

# Análisis de vibraciones para el diagnóstico aplicando procesamiento estadístico de orden superior.

**F. E. Hernández Montero\***, **E. Palomino Marín\*\***, **V. Atxa Uribe\*\*\***, **M. Luis Ruiz Barrios\***.

\*Universidad de Pinar del Río. Martí 270, Pinar del Río.

Tel: +53 82 755 453, Fax: +53 82 779 353. E-mail: fidel@tele.upr.edu.cu

\*\*Facultad de Ingeniería Mecánica. CEIM.

Instituto Superior politécnico "José Antonio Echeverría" Ciudad Habana. Cuba.

\*\*\*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 21 de enero del 2004; aceptado el 12 de marzo del 2004)

## Resumen.

El siguiente trabajo tiene la finalidad de aplicar algunas de las generalidades que involucra el procesamiento estadístico de orden superior al monitoreo del estado de las máquinas rotatorias, a partir del sensado de las vibraciones que esta genera. Básicamente se trabajó en la detección del desequilibrio presente, así como en la estimación de la magnitud del mismo. Como elementos estadísticos que se procesaron figuran los momentos y cumulantes de orden superior (hasta orden cuarto) de las vibraciones medidas tanto en el eje horizontal, como el vertical.

Finalmente, se constató como resultado, la efectividad de tal método para detectar un fallo específico, en este caso, el desequilibrio y que podría ser extendido para otros tipos de fallos.

**Palabras claves:** Análisis de vibraciones, procesamiento estadístico de orden superior, diagnóstico de maquinarias rotatorias.

## 1. Introducción.

Las estrategias de mantenimiento de maquinarias basadas en el monitoreo de la condición de las mismas proporcionan significativas ventajas económicas y de seguridad. Las otras dos posibles estrategias a seguir en dicho mantenimiento son:

- 1- El mantenimiento periódico, en el que se sustituyen los componentes con una frecuencia tal que se hace casi despreciable la probabilidad de ocurrencia de fallos.
- 2- El reemplazo de los componentes una vez producido el desperfecto.

El mantenimiento periódico puede constituir un despilfarro si se realiza de forma más frecuente de lo necesario la sustitución de componentes en buen estado. El mantenimiento basado en los fallos, sólo puede ser empleado cuando el desperfecto impredecible no conlleva implicaciones económicas y de seguridad significativas.

En muchos sistemas industriales, el coste de los componentes es alto, por lo que se podría generar ahorros significativos si se reduce, de una manera segura, la frecuencia de las sustituciones. Por otro lado, el costo no planificado de retiros de componentes por

mal funcionamiento, puede ser muy alto también. Luego, si a los componentes se les dará empleo un tiempo mayor que su tiempo de vida útil predicho, se requeriría una precisa medición de su condición, haciendo un pronóstico de los posibles fallos y llevando a cabo labores para evitarlos.

A pesar de que ejecutar la estrategia de mantenimiento basada en la condición de la maquinaria proporciona ahorros significativos, esta es dependiente por entero de la información precisa que se tenga acerca de la condición de la máquina y los cambios que aparezcan en la condición de una máquina genera una gran variedad de efectos en el ambiente. Por ejemplo, las vibraciones de la maquinaria pueden cambiar debido al desarrollo de muchos fallos; la rotura del material puede generar emisiones acústicas de alta frecuencia; los fallos en máquinas eléctricas pueden afectar los campos magnéticos vecinos, los cuales pueden ser monitoreados.

Las vibraciones se producen por una variedad de efectos que incluyen la fricción de partes móviles, pequeños desbalances en los componentes de rotatorios y frecuencias de resonancia de los componentes. El daño y desgaste de los componentes puede afectar

cualquiera de los efectos antes mencionados, y por ende, cambiar la naturaleza de las vibraciones. Por tanto, el problema de identificar la correcta condición de la máquina se restringe sólo a aislar el cambio en la señal, de la vibración de fondo.

Toda vez que la señal medida a partir de acelerómetros se encuentra cambiando constantemente, una muestra simple y aislada no proporciona información útil. Para obtener un indicador de la condición de la máquina se necesita transformar una cantidad alta de muestras de la señal de vibración para obtener rasgos invariantes en el tiempo. La magnitud en la cual un rasgo individual puede proporcionar información útil, depende de la señal que se está analizando y, por tanto, de la maquinaria y del tipo de fallo que esta presenta.

Al mismo tiempo, cuando se sensa la señal de vibración, la señal medida presenta componentes de ruido circuital interferente y de diversas fuentes de vibración que incluso pueden pertenecer a máquinas encontradas cercanamente. Es común considerar, para el ruido, que el mismo sea gaussiano, con estadísticos de segundo orden. Si la magnitud de la vibración recibida es muy baja, el ruido estará superpuesto sobre la señal útil a analizar, solapándola; luego, la aplicación de técnicas ya clásicas tales como el análisis espectral, cepstral [1-3] o de envolvente [4], pudieran generar falsos diagnósticos.

El análisis estadístico de orden superior constituye una técnica que permite procesar señales inmersas en ruido [5-7].

Es precisamente la obtención de rasgos invariantes en el tiempo de la señal sensada aplicando métodos estadísticos de orden superior el objetivo de este trabajo.

Siguiendo la tendencia de tales rasgos, será posible predecir futuros fallos. Podría ser necesario llevar a

cabo el mantenimiento una vez que tal característica rebasa un umbral entre una condición u otra.

El establecer un umbral apropiado hace que un rasgo simple pueda emplearse para discriminar entre dos condiciones diferentes de la máquina. Cuando exista una gran variedad de condiciones y rasgos, pueden usarse técnicas más avanzadas de análisis de discriminantes, dependiendo de la distribución de los rasgos por cada condición.

## 2. Vibración generada debido a la presencia de desequilibrio.

Al rotar el eje con un desequilibrio presente, se genera un movimiento que sigue una órbita elíptica. Esta órbita puede ser medida a través de las vibraciones de los acelerómetros, las cuales son proporcionales a este movimiento. El ploteo de las vibraciones en el tiempo muestra el camino de la órbita. Una inspección experta de esta órbita puede proporcionar una información de diagnóstico muy útil. La figura 1 muestra las órbitas de ploteo para (a) la condición de operación normal y (b) para la condición de desequilibrio.

Una técnica clásica para detectar el desequilibrio lo constituye el análisis espectral. Este procesamiento visualiza las componentes periódicas de la señal bajo análisis, y para el caso en que exista desequilibrio, se observará una componente a la frecuencia de giro del eje desbalanceado, así como a armónicos de esta.

No obstante, se puede decir que cuando el nivel de ruido presente es de una magnitud apreciable, o la magnitud del desequilibrio es muy baja, por lo que puede ser superpuesta por el ruido presente, entonces estos métodos, no son eficientes, conduciendo a resultados no esperados.

Una alternativa estaría en la aplicación del procesamiento estadístico de orden superior.

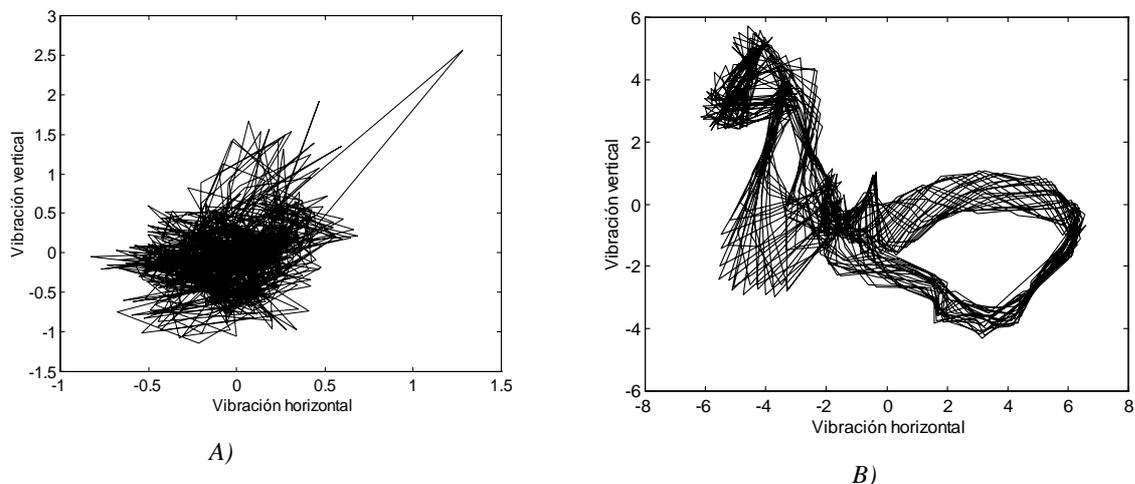


Figura 1. Ploteos de la órbita de un eje (a) en condición normal de operación y (b) con desequilibrio presente.

### 3. Revisión de los fundamentos estadísticos de orden superior aplicados en la investigación.

Los rasgos descritos en este epígrafe se nombran estadísticos porque se basan solamente en la distribución de muestras de vibración tratando a las series de tiempo como si fueran una variable aleatoria. Estos rasgos se basan en los momentos y cumulantes, por lo que se mostrarán los métodos de estimación de los mismos y sus relaciones [8-10].

Los momentos de una señal se pueden definir como:

$$m_n = E\{x^n\},$$

donde  $E\{\cdot\}$  es el valor esperado y puede ser estimado (asumiendo que la señal es estacionaria y ergódica) empleando

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^n$$

Los momentos de la señal se relacionan con su función de densidad probabilística ( $p(x)$ ) a través de la función generadora de momento:

$$\phi(s) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x)e^{sx} dx$$

El momento n-ésimo de la señal se puede obtener evaluando la derivada n-ésima de  $\phi(s)$  para  $s = 0$ :

$$m_n = \frac{d^n \phi(s)}{ds^n} \Big|_{s=0}$$

La segunda función característica es el logaritmo de la función generadora de momento. Los cumulantes se obtienen evaluando las derivadas de la función para:

$$c_n = \frac{d^n \ln(\phi(s))}{ds^n} \Big|_{s=0}$$

Los cuatro primeros cumulantes pueden calcularse a partir de los cuatro primeros momentos a través de las siguientes relaciones:

$$c_1 = m_1$$

$$c_2 = m_2 - m_1^2$$

$$c_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3$$

$$c_4 = m_4 - 3m_2^2 - 4m_3m_1 + 12m_2m_1^2 - 6m_1^4$$

Adicionalmente los cumulantes presentan una serie de útiles propiedades que los hacen más preferidos que los momentos. En primer lugar, los cumulantes de orden superior de una variable aleatoria gaussiana, son cero. En segundo lugar, los cumulantes de una suma de dos variables aleatorias se convierte en la suma de los cumulantes de cada variable aleatoria. Luego, si se le adiciona una señal gaussiana a una no gaussiana, los cumulantes de orden superior resultantes serán los cumulantes de la señal no gaussiana.

### 4. Materiales y métodos.

Los datos de procesamiento de vibraciones se obtuvieron a partir de una pequeña maqueta que permitía la simulación del fallo a considerar, que en este caso es el desequilibrio. Esta pequeña maqueta contenía un eje rotatorio con un volante manejado por un motor eléctrico. Se probó con masas diferentes colocadas al volante para generar desbalances. Las vibraciones fueron medidas a partir de dos acelerómetros colocados en las direcciones horizontal y vertical en el bloque de rodamientos. Un diagrama de esta máquina se muestra en la figura 2.

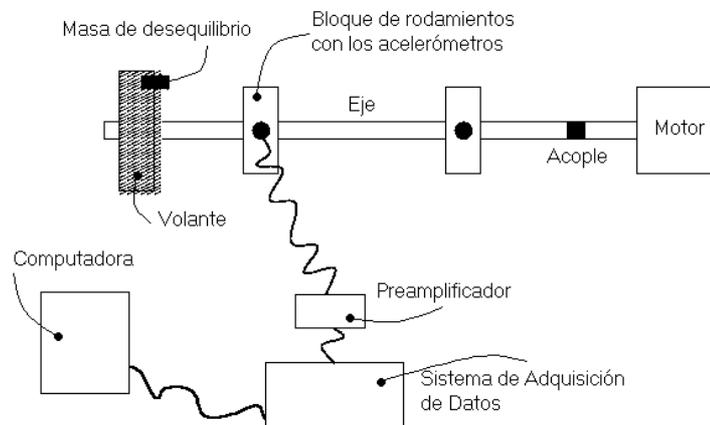


Figura 2. Diagrama de la maqueta de pruebas.

Un acelerómetro tipo 4371 de B&K se utilizó como transductor, así como un amplificador de carga tipo 2635 del mismo fabricante para acondicionar la señal adquirida. Para digitalizar la señal de vibración se utilizó una tarjeta EZKIT – LITE de Analog Devices, la cual además transmitía los datos a través del puerto serie hacia una computadora personal.

#### 4.1. Características estadísticas estimadas.

Para aplicar los elementos estadísticos de orden superior, los datos fueron muestreados a una frecuencia de 1 KHz, y se trabajó para una misma velocidad de 1500 rev/min, formando 50 grupos de 1024 muestras cada uno, para hacer un total de 51200 muestras para la vibración horizontal y 51200 muestras para la vertical. En este caso se determinaron los cumulantes hasta el cuarto orden, teniendo en cuenta los cumulantes propios y los cruzados (Ch, Cv, Chh, Cvv, Chv, Chhh, Cvvv, Chhv, Chvv, Chhhh, Cvvvv, Chhvv, Chhvv, Chvvv). Estos elementos se calcularon para la condición normal de operación y de desequilibrio pequeño. Además se trabajó para diferentes ganancias de los preamplificadores, lo que implicó simplemente trabajar con diferentes relaciones señal/ruido. Toda vez que se contará con 50 grupos de 1024 muestras, se determinarán los histogramas de los cumulantes calculados por grupo. También se calcularon los cumulantes de orden superior del vector de vibración, que no es más que el obtenido de la suma vectorial de los vectores de la vibración horizontal y la vertical.

#### 4.2. Prueba de gaussianidad.

Antes de estimar las características estadísticas y aplicar la teoría estadística explicada antes, fue necesario probar que el ruido en el que se encuentra inmersa la señal de vibración es gaussiano. Para ello se utilizó la función *gstat* de Matlab (Toolbox HOSA), la

cual da una idea de cuán gaussiana y lineal es una señal real. A esta función fue aplicada la señal del acelerómetro para el caso en que la máquina no estaba funcionando. Esta función de Matlab emplea términos probabilísticos por lo que existe riesgo de falsas conclusiones.

Para la señal de ruido procesada, la probabilidad de que sea gaussiana fue de 0.9721.

## 5. Resultados.

Los cumulantes procesados que mejor efectividad mostraron al aplicarlos en la detección de desequilibrio fueron los propios de orden cuarto de la vibración horizontal, Chhhh, así como los cruzados, de cuarto orden igualmente, Chhhv y Chhvv.

Si se realiza un ploteo de estos tres cumulantes, calculados en condición normal de operación, y para cuando el desequilibrio está presente (ver figura 3), se vería que se logra una buena clasificación en un espacio vectorial tridimensional. Para los casos que se ilustrarán, el símbolo “o” representa los rasgos obtenidos en condición normal de operación, y “+” representa las mismas características pero ahora cuando hay desequilibrio presente.

Al mismo tiempo, respecto a los cumulantes calculados a partir del vector de vibración, los mejores resultados se obtuvieron con los cumulantes de cuarto, tercer y segundo órdenes y en la figura 4 se muestra un ploteo de estas características invariantes en el tiempo.

Se puede plantear adicionalmente que en la medida en que evolucione el fallo, así se moverán en el espacio vectorial representado, los cumulantes procesados, por lo que este método posibilita estudiar la tendencia de dicho desperfecto y, al rebasar determinado umbral, llevar a cabo la reparación o sustitución del componente dañado

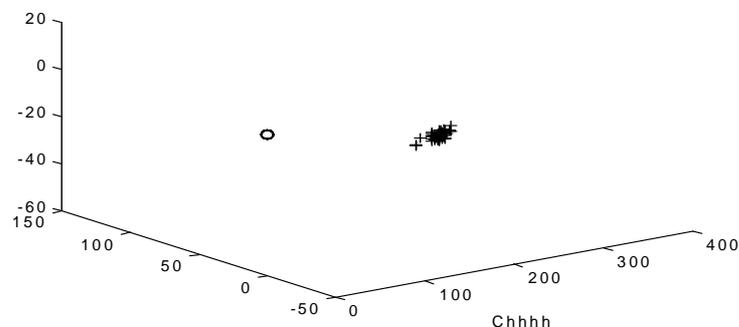


Figura 3. Ploteo de los cumulantes procesados que mejores resultados arrojaron (Chhhh, Chhhv, Chhvv)

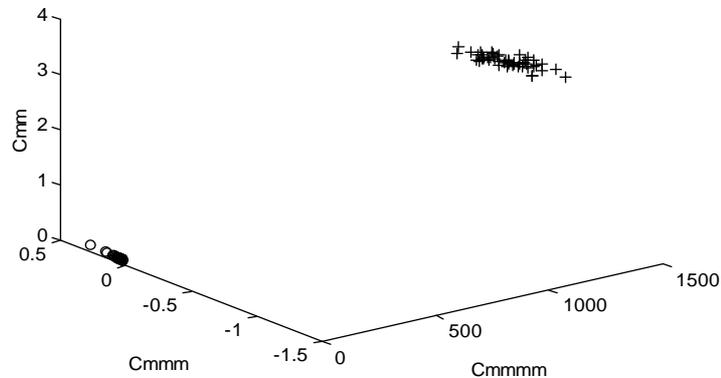


Figura 4. Ploteo de los cumulantes del vector de vibración que mejores resultados arrojaron (Cm, Cmm, Cmmm)

## 6. Conclusiones.

En principio se pudo comprobar la efectividad del método aplicado en la tarea de detección del fallo analizado.

Este método es más susceptible a ser empleado cuando la naturaleza del ruido operante es Gaussiana, o de lo contrario se necesitaría procesar los datos con una relación señal-ruido apreciable.

El cumulante que mejor resultado indujo en la aplicación dada se correspondió con el propio de la vibración horizontal.

Es importante tener en cuenta que otros fallos de naturaleza no gaussiana pudieran estar modificando los estimados estadísticos, y por ende, a pesar de estarse obteniendo una indicación de fallo debido a ese cambio, no se tendría una idea precisa de qué tipo de fallo ha aparecido.

Los problemas básicos surgidos con la implementación de este método fueron:

- 1- La necesidad de utilizar una cantidad elevada de muestras para efectuar la estimación de características estadísticas.
- 2- Si la naturaleza del ruido presente no es gaussiana, la estimación actual de los cumulantes se verá afectada.
- 3- Otros fallos pueden generar una vibración que afectaría igualmente los estimados.

Luego, una recomendación estaría en analizar la variación temporal y cíclica de las características estadísticas calculadas, para así, tener mayor información acerca de las vibraciones que aparecen en la señal del sensor.

## 7. Bibliografía.

1. J.S. Mitchell. An Introduction to Machinery Analysis and Monitoring. Tulsa: PennWell Books, 1993.

2. A.A. Alexandrov, A.V. Barkov, N.A. Barkova y V.A. Shafransky. Vibration and Vibrodiagnostics of Electrical Equipment in Ships. Sudostroenie (Shipbuilding), Leningrad. 1986.
3. A.V. Barkov. The Diagnostics and Condition Prediction of the Rolling Element Bearings by the Vibration Signal. Sudostroenie (Shipbuilding), No. 3, p. 21 – 23. 1985.
4. I. Iburguren. Monitorización de Máquinas Rotativas Utilizando Técnicas de DSP. Proyecto fin de carrera presentado para la obtención del título de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial. Universidad de Mondragón. España. Marzo del 2000.
5. A.C. McCormick. Cyclostationary and higher-order statistical signal processing algorithms for machine condition monitoring. A dissertation submitted to the signal processing division. Department of Electronic and Electrical Engineering and The Committee for Postgraduate Studies of The University of Strathclyde in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. September 1998.
6. I.M. Howard. Higher-order spectral techniques for machine vibration condition monitoring. Proc. Instn. Mech. Engrs., Part. G, 211 (1997), No. G00696, 211-219.
7. W.B. Collis, P.R. White y J.K. Hammond. Higher-Order Spectra: The Bispectrum And Trispectrum. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12 (1998), No. 3, 375- 394.
8. C.L. Nikias y J.M. Mendel. Signal processing with higher-order spectra. IEEE Signal Processing Mag., 10 – 38, July 1993.

9. A. Papoulis. Probability Random Variables and Stochastic Processes. Third Edition. McGraw-Hill International Editions. 1991.

10 A. Murray y J. Penman. Extracting Useful Higher-order Features for Condition Monitoring Using Artificial Neural Networks. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 45. (1997) No. 11.

---

## **Diagnosis by vibration analysis applying higher-order statistics signal processing.**

### **Abstract.**

The aim of this work is to apply higher-order statistics foundations on machine condition monitoring via vibration analysis. Specifically, shaft unbalance was the defect under study, and tasks for detection and magnitude estimation of this mechanical problem were accomplish. Higher-order (up to fourth-order) moments and cumulants of vertical and horizontal vibrations were estimated and analyzed.

It was probed the method effectiveness when it is applied on unbalance detection.

**Passwords: Vibration analysis, higher-order estatistics processing, rotating machine diagnosis.**