

# investigación

Área Abierta N° 1 [NOV. 2001]

## CALIDAD SONORA

Autor: Manuel Sigüero Guerra

**RESUMEN:** *El concepto de calidad sonora, compartido por el área de las Ciencias Medioambientales, la Ecología y las relacionadas con la Comunicación, también puede aplicarse en la mejora de los procesos de fabricación industrial. Su utilización práctica en este ámbito se incrementa cada año buscando la satisfacción de potenciales clientes. En este artículo relacionamos dicho concepto aplicándolo al estudio, desde el punto de vista perceptivo, de un sistema de Control Activo de Ruido instalado en un furgón monovolúmen con capacidad para siete ocupantes.*



## INTRODUCCIÓN

Muchos aspectos relacionados con la comunicación - inevitablemente ligados a lo sonoro y a la acústica en definitiva- o la semiología (1) y sus connotaciones del sonido como signo, o la psicología y su descripción y análisis de las sensaciones, necesitan utilizar, cada vez con mayor frecuencia, instrumentos técnicos para expresar sus avances. Los técnicos -atentos la mayor parte de las veces exclusivamente a la precisión numérica de las medidas- debemos apoyarnos también en las descripciones analíticas y la taxonomía eficaz de estas otras ciencias.

Algunos conceptos derivados de la interrelación de varios campos científicos y técnicos que aquí englobamos con el rótulo de acústica cualitativa son, por ejemplo: confort acústico, calidad sonora, audionomía, acusmática. Se aplican en el ámbito de la comunicación y evolucionan apoyándose en pruebas psicométricas. Pero va a ser sobre todo en el terreno industrial donde se van a poner de manifiesto con mayor énfasis. Sobre todo en aplicaciones que tratan de integrar determinados procesos de fabricación de sistemas motorizados y los deseos de los consumidores a través de las características sonoras de un producto.

El sonido ayuda al usuario a desarrollar una impresión global de calidad de un objeto. Dicho concepto de calidad puede representarse mediante una idea de confort acústico; puede ofrecer también la sensación de calidad al identificarlo con determinado status social. La calidad sonora (2) es uno de los atributos evidentes que puede singularizar el objeto fabricado y conseguir diferenciarlo de otros similares que, en el ámbito industrial, denominaremos competidores. En este sentido conviene recordar la estrategia comercial de una marca de motos tan carismática como

"Harley Davison"  que, ante la invasión en el mercado de remedos japoneses de su producto, patentaron a nivel internacional el sonido característico de su motor.

En éste trabajo se obtendrán datos perceptivos que podemos integrar en el concepto de Calidad Sonora, para aplicarlos en el estudio y desarrollo del prototipo de un sistema de Control Activo de Ruido funcionando en un vehículo en marcha.

## CONTROL ACTIVO DE RUIDO. CAR

Los sistemas CAR están basados en el principio de interferencia destructiva. Un sistema CAR genera un antiruido 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.

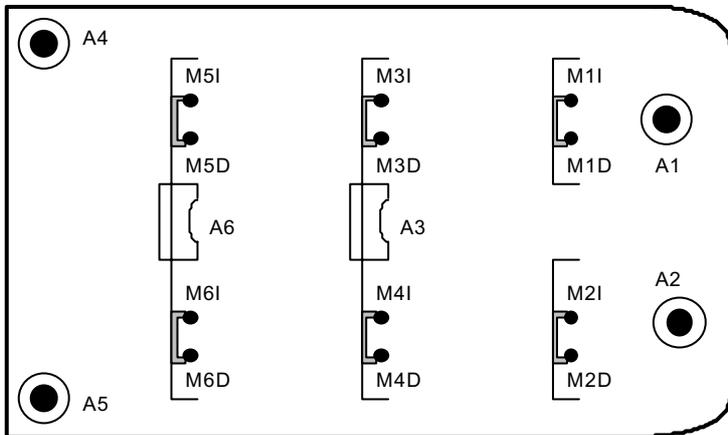
Nuestro grupo viene trabajando desde hace dos años para reducir el "booming" de un vehículo prototipo. La configuración CAR multicanal que ensayamos consta de 6 altavoces, 6 micrófonos y una señal de referencia, distribuidos en el interior como sigue:

- 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, doble, 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.



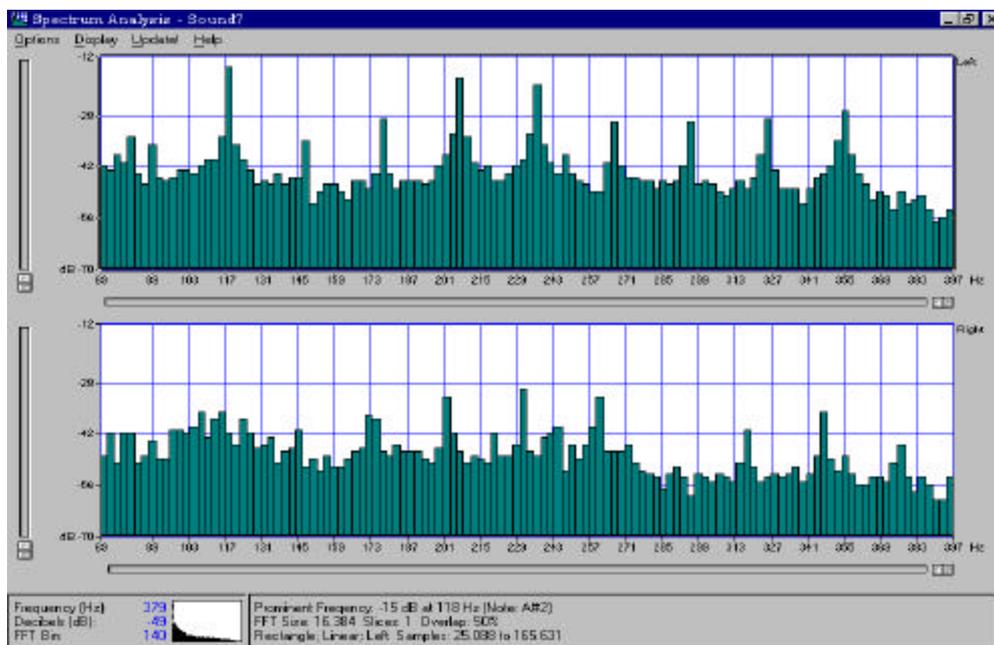
Foto de la furgoneta donde se puede apreciar la red de micrófonos-altavoces.

Para el sistema CAR usamos micrófonos de electrete con buena relación señal-ruido. Para las medidas, usamos micrófonos Brüel&Kjaer 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 unidades de presión normalizadas: dB re 20  $\mu$ Pa.



El dibujo muestra un esquema con la posición aproximada de sensores, tanto micros de control como de medida, y actuadores.

A continuación la gráfica n° 1 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.



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 de modo similar a como se llevarán a cabo el resto de las pruebas, es decir, por comparación. Es un procedimiento que podemos ver referido en el "Manual de medidas acústicas y control del ruido" de C.H. Harris (Mc Graw-Hill, 1995).

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.

## **INSTRUMENTACIÓN**

Antes de llevar a cabo las audiciones que nos den una idea del proceso perceptivo que un oyente especializado elabora, es necesario grabar los sonidos de la manera más real posible y mantener luego sus características. Para ello se captan las señales mediante sistemas binaural y estereofónico. Es importante que la grabación incluya los NPS indicativos iniciales con objeto de que se mantengan lo más idénticos posible en el proceso de reproducción sonora. De este modo nos aseguramos que exista una correspondencia cuantitativa entre el sonido "in situ" y los sonidos reproducidos mediante electroacústica en el laboratorio, en la cámara de audición o mediante auriculares. La fidelidad de los equipos empleados queda explicada en los apartados posteriores.

## **CABEZA ARTIFICIAL**

La utilización de este tipo de transductor es necesaria en situaciones en que la grabación de los campos sonoros debe mantener unas condiciones similares a las de nuestro proceso de audición. El sistema usa una réplica normalizada de la cabeza humana así como una réplica esquemática del torso humano. Tanto los pabellones como los canales auditivos son reproducciones exactas de las orejas y conductos humanos. Esto permite mantener la impedancia acústica necesaria a la altura aproximada del tímpano, donde se sitúan las membranas de los micrófonos.

Los micrófonos instalados en la cabeza artificial son omnidireccionales, de condensador (3/8 ") y actúan con alimentación "phanton" de 48 Vcc. Son de la marca Neumann, modelo KM 83i (específicos para éste sistema).

## **MICRÓFONOS**

Se han utilizado micrófonos profesionales de condensador con una respuesta amplitud-frecuencia lineal en el margen de 5 Hz a 17 kHz. Marca SCHOEPS, modelo CMT 56.

Las cápsulas microfónicas se han mantenido en la posición cardioide en todas las grabaciones. Se han alimentado con una fuente "phanton" de 48 V de corriente continua en la etapa de preamplificación.

La situación relativa entre las dos unidades han mantenido el esquema normalizado de la ORTF para micrófonos casi-coincidentes con una distancia relativa de 17 cm aproximadamente.

## **SEÑAL DE CALIBRACIÓN**

Se ha utilizado dicha señal con objeto de disponer de una referencia de NPS en la grabación de los eventos sonoros que nos permita, posteriormente, los mismos niveles en reproducción. Consiste en un tono puro de 400 Hz, generado por un oscilador analógico y un altavoz en el interior del

vehículo bajo prueba. Un sonómetro calibrado nos indica los NPS en dB(C) a la distancia equivalente a la que se sitúan los micrófonos y la cabeza artificial. La grabación posterior exige, lógicamente, mantener los potenciómetros de volumen del DAT en idéntica posición a la que tenían cuando se estaba grabando la señal de referencia.

### DIFERENCIA CUALITATIVA

Como las grabaciones se han llevado a cabo situando el vehículo en cámara semi-anecóica y también al aire libre, en iguales condiciones, tendremos un elemento comparativo importante en la escucha que nos indicará las posibles diferencias entre ambas situaciones. La utilización de dos sistemas de grabación magnética con transductores alternativos, como se explica en apartados anteriores, incrementa las opciones para cualificar las señales sonoras.

### SELECCIÓN DE FRAGMENTOS

Una escucha atenta de las grabaciones nos indica los elevados niveles a baja frecuencia (40 - 100 Hz). La reproducción mediante auriculares tipo "Walkman" o mediante el minúsculo altavoz del DAT es inviable. Este tipo de transductores producen gran distorsión (THD > 3%) al radiar frecuencias inferiores a 100 Hz.

Los fragmentos seleccionados son los de vehículo con el motor en marcha, arranque, aceleración a distintas velocidades, giro del motor a distintas revoluciones, parada del motor, apertura y cierre de puertas. Simultáneamente se han llevado a cabo medidas de inteligibilidad RASTI (3) en los mismos puntos donde se han colocado los micrófonos.

Ruido motor  --- Ruido con CAR 

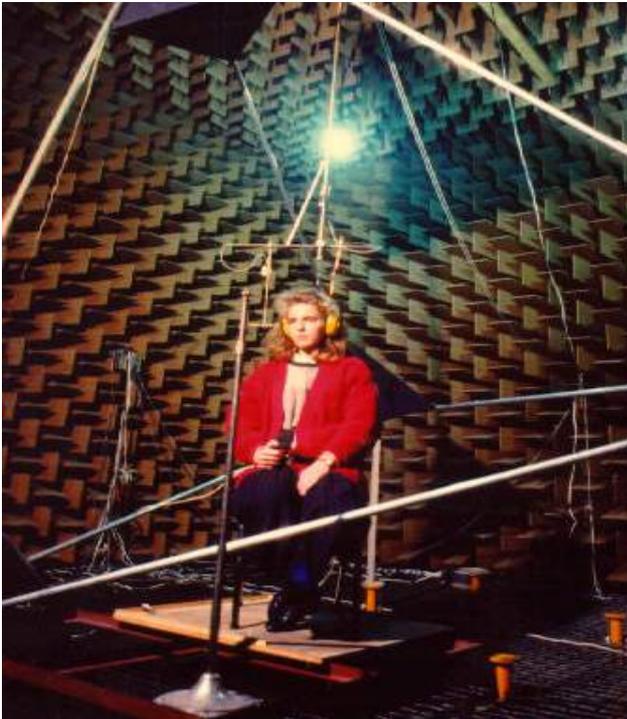
### SALA DE ESCUCHA

Un recinto que sea capaz de restituir las condiciones acústicas absolutas del vehículo bajo prueba es prácticamente imposible. Por esta razón los tests de audición los realizaremos mediante dos procedimientos distintos pero que a la vez sean complementarios:

- A. Auriculares estereofónicos electrostáticos STAX , para reproducir las grabaciones realizadas mediante cabeza artificial.



B. Cámara anecóica y sistema de reproducción "envolvente" de seis canales.



### **SISTEMA ELECTROACÚSTICO**

El sistema de reproducción en sala de escucha debe permitir que la información almacenada repita, con la mayor aproximación posible, las características acústicas del vehículo cuyo sonido queremos evaluar. Si realizamos el test en cámara anecóica tendremos la garantía de la ausencia de reflexiones en las paredes. Sin embargo a cambio necesitaremos incrementar el número de canales, cajas acústicas y correspondientes amplificadores de potencia. Para restituir el ambiente sonoro que se percibe en el habitáculo de un vehículo utilizamos un sistema de sonido envolvente (4) que, a partir de los dos canales estereofónicos de la grabación, nos permita equalizar hasta seis canales en la reproducción: dos canales frontales, dos laterales y dos traseros.

### **AUDIONOMÍA**

Aquí aplicaremos el concepto de lo que denominamos audionomía (del latín, *audi* = oír, del griego *nomia* = Organización) que quiere significar el modo en que se organizan los elementos acústicos y electroacústicos en un proceso de reproducción sonora y escucha de información grabada. Incluye el estudio del entorno acústico donde se lleve a cabo la audición, tratando de restituir las condiciones de espacialidad del recinto, adecuar la situación relativa de las cajas acústicas y calibrar el sistema electroacústico manteniendo las características de lo grabado aún después de haberlo editado. Dicha armonización de elementos debe estar presente en la cadena completa tanto de grabación como de reproducción. Se trata de conseguir el mayor grado de eficiencia hasta obtener una imagen auditiva ideal, es decir, lo más parecida al referente de las condiciones reales. En nuestro caso incluye los anteriores apartados a los que nos hemos estado refiriendo.

### **PRUEBA DE AUDICIÓN**

Para este tipo de pruebas nos remitimos a la normativa al respecto (5) y seleccionaremos un

grupo de oyentes expertos (audiometría correcta y capacidad de escucha crítica). Los test de audición se basan generalmente en dos tipos de prueba: diferencial semántico o pares comparados y sus variaciones. Nuestra experiencia nos enseña que, siendo ya complicado ponerse de acuerdo sobre aspectos técnicos (directividad, distorsión, estereofonía) entre expertos, lo es mucho más cuando se trata de definir adjetivos sobre sensaciones percibidas en una prueba de audición (rugosidad, fluctuación, armonicidad). Por ello somos partidarios de pruebas comparativas - pares comparados - que, conservando las relaciones de audionomía entre sonido real - sonido reproducido, casi llegan a eliminar dicha incertidumbre. Las audiciones que realizamos se hacen intercalando el circuito de control activo diseñado para el proyecto. Los elementos sonoros que incluimos en la comparación son los citados en un apartado anterior, es decir: arranque y parada, aceleración a distintas velocidades y distintas r.p.m. del motor.

## 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 sujetos 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.

En los procesos de grabación - reproducción aplicados al control activo de ruido se observan elevadas distorsiones derivadas del tratamiento de señales de muy baja frecuencia. Están motivadas por ondas estacionarias de baja frecuencia "booming" producidas en el habitáculo del vehículo. Influyen tanto en la grabación saturando los micrófonos, como en reproducción puesto que se requieren altavoces capaces de reproducir, sin distorsión, frecuencias de 50 Hz e inferiores.

La aplicación de los conceptos de calidad sonora en productos industriales no son más que meras disquisiciones académicas con poco significado si no consiguen tener una aplicación concreta. Para incidir en la calidad y que puedan aplicarse teorías y prácticas tenemos que poder incidir en los procesos de fabricación.

## REFERENCIAS

- (1) U. Jekosch & J. Blauert. A semiotic approach toward product sound quality, *Internoise 96*.
- (2) J. Blauert & U. Jekosch. Sound-Quality Evaluation-A Multilayered Problem. *ACUSTICA*. Vol 83. 1997. 747-753.

- (3) RASTI. Rapid Speech Transmission Index. Technical Review. 3.90. Brüel&Kjaer. Denmark.  
(4) M. Sigüero. Parámetros de espacialidad a partir de una señal estereofónica. Tecnicacústica 93.  
(5) IEC 268. Part 13. Subjective listening test.  
IEC 543. Informative guide for subjective listening test.  
ISO 8402. Quality management & quality assurance - Vocabulary.  
DIN 55350. Part 1. Concepts in the field of quality & statistics.



### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido posible gracias al soporte financiero de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto AMB99-1175-CO2-01).

### **ABSTRACT**

Recording, editing and listening sounds are very important processes when applied to sound quality control. From the place where the acoustic baffles are located to the auditive system of subjects under test, the emitted sound follows a complex path; its physical characteristics are partially modified. This paper examines some elements concerning these relationships; in particular they are applied to an active noise control device in a van car.