

Técnicas experimentales y resultados relevantes asociados, en el rango de audio

Antonio Moreno, J. García Zaragoza, Jaime Pfretzschner, Miguel Romera*,
Carlos de la Colina, Francisco Simón, Pedro Cobo, Salvador Santiago
Instituto de Acústica del CSIC, Serrano 144, Madrid 28006

**actualmente en Instituto de Física Aplicada*

PACS: 43.20, 43.28, 43.55

Resumen

Se describen en este trabajo un conjunto de técnicas experimentales desarrolladas que, bien por su interés intrínseco, bien por el apoyo investigaciones prioritarias en su momento, o bien por los resultados a que han conducido estimamos que merecen un espacio propio en esta conmemoración. Suelen funcionar bien en el rango de audio pero pueden utilizarse fuera del mismo cuando se cumplen las restantes hipótesis de trabajo.

Summary

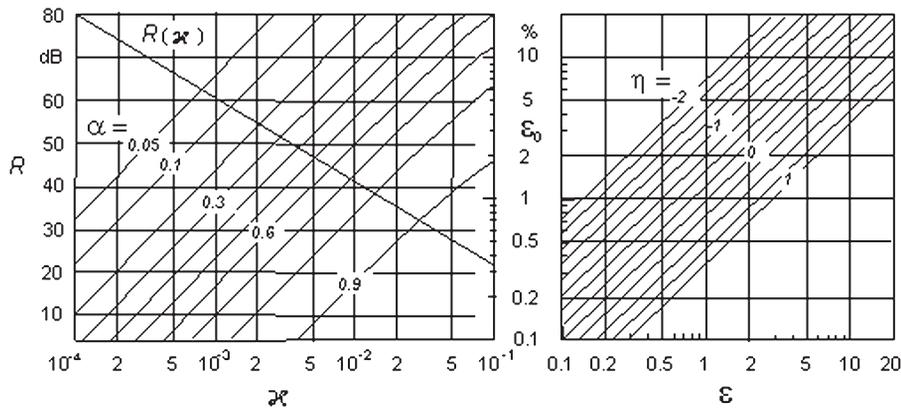
This work describes a set of experimental techniques developed at the Instituto de Acústica CSIC, that either have intrinsic interest or have facilitated relevant results in variety of questions such as errors in standing wave tube measuring methods, reverberation time measurements, speech directivity of humans, vibration transmissibility measurements based on pressure level anarmorphycal relations, impulse response of linear and not lineal acoustic systems are cases included. Though these techniques are within the audio-frequency range can be used in other situations provided the validity conditions are accomplished.

Introducción

Enumeramos aquí un conjunto de genuina creación y desarrollo propios, que continúan siendo de cierta utilidad y que han dado lugar a resultados relevantes. Su desarrollo se ha hecho necesario en el curso de investigaciones de las líneas temáticas prioritarias, a cuyo progreso han contribuido decisivamente. Hoy constituyen un acervo de importancia del Instituto de Acústica, que creemos pueden ser de utilidad general.

Coefficiente de absorción en tubo de ondas estacionarias

En el estudio de materiales y medios porosos se observaron desviaciones sistemáticas entre los valores previsibles y los medidos en un tubo de ondas estacionarias disponible en el laboratorio. Se encontró que estas desviaciones eran debidas a las perdidas del tubo por la finitud de la impedancia de las paredes. Se introdujo un parámetro de pérdidas en función del cual se pueden expresar los errores cometidos manteniendo las fórmulas mas sencillas derivadas del *método de la tangente hiperbólica*, según denominación de P. M. Morse, que usa la relación de onda estacionaria medida con el material y la distancia del primer mínimo. Se evitaba así la laboriosidad de métodos como el de Lippert, o el de Beranek recogido en una norma ASTM, manteniendo unos márgenes de error controlados.



Se aclaró y amplió un criterio empírico de la norma DIN para este tipo de mediciones en tubo de Kundt, que establecía un mínimo de 40 dB para la relación de onda estacionaria del tubo. Hace solamente un par de años, se ha consensuado una norma ISO para estas mediciones que se pretende para mediciones de gran precisión, lo que ha obligado a un alto grado de complejidad, quizá comparable a la de los métodos de Lippert y Beranek citados. En estudios de desarrollo de materiales, nuestro método da casi siempre resultados suficientemente precisos. Solamente el método de dos micrófonos le aventaja en rapidez, pero pierde precisión para valores bajos del coeficiente de absorción.

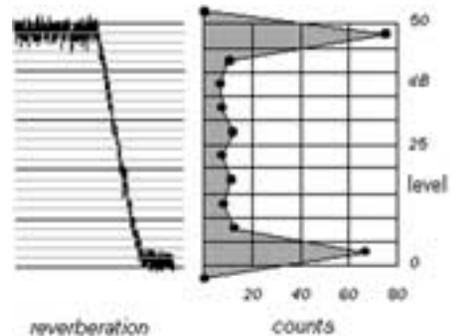
En la figura se reproduce uno de los ábacos principales que permite conocer el error ϵ , en función de la relación de onda estacionaria R y del coeficiente α a medir (estimable), a través de los parámetros de pérdidas a , de las posiciones del primer mínimo a_j en unidades $l/4$, y del parámetro de errores h , partiendo del error para uno conocido ϵ_0 (para $a_i=1$, por ejemplo, que es fácilmente calculable):

$$\eta(\alpha_1, a_i, a_j) = \ln \frac{\alpha(\alpha_1, a_j, \alpha)}{\alpha(\alpha_1, a_i, \alpha)}$$

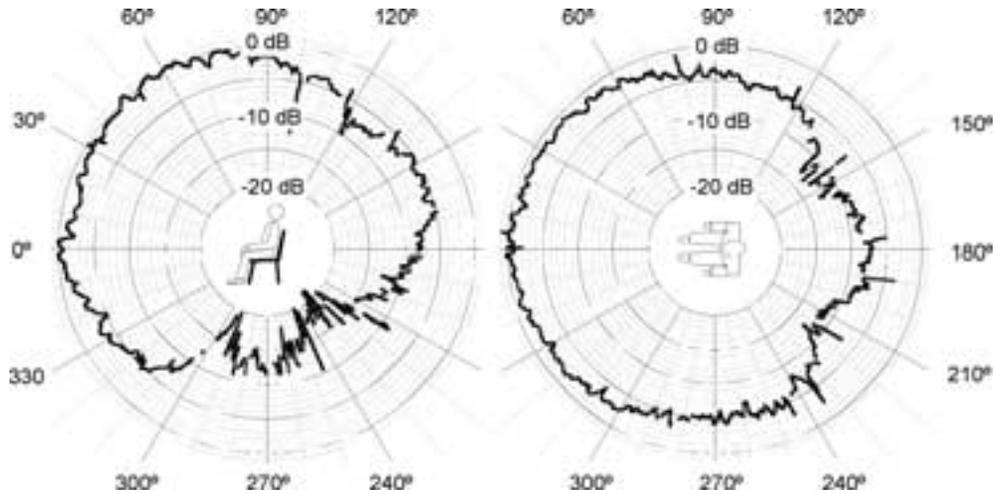
Tiempo de reverberación

En el periodo dominante de la instrumentación analógica, la medición del tiempo de reverberación necesitaba de ábacos transparentes lo que implicaba influencias subjetivas nada despreciables. Desarrollamos un método objetivo mediante de un analizador estadístico de niveles de uso común, en aquellos años, en la medición de percentiles de ruido ambiental. Su fundamento es el carácter de variable aleatoria gaussiana de las fluctuaciones de nivel en relación a la recta de mejor ajuste por mínimos cuadrados a la curva de caída del nivel en el proceso de la reverberación. Este algoritmo ha sido usado posteriormente en instrumentos de medición objetiva del tiempo de reverberación de la firma B&K (analizador de edificios 4418, y mas recientemente otros analizadores bicanal como p.e. el 2144)

La figura que sigue muestra comparativamente, para un caso, la evolución del nivel en un registrador gráfico y los valores asociados dados por el analizador estadístico. La función de relación del tiempo de reverberación con el numero de cuentas del analizador estadístico es una recta de pendiente $s=60/(r \cdot \Delta L \cdot n)$, donde r es el numero de cuentas por segundo del reloj, ΔL el intervalo de niveles de clasificación del analizador y n el número de procesos de reverberación acumulados.



En un buen número de procesos acústicos es clave la medición de valores altos del tiempo de reverberación, fuera de los rangos de la instrumentación convencional. Esto nos llevo al diseño y realización de un dispositivo que, por las características de adaptabilidad y prestaciones, entre las que hay que destacar la automatización e implementación de una lógica operativa, se realizo en tecnología digital. Se tomó como base el uso de señales de excitación aleatorias de banda ancha, de forma que de una única adquisición se puedan obtener, por postprocesado, los valores en las distintas bandas de frecuencia de interés. El sistema identifica de manera precisa, por el método del simplex, las tres zonas principales de la señal: intervalo estacionario, zona de caída o reverberación propiamente dicha y ruido de fondo. A continuación se determina el valor del tiempo de reverberación, mediante un procedimiento de regresión o mediante un algoritmo estadístico como el descrito anteriormente. (Paralelamente y



por razones semejantes se ha abordado el problema de la medición de tiempos de reverberación ultracortos mediante técnicas avanzadas de procesado de señal, en donde la tf. de Wigner no ha dado, por el momento, resultados satisfactorios mas que para casos demasiado simplistas).

Anamorfismos de nivel

Todavía en la década de los setenta dominaba la instrumentación analógica lo que condicionaba, sin duda, un gran número de técnicas experimentales relacionadas por un lado con la y por otro con las propiedades acústicas de materiales. En el estudio de transmisibilidad de vibraciones, por ejemplo, era una precaución adicional el evitar que la probeta receptora se desprendiera del montaje, invalidando la medición. En la directividad y respuesta en frecuencia de emisores, para mantener un grado de rigor suficiente, se estaba limitado a excitaciones con tonos puros lo que no daba información directa de como se emitían señales complejas tales como música, palabra etc. Se hacía también necesario mantener constante el nivel de excitación. Estas magnitudes en general presentan relaciones de magnitudes ligadas a la energía o lo que es equivalente a relaciones entre los valores rms de las respectivas señales. Encontramos que precisamente entre los valores rms había relaciones muy estrechas de la forma temporal que, observadas en intervalos temporales muy cortos eran difícilmente discernibles. Contempladas en la escala total del tiempo aparecían manifiestamente diferentes, y esta diferencia podía “medir” la variación de la magnitud en estudio. Por esto las llamamos relaciones de anamorfismo de nivel.

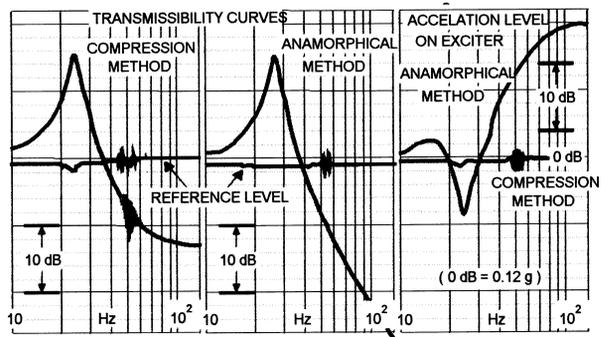
Este concepto dio lugar a una serie de técnicas experimentales en temas tan variados y de interés en nuestras líneas de investigación, tales como la directividad de personas en

la emisión de palabra, la directividad de emisores electroacústicos en la emisión de música o de palabra, la calibración secundaria de transductores (particularmente micrófonos), transmisibilidad de sistemas antivibratorios etc.

Para realizar la comparación se diseñaron y construyeron varios modelos de instrumentos analógicos que denominamos anamorfímetros de nivel, que fueron objeto de una patente (nº454429 GOSF-CSIC)

Esta técnica permitió la medición continua de la *directividad de personas* hablando, magnitud de la que se tenían solamente valores puntales en determinados ángulos, medidos por Dunn y Farnsworth. Hoy son corrientes las referencias a nuestro trabajo, en libros de acústica arquitectónica tanto en el extranjero (M. Barron, *Auditorium acoustics and architectural design*, E&FN Spon, 1993), como nacionales (A. Carrión, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Ed. UPC, 1998). La figura que sigue reproduce la directividad, de un individuo, obtenida para la palabra completa en los planos horizontal y vertical.

En la misma línea se estudió la *directividad de sistemas electroacústicos* complejos para la emisión de música o palabra, concluyendo en una propuesta de método de caracterización de la directividad de estos sistemas que evita el injustificado uso de



tonos puros. Se desarrolló también un método objetivo para la **calibración de protectores auditivos**, con ventajas sobre el método que usa la cabeza artificial y el subjetivo con personas.

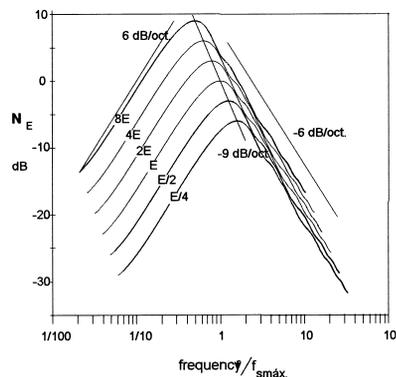
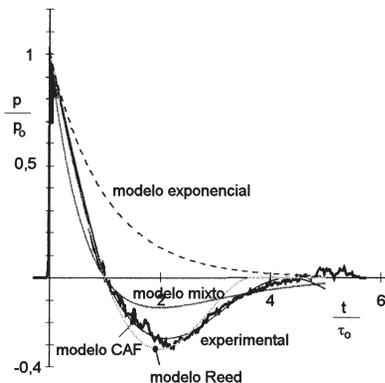
Este método de relaciones de anamorfismo de nivel, se mostró particularmente eficaz en la determinación experimental de la **transmisibilidad de vibraciones** de sistemas de un grado de libertad que son los más interesantes en acústica de edificios. La razón de esta eficacia reside en un aumento del rango dinámico efectivo del proceso, por una mejor distribución de la energía en las tres partes del fenómeno resonante: antes, durante y después de la resonancia. Con él se consigue una mejor definición de las curvas de transmisibilidad como se muestra en la figura siguiente, que compara este método con el tradicional de compresión, en sus dos primeras partes. La energía absorbida por el sistema se mantiene constante durante todo el proceso: en la resonancia el nivel de excitación disminuye drásticamente mientras que fuera de la resonancia el máximo nivel lo absorbe la parte donde se aplica la excitación.

Estas relaciones de anamorfismo dieron lugar a un **método de calibración secundaria de micrófonos**, de una simplicidad, robustez y fiabilidad que hoy continúa siendo de una utilidad manifiesta. Además es fácilmente aplicable a otros tipos de transductores en donde se pueda compensar la interacción mutua entre ellos, como es el caso de hidrófonos y acelerómetros de dimensiones e impedancias acústicas parecidas. En una variante actual usamos señales impulsivas y técnicas de procesamiento de señal, que oculta el origen en relaciones de anamorfismo.

Respuesta impulsional

Se han desarrollado señales impulsivas de corta duración aptas para obtener la respuesta impulsional de recintos mediante explosiones de pequeños cartuchos, de manera que espectralmente cubran el rango de frecuencias de interés. Paralelamente, para estudios en maqueta se ha desarrollado una fuente y detonador con relaciones de escala de aproximadamente 1/10, mediante descargas de condensadores a baja tensión puede obtenerse mediante impulsos de corta duración. En conjunto constituyen una pareja de señales gemelas, idóneas para estudios comparativos a escala real y en maquetas con relaciones de escala 1/10.

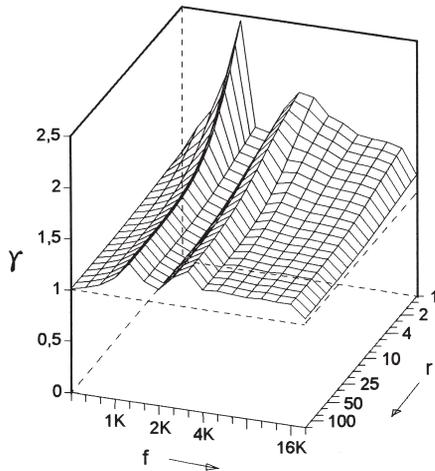
Una propiedad de primera importancia es la omnidireccionalidad de estas señales en todo el rango de frecuencias emitido. Se han caracterizado las formas temporales y espectrales en función de las masas explosivas y enunciado relaciones de similitud amplias, en base a las cuales se ha obtenido una forma canónica de la firma temporal de las explosiones diferente de las aproximaciones propuestas por otros autores, coherente con las características reales y con los contenidos espectrales.



Se han encontrado y explicado caracteres de alinealidad, manifiestos en los espectros y en proceso de propagación. Por su importancia en estudios experimentales de propagación exterior, o en barreras deben contabilizarse para obtener datos fiables de las características acústicas estudiadas. Por analogía en el rango lineal admitimos que, la propagación exterior de ondas esféricas, en medios disipativos, puede representarse mediante la ecuación: $I = I_0/R^{2\gamma} e^{-mr}$, donde I_0 es e^m veces la intensidad en $r=1$, m la absorción en el aire por metro recorrido y γ un parámetro de alinealidad. Se obtiene una muy buena aproximación de los resultados experimentales con la ecuación anterior, en las bandas de tercio de octava significativas del espectro de estas explosiones, tomando para m los valores de absorción en el seno del aire, medios en la banda de 1/3 de octava correspondiente, hoy objeto de una norma internacional, y para γ los valores de la figura que sigue:

Este parámetro indica cómo las explosiones disminuyen progresivamente su alinealidad al aumentar la distancia del punto de observación y cómo las frecuencias más energéticas poseen un mayor grado de alinealidad. En experiencias de medición de pérdidas por inserción en barreras, por ejemplo, no se puede ignorar este comportamiento alineal si se quieren evitar errores considerables por aplicar hipótesis de propagación dentro del rango lineal.

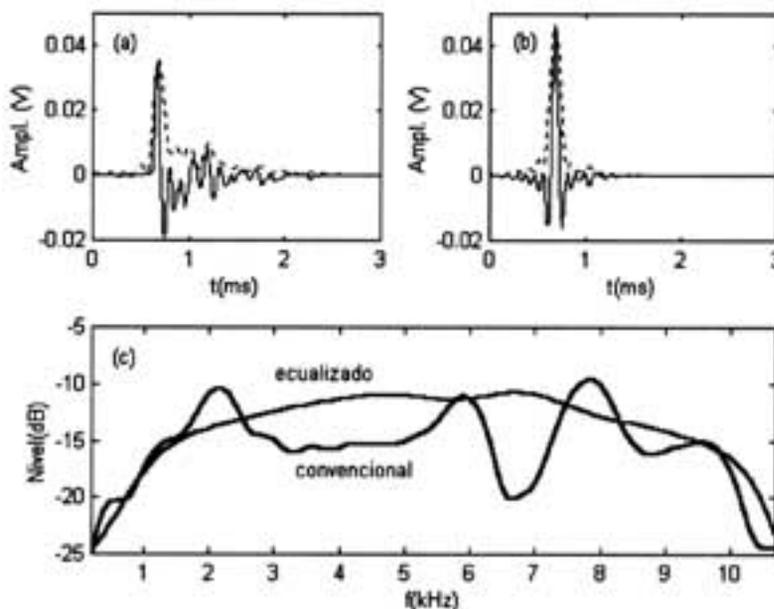
Dentro del rango lineal se ha desarrollado un método para obtener impulsos de muy corta duración. Se fundamen-



ta en el denominado método de *síntesis de forma de onda arbitraria*, conformación de pulsos, o ecualización paramétrica que puede ser aplicado a cualquier tipo de transductor (piezoeléctrico, electrodinámico,...) en régimen lineal. Su aplicación presupone el conocimiento de la respuesta impulsional del transductor y tal vez su aplicación más importante sea para configurar pulsos de mínima longitud (máxima resolución temporal de objetos). Recientemente hemos ampliado su uso a procesos de propagación en líquidos, particularmente en agua. La figura que sigue muestra un ejemplo correspondiente a un altavoz encapsulado en una pequeña esfera para a estudios de modelización del campo acústico en

el entorno de la estación Puerta de Atocha, mediante la radiación de pulsos de máxima resolución (con espectro de amplitud coseno y espectro de fase cero). El resultado de la síntesis es la radiación de un pulso de menor longitud que la respuesta impulsional del radiador (compárense las envolventes). El efecto de la ecualización es aún más claro cuando se comparan los espectros.

Otro método destacado para obtención de la respuesta impulsional al que hemos contribuido con avances interesante ha sido el *método Adrienne, aplicado a la obtención in situ de características intrínsecas de barreras anti-ruido*. Se ha realizado dentro del Proyecto Europeo SMT MAT1-CT94049, con el objetivo principal de obtener datos fiables de la absorción y aislamiento acústico de barreras, tanto en laboratorio como in situ, desde 200 Hz hasta 5 kHz, en bandas de tercio de octava: precisión de ± 1 dB en las magnitudes $DL\alpha$ y DLr de la norma EN 1793. El método *Adrienne* que combina el método MLS con la técnica de substracción de señal resulta muy atractivo para medidas in situ, por su inmunidad al ruido de fondo. La frecuencia más baja fiable del método depende esencialmente de la separación altavoz-micrófono-barrera. La optimización de esta geometría, que conduce al cálculo de la frecuencia más baja fiable, es una aportación nuestra. Este método está siendo usado como base para la medida in situ del coeficiente de absorción de pavimentos porosos (ISO 13472-1).



Pulsos radiados por un altavoz esférico en funcionamiento convencional (a) y ecualizado (b) y sus correspondientes espectros (c)