

# Técnicas de análisis de tendencias en mediciones espectrales y de nivel total de parámetros de diagnóstico

**L. Penabad Sanz, E. Palomino Marín, I. Pérez Mallea**

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE)

Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad Habana, Cuba.

Teléfono: 53 7-20 2267, Fax: 53 7-27 7129.

E-mail: [laksmi@mecanica.ispjae.edu.cu](mailto:laksmi@mecanica.ispjae.edu.cu)

(Recibido el 23 de septiembre de 1999, aceptado el 14 de enero del 2000)

## Resumen

En el presente artículo se muestra la implementación del análisis de tendencia, como tecnología predictiva, a través de la estadística matemática y su utilización en mediciones de parámetros de diagnóstico tanto espectral como de nivel total. El empleo de esta tecnología resulta de gran importancia debido a que permite pronosticar el momento de fallo, según el comportamiento de los niveles de los parámetros medidos, lo cual facilita la gestión del mantenimiento.

**Palabras claves:** mantenimiento, análisis de tendencia, medición espectral, medición de nivel total, pronóstico de fallo, vibraciones.

## 1. Introducción

Desde finales de los años 40 y principio de la década del 50, se han estado desarrollando trabajos en el campo de la investigación científica, encaminados a estudiar la evolución de los niveles de ciertos parámetros como las vibraciones en máquinas rotatorias de acuerdo con el tiempo de explotación de éstas y con la carga de trabajo de las mismas.

Desde esa época, los resultados más significativos apuntaban a la existencia de una correspondencia entre los niveles de estos parámetros y el tiempo de explotación de la máquina, de manera que los mayores niveles correspondían con las máquinas que exhibían un mayor tiempo de explotación. Sin embargo, en otros casos, donde el tiempo de explotación no era suficientemente alto como para que la máquina sufriera el deterioro propio de su explotación, se presentaban incrementos notables en estos niveles, por lo que fue necesario profundizar más en el comportamiento de la máquina.

Como resultado del estudio se obtuvo que cuando los niveles de estos parámetros técnicos aumentan más allá de ciertos valores durante la explotación de los equipos, normalmente la causa es un problema mecánico. Del mismo modo, a cada defecto mecánico se le puede

asociar un determinado comportamiento de dichos parámetros en particular. Esto se convirtió pues, en una de las premisas fundamentales del mantenimiento predictivo: conocer con profundidad la relación existente entre la causa y el defecto, ya que permite identificar el problema presente con un elevado grado de certidumbre, a partir de la medición y análisis de los niveles de los parámetros de diagnóstico.

El mantenimiento predictivo como forma de planificar y organizar el mantenimiento de una empresa (dentro de la estrategia de mantenimiento en general) en función de la evolución del comportamiento técnico de la maquinaria industrial, permite lograr un ahorro de recursos al planificar las interrupciones y necesidades de piezas de repuesto, teniendo en cuenta el estado de las máquinas y partiendo del conocimiento de la causa de los defectos, aprovechando al máximo la vida útil de sus elementos, además de una disminución de los volúmenes de trabajo.

Las tecnologías predictivas, definidas por los conocimientos necesarios para pronosticar el comportamiento mecánico de la maquinaria industrial, se nutren de las técnicas de diagnóstico, que consisten en un conjunto de procedimientos encaminados a identificar la causa del problema, basándose en la probada relación existente entre el estado técnico de una máquina y los niveles de uno o varios de los parámetros

de diagnóstico que ella genere. Entre las técnicas de diagnóstico más empleadas actualmente se encuentran:

1. **Diagnóstico por vibraciones:** Las vibraciones han sido a través de los años y de forma inconsciente, el método más utilizado para determinar si una máquina funciona normalmente o no, empleando el sentido auditivo o del tacto. Hoy en día se ha convertido en el fenómeno más representativo del estado técnico de una máquina. Su estudio permite detectar e identificar fallos en etapas tempranas de su desarrollo.
2. **Análisis de lubricantes:** Es empleado para determinar el grado de contaminación y de degradación de los lubricantes, con el objetivo de aprovecharlos al máximo. El estado de deterioro de los lubricantes no siempre es consecuencia de su uso, también es reflejo de otros defectos que pueden presentarse, por lo que su análisis es además utilizado en el diagnóstico de otros defectos.
3. **Diagnóstico por temperatura:** En la inmensa mayoría de los casos, la temperatura de diferentes puntos de las máquinas, en particular del alojamiento de los cojinetes de rodamientos o de las chumaceras, constituye un parámetro de diagnóstico de suma utilidad que puede ser empleado como parámetro síntoma o como parámetro de diagnóstico complementario. En este sentido el análisis termográfico es de las técnicas más actuales dentro del diagnóstico por temperatura y permite de una vez determinar los puntos mas calientes en un área determinada, sin tener que realizar tantas mediciones. Temperaturas superiores a ciertos valores predefinidos, no sólo son sintomáticas de problemas de fricción en los cojinetes, sino que también constituyen la causa de la pérdida de viscosidad de los lubricantes, con la consiguiente pérdida de la capacidad de trabajo del propio lubricante.
4. **Análisis de corriente y parámetros eléctricos:** La intensidad de corriente es el parámetro de diagnóstico de las máquinas eléctricas por excelencia. El cálculo de los espectros de corriente es básico para la determinación del estado técnico de las mismas.
5. **Análisis de tendencia:** Se basa en la medición sistemática de los parámetros síntomas tanto de carácter estático (nivel total) como dinámicos (espectros). Imprescindible para caracterizar el comportamiento de las instalaciones industriales y pronosticar el tiempo de operación segura hasta el fallo.

Del análisis de tendencias, que es el caso que nos ocupa, se tratará su implementación tanto en mediciones de nivel total como espectral empleando para ello métodos

estadísticos, los cuales permitirán estimar el tiempo de operación segura teniendo en cuenta el comportamiento de dichas mediciones.

## 2. Análisis de tendencias y pronósticos de fallo

Para determinar la tendencia del comportamiento de un parámetro de diagnóstico es imprescindible el uso del método estadístico conocido como análisis de regresión [5,6,]. Este método es utilizado para hallar la relación funcional de dos o más variables.

Los datos son observaciones realizadas durante la explotación de las máquinas. La variable independiente es el tiempo expresado en tiempo calendario o en horas de trabajo de la máquina y la variable dependiente es el nivel del parámetro síntoma investigado. Al analizar la tendencia de una serie de valores es necesario conocer cuáles son los modelos de regresión a emplear. Se ha podido demostrar que en las máquinas, los modelos que mejor describen su comportamiento son los de tipo lineal y exponencial (figura 1), por lo tanto serán estos los modelos a emplear en el análisis de regresión. En las figuras 2 y 3 se muestran mediciones de dos parámetros de diagnóstico que presentan estos dos tipos de comportamiento

La curva de regresión adopta la siguiente forma:

Para la regresión lineal

$$\hat{y} = a + bx \quad (1)$$

Para la regresión exponencial

$$\hat{y} = a + be^x \quad (2)$$

donde:

a, b: coeficientes de regresión.

x: variable independiente: tiempo.

$\hat{y}$ : valor esperado de la variable dependiente: nivel de los parámetros síntomas.

e: número de Euler.

Aplicando el método de los mínimos cuadrados y resolviendo el sistema de ecuaciones por el método de Gauss se obtienen los valores estimados de los coeficientes de regresión.

para el modelo lineal:

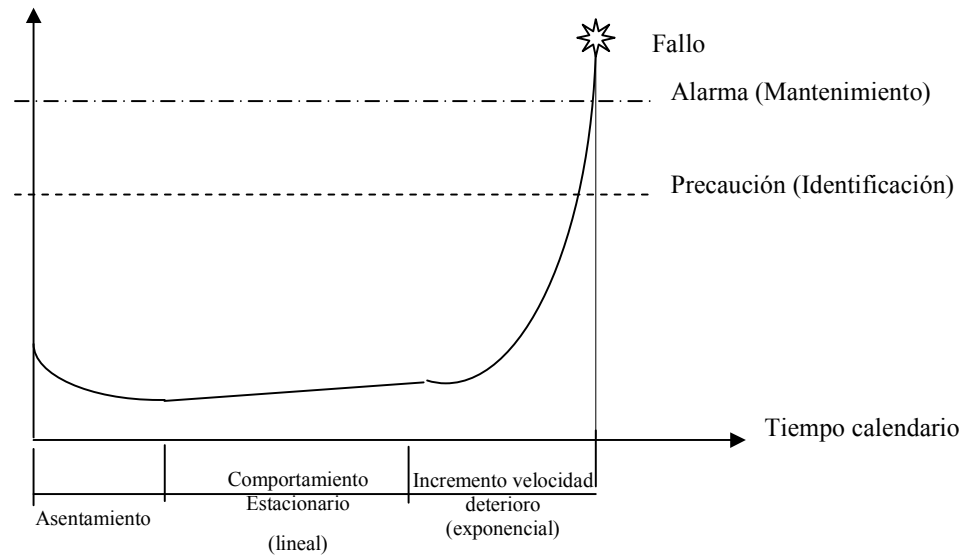
$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 b}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (4)$$

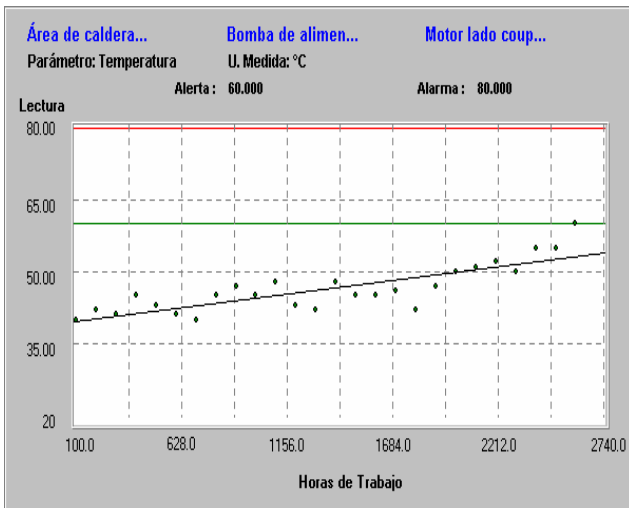
para el modelo exponencial:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n e^{x_i} y_i - \sum_{i=1}^n e^{x_i} \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n e^{2x_i} - \left( \sum_{i=1}^n e^{x_i} \right)^2} \quad (5)$$

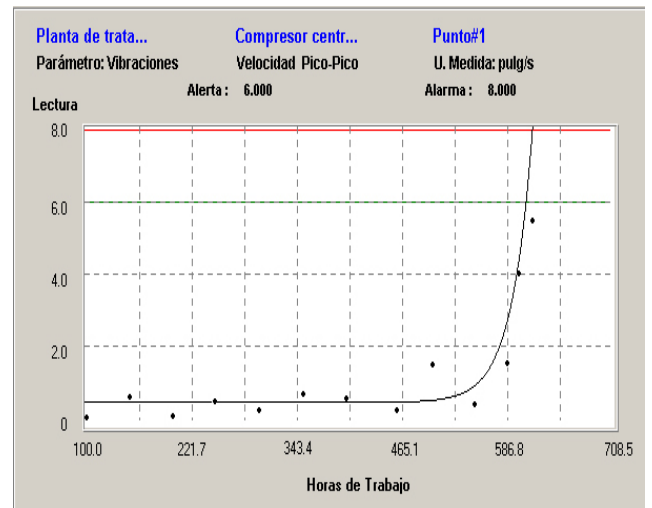
$$a = \frac{\sum_{i=1}^n e^{x_i} y_i - \sum_{i=1}^n e^{2x_i} b}{\sum_{i=1}^n e^{x_i}} \quad (6)$$



**Figura 1.** Comportamiento general de una máquina



**Figura 2.** Mediciones con comportamiento lineal



**Figura 3.** Mediciones con comportamiento exponencial

siendo:

$n$ : tamaño de la muestra.

$x_i$ : cada uno de los  $n$  valores de la variable independiente.

$y_i$ : cada uno de los  $n$  valores de la variable dependiente.

Las desviaciones mínimas cuadráticas de las curvas de regresión (7) de forma sencilla dan una idea de cuanto se acerca el modelo al comportamiento real de los parámetros medidos. Por lo tanto resulta un buen indicador a la hora de determinar cual de los modelos es el más apropiado para describir el comportamiento del parámetro en cuestión.

$$SCR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (7)$$

donde:

SCR: suma de cuadrado de los residuos.

Al comparar los valores de las desviaciones mínimas cuadradas para cada modelo se obtiene que si cumple que  $SCR_{lineal} < SCR_{exp}$  entonces la tendencia es lineal, y sino, exponencial.

Una vez conocida cuál es la tendencia del parámetro, entonces es posible pronosticar el tiempo hasta el fallo.

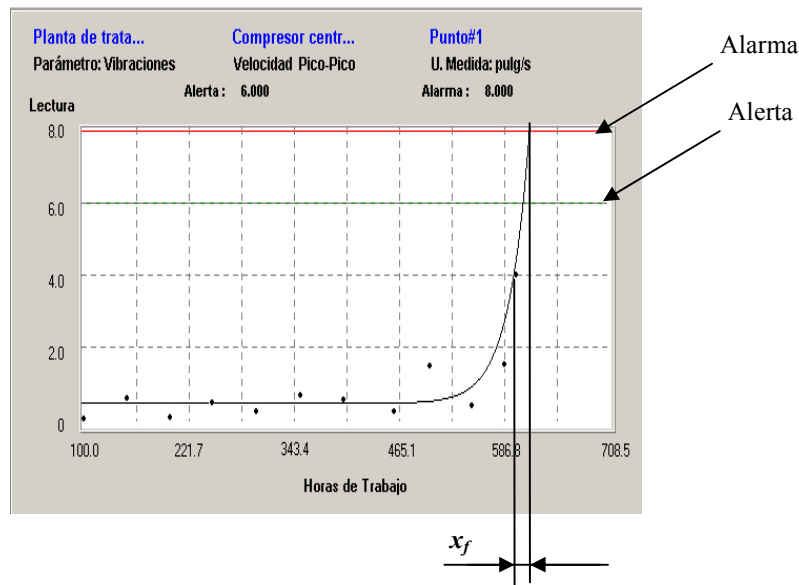


Figura 4. Pronóstico de fallo.

El pronóstico de fallo no es más que el tiempo que queda para que según la tendencia que muestran las mediciones, los parámetros alcancen niveles no tolerables (alarma). Estos niveles pueden haber sido suministrados por los fabricantes, estimados por métodos fiabilísticos o simplemente el resultado de la experiencia del especialista en mantenimiento (figura 4).

Cuando los coeficientes de regresión son conocidos entonces es posible determinar el tiempo hasta el fallo, a partir de la última medición, según la siguiente expresión:

$$x_f = \frac{(y_0 - a)}{b} - x_n \quad (8)$$

### 3. Análisis de tendencias y pronósticos de fallo en mediciones de nivel total

Con el objetivo de evaluar en alguna medida el estado técnico – operacional de las máquinas, la medición de nivel total de uno o varios parámetros de diagnóstico se utiliza como un excelente indicador del estado general de la máquina. De modo que, con el análisis de tendencias en nivel total se logra ejecutar la etapa de detección de problemas, como parte de la estrategia de planificación del mantenimiento a través de las tecnologías predictivas. Es importante señalar que con el análisis de tendencias en nivel total, sólo se puede detectar que algo “no anda bien”, pero no es posible

determinar cuál es la causa del problema, al menos en la inmensa mayoría de los casos. Por ello, el análisis de tendencias en nivel total contribuye al reajuste de los plazos para las acciones preventivas, toda vez que se desconoce la causa del problema e incluso el problema en sí. Baste decir que el crecimiento del nivel de los parámetros síntomas (vibraciones nivel total, presión, temperatura, etc.) Puede tener una o más causas cuyo desconocimiento impide la acción correctiva.

Para determinar la tendencia del comportamiento de los parámetros síntomas empleados al evaluar el estado técnico de las máquinas, han de aplicarse las expresiones 3,4,5 y 6.

En el caso de los pronósticos de fallo, antes de emplear la ecuación 7, es necesario especificar los niveles de alerta y alarma, lo cual no es tarea fácil. Hacerlo requiere de un profundo conocimiento de las características de la máquina investigada.

#### 4. Análisis de tendencias y pronósticos de fallo en mediciones espectrales

El análisis espectral resulta de gran importancia, ya que muchos defectos, incluso en etapas algo avanzadas de su desarrollo, provocan poca variación o ejercen poca influencia en la medición de nivel total. Es por tanto el análisis de mediciones espectrales, a diferencia de las mediciones de nivel total de parámetros de diagnóstico, el único que puede detectar la presencia de estos problemas antes de que sean considerables los daños [3].

Para el análisis de tendencia en mediciones espectrales es necesario en primer lugar determinar el método de estudio del espectro a utilizar: por frecuencias específicas o por bandas espectrales de alarma.

Con la división del espectro en pares frecuencia – amplitud o en bandas espectrales [1] que contengan las frecuencias de diagnóstico de los problemas potenciales con posible desarrollo de acuerdo al tipo de máquina y una adecuada selección de los niveles de alerta y alarma es posible su seguimiento y la determinación de la tendencia de los niveles en el espectro, así como la elaboración de pronósticos de fallo más fiables, debido a que se elaboran a nivel de defecto y no a nivel de máquina.

Con la amplitud para cada armónica o la potencia en cada banda espectral, según el método empleado para el análisis del espectro, se determina la tendencia del comportamiento de las armónicas o las bandas

aplicando las ecuaciones 3,4,5 y 6 para el cálculo de los coeficientes de regresión siendo " $x_i$ " el tiempo calendario o en horas de trabajo de la máquina y " $y_i$ " la amplitud de la armónica o la potencia de la banda para las mediciones espectrales realizadas, emitiéndose pronósticos de fallo empleando para ello la ecuación 7.

#### 5. Conclusiones

Al emplear el análisis de regresión como método para determinar la tendencia del comportamiento de los parámetros síntomas tanto a nivel de máquina (Nivel Total) como a nivel de defecto (Bandas Espectrales) es posible realizar pronósticos de fallo con un elevado grado de certidumbre y planificar las intervenciones de mantenimiento de acuerdo a las necesidades reales de la maquinaria industrial, con el ahorro que esto conlleva. Es cierto que el algoritmo es complejo y engorroso de trabajar, por lo que auxiliarse de una herramienta informática al estilo del software SAT 2.0, realizado por el grupo Vibrasoft, del Centro de Estudios de Innovación y Mantenimiento (CEIM) del ISPJAE, facilitaría mucho la labor del especialista y la gestión del mantenimiento en sentido general.

#### 6. Bibliografía

1. Berry, James E. A proven method for specifying both 6 spectral alarm bands as well as narrowband alarm envelopes using today's predictive maintenance software, Technical Associates of Charlotte Inc., 2nd Edition, EE.UU., 1992.
2. Palomino, M. E. Técnicas de análisis por vibraciones en el Mantenimiento, (folleto), ISPJAE, Cuba, 1997.
3. Palomino, M. E. Identificación de problemas en máquinas rotatorias a través de sus vibraciones, (folleto), ISPJAE, Cuba, 1996.
4. Palomino, M. E. Análisis digital de vibraciones en máquinas, Universidad Nacional Experimental "Antonio José de Sucre", Venezuela, 1994.
5. Harret, D. L. Introduction to Statistical Method, Addison – Wesley Publishing Company, 2nd Edition, EE.UU., 1970.
6. Doblado, J.M. y Nieto O., M. C. Estadística Teórica, Universidad Nacional de Educación a distancia, Madrid, 1970.

## Trend analysis techniques in spectral and total level mensurations

### Abstract

In this article is shown the implementation of the trend analysis, as predictive technology, through the mathematical statistic and its use in spectral and total level mensurations of diagnosis parameters. The use of this technology has a great importance because it allows to predict the failure moment, according to the behavior of the levels of measured parameters, that which facilitates the administration of the maintenance.

**Key words:** maintenance, tendency analysis, spectral mensuration, total level mensuration, failure presage, vibrations, diagnosis.

---

# II Congreso Cubano de Ingeniería y Reingeniería del Mantenimiento



Septiembre 12 – 15, 2000, La Habana, Cuba

---

### TEMAS PRINCIPALES

---

**Gestión Integral del Mantenimiento, Diagnóstico Industrial, Ingeniería de las Vibraciones, Lubricación, Tecnologías de Mantenimiento, Flotas de Maquinas y Automotores, Gestión, Estadística y Fiabilidad en las Empresas Industriales y de los Servicios.**

---

---

### Para enviar trabajos o solicitar información adicional

Comité Organizador CCIM'2000  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba  
Teléfono: (537) 20 2267 Fax: (537) 27 1208  
E-mail: ccim@mecanica.ispjae.edu.cu  
ceim@mecanica.ispjae.edu.cu