



## **Medición de sensibilidad de sensores de Emisión Acústica por comparación con un sensor patrón de sensibilidad conocida en base a la norma ASTM E976-00**

Ricardo E. Juárez\*, Carlos M. Ortega  
VN Acoustic Emission  
Riglos 155 (1424) CABA, Argentina  
\* [juarezre@arnet.com.ar](mailto:juarezre@arnet.com.ar)

### ***Resumen:***

Es conocida la complejidad que rodea a la calibración directa o indirecta de los sensores de Emisión Acústica para la obtención de parámetros secundarios. En la búsqueda de mecanismos simplificados de evaluación de dichos sensores es que en este trabajo se establece su caracterización por comparación con uno de curva de sensibilidad vs frecuencia conocida (PAC R15). Así es que se construyeron los elementos requeridos por la norma ASTM E976-00 (cono truncado de acero, etc.) para la comparación de sensores entre sí, utilizándose en la cadena de medición la opción mencionada en dicha norma consistente en la generación de ruido blanco de banda ancha y recepción por medio de un analizador de espectros. La aplicación de las matemáticas de sistemas lineales y técnicas de tratamiento digital de señales, como la FFT, permiten establecer las magnitudes del sensor en función de la frecuencia. Se presentan los gráficos de la sensibilidad vs frecuencia de sensores de construcción propia logrados con este método. Palabras clave: Emisión acústica, sensores, ASTM E976-00, sensibilidad,

### ***Introducción:***

La Emisión Acústica es una técnica de múltiples aplicaciones en pleno proceso de expansión hacia rubros muy variados y que está firmemente establecida a nivel de normas para numerosos casos. Es una técnica de detección pasiva en cierta forma similar a lo denominado “sonar pasivo” o “escucha pasiva” utilizada en la detección de submarinos, por supuesto que en otro medio y en otra gama de frecuencias. Si bien es de indudable utilidad, sus limitaciones son importantes debido a la complejidad de los fenómenos involucrados y a las diversas formas de propagación ondulatoria que llevan la información de los procesos estructurales en lo que se está interesado. Existen considerables esfuerzos para darle a esta interesante técnica posibilidades de espectroscopia caracterizando los fenómenos para su mejor identificación, pero es una tarea formidable. Como era de esperar el tema de la calibración de los sensores es también complicado y sujeto a cierta controversia.

## Calibraciones

a) La norma madre de todo el sistema es la **E 1106-86** que trata la calibración primaria en donde se utiliza la rotura de un capilar como la fuente de emisión de una señal tipo escalón, la que llega simultáneamente al sensor bajo estudio y a un sensor patrón ( por construcción) que es capacitivo y que mide desplazamientos. Las velocidades se deducen matemáticamente de la señal.

En este caso el bloque de acero sobre el cual se hacen las experiencias tiene que tener unas características de uniformidad, terminación de superficies, paralelismo etc., además de un gran tamaño que lo transforma en un serio inconveniente de construcción. Se lo muestra en la Fig.1.

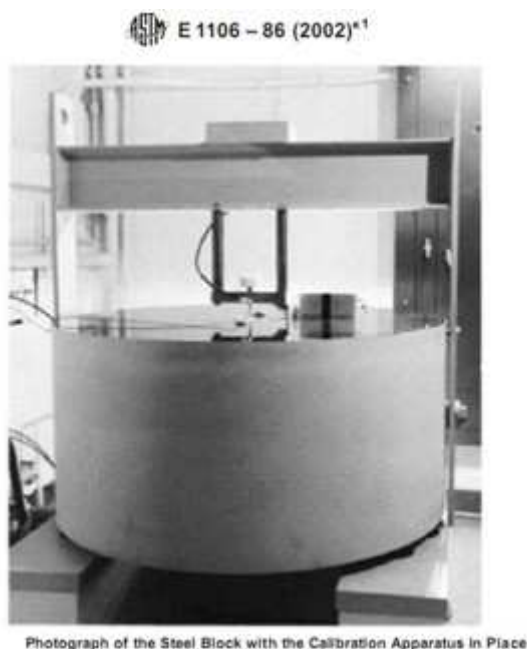


Fig. 1. Configuración de calibración según la E1106-86(2002), Hay pocas instituciones en el mundo que tienen este tipo instalaciones.

Pocas instalaciones de este tipo existen en el mundo, por lo tanto hay una búsqueda de alternativas como por ejemplo la utilización de bloques de vidrio de menor tamaño y la detección del desplazamiento por medio de un interferómetro láser como en el National Physical Laboratory del Reino Unido<sup>(1)</sup>, mientras que una propuesta de J. Kerpt<sup>(2)</sup>, si bien mantiene el enorme bloque de acero mencionado anteriormente, recurre al conocido método de reciprocidad para llevar a cabo la calibración.

b) Le sigue en orden de importancia la **norma E 1781-98 “Práctica Standard para Calibración Secundaria de sensores de AE”**. A diferencia de la E1106 la respuesta de un sensor no es comparada con la de un sensor absoluto sino contra uno de referencia surgido del procedimiento recomendado por la E 1106, que es un sensor

piezoeléctrico cónico diseñado y adoptado como referencia por el “National Institute of Standards & Technology” (NIST) estadounidense. También usa la misma instalación masiva de acero que se menciona en la norma de calibración primaria.

c) Como complemento de estas normas existe la **E 976-00** que es una “**Guía Standard para la Determinación de la Reproducibilidad de la Respuesta de los Sensores de AE**”. Esta es una guía para llevar a cabo verificaciones sobre el desempeño de los sensores en uso con la intención de establecer el grado de degradación que éstos pudieran tener debido al uso. Su misión es evaluar la sensibilidad de los sensores a la incidencia de una onda acústica y se realiza también con la ayuda de un cuerpo pero de dimensiones muchísimo más reducidas que en los casos anteriores. Deja en claro en la sección **3.1**, que esto no es una calibración de los sensores, sino un mecanismo de comparación. (Merece mencionarse aquí que una patente de W.C. Leschek<sup>(3)</sup> correspondiente a la Westinghouse Corp. propone una calibración secundaria contra un standard, pero con un bloque pequeño y utilizando un generador de ruido blanco como fuente emisora y un analizador de espectros a la salida del los receptores.)

La **E 976-00** presenta varias opciones, una de las principales <sup>(4)</sup> es un cono truncado macizo (“Beattie block”) de acero con los planos superiores e inferiores no paralelos, sino con un ángulo de  $10^\circ$ , como se ve en la Fig.2.

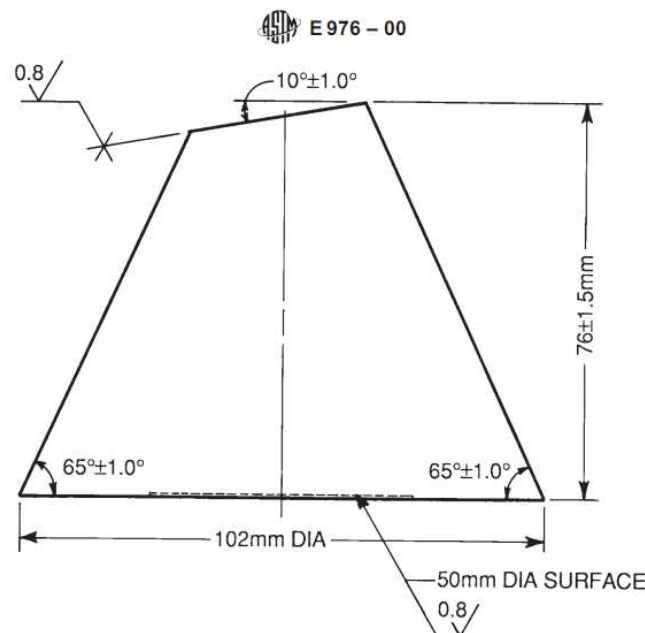


Fig.2. Plano de “Beattie block” de acuerdo a E976-00.

En la cara inferior va el emisor y en la superior el sensor que va a ser evaluado y se proponen asimismo diversos esquemas de instrumental que se muestran en la Fig.3

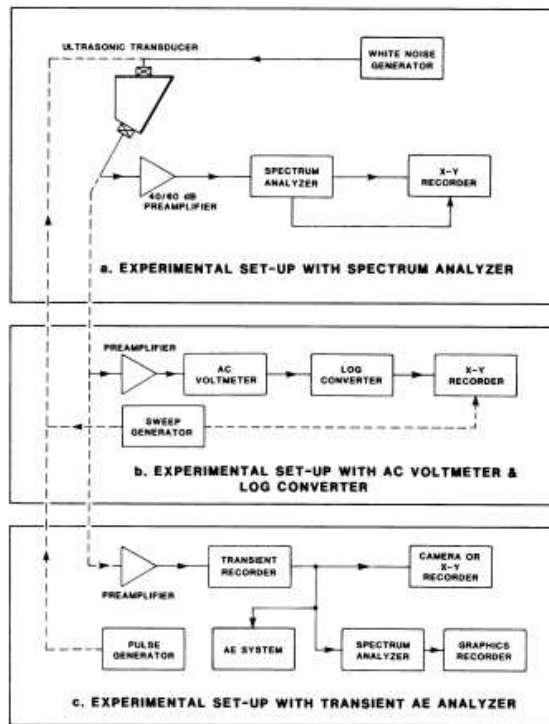


Fig. 3. Dispositivos de medición posibles según la E976-00.

Si bien el uso del generador de ruido blanco (opción **a**) disminuye la interferencia de las resonancias de modo normales se recomienda igual usar el bloque cónico como medio de comunicación entre emisor y receptor. En la opción **a**, la cadena de medición se complementa con un analizador de espectros para convertir la información en una curva de amplitud (en dB) en función de la frecuencia. La aplicación de la FFT permite la derivación de otras magnitudes del sensor en función de la frecuencia.

**La propuesta de calibración:**

Cualquiera de los procedimientos de la **E 976-00** es una comparación de sensores respecto **del valor tipo dado por el fabricante para evaluar si se encuentran cercanos a los mismos. La única** razón por la cual estos procedimientos no son considerados calibraciones es justamente porque **no hay ningún sensor de referencia involucrado.** Si la hubiera podría llegar a ser considerada como una **calibración secundaria** dentro de ciertas consideraciones de operación.

La manera en lo que esto puede ocurrir, usando el bloque y el instrumental expuesto en la parte **a** de la Figura 3, es la siguiente:

- i) Se coloca en la base grande del cono una fuente de emisión ultrasónica preparada para emitir en el rango de frecuencias de interés y cuya curva exacta de respuesta de transmisión en función de la frecuencia no necesariamente tiene que ser conocida.
- ii) Se coloca en la superficie truncada del cono un **sensor comercial cuya curva de sensibilidad en función de la frecuencia es conocida ya que ha sido calibrado por el fabricante contra patrones adecuados.**
- iii) Se mide la curva de respuesta en frecuencia del conjunto **emisor + cono** a la salida del sensor comercial calibrado.
- iv) Se reemplaza luego, en el mismo lugar, el sensor calibrado por el sensor a evaluar y se repite la operación, manteniendo idénticos valores de tensión sobre el emisor. Conociendo la respuesta en frecuencia del sistema **emisor + cono** (punto iii) y la señal medida a la salida del sensor a evaluar se puede deducir la curva de sensibilidad del mismo.

### ***Disposición experimental para la medición.***

La norma ASTM E976-00 establece tres tipos de disposiciones experimentales para la medición de la respuesta en frecuencia de sensores. Fig. 3

De las tres disposiciones se optó por el punto *a*. ***“EXPERIMENTAL SET-UP WITH SPECTRUM ANALYZER”***, es decir, con un generador de ruido blanco y analizador de espectro.

Los elementos necesarios para este setup, Fig. 4, son los siguientes: un generador de ruido blanco de banda ancha con frecuencias de corte en 10kHz y 1 MHz @ -3dB, un cono no resonante de acero descrito en la ASTM E976, cuyo plano se adjunta en la fig. 2. y un analizador de espectros desarrollado a partir de un digitalizador/adquiridor de datos adecuado y el software para crear instrumentos virtuales llamado LabView.



Fig. 4 disposición experimental de medición

### Generador de Ruido Blanco

El siguiente gráfico, Fig. 5, muestra el espectro de la salida del generador de ruido blanco. Se exhiben sus características de frecuencia de corte y atenuación según la ASTM E976-00.

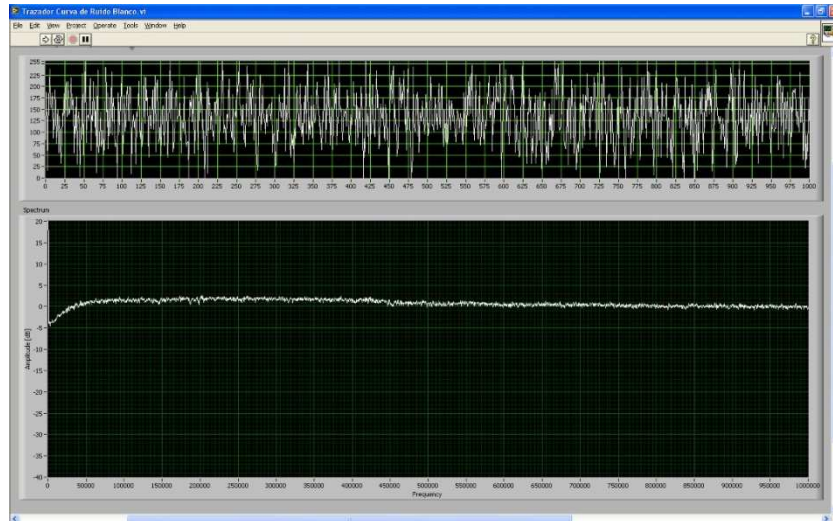


Fig. 5. Espectro del ruido blanco emitido por el generador.

En la Fig. 6 el valor RMS del ruido (recuadro negro arriba y a la derecha) supera el valor mínimo exigido por la norma que es de 1V RMS, como puede verse en la medición realizada con el digitalizador en función osciloscopio el valor es 1.97V RMS

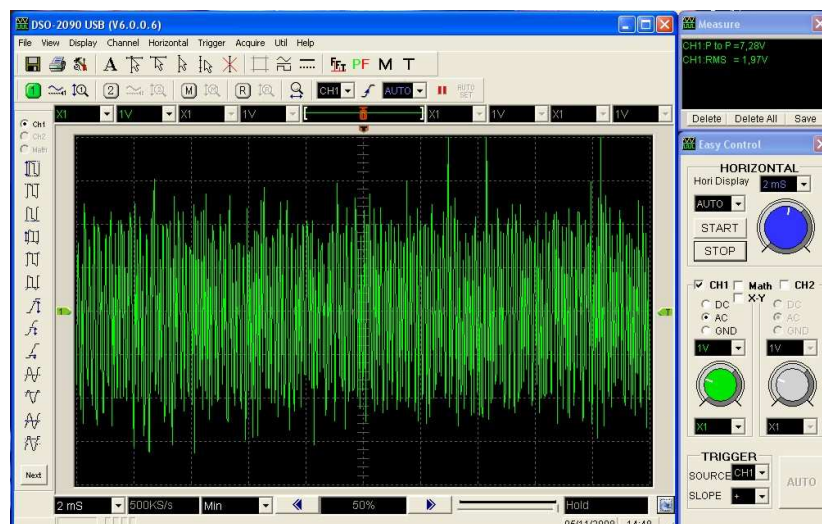


Fig. 6. Valor RMS del ruido blanco medido con el digitalizador.

### *Cono de acero no resonante según la norma ASTM E976-00*

Se torneó el cono de acero (llamado “Beattie Block” en la norma, Fig 7). Su forma cónica y sus bases alabeadas reducen la generación de modos normales dando como resultado un cuerpo no resonante. El material utilizado es acero SAE 1010 sin otras aleaciones.



Fig. 7. Cono de acero torneado según la E796-00

Fijado en la base del cono hay un cerámico piezoeléctrico que cumple la función de transductor/emisor según los lineamientos de la E976-00.

La pequeña superficie inclinada superior es el plano interface entre el cono y el sensor bajo prueba.

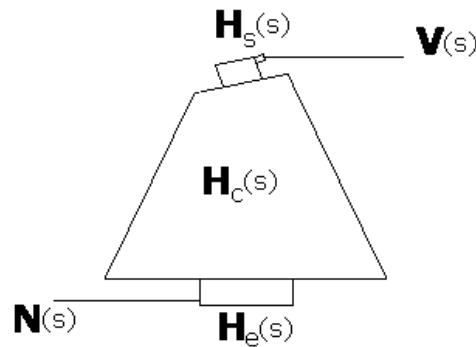
### *Preamplificador, Digitalizador y analizador de espectro:*

Se utilizó un digitalizador Hantek DSO-2090 (digital storage oscilloscope), con preamplificador incorporado de banda ancha de 40dB (50mV por división), que opera como adquiridor de datos y que se comunica con la PC que gobierna la medición por medio de un puerto USB. La PC le envía comandos al digitalizador y éste le devuelve un vector con las muestras que ha adquirido. Se utilizó el software para instrumentos virtuales LabView para controlar el digitalizador y el procesamiento de los datos.

El conjunto de funciones que dispone LabView para el análisis de señales es muy amplio, en particular aquel destinado al análisis espectral es muy poderoso y flexible.

## Teoría de la medición

Las funciones transferencia <sup>(5)</sup> de los distintos componentes de la disposición experimental se muestran en la Fig. 8:



Funciones Transferencias H de los distintos componentes del setup ASTM E976-00

Fig. 8 Distintos componentes de la Función Transferencia

En donde:

$s$  es la variable de Laplace

$N(s)$  = Ruido Blanco en [Volt RMS]

$H_e(s)$  = Respuesta emisor (transductor) en [ $\mu\text{bar}/\text{Volt}$ ]

$H_c(s)$  = Transferencia entre las caras del cono en [ $\mu\text{bar}/\mu\text{bar}$ ]

$H_s(s)$  = Respuesta del sensor bajo prueba [ $\text{Volt}/\mu\text{bar}$ ] (curva a medir)

$V(s)$  = Tensión a la salida del sensor bajo prueba [Volt RMS]

La Función transferencia global entre la tensión de salida y el ruido blanco de entrada es:

$$N(s) H_e(s) H_c(s) H_s(s) = V(s) \quad (1)$$

La ecuación de transferencia (1) es el producto de las transferencias complejas de cada componente, en términos de la variable de Laplace  $s$ . Como primera aproximación se asume que la pequeña masa del sensor bajo prueba no introduce modificaciones en el comportamiento espectral del cono.

*Primera parte: espectro de la tensión de salida del sensor patrón calibrado.*

El sensor patrón es un Physical Acoustic Corporation (PAC) modelo R15 número de serie AO97, cuya curva de calibración se entrega en el apéndice A.



Se fija el sensor patrón calibrado PAC R15 en la superficie inclinada del cono y la salida del sensor patrón se conecta al digitalizador. La ecuación transferencia resultante es:

$$N(s) H_e(s) H_c(s) H_{PAC R15}(s) = V_{PAC R15}(s) \quad (2)$$

Segunda parte: espectro de la tensión de salida del sensor bajo prueba.

Ahora se retira el sensor patrón y se fija al cono el sensor bajo prueba y la salida del sensor bajo prueba al digitalizador. La ecuación resultante es:

$$N(s) H_e(s) H_c(s) H_{SBP}(s) = V_{SBP}(s) \quad (3) \quad (\text{SBP} = \text{sensor bajo prueba})$$

Dividiendo miembro a miembro la ecuación (3) con la (2) resulta:

$$\frac{H_{SBP}(s)}{H_{PAC R15}(s)} = \frac{V_{SBP}(s)}{V_{PAC R15}(s)} \quad (3)$$

Reordenando los términos la curva buscada de sensibilidad del sensor bajo prueba es:

$$H_{SBP}(s) = \frac{V_{SBP}(s)}{V_{PAC R15}(s)} H_{PAC R15}(s) \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que en estado estacionario  $s = j\omega$  y que  $w = 2\pi f$ , entonces el módulo de la sensibilidad del sensor bajo prueba, medido en dB y en función de la frecuencia resulta:

$$H_{SBP}(f)_{dB} = V_{SBP}(f)_{dB} - V_{PAC R15}(f)_{dB} + H_{PAC R15}(f)_{dB} \quad (5)$$

La curva de sensibilidad del sensor bajo prueba  $H_{SBP}(F)_{dB}$  se obtiene como la diferencia entre los espectros medidos por el digitalizador, más la curva de calibración que entrega el fabricante con el sensor patrón.

El espectro resultante es la curva de respuesta en frecuencia del sensor bajo prueba en dB respecto de  $1V/\mu\text{bar}$  la que se grafica y guarda en un archivo especial.

*Sensibilidad del sensor como resultado de LabView:*

La curva superior de la fig. 9 es el último de los 100 frames de 1024 muestras en el dominio del tiempo, da idea de la amplitud de la señal a la salida del sensor bajo prueba. La segunda curva es la respuesta en frecuencia del sensor bajo prueba (diferencia entre la tercera y cuarta curva) que, precisamente, es la curva que se desea conocer. La tercera curva es la del sistema generador/emisor/cono guardada en el archivo en la primera parte de la medición, es siempre la misma para todos los sensores bajo prueba. La cuarta curva es el espectro de la tensión a la salida del sensor bajo prueba que es la realmente medida.

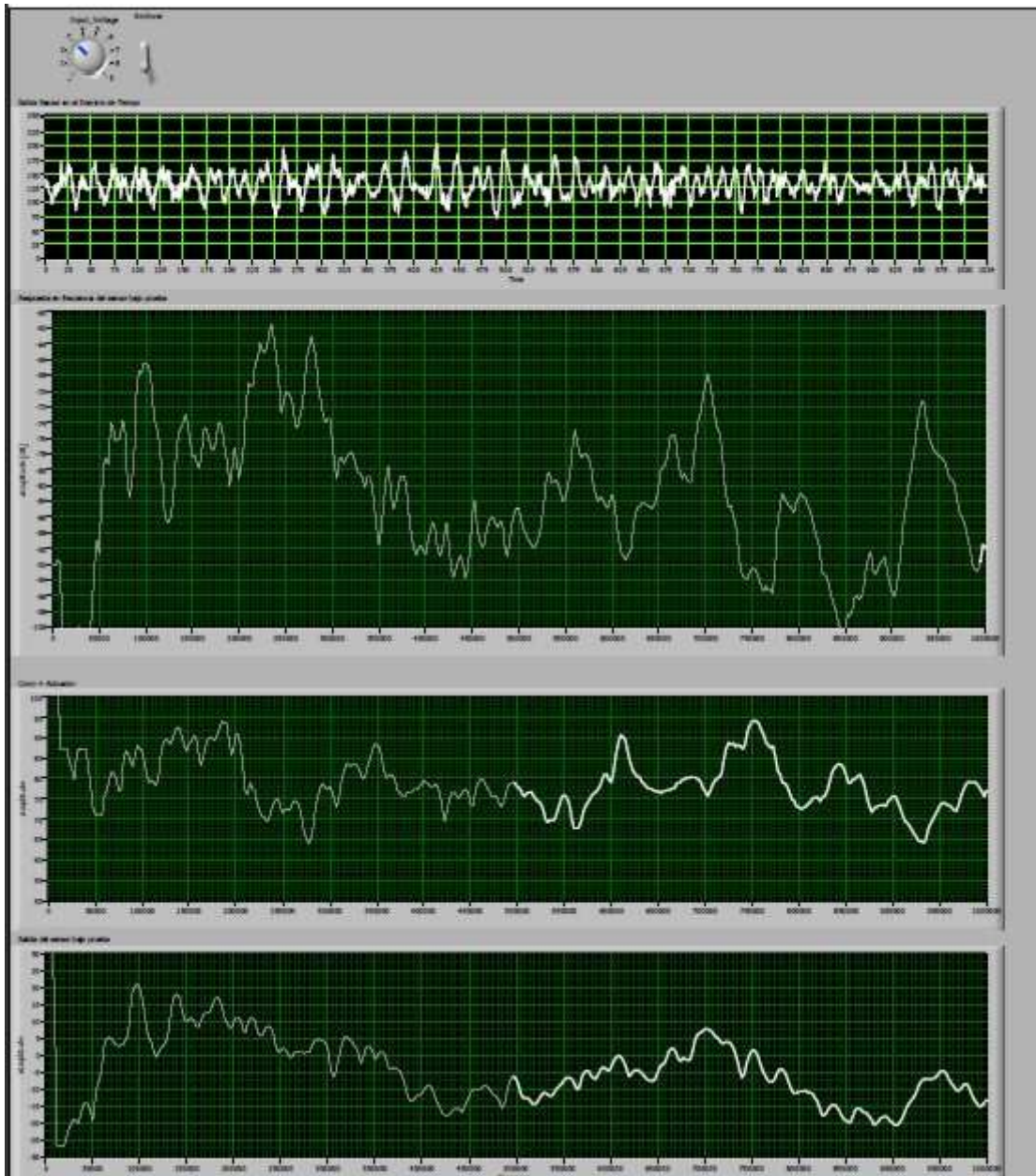


Fig 9 Curvas generadas por le LabView como resultado de la medición.

**Conclusión:**

Se ha expuesto un método de calibración secundaria que consiste en la comparación de dos sensores, según lo descrito en la norma ASTM E976-00, donde uno de ellos, denominado patrón, tiene sensibilidad conocida y calibrada por los métodos primarios o secundarios establecidos.

## ***Referencias***

- 1 P Theobald , T Esward, S Dowson and R Preston, ‘Acoustic Emission Transducers Development of a Facility for Traceable out-of-plane Displacement Calibration’. Ultrasonics. Vol 43, No 5, pp 343-350, March 2005
- 2 J Kerp, ‘Method of Acoustic Emission Sensor Calibration’. Dept. of Control and Instrumentation, FEEC, Czech Republic, 2005
- 3 W Leschek, W. C.: ‘Acoustic Emission Transducer Calibration’. United States Patent 4039767, 1977.
- 4 ASTM International, ASTM E976-00 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response1, Párrafo 4.2.1, año 2000.
- 5 K Ogata , ‘Modern Control Engineering’, Prentice Hall International, pag. 78, séptima edición 1980.

Apéndice A:

Curva de sensibilidad del sensor PAC R15 con su número de serie entregada por el fabricante:

