



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A083

## Calibración primaria y secundaria en aceleración

Lucía E. Barceló, Taibo, Lucía N., Zapata; Alexis G.

Área Técnica Acústica, Física y Metrología, INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), Av. Gral Paz 5445, 1650 San Martín, Pcia. Buenos Aires, R. Argentina. E-mails: [lubar@inti.gov.ar](mailto:lubar@inti.gov.ar); [luciat@inti.gov.ar](mailto:luciat@inti.gov.ar); [gzapata@inti.gov.ar](mailto:gzapata@inti.gov.ar)

### Abstract

Since 1982, INTI calibrates piezoelectric accelerometers by the laser interferometry technique, even before this absolute primary calibration method was normalized by ISO 5347 (1993). The mounting of the interferometer and the vibration exciter, as well as the instruments employed for the measurement of the charge sensibility of the accelerometer, have been modified several times. The original horizontal Michelson interferometer was replaced by a new system, which is both more compact and simple, following the vertical disposition devised by the Kobayashi Institute in Japan, with two isolated independent mechanical mountings, one for the interferometer and the other for the vibration exciter. The vibration exciter mounting isolation is provided by four springs, whose natural frequency in the vertical direction is  $< 1,5$  Hz (90 % rejection frequency 4,3 Hz). Four self-leveling active isolators (resonance frequency  $< 1,35$  Hz) ensure the lowest possible motion of the tabletop over which the interferometer is mounted. The ISO standard itself was modified (ISO 16 063-11 1999), especially the uncertainty calculation, because as the original standard was previous to the ISO Guide for the Expression of the Uncertainty in Measurement (GUM - 1993), it didn't comply exactly with this guide. This primary calibration of piezoelectric accelerometers is then transferred to the accelerometers widely employed in the industry for vibration analysis, by means of the secondary calibration of vibration transducers by the "back-to-back" method, normalized by ISO (originally ISO 5347/3 (1993), replaced in 2003 by ISO 16063-21 in 2003), thus completing the traceability in the acceleration domain.

### Resumen

INTI calibra acelerómetros en forma absoluta por interferometría láser desde 1982, aún antes de que este método de calibración primaria fuera normalizado por ISO 5347 (1993). Tanto el sistema de montaje del interferómetro y del excitador de vibraciones como los instrumentos de medición de medición fueron modificados en reiteradas oportunidades desde entonces. El interferómetro de Michelson original de plano horizontal fue reemplazado por otro de disposición vertical, consistente en dos montajes mecánicos independientes para el interferómetro y para el excitador de vibraciones, respectivamente. El excitador está montado sobre una base flotante sobre resortes helicoidales (frecuencia natural vertical bajo carga  $< 1,5$  Hz; frecuencia de rechazo al 90% 4,3 Hz) y la mesa óptica sobre aisladores activos autonivelantes (frecuencia de resonancia vertical  $< 1,35$  Hz). El cálculo de la incertidumbre de medición fue replanteado por ISO 16 063 (1999) en función de ISO GUM (1993). La base primaria descrita constituye el vértice de la pirámide metrológica, que se transfiere a la calibración de transductores y equipos de medición de vibraciones ampliamente utilizados en la industria para la medición de vibraciones (maquinaria, estructuras, humanas,...), mediante el método secundario normalizado por ISO 16063-21 (2003), completándose así la cadena de trazabilidad en aceleración.

## 1 Introducción

La aceleración de las vibraciones comenzó a medirse a fines de los años 20, requerida por la dinámica estructural y la arquitectura naval. Los acelerómetros primitivos se calibraban someténdolos a un movimiento mecánico de parámetros conocidos en un ámbito de frecuencias bastante limitado.

Los primeros acelerómetros comerciales aparecieron en el mercado en la década del 40, calibrados por el método absoluto de reciprocidad. Aunque el método interferométrico se conocía y aplicaba ya en los años 20, recién en la década del 60 resultó más práctico utilizar un interferómetro de MICHELSON para determinar la aceleración a partir del desplazamiento dinámico.

En la actualidad, los acelerómetros piezoeléctricos son los transductores más versátiles y más ampliamente utilizados para medir aceleraciones vibratorias. Proporcionarles trazabilidad en el ámbito más amplio posible de frecuencias y amplitudes, con la menor de las incertidumbres, sigue siendo el objetivo primordial de los laboratorios de referencia.

## 2 Interferometría láser

En el Laboratorio de Vibraciones del INTI, en 1982 ya se había desarrollado un montaje para la calibración absoluta de acelerómetros piezoeléctricos sobre la base de la técnica interferométrica, con una disposición horizontal del interferómetro [1]. El método empleado para calibrar acelerómetros con este dispositivo fue posteriormente objeto de normalización por ISO Draft 5347/Parte 1, convertido en norma en (1993) [2].

El sistema interferométrico del INTI fue sucesivamente modificado hasta llegar a la configuración actual, consistente en un interferómetro de plano vertical, siguiendo los lineamientos del desarrollo efectuado en el Instituto KOBAYASHI de Investigación Física del Japón [3]. El nuevo sistema posee una mayor simplicidad y dimensiones más reducidas respecto del montaje tradicional, ya que con esta nueva disposición, un único montaje permite cubrir una amplia gama de frecuencias y obtener una mayor precisión.

El diseño consta básicamente de dos sistemas mecánicos independientes, uno para el montaje del excitador de vibraciones (frecuencia natural vertical de 1,5 Hz bajo carga y frecuencia de rechazo al 90% de 4,3 Hz) y el otro para la colocación del láser y de los elementos ópticos [4].



**Figura 1** (arriba). Montaje para calibración por interferometría láser de acelerómetros piezoeléctricos en el INTI. Derecha, detalle del montaje del excitador de vibraciones entre las patas de la mesa óptica.



**Figura 2.** (arriba). Mesa óptica con el interferómetro de plano vertical del INTI y (a la derecha) detalle del cubo separador del haz y orificio para el pasaje del rayo luminoso hacia el segundo espejo, montado sobre el acelerómetro.

La mesa óptica montada sobre aisladores de tipo activo autonivelantes dentro de  $\pm 0,25$  mm, con frecuencia de resonancia vertical  $< 1,35$  Hz y horizontal  $< 1$  Hz. La frecuencia de rechazo al 90% es de 5 Hz en dirección transversal).

La norma ISO fue modificada siguiendo el avance de las investigaciones, siendo la ISO 16 063 la versión vigente en la actualidad, cuyas distintas partes aparecieron en 1998 (Basic concepts), 1999 (Part-11- Calibración Primaria) y 2003 Part 21 (Calibración Secundaria) [5].

## 2.1 Incertidumbre asociada

Probablemente, la modificación más importante de la nueva norma sea la introducida en el cálculo de la incertidumbre asociada con la medición, ya que la norma anterior, ISO 5347, no cumplía con la GUM (Guide for the Calculation of Uncertainty in Measurements), considerada una “protonorma”, cuya primera versión fue publicada a fines de 1993 [6].

El error y la incertidumbre de medición no estaban claramente diferenciados hasta que la GUM definió esos conceptos. No es arbitrario clasificar las fuentes de error como aleatorias (random) y sistemáticas, pero en el análisis de error las dos componentes recibían un tratamiento diferente. Existen otras limitaciones al análisis de error que constituyeron en el pasado un obstáculo para el intercambio de los resultados de las mediciones científicas y técnicas. Por este motivo, las autoridades metrológicas de todo el mundo colaboraron en la redacción de la GUM, que reemplaza al análisis del error por la cuantificación de la incertidumbre de medición.

A diferencia del análisis de error, que se basa en los conceptos hipotéticos del valor verdadero y del error referidos al estado de la naturaleza, la GUM se refiere a los valores cuantificables de las mediciones, y de sus incertidumbres asociadas, en el marco de nuestros limitados conocimientos de la naturaleza.

La GUM reconoce la importancia del juicio científico en la evaluación de las componentes de la incertidumbre y legitima su uso, declarando que no pueda establecerse ninguna distinción entre los métodos de evaluación estadísticos (Tipo A) y de otros tipos (Tipo B). Establece también el principio de que el resultado de una medición debe ser corregido para incluir todos los efectos sistemáticos significativos y que debemos esforzarnos por identificarlos. Corregir el resultado de una medición es poco seguro, por este motivo debe

siempre cuantificarse la incertidumbre asociada con cada corrección e incluirla en la incertidumbre estándar combinada. La GUM simplemente considera a las variaciones que surgen de los efectos random y a las asociadas con las correcciones de los efectos sistemáticos como componentes de la incertidumbre.

### 2.1.1 Método del conteo de franjas

Para frecuencias menores de 1 kHz se emplea el método del conteo de franjas para medir la amplitud de la vibración. Para frecuencias mayores de 1 kHz el número de franjas de interferencia que pasan frente al fotodetector es insuficiente para asegurar una buena exactitud.

**Tabla 1.** *Budget* de incertidumbre hasta 1 kHz (conteo de franjas)

<u>Componente</u>	%
1. Lectura de tensión	0,09
2. Distorsión total	0,18
3. Mov. basculantes y transversales del excitador	0,5
4. <i>Hum &amp; noise</i>	0,12
5. Longitud de onda (despreciable)	0
6. Conteo de franjas	0,01
7. Frecuencia de la señal (modo <i>ratio</i> )	0,001
8. Desalineación del <i>shaker</i>	0,05
9. Incertidumbre <i>random</i>	0,005
<i>Incertidumbre estándar expandida (k=2 para un intervalo de confianza del 95%)</i>	<b>1,1</b>

### 2.1.2 Método de los mínimos de las funciones de Bessel

Por lo antes expuesto, para frecuencias iguales o mayores de 1 kHz debe emplearse otro método para medir la amplitud de desplazamiento vibratorio al que se somete el acelerómetro. El procedimiento normalizado según ISO 16 063/Parte 11 es el de los mínimos de las funciones de BESSEL, cuyo cálculo de incertidumbre se detalla seguidamente.

**Tabla 2.** *Budget* de incertidumbre para frecuencias mayores que 1 kHz (mínimos de las funciones de Bessel)

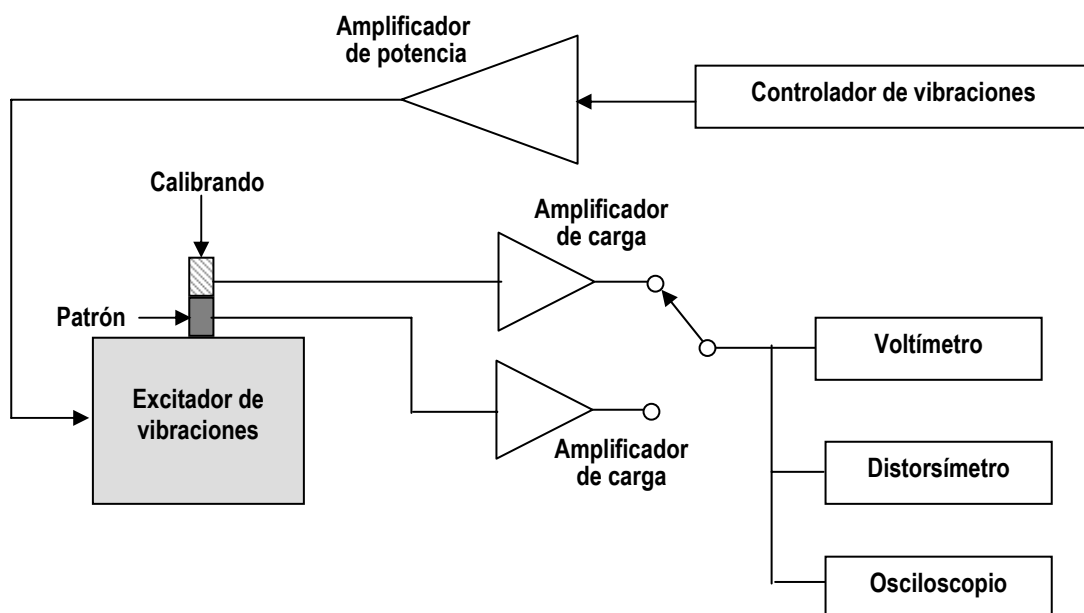
<u>Componente</u>	%
1. Lectura de tensión	0,09
2. Distorsión total	0,3
3. Mov. basculantes y transversales del excitador	0,6
4. <i>Hum &amp; noise</i>	0,0012
5. Longitud de onda (despreciable)	0
6. <i>Cross coupling</i> (despreciable en el montaje del INTI)	0
7. Frecuencia de la señal	0,001
8. Desalineación del <i>shaker</i>	0,05
9. Incertidumbre <i>random</i>	0,005
<i>Incertidumbre estándar expandida (k=2 para un intervalo de confianza del 95%)</i>	<b>1,3</b>

### 3 Método *Back-to-back* para Calibración de Acelerómetros y otros Sensores

La calibración primaria del patrón es transferida a los acelerómetros patrones secundarios (que también son acelerómetros piezoeléctricos) y a los transductores de medición por medio de una calibración por comparación, por ello denominada secundaria. El método de calibración secundaria normalizado (ISO 16 063/Part 21 2003) es el denominado *back-to-back*, debido a que el calibrando se atornilla sobre el acelerómetro patrón para garantizar que ambos reciban prácticamente la misma aceleración vertical.



**Figura 4.** Montaje del calibrando sobre el acelerómetro patrón y ambos sobre el excitador de vibraciones, para el método de calibración secundaria denominado de “*back-to-back*”.



**Figura .5** Diagrama en bloque de las conexiones para el método *back-to-back*.

### 3.1 Incertidumbre del Método back-to-back:

La incertidumbre de medición asociada con la calibración secundaria de un acelerómetro por el método back-to-back también se hace según los lineamientos de la GUM, de acuerdo con lo indicado en la norma actualmente en vigencia para este método (ISO 16 063/Part 21), aunque con componentes propias del método, que difieren de las ya indicadas para el de interferometría láser.

**Tabla 3** Budget de incertidumbre para el método de calibración secundaria back-to-back

<u>Componente</u>	<u>%</u>
1. Calibración del conjunto patrón	0,5
2. <i>Drift</i> del patrón (0,05 %/año)	0,029
3. Calibración del amplificador	0,12
4. Medición de las dos tensiones eléctricas y su razón	0,17
5. Temperatura	0,21
6. Máxima diferencia tolerada del patrón antes y después de la calibración	0,12
7. Parámetros de montaje (cable, conector, torque,...)	0,29
8. Distorsión (3ª armónica y diferencia de pendientes entre los acelerómetros)	0,0014
9. Sensibilidades transversales (excitador y calibrando)	0,19
10. Tensiones en la base	0,14
11. Movimientos relativos	0,058
12. Alinealidad de los transductores	0,017
13. Alinealidad de los amplificadores	0,046
14. Gravedad	0
15. Campo magnético del excitador	0
16. Otros efectos ambientales	0,058
17. Incertidumbre <i>random</i>	0,028-
<b><i>Incertidumbre estándar expandida (k=2 para un intervalo de confianza del 95%)</i></b>	<b>1,42</b>

### 3.2 Uso de adaptadores

Cuando se trata de sensores cuya forma o peso no permite que sean atornillados directamente sobre el acelerómetro patrón, la norma ISO 16 063/Part 21 propone el empleo de un adaptador a fin de sujetarlos, siempre que así queden perfectamente alineados sobre el excitador en la dirección de la vibración aplicada. En las fotos de la Figura 6 se observa un tipo de adaptador, diseñado especialmente para la calibración de un acelerómetro triaxial que forma parte de un equipo para la evaluación de ascensores.

De esta manera se completa el esquema de trazabilidad de Acústica en el área de aceleración.



**Figura 5.** Adaptador diseñado para someter a vibraciones a un acelerómetro triaxial, que por su forma y tamaño, no puede ser ubicado sobre el acelerómetro patrón como lo indica el método back-to-back (ISO 16 063/Part21, en tres direcciones ortogonales entre sí,.

### Referencias

- [1] Barceló, Lucía E. y Taibo, Lucía N.: Calibración absoluta de acelerómetros piezoeléctricos por interferometría LASER, Carta Metrológica N.6 (1984),
- [2] ISO 5347: "Methods for the calibration of vibration and shock pickups. Part 0 (1987): " Basic Concepts". Part 1 (1993): "Primary vibration calibration by laser interferometry". Part 3 (1993): "Secondary vibration calibration".
- [3] A.Yokota, H. Komura: Comparison calibration of vibration pickup by using transfer function and new calibration methods of multiaxial vibration pickup, Journal Acoustical Soc. Japan 13, 5 (1992).
- [4] Taibo, L.N., Barceló, L.E., Dittmar, W:J: y Riganti, J.M.: Implementación de Técnica Interferométrica para Calibración de Acelerómetros, 2das. Jornadas de Desarrollo e Investigación INTI, Buenos Aires 1998. Posteriormente publicado en la revista Industria y Desarrollo, Año 2, N° 5, Mayo 1999, . .
- [5] ISO 16 063: Methods for the calibration in shock and shock transducers Part 11 (1999): Primary vibration calibration by laser interferometry. Part 21 (2003): Vibration calibration by comparison to a reference transducer. Part 1: Basic concepts.
- [6] Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement (GUM); ISO 1993. Modificada en 1995 y con otra versión en discusión en la actualidad.