

## **MEJORA DE LA CALIDAD DEL SONIDO DE MOTOR EN EL INTERIOR DE VEHÍCULOS MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL ACTIVO**

PACS:43.60.Bf

de Diego Antón, María<sup>1</sup>; Ferrer Contreras, Miguel<sup>1</sup>; Piñero Sipán, Gema<sup>1</sup>; González Salvador, Alberto<sup>1</sup>; García Bonito, Juan Jesús<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera s/n,  
46022 Valencia, España.

Tel: 963 877 300. Fax: 963 877 309

<sup>2</sup>Departamento de acústica y vibraciones, IDIADA

L'Albornar, 43710

Santa Oliva, Tarragona, España.

E-mail: mdediego@dcom.upv.es; mifercon@teleco.upv.es; gpinyero@dcom.upv.es;

agonzal@dcom.upv.es; jjgarcia@idiada.es

### **ABSTRACT**

In this work, the good behaviour of active noise control (ANC) techniques for improving quality of interior car noise is validated using two strategies: an objective method based on psychoacoustic parameters (loudness, roughness and sharpness) which applies a comfort prediction model, and a subjective method by means of a jury test. Several signals have been recorded before and after ANC cancellation using a Head Acoustics mannequin positioned inside the car with two calibrated microphones at the ear-canals. Results show that ANC performance reduces at least 20 dB the noise power level (this fact is related with the loudness level), and this is highly appreciated by the evaluators. On the other hand, changes in the other parameters considered due to ANC have not determined an improving in comfort.

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se demuestra la bondad de las técnicas de control activo de ruido (CAR) aplicadas a ruido de motor en el interior de vehículos, no sólo considerando la posibilidad de reducir los niveles de potencia sonora en determinados puntos o zonas interiores del vehículo, sino también intentando mejorar la calidad subjetiva del sonido. Para ello se ha realizado un estudio de la calidad del ruido interior de vehículos mediante dos estrategias: una objetiva que consiste en determinar el bienestar acústico mediante la aplicación de un estimador que depende de parámetros psicoacústicos, y la segunda de forma subjetiva mediante la valoración de un jurado. Se instaló un controlador activo en el interior de un vehículo y se midió el nivel sonoro antes y después de aplicar la cancelación activa. A continuación, se realizó un análisis de las señales grabadas aplicando las estrategias anteriores. Los resultados de los análisis indican que las técnicas de control activo disminuyen en más de 20 dB el nivel de presión sonora original y que dicha reducción es valorada positivamente por el jurado (más del 94% de los casos estudiados). También se ha podido confirmar la repercusión del control activo sobre todo en la disminución del parámetro psicoacústico loudness mientras que para el resto de parámetros psicoacústicos estudiados no se puede deducir ninguna relación directa entre las variaciones sufridas y la aplicación de dicha técnica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Estudios anteriores han demostrado la eficacia de las técnicas de control activo de ruido [1] en la reducción de los niveles de potencia de señales acústicas ruidosas de baja frecuencia en entornos locales (véase [2] y [3]). Esto las hace especialmente apropiadas para controlar los ruidos procedentes de motores e incluso para mejorar la calidad del sonido de motor en el interior de un vehículo, donde podemos reducir gracias a estas técnicas el nivel de potencia de dicho ruido considerablemente. Este estudio trata de centrarse en cómo sería percibida esa disminución de nivel desde el punto de vista humano. Es decir, ¿realmente se aprecia subjetivamente una mejora en la calidad del sonido cuando se aplican técnicas de control activo de ruido? ¿en qué afectan dichas técnicas desde el punto de vista subjetivo? Para ello se ha llevado a cabo un experimento en el que se han grabado diferentes señales de baja frecuencia antes y después de aplicar CAR y se han usado tanto modelos matemáticos para la estimación del bienestar acústico a partir de parámetros propios del sonido, como las opiniones subjetivas proporcionadas por un jurado.

## 2. METODOLOGÍA

Para realizar el estudio propuesto, se ha dispuesto de un sistema de control activo de ruido basado en la placa DSP TMS320C40 de Texas Instrument y una versión multicanal del algoritmo de filtrado filtered-x LMS [1] (Múltiple Error filtered-x LMS) con los que se han podido conseguir unos resultados prácticos de hasta 35 dB de atenuación en una región de unos 900

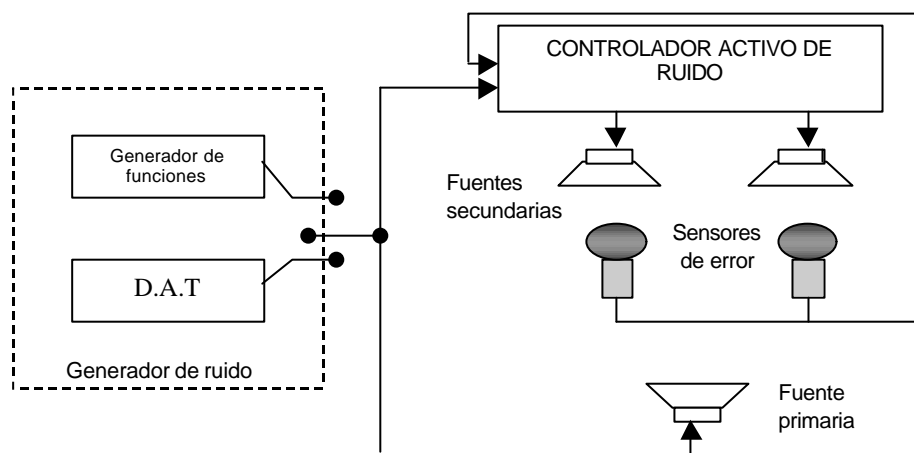


Figura 1: Esquema del sistema de control activo de ruido 2:2 utilizado

cm<sup>2</sup> localizada alrededor de la cabeza del oyente para señales de frecuencia máxima de 230 Hz. En la figura 1 puede verse un esquema típico de un sistema de control activo donde podemos distinguir la fuente primaria (generadora del ruido a cancelar), un par de micrófonos (sensores de error) donde tratamos de minimizar el nivel de potencia acústica, un par de altavoces (fuentes secundarias) mediante los cuales generamos otras señales que se intenten superponer en contrafase al ruido existente en el entorno de los sensores de error y el controlador activo de ruido (básicamente un DSP), mediante el cual realizamos los cálculos pertinentes para la generación de las señales que minimizan los niveles de potencia acústica en los sensores de error. Este esquema se ajusta perfectamente al usado en el experimento, donde además de los elementos mencionados, también se usó un DAT o un generador de funciones para reproducir las diferentes señales de ruido que formaban parte del estudio.

Este sistema ha sido instalado en un recinto de 7.35 m de largo, 4.16 m de ancho y 2.59 m de alto, donde se ha colocado un simulador de cabeza y torso humanos sobre el asiento de un automóvil centrado todo ello en la zona de actuación del sistema de control activo de ruido (figura 2). El simulador posee dos micrófonos calibrados en los canales auditivos con los que registraba los sonidos utilizados en el experimento, cuando se ejercía control y sin control. Posteriormente los sonidos eran analizados o presentados a un jurado para su valoración subjetiva.

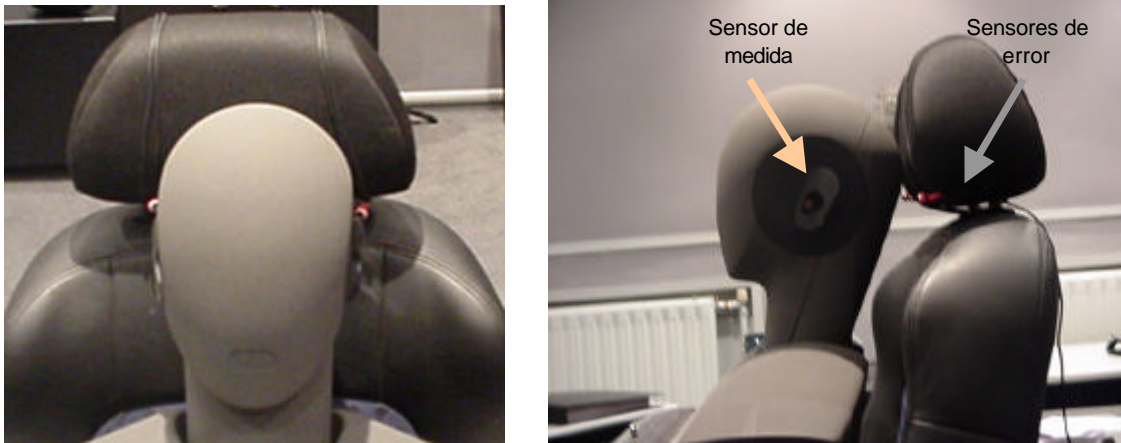


Figura 2: Localización del sistema de actuación de control activo y de la cabeza acústica.

Los sonidos que formaban parte de este experimento se han dividido en cuatro grupos: por un lado tonos puros de 50 a 200 Hz, por otro lado tonos acompañados de 10 armónicos con frecuencias fundamentales entre 20 y 30 Hz, ruido blanco y, por último, grabaciones de ruido en el interior de un vehículo en ralentí, aceleración y velocidad constante. De esta forma se ha podido estudiar cómo afecta el control activo de ruido a señales reales y a sus parámetros psicoacústicos, así como determinar si la naturaleza de la señal influye en los resultados obtenidos.

### 3. EVALUACIÓN OBJETIVA DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

En primer lugar, los sonidos recogidos por los micrófonos del simulador de cabeza y torso han sido analizados para obtener sus parámetros psicoacústicos [7]. A partir de ellos se ha evaluado como afecta el control activo a dichos parámetros. Los parámetros estudiados fueron: loudness (representa el nivel de potencia acústica ponderado por la percepción subjetiva humana), sharpness (da una idea de la distribución del contenido espectral del sonido, siendo mayor conforme más rica en altas frecuencias sea la señal), roughness (modeliza la percepción humana frente a pequeñas variaciones temporales del sonido) y tonality (trata de estimar la pureza tonal del sonido).

De los resultados obtenidos podemos destacar que el control activo de ruido, ver figuras 3 y 4, parece que sólo afecta sistemáticamente al loudness, del cual se aprecia una disminución considerable en sus valores. Este hecho está de acuerdo con los objetivos básicos de los sistemas de control activo de ruido, que no tratan otra cosa que reducir los niveles sonoros (directamente relacionados con los valores del loudness de una señal). Para el resto de parámetros no podemos extraer conclusiones tan claras. A tenor de los resultados obtenidos parece que el control activo no tiene mayor influencia sobre el roughness, mientras que tiende a subir los valores del sharpness. Los efectos sobre el tonality parecen ser imprevisibles. Todos estos resultados entran dentro de lo que cabía esperar atendiendo al significado de cada uno de los parámetros psicoacústicos, dejando patente que sobre el único parámetro que podemos tener un cierto control con las técnicas de control activas de ruido empleadas es sobre el loudness.

En las figuras 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos; las barras oscuras indican los valores de los parámetros cuando no se ejerce control activo (dos barras por frecuencia porque se representan los valores en cada uno de los canales o micrófonos del simulador de cabeza y torso), mientras que las más claras expresan los valores después de la aplicación de dichas técnicas.

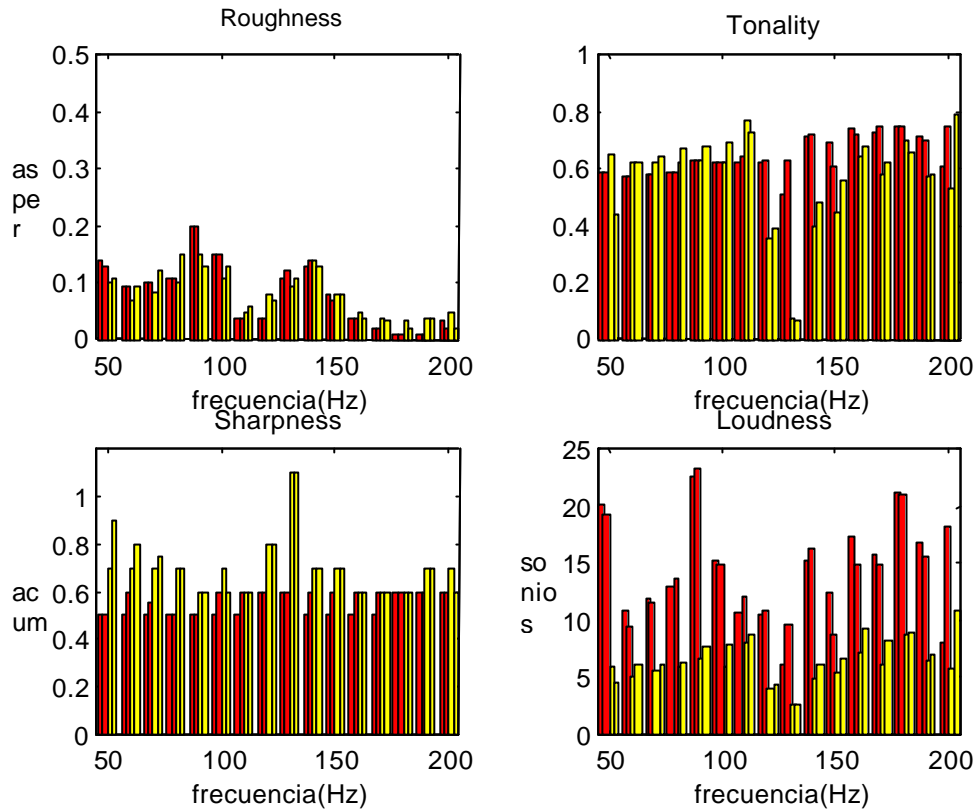


Figura 3: Valores de los parámetros psicoacústicos con y sin control activo para tonos puros

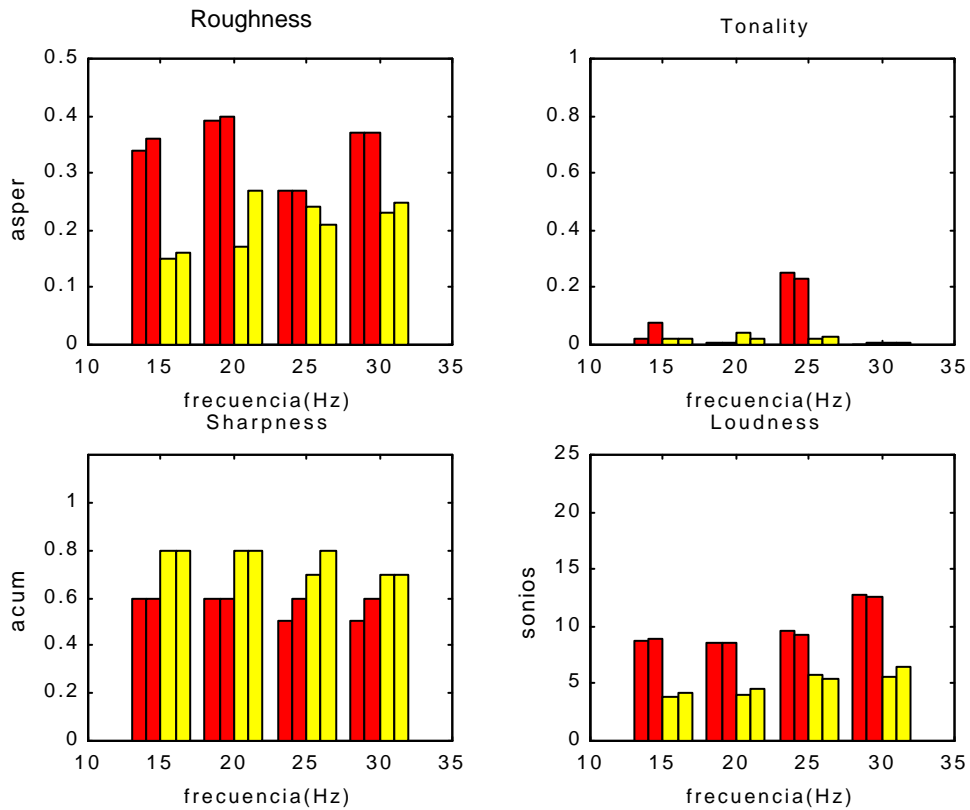


Figura 4: Valores de los parámetros psicoacústicos para tonos con 10 armónicos (con y sin control activo)

Empleando modelos basados en los parámetros psicoacústicos, podemos hacer una estimación del bienestar sobre estos sonidos, viendo como afecta el control activo al bienestar propiamente dicho. Algunos artículos [5] y [6] ya han tratado este tema y en este documento se

ha empleado el modelo descrito en [4] para estimar el bienestar acústico. Se trata de un modelo para motores diesel que depende linealmente de dos de los parámetros psicoacústicos (loudness (N) y roughness (R) ) y cuya expresión es:

$$Y = -7.5395 - 0.2995 \cdot N - 3.1451 \cdot R$$

Tras aplicar este modelo a los sonidos bajo estudio (descritos en el punto 2) podemos afirmar que el ejercer control activo de ruido mejora sensiblemente el bienestar del sonido como se puede apreciar en la figura 5.

Aunque todos los modelos matemáticos de bienestar tienden a dar una idea bastante aproximada de la subjetividad humana y los resultados obtenidos refuerzan la idea de que el control activo de ruido mejora la calidad subjetiva del sonido, faltaría contrastar estos resultados con la opinión subjetiva humana, que es realmente lo que tratamos de estudiar en este artículo.

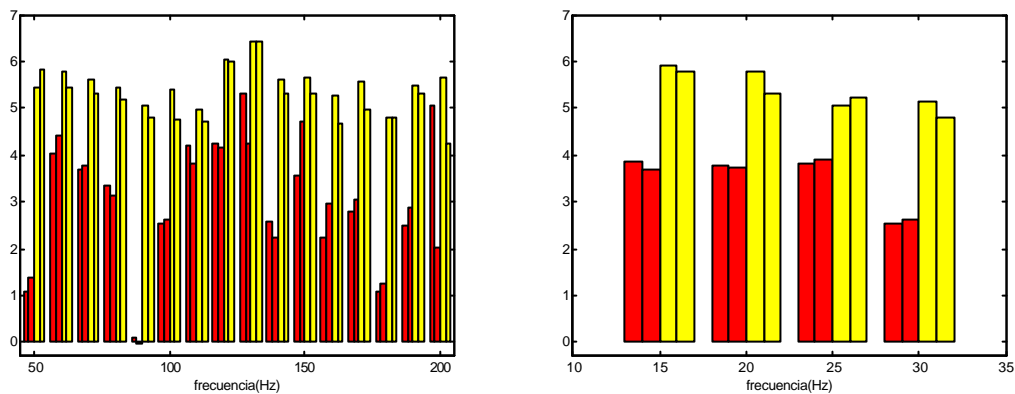


Figura 5: Estimación del bienestar acústico para señales de tonos puros y tonos con diez armónicos y diferentes frecuencias fundamentales cuando no se ejerce control activo (barras oscuras) y cuando se ejerce (barras claras)

#### 4. EVALUACIÓN SUBJETIVA DEL CONTROL ACTIVO DE RUIDO

Finalmente, se ha procedido a evaluar los efectos del control activo de ruido sometiendo algunas de las señales (cuatro tonos puros, dos señales armónicas y las tres grabaciones y ruido blanco) antes estudiadas al criterio subjetivo de un jurado humano. Se pidió al jurado (formado por 26 personas) que evaluara dos características en dichas señales: la sonoridad, para comprobar si la disminución que el control activo de ruido produce en los niveles de potencia es apreciable desde el punto de vista humano, y el bienestar acústico, para ver si dicha disminución se traduce en mejora de la calidad del sonido.

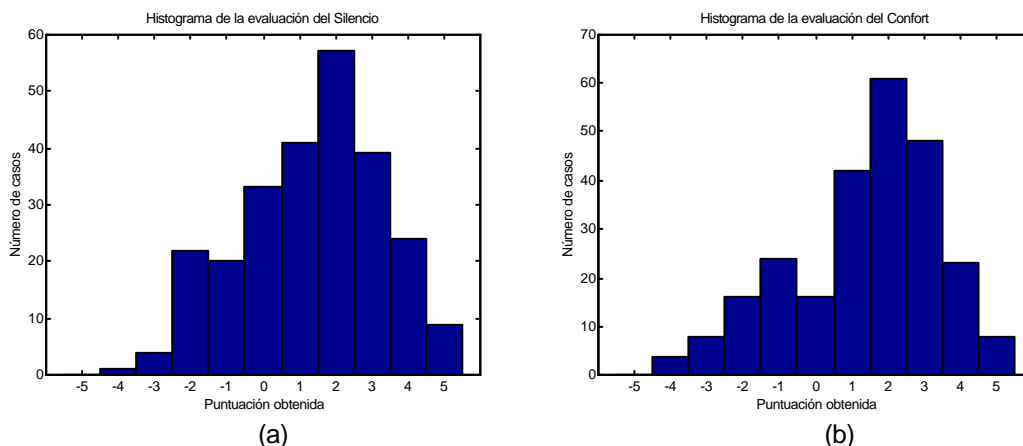


Figura 6: Histogramas de las puntuaciones para la evaluación de la sensación de silencio (a) y de bienestar (b).

Para ello cada miembro del jurado escuchó comparativamente la misma señal grabada antes y después del control y puntuó los efectos del control con una nota de -5 a 5 entendiendo que

puntuaciones mayores que cero consideran dichos efectos como positivos y menores como negativos, tanto para la sonoridad como para el bienestar.

Los resultados obtenidos para la sensación de bienestar y para la de silencio (sonoridad) quedan reflejados con detalle en los histogramas de la figura 6.

Como datos importantes podemos destacar que casi en un 75% de los casos la sensación de bienestar ha sido puntuada favorablemente cuando se ejerce control activo; además hay que destacar que en el 94% de los casos en los que se ha considerado que existe mejora en la sensación de silencio también se ha opinado que la sensación de bienestar mejora, dejando claro que para estos casos, la disminución del loudness está muy relacionada con el aumento del bienestar acústico.

La opinión que el jurado dictó sobre los efectos del control activo de ruido se puede resumir en las siguientes dos tablas:

	Mucho peor	Peor	Igual	Mejor	Mucho mejor
Silencio	0.4%	18.4%	13.2%	54.8%	13.2%
Bienestar	1.2%	19.6%	6%	60.8%	12.4%

Tabla 1: Valoración general cualitativa de los efectos del control activo de ruido

	Mucho menos agradable	Menos agradable	Igual de agradable	Mas agradable	Mucho mas agradable
Ralentí	4%	68%	4%	24%	0%
Velocidad Cte.	0%	4%	4%	92%	0%
Aceleración	0%	8%	24%	68%	0%
Ruido aleatorio	4%	56%	24%	16%	0%

Tabla 2: Valoración de los efectos del control activo sobre el bienestar para señales reales

## 5. CONCLUSIONES

Mediante el estudio subjetivo realizado se ha podido demostrar como el control activo de ruido no sólo es una técnica con la que conseguimos disminuir la potencia de las señales de ruido acústico sino que esta consecuencia es valorada de forma positiva desde la subjetividad humana en la inmensa mayoría de los casos consultados. También podemos concluir que dichas técnicas influyen de forma controlada sobre algunos de los parámetros psicoacústicos de las señales (como el loudness) pero que, en cambio, no hay tanta influencia directa sobre otros parámetros que es posible que si afecten al bienestar acústico. Modelos matemáticos de estimación del bienestar para señales acústicas, nos han proporcionado también resultados satisfactorios a la hora de enjuiciar las consecuencias de aplicar técnicas de control activo de ruido.

## 6. REFERENCIAS

- [1] S. Kuo, D. Morgan, "Active Noise Control System", John Wiley – Sons, 1996.
- [2] M. de Diego, A. Gonzalez, C. García, M. Ferrer. "Some practical insights in multichannel active noise control equalization " Proc. ICASSP-2000, Junio 2000.
- [3] M. de Diego, A. Gonzalez, C. García, " On the performance of local active noise control system" ,Proc. ICASSP-1999, Marzo 1999.
- [4] R. Ingham, N. Otto, T. McCollum, "Sound Quality Metric for Diesels Engines", SAE, Proc. Noise and Vibration conference, 1999, vol 01-1819.
- [5] M. de Diego, A. Gonzalez, G. Piñero, M. Ferrer, J.J. García Bonito, "Subjective evaluation of actively controlled interior car noise" ICASSP 2001.
- [6] M. de Diego, A. Gonzalez, G. Piñero, M. Ferrer, J.J. García Bonito, " Subjective evaluation of active noise control techniques applied to engine noise", Inter-noise 2001.
- [7] E. Zwicker, H. Fastl, "Psychoacoustics-fact and models", Springer-Verlag, 2ª Edición.