

## ANÁLISIS EN TIEMPO Y FRECUENCIA DE SEÑALES DE VIBRACION TOMADAS AL PIE DEL CARRIL DURANTE EL PASO DE UN TREN

### Time-frequency analysis of vibration signals taken on the foot from rail during pass of train

#### RESUMEN

La caracterización de los defectos en el contacto entre la rueda y el carril en el transporte ferroviario usando señales de vibración ha sido en los últimos años un factor importante en el mantenimiento de los ferrocarriles para limitar el impacto de las vibraciones producidas tanto en las instalaciones propias como en su entorno. Este trabajo es una contribución al estudio y caracterización de posibles defectos presentes en el material móvil de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona (FCMB). Para ello, se propone el uso de técnicas tiempo-frecuencia utilizando la STFT (Short Time Fourier Transform) y la CWT (Continue Wavelet Transform).

**PALABRAS CLAVES:** Análisis tiempo-frecuencia, contacto rueda-carril

#### ABSTRACT

*Characterization of the defects in wheel-rail contact, in railway transport, using vibration signals has been, in the last years, an important factor in the maintenance of the railroads in order to limit the impact of the vibrations both in the own facilities and in its surroundings. This work is a contribution to the study and the characterization of possible present defects in movable material of the subway of Barcelona (FCMB). For it, the use of time-frequency techniques for signal analysis is proposed. In the work, signals coming from the vibration of the foot of the rail to the passage of a train are analyzed using STFT (Short Time Fourier Transform) and WT (Wavelet Transform).*

**KEYWORDS:** Time-frequency analysis, wheel-rail contact

#### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en la operación de los trenes es las irregularidades en las ruedas y/o el carril. Las discontinuidades en el perfil de las ruedas, la presencia de planos en la rueda, las ruedas excéntricas, y el corrugado e irregularidades en el carril son algunos de los defectos que están presentes en la operación diaria de trenes. Estas irregularidades pueden ser el origen de fuertes vibraciones de tipo impulsivas.

Una de las tareas de los departamentos de mantenimiento de los ferrocarriles metropolitanos es la inspección del carril y de las ruedas de los trenes con el fin de detectar defectos en ambos elementos. Los principales defectos que están presentes en cada uno de los sistemas antes mencionados han sido estudiados, teórica y experimentalmente por varios investigadores en forma separada, para el rail; Toyilat et al [3], Mandriota et al [4], Cannon et al [5], entre otros y para las ruedas; Yang y Letourneau [6], Jianhai, et al [9], Skarlatos, et al [7], Branghin, et al [11], entre otros. También se han presentado varias investigaciones que involucran al contacto rueda-carril como un solo sistema, algunas en

#### ELKIN G. FLOREZ S.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad de Pamplona  
eflorez@unipamplona.edu.co

#### SALVADOR CARDONA i FOIX

Ingeniero Industrial, Ph.D.  
Profesor Catedrático  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Salvador.cardona@upc.edu

#### LLUÏSA JORDI NEBOT.

Licenciada en C. Físicas, Ph.D.  
Profesor Titular  
Universitat Politècnica de Catalunya  
lluisa.jordi@upc.edu

particular como las hechas en [2], [10] y [12], pero sin llegar a profundizar en el tema de análisis de señales aplicadas al mantenimiento predictivo. Puesto que el objetivo del presente trabajo es utilizar el análisis de tiempo-frecuencia para detectar posibles fallas que permitan un mantenimiento predictivo, las investigaciones anteriores son una base para caracterizar las fallas existentes en el sistema conjunto.

El laboratorio de vibraciones del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politècnica de Catalunya ha venido realizando en los últimos años mediciones de campo de las señales de vibración generadas por el paso de los trenes de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona que posteriormente han sido analizadas en el laboratorio para predecir posibles fallos. El presente trabajo es la aplicación de una metodología de análisis de señal en tiempo-frecuencia conjuntamente utilizando la STFT y la CWT, con miras a mejorar la detección y caracterización de fallos en el contacto rueda-carril de las líneas existentes de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona.

Para el análisis y procesamiento de señales de vibración

aplicadas al mantenimiento de sistemas mecánicos, durante mucho tiempo, La Transformada de Fourier ha sido ampliamente utilizada y con resultados satisfactorios en los casos en que estas señales son estacionarias, pero no ocurre lo mismo para el análisis de señales cuyo espectro varía con el tiempo (señales no estacionarias). La Transformada de Fourier detecta la presencia de una determinada frecuencia pero no brinda información acerca de la evolución en el tiempo de las características espectrales de la señal. Muchos aspectos temporales de la señal, tales como el inicio y el fin de una señal finita y el instante de aparición de una singularidad en una señal transitoria, no pueden ser analizados adecuadamente por el método de Fourier. Al procesar señales es común encontrar fenómenos oscilantes, casi monocromáticos, localizados en el tiempo. También ondas perdurables, que con amplitudes casi constantes, exhiben patrones de frecuencia variables en el tiempo. Surge entonces, en el análisis de señales de vibración no estacionarias, el problema de los fenómenos localizados en tiempo y frecuencia, es decir de posibles fallas que para su descripción requieren información conjunta de ambos dominios. Claramente, el análisis de Fourier no es la herramienta adecuada para expresar explícitamente este tipo de información en forma conjunta. Por lo tanto para representar tales fenómenos se requiere de patrones elementales capaces de localizar conjuntamente la información de ambos dominios. Entonces, el desafío consiste en definir una apropiada representación acorde con las características de la señal y a los objetivos de su procesamiento. Es aquí donde la STFT (Short Time Fourier Transform) y la CWT (Continue Wavelet Transform), juegan un papel importante en la búsqueda de las irregularidades y fallas existentes en el sistema rueda-carril, haciendo uso del análisis de una señal vibración.

**2. ANALISIS DE SEÑALES DE VIBRACION EN TIEMPO-FRECUENCIA (STFT y WT)**

Una clase de representaciones tiempo-frecuencia bastante utilizada para analizar señales de vibración no estacionarias se basa en el empleo de *ventanas temporales*, esto es de funciones suaves y bien localizadas en un intervalo. La ventana  $g(t)$  enmarca una porción de la señal y permite aplicar localmente la Transformada de Fourier. De este modo, se releva la información en frecuencia localizada temporalmente en el dominio efectivo de la ventana. Desplazando temporalmente la ventana se cubre el dominio de la señal obteniéndose la completa información tiempo-frecuencia de la misma. Este tipo de análisis es conocido como STFT de sus siglas en ingles. (Short Time Fourier Transform), definida como:

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

Donde  $g(t)$  es una ventana con ancho fijo el cual se desplaza a lo largo del eje tiempo por la variable  $\tau$ . Se puede Asumir que la ventana real  $g(t)$  está bien localizada en un intervalo centrado en  $t = 0$ , de longitud  $\Delta t$  y que su transformada de Fourier  $X_g(\tau, \omega)$  está también localizada en una banda centrada en  $\omega = 0$ , de ancho  $\Delta \omega$ , las ventanas desplazadas y moduladas  $g(t-\tau) e^{-j\omega t}$  son funciones elementales bien localizadas en el dominio conjunto tiempo-frecuencia. Cada función elemental se localiza en el rectángulo centrado en el punto  $(\tau, \omega)$  de dimensión  $\Delta t \Delta \omega$ . El principio de incertidumbre prueba que el área de este rectangulo satisface

$$\Delta_t \Delta_\omega \geq \frac{1}{2}. \quad (2)$$

Esta área es mínima cuando  $g$  es una Gaussiana, caso para el cual la transformada es llamada *transformada Gabor* [14]. Los valores obtenidos de  $\{X_g(\tau, \omega)\}$  representan un esquema del domino tiempo-frecuencia, mostrando la información que contiene la señal en dicho dominio. La señal original puede ser reconstruida por medio de:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X_g(\tau, \omega) e^{j\omega t} d\omega dt \quad (3)$$

Con la STFT se mejora la localización física de irregularidades (posibles fallas) en una señal de vibración generada por el paso de un tren. Pero solo se conocerá en que intervalo de tiempo (ancho de la ventana seleccionada) se presentan. Debido a esto las irregularidades que tengan una frecuencia menor al inverso del ancho de ventana seleccionada no podrán ser detectadas. La STFT de una señal puede ser representada en una malla como lo muestra la Figura 1a donde las divisiones en la dirección horizontal representan el intervalo de tiempo para cada ventana; las divisiones en la dirección vertical representan las frecuencias; y el sombreado del rectángulo es proporcional a la frecuencia de la componente de señal utilizada en el análisis.

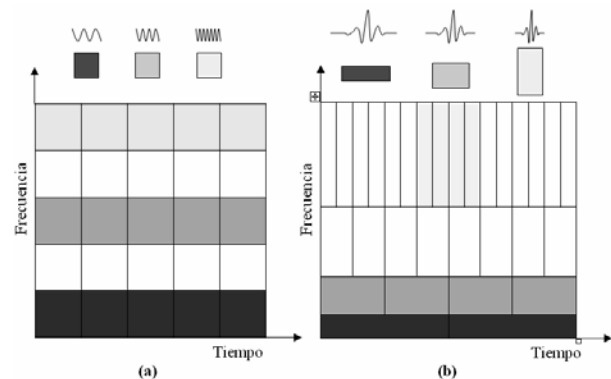


Figura 1. Representación en el dominio tiempo-frecuencia de señales: (a) Utilizando la STFT y (b) Utilizando la WT

Una herramienta que nos permite evitar los anteriores problemas es la Transformada Wavelet Continua (CWT). Este tipo de transformada permite analizar señales transitorias y de altas frecuencias con mejor resolución que la STFT. Lo anterior dado a que con la STFT una vez se ha seleccionado el ancho de la ventana todas las frecuencias son analizadas con la misma resolución de tiempo y frecuencia, mientras que la CWT permite ir adaptando el ancho de la ventana en función de las frecuencias y el tiempo. La figura 1 muestra un esquema del comportamiento de los dos tipos de transformada mencionados, para un mejor entendimiento del funcionamiento de las mismas.

El análisis de una señal con CWT se puede representar en un esquema como lo muestra la Figura 1b al igual que la STFT, la diferencia está en que con la CWT el rectángulo varía en su forma, pero manteniendo un área constante (siguiendo el principio de incertidumbre de Heisenberg [13,14]), tal que es estrecho para bajas escalas (altas frecuencias) y amplio para altas escalas (bajas frecuencias). La transformada wavelet continua de una señal de vibración  $f(t)$  esta definida por [14]:

$$Wf(s, \tau) = \langle f(t), \psi_{s,\tau}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (4)$$

Donde  $\psi^*(t)$  es la compleja conjugada de la función wavelet madre  $\psi(t)$ , escalada en frecuencia por la variable  $s$  y trasladada en el tiempo según la variable  $\tau$ , de la siguiente forma:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left( \frac{t-\tau}{s} \right) \quad (5)$$

Las wavelets  $\psi_{s,\tau}(t)$  generadas de la misma función wavelet madre  $\psi(t)$  tienen diferente escala  $s$  y ubicación  $t$ , pero tienen todas la misma forma. Las Wavelets son dilatadas cuando la escala  $s > 1$ , y son contraídas cuando  $0 < s < 1$ . Así, cambiando el valor de  $s$  se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro  $s$ , o una escala grande de  $\psi_{s,\tau}(t)$ , corresponden a un rango de bajas frecuencias. Valores pequeños de  $s$  o una escala muy pequeña de  $\psi_{s,\tau}(t)$  corresponde a un rango de frecuencias alto.

### 3. APLICACIÓN DE LA STFT Y LA CWT A LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN PRODUCIDAS POR EL PASO DEL TREN

Las vibraciones en el sistema de trenes son generalmente producidas en el contacto entre la rueda y el carril, y se transmiten a través de la fijación del carril, del balasto, de la estructura del túnel, de los cimientos de los edificios y en general de toda la estructura [15]. La figura 2 (a) muestra un registro de vibración tomado sobre la línea 3 al paso de un tren de la red de Ferrocarriles

Metropolitanos de Barcelona.

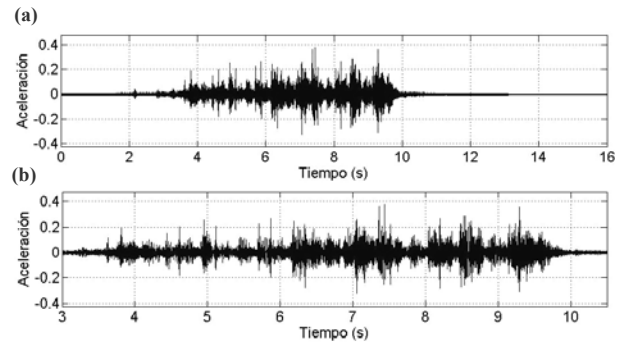


Figura 2. Señal de vibración tomada al paso de un tren de Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona; (a) registro completo y (b) registro analizado

La señal tiene un tiempo de duración de 16 segundos como lo muestra la figura 2a. Para realizar el análisis utilizando la STFT y CWT, la señal se recorta y se tiene en cuenta solo la parte mas significativa para dicho estudio, como lo muestra la figura 2 (b).

En el presente estudio se analizaron 19 registros que corresponden a la vibración producida por el paso de los trenes de la línea 3 captada a pie de carril por un acelerómetro piezoeléctrico [8]. Se mide la componente de vibración en la dirección vertical, y las señales han sido muestreadas a 2 kHz y luego pasado por un filtro pasabajas antialiasing de frecuencia de corte de 600 Hz. Para la implementación de la STFT en las señales obtenidas se utilizó una ventana Hanning con 512 muestras (aprox. 1/4 de segundo), solapando las sucesivas ventanas en un 75%. Para la CWT se utilizo la wavelet Meyer con escalas generadas por un modelo exponencial

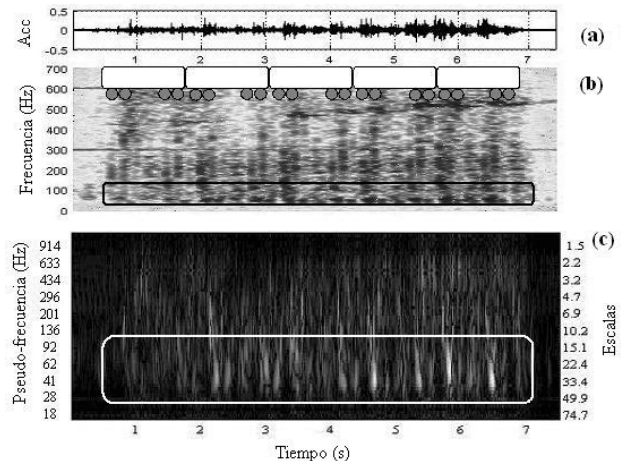


Figura 3. Señal de vibración tomada al paso de un tren, (a) Registro original, (b) STFT, (c) CWT

La figura 3 (a) muestra otro registro de vibración (aceleración) tomado en la línea al paso de un tren de la red de Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona. La figura 2b muestra la STFT, allí se observa la demarcación

que deja cada rueda al pasar por el punto de adquisición. Para la STFT el rango de frecuencias observado es de 0 a 600 Hz, que se considera significativo para caracterizar el contenido frecuencial de las posibles irregularidades. Igualmente la figura 2c muestra la CWT para la misma señal utilizando un intervalo de frecuencias en escala logarítmica. Los eventos significativos en la STFT también son reflejados por la CWT, los principales alrededor de 60 Hz (resaltado en las graficas) y otros de menor intensidad entre los 400 y 600 Hz. La STFT muestra una visión mas clara de los eventos, por lo que se utilizo como un identificador general de eventos y la CWT muestra una buena aplicación en intervalos de frecuencia cortos pero permitiendo hacer un barrido de frecuencias mas amplio.

#### 4. RESULTADOS

Se han analizado todos los registros de vibración disponibles y para mostrar los resultados que se obtienen con la aplicación de la STFT y la CWT, se utilizan dos registros, el primero muestra el paso de un tren sin características especiales y el segundo muestra algunas irregularidades (enmarcadas en la figura 2). La implementación de la CWT requirió de la selección de la wavelet a utilizar, para el cual se tuvo en cuenta los parámetros de la señal y las características propias de cada wavelet. En el presente trabajo, para el cálculo de la CWT se estudiaron las wavelets mostradas en la tabla 1,

seleccionando finalmente la wavelet Meyer por ser una wavelet definida en el dominio de la frecuencia al igual que su función de escalonado. La figura 5 muestra la forma y el dominio de definición de la wavelet madre y su función de escalonado que se ha seleccionado para el estudio de las señales del paso del tren en el presente estudio.

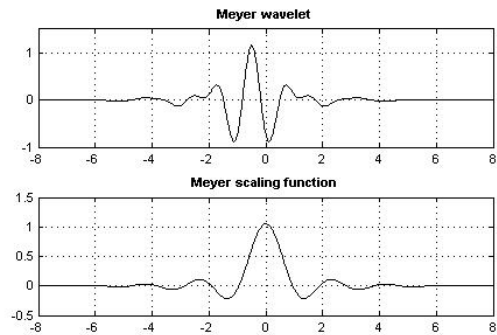


Figura 4. Wavelet Meyer y su función de escalonado

Con la implementación de la STFT, se han caracterizado los intervalos de frecuencia, donde aparecen los eventos significativos y el tiempo de aparición, que identifica el número de rueda (o la ubicación de la rueda en el tren) que esta pasando por el punto de medida (ver figura 5a). También se pueden observar dichos eventos utilizando la densidad espectral de potencia (ver figura 5b).

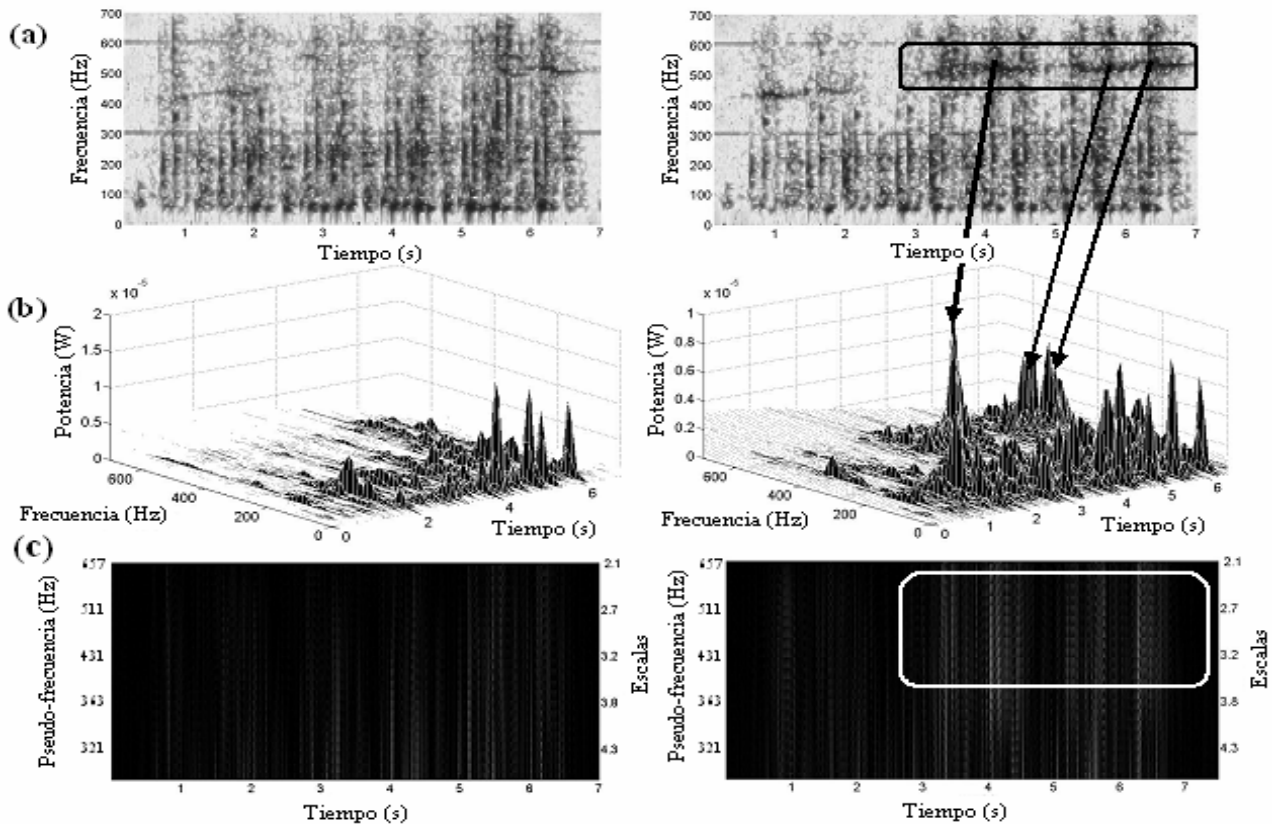


Figure 5. Análisis del registro del paso de dos trenes, (a) STFT, (b) PED (c) CWT del intervalo seleccionado

Conocidas por medio de la STFT las frecuencias donde se presentan irregularidades (400-600 Hz) en el comportamiento del contacto rueda-carril, para el caso del tren con irregularidades, se utiliza la CWT para buscar dentro de este intervalo (ver figura 5c). Apoyándose en ambos métodos se mejora la identificación temporal y frecuencial de las irregularidades que se presentan.

Tipo de Wavelet	Fc (Hz)
Meyer	0.6902
Mexican Hat	0.25
Db 4	0.7143
Morlet	0.8125

Tabla 1. Valor central de frecuencia de una Wavelet

Las frecuencias o pseudos-frecuencias establecidas para la CWT requieren un calculo previo en función de la escala, la frecuencia central de la wavelet utilizada (tabla 1) y el periodo de muestreo, esta relación esta dada por

$$Fa = \frac{Fc}{a * \Delta} \quad (6)$$

Donde:

**Fa**=Frecuencia o pseudos-frecuencia correspondiente a la escala *a*

**a**=La escala de descomposición

**Fc**= Valor central de la frecuencia utilizada.

**Δ**= Periodo de muestreo de la señal

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación para el análisis de señales de vibración, adquiridas al pie del carril, debido al paso de un tren utilizando las técnicas de la Transformada de Fourier por tiempos breves (STFT) y la Transformada Wavelet Continua (CWT), como una herramienta para conocer las características de posibles irregularidades en los elementos de contacto (rueda y carril).

Las señales de vibración registradas, presentan un comportamiento de tipo aleatorio, no-estacionario, lo cual hace que la implementación de la FFT, sea deficiente a la hora de caracterizar los eventos significativos. Por lo anterior la aplicación de la STFT y CWT, mostraron en este estudio que son dos herramientas que permitirán en el futuro mejorar el análisis y ayudaran a caracterizar y predecir irregularidades en el transporte ferroviario.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CAPRIOLI, A., CIGADA, A. and RAVEGLIA, D. Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(2), pp. 631-652. 2007
- [2] EBERSÖHN, W., RONEY, M., MAGEL, E. and PRAHL, F. Wheel/rail interface: A systems approach. *Railway Track and Structures*, **98**(12), pp. 29-31. 2002
- [3] TOLIYAT, H.A., ABBASZADEH, K., RAHIMIAN, M.M. and OLSON, L.E. Rail defect diagnosis using wavelet packet decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **39**(5), pp. 1454-1461. 2003
- [4] MANDRIOTA, C., NITTI, M., ANCONA, N., STELLA, E. and DISTANTE, A. Filter-based feature selection for rail defect detection. *Machine Vision and Applications*, **15**(4), pp. 179-185. 2004
- [5] CANNON, D.F., EDEL, K.-., GRASSIE, S.L. and SAWLEY, K. Rail defects: An overview. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **26**(10), pp. 865-886. 2003
- [6] YANG, C. and LÉTOURNEAU, S.,. Learning to predict train wheel failures. Tech. Rep. 2005
- [7] SKARLATOS, D., KARAKASIS, K. and TROCHIDIS, A. Railway wheel fault diagnosis using a fuzzy-logic method. *Applied Acoustics*, **65**(10), pp. 951-966. 2004
- [8] CARDONA FOIX. S., TEJEDO SOBRINO. J. L. Instalación de monitorizado por vibraciones para ferrocarriles metropolitanos. *Anales de Ingeniería Mecánica.*, **1** (6): 327:330. ISSN: 0212-5072. 1998
- [9] JIANHAI Y., ZHENG DING Q. and BOSHI C. Application of Wavelets to defect detection of wheel flats of railway wheels. ICSP'02 Proceedings, IEEE. **6**(02). 2002
- [10] REMINGTON, P.J. Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, **81**(6), pp. 1805-1823. 1987
- [11] BRAGHIN, F., LEWIS, R., DWYER-JOYCE, R.S. and BRUNI, S. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear. *Wear*, **261**(11-12), pp. 1253-1264. 2006
- [12] TELLISKIVI, T. and OLOFSSON, U. Wheel-rail wears simulation. *Wear*, **257**(11), pp. 1145-1153. 2004
- [13] F. LANZA DI SCALEA., J.McNAMARA. Measuring high-frequency wave propagation in railroad tracks by joint time-frequency analysis. *Journal of Sound and Vibration*, **273**, pp. 637-651. 2004
- [14] S. MALLAT, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, Second Edition, New York, 1999. p. 69.
- [15] CARDONA FOIX S., CLOS I COSTA, D. Tratamiento de datos en monitorizado por vibraciones para ferrocarriles metropolitanos. *Anales de ingeniería mecánica*, **9** (2): 267-269. ISSN: 0212-5072. 1992