

Aplicación de técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones al diagnóstico de cojinetes. Análisis experimental.

F. E. Hernández Montero*, V. Atxa Uribe**

* Universidad de Pinar del Río, Martí 270, Pinar del Río, Cuba. Tel: +53 82 755 453, Fax: +53 82 779 353.

E-mail: fidel@tele.upr.edu.cu

** Universidad de Mondragón. Loramendi 4, Guipúzcoa, España. Tel: +34 943 794 700, Fax: +34 943 791 536.

E-mail: batxa@eps.muni.es

(Recibido el 25 de Septiembre de 2005, aceptado el 14 de Enero 2006)

Resumen.

El siguiente trabajo consiste en la aplicación de las técnicas de procesamiento de señal más importantes al análisis de vibraciones para el diagnóstico de los cojinetes de rodamientos, aunque pueden ser extendidos a otros tipos de componentes.

Se efectúa una caracterización de las técnicas clásicas y avanzadas que más se emplean, en este caso, los análisis espectral, cepstral, de envolvente, de tiempo-frecuencia, estadístico de orden superior y cicloestacionario, y se muestra la manera en que se aplican en la tarea de detección de un desperfecto en un cojinete de rodamientos, siguiendo un enfoque simulado y otro experimental.

Palabras Claves: Técnicas de procesamiento de señal, análisis de vibraciones, frecuencias características de fallo de cojinetes de rodamientos.

1. Introducción.

Los cojinetes son una de las causas más frecuentes de averías en máquinas rotatorias. Estos presentan el inconveniente de que en una fase inicial de deterioro, los incrementos en el nivel global de vibración son prácticamente inapreciables y difícilmente detectables [1].

Las principales causas de fallos son [2]: fallo de lubricación, fatiga, suciedad, corrosión, corrientes eléctricas, precarga excesiva, vibraciones, montaje incorrecto y altas temperaturas, entre otros, y la aparición de los defectos puede acortar significativamente su tiempo de vida. Las fallas ocurren cuando la acumulación de desperfectos causa atascamientos, calentamientos, etc., llevando a la pérdida del cojinete.

Si un cojinete tiene un defecto tal como una grieta en uno de sus aros (fallo local), habrá un impacto cada vez que los elementos rodantes pasen sobre él [1]. Esos

impactos excitan las frecuencias resonantes del cojinete y del bloque que lo soporta, de la misma forma que una campana suena cuando es golpeada. Esto resulta en una serie de “golpes resonantes” muy cortos que suceden a la frecuencia de paso de las piezas rodantes (ver figura 1).

La forma de onda resultante es un ejemplo de modulación lineal. Si la señal se observa mediante un analizador de espectros, no habrá casi energía a la frecuencia de paso de elementos rodantes en el espectro, pero habrá componentes en la banda correspondiente a las frecuencias resonantes (habrá bandas laterales alrededor de ellas, separadas por la frecuencia de paso de elementos rodantes), las cuales son, en definitiva, las que indican qué parte del cojinete está dañado. Determinando las frecuencias asociadas a cada uno de los componentes de los cojinetes, se puede identificar qué parte o zona del cojinete está deteriorada.

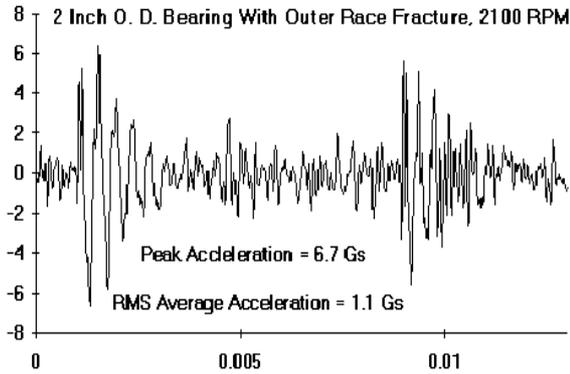


Figura 1. Ejemplo de vibración de cojinete con fractura del aro exterior.

2. Frecuencias características de fallo en los componentes del cojinete.

Las frecuencias indicadoras de deterioro de cojinete se determinan a partir de reglas ya establecidas. Por ejemplo, si se establece que un 60 % de las piezas rodantes pasarán por un punto dado del aro interior del cojinete para cada revolución del eje, y se supone un cojinete de 12 piezas rodantes, entonces pasarán $60 \times 12 / 100 = 7,2$ elementos rodantes por un punto del aro interior por revolución del eje. Multiplicando este valor por la frecuencia de giro del eje, se obtiene la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un punto del aro interior (*BPFO*).

Las frecuencias fundamentales de deterioro de un cojinete son [3, 4]:

BPFO: Frecuencia del aro exterior del cojinete

BPMI: Frecuencia del aro interior del cojinete

BSF: Frecuencia de elementos rodantes

FTF: Frecuencia fundamental del tambor

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$BPMI = \frac{Nb}{2} f_r \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos \alpha \right) \quad (2)$$

$$BPFO = \frac{Nb}{2} f_r \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \alpha \right) \quad (3)$$

$$BSF = \frac{Pd}{2Bd} f_r \left(1 - \frac{Bd^2}{Pd^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (4)$$

Las fórmulas para el cálculo de estas frecuencias son función de los 5 parámetros siguientes:

Bd : Diámetro de elementos rodantes
Pd : Diámetro medio
Nb : Número de elementos rodantes
 α : Ángulo de contacto
 f_r : Frecuencia de rotación del eje en Hz

Por otro lado hay que mencionar que un cojinete es usualmente el único punto de contacto entre los componentes rotatorios y los estáticos de una máquina, y como tal, está visto como punto importante de transmisión natural de vibración. Las vibraciones pueden ser generadas por algún otro componente, forzadas por desequilibrios, producidas por mezclas de engranajes, etc., las cuales son combinadas y transmitidas a través de toda la estructura estática, llegan al tambor de los cojinetes y producen allí una vibración que puede solapar la propia de los cojinetes y que puede conducir a diagnósticos erróneos [5].

3. Técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones utilizadas.

Densidad Espectral de Potencia

Por mucho, la técnica más importante para el diagnóstico de procesos y de la condición de las máquinas es la espectral. La idea consiste en detectar una cantidad de componentes espectrales asociadas de manera determinada con armónicos de frecuencias específicas. Esta técnica tiene las ventajas de estar asociada de manera natural con la característica rotatoria de la maquinaria, ofrece robustez frente al ruido y otras fuentes de distorsión, y se puede implementar a través de un procedimiento muy sencillo y rápido.

La densidad espectral de potencia (DEP) se relaciona con la potencia normalizada de una señal y su descripción en el dominio de la frecuencia [6].

Para una señal determinística de potencia, la DEP es

$$DEP_w(f) \square \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|W_T(f)|^2}{T}, \quad (5)$$

Donde $W_T(f)$ constituye la transformada de Fourier de $w_T(t)$, versión truncada en el tiempo de la señal

$$w_T(t) = \begin{cases} w(t), & -T/2 < t < T/2 \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} = w(t) \Pi\left(\frac{t}{T}\right)$$

Donde:

$$\Pi\left(\frac{t}{T}\right) \square \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases} \quad \text{se refiere a un pulso}$$

rectangular.

La estimación de la DEP_w dada en (5) se conoce como periodograma. La figura 2 muestra el periodograma de una señal que simula la vibración producida por un cojinete de rodamientos con un fallo local, en la que una señal armónica (de 100 Hz) es repetida cada 1 segundo (ver figura 3).

4. Análisis cepstral.

El espectro de la vibración generada cuando existe un fallo local en un cojinete de rodamientos se muestra

como líneas espectrales espaciadas a la frecuencia característica del fallo.

En ocasiones resulta muy difícil distinguir y evaluar tal espaciamiento de líneas en el dominio de la frecuencia a través del análisis espectral, debido tanto por una no adecuada resolución, o la presencia de un considerable nivel de ruido. Bajo estas condiciones, se hace conveniente combinar el análisis espectral con otras técnicas, como se efectúa al aplicar el análisis cepstral. Se pueden encontrar varias formas de cepstro, sin embargo, todas parten de considerarlo como el espectro del logaritmo del espectro [7]:

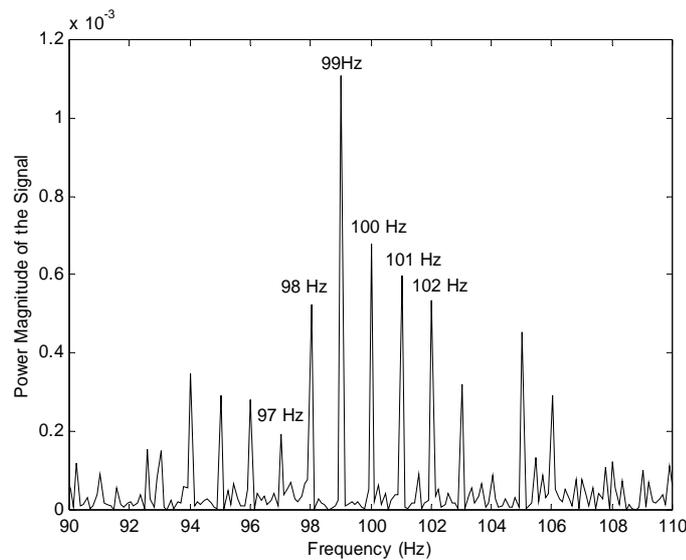


Figura 2. Periodograma de señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

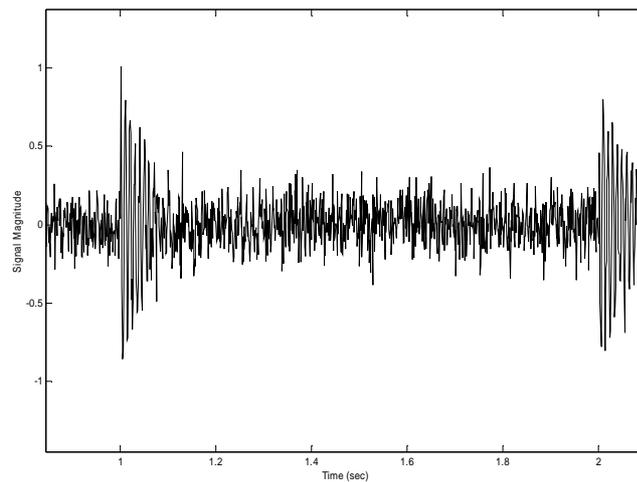


Figura 3. Señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamiento.

$$C(\tau) = FFT \left(\log |W_T(f)| \right) \quad (6)$$

Donde $W_T(f)$ está definida en la Sección 3, el valor absoluto de $C(\tau)$ se conoce como gamnitud y a τ se le denomina quefrecuencia.

Por tanto, se puede decir que el cepstrum es útil para interpretar la estructura del espectro y detectar "periodicidad" en el mismo, donde la quefrecuencia se referiría al período de la señal modulada. El cepstro de la señal de vibración simulada establecida en la sección 3.1 se muestra en la figura 4, donde se puede observar la serie de líneas cepstrales espaciadas a 1 segundo, indicando que el espectro presenta líneas separadas a 1 Hz.

5. Análisis de envolvente.

La detección de envolvente es un método que intensifica las componentes repetitivas de una señal dinámica para proporcionar un pronóstico preciso de la condición de la maquinaria. Las aplicaciones más comunes de esta técnica se pueden encontrar en el diagnóstico de cojinetes de rodamientos y engranajes [8]. Para su implementación, primeramente se eliminan, a través del filtrado, las componentes de baja frecuencia relacionadas con las velocidades de giro de la

maquinaria. Por el contrario, las componentes de alta frecuencia son intensificadas y espectralmente trasladadas a la banda de bajas frecuencias (demoduladas en amplitud), logrando una reducción del nivel de ruido (ver figura 5).

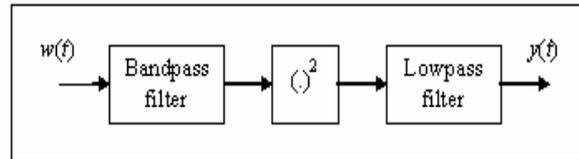


Figura 5. Diagrama del procedimiento de detección de la envolvente.

Si al aplicar la técnica se obtienen componentes espectrales relacionadas directamente con alguna frecuencia característica de fallo de un cojinete de rodamientos, esto indicará que el fallo correspondiente existe. La figura 6 muestra el espectro de la envolvente de la señal de vibración simulada, establecida en la sección 3. En este caso, se pueden distinguir una componente espectral a la frecuencia característica de fallo (1 Hz) y a armónicos de esta.

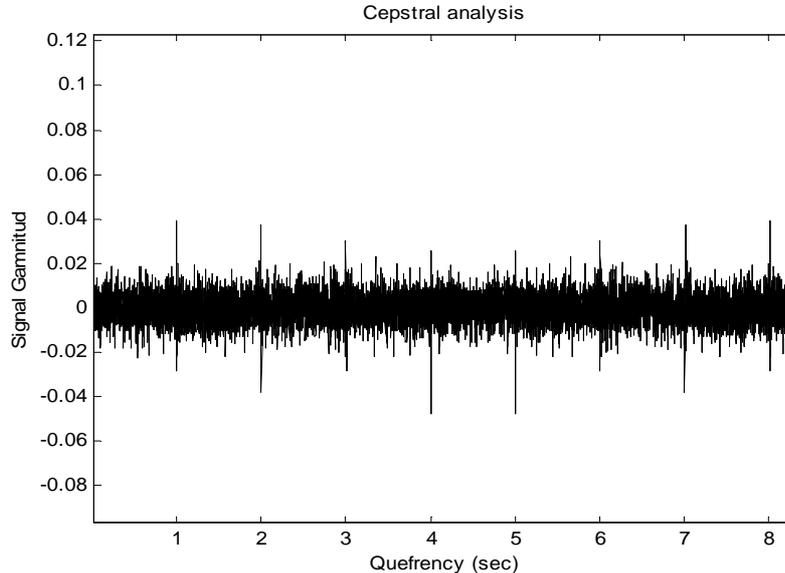


Figura 4. Cepstro de la señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

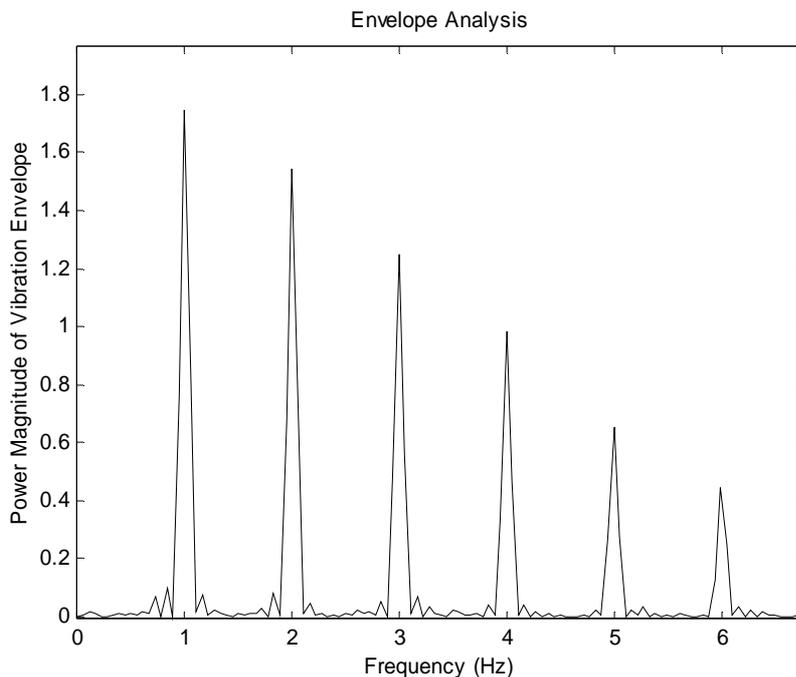


Figura 6. Espectro de la envolvente de la señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

6. Análisis de tiempo-frecuencia.

Cuando existen fallos locales en cojinetes de rodamientos, las vibraciones producidas representan a los procesos físicos que se generan, los cuales presentan características de no estacionaridad. Los procesos no estacionarios son muy difíciles de estudiar a través de la técnica clásica de Fourier [9], lo cual se debe a que esta técnica presenta resolución en frecuencia, pero no en el tiempo. En este caso, el análisis de estimados de la densidad espectral de potencia (o el espectro), tomados en cortos intervalos de tiempo constituiría una solución más conveniente [10]; entonces, se está haciendo referencia a la llamada transformada de Fourier de corto tiempo, dada por la siguiente expresión:

$$STFT(\tau, f) = FFT_{t \rightarrow f}(v_T(t - \tau)w(t)) \quad (7)$$

Donde:

$v_T(t)$ es una función de ventana, de tamaño T y centrada en 0.

El resultado de la aplicación de esta técnica al análisis de la señal de vibración simulada, se puede observar en la figura 7. En este caso, se puede observar la aparición

de concentraciones de energía espectral a 100 Hz cada 1 segundo.

7. Análisis espectral de orden superior.

Como ya se planteó, cuando la vibración que genera una maquinaria está determinada por procesos no lineales, su análisis es muy complejo. Las técnicas de análisis espectral de orden superior, desarrolladas recientemente, permiten detectar interacciones no lineales de componentes espectrales [11]. Por su parte, el proceso de modulación de la vibración producida cuando existe un fallo local en un cojinete de rodamientos puede ser descrito como la generación de componentes espectrales relacionadas en fase, característica que no puede ser detectada a través de la densidad espectral de potencia, a diferencia del análisis espectral de orden superior. El biespectro constituye una técnica de procesamiento estadístico de tercer orden, capaz de detectar acoplamientos cuadráticos de fase entre componentes espectrales [12].

El biespectro de $x(t)$ se define como:

$$B(f_1, f_2) = E\{W_T(f_1)W_T(f_2)W_T^*(f_1 + f_2)\} \quad (8)$$

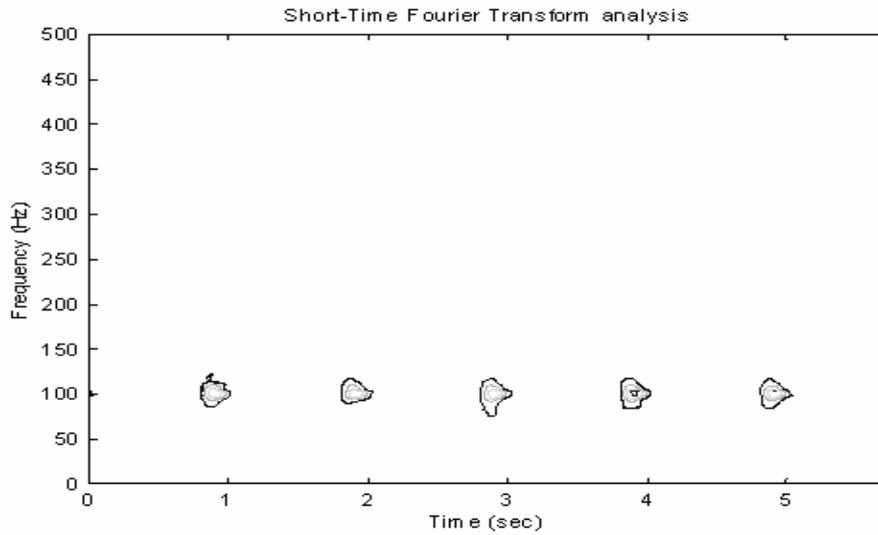


Figura 7. Análisis de tiempo-frecuencia de la señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

en la que se muestra cómo se mide la dependencia estadística existente entre tres componentes espectrales. Si las tres componentes se encuentran acopladas de manera no lineal, el promedio estadístico, denotado por el operador de valor esperado $E\{\cdot\}$, tiende a un valor distinto de cero, aún cuando cada componente individual sea aleatoria.

El contorno del módulo del biespectro de la señal de vibración simulada, establecida en la sección 3, se muestra en la figura 8, en la que se pueden observar biespectral puntos espaciados a 1 Hz por cada eje de frecuencia.

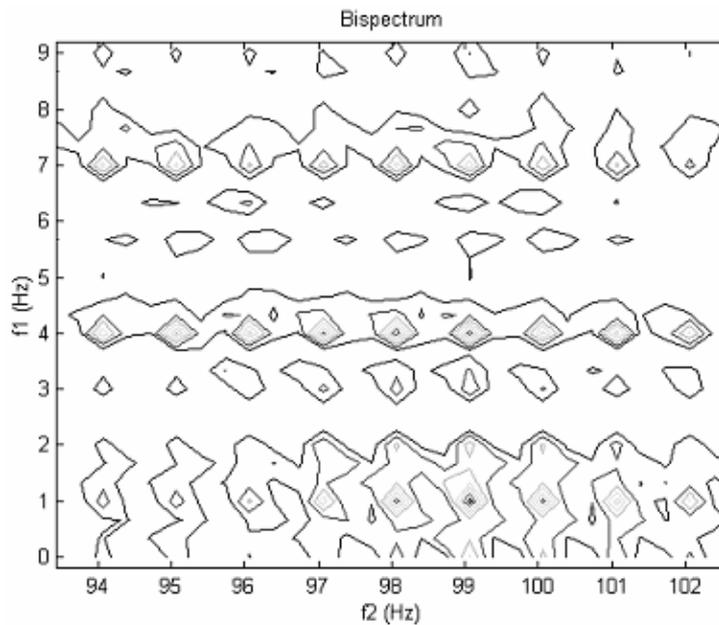


Figura 8. Contorno del módulo del bispectro de la señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

8. Análisis cicloestacionario.

Esta técnica de análisis de señal está dirigida a mejorar la efectividad del proceso de extracción de información de una serie de datos (por ejemplo, una señal contaminada por ruido) y es conveniente para caracterizar diferentes tipos de modulaciones. Del mismo modo que las técnicas de procesamiento estadístico de orden superior, el análisis cicloestacionario proporciona un estimado del acoplamiento de fase entre componentes espectrales [13]. En el marco cicloestacionario, para detectar la relación de fase entre componentes de diferentes frecuencias, se estima el parámetro conocido como Función de Densidad Espectral de Correlación (SCDF):

$$S^{\alpha}(f) = E \left\{ W_T(f - \alpha/2) W_T^*(f + \alpha/2) \right\} \quad (9)$$

Donde se expresa la magnitud de la relación entre dos componentes espectrales centradas en f y separadas en α (conocida como frecuencia cíclica). En la figura 9 se muestra el contorno bifrecuencial del módulo de la SCDF estimada para la señal de vibración simulada, descrita en la sección 3, en el que se pueden apreciar componentes a valores de frecuencia cíclica igual a la frecuencia característica de fallo (1 Hz) y armónicos de esta.

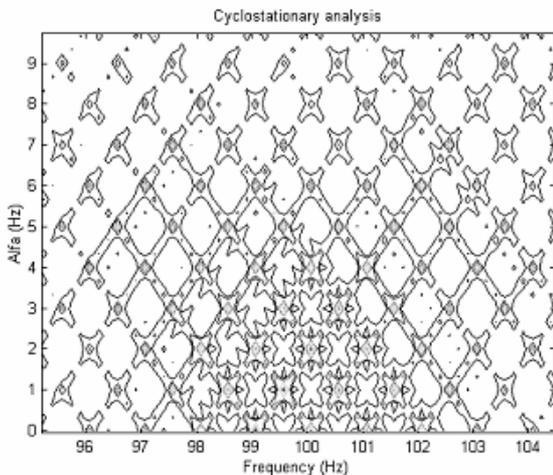


Figura 9. Contorno del módulo de la SCDF de la señal que simula la vibración producida por la existencia de un fallo local en un cojinete de rodamientos.

9. Maqueta mecánica experimental.

Con el objetivo de aplicar las técnicas expuestas en la sección 3 al análisis de vibraciones reales de cojinetes

de rodamientos con un fallo local, se diseñó y construyó una maqueta mecánica. Esta incluye un motor de AC que maneja un eje, soportado sobre dos cojinetes de rodamientos, que transmite movimiento a otro eje a través de poleas y correa (ver figura 10). El motor tiene una frecuencia de rotación de 21 Hz y el segundo eje rota a 25 Hz.

Los cojinetes de rodamientos utilizados son del tipo SKF 6205, caracterizado por los siguientes parámetros:

N : 13 bolas

Bd : 39 mm

Cd : 7.5 mm

$\cos \alpha$: 1

Las vibraciones fueron medidas a través de un acelerómetro piezoeléctrico, fijado en la chumacera de uno de los cojinetes de rodamientos que soporta el eje 1 (dirección horizontal de la vibración), al cual se le imprimió un defecto local en su aro exterior. Luego, siendo la frecuencia de rotación del eje 1 igual a 21 Hz, la frecuencia característica de fallo, $BPFO$, sería de 110 Hz (ver expresión (3)). El acelerómetro es del tipo 4371 de Brüel & Kjær, cuya señal se acondicionó empleando un amplificador de carga tipo 2635 de Brüel & Kjær, y la señal resultante se digitalizó (a una frecuencia de muestreo de 25 kHz) y transmitió hacia una computadora personal empleando un sistema de adquisición de datos ADSP 21061 SHARC. La computadora (utilizada para el análisis de la señal de vibración) se corresponde con los estándares de oficina, sin requerimientos especiales en cuanto a capacidad de memoria y disco.

10. Resultados.

En esta sección se aplicarán los algoritmos tratados en la sección 3 de manera teórica, pero en un marco práctico, es decir, aplicados al análisis de una señal real de vibración. La señal de vibración que se procesará y que ha sido obtenida de la generación de un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos de la maqueta experimental mecánica ($BPFO = 110$ Hz), se puede observar en la figura 11.

En la figura 12 se pueden observar componentes espectrales espaciadas a una frecuencia aproximada de 110 Hz, las cuales han aparecido por el fenómeno de modulación lineal dado en la señal de vibración por la presencia del fallo local en el cojinete de rodamientos.

Los resultados de la aplicación del análisis cepstral se pueden observar en la figura 13.

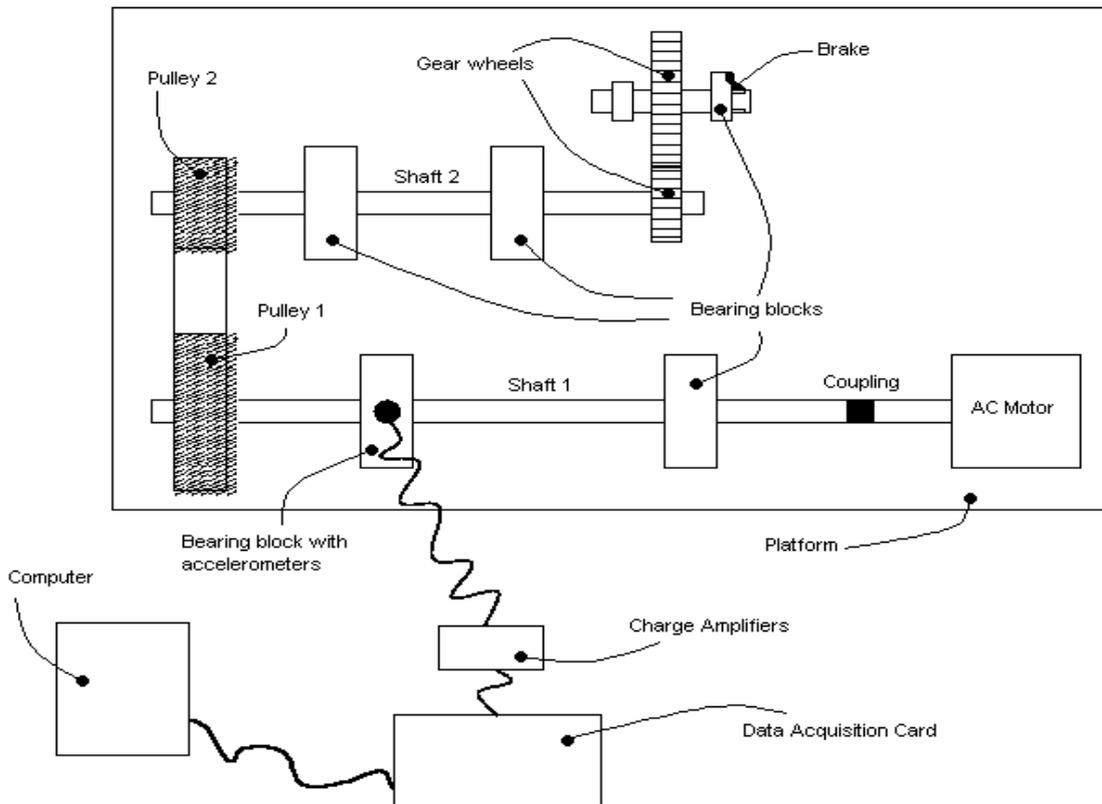


Figura 10. Maqueta experimental mecánica.

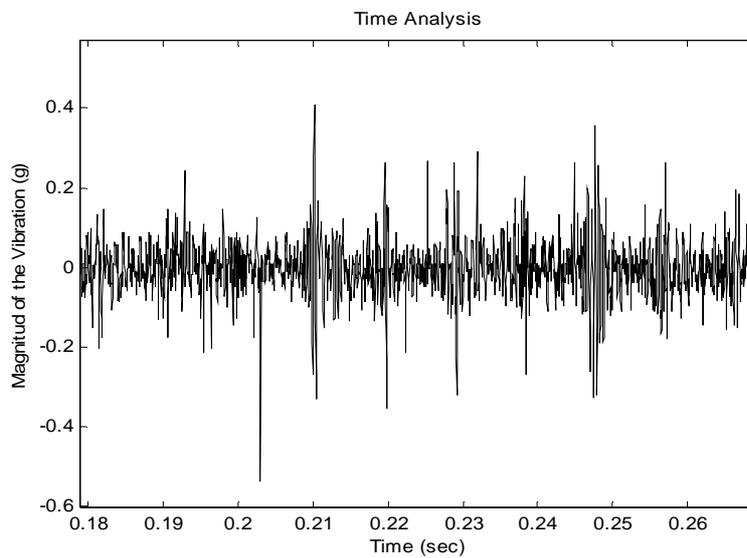


Figura 11. Señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

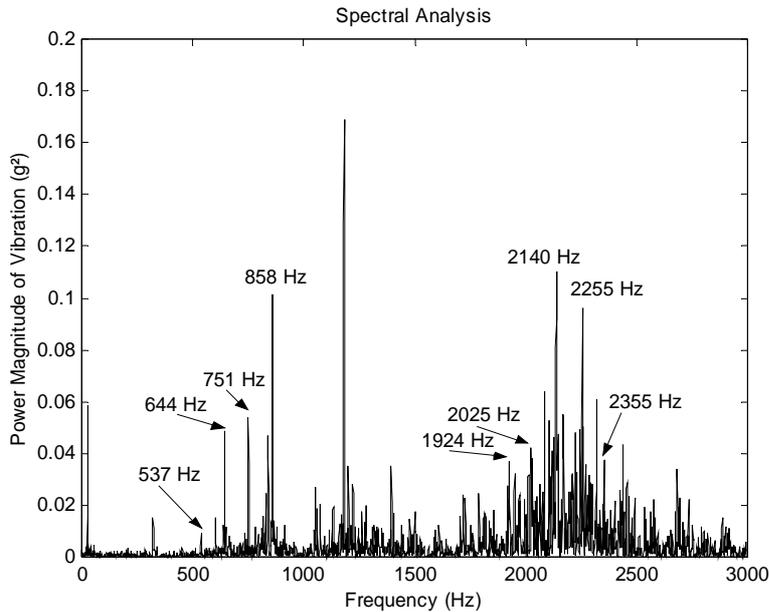


Figura 12. PSD de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

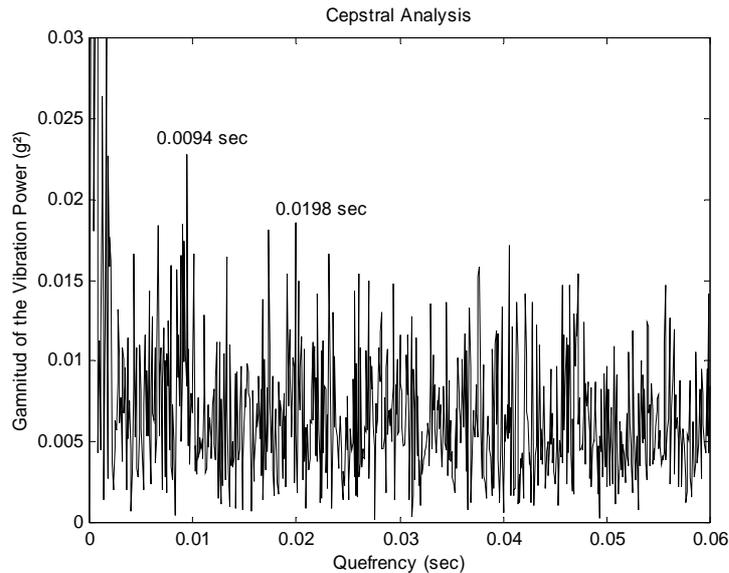


Figura 13. Cepstro de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

El cepstro de la señal real de vibración muestra a un valor de quefrecuencia de 9.4 ms y múltiplos de esta, líneas apreciables, lo cual indica la presencia de modulación. El inverso de 9.4 ms es precisamente 110 Hz, la frecuencia característica del fallo en el cojinete de rodamientos, por lo que se ha detectado este fallo a través del análisis cepstral.

Si se aplica el análisis de envolvente (ver figura 14), se apreciarán líneas espectrales a frecuencias cercanas a la frecuencia característica de fallo, y armónicos de esta, lo cual indica que el fallo correspondiente existe.

La aplicación del procesamiento de tiempo-frecuencia también refleja la presencia del proceso de modulación al mostrar los pulsos periódicos de envolvente modulando la amplitud de las frecuencias de resonancia. (ver figura 15). El patrón de tiempo-frecuencia resultante muestra que el espacio entre pulsos sucesivos es aproximadamente siempre el mismo y de 9.0 ms (su inverso es 111 Hz, valor muy cercano al de la frecuencia característica de fallo del cojinete de rodamientos defectuoso), lo cual indicaría la presencia del fallo.

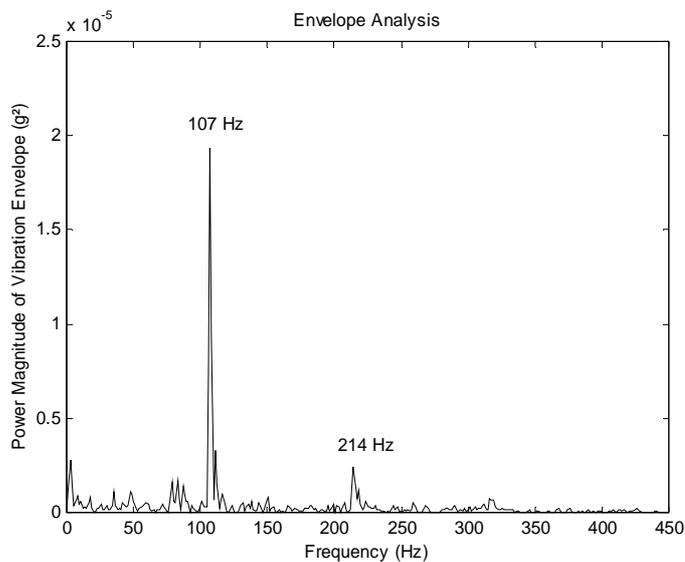


Figura 14. Análisis espectral de la envolvente de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

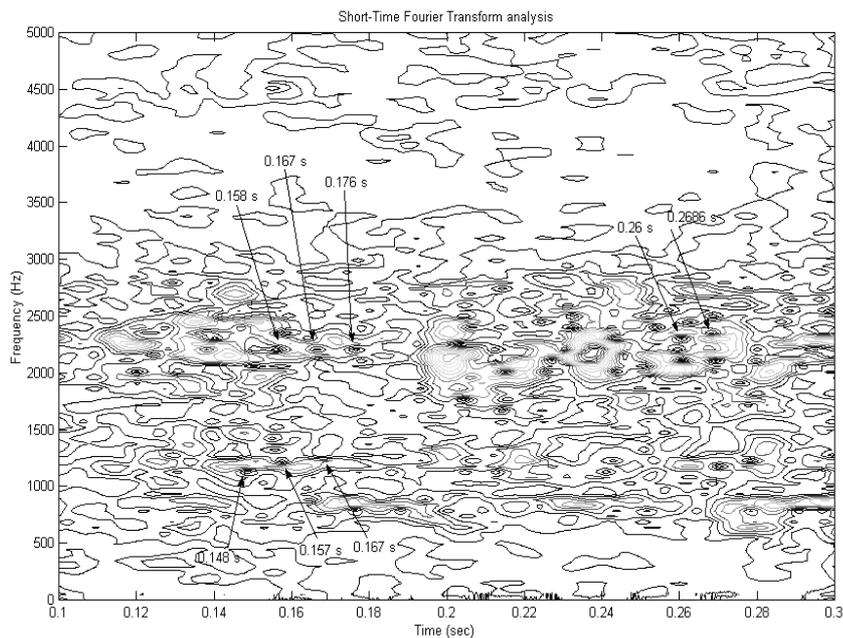


Figura 15. Análisis de tiempo-frecuencia de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

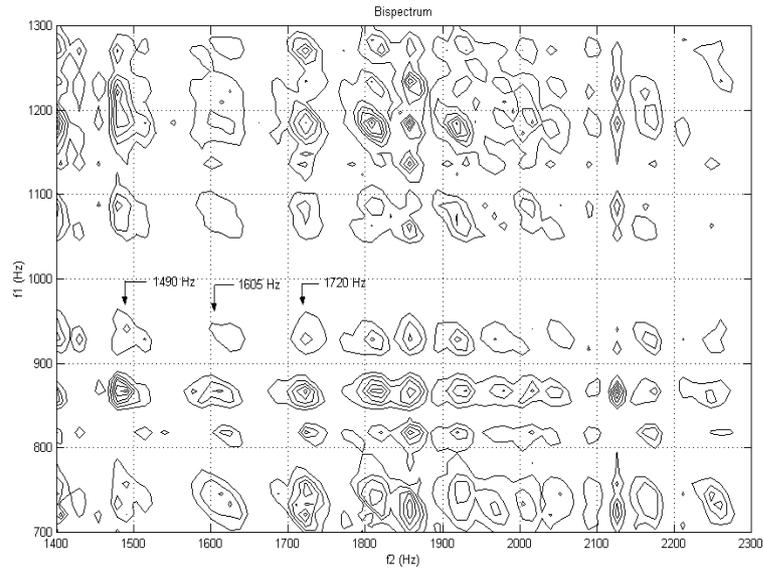


Figura 16. Contorno del módulo del bispectro de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

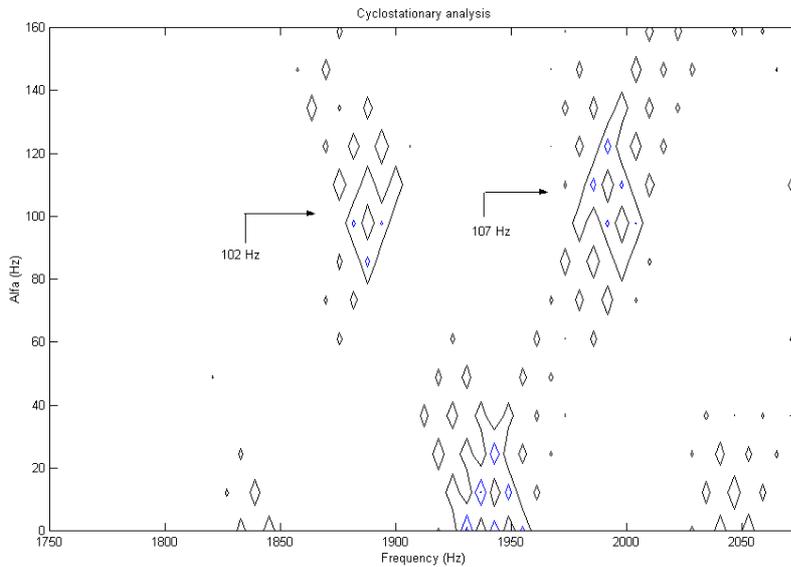


Figura 16. Contorno del módulo de la SCDF de la señal real de vibración correspondiente a un fallo local en el aro exterior de un cojinete de rodamientos.

La otra técnica aplicada al análisis de vibraciones es el bispectro, y el correspondiente al de la señal real de vibración se puede apreciar en la figura 16.

En la figura 16 se pueden observar componentes bispectrales separadas a frecuencias muy cercanas a 110 Hz, lo cual indica la presencia del fallo específico en el cojinete de rodamientos.

Finalmente, el resultado de aplicar el procesamiento cicloestacionario a la señal real de vibración se puede observar en la figura 17, en la que se han hecho visibles componentes cíclicas a frecuencia cíclica α de 110 Hz, la frecuencia característica de fallo.

11. Bibliografía.

- [1] PREDYCSA, Curso avanzado de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones. 16 – 17 Junio de 1999. 73 – 100, 117 - 120.
- [2] WILCOK, D. F., Bearing Design and Application. McGraw-Hill, New York, 1957.
- [3] S.BRAUN, B.DATNER, Analysis of roller/ball bearing vibrations. Journal of Mechanical Design, 101, January 1979, 118-125.
- [4] N.TANDON, B.C.NAKRA, Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings. A review, The Shock and Vibration Digest, Vol. 24, No. 3, 1992, 3-11.
- [5] D. DYER, Y R. M. STEWART, Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. Journal of Mechanical Design, 100, April 1978, 229 – 235.
- [6] L.W.COUCH, Digital and Analog Communication Systems. 5th Edition. Prentice Hall. NJ 07458. 1997.
- [7] R.B.RANDALL, J.HEE, Bruel & Kjaer Technical Review. Cepstrum Analysis 3 (1981) 3-40.
- [8] SKF Application Note. "What Are Enveloping and SEE?" SKF Condition Monitoring, Inc. 1995; <http://www.skfcm.com/news/appnotes/cm3014.pdf>.
- [9] H.OEHLMANN, D.BRIE, M.TOMCZAK, A.RICHARD, A Method for Analysing Gearbox Faults using Time-Frequency Representations. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, No. 4, 1997, 529-545.
- [10] M.C.PAN, P.SAS, Transient analysis on machinery condition monitoring. Proceedings of 3rd International Conference on Signal Processing 2 (1996), 1723-1726.
- [11] I.M.HOWARD, Higher-order spectral techniques for machine vibration condition monitoring. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 211 Part G (1997) 211-219.
- [12] L.BOUILLAUT, M.SIDAHMED, Comparison of the cyclostationary and bilinear approaches: theoretical aspects and applications to industrial signals. 10th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor PA, USA, 2000, 702-706.
- [13] A.C.MCCORMICK, A.K.NANDI, Cyclostationarity in rotating machine vibrations. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12, No. 2, 1998, 225-242.

Application of classic and advanced techniques of prosecution of bearings vibrations diagnosis. Experimental analysis.

Abstract.

This work relates the application of several signal processing techniques on rotating machine condition diagnosis, specifically, roller-ball bearings. These methods can be extended to the diagnosis of other machine components.

Classical and advanced techniques are characterized and applied on the detection of localized bearing failures (in this work, outer raceway crack), in particular, spectral, cepstral, envelope, time-frequency, bispectral and cyclostationary analysis. These methods were applied on simulation and experimental signals processing.

Keywords: signal processing techniques, vibration analysis, failure frequency of rolling bearings.