



## ANALISIS DINAMICO DE MAQUINAS UTILIZANDO LA DISTRIBUCION DE WIGNER-VILLE

Dr. Pedro Saavedra González  
Carlos Figueroa G.  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Dr. Marcelo Iribarren C.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción  
Barrio Universitario, Casilla 53-C  
Concepción - CHILE

### RESUMEN

*Muchos problemas que se producen en las máquinas rotatorias generan en sus inicios vibraciones transientes o de un modo no estacionario, que en diferentes instantes de tiempo tienen diferentes contenidos en frecuencias. Se demuestra que en estos casos es necesario una transformada bidimensional tiempo-frecuencia para caracterizar dichas vibraciones. Se discute la pseudo-Transformada de Wigner-Ville, STWV, y su implementación en ambiente MATLAB. Se analizan diferentes tipos de vibraciones mediante la STWV para ilustrar sus características principales y se compara su performance con la clásica Transformada Rápida de Fourier, FFT. Se concluye que la STWV es una herramienta de análisis mucho más poderosa que la FFT especialmente para señales transientes y no estacionarias.*

### SUMMARY

*Rotary machines with don't operate correctly initially generate transient vibrations and/or non stationary mode, which in different instances have different frequency content. It can be shown, that in these cases a bidimensional time-frequency transform is necessary to characterize these vibrations. The Wigner-Ville pseudo Transform, STWV, and its implementation in MATLAB language are discussed. Several different vibration types are analyzed using STWV to illustrate their principal characteristics and its performance is compared with the classical Fast Fourier Transform, FFT. It is concluded that the STWV is a much more powerful analysis tool than the FFT, especially for transient and not stationary signals.*

### INTRODUCCION

Un factor que grava fuertemente los costos de los productos generados por todo tipo de industria es la pérdida de producción debido a la detención de una máquina crítica en plantas de producción continua. Para disminuir estas pérdidas se debería detener la máquina sólo cuando sea estrictamente necesario, para lo cual se requiere

conocer su condición mecánica en todo instante. Esta estrategia de mantenimiento predictivo está basada fundamentalmente en el análisis de vibraciones medidas en los descansos de la máquina.

El procedimiento estándar para analizar las vibraciones en una máquina se basa fundamentalmente en el espectro vibratorio obtenido de la Transformada Rápida de Fourier, FFT y complementado con otros tipos de análisis: forma de onda en el tiempo, relación de la fase entre vibraciones y en algunos casos las órbitas que describe el eje en sus descansos, los diagramas de Bodé, suma sincrónica en el tiempo entre otros.

El problema de las técnicas que se utilizan actualmente es que no permiten discriminar entre tipos de fallas en máquinas rotatorias que presentan síntomas similares funcionando en estado estacionario. Ejemplo de esto, como lo saben los usuarios, es que no es posible diferenciar en forma confiable usando las técnicas señaladas precedentemente, entre un problema de desalineamiento de ejes con un problema de grieta transversal en ellos. La importancia de diferenciar en una máquina crítica entre este tipo de problemas es que permite decidir fundadamente al ingeniero responsable de la máquina la acción a tomar. En el primer caso se puede continuar con el problema hasta una parada programada para unos meses más, mientras que en el segundo caso se debe detener la máquina de inmediato para evitar el alto riesgo de que se produzca una falla catastrófica.

El problema de la FFT, es por su definición, descomponer la vibración a analizar en una serie de componentes en frecuencia de amplitudes constantes. Esto indica que efectos tales como cambios abruptos en el tiempo, o efectos locales o transientes en la vibración, son promediados en el periodo de análisis, perdiéndose información sobre la naturaleza o forma de estas variaciones. Lo anterior explica por qué las FFT de las vibraciones generadas por diferentes fallas pueden ser similares, y por lo tanto, la inviabilidad de discriminar entre ellas a través de este análisis.

Una mejor caracterización de una señal vibratoria, en especial aquellas evolutivas o transientes, se obtiene considerándola como función conjunta del tiempo y de la frecuencia. Estos tipos de transformaciones se denominan frecuentemente representaciones "frecuencia-tiempo".

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar que el uso de una de estas representaciones frecuencia-tiempo, específicamente la seudo Transformada de Wigner-Ville, es una herramienta más poderosa que la FFT para el análisis de vibraciones en máquinas rotatorias.

#### LA SEUDO TRANSFORMADA DE WIGNER-VILLE

La Transformada Rápida de Fourier, FFT, es una función unidimensional que representa la potencia media de la vibración en función de la frecuencia. Las transformadas tiempo-frecuencia son funciones bidimensionales en el dominio del tiempo y de la frecuencia,  $T(\xi, t)$  que proveen información de cómo se comportan en cada instante, las diferentes componentes en frecuencia de una vibración.

Las propiedades de las transformadas tiempo-frecuencia son función de la manera cómo dependen de la vibración o señal temporal  $x(t)$ . Esta dependencia puede ser lineal, cuadrática o no lineal, siendo las dos primeras las más utilizadas. Dentro de las transformadas lineales más conocidas están la "short time Fourier Transform", la transformada de Gabor y la transformada de Ondelette. Dentro de las representaciones tiempo-frecuencia cuadráticas están la transformada de Wigner, la seudo transformada de Wigner-Ville y la transformada de Choi-Williams. En el presente trabajo se utilizará la seudo transformada cuadrática de Wigner-Ville, STWV.

A pesar que la propiedad de linealidad que tienen las transformaciones lineales es una propiedad deseable, las transformaciones cuadráticas presentan la ventaja que la resolución tiempo-frecuencia no está restringida por "el principio de incertidumbre de Heisenberg", Cohen [1]. Este principio por el cual están regidas las

transformaciones lineales, establece que, para buena precisión o resolución en el tiempo se requiere de un ancho de banda grande en frecuencias, o si se quiere una alta resolución en frecuencia es necesario una muestra larga de tiempo, es decir, no es posible lograr una transformación que tenga una resolución arbitraria tanto en el tiempo como en frecuencias.

La transformada de Wigner,  $W(t, \omega)$  está definida como:

$$W(t, \omega) = \int S^* \left( t - \frac{\tau}{2} \right) S \left( t + \frac{\tau}{2} \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

donde  $S(t)$  corresponde a una señal compleja.

Para calcular la transformada de Wigner, Ville utilizó una señal analítica. Esta señal analítica es una señal compleja. Luego, para señales reales  $S_r(t)$ , se puede obtener la parte imaginaria mediante la transformada de Hilbert:

$$S(t) = S_r(t) + j H\{S_r(t)\} \quad (2)$$

con esto se asegura eliminar las distorsiones que ocurren a frecuencias cercanas a cero debido a la interferencia de los componentes de frecuencia negativa.

La principal desventaja de la transformada de Wigner-Ville son los términos cruzados que aparecen en señales con más de una componente frecuencial y los valores negativos que pueden aparecer como consecuencia de estos términos. Para minimizar los términos cruzados Shin [2] propone utilizar una ventana Gaussiana deslizante en el dominio del tiempo y la frecuencia. La transformada obtenida mediante este procedimiento es conocida como la Seudo Transformada de Wigner-Ville, STWV.

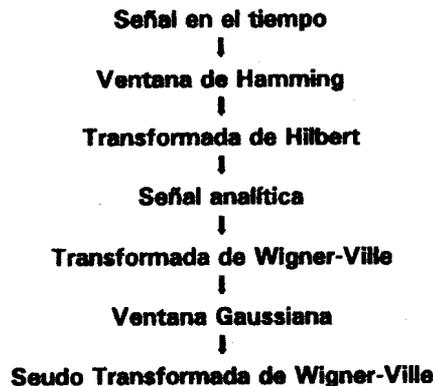


Fig. 1. Diagrama en bloques para obtener STWV.

Fig. 1 muestra un diagrama en bloque de los pasos a seguir para obtener un algoritmo de cálculo de la STWV, Figueroa [3]. Esta secuencia de pasos fue utilizada para obtener un programa de cálculo en ambiente MATLAB [3].

## APLICACION DE LA STWV AL DIAGNOSTICO DE FALLAS EN MAQUINAS ROTATORIAS

En los siguientes ejemplos se ilustra cómo la Seudo Transformada de Wigner-Ville, STWV, es utilizada como un poderoso y eficaz método para diagnosticar fallas incipientes en máquinas rotatorias.

**Rotor desbalanceado con rozamiento intermitente.** Fig. 2 muestra la vibración en el tiempo de un rotor desbalanceado, el cual debido a sus altas vibraciones roza en forma intermitente y no estacionaria con la carcaza, excitando frecuencias naturales del rotor de aproximadamente 80 y 100 Hz. El espectro de la vibración obtenido por la FFT, análisis frecuencial tradicional, Fig. 3 muestra la componente armónica a la velocidad de giro del rotor y componentes banda ancha alrededor de los 80 y 100 Hz respectivamente. No es fácil diagnosticar el problema, a través del análisis de la FFT, aún para un analista experto en análisis de vibraciones. La Seudo Transformada de Wigner-Ville, sin embargo, muestra claramente las frecuencias naturales del rotor y la periodicidad con que ellas son excitadas, permitiendo un análisis inequívoco de la vibración.

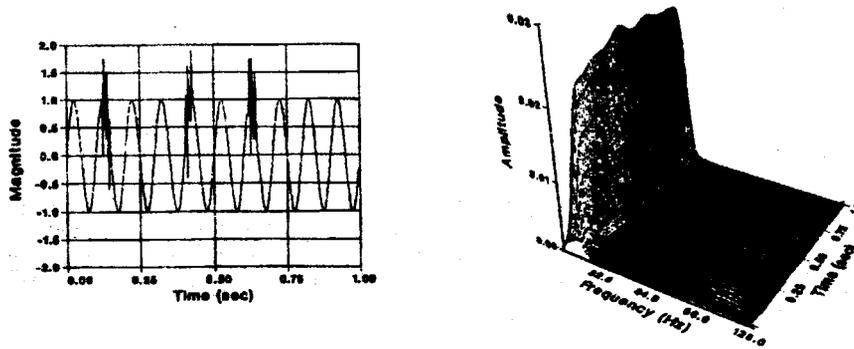


Fig. 2 Forma de la vibración en el tiempo y Seudo Transformada de Wigner-Ville.

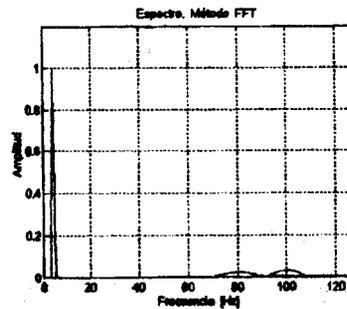


Fig. 3 FFT de vibración mostrada en Fig. 2.

Se debe tener presente que, en la mayoría de los casos las vibraciones registradas en las máquinas tienen muchas componentes, por lo que la forma de la vibración en el tiempo, a diferencia de este ejemplo, es compleja y de poca utilidad en el análisis. El diagnóstico del problema se realiza entonces tradicionalmente a través del análisis de la FFT de la vibración.

**Partida rápida de un motor eléctrico.** Fig. 4 muestra la partida de un motor eléctrico. En la parte superior se muestra la forma de la vibración en el tiempo y en la inferior se muestra su espectro vibratorio. Esta vibración tiene una componente predominante a la velocidad de rotación del motor debido a su desbalanceamiento residual, por lo tanto, es una monotonía que aumenta de amplitud y frecuencia desde 0 a 120 centésimas de segundo, que es cuando alcanza su velocidad nominal.

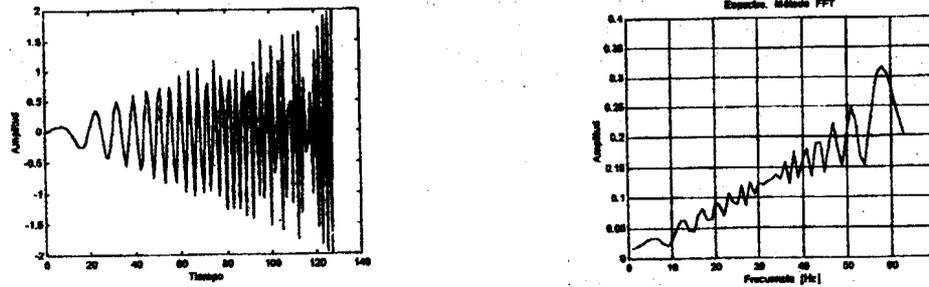


Fig. 4 Vibraciones en la partida de un motor eléctrico.

La FFT obtenida de esta señal vibratoria muestra una forma de espectro continuo y difícil de interpretar, ilustrando lo inadecuado que es la FFT para analizar vibraciones transientes. Sin embargo, la STWV, Fig. 5, muestra claramente que la vibración es monotonía de amplitud y frecuencia creciente.

En este caso no es aplicable el tradicional método de diagrama en cascada, es decir, realizar la FFT de la señal vibratoria en diferentes tramos de tiempo, debido a que incluso en pequeños tramos de tiempo la característica de la vibración sigue siendo no estacionaria producto de la gran aceleración con que parten los motores eléctricos.

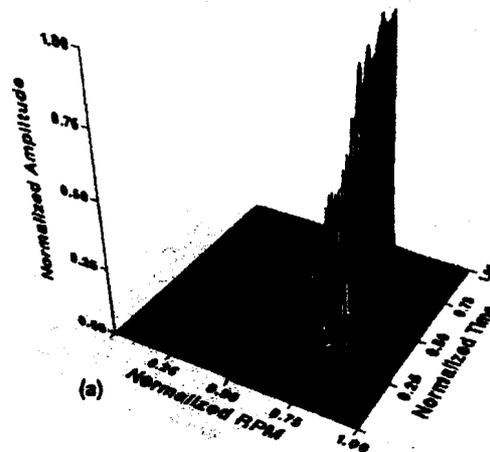


Fig. 5 STWV normalizada de la vibración mostrada en Fig. 4.

La STWV, como se ha ilustrado, es adecuada para analizar vibraciones no estacionarias. Esto permite determinar a través de ella, características tales como velocidades críticas y factores de amortiguamiento en las partidas y paradas rápidas de máquinas, lo que no es posible con la FFT.

Aplicación al diagnóstico de la condición mecánica de reductores de engranajes. El diagnóstico de la condición mecánica de máquinas complejas presenta el problema de la presencia de ruido que interfiere con las señales vibratorias. Fig. 6 muestra la vibración generada en el engranaje de un molino de bolas. Se muestra la forma de la vibración en el tiempo, y su espectro vibratorio. La manera de detectar problemas de desalineamiento del engrane, excentricidad de alguna de las ruedas, dientes desastillados, ejes doblados, puntos altos en el engrane, etc., se obtiene analizando las modulaciones (variaciones) de la componente vibratoria a la frecuencia de engrane (número de dientes x velocidad de rotación). Las modulaciones de esta componente se analizan tradicionalmente en el espectro (FFT) observando las bandas laterales en torno a ella.

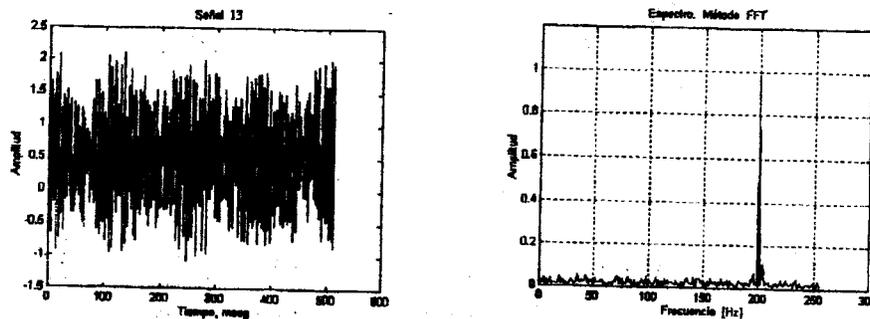


Fig. 6 Vibraciones en un engranaje piñón-corona.

En esta situación no es posible inferir de la FFT el estado del engrane debido a la presencia de vibraciones aleatorias producto del movimiento de la carga dentro del molino, lo cual genera una vibración de espectro de banda ancha que oculta las bandas laterales. Sin embargo, observando la STWV, Fig. 7, se ve claramente la modulación de amplitud de la componente a la frecuencia de engrane y la periodicidad de su modulación, lo que permitió inferir el problema del engrane.

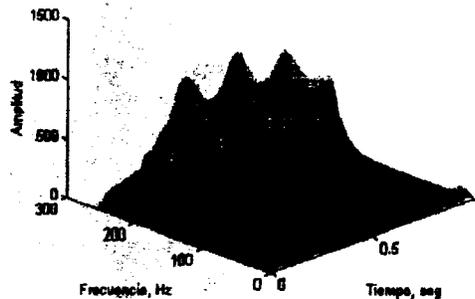


Fig. 7 STWV de la vibración mostrada en Fig. 6.

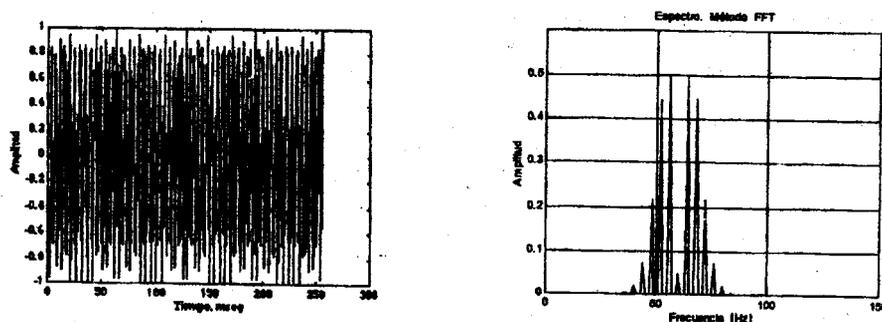


Fig. 8 Vibración modulada en frecuencia y amplitud.

Fig. 8 es otro ejemplo que muestra el gran potencial de la STWV en analizar vibraciones moduladas. La tradicional FFT es incapaz de determinar qué tipo de modulaciones se presentan en la señal vibratoria. La STWV, Fig. 9, sin embargo, fácilmente puede distinguir entre modulaciones en amplitud y/o frecuencia. Este análisis de modulaciones tampoco puede ser obtenido usando técnicas tradicionales más refinadas como el Cepstrum.

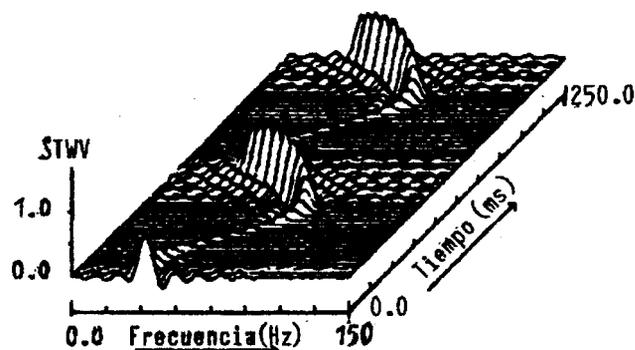


Fig. 9 STWV de la vibración mostrada en Fig. 8.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una contribución preliminar de la aplicación de transformadas bidimensionales tiempo-frecuencia usadas en otras áreas de la ciencia (procesamiento de imágenes, radar) al diagnóstico de la condición mecánica de máquinas rotatorias, como una alternativa a la FFT unidimensional usada actualmente.

Se utiliza una transformada cuadrática, la pseudo transformada de Wigner-Ville, cuya principal ventaja es no estar restringida por el principio de incertidumbre de Heisenberg, y su principal desventaja es la generación de términos cruzados ficticios (minimizados en este trabajo utilizando una ventana Gaussiana).

Algunos de los grandes potenciales de estas transformadas para el diagnóstico de fallas en máquinas, respecto a la tradicional FFT, quedan ilustrados en los ejemplos presentados, especialmente en aquellos tipos de vibraciones donde la FFT es ineficiente: vibraciones transientes no-estacionarias, o vibraciones moduladas en frecuencia y amplitud.

La investigación actual y futura en el tema queda centrada en dos puntos:

- i). Cómo optimizar, en forma sencilla, la eliminación de las componentes ficticias sin perder resolución en tiempo y frecuencia. Así, estas transformadas podrán estar disponibles en un analizador de vibraciones comercial para cualquier usuario.
- ii). Cómo, a partir de estas distribuciones poder discriminar entre fallas que con los métodos actuales no es posible realizar. El trabajo de Feldman [4] alienta la convicción de los autores de este trabajo de alcanzar este buscado objetivo.

#### REFERENCIAS

- [1] Cohen, L., "Time-Frequency Distribution. A review", Proceeding of the IEEE, Vol.77, N°7, pp.914-981, 1989.
- [2] Shin, Y., Jeon, I., "Pseudo Wigner-Ville Time-Frequency Distribution and its Application to Machinery Condition Monitoring", Shock and Vibration, Vol.1, N°1, pp.65-76, 1993.
- [3] Figueroa, C., "Diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias usando nuevos métodos de análisis de vibraciones". Memoria de Título Ingeniería Civil Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, 1996.
- [4] Feldman, M., Braun, S., "Identification of non-linear system parameters the instantaneous frequency: application of the Hilbert Transform and Wigner-Ville techniques", XIV IMAC, pp.637-642, 1996.