

## **CONTROL ACTIVO DEL SONIDO Y LAS VIBRACIONES – UN ENFOQUE SISTEMÁTICO CON EJEMPLOS TÉCNICOS**

PACS 43.50.Ki

Scheuren, Joachim  
Mueller-BBM  
Robert-Koch Stasse 7  
82234 Planegg  
E-mail: JScheuren@MuellerBBM.de

### **SUMARIO**

Tras unos comentarios y valoraciones generales sobre el estado actual de las medidas de control activo del ruido y de las vibraciones en la práctica, se da paso a exponer la estructura básica de cualquier enfoque activo para ilustrar las diversas etapas de cualquier proceso de diseño de un sistema activo. En este proceso, podría ser de ayuda una diferenciación lógica de los principios físicos fundamentales para buscar los emplazamientos y los mecanismos óptimos de interferencia. Ello se presenta de manera sistemática y se demuestra mediante algunos ejemplos básicos, pero ilustrativos, que incluyen la fascinante posibilidad de poner en práctica y de experimentar con sonidos arbitrariamente diseñados in situ, es decir, fuera del laboratorio en condiciones reales y en tiempo real.

### **INTRODUCCIÓN**

Hasta que los historiadores de la técnica no se pongan de acuerdo en una clasificación definitiva, la definición de los períodos tecnológicos estará siempre caracterizada por impresiones y valoraciones personales. Concretamente, esto es válido para el sonido activo y el control de la vibración, donde el período de grandes esfuerzos orientados a la tecnología y tecnológicamente prometedores comenzó hace casi 30 años gracias al trabajo pionero de M. Swinbanks, quien – de forma excelente – fue capaz de combinar un minucioso entendimiento de las propiedades físicas implicadas con la imperiosa necesidad de un pragmatismo técnico ([1]). Junto con la cercana perspectiva de que casi todas las carencias en el procesamiento de señales se solventarán más tarde o más temprano gracias a los nuevos, y siempre en evolución, procesadores de señales digitales, este fue el punto de inicio de una era que desafortunadamente no ha podido concluir todavía debido a un descubrimiento definitivo: la era del desarrollo, introducción y utilización del sonido activo y el control de vibración como técnica acústica ampliamente aceptada.

Esta técnica fue primero formulada por escrito por P. Lueg en los años treinta del siglo pasado ([2]) y tuvo una temprana fase de exploración en los años cincuenta ([3],[4]), cuando se llevaron a cabo experimentos de laboratorio sistemáticos para investigar la viabilidad del nuevo enfoque. A finales de los años sesenta, se realizaron las primeras tentativas para obtener un

mejor conocimiento mediante la interacción física diseñada teóricamente a base de varias descripciones del campo ([5]).

Pero entonces, desde aproximadamente 1970, se inició un trabajo serio en diferentes lugares y pronto estuvo acompañado por un optimismo a veces bastante apreciable y que incluso incitaba a que degenerase en grandes e irrealizables promesas. A largo plazo, esto se vio afectado por una pérdida de confianza y credibilidad que puede considerarse asimismo responsable de cierta frustración sobrevinida en los últimos años. Otros motivos de decepción pueden apreciarse en una política expresa ampliamente difundida que, cubriendo por completo el campo de potenciales puestas en práctica sin soluciones que lo acompañen – impiden el progreso en vez de apoyarlo.

Pero indudablemente sería demasiado fácil echarle la culpa únicamente a estos efectos secundarios. Por supuesto que se desprende cierta justificada desilusión del hecho de que los numerosos y enormes esfuerzos para establecer la técnica fueran apenas compensados por soluciones económicas que hicieran frente a las necesidades de un mayor rendimiento y robustez. Por ello, aparte de los numerosos éxitos en laboratorio, muchas expectativas no pudieron cumplirse y muchas inversiones no pudieron reembolsarse. Pero sería totalmente injustificado basar una valoración general del ruido activo y del control de vibración principalmente en estas deficiencias. Se han conseguido éxitos y hay (y habrá) continuos progresos en el futuro para incluir la técnica en la “caja de herramientas” de los ingenieros acústicos.

Esta conferencia intentará dar justificación a este hecho y ayudar así a que sea comprensible. Por ello se pretende que sea una introducción al tiempo que describe el estado del arte. Es obvio que esto solo puede hacerse a modo de ejemplo – sin exigir perfección alguna. Sin embargo, teniendo en cuenta este estado incompleto, se pone especial énfasis en lo más típico y representativo de lo más básico, permitiendo de esta forma aplicarlo a otros problemas en la más amplia área del sonido activo y del control de la vibración. Sin embargo, aquellas personas que quieran una mayor precisión deberán remitirse a los libros de texto preliminares ([6]-[9]) así como a una extensa literatura existente.

## ESTRUCTURA DEL PROBLEMA GENERAL

A la hora de analizar un sistema activo así como a la hora de diseñarlo, podría ser de gran ayuda tener un claro conocimiento sobre su estructura particular y los elementos de los sistemas del sonido activo y del control de vibración. Podría ser ilustrativo comenzar con un repaso general a cualquier problema de control de ruido o vibración, donde el objetivo común es el de controlar magnitudes de campo acústicas o vibratorias o mecanismos de un sistema mecánico MS tal que algunas magnitudes objetivo  $z$  queden influenciadas de la manera deseada. La Fig. 1. ilustra este hecho. Se dispone de muchos instrumentos y técnicas para realizar esta tarea, por ejemplo, materiales amortiguantes o absorbentes, cambiando o añadiendo masas y rigideces, cambiando vías de propagación o protegiendo áreas específicas.



Fig. 1 Esquema para ilustrar el control de magnitudes objetivo  $z$  de un sistema mecánico MS

Cuando las dificultades para alcanzar los objetivos llevan a consideraciones de si aplicar un enfoque activo o no, el primer paso es el de examinar minuciosamente la posibilidad de controlar de las magnitudes objetivo por medio de transductores electromecánicos aplicados de una manera adecuada. Estos generan un denominado campo secundario dedicado a interferir con el campo primario existente de una manera ya establecida. Esto puede considerarse como

una tarea muy ambiciosa porque deben tenerse en cuenta varias cuestiones. Para ilustrar este hecho y, llegados a este punto, se deberían formular las siguientes preguntas típicas:

- ¿Cuántos actuadores deberían colocarse y en qué lugar, para obtener un efecto máximo con el mínimo esfuerzo de excitación?
- ¿Cuántos sensores deberían colocarse y en qué lugar, para aportar suficiente información con el tiempo suficiente para que los actuadores sean procesados con el efecto deseado?
- ¿Es el sistema resultante – con respecto a las magnitudes objetivo – observable?
- ¿Es el sistema – con respecto a las magnitudes objetivo y de excitación – controlable?
- ¿La unidad de control necesaria es causal y factible?

Si se puede responder satisfactoriamente a estas consideraciones, el sistema mecánico MS se ha convertido en un sistema electromecánico EMS con nuevas entradas  $y$  y con salidas adicionales  $z'$  que pueden combinarse con las salidas anteriores hasta formar un nuevo conjunto  $z$  de señales de salida. El problema restante es el de evaluar las señales de entrada  $y$  necesarias a partir de las señales de salida  $z$  disponibles mediante el adecuado diseño de una unidad de procesamiento de señal SPU, tal y como se muestra en la Fig. 2.

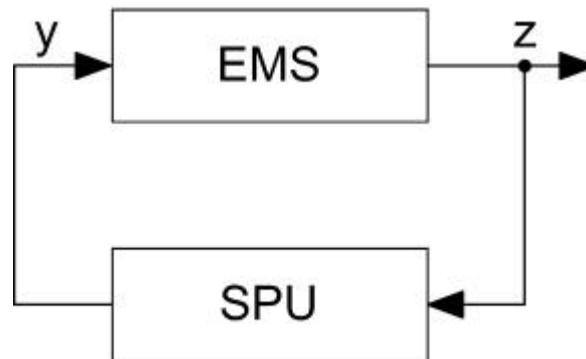


Fig. 2 Esquema para ilustrar el control de magnitudes objetivo  $z$  de un sistema electromecánico EMS accionando de forma adecuada las entradas de control del EMS.

A pesar de que la variedad y la complejidad de las cuestiones a tratar impiden dar detalles de ningún tipo, debería enfatizarse aquí que la secuencia de los dos pasos de diseño fue elegida intencionadamente. Cualquier procesamiento de señal está limitado a lo que permita la relación física entre las observaciones  $z$  disponibles y lo que permiten las señales de control necesarias  $y$ . El diseño apropiado del sistema electromecánico EMS y, por ejemplo, la apropiada selección así como la adaptación adecuada de los actuadores, es crucial para el éxito en el diseño de la unidad de procesamiento de señal SPU y de este modo para el enfoque general. Por esta razón, generalmente, la primera tarea es, normalmente, describir

- el diseño electromecánico del sistema EMS incluyendo los sensores para las señales que tienen que ser aplicadas y los actuadores para las señales que deberán aplicarse.

A continuación, la segunda tarea será la de realizar

- el diseño de las unidades controladoras dentro de la unidad de procesamiento de la señal SPU

definiendo y obteniendo un algoritmo para el que la unidad SPU – junto con el hardware y el software necesarios – sea capaz de cumplir con los requisitos del sistema EMS. Una vez trazado el contexto aproximado de las etapas implicadas, esta conferencia se centrará en

señalar varios conceptos físicos de la interferencia mecánica que pueden ser de gran ayuda al diseñar y analizar las medidas de control activo.

### **CONTROL DE RUIDO ACTIVO Y DISEÑO DE SONIDO ACTIVO**

Hasta ahora, no se ha establecido ninguna hipótesis con respecto a las señales objetivo y a los valores característicos de la señal que deberían obtenerse. Desde los primeros comienzos del control del sonido y de las vibraciones por métodos activos, un objetivo obvio y altamente motivador fue el de utilizar el sistema para la reducción del ruido y la vibración. Sin embargo, los sistemas activos están intrínsecamente condicionados a realizar la tarea mucho más general de generar y relacionar sonidos arbitrarios con los procesos técnicos. Esto se debe a que el diseño del sonido difiere de la reducción del sonido mediante la adición de sonido, en vez de simplemente reducirlo. Las técnicas activas, que – por su misma definición – añaden sonidos incluso de un modo puramente reductor, reúnen de esta forma las condiciones necesarias para realizar sonidos arbitrariamente diseñados.

Incluso si este enfoque fuese considerado inaceptable como solución integrada para grandes cantidades de producto, ofrece la fascinante posibilidad de implementar sonidos arbitrarios in situ, permitiendo de esta forma un completo ensayo funcional y una evaluación del entorno para definir y experimentar con el sonido más adecuado.

El concepto técnico de estos enfoques difiere únicamente en las especificaciones de los objetivos que, para la reducción del sonido, deberían definirse como cero, anulación del mismo, mientras que, para el diseño del sonido, se debería definir una señal deseada que reúna las características del sonido pretendido.

### **INTERACCIÓN FÍSICA EN SISTEMAS CONTROLADOS ACTIVAMENTE – UN ENFOQUE SISTEMÁTICO**

La tarea de diseñar un sistema electromecánico que sea capaz de controlar algunas señales objetivo hasta alcanzar valores, formas o parámetros deseados debe comenzar por hallar la manera más efectiva de interferir con aquellas señales que determinan finalmente las señales objetivo. Ya que los cambios arbitrarios de una forma de onda requieren la posibilidad de compensarla completamente, la efectividad de las fuentes adicionales está limitada por la capacidad de interferencia destructiva: si un nuevo sonido generado debe dominar las características del sonido, el sonido previo original deberá ser destruido.

De este modo, es normal seguir la vía y la propagación del sonido que debe ser interferido a lo largo de su completo camino de propagación, empezando por el mecanismo generador del sonido hasta el punto o los puntos donde las señales objetivo de utilidad puedan ser observadas. Estructurar esta vía de una manera sistemática lleva al siguiente esquema por el que tiene que pasar cualquier forma de onda. Está claro que, en la práctica, dependiendo de la configuración específica, algunos elementos de este esquema pueden ser omitidos. Sin embargo, esto no debería poner en entredicho el valor general a la hora de encontrar un cuello de botella donde el campo de ondas considerado pueda ser influenciado más fácilmente.

Si se dividen en grupos de acuerdo con el mecanismo dominante, las zonas de interacción de interferencia pueden caracterizarse por los siguientes principios:

- control activo de la generación del sonido
- control activo de la introducción del sonido
- control activo de la propagación del sonido en estructuras
- control activo de la radiación del sonido
- control activo de la propagación del sonido en fluidos (y aire)
- control activo de la inmisión del sonido

Estos principios se tratarán brevemente a continuación.

---

### Control activo de la Generación de Sonido

La manera más efectiva de reducir el sonido es posiblemente el evitar su generación. Esto puede ser especialmente útil si una adecuada interacción con el proceso de la generación del sonido impide que el mecanismo comience a funcionar. Un primitivo y eficaz ejemplo era el control de las reflexiones de las ondas del sonido en el extremo abierto de un tubo Rijke ([10]). Se obtuvieron similares resultados para la supresión de inestabilidades de los resonadores Helmholtz excitados por un flujo de aire.

En ambos ejemplos, el control activo tuvo éxito a la hora de establecer un mecanismo de vibración auto-excitado. De esta forma, se requería una energía mínima para interactuar con la vibración resonante ya que esta interacción tenía que tratar únicamente con las bajas amplitudes de la vibración estabilizada.

A pesar de lo fascinante de este concepto y a pesar de los muchos intentos por solventar problemas tales como la combustión o las inestabilidades de las oscilaciones, las numerosas dificultades a resolver en las aplicaciones prácticas evitaron que el enfoque se convirtiera en puestas en práctica industriales estándar.

### Control Activo de la Introducción del Sonido

En contraste con los mecanismos generadores de ruido, donde la fuente en sí está impedida de actuar, el control activo de la introducción del ruido debe hacer frente a los efectos de esta fuente en una estructura o medio receptores. La cancelación efectiva global del campo de ondas excitado puede conseguirse más fácilmente aplicando una copia negativa de la fuente, una denominada anti-fuente, lo más cercana posible a la fuente primaria.

Este enfoque es prometedor en la práctica si las dimensiones y la directividad de la fuente primaria le permiten ser tratada como una fuente monopolar. Ejemplos típicos son la salida de tuberías y conductos o la excitación en aquellos puntos que conectan alguna fuente de vibración a una estructura receptora. En la referencia ([11]) se describe una primera instalación de demostración de un sistema de estas características en el escape de una turbina de gas industrial. Posteriormente, se desarrollaron conceptos similares y actualmente son de uso limitado en casos donde el entorno del proceso general ofrece soluciones clásicas más bien complicadas.

A continuación se ofrece un ejemplo de como compensar el efecto de fuentes puntuales aplicando montajes de aislamiento activo.

### Control Activo de la Propagación del Sonido en Estructuras

Los primeros estudios teóricos así como los primitivos ensayos experimentales se basaban en un enfoque modal que pretendía excitar y de esta manera controlar los modos específicos de interés. Esto puede resultar adecuado si los modos que deben ser influenciados se conocen con antelación y si cualquier generación o amplificación de los modos incontrolados (spillover) pueden ser aceptados. Sin embargo, en muchos casos, puede ser mucho más adecuado y efectivo un enfoque orientado de modo ondulatorio. Esto es especialmente cierto si se deben alcanzar tanto la desactivación de las vías de transferencia como la supresión de resonancias.

En la práctica, este enfoque está limitado al caso unidimensional y a los tipos de onda simples, como las ondas de flexión y longitudinales. Pero a pesar de algunos éxitos en controlar la propagación de dichos tipos de onda en condiciones de laboratorio, todavía se debe llevar a cabo una aplicación dentro de las instalaciones técnicas reales, aparte de las construcciones especiales para grandes estructuras espaciales.

Sin embargo, para ilustrar las capacidades de este enfoque, a continuación se revisarán algunos resultados de laboratorio típicos.

### Control Activo de la Radiación del Sonido

En un enfoque ingenuo del problema, la supresión activa de la radiación del sonido de una estructura radiante pretendería suprimir las vibraciones de la estructura. A pesar de ser suficiente con respecto al objetivo deseado, el criterio sobrepasaría la necesidad al demandar más de lo que requiere la supresión de la radiación. Esto es porque una estructura también puede vibrar radiando en modos no radiantes.

Con respecto a la radiación del sonido, sería así mucho más eficaz concentrarse únicamente en las vibraciones radiantes y encontrar vías para detectar y generar selectivamente dichas vibraciones radiantes. Este enfoque fue establecido en los últimos 10 a 15 años como Control Acústico Estructural Activo junto con investigaciones minuciosas y verificaciones experimentales de laboratorio de los conceptos anteriores. Sin embargo, las aplicaciones industriales prácticas parecen sufrir impedimentos físicos y financieros que todavía no se han solventado.

#### Control Activo de la Propagación del Sonido en Fluidos (y Aire)

El control activo de ondas de sonido unidimensionales en conductos fue – además del silenciamiento de pequeñas zonas – uno de los primeros ejemplos de esfuerzos de control activo tanto en la teoría como en la práctica. Fue debido al hecho de que, por debajo de la frecuencia de corte de un conducto, solo las ondas planas son capaces de propagarse. Por este motivo, los sistemas de conductos de baja frecuencia se caracterizaban por unos pocos, a menudo por un único grado de libertad.

El clásico artículo de Swinbanks dio comienzo a una era de investigaciones prácticas e implementaciones que diferían principalmente en el principio físico en cuestión (por ejemplo, la absorción de ondas incidentes reflectantes) y en la disposición de los sensores y actuadores. Los experimentos de laboratorio se llevaron a cabo por medio de tentativas para instalar dichos sistemas en la práctica y estos tenían a su vez como propósito ser algo más que simples demostraciones.

A pesar de que la factibilidad principal y la estabilidad podían considerarse como fiables en el pasado, las aplicaciones prácticas están por ahora mayormente limitadas a situaciones especiales, donde las restricciones existentes o las exigencias extremas son capaces de superar el inconveniente de costes más elevados comparados con las soluciones pasivas clásicas.

Sin embargo, este éxito parcial solo es válido para las aplicaciones unidimensionales. En el caso de aplicaciones bidimensionales o tridimensionales, los sueños conceptuales del pasado no pudieron llevarse a cabo en la realidad ya que la tarea de tratar con campos sonoros espaciales y con la propagación del sonido es demasiado ambiciosa para justificar los esfuerzos. Esto es válido para todas las aplicaciones que incluyen ejemplos tan espectaculares como el aislamiento acústico de ventanas abiertas o la mejora de pantallas. Sin embargo, este último ejemplo muestra que el éxito de enfoques activos puede depender en gran medida del grado de sofisticación del concepto básico.

Esto puede ser ampliamente demostrado para el caso de pantallas acústicas, donde el ángulo de difracción depende de la impedancia en el borde difractor. En este caso, las posibilidades de lograr una impedancia de apantallamiento óptima puede sustancialmente mejorarse permitiendo las ejecuciones activas de esta impedancia.

#### Control Activo de la Propagación del Sonido en Fluidos (y Aire)

Si todas las interacciones entre la fuente y el receptor fallan o son demasiado complicadas, el último enfoque que queda es el de concentrar las medidas de control en alguna zona en torno a uno o varios puntos de recepción. Junto con el control activo de ondas unidimensionales, este enfoque ha despertado gran interés en los comienzos del control activo de campos sonoros.

De nuevo, esto fue debido a la relativamente simple naturaleza del problema en el caso de volúmenes pequeños, tales como los protectores de oído con auriculares, o los pequeños

compartimentos de pasajeros. Es de sumo interés el que estos ejemplos representen todavía en la actualidad algunas de las más prometedoras o, incluso, las bien establecidas aplicaciones del control activo del ruido y de la vibración.

Cualquier persona puede comprar auriculares activos y protectores de oído activos y las soluciones activas para mejorar el sonido interior de los coches están más o menos en disposición de ser aplicadas, especialmente para el caso del ruido periódico de baja frecuencia del motor. El enfoque incluso podría ampliarse a los aviones de hélice para reducir notablemente los tonos de alto nivel a la frecuencia de paso de la hélice.

Sin embargo, hasta ahora no ha sido posible resolver todas las dudas acerca de la fiabilidad, la robustez a largo plazo y la economía.

Tras estas breves observaciones sobre los conceptos físicos posibles y el estado del arte relacionados con estos conceptos, a continuación se describirán y analizarán algunos ejemplos técnicos.

### **CONTROL ACTIVO DE LA INTRODUCCIÓN DEL SONIDO (AISLAMIENTO DE VIBRACIÓN ACTIVO)**

El primer ejemplo de aplicación tratará sobre la reducción de la generación del sonido mediante métodos activos y pretende demostrar el potencial de este enfoque en el caso de excitación del sonido estructural, donde una fuerza aplicada de forma adecuada soporta activamente un sistema pasivo de aislamiento de vibración.

Existe una contradicción entre la necesidad de fijar un añadido dentro de su entorno mientras que se está aislando este entorno de las vibraciones operacionales del mismo. Por ejemplo, un motor de un vehículo tiene que ser llevado con ese vehículo. Además, cualesquiera oscilaciones con amplitudes elevadas tienen que ser limitadas para garantizar un acoplamiento estable y una excitación continua de la vía sin ningún daño.

Sin embargo, en cuanto a frecuencias más elevadas, sería conveniente no tener un acoplamiento entre el agregado y la estructura receptora, evitando de esta forma cualquier excitación del entorno debido a vibraciones libres del mismo. De este modo, las conexiones rígidas para casos estáticos y de baja frecuencia no son consistentes con la exigencia de conexiones débiles para frecuencias medias y altas.

Una tal dependencia ideal selectiva de la frecuencia de estas características no puede llevarse a cabo por métodos pasivos. Utilizar un sistema activo para mejorar el aislamiento de una estructura receptora de cualquier dispositivo de vibración permite la transferencia de rigideces casi arbitrarias a rangos de frecuencias determinados. Esto se demostró por medio de varios experimentos en laboratorio así como en condiciones reales ([12],[13],[14]).

Se puede demostrar que cualquier conexión activa entre dos estructuras que cumplen los requisitos anteriormente descritos debe contener un elemento con características del muelle. Entonces se deberá construir un sistema activo en torno a un muelle pasivo, completándolo por medio de un adecuado dispositivo actuador. Entre las diferentes posibilidades de incorporar actuadores dentro de los elementos de conexión de un montaje aislante, en el pasado se prefirieron disposiciones paralelas de muelles y actuadores, principalmente porque mantenían alejada cualquier fuerza estática del actuador.

Se llevó a cabo un espectacular ejemplo con cuatro montajes activos conectando un pequeño motor eléctrico a una estructura de placa rígida de 2 m x 3 m ([12]). Los montajes en sí se realizaron con tres postes de goma cilíndricos en paralelo a un vibrador electrodinámico. Se escogieron los detalles constructivos para obtener una rigidez sustancialmente inferior en dirección horizontal que en dirección vertical.

Para velocidades de rotación constantes del motor, las fuerzas generadas a la frecuencia básica rotacional y sus armónicos (caracterizados por  $v$ ) pudieron reducirse hasta el nivel de ruido ambiente. Como ejemplo, la Fig. 3 muestra el resultado para una de las fuerzas transmitidas con (b) y sin (a) control activo. Todos los armónicos pudieron atenuarse al nivel del ruido, que no está en correlación con las vibraciones periódicas de la máquina y de esta forma a salvo de ser compensadas. Nótese que la diferencia en el nivel de ruido de banda ancha solo está causada por las diferentes resoluciones del equipo de medida. En función de la relación señal/ ruido, se podrían alcanzar drásticas reducciones de ruido de hasta 80 dB.

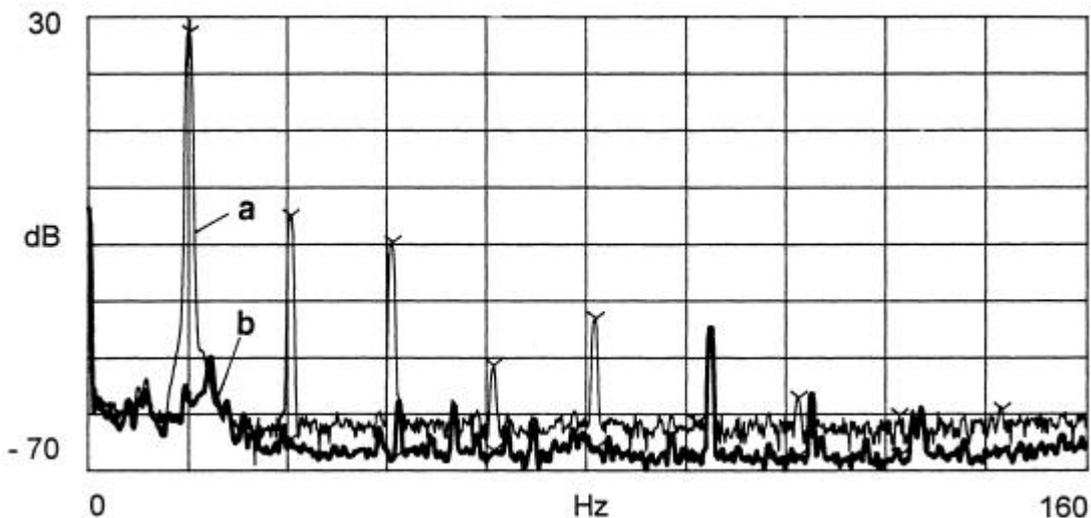


Fig. 3 Espectro de la fuerza transmitida a la base con (b) y sin (a) aislamiento de vibración activo.

Otros experimentos posteriores demostraron que ni la minimización de las fuerzas transmitidas ni la minimización de las velocidades en los puntos de contacto dieron como resultado una velocidad mínima cuadrática media de la estructura de la placa. La pregunta resultante de cuál sería el mejor criterio de error para los dispositivos aislantes de vibración fue investigada recientemente y tuvo como resultado el proponer minimizar la suma ponderada de fuerzas y velocidades cuadráticas debajo de los montajes ([15]). Sin embargo, para la aplicación indicada aquí, estas diferencias eran mínimas y no se profundizó más.

Nótese que la compensación activa de las fuerzas que excitan una estructura puede resultar en una reducción global del campo vibratorio. Se verificó este hecho en el caso de la placa rígida para varias distribuciones de puntos de medida de la velocidad.

Para demostrar la robustez operacional del sistema activo, se instaló el mismo para aislar las vibraciones de un convertidor entre su base y la estructura de un barco. Se pudo demostrar que en condiciones de funcionamiento normales del barco, era posible atenuar el nivel de vibración cuadrático medio en la estructura objetivo en hasta 20 dB.

Las reducciones de alto nivel descritas anteriormente requieren el predecir las perturbaciones sinusoidales. En el caso de excitaciones de banda ancha, no está a priori disponible la información que permite predecir las estimaciones de la perturbación. Los sistemas activos tienen que depender del control de realimentación. A pesar de que esto limita el rango de frecuencia, se podrían poner en práctica con éxito algunas soluciones para bajas frecuencias para proteger bancadas altamente sensibles de las vibraciones del entorno ([16]) o los edificios de los terremotos ([17],[18]).

Existen muchos otros aspectos tales como las normas de diseño, los beneficios, las desventajas, las dificultades y los ejemplos de aplicación para los aisladores activos. En las referencias ([7],[9]) se pueden encontrar revisiones completas junto con amplias referencias.

## CONTROL ACTIVO DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO

De nuevo, la ilustración del control activo de la propagación de ondas dentro de este texto debería basarse en un ejemplo estructural. Hace 15 ó 20 años, existía una gran confianza en que los primeros éxitos con el control activo de ondas de sonido planas en conductos podría transferirse a las ondas estructurales ([19],[20]). Por lo menos, para los tipos de onda simples en condiciones favorables, se esperaba que pudiera alcanzarse la reflexión y/o la absorción de ondas incidentes mediante actuadores adecuados.

La principal factibilidad de esta esperanzas pudo mostrarse a finales de los años 1980 para ondas de flexión en vigas en varios experimentos de laboratorio ([20],[21]). La Fig. 4 muestra el resultado obtenido para un dispositivo reflectante activo de banda ancha sujeto a una viga.

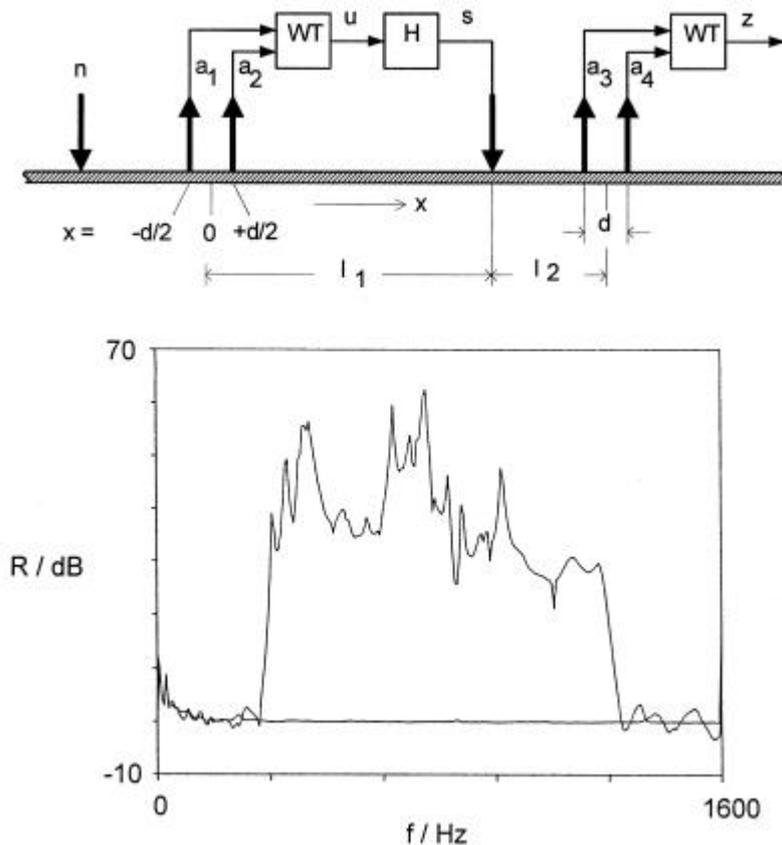


Fig. 4 Disposición principal y pérdida por transmisión de un reflector activo

Las ondas de flexión generadas por una fuente de ruido de banda ancha  $n$  se registraron direccionalmente mediante un dispositivo de medida en dos puntos que incluye una unidad digital WT para separar las ondas incidentes de las ondas con dirección opuesta. La unidad de procesado de señal determina entonces la señal óptima  $s$  para provocar que el transductor de fuerza refleje este campo de onda de flexión incidente. Se llegó a la optimización minimizando la señal de error  $z$  que de nuevo fue derivada mediante la evaluación direccional de una medida en dos puntos.

Tal y como se muestra en la Fig. 4, la pérdida por transmisión que caracteriza el reflector activo tiene un valor medio de aprox. 35 dB, lo que significa que aproximadamente el 99,97% de la potencia incidente fue rechazada por el dispositivo activo. En el experimento, todas las dimensiones se escogieron de manera que los campos cercanos pudieran ser despreciados. Si esta hipótesis no se cumple, se deberán aplicar más de dos sensores ([22]).

A pesar de que las ondas de flexión son el tipo de onda más importante en acústica debido a su eficacia de radiación, otros tipos de ondas tales como las longitudinales y de torsión pueden ser igualmente importantes suministrando energía a estos radiadores. Asumiendo únicamente el conocimiento del número de onda y su dependencia de la frecuencia, las consideraciones básicas de la referencia ([22]) son principalmente independientes del tipo de onda a tratar. Por esta razón, el enfoque se consideró aplicable también a otros tipos de onda. Las investigaciones teóricas relacionadas pueden encontrarse en las referencias ([23],[24]), y los resultados para una aplicación práctica en las referencias ([25],[26]). En este caso, se dotó a un poste con actuadores integrados para reducir el ruido interior en los helicópteros, controlando ondas longitudinales y de flexión que se propagaban a lo largo del poste.

Otras ampliaciones trataron con los efectos de los tipos de actuadores y sensores y los emplazamientos, así como con varias condiciones en el extremo de vigas finitas ([9]). Asimismo, se investigó detenidamente el control directo de los flujos de potencia en vez de las amplitudes de onda ([23]). Sin embargo, tal y como ya se ha mostrado en la referencia ([27]), el flujo de potencia debe ser tratado con precaución. Esto se debe principalmente a que cualquier aplicación de fuentes secundarias actúa hacia atrás en la distribución de energía global. El aplicar una fuerza adicional a una estructura puede producir una potencia adicional suministrada a la estructura por las fuerzas existentes previamente. Esto puede llevar al asombroso hecho de que la energía absorbida de forma activa puede ser excedida por la potencia primaria introducida adicionalmente, de manera que se consiga el efecto contrario al deseado.

Todos estos enfoques pueden aplicarse a medios bidimensionales – o incluso tridimensionales. Sin embargo, sin propuestas mejoradas para ajustes de onda específicos y alineaciones de actuadores adecuados, tales generalizaciones tienden a estar limitadas a tratamientos académicos.

En resumen, se podría decir que a pesar de haber entendido los mecanismos básicos de las posibles realizaciones, las implementaciones prácticas aún no han sido capaces de cumplir las expectativas de los resultados de laboratorio.

## **CONTROL ACTIVO DE LA RADIACIÓN DEL SONIDO**

### Control Activo de Vibración

El control activo de campos vibratorios en áreas objetivo predefinidas puede tener diferentes propósitos: la limitación de características vibratorias en sí mismas o la reducción de aquella parte de un campo sonoro radiado por la estructura controlada. A pesar de diferir en la formulación del criterio de error, estas tareas poseen esencialmente una gran similitud.

Se llevaron a cabo muchos intentos en el pasado para desarrollar estas dos estrategias. Una de las primeras tareas en la investigación del control activo fue la de reducir las amplitudes de unos modos de vibración determinados. Empezando por la visión de controlar el comportamiento vibratorio de estructuras extremadamente ligeras, se desarrolló un entendimiento minucioso sobre las posibilidades teóricas y los límites (véase la reseña literaria en la referencia ([27])).

A diferencia de las medidas basadas en las ondas de propagación, la minimización de las vibraciones estructurales en áreas objetivo fue generalmente enfocada mediante conceptos modales. Además, si no se pueden derivar señales predictivas de los sensores que detectan

las ondas incidentes o de las hipótesis de banda estrecha de los campos primarios, se deberá confiar en las estrategias de realimentación. De esta forma, este área de trabajo se estableció predominantemente como control de realimentación modal.

Hoy en día, como área de investigación, este enfoque ha adquirido una gran madurez y cierta experiencia práctica. Además de los numerosos trabajos fundamentales y experimentales, se puso especial énfasis en el problema de la observación y del control que va inmediatamente unido a la importante cuestión práctica de dónde situar, y cuantos, sensores y actuadores.

Las disposiciones de actuadores varían desde fuerzas simples que actúan contra las masas de inercia (absorbedores de vibración activa) a sofisticados actuadores distribuidos que pueden estar integrados dentro de la estructura (estructuras inteligentes). Para enfatizar los beneficios de estos dispositivos puede ser de utilidad el interpretarlos en función de modificaciones estructurales virtuales tales como masas anexas o amortiguadores.

Los textos básicos sobre todos los aspectos relevantes así como las reseñas del estado del arte pueden encontrarse en las referencias ([7],[9],[27]).

### Control Activo Acústico Estructural

El Control Activo Acústico Estructural (ASAC) describe las tentativas de utilizar entradas de control directamente aplicadas a una estructura para reducir la radiación sonora de la misma. Por supuesto, esto cambia también la distribución de vibración, pero únicamente para satisfacer otras necesidades. Por ello puede utilizar las mismas estrategias que el control de vibración activo pero está dirigido hacia las señales de error directamente correlacionadas con el ruido radiado en vez de a las amplitudes de vibración.

De nuevo, los enfoques modales son muy adecuados para eliminar la radiación acústica. Para percibir de manera selectiva los modos radiados y concentrando los esfuerzos de control a estos modos, se puede alcanzar una reducción eficaz de la potencia de sonido radiado.

Por supuesto, la radiación del sonido puede reducirse igualmente disminuyendo el nivel de vibración global. Sin embargo, teniendo en cuenta que los diferentes modos están caracterizados por diferentes longitudes de onda y que de esta forma se acoplan con diferente fuerza al fluido circundante, es obvio que los modos con la eficacia de radiación más elevada deberían ser tratados de manera especial.

En lugar de una transformación modal, cualquier distribución de vibración espacial puede descomponerse de igual forma en sus componentes de número de onda mediante la transformada espacial de Fourier. Esencialmente, el control del sonido radiado significa el control de la parte del espectro de número de onda donde la longitud de onda estructural es mayor que la longitud de onda en el medio del entorno. Para permitir niveles de vibración no restringidos para números de onda no radiantes, el ASAC se basa esencialmente en minimizar partes radiadas del espectro de número de onda o incluso en trasladar la energía vibratoria de las partes radiantes a las no radiantes. De este modo, la disminución del sonido puede ir acompañada por un incremento de los niveles de vibración estructurales.

Estos hechos básicos fueron explorados de forma intensiva en los años 80 ([28],[29]) y mientras tanto, se resumieron en varios ensayos y libros de texto ([7],[9]). Son especialmente beneficiosos para el diseño y la disposición de sensores y actuadores que determinan si la radiación del sonido es observable y controlable. Existen alentadoras esperanzas de que la integración de actuadores en estructuras inteligentes puedan abrir muchas posibilidades para un control de la radiación sonora elegante y eficaz. Añadiendo capas de espuma pasivas adicionales, se obtienen "espumas activas" ([30]) que pueden mejorar el ancho de banda de unas medidas exclusivamente activas o pasivas.

Para controlar la radiación sonora, la selección de actuadores no está limitada a ninguno de los mecanismos descritos anteriormente. Habiendo utilizado los conceptos descritos aquí para diseñar una disposición óptima de los actuadores, los sensores adecuados (y algoritmos)

forzarán automáticamente al sistema a minimizar la potencia sonora radiada si esta está suficientemente correlacionada con las señales de error. Entonces es irrelevante si la estructura está controlada en sus puntos de excitación, a lo largo de sus vías de propagación de onda o en subestructuras radiantes. Estas diferencias únicamente se tuvieron en cuenta para encontrar una disposición óptima con esfuerzos globales mínimos.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, se llevó a cabo un ejemplo para controlar la radiación sonora compensando la excitación de estructuras con montajes activos. El sistema se instaló para aislar las vibraciones de un transformador de la estructura de soporte en una embarcación. Accionando los actuadores adecuadamente, se podía observar una notable reducción en el agua del entorno.

Finalmente, la eficacia de controlar campos sonoros aplicando fuerzas en emplazamientos estructurales adecuados se demostrará a continuación mediante los resultados obtenidos con un tren de alta velocidad, donde se aplicaron medios activos para reducir las componentes del ruido de baja frecuencia. Excitados por múltiplos de la frecuencia rotacional de las ruedas (armónicos de la rueda) y reforzados por resonancias coincidentes de rail y muelles de bogie secundarios, los trenes de alta velocidad pueden experimentar aumentos de vibraciones y de ruido alrededor de los 90 Hz.

A pesar de que la cancelación del sonido directo mediante un conjunto de altavoces compensó con éxito el ruido tonal en los compartimentos, un análisis detallado de la vía de transferencia desde la generación vibratoria hasta la radiación sonora demostró que aplicando fuerzas al cuerpo del vehículo cerca de los muelles secundarios sería la manera más eficaz de reducir el ruido interior.

Tras un estudio con éxito de un caso ([31]), el concepto fue ensayado en un vehículo circulando en las instalaciones de la German Railway Corporation. La Fig. 5 muestra el resultado de cuatro actuadores de piezocerámica (dos en cada lado) colocados en paralelo a los muelles secundarios de un bogie, a una velocidad de 200 km/h. Los actuadores se excitaron con una señal de referencia derivada de la rotación de las ruedas y que contenía las frecuencias a considerar.

En la distribución espacial de la Fig. 5 se puede apreciar que el campo sonoro generado por el bogie en el lado izquierdo de la figura se redujo considerablemente en el compartimento.

## **CONTROL ACTIVO DE LA INMISIÓN SONORA Y DISEÑO DE SONIDO ACTIVO**

Para aplicaciones adecuadas ("fijaciones"), el control activo del ruido y de la vibración demostró ser una herramienta eficaz para reducir los componentes de campo no deseados a un nivel aceptable. Se pueden encontrar ejemplos de aplicaciones con éxito en vehículos, incluyendo los barcos y aviones, estos últimos incluso con una serie de implementaciones. Sin embargo, a pesar de haber sido un tema de considerable investigación y esfuerzos de desarrollo, el control activo de ruido en coches y trenes no ha tenido aún éxito a la hora de ponerse en práctica a gran escala. Esto es parcialmente debido a deficiencias técnicas como la insuficiente capacidad de los actuadores o la robustez y la fiabilidad a largo plazo. De mayor importancia parece ser el hecho de que los costes derivados no podían reducirse a un nivel aceptable.

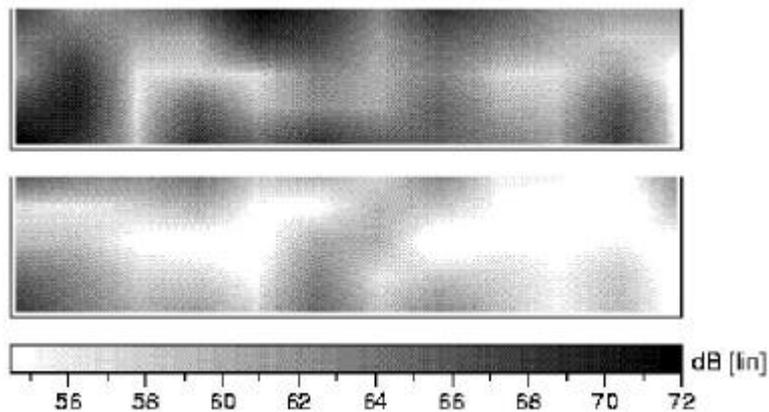


Fig. 5 Distribución espacial del nivel de presión sonora en el compartimento de un coche de alta velocidad ICE con (abajo) y sin (arriba) control activo

Sin embargo, el interés se intensificará definitivamente mediante la atractiva posibilidad de cambiar, preferiblemente, las características del sonido en vez de simplemente reducirlo o anularlo.

Aparte de algunos casos especiales, el control de sonido activo significa generar sonido adicional que interfiere con el sonido original. Este concepto incluye la posibilidad de alteraciones de sonido deliberadas permitiendo superposiciones, que no interfieren, de nuevos componentes sonoros. Al combinar estos elementos de campo generados nuevamente con componentes canceladores, se pueden realizar modificaciones casi arbitrarias del campo sonoro. Este enfoque amplía las posibilidades de las técnicas del Control Activo del Ruido tradicional (ANC) y de esta manera puede ser descrito adecuadamente como Diseño de Sonido Activo (ASD).

Las magnitudes psico-acústicas pueden utilizarse para caracterizar las valoraciones subjetivas de sonidos arbitrarios que – por supuesto – pueden incluir sonidos generados también por medidas de control activo. Esto plantea inmediatamente la idea inversa de utilizar el control activo para lograr sonidos con características de percepción prescritas y auditivamente adecuadas. En este caso, el objetivo común de minimizar alguna función de error cuadrática media se sustituiría por una función de error utilizando los parámetros de sonido y las características relevantes.

Sin embargo, las reglas no lineales, y por ello irreversibles, de cálculo, impiden una asignación única de las características sonoras temporales a descriptores sonoros relacionados con la percepción. Para componentes repetitivos del ruido de motor o de rodamiento se puede utilizar un enfoque más pragmático. Al prescribir los valores de amplitud bien definidos de un conjunto de armónicos determinado (velocidades de motores o armónicos de las ruedas), la subsiguiente aproximación de estas amplitudes relacionadas con el giro variarán el ruido resultante junto con los parámetros subjetivamente asociados ([32]).

Las medidas prácticas de control activo se representan aquí mediante un ejemplo que demuestre el potencial del estado del arte para los coches. Este ejemplo demostrará la factibilidad del Diseño del Sonido Activo en un coche de pequeño tamaño de 4 cilindros (Nuevo Escarabajo). Para demostrar las capacidades de un sistema de estas características, se utilizó para producir los sonidos de diferentes motores de otros coches ([32],[33]). Los sonidos objetivo se obtuvieron de las mediciones en estos coches y luego se almacenaron para utilizarlos en el dispositivo del procesado de señal. Basándose en las señales de error de seis micrófonos de error y con la información adecuada sobre las revoluciones y la carga del motor, seis altavoces secundarios se alimentaron de manera que el campo sonoro resultante fuera una aproximación óptima de los sonidos prescritos.

La Fig. 6 incluye algunos ejemplos típicos que muestran el espectro de frecuencia dependiente del tiempo en el oído del conductor si el coche es consecutivamente revolucionado (a 6000 rpm) y reducido con cuatro implementaciones de sonido diferentes. La primera prueba (parte más inferior de la Fig. 6) muestra el espectro típico de un coche deportivo de 12 cilindros, seguido a continuación por un coche deportivo de 8 cilindros, un coche deportivo de 6 cilindros y, finalmente, por el sonido de motor original de 4 cilindros (sistema desconectado).

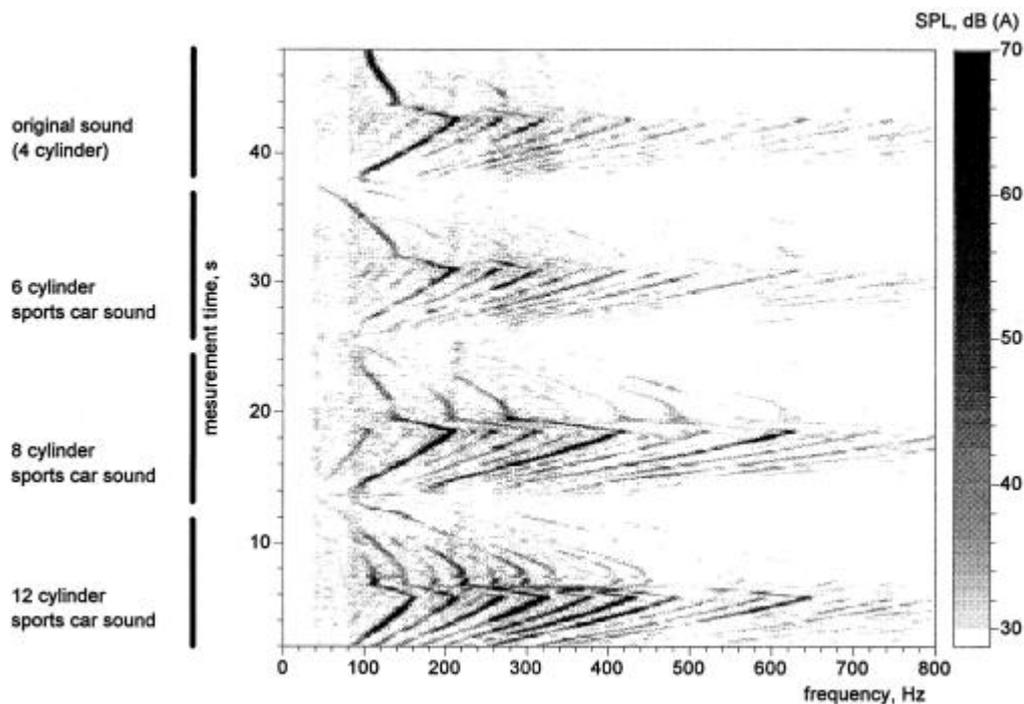


Fig. 6 Espectros de presión sonora ponderados A en el oído del conductor para cuatro pruebas consecutivas con diferentes sonidos de motor.

El efecto fue – objetivamente (por mediciones) y subjetivamente (de oído) – sorprendente. Los diferentes sonidos fueron capaces inmediatamente de generar la ilusión acústica de conducir un coche diferente. De esta forma, el sistema puede ser algo más que un juguete: puede ser asimismo utilizado – y debería ser extremadamente útil – como una herramienta experimental para determinar y ensayar de manera óptima sonidos para coches específicos.

Finalmente, debería mencionarse que el Diseño de Sonido Activo se utilizó recientemente para reducir y/o modificar el ruido de sistemas de admisión de aire de motores de coches. Los resultados experimentales de los dispositivos de ensayo ([34]) fueron bastante prometedores y parecen haber despertado un gran interés entre los expertos. Por ello se puede afirmar que – a pesar de alguna incertidumbre sobre la aceptación de los sonidos falseados por medios electroacústicos – el panorama de la obtención de sonidos deliberadamente diseñados es altamente atractivo.

Los resultados de trabajos anteriores finalmente llevaron a la implementación de un sistema para demostrar el diseño de sonido interior activo en un Nuevo Escarabajo. Aparte de reducir el ruido del motor en el interior del vehículo, este sistema permite la creación de sonidos interiores arbitrarios dependientes de las revoluciones del motor. Al pulsar un botón, es posible modificar el sonido típico de un motor de cuatro cilindros para dar una impresión acústica de un motor de seis cilindros en el interior del vehículo. Este diseño del sonido podría reproducir también el tono deportivo de un turismo o el confort acústico de una limusina.

La Fig. 7 muestra los espectros típicos del nivel sonoro en la posición del conductor para diferentes escenarios sonoros: el espectro sonoro original en el diagrama superior, el espectro

para el modo de reducción sonora más abajo y el espectro para un motor típico de 6 cilindros en la parte inferior. A pesar de que la representación en blanco y negro muestra una clara interpretación de los datos más bien difícil, se puede apreciar que el segundo orden del estado inicial para valores de 5000 a 6000 rpm podría compensarse en el modo de reducción. Asimismo, en el modo de 6 cilindros, se puede apreciar que los órdenes 6º y 9º son mucho más dominantes que en los demás casos que indican que el motor virtual ha cambiado definitivamente sus características.

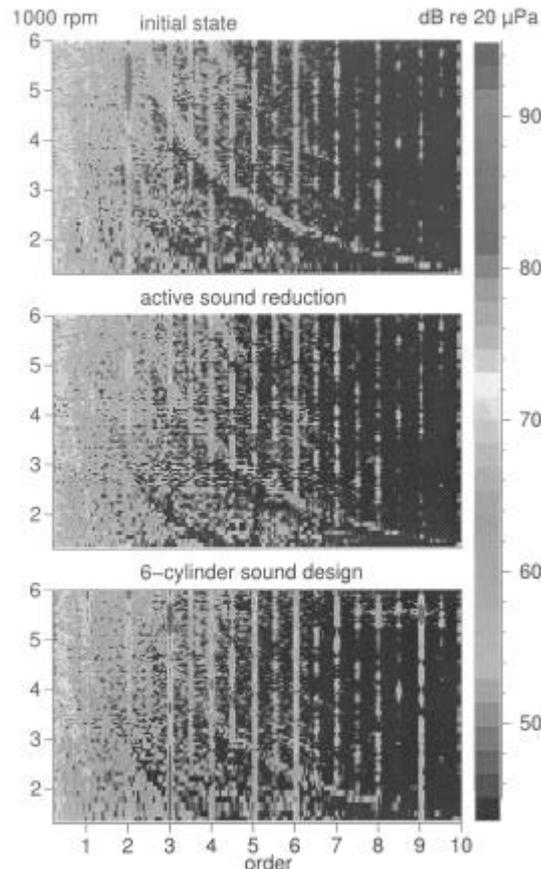


Fig. 7 Espectros del nivel sonoro en la posición del conductor durante un lento recorrido en carretera

Esta característica cualifica el sistema para apoyar enérgicamente el trabajo de ingeniería permitiendo ensayos in situ de sonidos en condiciones plenamente operacionales. Por ello, puede ser de utilidad para demostrar los objetivos así como los efectos de las medidas acústicas para ambos enfoques: los activos y los pasivos.

## CONCLUSIONES

Tras los períodos consecutivos de entusiasmo y desilusión sobre el ruido activo y el control de vibración, la recapitulación detallada y consciente de los conceptos físicos básicos puede ayudar a la hora de encontrar qué aplicaciones tienen el potencial para superar con éxito la resistencia de los profesionales. Junto con posteriores progresos, especialmente con respecto a los actuadores avanzados, esto debería finalmente llevar a un merecido éxito de la técnica. En cualquier caso, las implementaciones del control del sonido activo abren la posibilidad de experimentar con sonidos in situ, por ejemplo, fuera del laboratorio en condiciones reales y en tiempo real. Esto puede preverse para ampliar ensayos auditivos y verificaciones en entornos reales – una mejora natural y consecuente de los clásicos ensayos auditivos.

## REFERENCIAS

- [1] M.A.Swinbanks: The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts. Journal of Sound and Vibration (J.S.V.), Vol.27, No.3, 1973, pp. 411-436.
- [2] P.Lueg: Process of Silencing Sound Oscillations. US Patent No. 2043416, 1934.
- [3] H.F.Olson: Electronic Control of Noise, Vibration and Reverberation. JASA, Vol.28, Nr.5, 1956, pp. 966-972.
- [4] W.B.Conover: Fighting Noise with Noise. Noise Control, Vol. 92, 1956, pp.78-92.
- [5] M.Jessel, G.Mangiante: Active Sound Absorbers in an Air Duct. J.S.V., Vol. 27, No.3, 1972, pp. 383-390.
- [6] P.A.Nelson, S.J.Elliott: Active Control of Sound. Academic Press, London, 1992.
- [7] C.R.Fuller, S.J.Elliott, P.A.Nelson: Active Control of Vibration. Academic Press, London, 1996
- [8] S.J.Elliott: Signal Processing for Active Control. Academic Press, London, 2001
- [9] Hansen, Snyder: Active Control of Noise and Vibration. Spon, 1997.
- [10] M.A.Heckl: Active Control of the Noise from a Rijke Tube. J.S.V. 124, 1988, 117-133
- [11] M.A. Swinbanks: The Active Control of Sound and Vibration and some Applications in Industry. Proc.Inst.Mech.Eng. 198A, 1984, 281-288.
- [12] Scheuren et.al.: Experiments with Active Vibration Isolation. Proc. Active 95, Newport Beach, 1995, pp. 79-88.
- [13] Watters et.al.: A Perspective on Active Machinery Isolation. Proc. 27th Conf. On Decision and Control, Austin, 1988, pp 2033-2038.
- [14] Jenkins et.al.: Active Isolation of Periodic Machinery Vibrations. Journal of Sound and Vibration (JSV), Vol., 166(1), 1993, pp. 117-140.
- [15] Elliott et.al.: The Control of Transmitted Power in an Active Isolation System. Proc. Active 97, Budapest, 1997, pp. 93-104.
- [16] Judell, Heiland: The Design of Vibration Control Solutions for Semiconductor Lithography and Inspection Equipment.
- [17] Kobori: Structural Control of Buildings under Earthquakes and Strong Winds. Proc. Active 97, Budapest, 1997, pp. III-XV.
- [18] Fujita: Smart Structures for Active Vibration Control of Buildings. Proc. Active 97, Budapest, 1997, pp. XIX-XXXVIII.
- [19] Mace: Active Control of Flexural Vibrations. JSV, Vol. 114(2), 1987, pp. 253-270.
- [20] Scheuren: Non-reflecting Termination for Bending Waves in Beams by Active Means. Proc. Inter-Noise 1988, Avignon, pp. 1065-1068.
- [21] Scheuren: Active Attenuation of Bending Waves in Beams. Proc. Of the Institute of Acoustics, Vol. 12, Part 1, 1990, pp. 623-629.
- [22] Scheuren: Aktive Beeinflussung der Wellenausbreitung I – Theoretische Überlegungen zur aktiven Beeinflussung der Ausbreitung von Luft- und Körperschall. Acustica, Vol. 71(4), 1990, pp. 243-256.
- [23] Pan, Hansen: Active Control of Total Vibratory Power Flow in a Beam. I. Physical System Analysis. Journal of the Acoustical Society of America (JASA), Vol. 89, pp. 200-209.
- [24] Gardonio, Elliott: Active Control of Multiple Waves Propagating on a One-dimensional System with Scattering Termination. Proc. Active 95, Newport Beach, 1995, pp. 115-126.
- [25] Elliott et.al.: Vibration Reduction by Active Wave Control in a Strut. Proc. IUTAM Symposium "Active Control of Vibrations", 1994, pp. 1-8.
- [26] Maier et.al.: Active Gearbox Struts for Helicopter Interior Noise Reduction. Second CEAS-ASC Workshop on Aircraft Interior Noise Control. Friedrichshafen, 1998.
- [27] Scheuren: Aktive Beeinflussung der Ausbreitung von BiegeWellen. Dissertation am Institut für Technische Akustik der Technischen Universität Berlin, 1990.

- 
- [28] Fuller: Analysis of Active Control of Sound Radiation from Elastic Plates by Force Inputs. Proc. Inter-Noise 1988, Vol. 2, pp. 1061-1064.
  - [29] Fuller: Active Control of Sound Transmission / Radiation from Elastic Plates by Force Inputs I: Analysis . JSV, Vol. 136(1), 1990, pp. 1-15.
  - [30] Gentry, Guigou, Fuller: Plate Radiation Control with Smart Foam. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, pp.
  - [31] Schirmacher et.al.: Active Noise and Vibration Control for a High Speed Railcar: a Case Study. Proc. Active 97, Budapest, 1997, pp. 557-564.
  - [32] J. Scheuren, U. Widmann, J. Winkler: Active Noise Control and Sound Quality Design in Motor Vehicles. SAE Paper No. 1999-01-1846, May 1999, Proc. SAE Noise and Vibration Conference, Traverse City, USA, pp. 1473-1479, 1999.
  - [33] R. Schirmacher, R. Lippold: Designing, Vehicle Sound by the Use of ANC and Active Sound Design – Theory, Application and Practical Experiences. Transactions IMechE European Conference on Vehicle Noise and Vibration, London, UK, pp. 379-385, 2000.
  - [34] F. Pricken: Active Noise Cancellation in Future Air Intake Systems. SAE Paper No. 2000-01-0026, March 2000.