

## LA TRANSFORMADA WAVELET COMO HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DE SEÑALES ULTRASÓNICAS TRANSMITIDAS EN HUESO CORTICAL

PACS: 43.35.Wa

Pardo, Emilia <sup>(1)</sup>; Talmant, Maryline <sup>(2)</sup>; Laugier, Pascal <sup>(2)</sup>; San Emeterio, José Luis <sup>(1)</sup>

(1) Instituto de Acústica. CSIC.

Serrano 144.

28006 Madrid, España

Tel.: 34 915 618 806. Fax.: 34 914 117 651

E-mail: empargo@ia.cetef.csic.es

(2) Laboratoire d'Imagerie Paramétrique, UMR CNRS 7623,

Université Pierre et Marie Curie-Paris 6

15 rue de l'Ecole de Médecine.

75006 Paris. Francia

### ABSTRACT

The purpose of this work is the application of wavelet transform methods to the study of multi-component signals obtained by ultrasonic axial transmission in cortical bone. This technique consists of a linear arrangement of emitters and receivers placed on the same side of the skeletal site. Ultrasound waves which propagate along the axis of long bones are observed and the velocity of these waves is found to provide an index of bone status. In devices which operate at 1 MHz, the first arriving signal is the unique contribution exploited for bone assessment [1]. Nevertheless, the acquired signals are usually quite complex and other contributions may be valuable to improve bone diagnosis. On the other hand, there is no standard signal processing technique for the velocity determination of these contributions using broad-band ultrasonic pulses [2-3]. In this work, a preliminary study of the capabilities of time-scale techniques for the identification of different components in the previous signals is presented. A reassignment of the time-scale coefficients [4] is also explored to improve the concentration of the signal components.

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la aplicación de la transformada wavelet al estudio de las señales con componentes múltiples obtenidas mediante transmisión axial ultrasónica en hueso cortical. Esta técnica se basa en la utilización de un arreglo lineal de emisores y receptores ultrasónicos que se sitúan en el mismo lado del hueso. Se adquieren las señales correspondientes a las ondas ultrasónicas que se propagan según el eje de los huesos largos, y se determina su velocidad como indicativo del estado del hueso. Normalmente la primera señal que llega es la única contribución explotada de cara a la evaluación del estado del hueso [1]. No obstante, las señales adquiridas son generalmente bastante complejas, y otras componentes podrían resultar también útiles para mejorar el diagnóstico del hueso. Por otra parte, no existe una técnica de procesado de señal estándar para la determinación de la velocidad de estas contribuciones usando pulsos ultrasónicos de banda ancha [2-3]. En este trabajo se presenta un estudio preliminar acerca de la capacidad de las técnicas tiempo-escala para la identificación de diferentes componentes en las señales anteriores. Asimismo se explora la utilización de la técnica de reasignación de los coeficientes tiempo-escala [4] con el fin de mejorar la concentración de las componentes de la señal.

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo se han aplicado técnicas tiempo-escala para el análisis de las señales no estacionarias, multicomponente, obtenidas mediante transmisión axial ultrasónica en hueso cortical. Estas señales son medidas *in vivo* en el hueso del radio de los pacientes, mediante una sonda consistente en un array lineal de transductores de banda ancha, trabajando a una frecuencia central de 1 MHz, con un ancho de banda relativo del 70%. Los dos elementos en los extremos del array actúan alternativamente como emisores, mientras que los 14 elementos centrales actúan como receptores. Todos los transductores son elementos idénticos de anchura  $\lambda/2$ , y con una separación entre ellos ligeramente superior a  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el tejido blando [1].

El análisis de estas señales se ha llevado a cabo mediante transformadas tiempo-escala, buscando los parámetros de procesamiento más adecuados con el fin de obtener una buena concentración de las diferentes componentes de señal a identificar.

## TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA. ESCALOGRAMA

Figura 1. Señal que llega al receptor 7 (a), y su espectro de energía en función de la frecuencia (b).

La transformada wavelet continua se define como

$$T_x(t, a, \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s) |a|^{-1/2} \psi \left( \frac{s-t}{a} \right) ds \quad (1)$$

con la condición de admisibilidad  $C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$  (2)

La distribución de energía correspondiente es el escalograma:

$$E_x(t, a, \psi) = |T_x(t, a, \psi)|^2 \quad (3)$$

Al variar el parámetro de escala  $a$ , el ancho de banda y la duración de la wavelet también varían, teniendo wavelets largas en las bajas frecuencias, y wavelets más cortas en las altas frecuencias. Aunque la transformada wavelet proporciona una representación tiempo-escala, para wavelets bien localizadas en torno a una frecuencia central  $f_c$  a escala  $a=1$ , es posible una interpretación tiempo-frecuencia aproximando  $f = f_c/a$ .

En este trabajo se ha utilizado la wavelet de Morlet, que consiste en una senoidal con envolvente Gaussiana:

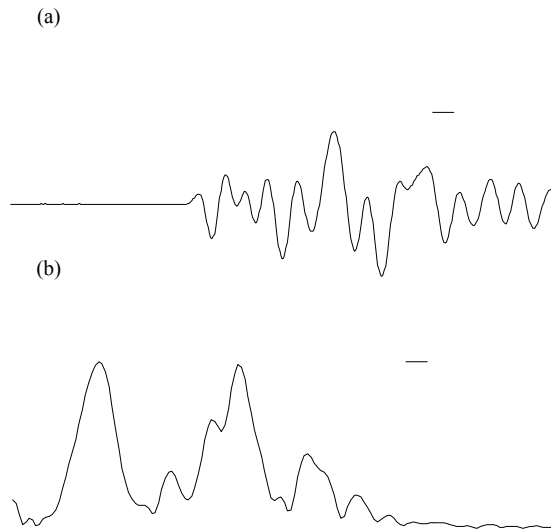
$$\psi(s) = e^{i\eta s} \cdot \frac{e^{-s^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (4)$$

Los parámetros  $\eta$  y  $\sigma$  determinan el tamaño de las regiones de resolución tiempo-frecuencia para esta wavelet.

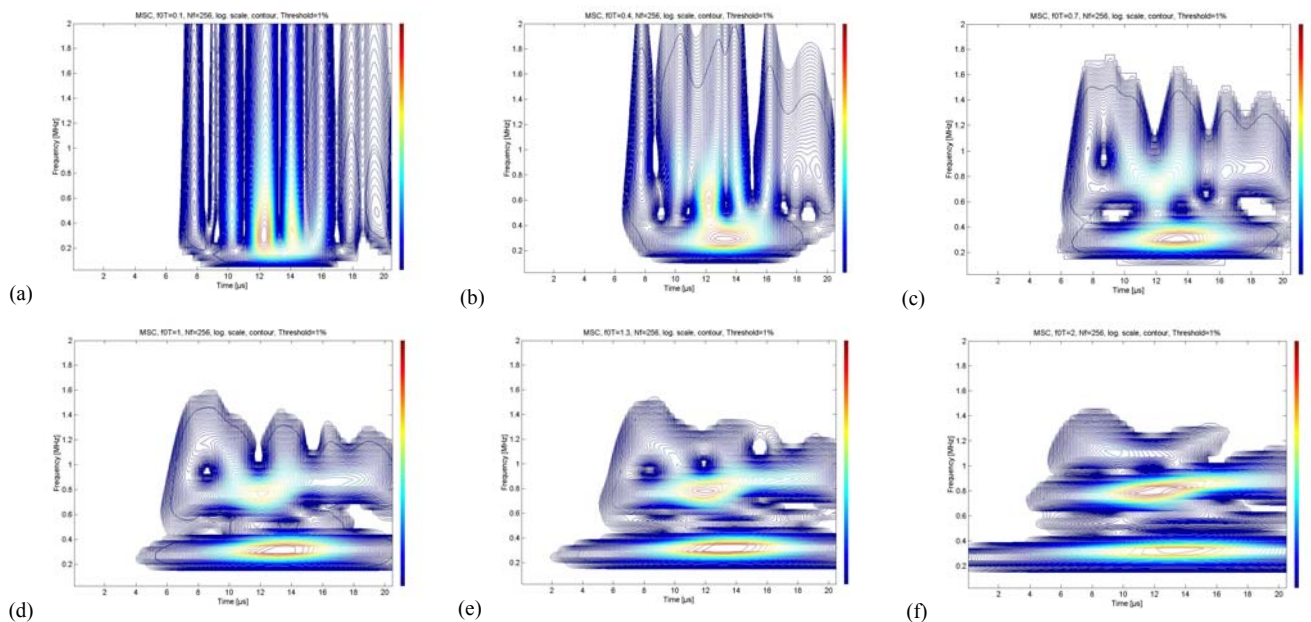
## PROCESADO WAVELET DE UNA TRAZA ULTRASÓNICA. COMPONENTES DE LA SEÑAL

La figura 1 muestra un ejemplo típico de la señal que llega a un elemento del array de transductores, en particular al receptor 7. Se ha representado la señal en el dominio del tiempo (figura 1.a), junto con su espectro de energía (figura 1.b). En este espectro se pueden distinguir tres componentes principales: una de baja frecuencia en torno a 0.3 MHz, otra de frecuencia intermedia en torno a 0.85 MHz, y finalmente otra de más alta frecuencia y menor amplitud que las anteriores, en torno a 1.1 MHz. Esta representación permite identificar las principales componentes frecuenciales de la señal, pero no proporciona ninguna información sobre los instantes de tiempo en que ocurren. Por el contrario, la representación wavelet sí que va a proporcionar información conjunta de la energía de la señal en el plano tiempo-frecuencia.

La figura 2 muestra la representación wavelet de la señal anterior, en particular el escalograma correspondiente a una wavelet de Morlet. Para obtener esta representación se ha utilizado el



paquete de software libre denominado *time-frequency toolbox* [4] en el entorno Matlab. Las distintas figuras 2.a-f corresponden a diferentes elecciones del parámetro de procesamiento  $f_0T$  (*tiempo-ancho de banda*), que determina la resolución tiempo-frecuencia de la wavelet. En la figura 2.a la resolución temporal es muy buena, permitiendo una clara identificación de los tiempos de llegada de la energía. En las siguientes figuras, a medida que el parámetro  $f_0T$  se incrementa, la resolución en frecuencia mejora mientras que la resolución temporal empeora. La figura 2.f muestra la mejor resolución en frecuencia. Se pueden identificar las mismas componentes observadas antes en el espectro de energía de la figura 1.b, dos de mayor



amplitud en torno a 0.3 y 0.85 MHz, y una tercera de menor amplitud alrededor de 1.1 MHz. Pero esta representación ofrece, sobre el espectro de energía, la ventaja adicional de proporcionar cierta localización temporal de las componentes frecuenciales identificadas. Por

Figura 2. Escalograma de la señal que llega al receptor 7, para una wavelet de Morlet con diferentes valores del parámetro  $f_0T$ : (a)  $f_0T = 0.1$ ; (b)  $f_0T = 0.4$ ; (c)  $f_0T = 0.7$ ; (d)  $f_0T = 1$ ; (e)  $f_0T = 1.3$ ; (f)  $f_0T = 2$ .

otra parte, el estudio aquí presentado muestra la necesidad de establecer un compromiso entre las resoluciones en tiempo y en frecuencia, mediante la elección adecuada de los parámetros de la wavelet. En este caso el valor  $f_0T = 1$  (figura 2.d) parece una buena elección, y será el que se utilice en adelante.

## PROCESADO WAVELET DE LAS SEÑALES RECIBIDAS POR EL ARRAY ULTRASÓNICO

La figura 3 muestra la secuencia de señales ultrasónicas recibidas por los 14 elementos del array, y sus respectivos escalogramas para una wavelet de Morlet con parámetro  $f_0T = 1$ . Los escalogramas para los 14 receptores muestran las mismas tres componentes principales observadas anteriormente en el receptor 7. Sin embargo es interesante observar que, para los receptores más distantes del transmisor, las componentes de más alta frecuencia, alrededor de 1.1 y 0.85 MHz, se encuentran muy atenuadas, mientras que el término de baja frecuencia, en torno a 0.3 MHz, no experimenta prácticamente atenuación. Esto refleja claramente el fenómeno de atenuación dependiente de la frecuencia.

## MÉTODO DE REASIGNACIÓN

Un aspecto crítico en las representaciones tiempo-frecuencia es su legibilidad, lo que implica tanto tener una buena concentración de las componentes de la señal, como que no aparezcan términos de interferencia engañosos. Para mejorar la legibilidad de las distribuciones tiempo-frecuencia existe una técnica general denominada reasignación (*reassignment*) [4], que consiste en desplazar cada valor de la distribución tiempo-frecuencia calculado en el punto  $(t, f)$ , a otro punto  $(\hat{t}, \hat{f})$  que es el centro de gravedad de la distribución en torno a  $(t, f)$ . De esta manera, el valor medio de la energía de la señal en torno a cada punto no se asigna a su centro geométrico, sino a su centro de gravedad, que es mucho más representativo de la distribución local de la energía de la señal.

En la figura 4 se muestra de nuevo el escalograma para la señal en el receptor 7 (figura 4.a), y el resultado de aplicar el método de reasignación a esta distribución (figura 4.b). En estas figuras queda patente la capacidad del método de reasignación para proporcionar una visualización más clara de la distribución de energía de la señal.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio basado en la transformada wavelet de las señales no estacionarias, multicomponente, que se obtienen mediante transmisión axial ultrasónica en hueso cortical. Los resultados muestran que la información conjunta tiempo-frecuencia que proporciona el dominio wavelet supera las posibilidades de otras técnicas más sencillas, como el análisis clásico de Fourier. La flexibilidad en la elección de la wavelet madre y sus parámetros, y la posibilidad de utilizar técnicas avanzadas como la reasignación, permiten un análisis adaptado a las características de la señal y al tipo de estudio que se desea realizar. Por otra parte, en un análisis más avanzado podrían aplicarse también técnicas de supresión de ruido y filtrado wavelet para la identificación de las diferentes componentes de la señal [5].

Por todo ello, la transformada wavelet puede ser una herramienta útil para el estudio de las señales ultrasónicas complejas transmitidas en hueso que se han presentado aquí. Se requerirá un estudio más exhaustivo para determinar la elección óptima de los parámetros wavelet y analizar en detalle las componentes de la señal observadas en este trabajo preliminar. Futuros estudios se centrarían en la determinación de la velocidad de las diferentes componentes identificadas.

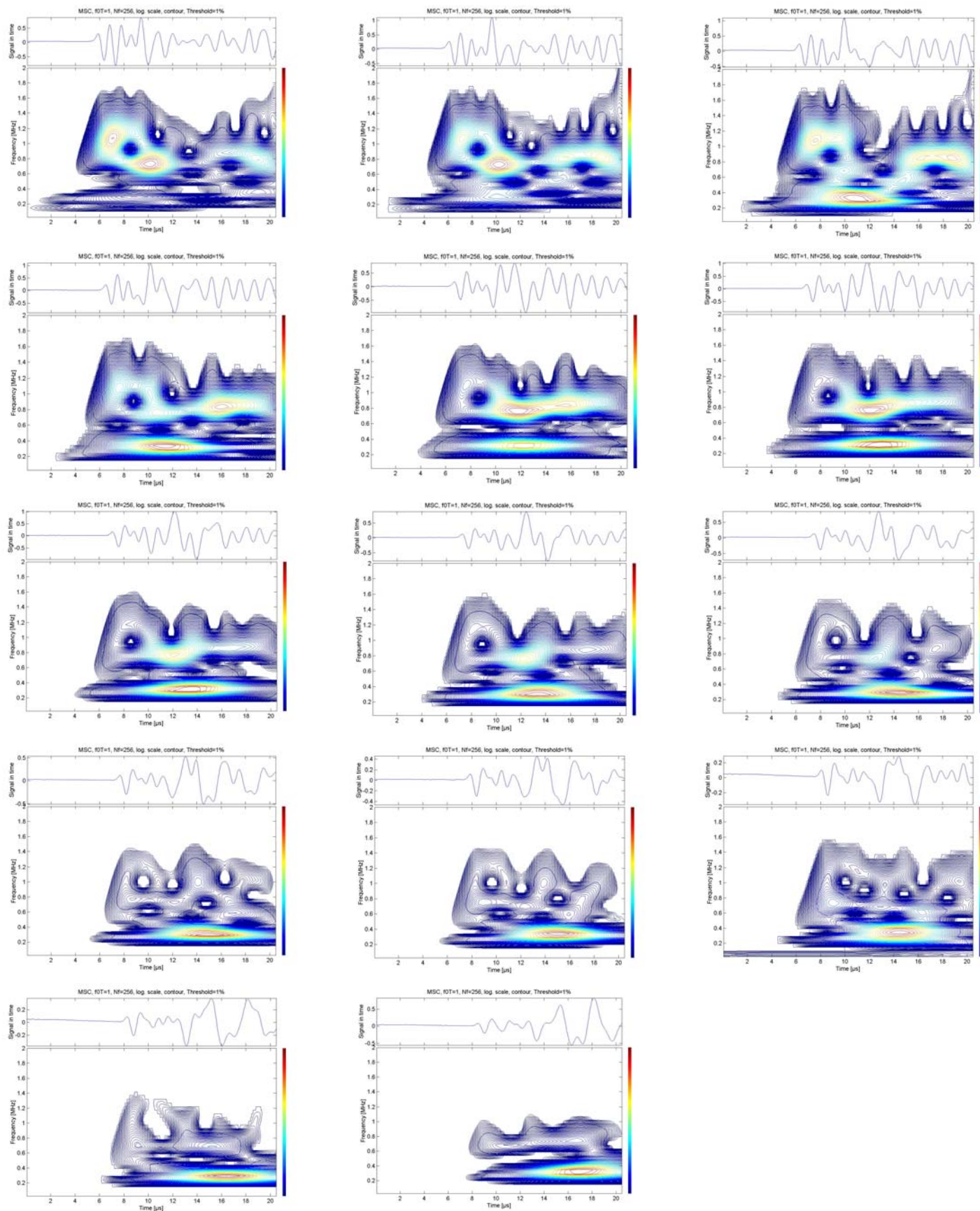


Figura 3. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, señales en los receptores 1 a 14 del array, y sus respectivos escalogramas para una wavelet de Morlet con  $f_0T = 1$ .

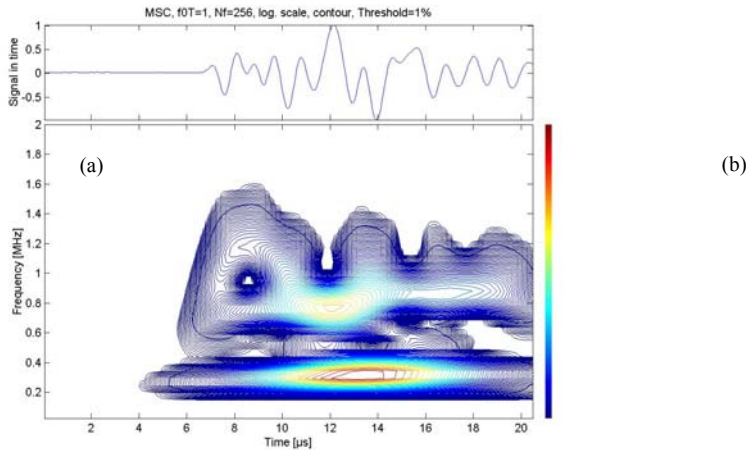


Figura 4. Escalograma de la señal que llega al receptor 7 para una wavelet de Morlet con  $f_0 T = 1$  (a), y resultado de aplicar la técnica de reasignación a esta distribución (b).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyectos DPI2002-00441 y DPI2005-00124, y beca FPI BES-2004-5296).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Bossy, M. Talmant, M. Defontaine, F. Patat, P. Laugier, "Bidirectional axial transmission can improve accuracy and precision of ultrasonic velocity measurement in cortical bone : A validation on test materials" IEEE Trans. On Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 52, pp. 71-79 (2004)
- [2] G. Haiat, F. Padilla, R.O. Cleveland, P. Laugier, "Effects of frequency-dependent attenuation and velocity dispersion on in vitro ultrasound velocity measurement in intact human femur specimens", IEEE Trans. On Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, Vol 53, pp. 39-51 (2006)
- [3] PHF Nicholson, G. Lowet, C.M. Langton, J. Dequeker, J. VanderPerre, "A comparison of time-domain and frequency-domain approaches to ultrasonic velocity measurement in trabecular bone", Physics in Medicine and Biology, Vol. 41, pp. 2421-2435 (1996).
- [4] F. Auger, P. Flandrin, P. Gonçalves and O. Lemoine, Time-Frequency Toolbox Tutorial, 1997
- [5] E. Pardo, J.L. San Emeterio, M.A. Rodríguez, A. Ramos, "Noise reduction in ultrasonic NDT using undecimated wavelet transforms" Ultrasonics, Vol. 44, nº 3-9, pp.17-21 (2006) (article in press).