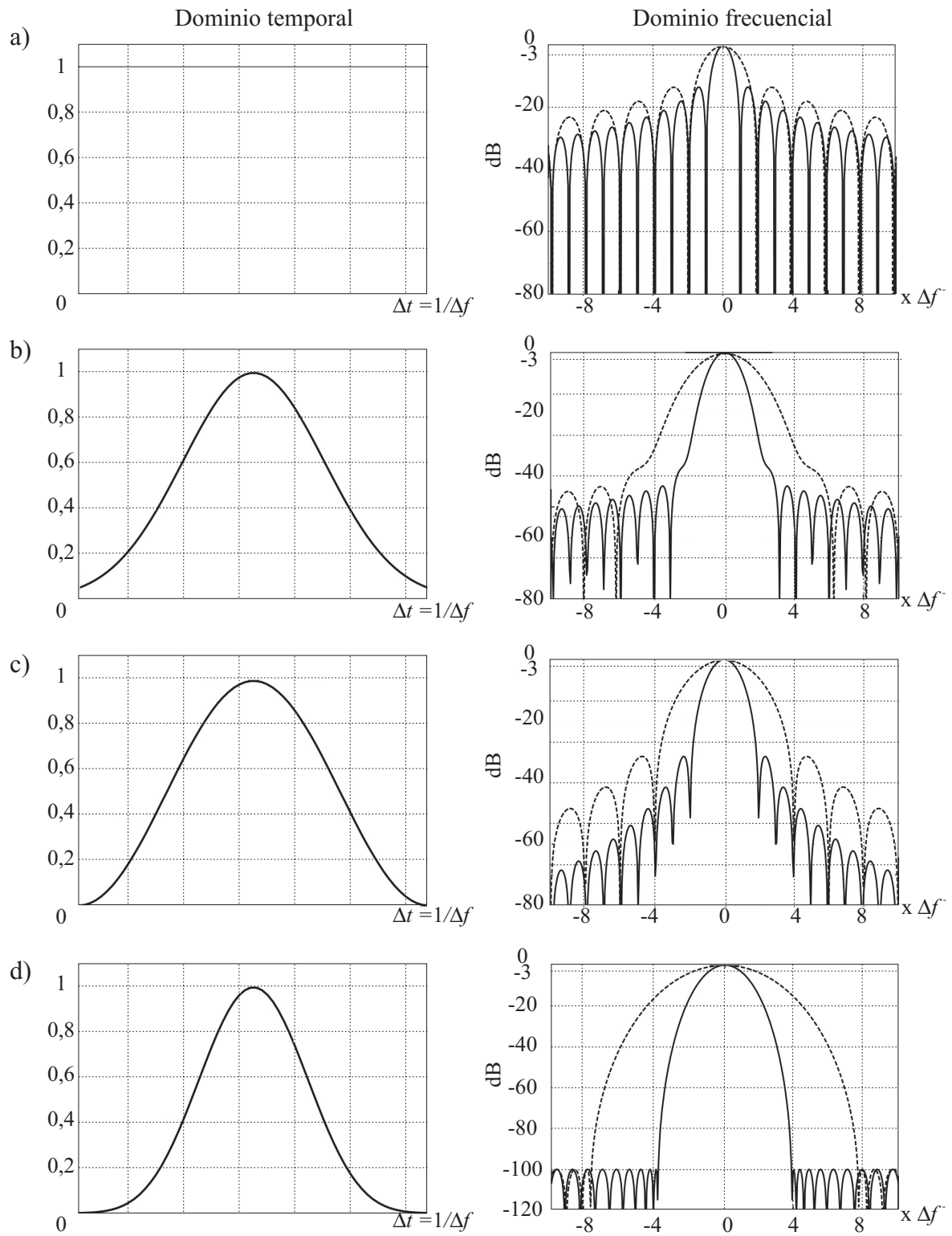


Figura 1 Función ventana y su espectro frecuencial: a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

Tabla 1 Funciones ventana y sus característica

Nombre	Ancho de banda a 3 dB	Factor de forma	Altura del lóbulo lateral principal	Magnitud del rizado en la banda de paso
Rectangular	$0,89 \Delta f$	750	-13 dB	3,92 dB
Gauss	$1,37 \Delta f$	45,9	-43 dB	1,58 dB
Hanning	$1,44 \Delta f$	9,2	-31,5 dB	1,40 dB
Chebyshev	$1,85 \Delta f$	3,8	Puede ser seleccionado	0,87 dB
Kaiser-Bessel	$1,71 \Delta f$	3,6	-66,6 dB	1,02 dB
Flat Top	$3,72 \Delta f$	2,5	-93,6 dB	0,01 dB

Experimentación

En esta investigación se utiliza la STFT para la manipulación y análisis de una señal de vibración en el dominio tiempo-frecuencia, buscando determinar la forma como la selección de la ventana temporal describe en el dominio conjunto, con exactitud, un evento puntual (un impulso), un evento presente en un intervalo de tiempo muy corto (un pulso) y un evento continuo (presencia de una vibración armónica). Para ello se sintetiza una señal de igual longitud a las señales obtenidas en campo $t = 8$ s y con una frecuencia de muestreo de [2000 Hz], definida por

$$x(t) = A * \sin(2\pi f_1 t) + A * \sin(2\pi f_2 t) + K_1 \delta(t - t_1) + K_2 \delta(t - t_2) + \text{randn}(t) \quad (3)$$

Donde $f_1 = 45$ Hz y $f_2 = 200$ Hz, y $\delta(t - t_n)$, para $n = 1, 2$ son dos funciones delta de Dirac, ubicadas en $t_1 = 2,065$ s y $t_2 = 4,16$ s. Estas últimas se manipulan para simular la presencia de dos pulsos de ancho 2 ms, las constantes A , K_1 y K_2 , son seleccionadas en función de las amplitudes que presentan las señales reales, y finalmente, $\text{randn}(t)$ es un ruido aleatorio normalmente distribuido.

Se realiza el análisis de la señal sintetizada mediante la STFT, utilizando las ventanas temporales, *Rectangular*, *Gauss*, *Hanning* y *Chebyshev*, modificando el ancho de las mismas y aplicando un solape. Los anchos de ventana temporal uti-

lizados son de 0,032, 0,064 y 0,128 segundos equivalentes a 64, 128 y 256 muestras respectivamente y solapes de 25%, 50% y 75%. En el desarrollo del presente trabajo se obtuvo gran cantidad de información que es imposible mostrar en este documento. En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos mediante un tamaño de ventana de 64 muestras con un solape de 75%, lo que permite describir, por medio de la DEE y del Espectrograma, los eventos que describen la señal sintetizada y que son comunes en señales de vibración reales. Primero, la presencia del impulso, que se refleja en un instante fijo en el dominio temporal y se muestra en todo el dominio frecuencial; segundo, la presencia del pulso, que se refleja en un intervalo de tiempo muy corto (del orden de milisegundos) en el dominio temporal y solo se muestra en un intervalo del dominio de frecuencias; y finalmente, la presencia de una vibración periódica, que se refleja en todo el dominio temporal y se muestra a un valor constante en el dominio frecuencias. Para corroborar lo anterior, la figura 2 muestra la DEE y la figura 3 muestra el espectrograma, ambos calculados mediante la STFT y utilizando las diferentes ventanas temporales, de la señal sintetizada con la presencia de la vibración periódica y de dos impulsos. Seguidamente, la figura 4 muestra la DEE y la figura 5 muestra el espectrograma de la señal sintetizada con la presencia de dos pulsos, de ancho 2 ms, y la vibración periódica. Los valores utilizados, en la obtención de las figuras

2 y 3, para la señal sintetizada y definida por la ecuación 3 se tiene; $A = 15$, $K_1 = 700$ y $K_2 = 800$. Para las figuras 4 y 5, debido a que la energía de los pulsos comparada con la energía de la componente periódica es mucho menor, los valores de amplitud en los pulsos han sido manipulados

para mostrar el comportamiento de los mismos en el análisis. Además se ha de tener en cuenta que las unidades en el eje zeta para estas figuras son unidades de energía que a su vez son función de las unidades que contenga la señal de vibración analizada (m, m/s, m/s²).

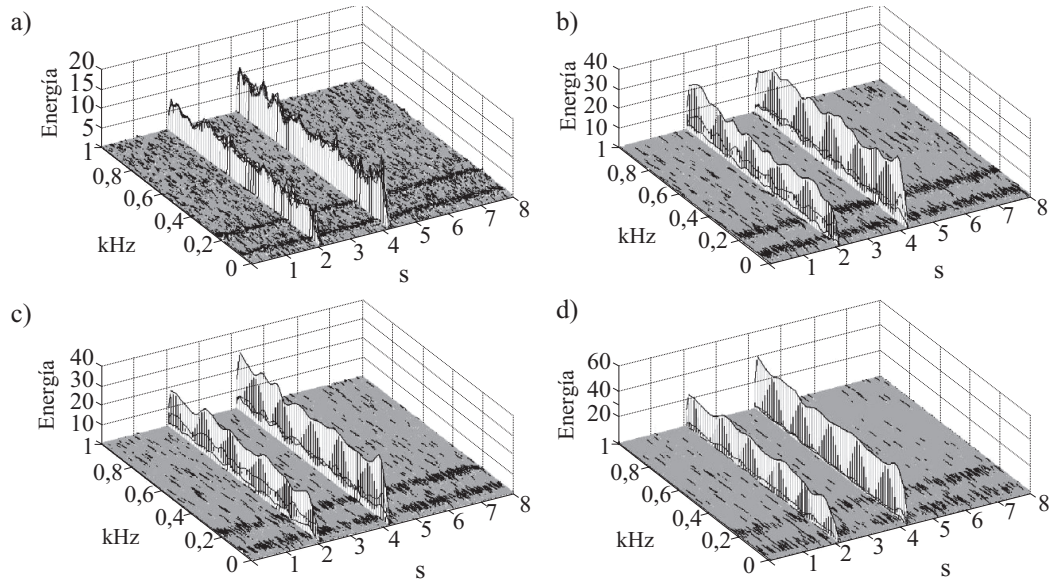


Figura 2 DEE, de una señal con 2 impulsos y 2 componentes periódicas, utilizando las ventanas; a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

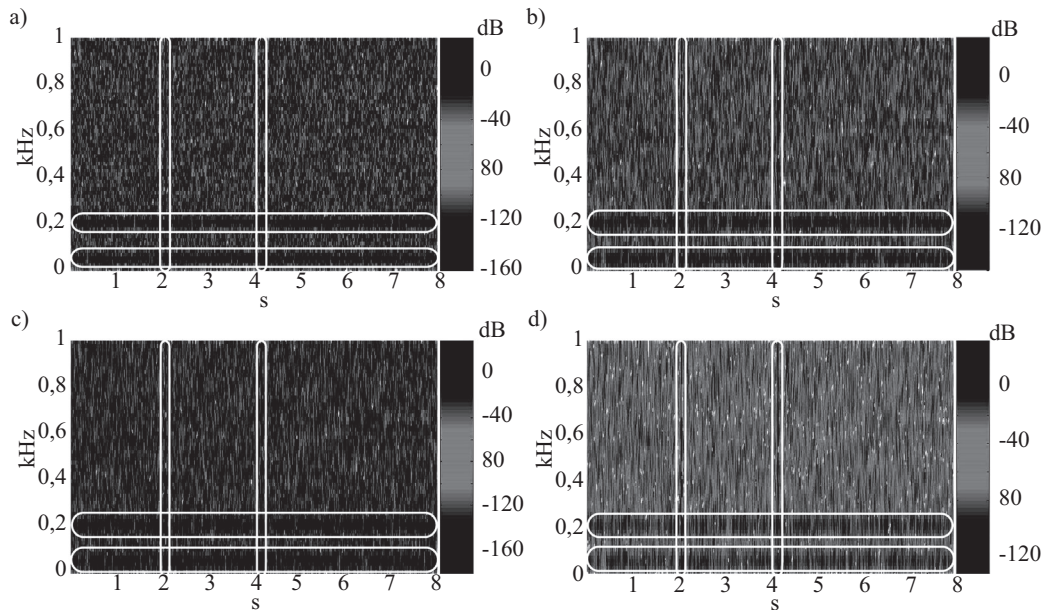


Figura 3 Espectrograma de la señal con 2 impulsos y 2 componentes periódicas, utilizando las ventanas; a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

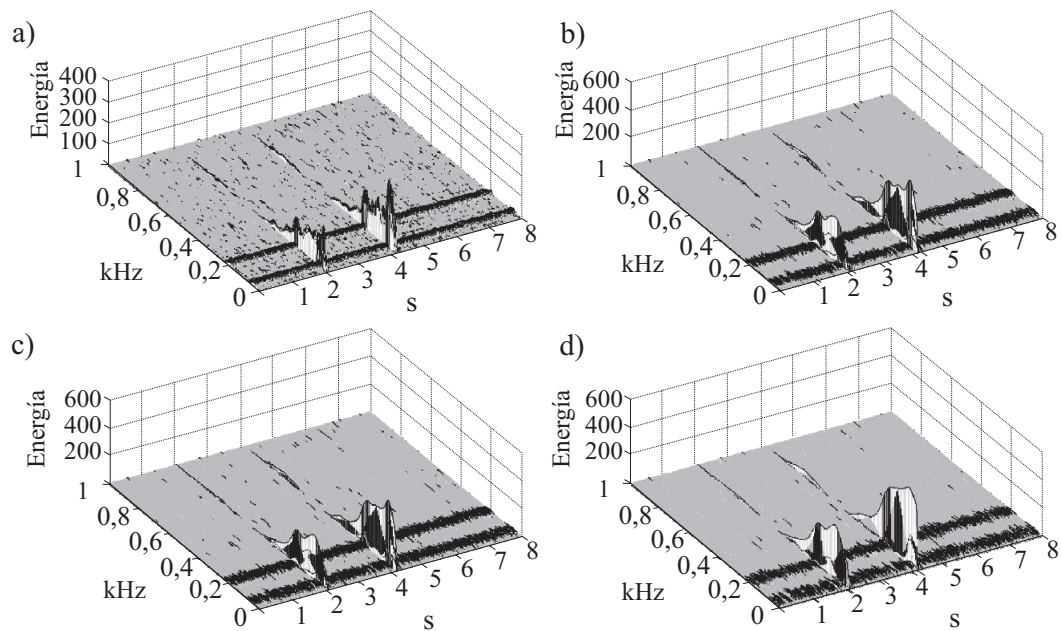


Figura 4 DEE de la señal con 2 pulsos y 2 componentes periódicas, utilizando las ventanas; a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

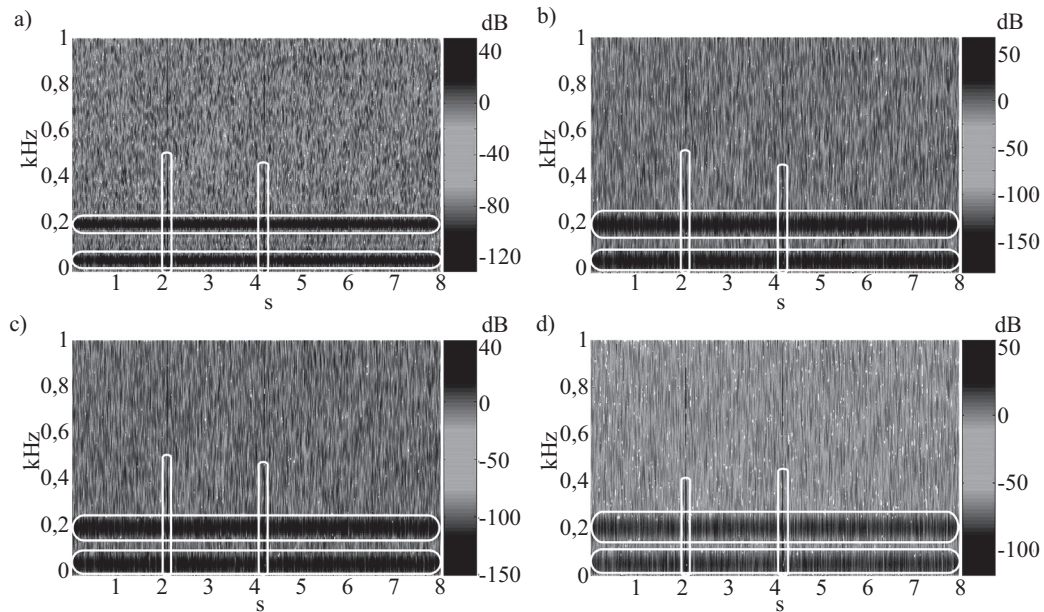


Figura 5 Espectrograma de una señal con dos pulsos y 2 componentes periódicas utilizando las ventanas; a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

Conocida la forma en como dos eventos característicos en el estudio de vibraciones se revelan por medio de la STFT, se prosigue a aplicar esta herramienta a señales de vibración reales. Para

ello, se utilizan las señales de vibración generadas por el contacto rueda-carril al paso de un tren, con el fin de determinar, mediante el análisis tiempo-frecuencia, la presencia de alguno de

los eventos antes simulados y que pueden estar relacionados con fallos típicos en las ruedas del tren. Estas señales se adquieren de los trenes que circulan por la línea 3 del metro de la empresa Transports Metropolitans de Barcelona (TMB). Se utiliza el sistema de monitorizado de vibraciones que ha sido montado sobre esta línea y operado por el personal del Laboratorio de Vibraciones del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

En este laboratorio, se cuenta con una amplia experiencia en la adquisición de este tipo de señales dado que desde finales de los 80's del siglo pasado se implementó un sistema de monitorizado de las vibraciones producidas por los trenes en la línea 5; luego, en el año de 1990, en la línea 4, y con la experiencia ganada, a principios de siglo, se realizó un nuevo montaje en la línea 3. Para este último montaje se tuvo en cuenta los resultados obtenidos por diferentes autores en los montajes anteriores: Fernández [11] y Clos [12], Martínez, de los Santos y Cardona [13] y Cardona, Martínez, Fernández y de los Santos [14] permitiendo optimizar el sistema de monitorizado sobre la línea 3. Por ejemplo, se montaron dos acelerómetros piezoeléctricos sobre la vía del metro, seleccionados en función de los requerimientos tanto de campo como de funcionamiento; son de la marca Endevco modelo 7250A-10 [15]. Otras características importantes definidas en [11 y 12] son, la separación entre acelerómetros, que se corresponde a una distancia de 1,3 m., la selección de la ubicación de los sensores bajo el pie del carril y la selección ya sea de la velocidad o de la aceleración como la variable óptima para medir la vibración, entre otras. En la figura 6 se muestra el esquema del sistema de monitorizado de vibraciones antes descrito. la figura 7-a muestra la base metálica sobre la que se monta cada uno de los acelerómetros y la figura 7-b muestra el montaje realizado para tomar las vibraciones del carril tanto, en el sentido transversal (sensor montado a un costado del carril) como en el sentido vertical (acelerómetros montados en una base metálica y ajustados al pie del carril) del carril.

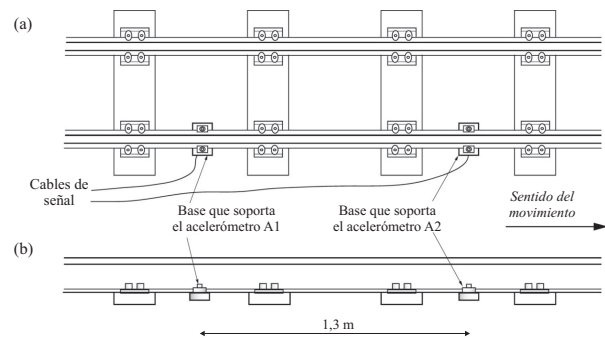


Figura 6 Esquema del sistema de monitorizado de vibraciones sobre la vía del tren, (a) vista superior de la vía, (b) vista lateral de la vía

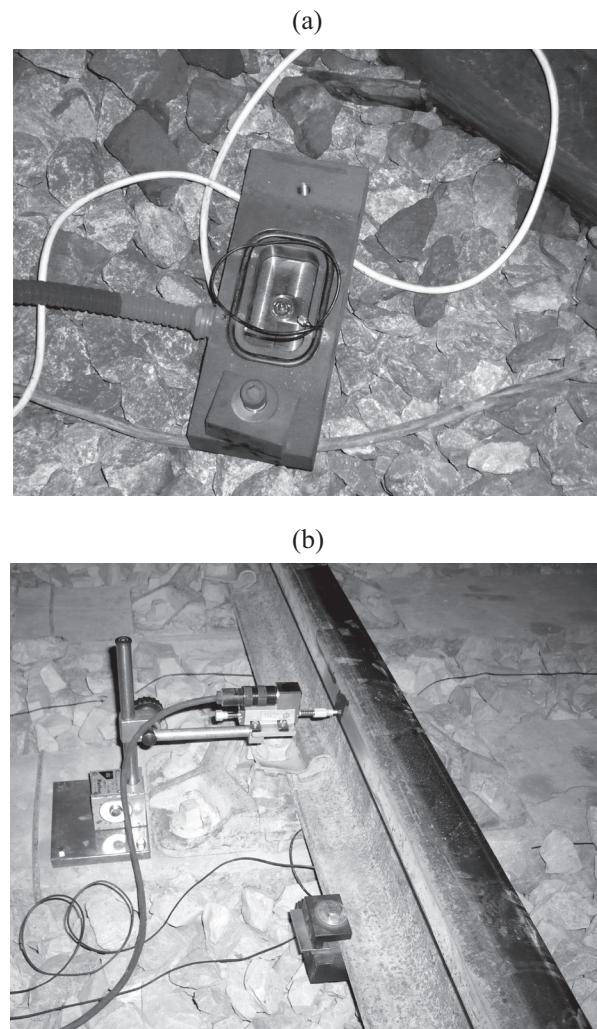


Figura 7 a) Base metálica para el montaje del acelerómetro, b) Base montada en la parte inferior del pie del carril

El Laboratorio de Vibraciones cuenta con un sistema de adquisición de datos de última generación; sistema portátil multicanal *Pimento* (8 canales) con software propio perteneciente a la compañía LMS. Éste ha sido adquirido como parte del desarrollo del proyecto VIBRAPLA (Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Ministerio de Educación y Ciencia: Identificación de planos en las ruedas de los ferrocarriles a partir del análisis de las vibraciones del carril). La selección de este sistema de adquisición se realizó teniendo en cuenta factores tales como: portabilidad y autonomía, módulos de adquisición multicanal, permitir entradas de tensión y corriente, entre otros [16].

Para cada acelerómetro, de los dos con los que cuenta el sistema de monitorizado, se obtienen registros digitales (señales de vibración) de la señal de aceleración; cada uno de estos registros contiene 32000 valores, muestreados a una frecuencia de 2 kHz lo que equivale a una señal temporal de 16 segundos de longitud. Los registros son adquiridos automáticamente al paso del tren gracias a un disparo (trigger) programado para activarse al captar una amplitud de vibración mínima de 30 m/s^2 y con un tiempo de prerregistro de 5 segundos, lo que garantiza la adquisición total del paso de las ruedas del tren. Las señales son almacenadas en formato rtf (Rich Text Format), y transformadas al formato de datos universal, para luego ser exportados a cualquier software de análisis, en el trabajo actual Matlab. Además de las señales de vibración, se determina el paso de cada rueda, por medio de dos galgas extensiométricas ubicadas en el alma del carril y en la misma ubicación del primer acelerómetro, para diferenciar la presencia de este evento —el paso de las ruedas— con la presencia de planos en las ruedas al realizar el análisis. En la figura 8 se muestra una señal de vibración adquirida por el primer acelerómetro y la señal adquirida por las galgas, donde se muestra el paso de las 20 ruedas del tren.

La adquisición de las señales se realizó una vez por semana durante 5 meses, tomando los registros generados por los sensores de vibración al

paso de cada tren. El número de trenes que en promedio circulan diariamente por la línea 3, donde se realiza la adquisición de vibraciones, es de 24 trenes, de un total de 28 trenes disponibles en la línea, que son identificados por medio del número de matrícula del primer vagón del tren y por el número de registro de operación del día respectivo. Lo anterior permite determinar a qué tren corresponde cada una de las señales de vibración adquiridas. En total, el número de señales obtenidas durante los 5 meses corresponde a 480 señales, equivalentes a 20 señales por cada tren.

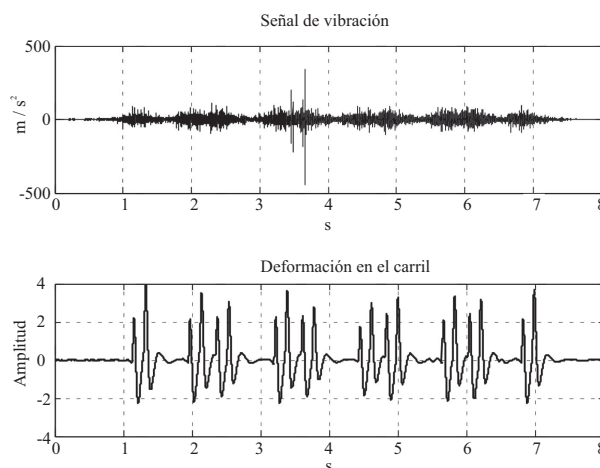


Figura 8 Señal temporal de vibración (arriba) y señal de deformación del carril al paso de las ruedas del tren (abajo)

Una vez obtenidas las señales, se procede a realizar el análisis en el dominio tiempo-frecuencia, para estudiar como la implementación de la STFT con las ventanas, utilizadas en el presente estudio, permiten determinar el comportamiento y la forma de presentarse de uno o varios eventos no típicos en las ruedas del tren. Finalmente, se relaciona la presencia de dichos eventos con la presencia de planos en las mismas. Lo anterior permite hacer una contribución al mantenimiento preventivo y predictivo de las ruedas de los trenes.

Resultados

Por la línea 3 circulan cuatro modelos de tren, estos son, los modelos 2000, 3000, 3000R (re-

novados por parte de la empresa TMB) y 5000. Este último modelo corresponde a trenes modernos incluidos por la Empresa TMB para mejorar la frecuencia del servicio. De los 24 trenes que circulan diariamente generalmente el 35,7 % son del modelo 3000 y los modelos restantes, 2000, 3000R y 5000, se reparten igualmente con un 21,4% cada uno.

Después de analizar en el dominio tiempo-frecuencia, mediante la STFT, cada una de las señales generadas por los respectivos trenes, utilizando cada una de las cuatro ventanas temporales estudiadas y a las que se varía el tamaño y el solape, se pudo identificar en algunos de los trenes, modelos 2000 y 3000, la presencia de eventos no comunes similares a los simulados en el ordenador mediante Matlab y que se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 5, y que pueden ser atribuidos a la presencia o al comienzo de generación de un plano en una de las ruedas.

La figura 9 muestra la DEE y el espectrograma, de una de las señales adquiridas para un tren, perteneciente al modelo 2000, utilizando los cuatro tipos de ventana estudiados. En ella se aprecia la presencia de un evento no común en el instante $t = 3,6$ s, correspondiente al paso de la segunda rueda del quinto boggie del tren, que se refleja como un impulso en un instante determinado en el dominio del tiempo y a través de todo el dominio de frecuencias. También cabe resaltar como las ventanas Gauss y Hanning reflejan de mejor forma la presencia de dicho evento.

En la figura 10 se muestra la DEE y el espectrograma de una de las señales adquiridas para un tren, perteneciente al modelo 3000, utilizando los cuatro tipos de ventana estudiados. En ella se aprecia la presencia de dos eventos no comunes: el primero al paso de la primera rueda del segundo boggie, en $t = 1,9$ s, donde se aprecia la presencia de un evento que incrementa su amplitud de una forma directa con el incremento de frecuencia; el segundo evento se revela en la primera y segunda ruedas del quinto boggie, en tiempo $t = 3,6$ y $3,8$ s, y que se puede atribuir a la presencia de una falla, y se refleja como un evento en un intervalo

de tiempo, en el dominio temporal, y solo a través de un intervalo de frecuencias en el dominio de frecuencias. Esto hace que pueda ser atribuido a una falla extendida o de longitud considerable sobre la superficie de la rueda del tren.

Conclusiones

A diferencia de la ventana rectangular, cuando se aplica la STFT utilizando cualquiera de las otras tres ventanas analizadas, una parte significativa de la señal se atenúa o es ignorada en el análisis debido a los pequeños valores de amplitud que manejan dichas ventanas en sus fronteras. Por lo tanto, si la STFT está siendo utilizada para detectar eventos puntuales en el tiempo –impulsos– la no selección de un solape mínimo del 50% generaría la atenuación o la no detección de estos eventos, cuando los mismos se encuentren o coincidan cerca de las fronteras o bordes de la ventana en el desarrollo del análisis.

Los resultados demuestran que para el análisis de señales transitorias las ventanas estudiadas pueden ser utilizadas para:

- La *ventana Rectangular* para conocer la presencia de eventos continuos de tipo sinusoidales y cuando se quiere evitar el uso de un solape en el análisis.
- Las *ventanas Gauss y Hanning* para determinar eventos puntuales (se presentan en un instante fijo en todo el dominio temporal), teniendo en cuenta que el mínimo solape ha de ser del 50%. Se demuestra que la ventana Gauss tiene mayor habilidad, sobre la ventana Hanning, para separar componentes frecuenciales de niveles ampliamente diferentes, debido al factor de forma que cada una maneja.
- La *ventana Chebyshev* para conocer un intervalo de componentes frecuencial y atenuar casi en su totalidad el resto de componentes. Para el análisis de señales periódicas esta ventana es probablemente la mejor.

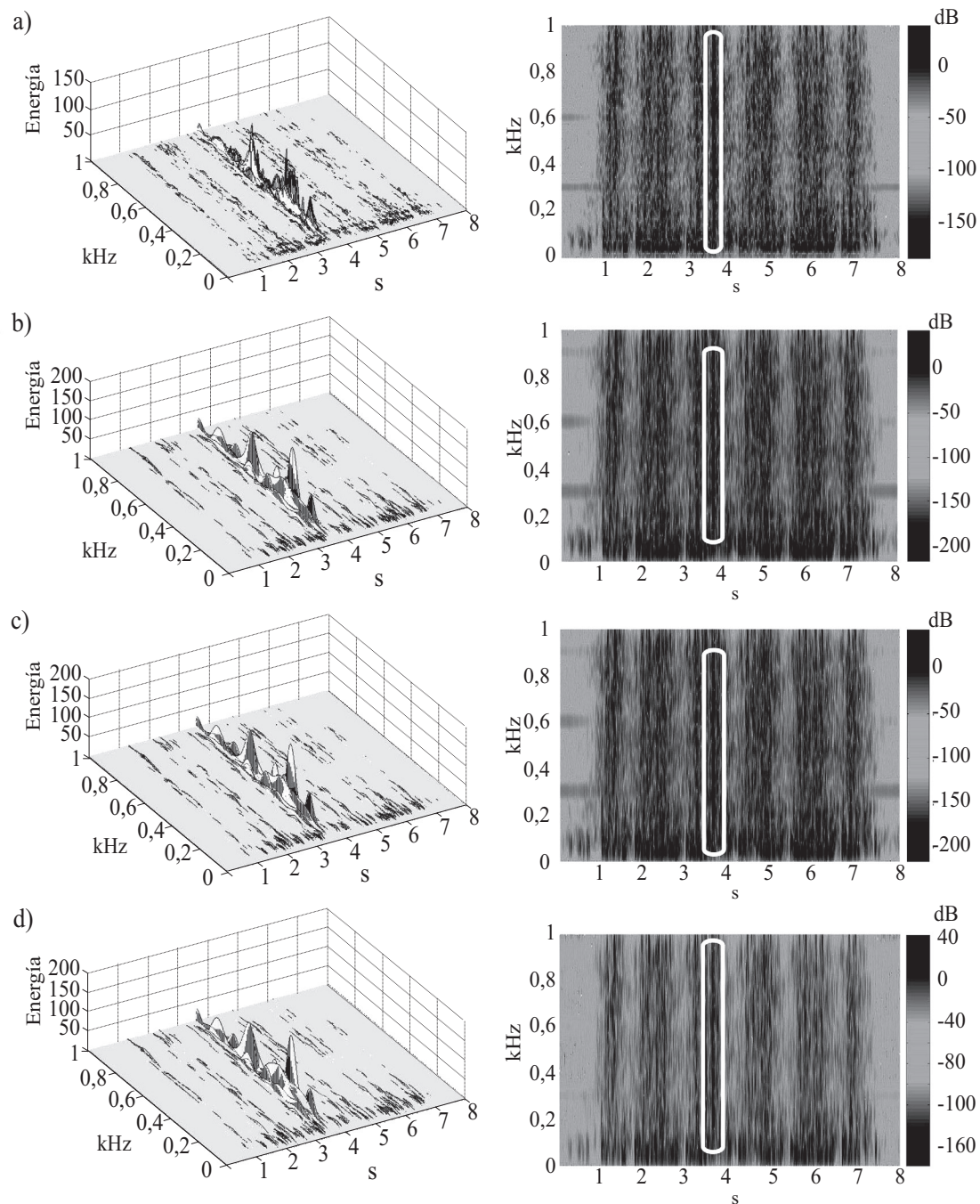


Figura 9 Espectrograma de una señal real, de un tren modelo 2000, utilizando las ventanas; a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

Se comprueba que las señales de vibración generadas al paso de un tren y tomadas al pie del carril son señales transitorias y que por medio de un análisis tiempo-frecuencia se refleja no solo

el instante en que se presenta un evento en el dominio del tiempo, si no que además, permite determinar el estado de dicho evento mediante el dominio frecuencial.

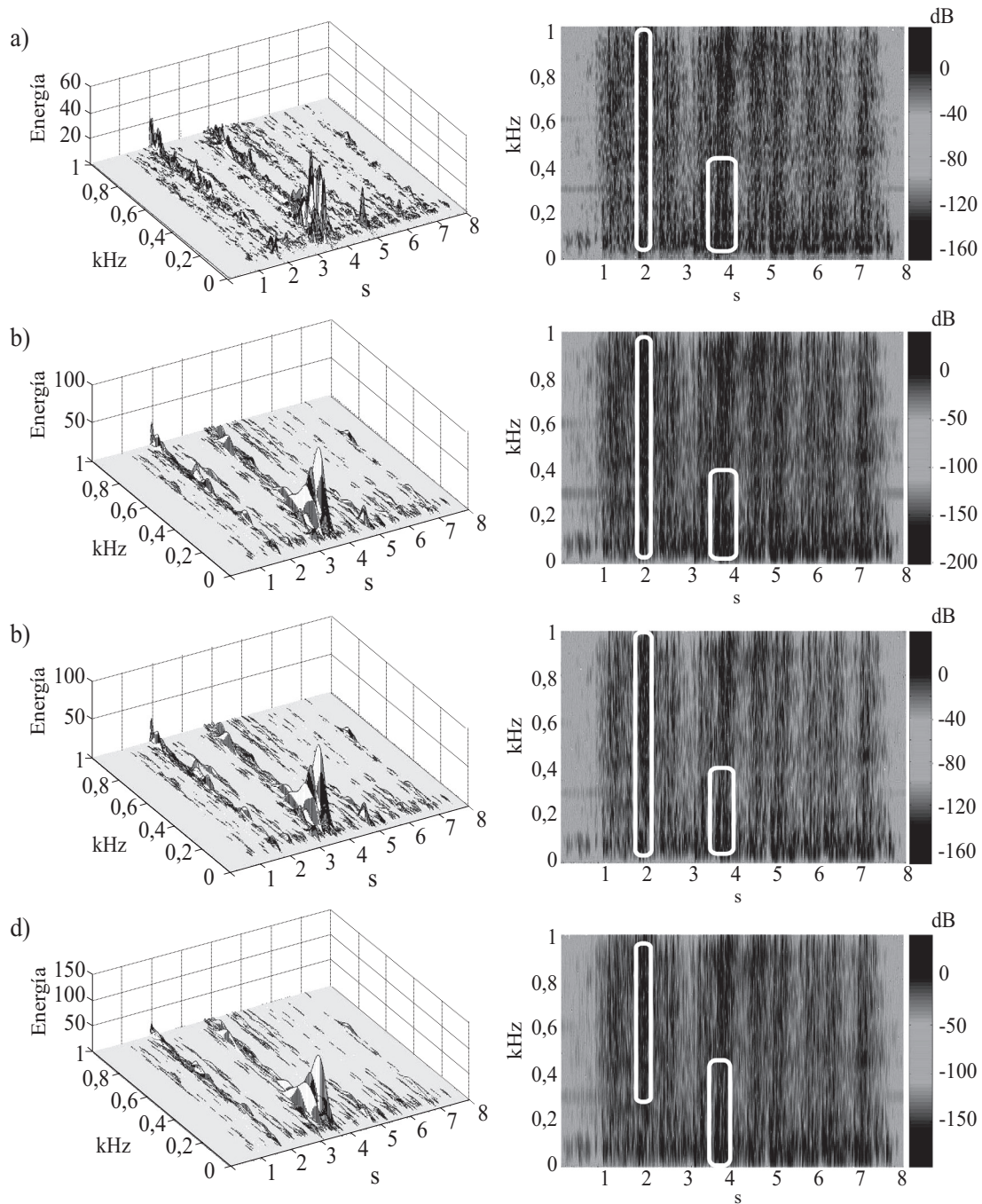


Figura 10 Espectrograma de una señal real, de un tren modelo 3000, utilizando las ventanas;
a) Rectangular, b) Gauss, c) Hanning, d) Chebyshev

Agradecimientos

Los autores dan sus agradecimientos a la empresa Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) por su colaboración para utilizar las instalaciones

de la estación de Palau Reial para realizar las mediciones, y al personal técnico del Laboratorio de Vibracions de la UPC, por la colaboración en el proceso de adquisición de las señales de vibración.

Referencias

1. E. Flórez, S. Cardona, L. Jordi. "Análisis en tiempo-frecuencia de señales de vibración tomadas al pie del carril durante el paso de un tren". *Scientia et Técnica*. Vol. 35. 2007. pp. 243-247.
2. S. Cardona, S. Tejedo. "Instalación de monitorizado por vibraciones para ferrocarriles metropolitanos". *Anales de ingeniería mecánica*. Vol. 1. 1988, pp. 327-330.
3. F. Lanza di Scalea, J. McNamara. "Measuring high-frequency wave propagation in railroad tracks by joint time-frequency análisis". *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 273. 2004. pp. 637-651.
4. A. Caprioli, A. Cigada, D. Raveglia. "Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 21. 2007. pp. 631-652.
5. Y. Jianhai, Q. Zhengding, C. Boshi. "Application of Wavelet transform to defect detection of wheel flats of railway wheels". *ICSP'02 Proceedings, IEEE*. Vol. 6. 2002. pp. 29-32.
6. D. E. Newland. "An introduction to random vibrations, spectral & wavelet análisis". 3ª ed. *Longman Scientific & Technical*. Singapore. 1993. pp. 155-157.
7. R. L. Allen, D. W. Mill. "Signal Analysis Time, Frequency, Scale, and Structure". *IEEE Press*. John Wiley & Sons, Inc. Piscataway. NJ. 2004. pp. 585-616.
8. D. Clos. *Tractament de dades per a la monitorització per vibracions de l'estat de les rodes dels trens dels Ferrocarrils Metropolitans de Barcelona*. Proyecto de fin de carrera para optar al título de ingeniero Industrial de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona de la UPC. 1991. pp.77-99.
9. L. Cohen. *Time-Frequency Análisis*. Prentice Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim. (Editor). New Jersey. 1995. pp. 44-52.
10. S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 2ª ed. Academic Press. New York. 1999. pp. 69-72.
11. E. Fernandez Díaz. *Contribució a L'estudi de la Detecció i L'anàlisi de les Vibracions Produïdes Pels Bogis D'un Ferrocarril*. Tesis de Doctorado. 2000. pp. 97-127.
12. S. Cardona, S. Tejedo. "Instalación de monitorizado por vibraciones para ferrocarriles metropolitanos". *Anales de ingeniería mecánica*. Vol. 1. 1988. pp. 327-330.
13. F. Lanza di Scalea, J. McNamara. "Measuring high-frequency wave propagation in railroad tracks by joint time-frequency análisis". *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 273. 2004. pp. 637-651.
14. A. Caprioli, A. Cigada, D. Raveglia. "Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 21. 2007. pp. 631-652.
15. http://www.endevco.com/product/Product.aspx?product_id=123, 24. Consultada el 20 de septiembre de 2008.