

EVOLUCIÓN DE UNA SONDA DE VIBRACIONES PARA SIMPLIFICAR LA EVALUACIÓN DE TRANSMISIÓN SONORA POR FLANCOS ENTRE RECINTOS

PACS: 43.55.Rg

San Millán-Castillo, Roberto¹; Domingo, Salvador²; Pavón García, Ignacio³

¹ E.T.S.I. Telecomunicación – Universidad Rey Juan Carlos, Camino del Molino, s/n - 28943 Fuenlabrada (Madrid, España).

E-mail: roberto.sanmillan@urjc.es

² Bluenoise, S.L. C/ Joanot Martorell, 7-2 46470 Catarroja (Valencia, España).

E-mail: hal@noiselab.net

³ Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada-Universidad Politécnica de Madrid (UPM) Crta. de Valencia Km-7 28031 (Madrid, España).

E-mail: ignacio.pavon@upm.es

ABSTRACT

To know vibration velocity level on a room surface is important in order to get information about flanking sound transmission between rooms. Instrumentation market offers a large amount of solutions, when it comes to sensors. When talking about accelerometers mounting techniques, the answer is less obvious. A probe evolution designed to perform this kind of measurements is shown. It is prioritized a solution that lets one a fast, comfortable, and barely intrusive data acquisition. Several probe versions and prototypes are described and compared through measurements in a real environment.

RESUMEN

Conocer el nivel de velocidad de vibración en las superficies de un recinto es relevante para obtener información sobre la transmisión sonora por flancos entre recintos. El mercado de la instrumentación ofrece una amplia variedad de soluciones en cuanto a sensores. Cuando se trata la técnica de montaje del acelerómetro, la respuesta es menos obvia. Se presenta la evolución de una sonda diseñada para ejecutar estas mediciones. Se prioriza una solución que permita una adquisición de datos rápida, cómoda y apenas intrusiva. Varios prototipos y/o versiones se describen y comparan mediante mediciones en un entorno real.

INTRODUCCIÓN

La determinación del nivel de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos se realiza a partir de procedimientos descritos en estándares internacionales de uso generalizado en esta disciplina [1]. En términos prácticos se trata de determinar el aislamiento “in situ” del elemento separador de 2 recintos.

Los resultados están destinados a la certificación del valor de aislamiento entre locales, al objeto de compararlos con los valores definidos en la legislación aplicable en cada caso [2].

Hay muchos trabajos que finalizan en esa declaración de conformidad, pero otros muchos requieren implementar un diseño que normalmente incrementa el aislamiento del elemento existente. En ese momento la información que ofrece este tipo de ensayos podría ser insuficiente.

A menos que la situación sea equiparable a la de una cámara de transmisiones sonoras, es probable que las contribuciones al nivel de recepción provengan de más paramentos que el que divide las dos salas estudiadas; es decir, de las transmisiones por flancos. Por tanto, habrá que tener en cuenta ese aporte en la concepción de un diseño de aislamiento acústico. De otra forma, podríamos errar en la selección de soluciones de control y su envergadura, así como el lugar en las que aplicarlas [3], [4].

Una de las variables relevantes para definir las transmisiones indirectas es el nivel de velocidad de vibración [5], [6], [7]. Se trata de una variable representativa de la potencia acústica radiada por una pared, o elemento de ella, y su adquisición es relativamente sencilla.

Se necesita instrumentación y métodos que nos faciliten datos para estimar la contribución de las transmisiones por flancos en las condiciones de un ensayo de aislamiento "in situ". El equipamiento generalista existente es capaz de satisfacer las necesidades fundamentales de adquisición, y análisis de variables que nos dan información sobre la contribución de los flancos. Sin embargo, optimizar su uso para esta aplicación concreta requiere la integración de varios componentes de ámbito general y su adaptación a la operativa de estos ensayos.

Esta comunicación transmite el proceso de evolución de una sonda de vibraciones diseñada para simplificar la obtención de datos relativos a las transmisiones indirectas en un recinto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen numerosos métodos e instrumentación que nos podrían proporcionar datos sobre la contribución de los flancos de un recinto al aislamiento acústico, los más relevantes son los siguientes:

1. Bloqueo de paramentos: se trata de dotar de un aislamiento muy superior a cada uno de los flancos implicados y determinar su contribución al nivel de recepción [1], [8].
2. Intensidad acústica p-p: obtención de la potencia sonora "in situ" generada por cada una de las superficies a través de la medida con una sonda clásica p-p [9].
3. Intensidad acústica p-u: similar al punto 2), empleando una sonda p-u [10].
4. Vibrometría láser: medida de los niveles de velocidad de vibración a través de interferometría láser [11], y posterior inferencia de la potencia radiada por cada una de la superficie.
5. Vibrometría clásica: similar al punto 4), empleando el acelerómetro como sensor de medida [4], [12].

Todas las propuestas planteadas son perfectamente válidas desde el punto de vista teórico, tal y como avalan las referencias asociadas. Sin embargo, centrándose en su aplicación práctica y en la ejecución en un ensayo en un entorno real, los condicionantes no son equiparables.

El objetivo principal de esta nueva propuesta es el de simplificar la evaluación de la transmisión por flancos. Para ello, se prioriza una metodología cuya adquisición de datos sea rápida, cómoda y lo menos intrusiva posible. De esta forma, su uso será de aplicación en la mayoría de casos reales y no quedará en un mero ejercicio de laboratorio. La idea es que con poco más equipamiento que el utilizado en un ensayo clásico de aislamiento acústico, sea factible obtener datos relevantes sobre la transmisión por flancos.

Analizar las propuestas de métodos e instrumentación posibles es fundamental. Bloquear cada uno de los paramentos es la solución ideal, sin embargo es utópica en los casos reales: por recursos económicos y temporales, así como de molestia para el usuario. Los métodos de

intensidad, ofrecen mucha información sobre la radiación sonora de las superficies de forma exhaustiva, pero su aplicación hace uso de instrumentación con un coste medio-alto, de personal muy cualificado, y de más medios y métodos precisos para generar datos correctos; en situaciones habituales con mobiliario su ejecución puede complicarse ostensiblemente. En el caso de la vibrometría láser, las implicaciones son similares al caso de la intensidad, pero con un coste de equipamiento en la gama alta, aunque la adquisición de datos es más fácilmente automatizable.

SOLUCIÓN PROPUESTA Y EVOLUCIÓN DE LA MISMA

De cara al cumplimiento del objetivo planteado, la medida de vibraciones clásica es la que mejor puede ajustarse en un ensayo de estas características. Las razones son las siguientes:

- Uso de sensores genéricos compatibles con la mayoría de analizadores empleados en el ensayo de aislamiento acústico.
- Coste contenido de la ampliación de equipamiento: acelerómetro mono-axial genérico y cableado sencillo.
- Acceso rápido y sencillo a cada una de las superficies límites para medir las vibraciones. Ejecución de medidas directa e inmediata.

A pesar de no medir radiación sonora directamente, su correlación con ella es de utilidad para la evaluación de las transmisiones indirectas [4], [12]. Dentro de esta técnica, encontramos multitud de posibilidades. Nos centraremos en: el sensor y técnica de montaje.

Con una aproximación muy simplificada, es posible definir la relación entre el nivel de vibración para ondas de flexión de una pared y radiación sonora, mediante la siguiente ecuación:

$$(1) \quad W_{radiada} = S\rho_0c_0\sigma\langle v^2 \rangle$$

La magnitud de medida de interés es el nivel de velocidad de vibración *rms* promediado temporal y espacialmente, en el eje perpendicular a la pared, que es la componente que más relevancia tiene en la determinación de la energía sonora radiada por una superficie [5], [13], [14]. La eficiencia de radiación (σ) podrá ser estimada en función de la composición de las superficies.

El sensor más cómodo para realizar medidas in situ es un acelerómetro piezoeléctrico con inyección de corriente. En acústica arquitectónica las temperaturas no son extremas, y no hay razón para el empleo de acelerómetros capacitivos. De esta forma se elimina de la cadena de medida cualquier amplificador de carga, y se puede emplear cable coaxial genérico y de coste bajo para la realización de las mediciones.

Se debe seleccionar un sensor que satisfaga nuestras necesidades de análisis. Por un lado debemos obtener datos desde 50Hz hasta 5000Hz, que es en rango de interés en medidas de aislamiento. Por otro, la sensibilidad del acelerómetro marcará el rango dinámico de medida de las oscilaciones de la pared. A pesar de no esperar desplazamiento amplios como en otras aplicaciones, sí se debe tener capacidad para medir vibraciones de muy bajo nivel, por lo que se requiere una sensibilidad alta y un nivel de ruido de fondo bajo. Un peso reducido respecto a un elemento constructivo típico, es algo a contemplar. En conclusión: un sensor de precisión.

Se selecciona un acelerómetro piezoeléctrico [®]ICP mono-axial con una sensibilidad de 100mV/g, rango de medida desde los 0.01 $ms^{-2}rms$, frecuencia de resonancia en 25kHz, y un peso de 40gr.

Hasta este punto se ha conseguido una solución en una gama de coste bajo, ligero, de pequeño tamaño, y compatible con un alto porcentaje de cadenas de medida dedicadas al aislamiento acústico. Para la consecución de una metodología rápida, cómoda y no intrusiva, hay que centrarse en la técnica de montaje del acelerómetro, pues será el factor más influyente.

Las posibilidades son variadas, y sus efectos están perfectamente descritos [15]. Sin embargo, las características particulares de la aplicación propuesta limita el uso de muchas de ellas. En un laboratorio es perfectamente posible emplear un montaje con anclaje rígido, que es el más conveniente. Ahora, tratar de reproducirlo en recintos reales convertiría el método en el más costoso y lento de todos los propuestos. Además, de esta forma se estaría lejos de disponer de una técnica poco intrusiva; más bien todo lo contrario y se retrocedería en el objetivo inicial.

Se podría emplear cera para el montaje de los acelerómetros. Esta técnica es obviamente mucho menos intrusiva que la descrita anteriormente. Su ejecución se convierte en tediosa y poco repetible por la necesidad de reponer la cera constantemente durante el ensayo. En locales reales en uso, es complicado ir dejando residuos de cera en las paredes, que además son difíciles de retirar completamente en multitud de ocasiones [14].

Vistos todos estos argumentos, parece que la técnica que mejor se ajusta a los objetivos es el empleo de una sonda. Con el uso de la sonda se tiene acceso más rápido de todos lo posible a las superficies del recinto, y se trata de la manera menos intrusiva de adquirir datos. Bien es cierto que se debe contar con una limitación en la respuesta en frecuencia del acelerómetro, ya que la frecuencia de resonancia del sensor se verá disminuida de forma considerable.

Una vez se decide la línea de actuación en cuanto a la técnica de montaje, se reflexiona sobre la operatividad del ensayo y la mejor forma de llevarlo a cabo. Será necesario realizar un muestreo amplio en las paredes del recinto, resultando un número de mediciones considerable. Así la ejecución de la medida ha de ser lo más cómoda posible.

El uso directo del acelerómetro y la sonda conectada al mismo, será sólo válido para mediciones puntuales y poco exhaustivas. En este caso se debe garantizar cierta repetibilidad y comodidad en la realización de las mismas. Por ello se decidió actuar en este punto con diferentes diseños que mejorarán este punto:

Modelo original: se trata de un cilindro metálico con 64mm de diámetro y 57mm de longitud, que permite un agarre más estable del conjunto acelerómetro y sonda. En su interior se suspende el acelerómetro mediante muelles metálicos para permitir absorber pequeños cambios en el soporte de la sonda y evitar tensiones no deseadas del posicionamiento de la sonda sobre la pared; generadas por las irregularidades o materiales de las superficies, por la localización incómoda del punto de medida, o por la diferente fuerza aplicada por el ejecutor de la medida. La sonda se completa con una varilla metálica de 60mm de longitud que será la que conecte el acelerómetro con la superficie de interés. Ver *Figura 1* y *Figura 2(1)*.

Modelo evolucionado: a partir del modelo anterior, y una vez realizados multitud de trabajos, se ve conveniente la necesidad de mejorar el diseño en la parte del agarre. Se dota a la sonda de una estructura mucho más ergonómica que redunde en una mayor comodidad a la hora de realizar las mediciones. El conjunto disminuye de tamaño, permitiendo el agarre completo con una mano. Además la suspensión del sensor se mejora mediante amortiguadores de silicona más rígidos que los anteriores, en hasta 4 puntos, mejorando la posición del acelerómetro en todo momento. Esta primera versión mejorada la se denomina “modelo evolucionado intermedio con menor ajuste de varilla”. Ver *Figura 1* y *Figura 2(2)*.



Figura 1. A la izquierda, fotografía de la primera versión de sonda de vibraciones, “modelo original”.

A la derecha, fotografía de la versión de sonda de vibraciones actual. Con pequeñas modificaciones, se corresponde con todos los modelos que contengan en su descripción “modelo evolucionado”.

Modelo evolucionado + varilla modificada: se trata de una mejora del modelo evolucionado mediante la mejora del ajuste de la varilla al acelerómetro, convirtiéndolo en excelente; mucho más rígido y solidario con el sensor. El objeto de esta modificación es dotar a la sonda de una mayor estabilidad en la medida que redunde en una mayor repetibilidad de las mismas. En este caso se abren dos caminos: el primero, únicamente ejecutar el ajuste al acelerómetro (“modelo evolucionado + ajuste de varilla mejorado”); y el segundo, añadir en el extremo de la sonda que entra en contacto con la pared con un disco metálico (diámetro 20mm, y espesor de 3mm), de cara a encontrar un contacto con la superficie mayor y más cómodo en la ejecución de las mediciones (“modelo evolucionado (3) + varilla modificada”). Ver *Figura 1* y *Figura 2(3, 4)*.

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En una primera fase, se realizan una serie de mediciones para comprobar el comportamiento de las distintas versiones de la misma. A pesar de existir algunas referencias al respecto [4], se enfrentan dichas mediciones con otras metodologías clásicas que proporcionan un mejor montaje, en la medida de las posibilidades disponibles: montaje con cera, y montaje con apoyo simple directo y manual del acelerómetro.

Las mediciones de nivel de velocidad se llevan a cabo en un aula de laboratorio de la Universidad Rey Juan Carlos. La excitación de las superficies se realiza mediante un campo sonoro difuso generado en una sala anexa, común para todos los experimentos llevados a cabo. El nivel de presión sonora promedio en la sala emisora es de 100dB, y el aislamiento de la solución es débil, con un R_w de 17dB. Se adquieren los datos en diferentes puntos del paramento común de ambos recintos, descritos a continuación:

- Pared: elemento principal, pared doble de cartón yeso. 2 puntos (A y B).
- Puerta: elemento secundario, panel de madera. 2 puntos (C).
- Cristal: elemento secundario, integrado en la puerta. 1 punto (D).

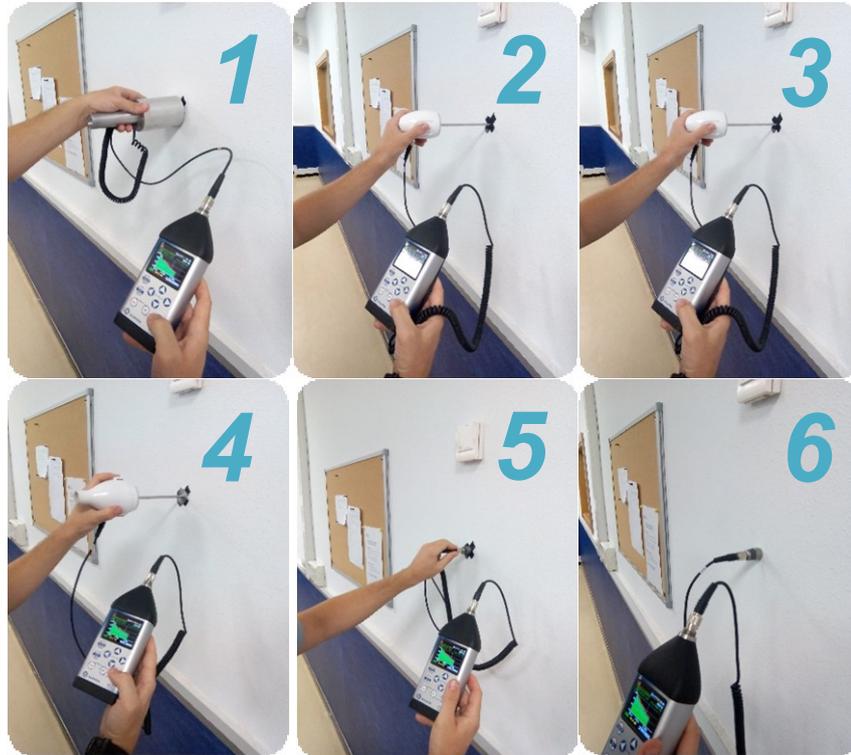


Figura 2. Fotografía de la ejecución de mediciones con distintos modelos de sonda y acelerómetro llevados a cabo: 1) modelo original, 2) modelo evolucionado intermedio, con menor ajuste de varilla, 3) modelo evolucionado (2) + ajuste de varilla mejorado, 4) modelo evolucionado (3) + varilla modificada, 5) acelerómetro con apoyo simple, 6) acelerómetro con cera.

Se seleccionan diferentes materiales para tratar de obtener la incidencia de cambios en este aspecto. Además, se realizan 3 mediciones consecutivas en cada uno de los puntos, tanto para ruido de fondo como durante la excitación con campo acústico, de cara a tener una primera impresión sobre la repetibilidad de las mediciones según el material y el tipo de sonda. Se mantuvo el mismo operador.

Las mediciones se realizan con una configuración ambiciosa de cara a disponer de datos para éste y futuros trabajos de desarrollo: FFT, 1601 líneas, rango de frecuencias hasta 5kHz, tiempo de medida 6s. El número total de registros con el que trabajamos finalmente fue de 210, contabilizando las mediciones descritas, junto a otras de control interno del experimento. El equipamiento empleado se enumera a continuación. Todos sus elementos se clasifican como de precisión y su uso está extendido en el ámbito profesional:

- Fuente sonora, modelo Qohm, de la firma Qsources.
- Amplificador de potencia, modelo Qam, de la firma Qsources.
- Analizador en frecuencia, modelo SVAN977B, de la firma Svantek.
- Acelerómetro, modelo SV 80, de la firma Svantek.

Los resultados de las mediciones realizadas se presentan a continuación.

En el caso del nivel de velocidad de la *Figura 3*, se observa como los métodos alejados de un montaje fijo infraestiman los valores de nivel. A excepción del primer prototipo de sonda que justamente produce el efecto contrario. Se ilustra con uno de los puntos de medida.

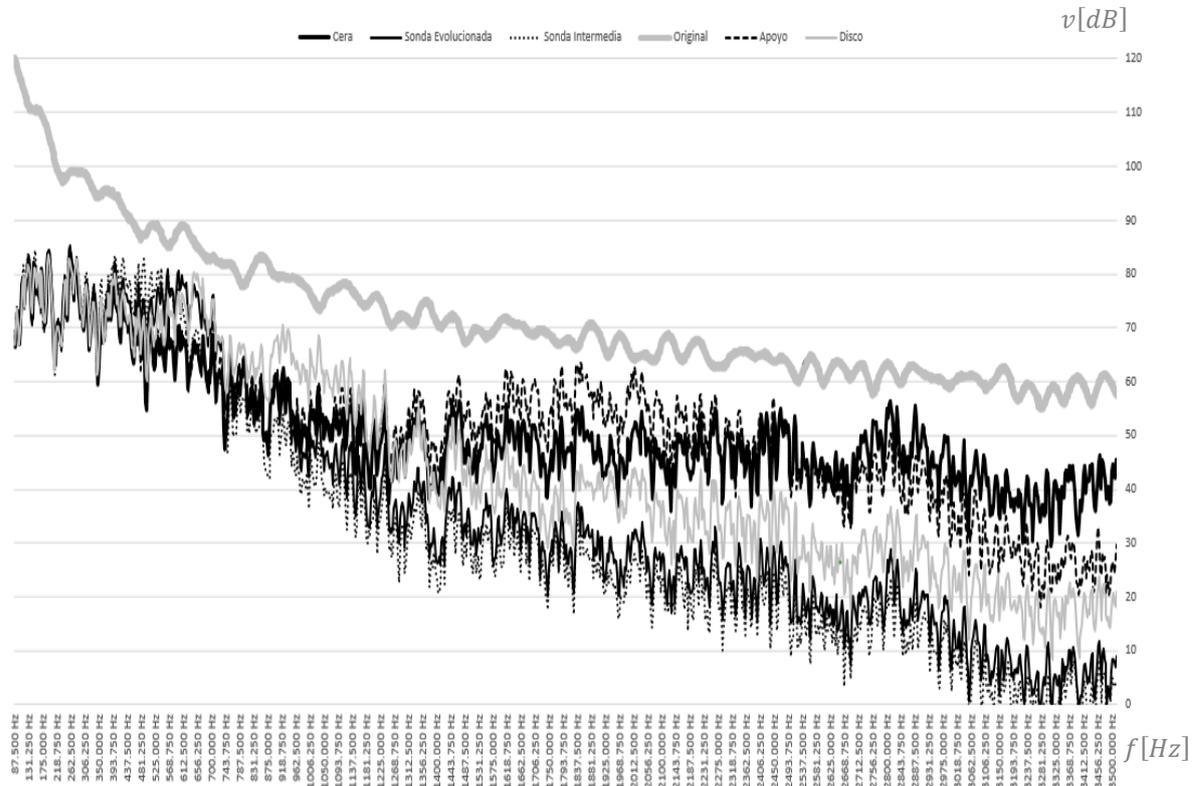


Figura 3. Comparativa de nivel de velocidad promediado obtenido en el punto A de la pared con cada uno de los montajes del sensor, en función del frecuencia.

La comparativa de nivel se realiza poniendo como referencia el montaje que según la normativa y la teoría es el más estable de todos los enfrentados en este experimento: acelerómetro con cera. De cara a determinar la contribución de los flancos al nivel de recepción, todas las mediciones se realizarán con el mismo sensor, y dado que se evalúan las relaciones relativas [3], está desviación en el apartado del nivel puede ser menos determinante en la detección de contribuciones.

Más relevancia tiene la dispersión de las medidas en los puntos de medida. Se ha optado por comparar el promedio de las desviaciones típicas en todos los puntos para cada uno de los montajes. Los resultados se aprecian en la *Figura 4*. Claramente se observa como 2 de las sondas se comportan parejas respecto al método de referencia, mientras otras 2 nos ofrecen resultados claramente mejorables.

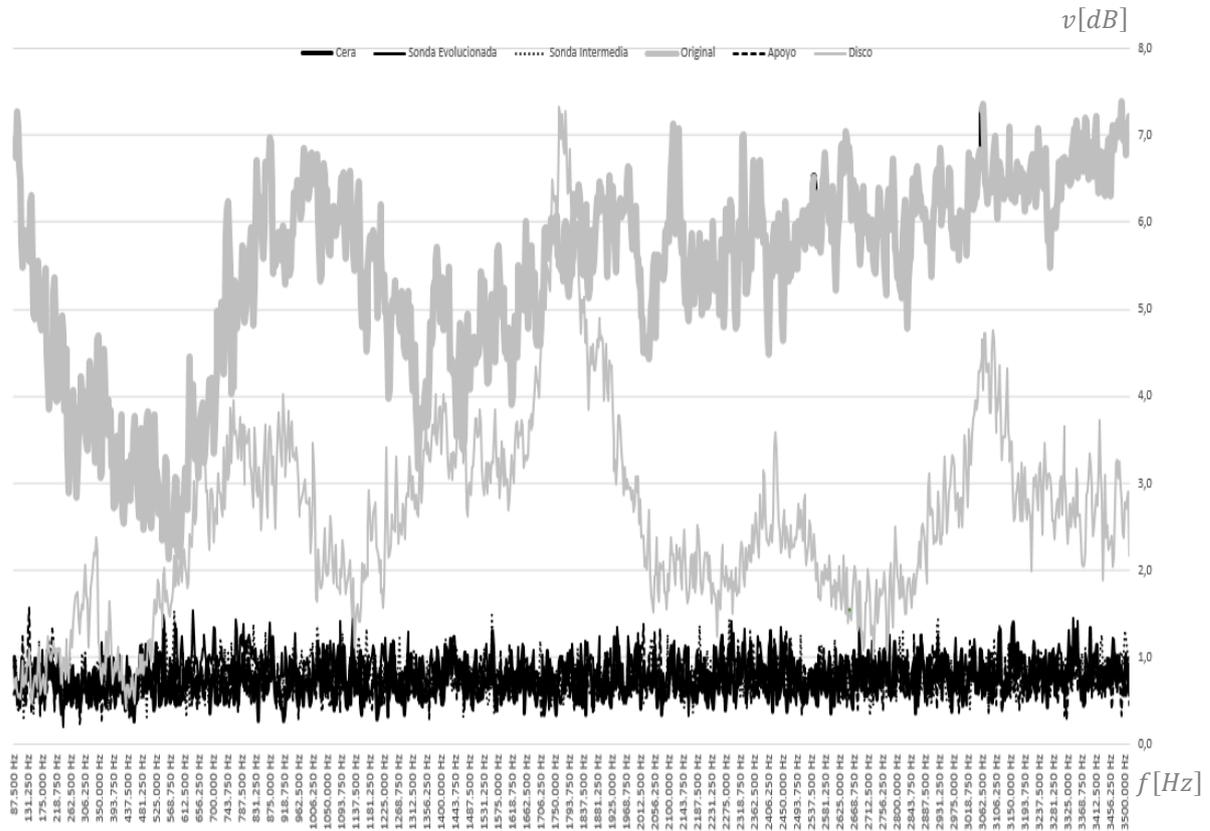


Figura 4. Promedio de la Desviación típica (σ) de las mediciones realizadas en todos los puntos del experimento, con cada uno de los montajes del sensor, en función de la frecuencia.

CONCLUSIONES

Llegados a este punto se pueden distinguir dos tipos diferentes de conclusiones: referentes a la operativa de la sonda, y referentes a la calidad de las señales obtenidas por este sistema.

En cuanto a la operativa del sistema, en la realización de los ensayos se puede constatar la mejora en la eficiencia de los recursos empleados en el ensayo con sondas de este tipo:

- Se **reduce el tiempo de ensayo**, puesto que no se necesita aplicar cera durante la realización del ensayo, ni corregir caídas del sensor por la adherencia de la cera. Se estima que esta metodología de referencia incrementa el tiempo de ensayo en un 40% por punto de medid, respecto al empleo de la sonda.
- Se **mejora la intrusión de la adquisición** de vibraciones, eliminando cualquier tipo de residuo como la cera, o montajes y/o anclajes más complejos y que requieren mayores recursos temporales e incurrir en costes adicionales.
- Se incrementa la **facilidad de manejo**, puesto que el agarre es mucho más ergonómico y el gesto de la muñeca es más relajado.
- Se amplía el **acceso a zonas complejas**, como pueden ser falsos techos, mediante la pequeña varilla, mejorando las posibilidades de muestreo.

Hablando de la calidad de las señales obtenidas, se concluye:

- Se **infravalora el nivel de velocidad**, en todo el rango de frecuencia. Este efecto es mucho más relevante a medida que aumenta la frecuencia. A pesar de disponer de una excitación por vía aérea de nivel suficiente, el aislamiento y la capacidad de vibración

de los parámetros es mucho menor con el incremento de la frecuencia. Por tanto los niveles son menores. La necesidad de transmitir la vibración por la varilla hace disminuir su nivel. A esto se une la respuesta en frecuencia de los sistemas con sonda, cuya resonancia se suele situar en torno a 1kHz, y como se comprueba con estos datos, su infravaloración de los niveles a partir de ella. Empleando la misma sonda en todas las superficies, nos interesan los niveles relativos, de modo que este hecho en sí mismo es un obstáculo salvable.

- Se **contiene la desviación estándar** de las mediciones, frente a un método más robusto como el de la cera. La sonda intermedia y actual tienen valores muy similares a los del método con cera, con desviaciones máximas de 0.8dB. Teniendo en cuenta un análisis de resolución elevada como es la FFT, se pueden equiparar los métodos en lo que a repetibilidad se refiere; más aún sin la necesidad de obtener valores absolutos.

A través de este experimento se observa la evolución de una sonda de vibraciones diseñada para una aplicación específica. Se obtiene una señal con calidad razonable y se mejora significativamente la operativa de la adquisición de datos. Así, se alcanza el objetivo de simplificar las mediciones para evaluar las transmisiones por flancos en un recinto.

A partir de los datos y conclusiones obtenidas en este proyecto, se plantean nuevas líneas de actuación: mejorar la representatividad de los valores de señal adquiridos, tratando de corregir la problemática encontrada; y optimizar en paralelo la operativa de los ensayos.

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 16283-1:2014. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.; 2014.
- [2] Ministerio de Fomento, Gobierno de España. Código Técnico de la edificación (CTE). Documento básico HR, Protección frente al ruido (DB-HR); 2009.
- [3] Anierte Pérez, José Antonio y Domingo Bets, Salvador. "Método matricial para la ingeniería de aislamiento acústico". 41º Congreso nacional de Acústica, Tecnia Acústica León; 2010.
- [4] Rosao, V. et Carreira, A. "Use of vibration measurements to determine the most suitable locations to improve sound insulation in buildings". The 21st Congress on Sound and Vibration (ICSV), Beijing/China; 2014.
- [5] UNE-EN ISO 10848-1. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 1: Documento marco; 2007.
- [6] UNE-EN ISO 10848-2. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 2: Aplicación a elementos ligeros cuando la unión tiene una influencia pequeña; 2007.
- [7] UNE-EN ISO 10848-3. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 3: Aplicación a elementos ligeros cuando la unión tiene una influencia importante; 2007.
- [8] UNE-EN ISO 140-4:1999. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "in situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales; 1999.
- [9] UNE-EN ISO 9614-1:2010. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la intensidad del sonido. Parte 1: Medición en puntos discretos.; 2010.
- [10] N.B. Roozen, et al., Determining radiated sound power of building structures by means of laser Doppler vibrometry. *Journal of Sound and Vibration* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.02.029i>
- [11] H-E de Bree, V.B. Svetovoy, R. Raangs, R. Visser. "The very near field; theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field", ICSV11, St. Petersburg; 2004



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS**

- [12] Rodrigues Andrade, C.A. Estudio vibro-acústico e intensimétrico de las transmisiones por flancos en edificios; 2009. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid.
- [13] Cremer, L., Heckl, M., Petersson, Björn A.T. Structure-Borne Sound; 2005.
- [14] Hopkins, C. Sound insulation. Elsevier/Butterworth-Heinemann; 2007.
- [15] Serridge, M., Licht, T.R. B&K. Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers; 1987.