

## APLICACIÓN DE ACÚSTICA CUALITATIVA EN EL CONTROL ACTIVO DE RUIDO

REFERENCIA PACS: 43.50.Qp

Manuel Sigüero, Pedro Cobo  
Instituto de Acústica. CSIC  
Serrano 144  
28006 Madrid

### ABSTRACT

To determine the hypothetical subjective effectiveness of an active noise control system, two simple experiments were performed. The two tests are based on the same type of judgements made by the subjects: pair comparisons. Also a simple test of auditive perception was conducted to equalise the loudness level of the noise and the calibration signal. The results of the two tests were in general agreement with the active noise control measures.

### INTRODUCCIÓN

Desde hace años se vienen realizando en nuestros laboratorios ensayos objetivos en el campo del Control Activo de Ruido (en adelante CAR). Estos ensayos buscan optimizar las herramientas constructivas y de calibración del sistema, desde el punto de vista metrológico y también desde el mecánico, para su desarrollo en distintas aplicaciones. Uno de los recintos en los que estamos trabajando y donde hemos instalado nuestro prototipo es una furgoneta de transporte de pasajeros (ocho incluido el conductor) (1). En el siguiente punto se especifica con más detalle las características y disposición del sistema.

Como el prototipo ha alcanzado un grado de efectividad considerable (2), el paso siguiente, dentro del campo de la acústica cualitativa (AC) será la comprobación de que dicha mejora puede ser reconocida, desde el punto de vista subjetivo, por una población representativa de individuos. Cuando hablamos de efectividad nos estamos refiriendo a un grado de reducción de molestia frente al ruido de suficiente importancia como para originar dos aspectos fundamentales:

Que lo sea en un porcentaje aceptable para ser percibido sensorialmente.  
Ser fácilmente reconocible numérica y gráficamente y, por tanto, mensurable.

Mediante el principio de superposición en el que se basa el método de CAR, lo que tratamos es de reducir el ruido de motor y estructural en el interior del vehículo, utilizando elementos electroacústicos. Desde luego se busca reducir, incluso eliminar, los sonidos desagradables con la intención de que las condiciones de habitabilidad para conductor y pasajeros sean menos molestas.

Por lo tanto aquí ya nos encontramos con dos premisas en las que se suele pensar como evidentes, aunque hasta ahora no se hayan verificado más que a través de la opinión sugerida, nunca confirmada, de los usuarios ocasionales sometidos a este tipo de ambiente ruidoso. Una premisa es la de que el ruido en el interior de la furgoneta resulte molesto, y la otra es que al introducir el sistema CAR, con la disminución de frecuencias graves, también disminuiríamos el grado de molestia de los posibles usuarios, generado por los ruidos del vehículo.



Las pruebas de audición en las que vamos a trabajar tratarán de confirmar o negar ambas premisas, añadiendo una alternativa a los niveles de reducción de la señal CAR. Compararemos también la percepción auditiva de la señal completa, no sólo con la generada por nuestro control activo, que puede verse en gráficas posteriores, sino con atenuaciones de  $-4$  dB y  $-9$  dB en el margen dinámico de dicha señal completa.

## SISTEMA CAR

Los sistemas CAR están basados en el principio de interferencia destructiva. Un sistema CAR genera un antirruído de igual amplitud pero fase contraria. En condiciones de linealidad, el ruido primario y el ruido secundario, generado activamente, se cancelan. Los sistemas CAR son el complemento ideal de los sistemas pasivos cuando el ruido contiene frecuencias bajas y altas. El CAR funciona tanto mejor cuanto más baja es la frecuencia. Los sistemas CAR contienen una parte acústica (sensores y actuadores) y una parte electrónica (el sistema de control). En una implementación anticipativa, el controlador recibe información previa del ruido (señal de referencia), genera la señal de control para los actuadores, y adapta los filtros de control para minimizar la suma de los cuadrados de las señales en los sensores de error (filtros LMS adaptativos). Ya que los sistemas CAR han de funcionar en tiempo real, se requieren procesadores capaces de realizar un número grande de operaciones por segundo. Los microprocesadores especializados en operaciones de cálculo numérico son los DSP.

Las aplicaciones CAR en medios de transporte (vehículos, aviones) son las que tienen un mayor potencial económico, por dos razones:

**Ambiente acústico:** ambas aplicaciones tienen una incidencia importante en el ambiente acústico al que está sometido una gran parte de la población. Además, en ambos casos, es importante conseguir una mejora de unos cuantos dB en baja frecuencia, sin incrementar el peso del vehículo.

**Económicas:** en el caso del avión, el incremento del coste económico que supone implementar un sistema CAR es despreciable frente al coste total del avión. En el caso de los vehículos, la fabricación masiva de unidades de un modelo hace que el precio del DSP necesario para implementar el sistema CAR baje apreciablemente.

Nuestro grupo viene trabajando desde hace dos años para reducir el booming de un vehículo prototipo (1). La configuración CAR multicanal que ensayamos consta de 6 altavoces, 6 micrófonos y una señal de referencia, distribuidos en el interior como sigue:

Altavoces A1 y A2, en el techo, encima de las cabezas de los asientos delanteros.

Altavoz A3, debajo del asiento en la fila central.

Altavoces A4 y A5, en el techo, en las esquinas traseras del vehículo.

Altavoz A6, debajo del asiento trasero.

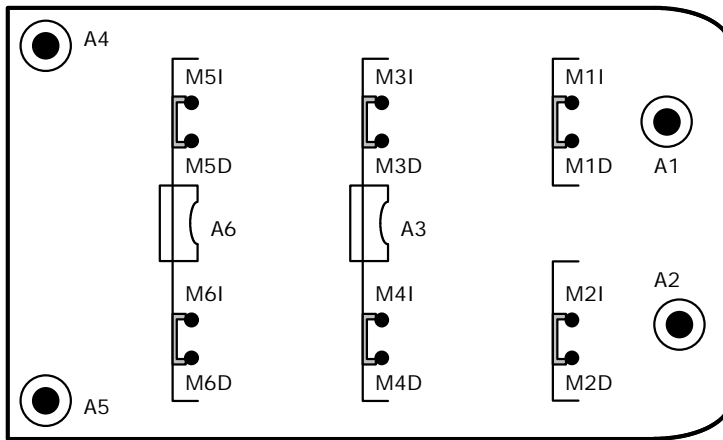
Micrófonos M1, M3, y M5, en la parte derecha de los reposacabezas de los asientos delantero, central y trasero, respectivamente.

Micrófonos M2, M4, y M6, en la parte izquierda de los reposacabezas de los asientos delantero, central y trasero, respectivamente.

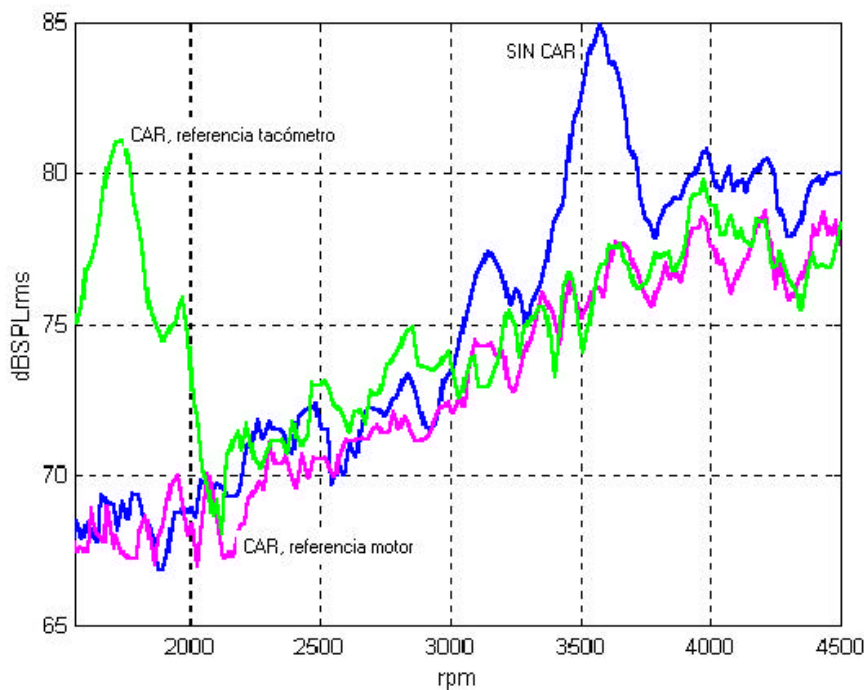
Señal de referencia proporcionada por un acelerómetro sobre el soporte izquierdo del motor.

Para el sistema CAR usamos micrófonos de electrete. Para las medidas, usamos micrófonos B&K de media pulgada, aproximadamente en las mismas posiciones que los micrófonos de error. La ventaja de usar micrófonos B&K para las medidas es que pueden ser calibrados, por lo que los resultados se pueden expresar en dB re 20 Pa. La siguiente Figura muestra un esquema con la posición aproximada de sensores y actuadores.





La gráfica siguiente muestra un resultado típico de nuestro sistema CAR para reducir el booming. Se representa el nivel global en el micrófono M1D, cuando se acelera el vehículo entre 1500 y 4500 rpm, en tercera marcha. Cuando el motor excita un modo de cavidad, alrededor de las 3600 rpm, se produce un incremento súbito del ruido. Con el sistema CAR conectado, y la señal de referencia del motor, se cancela el booming. Nótese como con una referencia tacométrica también cancelamos el booming, pero reforzamos una zona alrededor de las 1650 rpm. Este resultado ilustra la importancia de la elección de una señal de referencia apropiada.



En el asiento delantero derecho se obtenían resultados similares. En los asientos de la segunda y tercera filas la cancelación era cuantitativamente menor, debido a que el booming era menos importante.

## ESTÍMULOS SONOROS

El primer elemento a estudiar en el campo de la AC es una precisa toma de datos del fenómeno sobre el que queremos incidir. El proceso de captación y grabación de las señales sonoras en el interior del vehículo se llevó a cabo el año pasado según un procedimiento del que dimos cuenta en la Tecnia Acústica de Lisboa (3).

En este nuevo ensayo hemos grabado las señales de prueba incluyendo ya nuestro prototipo de reducción de ruido. Por tanto la batería de grabaciones incluirá de forma alterna, para cada punto de toma de datos, el sonido del interior del vehículo en marcha tal como sale de fábrica y con el sonido del sistema CAR conectado y actuando.

Los micrófonos se han situado en cada uno de los puntos que correspondería a la altura de la cabeza de cada uno de los ocupantes, en disposición estereofónica y manteniendo una separación entre sus diafragmas de 25 cm aproximadamente, tratando de realizar una toma de sonido quasi-binaural. Utilizaremos como señal de referencia la generada por un pistófono a una frecuencia de 1.000 Hz y 94 dB de presión sonora (no confundir la señal de referencia para la calibración de los niveles con la señal de referencia para el sistema CAR). La grabación de las señales en soporte DAT (Digital Audio Tape), nos permitirá la posterior edición digital de los fragmentos seleccionados para la prueba, de modo que las señales se preservan en su casi totalidad.

Se han realizado dos pruebas separadas en las que se presentan seis tandas de sonidos agrupados por pares. Los estímulos sonoros tendrán una duración total de 7 segundos, incluyendo tiempos de subida y extinción de 0,3 segundos cada uno. Se presentarán al auditorio para realizar los tests de juicios subjetivos a través de auriculares electrostáticos calibrados (STAX) con su pre-amplificador acoplado con ganancia ajustable de una gran dinámica (> 65 dB) y un bajo nivel de ruido de fondo (< 15 dB). Las señales de ambos tests, una vez editadas digitalmente para incluir la indicación verbal y los “fadings”, se presentan en soporte DAT.

Tanto las señales originales como las modificadas se han presentado a los oyentes con distintos grados de atenuación. El objetivo de esta prueba era el de comparar señales cuyo espectro se modifica a través del sistema CAR y las mismas señales originales con atenuaciones de -4 dB y -9 dB en el rango dinámico. Mediante este procedimiento podría deducirse que la sensación de molestia para este tipo de ruido puede depender del rango de frecuencias de su espectro o que, de otro modo, puedan ser los niveles de presión sonora los que influyan en su percepción.

El panel de la primera prueba o test de audición, estará compuesto por 27 sujetos con oído sano y respuesta auditiva aceptable (audiometría) y un grado suficiente de escucha crítica que nos permita valorar los resultados con suficiente fiabilidad. Los fragmentos serán seis pares de señales alternando señal con CAR y señal sin CAR.

El panel de la segunda prueba se compone de 27 oyentes y los términos son muy similares a los del test anterior. La diferencia es que las señales incluidas en ésta tratan de comparar fragmentos con y sin CAR con fragmentos atenuados en las proporciones antes citadas.

**Las pruebas se inician con una pequeña explicación verbal de lo que vamos a escuchar y la instrucción: *Indica con una cruz en el recuadro A o B, el sonido que te resulta menos molesto (o cual es el que prefieres).***

## DISEÑO EXPERIMENTAL

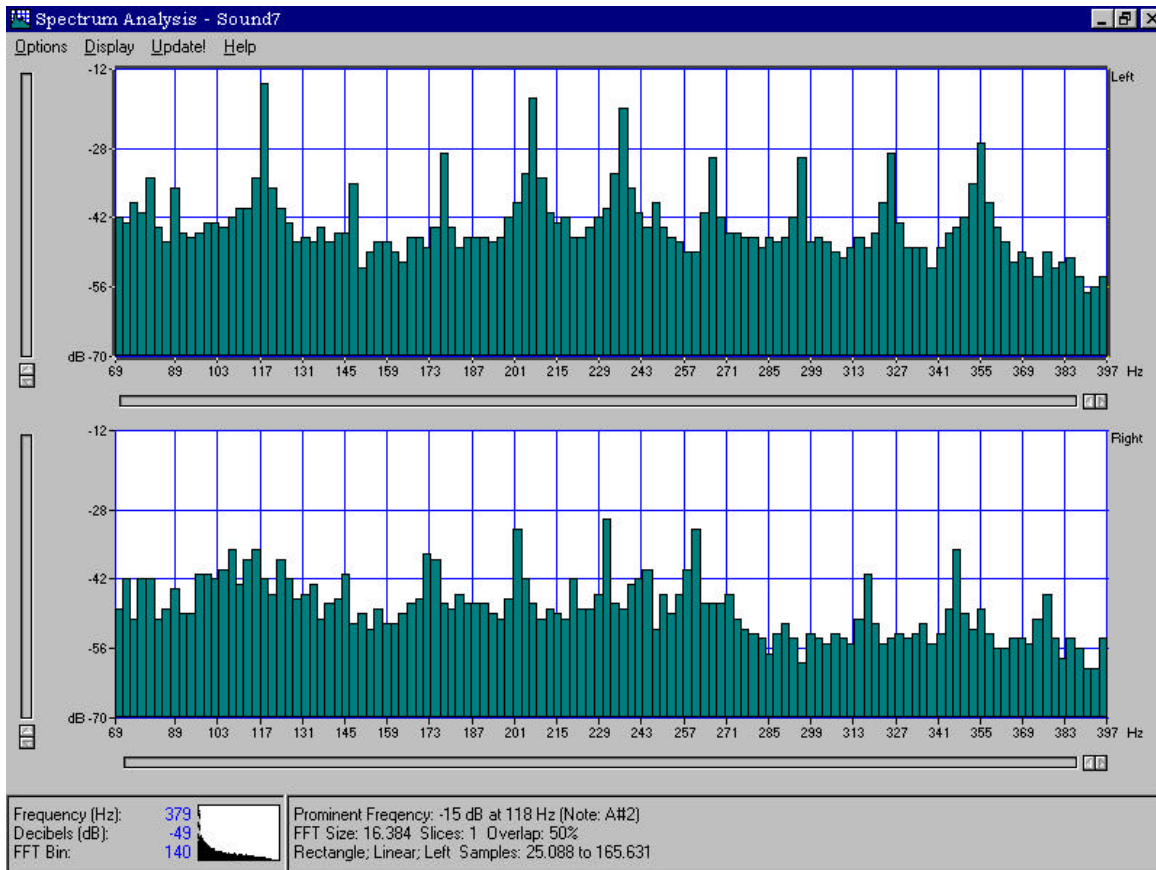
Los dos tipos de ensayos subjetivos más utilizados suelen ser el de “pares comparados” y el de “escala de categorías numéricas”. Otros como el de “diferencial semántico” o los sometidos a procesados puramente estadísticos pueden llegar a relativizar aspectos analíticos que a nosotros sí nos pueden interesar, como son la incidencia de determinadas frecuencias parciales en el tratamiento de señal con el que trabajamos.



Las grabaciones seleccionadas han sido realizadas manteniendo la separación binaural, bien a través de cabeza artificial Neumann o mediante par microfónico Brüel & Kjaer. Se han elegido puntos de medida en distintos lugares de asientos de pasajeros y en el puesto del conductor. El soporte magnético utilizado es un magnetófono digital DAT.

Los fragmentos elegidos pertenecen a grabaciones “in situ” realizadas a 3600 revoluciones, en 3ª marcha, en cámara semi-anecóica.

A continuación se presentan los espectros de las señales originales y los modificados por el prototipo CAR. La gráfica de la parte superior corresponde a la FFT del sonido en el interior de la furgoneta en marcha a 3600 rpm cuando NO se conecta el sistema. La gráfica inferior corresponde al mismo sonido cuando SI está conectado el CAR.



Una de las condiciones de la prueba es mantener en el laboratorio de audición las características de las señales obtenidas en el vehículo en marcha en el interior de una cámara semi-anecóica. Es de una gran complejidad mantener todas las condiciones que caracterizan las señales del motor. Sobre todo en el laboratorio no podemos restituir las señales vibratorias que se inducen del conjunto: vehículo – motor – estructuras. Nosotros vamos a limitarnos a tratar de mantener los niveles de sonoridad del ruido real y del ruido reproducido.

Como en el proceso de grabación hemos insistido mucho en incluir las señales de calibración para los micrófonos empleados, este va a ser el momento de poder utilizarlas. Los índices de sonoridad exigen para su cálculo un

engorroso procedimiento que tiene su ineludible aplicación en determinadas medidas sobre todo en el ámbito de la calibración de transductores, y por ello ha sido objeto de normativa internacional (ISO R-532, con sus apartados A y B), reconocida por todos. La aplicación práctica de este trabajo no nos exige el conocimiento de la sonoridad absoluta de los sonidos con los que estamos trabajando sino una útil aproximación con la idea de realizar los tests de percepción con garantía de similitud con la señal generada "in situ".

La sonoridad que nosotros queremos conocer la vamos a estimar mediante un promediado de juicios subjetivos (4) de modo similar a como se llevarán a cabo el resto de las pruebas, es decir, por comparación.

Si disponemos de una señal de calibración grabada con un pistófono de frecuencia 1 kHz y 90 dB de nivel de presión sonora; si disponemos de un conjunto de pre-amplificador y auriculares calibrados; si disponemos, por último, de señales grabadas en un magnetófono en cuyos controles hemos mantenido los niveles establecidos durante la calibración de los micrófonos, tenemos lo suficiente. Un panel reducido de oyentes expertos nos permitirá equilibrar los niveles de calibración y los de las señales grabadas del motor para tener la aproximación suficiente en la estimación de la sonoridad de los ruidos en los que se basarán las pruebas posteriores.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Respecto a la primera prueba, de los 27 sujetos a los que se les ha pasado el test, 23 han respondido señalando su preferencia por las señales grabadas que pertenecían al ruido del motor en el interior del vehículo cuando Sí estaba conectado y funcionando el sistema CAR. Los otros cuatro sujetos han expresado dudas en algún término o han señalado 1 o 2 alternativas diferentes.

En la segunda prueba 22 de los 27 sujetos que han escuchado el test comparativo, identifican con mayor agrado la señal completa atenuada en -9 dB, respecto a señales con y sin CAR. Se confirma la preferencia de la población estudiada -23 de 27 - por los sonidos con CAR frente a los no atenuados o atenuados en rangos inferiores a los 9 dB.

Dado que los ensayos llevados a cabo mediante los tests de audición eran de una gran simplicidad y teniendo en cuenta que los resultados aparecen netamente marcados, no se ha considerado la posibilidad de elaborar algún tipo de análisis estadístico más complejo. Los resultados de estos tests cualitativos permiten reducir las dudas respecto a la preferencia de los oyentes por los ruidos de motor a los que se ha eliminado la componente del "booming", es decir la región de las bajas frecuencias. Por tanto de ahí parece deducirse que en el grado de molestia ante el ruido generado en el interior de un vehículo de motor en marcha influyen en un porcentaje elevado las frecuencias inferiores a los 200 Hz, concretamente en torno a los 170 Hz e inferiores. Las atenuaciones de la señal en torno a -9 dB se reconocen como menos molestas que la señal completa y la del sistema en marcha. Las atenuaciones entre -4 y -6 dB se perciben como menos molestas que la señal completa pero más molestas que la señal del CAR en funcionamiento.

## REFERENCIAS

- (1). P. Cobo y J.M. Martín. "Medidas de ruido y vibraciones en el interior de un vehículo relevantes para el diseño de un sistema CAR multicanal". Tecniacústica 98. Lisboa.
- (2). T. Bravo, P. Cobo, and J.M. Martín. Active noise control of harmonic sound in a van: a case history". Proc. European Automotive Congress, Barcelona, 1999.
- (3). M. Siguero. "La acústica cualitativa en el control activo de ruido". Tecniacústica 98. Lisboa.
- (4). C. H. Harris(Ed.). "Manual de medidas acústicas y control del ruido"(3ª Ed.). Mc Graw-Hill, Madrid, 1995.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al soporte financiero de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. (Proyecto AMB97-1175-C02-01).

