Mecánica Computacional, Volumen XVIII - pp. 451-458
Compilado por: E. Dari, C. Padra y R. Saliba
San Carlos de Bariloche, noviembre de 1997

APLICACIÓN DE TRANSFORMADAS TIEMPO-FRECUENCIA AL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MÁQUINAS ROTATORIAS

P. Saavedra, C. Harrison, M. Iribarren y C. San Martín
Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción; Casilla 53-C, Concepción - Chile
pedro @ galileo . dim . udec . cl

RESUMEN

Este artículo discute el uso de transformadas tiempo-frecuencia en el análisis de vibraciones medidas en máquinas rotatorias, con el objeto de determinar su condición mecánica. Se explica y se compara la performance de la Transformada de Fourier corta, la Transformada en ondelettes y la Seudo Transformada de Wigner-Ville en el análisis de vibraciones transientes y moduladas en frecuencia y amplitud.

ABSTRACT

This paper deals with the joint time-frequency distributions applied to measured vibrations on rotating machines for evaluating its mechanical condition. The use and advantage of applying the Short Fourier Transform, the Wavelet Transform and Pseudo Wigner-Ville Transform is explored through the analysis of non-stationary and amplitude and frequency modulated vibrations generated by some faults on the machines.

INTRODUCCIÓN

La fuerte competencia en los mercados actuales requiere que las empresas reduzcan los costos de mantenimiento de sus máquinas, aumenten la disponibilidad de ellas y disminuyan a cero las detenciones imprevistas. Para esto se está usando en forma creciente el análisis de las vibraciones medidas en los descansos o ejes de las máquinas rotatorias (motores, turbinas, bombas, cajas de engranajes, etc.). Esto con el objetivo primario de predecir la condición mecánica en que se encuentran (auditoría técnica de máquinas y diagnóstico de fallas) y efectuar la intervención de ella cuando sea estrictamente necesario (mantenimiento predictivo).

El objetivo del análisis de señales es extraer información relevante, a través de una transformación de ellas. Hoy en día existen numerosas técnicas de análisis tanto en el dominio tiempo como frecuencias, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular. La más utilizada es el análisis frecuencial clásico basada en la Transformada Rápida de Fourier, FFT, la cual determina la composición frecuencial de la señal a analizar.

El análisis frecuencial FFT sólo trabaja bien si la señal a analizar está compuesta de componentes estacionarias durante su período de análisis. Esto indica que efectos tales como cambios abruptos en el tiempo, o efectos locales o transientes en la vibración, son promediados en el período de análisis, perdiéndose información sobre la naturaleza o forma de estas variaciones. Lo anterior explica porqué las FFT de vibraciones diferentes, generadas por diferentes fallas pueden ser similares, y por lo tanto, la inviabilidad de discriminar entre ellas a través de este análisis. Existe entonces la necesidad de un análisis que describa mejor señales no estacionarias o transientes. Esto se consigue con las distribuciones o transformadas "tiempo-frecuencia".

El presente trabajo tiene como objetivo la utilización de la Seudo Transformada de Wigner-Ville, la transformada en ondelettes y la STFT en el análisis de algunas señales evolutivas en el tiempo indicadoras de problemas en las máquinas rotatorias. Los algoritmos de las distribuciones tiempo-frecuencia utilizados para analizar señales vibratorias de máquinas rotatorias son implementados en un PC en ambiente de MATLAB.

DISTRIBUCIONES TIEMPO-FRECUENCIA

La *Transformada de Fourier*, FT, es el método clásico para representar información en el dominio frecuencia (o espectro) de una señal estacionaria. Para una señal continua en el tiempo x(t), FT está definida como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, e^{-j2\pi f t}\, dt \tag{1}$$

Claramente se ve que la información en el dominio frecuencia está definida sobre un período infinito de tiempo. Si la señal no es estacionaria, los cambios que se produzcan en ella harán variar las componentes espectrales y aún más grave es que cambios abruptos en ella harán que X(f) se esparza sobre todo el eje de las frecuencias. Por consiguiente, un análisis para señales no estacionarias requiere más que la FT, se requiere de una distribución tiempo-frecuencia.

Distribuciones lineales

Las distribuciones o transformadas tiempo-frecuencias se pueden clasificar en lineales y cuadráticas. La distribución lineal más conocida es la *Short Time Fourier Transform*, STFT, la cual es evaluada aplicando la clásica FFT a diferentes tramos de la señal haciendo uso de una ventana deslizante g(t) de extensión limitada, centrada en $t = \tau$, es decir:

$$STFT(\tau,f) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(t)\, g(t-\tau)\, e^{-j2\pi f t}\, dt \tag{2}$$

donde $g(t) = 0$ para $|t|>T/2$, y la señal se supone ser estacionaria durante el corto intervalo de tiempo T. Si esto no fuese así los valores obtenidos serían valores promedios.

Un problema que presentan las distribuciones lineales es que no es posible obtener simultáneamente una buena resolución en el dominio tiempo Δt y frecuencias Δf, debido a que su producto está limitado por [1]:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{2} \tag{3}$$

esto es referido generalmente como el "principio de incertidumbre". Esto significa que una buena resolución en frecuencias conduce a una mala resolución en el tiempo y viceversa.

Para superar la limitación de resolución de la STFT se puede utilizar una distribución de resolución variable Δt y Δf en el plano tiempo-frecuencia. Intuitivamente la solución se ve como un banco de filtros de ancho de banda variable, el cual aumenta a medida que crece la frecuencia. Esto resulta en una capacidad de entregar alta resolución frecuencial a bajas frecuencias y alta resolución temporal a altas frecuencias.

La Transformada en ondelettes (Wavelet Transform), WT, es una distribución lineal que sigue exactamente las ideas anteriores, mientras se le ha agregado la simplificación de que todas las respuestas impulso del banco de filtros son definidas como versiones escaladas (estiradas o comprimidas) del mismo prototipo w(t), es decir:

$$w(t,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \left(\frac{t}{a}\right) \tag{4}$$

donde a es el factor de escala y w es la ondelette madre. La WT de una señal x(t) está definida entonces como la convolución de x(t) y w(t,a) [2]:

$$WT(t,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\; W\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau \tag{5}$$

La condición que debe satisfacer W(t) para que la representación indicada en (5) sea válida es que la ondelette madre tiene que tener un valor medio cero y energía finita [2].

Muchas de las formas de ondelettes encontradas en la literatura son de la forma w(t) = h(t) exp ($-j2\pi f_0 t$) debido a que ellas se relacionan más fácilmente al concepto de frecuencia, parámetro fundamental para el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias.

La ventaja de cambiar la resolución en frecuencia a diferentes frecuencias se obtiene con los llamados **"paquetes de ondelettes"**, donde, dentro de los límites fijados por el principio de incertidumbre, se eligen resoluciones diferentes y arbitrarias en el dominio de las frecuencias, dependiendo de la naturaleza de la señal.

El uso de la transformada de ondelette presenta ventajas en cierto tipo de señales donde un análisis de porcentaje de banda constante es más apropiado que el análisis de ancho de banda fijo que utiliza la STFT. Por ejemplo, en los análisis acústicos donde el oído humano realiza un análisis el cual es aproximadamente de porcentaje de banda constante.

Distribuciones cuadráticas

Este tipo de distribuciones se caracteriza por depender en forma cuadrática de la señal temporal lo que permite interpretarlas como una distribución de energía de la señal en el plano tiempo frecuencia.

Dentro de las distribuciones cuadráticas la más interesante es la Distribución de Wigner-Ville, WV(t, f), definida como [3].

$$WV(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t+\tau/2)\ S^{*}(t-\tau/2)\ e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad (6)$$

donde * indica la conjugada y S(t) es la señal analítica de la señal real x(t), definida por S(t) = x(t) + j H [x(t)], donde H [x(t)] es la transformada de Hilbert de x(t).

Una propiedad relevante de las distribuciones cuadráticas es que no están limitadas por el principio de incertidumbre. Sin embargo, presenta dos problemas respecto a las distribuciones lineales: (i) A pesar de ser una distribución de densidad de energía puede presentar algunos valores negativos. (ii) Por ser de naturaleza bilineal se pierde la ventaja de poder utilizar el principio de superposición cuando se analizan señales con varias componentes. Esto trae como consecuencia que aparezcan componentes de "términos cruzados" que no son reales.

Por ejemplo, si $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$, entonces la Distribución Wigner-Ville de x(t),

$$WV(t,f) = WV_1(t,f) + WV_2(t,f) + WV_{12}(t,f) + WV_{21}(t,f) \qquad (7)$$

donde $WV_1(t,f)$ y $WV_2(t,f)$ son las distribuciones de Wigner-Ville para las componentes $x_1(t)$ y $x_2(t)$, y $WV_{12}(t,f)$ y $WV_{21}(t,f)$ son las distribuciones cruzadas entre $x_1(t)$ y $x_2(t)$. Estos términos están ubicados en la frecuencia media de las componentes y son de naturaleza oscilatoria. Existe entonces la posibilidad en una señal multicomponente que estos términos cruzados interfieran incorrectamente con algunas componentes reales de la señal.

Estos problemas han hecho dudar a los usuarios si vale la pena utilizar la distribución de Wigner-Ville. Sin embargo, sus ventajas una vez minimizado el efecto de los términos cruzados, la han convertido en la distribución tiempo-frecuencia más útil y fundamental [4]. En este trabajo la influencia de los términos cruzados se disminuye usando una ventana deslizante en el dominio tiempo antes de calcular la WVD. La WVD así obtenida se llama la Seudo Distribución de Wigner-Wille, PWVD.

En la práctica la PWVD debe ser calculada en un PC, lo que implica tomar un tiempo de muestreo finito y discretizarla. La versión discreta de la WVD usada será [5]:

$$WVD(m\Delta t, k\Delta\omega) = 2\Delta\omega \sum_{n=0}^{2n-1} W$$

$$W = S[(m+n)\Delta t]\cdot S^{*}[(m-n)\Delta t]\ \exp(-j\pi nk/N) \qquad (8)$$

$$donde\ \ \Delta\omega = \pi/(2N\Delta t)$$

La resolución en frecuencia, $\Delta\omega$, en ecuación (8) es un cuarto de la resolución de un espectro de densidad espectral de potencia obtenido utilizando la FFT. Para disminuir las discontinuidades en los extremos de la señal, lo cual genera fugas laterales, se aplica a la señal temporal una ventana Gaussiana discretizada para obtener la PWVD discretizada.

Cohen [3] demostró que todas las distribuciones cuadráticas provienen de una expresión general, las cuales se relacionan a través de una función $\phi = \exp[-\theta^2\tau^2\sigma]$. El problema que presenta esta distribución es el compromiso entre la resolución en frecuencia de los "términos verdaderos" y la amplitud de los términos cruzados. Una gran atenuación de estas últimas componentes implica pobres resoluciones frecuenciales y viceversa. Este compromiso es una seria limitación para este tipo de distribución, pues para transientes de corta duración una mala elección del factor escalamiento σ puede significar que los transientes no sean detectados.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN Y DISCUSIÓN

Vibraciones generadas en la partida de un motor eléctrico. Una aplicación interesante en el análisis de vibraciones es la determinación de las velocidades críticas de una máquina analizando sus vibraciones medidas en partidas y paradas. Fig. 1 muestra el análisis de las vibraciones generadas en la partida de un motor eléctrico debido a su desbalanceamiento residual. El tiempo en que alcanza su velocidad nominal es aproximadamente 1 seg. Fig. 1-a muestra el diagrama en cascada, equivalente a las STFT, que es la herramienta utilizada normalmente para estudiar este tipo de problemas. La desventaja de esta representación en este problema se debe a su

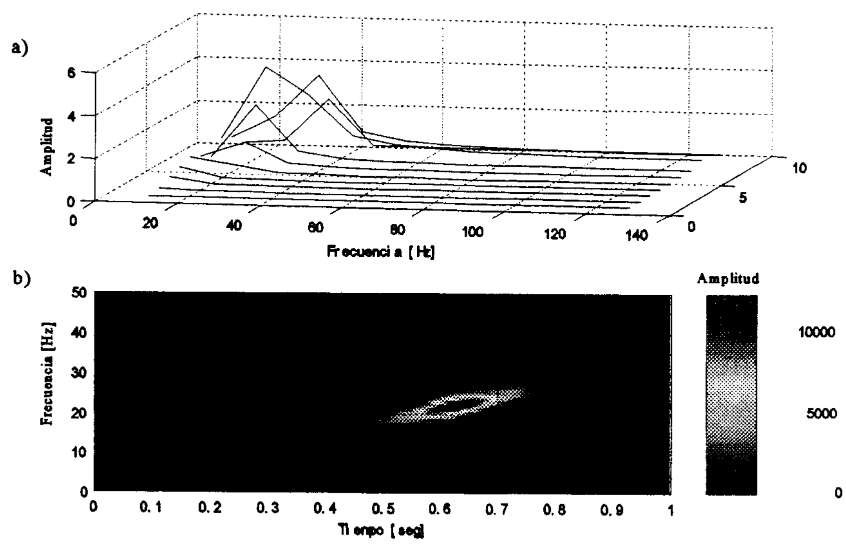

Fig. 1. a) Diagrama en cascada, STFT. b) Seudo Transformada de Wigner-Ville.

mala resolución frecuencial $\Delta f = 1$ / (longitud T de la ventana temporal de análisis). Si se calcula 10 espectros durante la partida del motor, entonces $T = 0.1$ seg y $\Delta f = 10$ Hz, lo que no permite determinar con exactitud la primera velocidad crítica del rotor de 25 Hz. En cambio, en la PWVD, Fig. 1-b, se puede distinguir claramente dicho valor.

Rotor con comportamiento no-lineal. Otra aplicación interesante de las distribuciones tiempo-frecuencia es su uso en la determinación de parámetros modales en sistemas no lineales. Fig. 2-a representa esquemáticamente un rodamiento que en lugar de tener un ajuste deslizante está suelto en su alojamiento. Este problema es similar a un rodamiento con sus pistas y/o elementos rodantes desgastados. Este es un problema típico que se presenta en máquinas que trabajan en ambientes con mucho polvo (chancadores, ventiladores, etc.). Es interesante en este caso estimar el juego de los rodamientos para poder determinar su reemplazo.

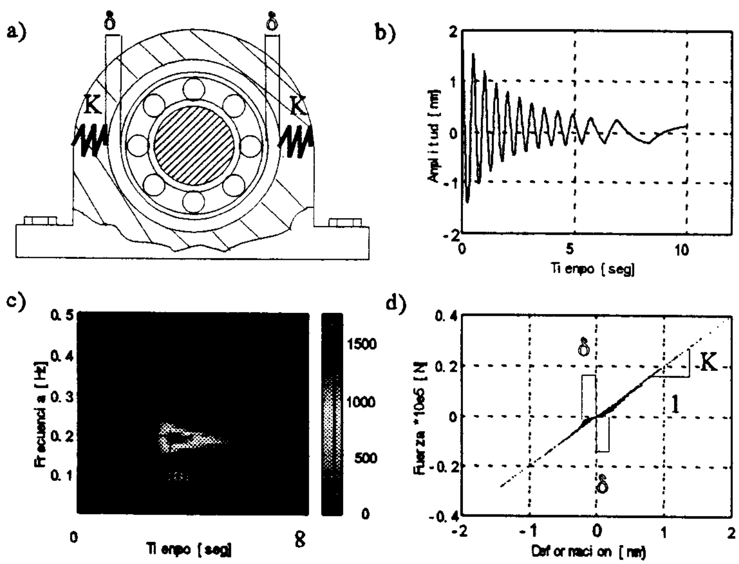

Fig. 2. a) Rotor con juego δ en sus rodamientos. b) Vibraciones libres horizontales del rotor. c) PWVD de las vibraciones libres. d) Curva fuerza-deformación horizontal del rotor.

Este sistema es no-lineal debido a la variación de la rigidez según el rotor se mueva en el huelgo δ o esté en contacto con el soporte de rigidez K. Fig. 2-b muestra las vibraciones libres medidas en el rotor. Claramente se observa la variación de la frecuencia natural (que va en aumento). Fig. 2-c muestra la PWVD de esta vibración. De esta distribución se toma los valores pico en cada instante que representan la frecuencia instantánea y a partir de ella se obtiene la curva Fuerza-Deformación del sistema, Fig. 2-d, donde se puede determinar el juego δ de los rodamientos

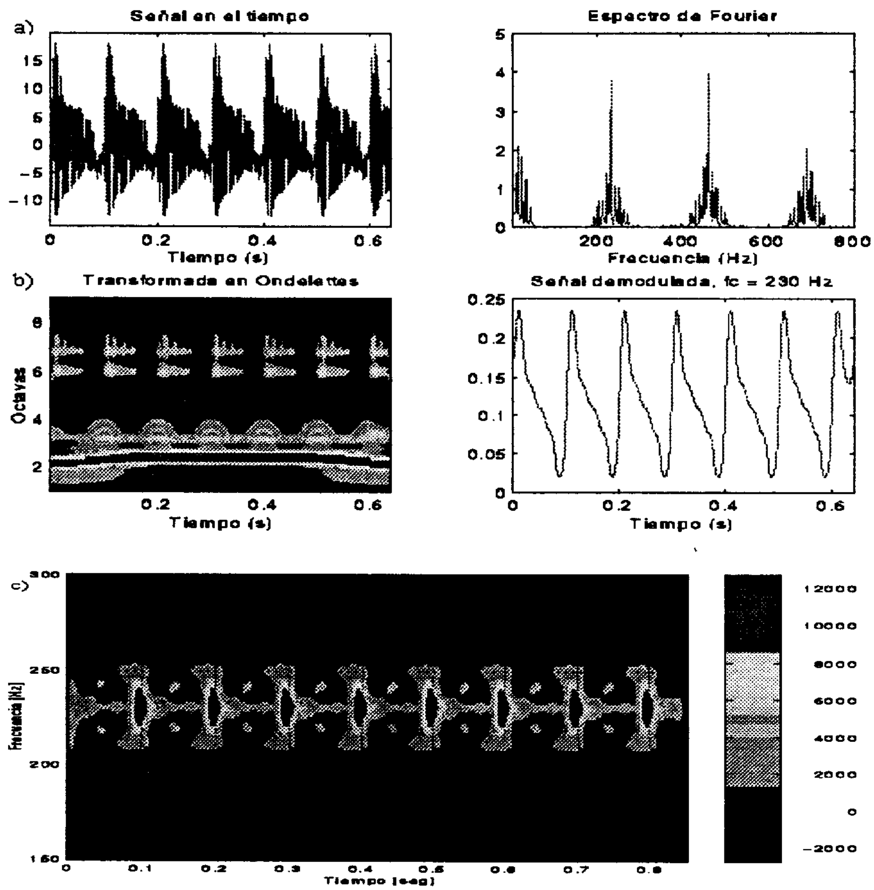

Fig. 3. a) Vibración y espectro. b) Transformada de ondelettes. c) PWVD de componente a fe.

Vibraciones en engranajes. Fig. 3-a muestra la velocidad vibratoria medida en el descanso de un engranaje piñón que acciona un molino. La velocidad de rotación del piñón es 10 Hz y tiene 23 dientes por lo que su frecuencia de engrane es fe = 230 Hz. Esta figura también muestra el espectro de la señal. Se observa que las componentes a fe, 2fe y 3fe tienen bandas laterales a la velocidad de rotación del piñón indicando modulación y por lo tanto un problema en el engrane. En este análisis frecuencial clásico no se puede determinar si dichas modulaciones son en amplitud y/o frecuencia, lo que permitiría inferir el origen del problema.

Fig. 3-b muestra una Transformada en ondelettes y un corte del escalograma a la frecuencia del engrane fe = 230 Hz. Se aprecia claramente que esta componente está modulada en forma

periódica en amplitud al período de rotación del piñón. Esto indica un piñón montado en forma excéntrica, o el eje doblado del piñón, o un piñón con un punto alto (runout). Fig. 3-c muestra la PWVD de la componente a la frecuencia de engrane. En esta figura se puede apreciar de igual forma que en Fig. 3-b, que la componente a f_e está modulada periódicamente en amplitud, con un período igual a la velocidad de rotación del piñón.

CONCLUSIONES

Se ha aplicado la PWVD y la transformada en ondelette para analizar las vibraciones medidas en los descansos de máquinas rotatorias con el objeto de determinar su condición mecánica. Se concluye que para un eficaz análisis de vibraciones no estacionarias en el plano tiempo-frecuencia se requiere el uso de diferentes distribuciones según la naturaleza del problema. Si se requiere una buena resolución en frecuencias, y la señal no tiene muchas componentes, la PWVD presenta ventajas. Si se requiere un análisis de una señal con muchas componentes y con buena resolución en frecuencia a las bajas frecuencias y no a las altas frecuencias, la transformada en ondelettes es la más adecuada, como se ilustró en el ejemplo del engrane.

Se espera que mejorando la performance de las distribuciones presentadas, tema de la actual investigación, estos métodos lleguen a ser una herramienta poderosa de análisis de vibraciones para el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias en los casos donde los métodos clásicos presentan serias limitaciones.

REFERENCIAS

[1] HAMMOND, J.K. y P.R. WHITE: The Analysis of Non-Stationary Signals Using Time-Frequency Methods. Journal of Sound and Vibration, Vol 190, N°3, 1996, pp.419-447.

[2] WANG, W.J.: Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis. Shock and Vibration, Vol 3, N°1, 1996, pp.17-26.

[3] COHEN, L.: Time-Frequency Distributions. A Review Proceeding of the IEEE, Vol 77, N°7, 1989, pp.941-981.

[4] SHIN, S.Y. y JEON, J.J.: Pseudo Wigner-Ville Time-Frequency Distribution and Its Aplication to Machinery Condition Monitoring, Vol 1, N°1, 1993, pp.65-76.