

Copia No Controlada

Instituto Nacional  
de Tecnología Industrial

Centro de Desarrollo e Investigación  
en Física y Metrología



INTI



Procedimiento específico: PEA12

# **CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS POR INTERFEROMETRÍA LÁSER SEGÚN LA NORMA ISO 16063/11**

Revisión: Enero 2015

Este documento se ha elaborado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial.  
Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

## PEA12 Lista de enmiendas: Enero 2015

[illegible]

PEA12 Índice: Enero 2015

NOMBRE DEL CAPÍTULO	REVISIÓN
Página titular	Enero 2015
Lista de enmiendas	Enero 2015
Índice	Enero 2015
Calibración de acelerómetros piezoeléctricos por interferometría láser según la norma iso 16063/11	Enero 2015
Apéndice 1	Enero 2015
Apéndice 2	Enero 2015
Apéndice 3	Enero 2015
Apéndice 4	Enero 2015

PREPARADO POR


FIRMA Y SELLO  
  
ARIEL QUINTO  
U.T. ACÚSTICA

INTI - FÍSICA y METROLOGÍA

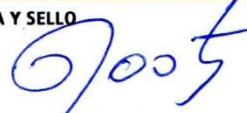
REVISADO POR

FIRMA Y SELLO  


REVISADO POR

FIRMA Y SELLO  
  
Téc. ARIEL QUINTO  
U.T. CALIDAD Y ADMINISTRACIÓN  
FÍSICA Y METROLOGÍA  
INTI

APROBADO POR

FIRMA Y SELLO  


Ing. JUAN A. FORASTIERI  
DIRECTOR TÉCNICO  
INTI - FÍSICA Y METROLOGÍA

PEA12: Enero 2015

## 1. Objeto

Establecer los métodos de calibración por Interferometría Láser entre 50 Hz y 5 kHz de acelerómetros piezoeléctricos comprendidos en el título.

## 2. Alcance

Para acelerómetros piezoeléctricos que se emplean como patrón.

## 3. Definiciones y Abreviaturas

Se encuentran en las normas de referencia.

## 4. Referencias

- Norma ISO 16063-11: Calibración primaria por interferometría Láser.
- Norma ISO 16063-1: Conceptos básicos.
- Norma ISO 266: Frecuencias preferentes de medición.

## 5. Responsabilidades

**5.1.** Profesionales y técnicos del Laboratorio de Vibraciones en la realización de las calibraciones.

**5.2.** Coordinador de la U.T. Acústica, supervisando las calibraciones, verificando que se cumplan los procedimientos y revisando los resultados.

## 6. Instrucciones

Las instrucciones de trabajo se efectúan de acuerdo con la norma ISO 16063/11. Se eligen como valores de referencia la frecuencia y la aceleración en  $\text{m/s}^2$  de la calibración de fábrica del patrón a calibrar.

Se emplean en todos los casos valores de aceleración pico de 1, 2, 5  $\text{m/s}^2$  o sus múltiplos, seleccionando a cada frecuencia el valor de aceleración tal que la relación señal-ruido sea  $\geq 70$  dB.

### 6.1. Identificación y almacenamiento

Los acelerómetros que se calibran se identifican en acuerdo con las instrucciones del Manual de Calidad del INTI - Física y Metrología y procedimientos generales y se guardan hasta la finalización de las calibraciones, en el Laboratorio de Vibraciones, sala N° 63.

### 6.2. Instrumentos que se utilizan

- Acelerómetro Piezoeléctrico marca Brüel & Kjaer modelo 8305, n° de serie 1149987 ó n° de serie 2860128.
- Excitador a las Vibraciones marca Brüel & Kjaer, modelo 4808, n° de serie 2758499.
- Generador de onda sinusoidal marca Agilent, modelo 33210A, n° serie MY48007587.
- Amplificador de Potencia marca Brüel & Kjaer modelo 2707, n° de serie 641800.
- Amplificadores de Carga acondicionadores de Sensibilidad, marca Brüel & Kjaer modelos 2650 y 2635, n° de serie 860079 y 2935013, respectivamente.
- Amplificador de Banda Ancha Melles Griot modelo 13AMP005, n° de serie 464.
- Multímetro Hewlett-Packard modelo 34401A, n° de serie US36064582.
- Higrotermómetro TFA Acu 1.
- Distorsímetro Kronhite Modelo 6900B, n° de serie 1523.
- Osciloscopio marca Tektronic, modelo TDS1001B, n° serie C103831.
- Analizador de Espectros en Tiempo Real marca Brüel & Kjaer, modelo 2145, n° de serie 1875180.
- Láser de He-Ne.

PEA12: Enero 2015

### 6.3. Instrucciones para la calibración primaria de acelerómetros piezoeléctricos

**6.3.1.** El excitador de vibraciones B&K 4808 se ubica sobre un bloque sísmico, separado del apoyo del interferómetro, que está a su vez colocado sobre cuatro aislantes activos.

Si el acelerómetro es del tipo double-ended, se ajusta con tornillo a la superficie del excitador de vibraciones B&K 4808, en dirección vertical. Se mide el par de ajuste del acelerómetro mediante un torquímetro (2 Nm). Además, se atornilla un espejo a la parte superior del acelerómetro.

Si el acelerómetro es del tipo single-ended, se intercala entre el excitador de vibraciones B&K 4808 y el acelerómetro que se va a calibrar un adaptador metálico de acero inoxidable de superficie pulida espejo, con el objeto de enfocar el láser en el adaptador a los lados del acelerómetro. Se mide el par de ajuste del acelerómetro sobre la superficie del adaptador metálico.

**6.3.2.** Se miden la temperatura ambiente y la temperatura del acelerómetro.

**6.3.3.** Para las mediciones entre 50 Hz y 800 Hz, se emplea el método de Conteo de franjas (Método 1 de la norma ISO 16063/11, punto 7), conectando los instrumentos y los elementos del interferómetro según el diagrama de la figura 1

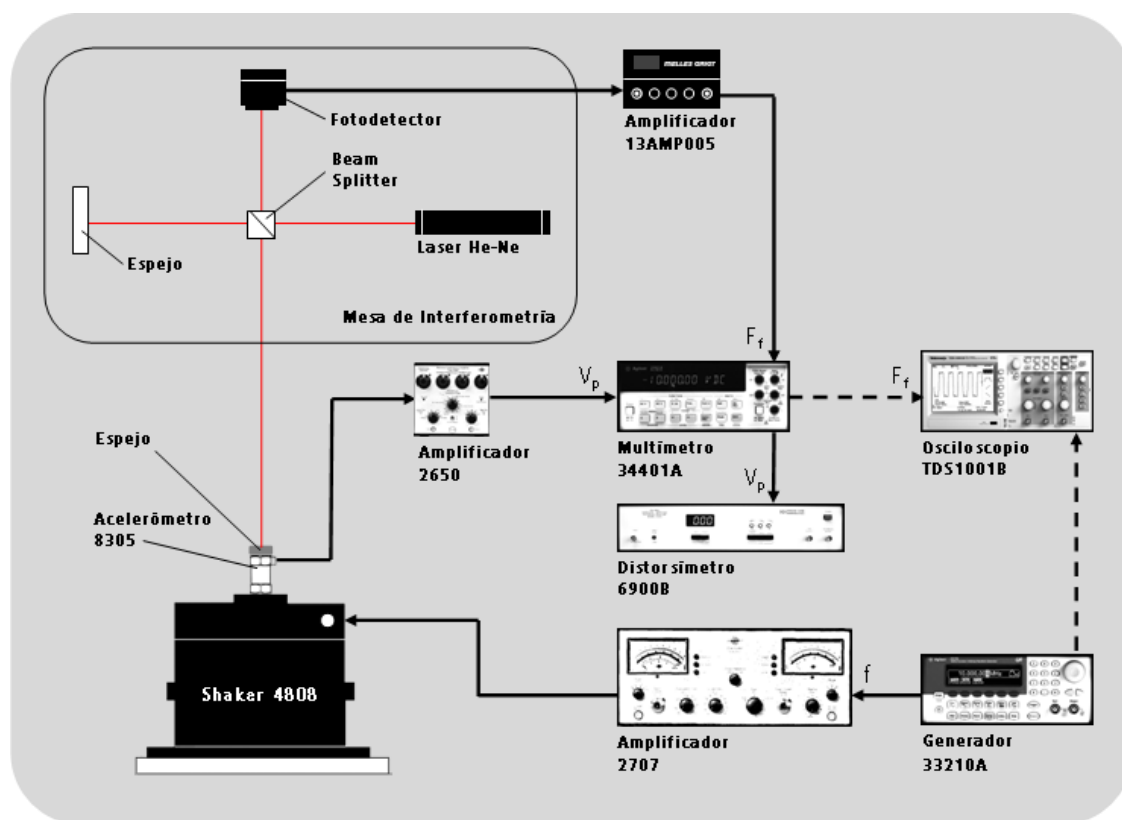


Figura 1. Diagrama de las conexiones para el Método de Conteo de Franjas

**6.3.3.1.** Antes de alinear la mesa de interferometría se debe configurar el Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005. Sin ninguna conexión, encender el equipo y seleccionar el “Gain Setting” en 200 nA, “Bias Voltage” en cero, “Low Offset” (panel trasero) y ajustar el “Offset” hasta leer una corriente de valor cero en la pantalla. Luego seleccionar el “Gain Setting” en 200  $\mu$ A y apagarlo.

**6.3.3.2.** Conectar el fotodetector a la entrada BNC del Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005, ajustando el “Bias Voltage” en -5 V. La salida BNC de este último se divide y se conecta tanto a la entrada posterior BNC del multímetro Hewlett-Packard 34401A como al canal 2 del Osciloscopio Tektronic TDS1001B.

## PEA12: Enero 2015

**6.3.3.3.** Se alinea el láser con el fotodetector, el beam splitter y los espejos del interferómetro para obtener la mejor salida del Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005.

**6.3.3.4.** Conectar mediante un cable BNC-BNC la salida frontal Output del generador de funciones arbitrarias Agilent 33210A al canal 1 del Osciloscopio Tektronic TDS1001B y en el conector trasero Signal Input AC del amplificador de potencia Brüel & Kjaer 2707. Este último se conecta a su vez a través del conector posterior Amplifier Output al conector Input del excitador de vibraciones Brüel & Kjaer 4808.

**6.3.3.5.** Conectar a través de un cable microdot la salida del acelerómetro patrón con la entrada microdot del amplificador de carga utilizado.

**6.3.3.6.** La salida de tensión del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga” ( $V_p$ ), se divide y se conecta tanto a la entrada frontal BNC del multímetro Hewlett-Packard 34401A como a la entrada BNC del Distorsímetro Kronhite 6900B.

**6.3.3.7.** Para medir la tensión de alterna del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga”, se debe configurar el setup del multímetro Hewlett-Packard 34401A seleccionando en el menú: frecuencia inferior de corte en 3 Hz, lectura slow de 6 dígitos. Para luego proceder a medir la tensión  $V_p$  de salida del amplificador de carga.

**6.3.3.8.** Para medir la distorsión en la lectura de tensión de alterna del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga”, se debe configurar el Distorsímetro Kronhite 6900B seleccionando Mode en “% DIST” y Filter en “30 kHz” y “80 kHz”.

**6.3.3.9.** En el amplificador de carga utilizado a la salida del acelerómetro que se calibra, se seleccionarán las siguientes posiciones de los controles:  
Si se trata del amplificador B&K 2650, Transducer Sensitivity en 1,000; Volt/Unit Out (Transducer Range) en 0, 01 ò 0,1 (1-11 pCmV/Unit Out); Lower Frequency Limit en 3 Hz y Upper Frequency Limit en 30 kHz.  
Si se trata de un amplificador de carga B&K 2635, la posición de los controles será: Transducer sensitivity 1,00; mVolt/Unit Out en 10 ó 100; Lower Frequency Limit en 2 Hz y Upper Frequency Limit en 30 kHz.

**6.3.3.10.** Antes de encender el amplificador de potencia Brüel & Kjaer 2707, verificar que los controles en el frente estén en las posiciones siguientes:

Power: en Off

Output Impedance: LOW

Current Limit: 17 A rms

Head Constant (NO DEBE TOCARSE NUNCA. Ha sido fijada al conectar el Excitador de Vibraciones Brüel & Kjaer 4808 en un valor de 2,8 inches/V/s).

Displacement Limit: 0,8 mm

Direct Current Output: Se ajusta por peso según si se hace uso o no de un adaptador, para que el elemento móvil esté centrado verticalmente.

Amplifier Range: Debe estar en Reset

Range A rms: 30

Range V rms: 10

**6.3.3.11.** Encender el amplificador de potencia B&K 2707 llevando la perilla Power a ON y luego a Load On. Si quedaran luces prendidas, se logra apagarlas girando la perilla Amplifier Gain de la posición 0 a RESET.

**6.3.3.12.** Llevar en el amplificador de potencia el Amplifier Gain a 10, valor de amplificación adecuado para este procedimiento.

PEA12: Enero 2015

**6.3.3.13.** Se seleccionan los valores de aceleración a aplicar en m/s<sup>2</sup> según el punto 5a de la norma ISO 16063-11.

**6.3.3.14.** Se seleccionan las frecuencias de la calibración, en el rango de 50 Hz a 800 Hz en bandas de tercio de octava (ISO 266), que siempre deberán incluir la frecuencia de referencia del acelerómetro patrón.

**6.3.3.15.** Una vez fijados los niveles de aceleración en m/s<sup>2</sup> para cada frecuencia se procede a calcular las frecuencias nominales del conteo de franjas (Ff) a la salida del Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005, para las frecuencias del punto 6.3.3.14. Despejándolas de la siguiente fórmula del punto 7.3 de la norma ISO 16063-11:

$$a = f \times F_f \times 3,123 \times 10^{-6} \times \sqrt{2} \text{ m}$$

Donde:

- **a** es la aceleración seleccionada del conjunto acelerómetro-amplificador de carga;
- **f** es la frecuencia de la señal de la vibración, excitando sucesivamente a las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava entre 50 Hz y 800 Hz.
- **F<sub>f</sub>** frecuencia leída a la salida del Amplificador de Banda Ancha.

**6.3.3.16.** Las frecuencias seleccionadas en el punto 6.3.3.14 se ingresan en el generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A seleccionando la opción “Sine” en el teclado frontal de selección de función, luego en pantalla la opción “Freq” con las teclas de menú y por último mediante el teclado numérico se ingresan los distintos valores de frecuencia.

**6.3.3.17.** Para cada una de esas frecuencias, se selecciona en pantalla la opción “Amp” del menú y mediante el botón “Output” se habilita la salida del generador al amplificador de potencia B&K 2707 y luego con la “Perilla” del panel frontal se generan niveles de amplitud en volts rms hasta leer en la pantalla del panel posterior del multímetro Hewlett-Packard 34401A el valor de frecuencia calculado en el punto 6.3.3.15, equivalentes a una señal de aceleración sinusoidal pico en m/s<sup>2</sup>. Posteriormente se procede a leer la tensión en el panel frontal del multímetro Hewlett-Packard 34401A. Verificando, antes y después de la medición, el nivel empleado en cada punto de frecuencia y chequeando que no superen el 5% de distorsión.

**6.3.3.18.** Se consignan los resultados obtenidos en una Tabla (que figura en el Apéndice 1 de este procedimiento). En dicha Tabla, **f** es la frecuencia de la señal generada por el generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A, **V<sub>p</sub>** la tensión eléctrica a la salida del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga” y **Ff** la frecuencia leída a la salida del Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005.

**6.3.3.19.** Se calcula la sensibilidad del conjunto acelerómetro-amplificador de carga con la fórmula:

$$S_c = \frac{0,3202 \times 10^{-6} \times \sqrt{2} \times V_p \text{ m}^{-1}}{f \times F_f}$$

Donde:

- **S<sub>c</sub>** es la sensibilidad del conjunto acelerómetro-amplificador de carga;
- **V<sub>p</sub>** es la tensión eléctrica a la salida del conjunto acelerómetro-amplificador de carga;
- **f** es la frecuencia de la señal de la vibración, excitando sucesivamente a las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava entre 50 Hz y 800 Hz.
- **F<sub>f</sub>** frecuencia leída a la salida del Amplificador de Banda Ancha.

PEA12: Enero 2015

**6.3.3.20.** Una vez obtenida la sensibilidad del conjunto Sc, la sensibilidad del acelerómetro patrón sólo se obtiene calibrando por separado el amplificador de carga según Procedimiento PEA15 para hallar su sensibilidad Sa. La sensibilidad del acelerómetro patrón Sp se calcula entonces mediante la siguiente fórmula:

$$S_D = S_C / S_A$$

Donde:

- $S_p$  es la sensibilidad del acelerómetro patrón;
- $S_c$  es la sensibilidad del conjunto acelerómetro-amplificador de carga;
- $S$  es la sensibilidad del amplificador de carga.

**6.3.3.21.** La incertidumbre en la determinación de  $S_p$  es según el cálculo del Apéndice 4 de este procedimiento.

**6.3.4.** Para las mediciones entre 1000 Hz y 5 kHz, se emplea el Método de los Ceros de las Funciones de Bessel (Método 2 de la norma ISO 16063/11, punto 8), conectando los instrumentos y los elementos del interferómetro según el diagrama de la figura 2.

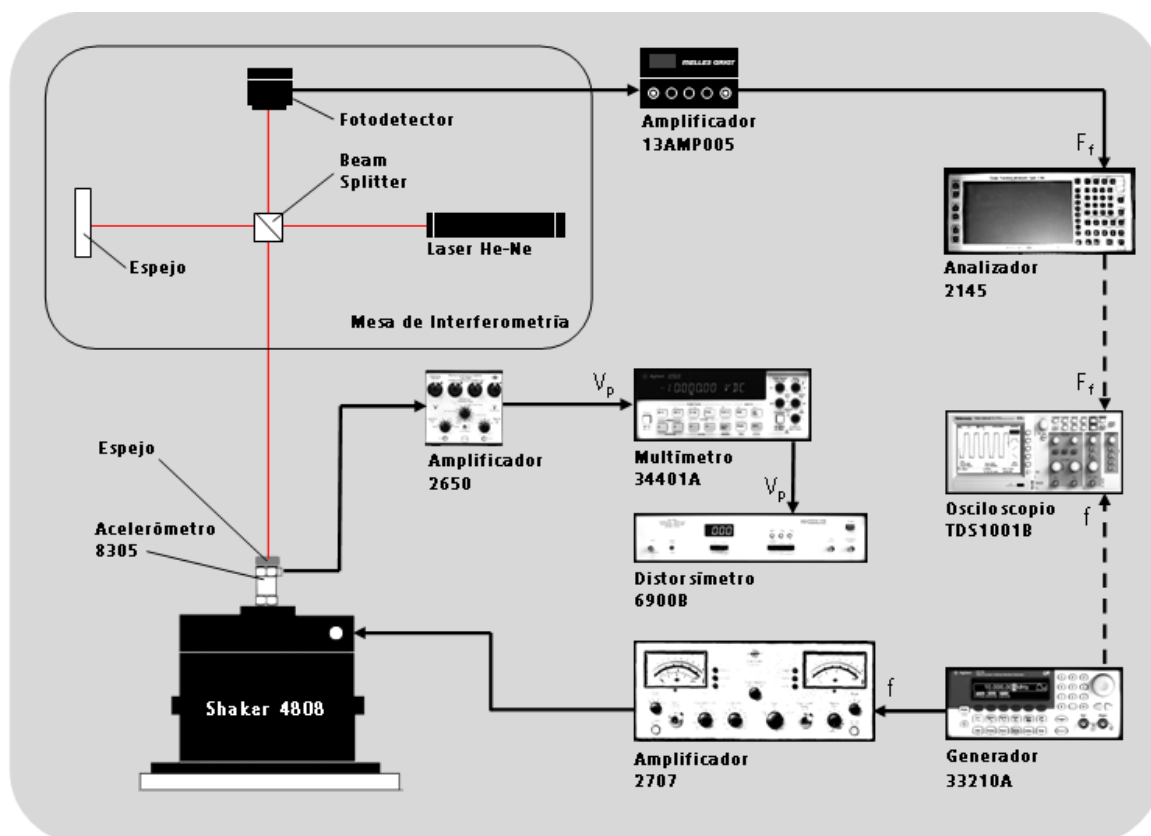


Figura 2. Diagrama de las conexiones para el Método de los ceros de Bessel

**6.3.4.22.** Repetir el punto 6.3.3.1

**6.3.4.23.** Conectar el fotodetector a la entrada BNC del Amplificador de Banda Ancha Melles Griot 13AMP005, ajustando el “Bias Voltage” en -5 V. La salida BNC de este último se divide y se conecta me-



## PEA12: Enero 2015

diante un cable BNC-LEMO en el canal A del Analizador Bruel & Kjaer 2145 y mediante un cable BNC al canal 2 del Osciloscopio Tektronic TDS1001B.

**6.3.4.24.** Configurar el Analizador Bruel & Kjaer 2145 según el punto 6.5.10 del capítulo 6 del manual Analizador de Señales Portable tipo 2147, 2143/7669.

**6.3.4.25.** Repetir los puntos 6.3.3.3 y 6.3.3.12.

**6.3.4.26.** Se eligen los valores de frecuencia entre 1000 Hz y 5 kHz que corresponden a las frecuencias centrales de bandas de tercio de octava (ISO 266).

**6.3.4.27.** Para cada una de ellas se ajusta la amplitud del Excitador de Vibraciones Brüel & Kjaer 4808 desde cero hasta un nivel en el cual la señal fundamental leída en el canal A del Analizador Bruel & Kjaer 2145 alcance un valor máximo y vuelva a un valor mínimo. Este valor mínimo corresponde al punto mínimo N°1, con el cual se obtiene el valor de desplazamiento pico de 0,1930 µm (Tabla 1 del punto 8.2 de la norma ISO 16063-11). Posteriormente se procede a leer la tensión en el panel frontal del multímetro Hewlett-Packard 34401A. Verificando, antes y después de la medición, el nivel empleado en cada punto de frecuencia y chequeando que no superen el 5% de distorsión.

**6.3.4.28.** Sin cambiar la frecuencia, seguir aumentando la amplitud del Excitador de Vibraciones Brüel & Kjaer 4808 desde el primer valor mínimo hasta que la señal fundamental leída en el canal A del Analizador Bruel & Kjaer 2145 alcance nuevamente un valor máximo y vuelva a un valor mínimo correspondiente al punto mínimo N°2. Posteriormente se procede a leer la tensión en el panel frontal del multímetro Hewlett-Packard 34401A. Verificando, antes y después de la medición, el nivel empleado en cada punto de frecuencia y chequeando que no superen el 5% de distorsión. Repetir para los siguientes puntos mínimos.

**6.3.4.29.** Se consignan los resultados obtenidos en una Tabla (que figura en el Apéndice 2 de este procedimiento). En dicha Tabla,  $f$  es la frecuencia de la señal generada por el generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A y  $V_p$  la tensión eléctrica a la salida del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga”.

**6.3.4.30.** Con los valores medidos, se calcula la sensibilidad del conjunto acelerómetro-amplificador mediante la fórmula siguiente:

$$S_c = \frac{0,02533 \times 10^6 \times \sqrt{2} \times V_p}{D \times f^2}$$

Donde:

- $S_c$  es la sensibilidad del conjunto acelerómetro-amplificador de carga
- $V_p$  es la tensión a la salida del conjunto acelerómetro-amplificador de carga;
- $f$  es la frecuencia de la vibración aplicada al acelerómetro.
- $D$  es el valor del desplazamiento pico correspondiente a los distintos puntos mínimos de acuerdo a la Tabla 1 de la norma ISO 16063-11.

**6.3.4.31.** Se calcula la aceleración pico aplicada de la siguiente fórmula:

$$a = 39,478 \times D \times f^2$$

Donde:

- $a$  es la aceleración aplicada al conjunto acelerómetro-amplificador de carga,
- $f$  es la frecuencia de la vibración aplicada al acelerómetro.
- $D$  es el valor del desplazamiento pico correspondiente a los distintos puntos mínimos de acuerdo a la Tabla 1 de la norma ISO 16063-11.

PEA12: Enero 2015

**6.3.4.32.** La sensibilidad del acelerómetro sólo (sin el amplificador de carga) se calcula mediante la fórmula ya empleada en el punto 6.3.3.20, en la que se emplea la sensibilidad del amplificador de carga calculada mediante el método del Procedimiento PEA15.

**6.3.4.33.** La incertidumbre en la determinación de  $S_p$  es según el cálculo del Apéndice 4 de este procedimiento.

#### 6.4. Condiciones ambientales

De acuerdo con la norma ISO 16063-11, la temperatura ambiente será  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$  con una humedad relativa menor que 75 %. Los registros de temperatura y humedad se consignan en la Tabla del Apéndice 3.

#### 6.5. Incertidumbre en las mediciones

Según norma ISO 16063-11. El cálculo de la incertidumbre expandida se desarrolla en el Apéndice 4.

### 7. Registros de la calidad

Se conservan registros manuscritos de las observaciones originales, copia de los certificados emitidos, así como de la Orden de Trabajo, y demás documentación relacionada, de acuerdo con el manual de la calidad del INTI - Física y Metrología, capítulo 11.

### 8. Precauciones

No aplicable.

### 9. Apéndices y anexos

APÉNDICE N°	TÍTULO
1	Planilla de resultados "Conteo de Franjas"
2	Planilla de resultados "Método de los Ceros de las Funciones de Bessel"
3	Planilla de condiciones ambientales
4	Cálculo de incertidumbres

## PEA12 Apéndice 1: Enero 2015

## Planilla de resultados "Cuento de Franjas"

O.T. N°:

Fecha:

Calibración según norma: 16063/11

Procedimiento: PEA12

**Instrumento:**Marca:  
Modelo:  
N° de Serie:Marca:  
Modelo:  
N° de Serie:**Método:** Cuento de Franjas

Frecuencia [Hz]	Aceleración Nominal [m/s <sup>2</sup> ]	Frecuencia Franjas Nominal [Hz]	F <sub>f</sub> [Hz]	V <sub>p</sub> [mV]
10	2	64041		
12,5	2	51233		
16	5	100064		
20	10	160102		
25	10	128082		
31,5	10	101652		
40	20	160102		
50	20	128082		
63	20	101652		
80	20	80051		
100	20	64041		
125	20	51233		
160	20	40026		
200	20	32020		
250	20	25616		
315	20	20330		
400	20	16010		
500	20	12808		
630	20	10165		
800	20	8005		
1000	20	6404		

Condiciones Ambientales: Ver planilla del laboratorioObservaciones:

Realizó

Revisó

Coordinador

Formulario PEA12/01

## PEA12 Apéndice 2: Enero 2015

## Planilla de resultados "Método de los Ceros de las Funciones de Bessel"

O.T. N°:

Fecha:

Calibración según norma: 16063/11

Procedimiento: PEA12

**Instrumento:**

Marca:  
Modelo:  
N° de Serie:

Marca:  
Modelo:  
N° de Serie:

**Método:** Bessel

Frecuencia [Hz]	N° de Punto Mínimo	$V_p$ [mV] rms
1000	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
1250	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
1600	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
2000	1	
	2	
	3	
	4	
	5	

Frecuencia [Hz]	N° de Punto Mínimo	$V_p$ [mV] rms
2500	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
3150	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
4000	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
5000	1	
	2	
	3	
	4	
	5	

Condiciones Ambientales: Ver planilla del laboratorioObservaciones:

Realizó

Revisó

Coordinador

Formulario PEA12/02

PEA12 Apéndice 3: Enero 2015

**Planilla de condiciones ambientales**Registros de Temperatura y Humedad

Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Observaciones - Firma

Formulario PEA12/03

## PEA12 Apéndice 4: Enero 2015

## Cálculo de incertidumbres

## INCERTIDUMBRE

## 1. Método del conteo de franjas:

<b>1. Conteo de franjas:</b>	<b>[%]</b>
Lectura de tensión	0,09
Distorsión total	0,18
Mov. basculantes y transversales del excitador	0,5
<i>Hum and noise</i>	0,12
Error en longitud de onda (despreciable)	0
Error por <i>cross coupling</i> (con nuestro montaje es despreciable)	0
Conteo de franjas (Máximo a 1000 Hz)	0,01
Error en frecuencia de la señal (en modo <i>ratio</i> )	0,001
Desalineación <i>shaker</i>	0,05
<b>Incertidumbre Sistemática Porcentual</b>	<b>0,55</b>
Incertidumbre Random	0,005
Incertidumbre Sistemática	0,6
<b><i>Incertidumbre expandida (k=2 para 95%)</i></b>	<b>1,1</b>

PEA12 Apéndice 4: Enero 2015

**2. Método de los Ceros de las Funciones de Bessel**

<b>2. Bessel</b>	<b>%</b>
Lectura de tensión	0,09
Distorsión total	0,3
Mov. basculantes y transversales del excitador	0,6
<i>Hum and noise</i>	0,0012
Error en longitud de onda (despreciable)	0
Error por <i>cross coupling</i> (con nuestro montaje es despreciable)	0
Ceros de Bessel	0,004
Error en frecuencia de la señal	0,001
Desalineación <i>shaker</i>	0,05
Incertidumbre Sistemática Porcentual	0,68
Incertidumbre Random	0,005
Incertidumbre Sistemática	0,64
<b><i>Incertidumbre expandida (<math>k=2</math> para 95%)</i></b>	<b>1,3</b>