

## EVALUACIÓN Y DETECCIÓN DE PÉRDIDAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO EN EDIFICACIÓN

PACS. 43.58.-e

Fernández Comesaña, Daniel <sup>1,2</sup>; García Escribano, Dolores <sup>1</sup>; de Bree, Hans-Elias<sup>1</sup>; Holland, Keith <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Microflown Technologies  
Tivolilaan 205  
6824 BV  
Arnhem  
Holanda  
E-Mail: [fernandez@microflown.com](mailto:fernandez@microflown.com)

<sup>2</sup> Institute of Sound and Vibration (ISVR)  
University Road, Highfield  
S017 1BJ  
Southampton  
Reino Unido

### ABSTRACT

It is common to find isolation losses in constructive elements without having a clear idea about what is causing the leakage. Due to recently introduced measurement techniques, like Scan and Paint, it is possible to characterize the sound field by scanning close to the surface in a very accurate and fast way. This technique generates 3D maps of the pressure, intensity or particle velocity variations through the whole measured surface. Several results are presented to probe the potential and viability of the usage of techniques such as Scan and Paint applied to acoustic leakage detection in edification.

### RESUMEN

Es frecuente encontrar importantes bajas de aislamiento acústico en determinados puntos de elementos constructivos sin que necesariamente haya una causa apreciable. Gracias a nuevas técnicas de medida recientemente introducidas, como "Scan & Paint", es posible caracterizar el campo sonoro mediante barridos cerca de cualquier superficie de una forma rápida y precisa. Esta técnica permite la generación de mapas 3D de las variaciones de presión, intensidad o velocidad de partícula a lo largo de la superficie medida. Diversos resultados son presentados para avalar la viabilidad y potencial del uso de técnicas como "Scan & Paint" aplicadas a la detección de fugas acústicas en edificación.

### 1. INTRODUCCIÓN

"Scan & Paint" es una nueva técnica de medida desarrollada para mapear campos sonoros estacionarios [1-4]. El tiempo necesario para llevar a cabo las medidas es minimizado consiguiendo a su vez máxima flexibilidad. Básicamente, un plano virtual bidimensional próximo a la fuente sonora es escaneado con un transductor y simultáneamente grabado en video. Los mapas sonoros pueden ser creados combinando la información posicional del sensor con la señal adquirida por el mismo. La velocidad de partícula normal a la superficie o la presión

sonora pueden ser caracterizadas usando sondas Microflown, también llamadas sondas PU (presión-velocidad de partícula). Combinando estas dos magnitudes es obtenida la intensidad acústica de una forma directa, sin aproximaciones, que abarca todo el espectro audible (20 Hz a 20 kHz).

## 2. TEORÍA

### 2.1. Velocidad de Partícula

La velocidad local de un fluido en movimiento provocada por el desplazamiento de una superficie en contacto con dicho fluido es conocida como velocidad de partícula. Por consiguiente, esta magnitud es proporcional al desplazamiento de la fuente excitante. La velocidad de partícula puede ser considerada positiva o negativa dependiendo de la dirección del movimiento del flujo. Por lo tanto, podemos definir como

$$\vec{u}(t) = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $\partial \vec{\xi}$  es el desplazamiento de una partícula del flujo, o simplemente el desplazamiento de un volumen infinitesimal. La ecuación 1 puede ser relacionada con la presión considerando solamente la velocidad de partícula normal a la fuente

$$u_n(t) = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial \vec{n}} d\tau \quad (2)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad del aire y  $p$  es presión sonora. Existen dos métodos diferentes para medir la velocidad de partícula: directamente, usando un Microflown, siendo capaces de medir todo el espectro audible con precisión; o indirectamente, calculando el gradiente de presión entre dos micrófonos en una reducida parte del espectro, esto es

$$u_n(t) \approx -\frac{1}{\rho_0 d} \int_{-\infty}^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau \quad (3)$$

donde  $d$  es la distancia entre los dos micrófonos, lo cual condicionara la banda frecuencial donde esta aproximación podrá llevarse a cabo.

### 2.2. Intensidad

La intensidad instantánea  $I(t)$  de una onda sonora es la cantidad de trabajo que un elemento de un fluido ejerce sobre las partículas adyacentes a él [5]. Es obtenido como el producto instantáneo entre presión y velocidad de partícula ( $I(t) = pu$ ). Es expresado en Vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). La intensidad  $I$  es normalmente definida como el promedio temporal de  $I(t)$  y por lo tanto, la energía media transmitida a través de una unidad de área normal a la dirección de propagación,

$$I = \langle I(t) \rangle_T = \langle pu \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T pu dt \quad (4)$$

Debido a su dependencia intrínseca con la velocidad de partícula, existen también dos métodos para medir intensidad acústica: directamente usando una sonda P-U (presión-velocidad de partícula); o indirectamente con una sonda P-P (dos micrófonos de presión). Una interesante discusión acerca de las limitaciones de los dos métodos puede encontrarse en la referencia bibliográfica [6].

Utilizando una sonda de intensidad P-U el espectro de intensidad acústica normal a la superficie es obtenido tomando la parte real de la potencia espectral cruzada entre la señal temporal de presión y velocidad de partícula  $G_{pu}$  [7], esto es

$$I(\omega) = \text{Re}\{G_{pu}(\omega)\} \quad (5)$$

Asumiendo que el campo sonoro está excitado por oscilaciones armónicas podremos obtener una expresión que relaciona la intensidad con magnitud y fase de los distintos componentes,

$$I = \frac{1}{2} \text{Re}\{pu^*\} = \frac{1}{2} \text{Re}\{p_0 u_0 e^{j(\phi_p - \phi_u)}\} = \frac{1}{2} p_0 u_0 \cos(\phi_p - \phi_u) \quad (6)$$

### 3. INSTRUMENTACIÓN Y MONTAJE

Una sonda P-U estándar con acondicionador de señal y tarjeta de sonido Microflown Technologies fueron utilizados para llevar a cabo las medidas presentadas en este artículo. Además, dos altavoces, Monacor TXA-110 y Beringer Eurolive B205D, y una cámara Logitech WebCam Pro 9000 fueron necesarios para excitar las superficies evaluadas y grabar en video el proceso de medición. En la figura 1 se puede ver varias fotos del montaje.



Figura 1 - Fotos del montaje: superficie estudiada y equipo de medición (izquierda), entorno de medida (superior derecha), parte exterior de la sala (inferior derecha)

### 4. METODOLOGÍA

Las medidas llevadas a cabo tienen como objetivo caracterizar la radiación de distintos paneles y estructuras para detectar la existencia de elementos constructivos con pérdidas de aislamiento o cualquier tipo de “fugas” acústicas. Para ello se llevaron a cabo medidas de presión sonora, velocidad de partícula e intensidad acústica, con el fin de encontrar las ventajas y desventajas de usar distintos tipos de mapeado.

La nueva técnica de medida comúnmente conocida como “Scan & Paint” fue utilizada para adquirir la información acústica necesaria y para elaborar los mapas sonoros mostrados a lo largo de este artículo. Este nuevo método es un derivado de las técnicas de escaneo que

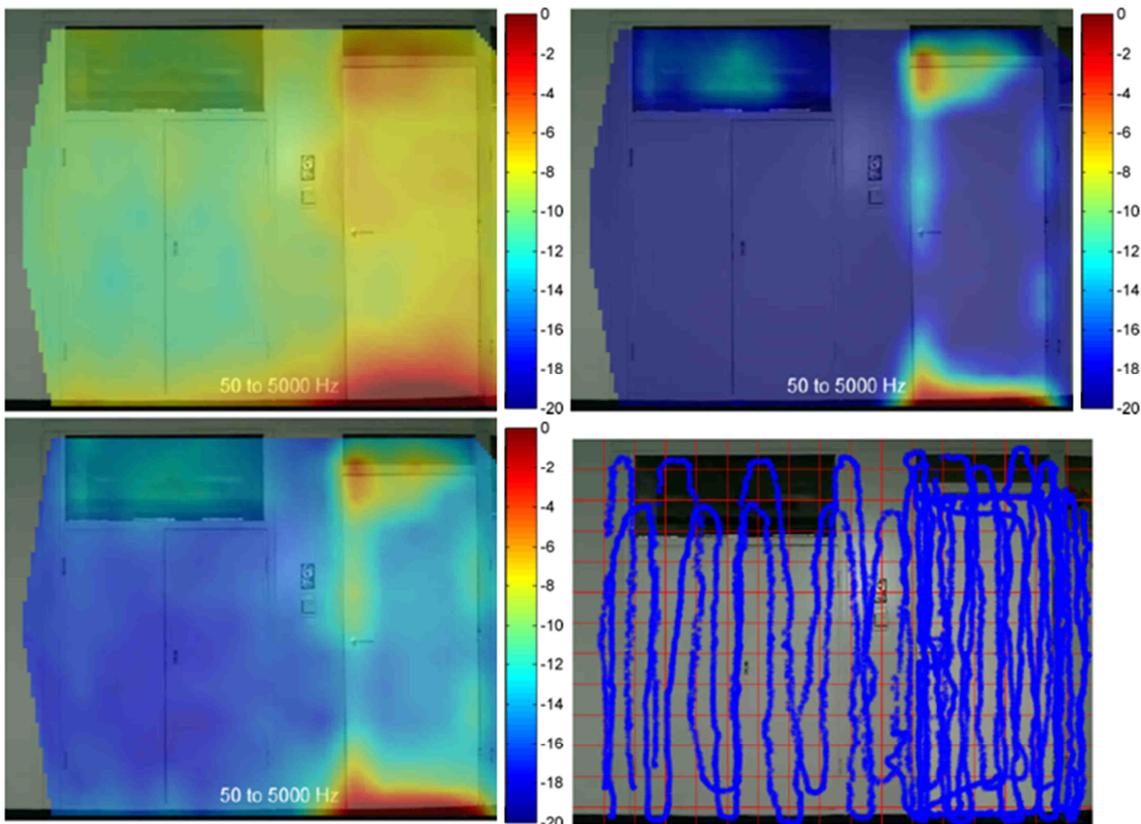
durante años han estado en el mercado, pero que hasta ahora han sido poco utilizadas debido al alto coste de los sistemas de posicionamiento de los sensores, y sus altas limitaciones a la hora de evaluar distintos entornos.

“Scan & Paint” se basa en combinar la señales adquiridas con la sonda de intensidad PU con la información posicional obtenida a través de una video cámara. Por tanto, la sonda es movida manualmente mientras un video es grabado. A continuación, la localización es llevada a cabo valiéndose de herramientas de procesamiento de imagen basadas en localización de objetos por color. Por último, los distintos mapas sonoros de presión, velocidad o intensidad pueden ser producidos para estudiar nuestras regiones de interés.

Para excitar los materiales constructivos y detectar perdidas de aislamiento, dos altavoces fueron situados a más de 4 metros de la superficie evaluada en la habitación anexa a donde se realizaron las medidas. Ruido blanco fue utilizado para conseguir excitar por igual las distintas partes del espectro, pudiendo detectar las frecuencias más críticas a lo largo de todo el rango audible.

## 5. RESULTADOS

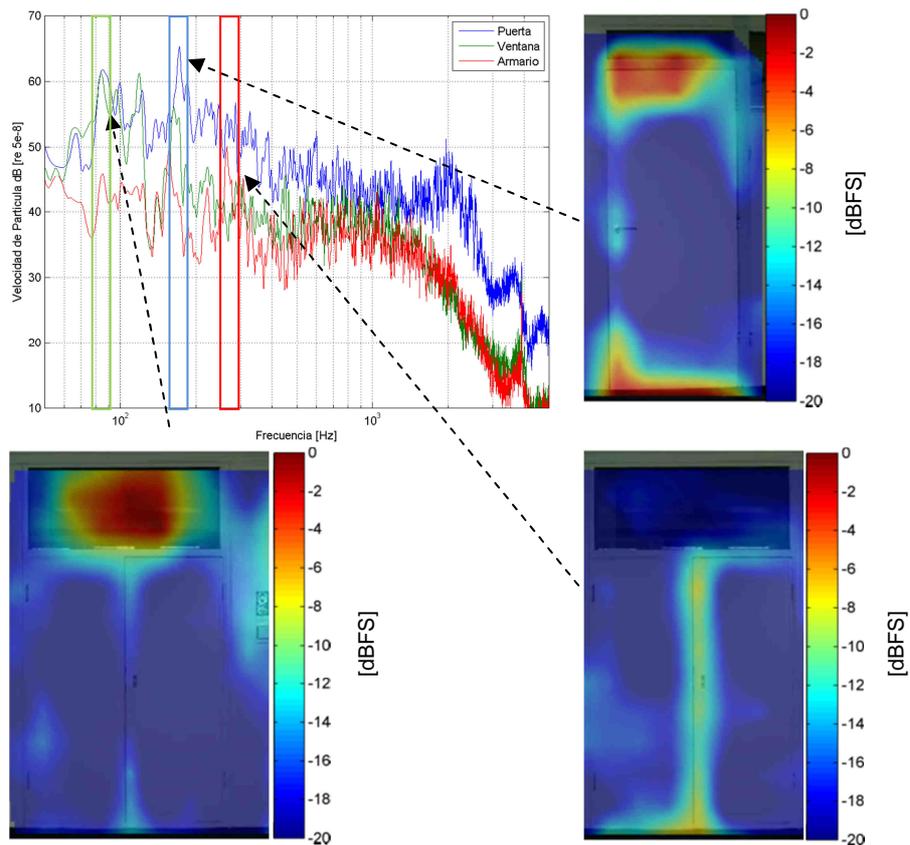
Primeramente, los mapas de presión, velocidad e intensidad son presentados en la figura 2 con el correspondiente recorrido producido por el rastreo de la sonda durante las medidas. Estas figuras fueron obtenidas tras evaluar 3 medidas realizadas durante 3 minutos aproximadamente cada una de ellas. Todos los resultados han sido normalizados (dBFS) para poder comparar las diferentes figuras. La resolución espacial de los resultados es totalmente ajustable, y para el caso estudiado ha sido acotada a un punto de malla cada 0.15 metros en una superficie total de 3.2x1.4 metros. Por lo tanto, gracias al método de escaneo usado (“Scan & Paint”) podemos llevar a cabo en menos de 10 minutos la toma de información en 200 puntos diferentes.



**Figura 2 - Mapas acústicos de presión (superior izquierda), velocidad de partícula (superior derecha) e intensidad acústica (inferior derecha); y mapa de las posiciones recorridas durante los escaneos con malla virtual de medida (inferior derecha) [dBFS]**

Analizando los resultados presentados en la figura anterior, es claro que con los mapas de velocidad de partícula es mucho más fácil localizar donde están las fuentes de ruido (una discusión más extensa es presentada en la siguiente sección). Por ello, el resto de resultados como los espectros de los puntos más críticos o la visualización de las resonancias de los distintos elementos constructivos serán dados usando mapas de velocidad de partícula.

En la figura 3 se presentan los espectros de los tres elementos constructivos analizados: la puerta, el armario y la ventana (fuente dominante en bajas frecuencias). Cabe destacar el potencial que nos aporta el uso de técnicas de escaneo incluso para visualizar las distintas resonancias de los elementos constructivos. A continuación, la figura 3 presenta distintos mapas de las frecuencias resonantes más significativas.



**Figura 3 – Espectro de velocidad para los principales elementos constructivos (superior izquierda) y mapas de velocidad de partícula con 10 Hz de ancho de banda centrados en distintas frecuencias de resonancia: puerta (superior derecha), ventana (inferior izquierda) y armario (inferior derecha)**

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Mapas de presión, velocidad e intensidad

Uno de los principales objetivos de este artículo es encontrar un método que nos permita localizar con precisión donde están las principales pérdidas de aislamiento de elementos constructivos. De acuerdo con [4], “Scan & Paint” es un eficaz técnica de escaneo que ha sido validado con éxito contra medidas punto por punto en diferentes entornos acústicos.

En la figura 2 son presentados tres diferentes mapas adquiridos simultáneamente, así como el rastro de la sonda de intensidad PU detectada a través del procesado del video. Dada la alta densidad de puntos en nuestra área evaluada, podemos establecer una resolución espacial lo

suficientemente alta como para detectar problemas hasta en las uniones entre la puerta y el marco. Los resultados presentados presentan puntos virtuales de medida cada 0.15 m.

Es ahora importante plantear que es lo que queremos visualizar para detectar “fugas acústicas”. Estudiando mapas de presión en un entorno no anecoico podemos encontrar altos niveles de presión en lugares donde no necesariamente tengamos una fuente de ruido. En la parte superior izquierda de la figura 2 podemos ver como el mapa de presión solo nos aporta información aparentemente relevante de los máximos del mapa pero no podemos sacar ninguna conclusión clara debido a la variabilidad de la presión a través del campo sonoro. El rango dinámico de la presión es bastante limitado y por ello la diferencia entre el mínimo valor medido y el máximo es aproximadamente 12 dBs.

Por otro lado tenemos el mapa de velocidad de partícula (parte superior derecha de la figura 2). Es destacable el potencial de este método debido a la claridad con la que podemos observar como el marco de la puerta es nuestro principal problema junto a la ventana que se encuentra en la parte superior izquierda de la imagen. Mapeando la velocidad normal a la superficie no tenemos problemas con las reflexiones que nos puedan llegar de la sala en sí, el carácter vectorial de la velocidad es mucho más potente que la presión (escalar) a la hora de detectar fuentes sonoras en campo cercano. Además, el rango dinámico de la velocidad es mucho mayor que el de la presión, consiguiendo mejores niveles de señal a ruido a lo largo del mapa.

Por último, el mapa de intensidad es presentado en la parte inferior izquierda de la figura 2. Por definición (ver la ecuación 4), la intensidad acústica puede entenderse como un promedio entre presión y velocidad. No es de extrañar pues, que el mapa obtenido sea una especie de resultado intermedio entre los citados anteriormente. El mapa aporta más información que sólo usando presión, pero también existe más esparcimiento de la energía alrededor de los máximos, por tanto, la resolución del método es menor que evaluando velocidad de partícula.

## 6.2. Evaluación modal

Una vez localizadas las distintas fuentes de ruido podemos analizar sus espectros para encontrar las frecuencias de resonancia más problemáticas. En el caso estudiado, el problema se ha dividido en tres elementos diferentes: puerta, ventana y armario.

Estudiando el espectro de los distintos elementos presentados en la figura 3, se puede claramente apreciar como la puerta es dominante prácticamente a lo largo de todo el espectro. Sólo a bajas frecuencias su espectro de velocidad es comparable al producido por la ventana. En el espectro podemos observar tres diferentes frecuencias de resonancia claras por su diferencia de más de 6 dBs con los valores colindantes y por no coincidir con máximos de los otros espectros.

Un mapa acústico de la puerta es presentado en la parte superior derecha de la figura 3 para la frecuencia de resonancia más significativa (165 Hz). En el mapa es claro que tanto la parte superior de la puerta como la inferior son los problemas principales que se deberían mejorar para reducir el nivel de ruido medido en la sala estudiada.

El segundo fuente de ruido más problemática es la ventana superior izquierda. Estudiando el espectro medido y los mapas para distintas frecuencias es posible evaluar el comportamiento modal de dicha estructura. Es claro que los primeros modos son los que radian energía más eficientemente, siendo clara la tendencia decreciente en los valores de velocidad medidos a lo largo del espectro.

En la parte inferior izquierda de la figura 3 podemos apreciar como el modo más energético encontrado a 87 Hz presenta un máximo de velocidad en el centro del panel, sin ningún otro máximo a lo largo de la estructura. Es por ello que se puede deducir que este es el primer modo de vibración de la ventana.

A pesar de que el armario no es una de las fuentes que podamos considerar problemáticas, debido a su baja influencia comparado con el ruido aportado por la puerta o ventana, es una

estructura que nos permite validar nuestro estudio modal. Tanto para la ventana como la puerta son estructuras cuyas frecuencias de resonancia dependerán de los materiales de los que están contruidos, y de la manera que están fijados sus distintos bordes. Sin embargo, el caso del armario vacío es diferente ya que fácilmente podemos calcular los modos de resonancia de la cavidad interior de dimensiones (1.30 x 0.45 x 1.70 m).

En la parte inferior derecha de la figura 3 podemos apreciar cómo obtenemos máximos de velocidad a lo largo de la junta central de unión para frecuencias alrededor de 265 Hz. Considerando el largo del armario podemos afirmar que este máximo está relacionado con el segundo modo axial de la cavidad, justo cuando la longitud de onda se iguala con el largo del armario, y por tanto el máximo recae en el medio de la junta ( $344 / 1.3 = 264.6$  Hz).

## 7. CONCLUSIONES

Un método rápido y preciso es propuesto para la evaluación de pérdidas de aislamiento en materiales constructivos basado en la visualización de mapas de velocidad de partícula adquiridos usando la nueva técnica de medida y software "Scan & Paint". Ha sido demostrado que la utilización de sondas PU es necesaria para detectar "fugas acústicas" y pérdidas de aislamiento en todo tipo de entornos, incluidas salas con altos tiempos de reverberación. Gracias a la alta resolución espacial conseguida con las mediciones, es posible llevar a cabo un análisis modal de las distintas estructuras evaluadas, visualizando con facilidad sus distintas frecuencias de resonancia.

## 8. REFERENCIAS

- [1] E. Tijs, H.-E. de Bree, and S. Steltenpool. "Scan & paint: a novel sound visualization technique". In *Internoise*, Lisboa, Portugal, 2010.
- [2] H.-E. de Bree, J. Wind, E. Tijs, and A. Grosso. "Scan&paint, a new fast tool for sound source localization and quantification of machinery in reverberant conditions". In *VDI Maschinenakustik*, Stuttgart, Alemania 2010.
- [3] D. Fernandez Comesana, J. Wind and H-E. de Bree. "A scanning method for source visualization and transfer path analysis using a single probe". In *SAE International*, 2011.
- [4] D. Fernández Comesaña, J. Wind, A. Grosso, K. Holland, "Performance of P-P and P-U intensity probes using Scan & Paint", *ICSV*, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [5] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. Spon Press, 3rd edition, 1982.
- [6] F. Jacobsen and H.-E. de Bree. "A comparison of two different sound intensity measurement principles". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3):1510–1517, 2005.
- [7] F. J. Fahy. *Sound Intensity*. E&FN Spon, London UK, 1995.