

# Calibración de acelerómetros piezoeléctricos empleando un instrumento virtual.

**J. Cabrera Gómez, E. Palomino Marín.**

Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento.  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.  
Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba  
Telefono: (537) 2671872 Fax: (537) 267 2046  
E – mail: [jcabrera@ceim.ispjae.edu.cu](mailto:jcabrera@ceim.ispjae.edu.cu).

(Recibido el 4 de enero de 2001; aceptado el 22 de febrero de 2001)

## Resumen

La medición de los niveles de vibraciones en maquinarias y estructuras requiere el empleo de una instrumentación adecuada, dentro de la cual tiene un inobjetable protagonismo el captador utilizado como elemento sensor primario. Esto hace que la calidad de la medición esté significativamente vinculada a la dependencia de la relación de la magnitud a medir y la señal eléctrica producida por el propio captador, así como el comportamiento de éste ante el contenido de frecuencias de la vibración. El presente trabajo muestra la implementación automatizada, a través del análisis FFT, de un procedimiento para la calibración de acelerómetros piezoeléctricos a partir de suministrarle a éstos una excitación de tipo aleatoria.

**Palabras claves:** Calibración de acelerómetros, medición de vibraciones, respuesta de frecuencias, sensibilidad.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En la técnica moderna, la medición de los niveles de las vibraciones presentes en las máquinas y estructuras se presenta como una acción obligatoria, si se pretende diagnosticar el estado de éstas con vistas a satisfacer objetivos posteriores.

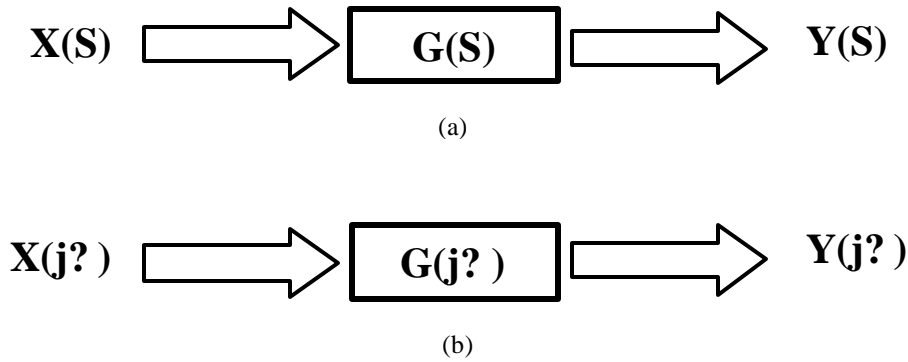
La aceleración, la velocidad y el desplazamiento, constituyen parámetros descriptivos de los niveles de las vibraciones mecánicas presentes en la superficie seleccionada para efectuar la medición, pudiéndose emplear diversos tipos de captadores cuyas salidas sean proporcionales a alguno de estos parámetros. No obstante, en la práctica los transductores de aceleración son los que han mostrado las mejores respuestas dinámicas, siendo los del tipo piezoeléctrico los más difundidos en la actualidad.

En el presente trabajo se describen algunos de los métodos clásicos para la calibración y la determinación

de la respuesta dinámica de acelerómetros piezoeléctricos. Se presenta además una versión desarrollada por los autores, sobre la base del empleo de una computadora fungiendo como analizador FFT en la conocida calibración “back-to-back” de acelerómetros piezoeléctricos.

## 2. DINÁMICA DEL ACELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO

El acelerómetro piezoeléctrico habitualmente es modelado como un sistema lineal de segundo orden [1, 2]. Tal sistema puede ser descrito en el dominio de Laplace mediante su *función de transferencia* (figura 1a) o en el dominio de Fourier a través de su *función respuesta de frecuencias* (figura 1b).



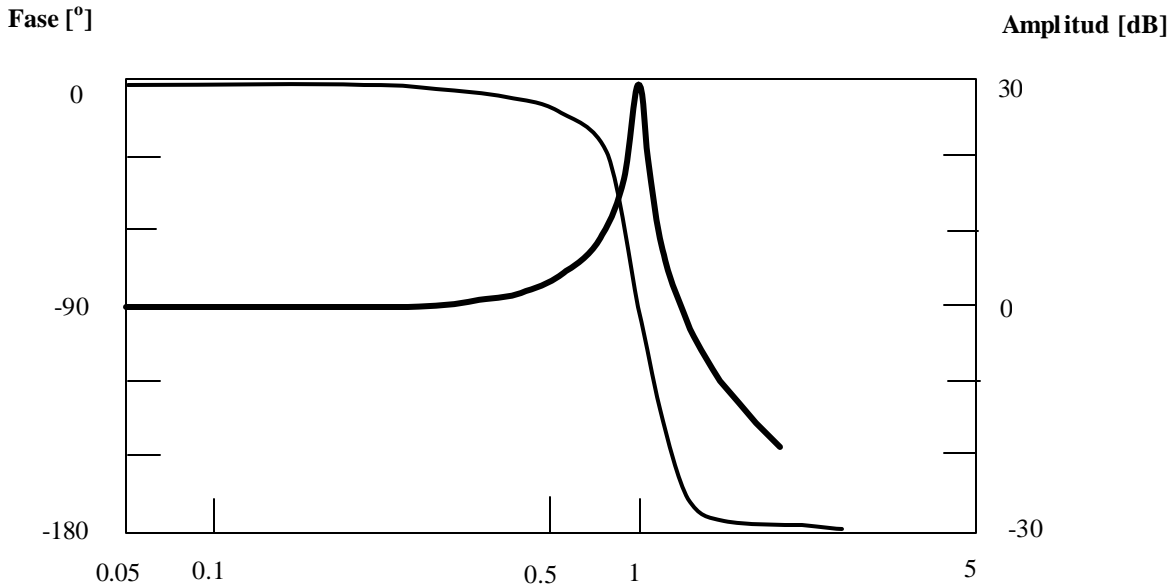
**Figura 1.** Formas de describir al acelerómetro como sistema lineal.

$$G(s) = \frac{a_1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad (1)$$

La función de transferencia del acelerómetro puede expresarse mediante la relación (1), en tanto que su correspondiente función respuesta de frecuencias está dada por la ecuación (2).

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\phi} \quad (2)$$

La figura 2 muestra la respuesta dinámica del acelerómetro en módulo y fase, siendo ésta proporcional a la frecuencia de resonancia en virtud del tipo de sujeción que se haya empleado para fijarlo a la superficie vibrante [6].



**Figura 2.** Respuesta dinámica del acelerómetro piezoeléctrico

### 3. TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN

En sentido general, la calibración de los acelerómetros piezoeléctricos puede ser efectuada en forma absoluta o por comparación [8, 10]. Durante la calibración absoluta, la sensibilidad del acelerómetro se determina a partir de mediciones basadas en unidades fundamentales y derivadas de las propiedades físicas involucradas. El método más empleado en la actualidad para este tipo de calibración es la interferometría láser [5]. Por su parte, en una calibración por comparación, la sensibilidad se obtiene a partir de la relación que se establece con un patrón cuyos parámetros vibratorios son conocidos. Las formas más usuales que adopta la calibración por comparación son:

#### *Calibración con fuente de vibraciones conocidas*

Esta técnica se ejecuta con dispositivos calibradores [3] para chequear el estado del acelerómetro antes, durante o después de efectuar una medición.

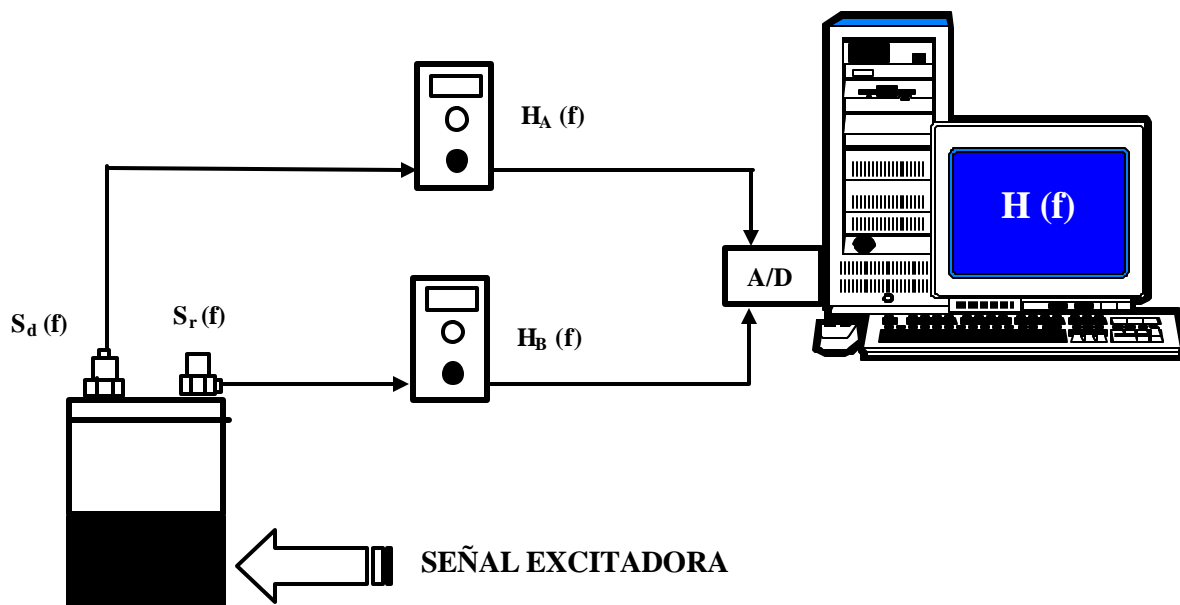
#### *Calibración “Back-To-Back”*

Esta técnica se caracteriza por el empleo de dos acelerómetros [4, 7], siendo uno de ellos el patrón y el otro es el captador a calibrar. Para efectuar el proceso de calibración ambos acelerómetros se colocan sobre el

mismo dispositivo excitador, para suministrarles una señal excitadora de determinadas características. La tendencia actual es la de emplear excitación aleatoria con características de ruido blanco, con la cual se intenta excitar de forma simultánea el grupo de frecuencias contenidas dentro de la banda ajustada para el experimento. Lo usual en estos casos es emplear un analizador de FFT a dos canales que incorpore además un generador de ruido blanco.

### 4. CALIBRACIÓN “BACK-TO-BACK” EMPLEANDO UN INSTRUMENTO VIRTUAL ANALIZADOR DE FFT.

El empleo de un instrumento analizador real con las características apuntadas anteriormente, simplifica notablemente la instalación experimental. Sin embargo, tales instrumentos son sumamente caros, lo cual hace muy atractiva la variante de sustituirlos por un instrumento virtual [9]. En la figura 3 se puede apreciar la plataforma experimental básica para la calibración “Back-To-Back” de un acelerómetro piezoeléctrico aprovechando las posibilidades de un instrumento virtual. La interfaz A/D y el software hacen el trabajo del analizador de señales FFT a dos canales, debiéndose adicionar a la instalación el correspondiente dispositivo excitador.



**Figura 3.** Calibración “Back-To-Back” de un acelerómetro piezoeléctrico empleando un instrumento virtual.

La relación entre las sensibilidades del acelerómetro patrón y el que se va a calibrar puede expresarse a través de la ecuación (3), en la que:  $S_d(f)$  es la sensibilidad del acelerómetro a calibrar,  $S_r(f)$  es la sensibilidad del acelerómetro patrón,  $H(f)$  es la respuesta de frecuencias calculada por el instrumento virtual,  $H_A(f)$  y  $H_B(f)$  son respectivamente las respuestas de frecuencias de los canales A y B.

$$\frac{S_d(f)}{S_r(f)} = H(f) \frac{H_B(f)}{H_A(f)} \quad (3)$$

Como posibles variantes dentro de este método de calibración, se pueden emplear las siguientes:

#### **Calibración “Back-To-Back” por conmutación:**

Se realizan dos mediciones intercambiando los cables de conexión de los acelerómetros, de manera que si en la primera medición la señal del acelerómetro patrón viaja por el canal A, en la segunda medición lo hará por el B. Con este proceder se excluye del resultado la influencia de la instrumentación empleada. Tomando como base la relación planteada por la ecuación (3), las expresiones (4) y (5) mostrarán respectivamente los resultados parciales obtenidos en la primera y la segunda medición, en tanto que la expresión (6) presenta el resultado final hallado para la sensibilidad del acelerómetro a calibrar en función de las propiedades conocidas del patrón.

$$\frac{S_d(f)}{S_r(f)} = H_{\frac{d}{r}}(f) \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (4)$$

$$\frac{S_r(f)}{S_d(f)} = H_{\frac{r}{d}}(f) \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (5)$$

$$S_d(f) = S_r(f) \sqrt{\frac{H_{\frac{d}{r}}(f)}{H_{\frac{r}{d}}(f)}} \quad (6)$$

#### **Calibración “Back-To-Back” por sustitución**

En este caso también se efectúan dos mediciones sucesivas, pero en esta ocasión se emplea un acelerómetro denominado “de pivote”, cuyas características no tienen que ser necesariamente conocidas. Procediendo en forma similar al caso anterior, se puede llegar al resultado que muestra la expresión (7).

$$S_d(f) = S_r(f) \frac{H_{\frac{d}{p}}(f)}{H_{\frac{r}{p}}(f)} \quad (7)$$

Siguiendo el procedimiento que se acaba de describir, los autores han calibrado diversos modelos de acelerómetros. A modo de ejemplo y para ilustrar el trabajo desarrollado en tal sentido, se muestran en la tabla 1 los resultados del procesamiento estadístico aplicado con posterioridad a las mediciones efectuadas sobre uno de los acelerómetros calibrados. Se puede apreciar como la sensibilidad se mantiene aproximadamente estable en un rango de frecuencias entre 20 Hz y 4 kHz, tergiversándose la lectura a partir de este último valor. El hecho adicional de conocer la sensibilidad de una forma más detallada, o sea, por intervalos de frecuencias, permite a la larga mejorar la exactitud de las mediciones que se realicen posteriormente.

Tabla 1. Resultados del procesamiento estadístico.

<i>Rango de frecuencias [Hz]</i>	<i>Sensibilidad promedio [mV/g]</i>	<i>Desviación estándar [mV/g]</i>
20 - 1000	17.57	3.16
1000 - 2000	16.38	2.70
2000 - 3000	14.87	2.16
3000 - 4000	14.36	1.52
4000 - 5000	10.38	1.89
5000 - 6000	4.72	1.62
6000 - 10000	15.90	2.15

## 5.-CONCLUSIONES:

- La incorporación del instrumento virtual utilizado para las tareas de calibración “Back-To-Back” de acelerómetros piezoeléctricos, logra satisfacer las exigencias técnicas que caracterizan la instalación experimental que incluye un analizador real de FFT a dos canales.
- La sustitución de un poderoso analizador FFT a dos canales por un instrumento virtual, permite la implementación de técnicas de calibración por comparación en condiciones económicamente muy ventajosas.
- La recalibración sistemática de los acelerómetros disponibles posibilita una mayor efectividad en las mediciones futuras a realizar, minimizando los errores de sensibilidad durante las mismas.

## REFERENCIAS

1. Argüelles J.A., “*Elementos de ingeniería de sistemas y controles automáticos*”, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1986.
2. Argüelles J.A., “*Mediciones de eventos mecánicos dinámicos*”, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1987.
3. BRÜEL & KJÆR, *Electronic Instruments Master Catalogue*, Denmark, 1997
4. Change N.D., “*Back-To-Back Accelerometer Calibration*”, DYTRAN General Catalogue & Instrumentation Handbook, USA, 1995.
5. ISO 5347:87, *Methods Of Calibration Of Vibration And Shock Pick-ups*, ISO 5347, 1987.
6. ISO 5347:87, *Mechanical Vibration And Shock Mounting Of Accelerometers*, ISO 5348, 1987.
7. Litch T., et al, “*Recent Developments In Accelerometers Design*”, Brüel & Kjær *Technical Review*, 1987 N° 2.
8. Litch T., Henrik A., “*Trends In Accelerometers Calibration*”, Brüel & Kjær *Technical Review*, 1987 N° 2.
9. Palomino E., “*Concepción, desarrollo y aplicación de un instrumento virtual para el análisis de vibraciones en maquinarias y estructuras*”, *Tesis doctoral*, ISPJAE, 1995.
10. Serridge M., Torben R., “*Piezoelectric Accelerometer And Vibration Preamplifier Handbook*”, Brüel & Kjær, Denmark, 1986.

## Calibration Of piezoelectric accelerometers by using a virtual instrument.

### Summary

Vibration level measurements in machineries and structures require an appropriate instrumentation, being very important the transducer used as primary sensor element. The quality of the measurement is significantly linked to the dependence of the relationship between the magnitude to measure and the electric output produced by the transducer, as well as the behaviour of this device to the content of frequencies of the vibration. The present work shows the automated implementation, through the FFT analysis, of a procedure in order to calibrate piezoelectric accelerometers submitting them to random excitation forces.

**Key words:** calibration of accelerometers, vibration measurements, frequency response, sensitivity

---

### Curso de posgrado.

#### *La Informática en la Ingeniería y la Arquitectura.*

**Conferencista:** *MSc. Ing. Ángel Alberto Corugedo Méndez. Dpto. Gráfica de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Mecánica. ISPJAE. :*  
[corugedo@mecanica.ispjae.edu.cu](mailto:corugedo@mecanica.ispjae.edu.cu)



#### **Objetivos generales del curso.**

- Crear entre los profesionales asistentes una cultura general e integral sobre las aplicaciones de la informática como herramienta de trabajo para la solución de los problemas profesionales de ingenieros y arquitectos. Motivar la superación continua para el uso y desarrollo de las tecnologías informáticas en la actividad profesional de ingenieros y arquitectos.

#### **Contenido.**

Conferencia No. 1: La informática y sus aplicaciones profesionales.  
Conferencia No. 2: La informática y el desarrollo de los proyectos.  
Conferencia No. 3: La informática y la capacitación de los profesionales.  
Conferencia No. 4: La informática y la organización de los proyectos.  
Conferencia No. 5: La informática y la normalización en la actividad de proyectos.

#### **Frecuencia.**

El curso se desarrollará durante cinco semanas todos los jueves a partir del jueves 31 de junio 2001 a las 3:00 pm en la sede de la UNAICC de la provincia La Habana situada en Callé Línea No. 1008 e 10 y 12 Vedado, Ciudad de la Habana.