

## **VALORACIÓN SUBJETIVA DE LA MOLESTIA DE RUIDO DE AUTOMOCIÓN. INDICE LS**

REFERENCIA PACS: 43.50.Rq

Barti Domingo, Robert  
Po Bonanova, 8  
Departamento de Acústica  
Ingeniería La Salle. URL  
08022 Barcelona. España  
Tel: 34 932 902 427  
Fax: 34 932 902 416  
E-Mail: robert@salleURL.edu

### **ABSTRACT**

Nuisance can not be measured with traditional methods like  $Leq$  in dB A-weighted. Sounds from noise sources are complex, and need multi-dimensional analysis in order to know the real nuisance perceived by citizen. A new LS index was do. This index is obtained from analysis of noise emitted by cars passing along a road. Jury people were young, 20 to 30 years old. People of other countries, with different culture and sensibility to car's noise, did some tests. LS index shows a very good correlation with critical cases, when the overall noise is not according with the sensation of the jury, that is, the most noisy not correlate with the highest noise level.

### **RESUMEN**

La molestia del ruido no puede ser medida con métodos tradicionales como el nivel equivalente ( $Leq$ ) y la ponderación A. Las señales de ruido son señales complejas que necesitan análisis multidimensionales, para poder establecer con certeza el grado de molestia. Para este fin, se ha desarrollado un nuevo índice, índice LS. A partir de mediciones en condiciones reales de funcionamiento, y tras un amplio test subjetivo, se ha correlacionado los datos obtenidos de mediciones físicas, con las sensaciones observadas. El jurado está formado por gente joven, entre 20 y 30 años. Se ha extendido el análisis subjetivo inicial, a población extranjera con situación y cultura lejanas a la nuestra. El índice LS muestra un elevado grado de correlación con las respuestas del jurado, incluso en los casos más difíciles, donde se observa que el nivel de ruido y grado de molestia no van a la par.

### **INTRODUCCION**

Los fabricantes de vehículos deben asegurar que sus productos cumplen unas cada vez más estrictas normas. La seguridad, el consumo, la contaminación, son algunos de los aspectos que hay que tener muy presentes cuando se diseña un coche. En los últimos años, los usuarios conscientes de que la seguridad no tiene precio, exigen mejores acabados, y mejores elementos de seguridad. La calidad de un coche es una cuestión palpable en el mercado. Los coches silenciosos no tienen porque ser lentos. Se asocia pues una cuestión de calidad acústica, con el grado de silencio.

Se ha demostrado ampliamente que las mediciones actuales basadas en Leq y dBA, no son eficientes para medir el grado de molestia del ruido de automoción. Es necesario desarrollar nuevos y más eficientes métodos de medición y especialmente de análisis de señal, para poder valorar con éxito el grado de molestia. Los estándares actuales valoran de distinta forma el ruido de automoción y el ruido en las ciudades. Los fabricantes miden valores de pico en sus coches, mientras que en la ciudad se miden valores de nivel equivalente. La sensación percibida es evidentemente distinta a la medida en ambos casos y además no es coincidente.

Las sensaciones percibidas por las personas no pueden ser descritas únicamente con medidas de presión acústica. Es necesario analizar el sonido, tal como lo analiza nuestro cerebro. El análisis espectral no es suficiente, hay que considerar también la evolución temporal de la señal. Nuevos parámetros basados en la evolución energía-tiempo se han desarrollado, con el fin de obtener mayor información de la señal de ruido. La distribución estadística del ruido constituye también una importante fuente de información.

## **MEDICIONES**

El ruido procedente de los vehículos circulando por la carretera, se graba en soporte digital DAT, sin ningún tipo de filtrado. Los vehículos pasaban a unos 2,5 m de la posición del micrófono. El sonómetro se sitúa a 1,5 m de altura, posición más cercana a la realidad que la de 1,2 m. La carretera de dos carriles, presenta un buen asfaltado, y una pendiente de un 2%. Se graban únicamente las señales procedentes de los vehículos que suben solos por la carretera. La velocidad de los vehículos oscilaba entre los 45 Km/h y los 60 Km/h. La marcha seleccionada en el coche es mayoritariamente la tercera velocidad para los vehículos de poca cilindrada, y la cuarta velocidad para los más potentes. Las condiciones climatológicas fueron excelentes, sin viento ni lluvia. La zona escogida presenta una gran amplitud sin obstáculos cercanos al punto de medida. Por último, y con el fin de que los conductores no influyeran su conducción por la presencia del equipo de medida, éste se camufló adecuadamente.

## **ANALISIS**

Con las señales grabadas se realizan dos tipos de análisis. Pruebas subjetivas con un jurado formado por gente joven, y pruebas analíticas utilizando todos los medios técnicos de que disponemos en éste momento en nuestro laboratorio de acústica. Entre los medios analíticos, destacamos los medios "tradicionales" y los nuevos métodos desarrollados en nuestro centro, como es el análisis multidimensional. El objetivo de este estudio es clasificar el ruido generado por vehículos automóviles circulando en condiciones normales por una carretera, en función de su grado de molestia ocasionada sobre la población. Los sonidos se reproducen mediante auriculares en el laboratorio. La sensación de realismo conseguido con auriculares no es muy buena debido a las componentes de muy baja frecuencia captadas por vis sólida por nuestro cuerpo. A pesar de ello, el sistema de análisis subjetivo se puede realizar ya que se utiliza un método comparativo para decidir la clasificación de cada vehículo en función de su grado de molestia.

Otro problema añadido es el nivel de escucha de las señales grabadas. Obviamente, en principio, sería deseable que el nivel de escucha fuera el mismo que en la situación real. La experiencia demuestra que cuando las condiciones de reproducción no son las mismas, es mejor aumentar ligeramente el nivel para hacer más perceptible los cambios de sonido y facilitar la labor de clasificación. Además como las pruebas se realizaron en diversos sitios de forma simultánea, no se puede tener la certeza de que la calidad de los mismos sea exactamente la misma.

Las respuestas subjetivas correspondientes a la muestras de ruido de los vehículos, se clasificaron por país de procedencia, y por sexos. Los primeros bloques o pruebas estaban formados por grupos de cuatro coches. Tras los primeros tests, se pudo constatar que si se reducía a tres el número de vehículos comparados simultáneamente, era más fácil clasificar los coches. El jurado podía reproducir tantas veces como deseara los fragmentos de ruido. El

orden de aparición de los bloques iba cambiando periódicamente para evitar errores de polarización de las respuestas.

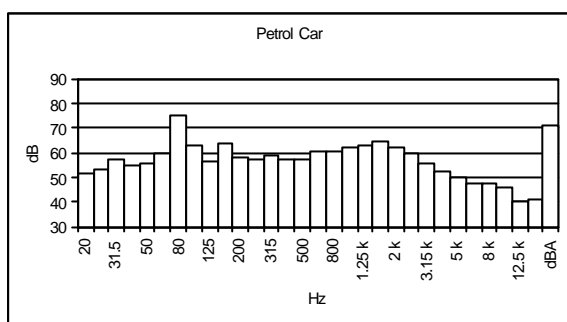


Figura 1

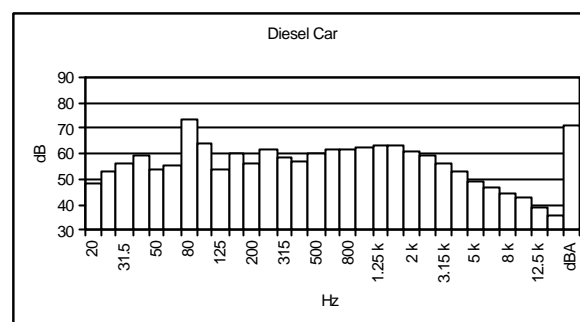


Figura 2

El análisis espectral ya sea en banda fina o en bandas de porcentaje constante, es el tipo de análisis más frecuente. En algunos casos el aspecto visual del espectro no se corresponde con la sensación acústica que oímos. La figuras 1 y 2 muestran el espectro generado por distintos vehículos. Aunque se observan ligeras diferencias, el sonido generado es bastante distinto. Comentamos un dato significativo: la figura 1 corresponde a un coche de gasolina, y el coche 2 a un coche diesel. Eso nos da una idea de la diferencia de sonido que se produce. A la derecha de la gráfica tenemos en nivel global en dBA.

El sonido del coche diesel es muy particular y se diferencia claramente del coche con motor de gasolina. Destacamos que a pesar de la diferencia de sonidos el nivel global en dBA es exactamente el mismo. La clasificación obtenida para cada vehículo tras las pruebas subjetivas fueron claras. El análisis espectral no es suficiente para describir con exactitud las sensaciones acústicas que producen los sonidos.

## PRUEBAS SUBJETIVAS

Las muestras de sonido de cada vehículo se muestran a cada persona que forma parte del jurado. Estas personas no son seleccionadas especialmente para hacer la prueba. El colectivo mayoritariamente representado forma parte del alumnado de nuestro centro, con edades comprendidas entre los 20 y los 26 años aproximadamente. La gran mayoría realiza estudios de acústica, de manera que entiende el concepto "molestia". Antes de empezar, se les indica que deben rellenar una hoja-encuesta con sus datos personales, donde van a puntuar a cada vehículo del 1 al 3, en función del grado de molestia detectado. Se insiste en el tema de grado de molestia, y que en ocasiones, no va ligado con el nivel de la señal, aunque obviamente, si el desnivel es elevado, la mayor energía repercute en una mayor molestia. A partir de ese punto, cada persona encuestada aplica sus criterios y gustos personales para hacer la clasificación. En muchos casos la decisión de qué vehículo resulta el más o menos molesto es relativamente sencillo, pero entre los dos restantes, la decisión puede resultar algunas veces más complicada.

## METODOLOGÍA

Se ha evitado la utilización de los métodos basados en una escala de valores sobre la que se puntuaba cada vehículo por separado. El estado de ánimo, la hora del día, en cansancio, etc. pueden hacer que la valoración absoluta varíe de forma considerable. Para evitar este fenómeno, y debido a la duración de las pruebas, se optó por crear una nueva metodología.

Esta se basa en las pruebas de comparación. Está formada por dos fases. En la primera, se clasifica a los vehículos. Cada grupo, formado por tres coches, se clasifica del más molesto (3) al menos molesto (1). Con ello se consigue una mayor repetitividad de los resultados. El resultado de ésta primera fase es una matriz para cada grupo juzgado. Esta matriz está formada por los tres casos estudiados, ponderados por las respuestas del jurado.

En la segunda fase, se obtiene una expresión, que permite puntuar a cada vehículo. A partir de este punto ya tenemos un resultado numérico que nos valora el grado de molestia del vehículo.

**RESULTADOS**

Después de los primeros resultados mostrados en el pasado congreso de Tecniacústica '99 celebrado en Ávila, se ha aumentado el número de casos, y se ha variado la formulación del índice LS. Una parte del jurado, la mayor parte, procede de nuestro país. Concretamente, alumnos de nuestro centro. Francia y Japón también participan en los análisis subjetivos. En estos casos la población participante también es de procedencia universitaria, por lo que podemos decir que el estudio, por ahora, se centra en la población joven con estudios superiores. Este colectivo de gente joven, es el que en un futuro va a padecer las consecuencias del ruido industrial de nuestra sociedad actual.

En total participaron 65 personas en las pruebas realizadas en nuestro país, 10 de Japón y 10 de Francia. Los resultados que a continuación se presentan, deben interpretarse como resultados preliminares, y en ningún caso concluyentes.

La tabla 1, muestra los resultados subjetivos para los hombres y las mujeres. En la tabla se indica el número de orden en la puntuación final, la puntuación obtenida, el balance acústico, y el nivel de sonoridad. Finalmente, con una letra se indica de que coche se trataba.

Orden	HOMBRES	Balance	L	Coche	MUJERES	Balance	L	Coche
1	28.201	27.951	68.63	G	30.666	27.951	68.63	G
2	26.274	23.195	49.1	C	23.35	6.0729	46.32	T
3	23.684	12.673	40.81	U	23.224	12.673	40.81	U
4	20.2	8.8592	38.04	K	22.751	23.195	49.1	C
5	16.258	22.151	47.43	R	20.335	4.435	39.04	I
6	16.257	4.435	39.04	I	15.346	3.1181	42.65	O
7	15.465	6.0729	46.32	T	14.962	8.8592	38.04	K
8	12.235	4.0169	40.38	P	13.136	6.8374	40.53	Q
9	12.123	10.301	38.38	B	12.386	4.0169	40.38	P
10	11.798	6.8374	40.53	Q	11.755	0.4486	40.02	M
11	8.0232	5.7995	37.71	E	10.822	10.301	38.38	B
12	7.6531	4.9647	36.92	A	10.492	22.151	47.43	R
13	7.4401	4.1485	33.57	L	10.118	5.7995	37.71	E
14	7.2057	6.3153	36.52	J	9.6667	3.2726	32.36	F
15	6.9264	3.2726	32.36	F	9.1684	4.2403	39.35	D
16	6.4755	8.2299	32.56	H	8.3482	6.3153	36.52	J
17	6.2951	3.1181	42.65	O	7.45	4.9647	36.92	A
18	5.9184	3.4865	29.59	N	7.4301	1.5149	36.26	S
19	5.6757	4.2403	39.35	D	6.8162	8.2299	32.56	H
20	5.3548	1.5149	36.26	S	6.2284	3.4865	29.59	N
21	4.661	0.4486	40.02	M	5.8716	4.1485	33.57	L

Tabla 1

Los hombres y las mujeres muestran distinto grado de sensibilidad al ruido de automoción. En general las mujeres penalizan mucho a los ruidos que muestran un mayor contenido de alta frecuencia. Debido a que la fisiología del oído humano es distinto, este efecto era previsible. Además, la cultura "mecánica" está más extendida entre la población masculina que entre la femenina. Esta cultura puede matizar bastante las respuestas subjetivas. Por ejemplo con el carácter más o menos deportivo del ruido de un vehículo.

Spain	Bal	L	Car	Japan	Bal	L	Car	France	Bal	L	Car
28.201	27.951	68.63	G	31.2	27.951	68.63	G	31.6	27.951	68.63	G
26.274	23.195	49.1	C	28.8	23.195	49.1	C	29.333	23.195	49.1	C
23.684	12.673	40.81	U	23.6	6.0729	46.32	T	27.934	12.673	40.81	U
20.2	8.8592	38.04	K	19.2	4.435	39.04	I	20.379	8.8592	38.04	K
16.258	22.151	47.43	R	18	12.673	40.81	U	18.666	22.151	47.43	R
16.257	4.435	39.04	I	15.6	8.8592	38.04	K	15.634	6.0729	46.32	T
15.465	6.0729	46.32	T	15.2	4.0169	40.38	P	15.395	4.2403	39.35	D
12.235	4.0169	40.38	P	12.4	10.301	38.38	B	15.078	6.8374	40.53	Q
12.123	10.301	38.38	B	11.8	6.8374	40.53	Q	14.92	4.0169	40.38	P
11.798	6.8374	40.53	Q	11	0.4486	40.02	M	12.189	5.7995	37.71	E
8.0232	5.7995	37.71	E	10.8	4.2403	39.35	D	11.232	4.435	39.04	I
7.6531	4.9647	36.92	A	9.4	6.3153	36.52	J	11.079	10.301	38.38	B
7.4401	4.1485	33.57	L	9.4	22.151	47.43	R	10.951	6.3153	36.52	J
7.2057	6.3153	36.52	J	9.2	5.7995	37.71	E	9.1578	4.9647	36.92	A
6.9264	3.2726	32.36	F	8	3.2726	32.36	F	8.2534	0.4486	40.02	M
6.4755	8.2299	32.56	H	6.4	1.5149	36.26	S	7.8724	3.2726	32.36	F
6.2951	3.1181	42.65	O	5.6	4.9647	36.92	A	7.3803	3.1181	42.65	O
5.9184	3.4865	29.59	N	5.6	3.1181	42.65	O	7.1106	1.5149	36.26	S
5.6757	4.2403	39.35	D	5.5	3.4865	29.59	N	6.7612	8.2299	32.56	H
5.3548	1.5149	36.26	S	5	8.2299	32.56	H	6.0092	4.1485	33.57	L
4.661	0.4486	40.02	M	4.8	4.1485	33.57	L	5.5235	3.4865	29.59	N

Tabla 2

En la tabla 1, observamos la puntuación invertida para un mismo vehículo para los hombres y las mujeres. Concretamente, si observamos los vehículos M y R, se aprecia que la valoración de los hombres que es contraria a la obtenida por la mujeres. El vehículo M presenta un sonido con mayor contenido en baja frecuencia. En general las mujeres siempre lo valoran negativamente, mientras que los hombres en general lo valoran distinto, no les resulta tan molesto. Un comentario aparte merece el vehículo R. Notamos que la sonoridad (47 Sons) lo sitúa "a priori" de los más ruidosos. Los vehículos diesel también son considerados más molestos por las mujeres que por los hombres. Del estudio subjetivo también se desprende que las mujeres son más críticas que los hombres, los cuales se conforman más con el ruido. Podríamos decir que el grado de precisión es mayor en las mujeres que en los hombres. Los criterios que siguen las mujeres responden básicamente a la sonoridad del ruido. En cambio para los hombres el balance acústico y otros factores son los más importantes.

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos de las encuestas realizadas en España, Francia y Japón. Se muestran con distintos colores algunos casos particulares dignos de destacar. En general se observa que la clasificación obtenida de la encuesta en Japón, dista mucho de la obtenida en el entorno Mediterráneo. Destacamos casos curiosos, como por ejemplo, el de coches considerados con un nivel de sonoridad muy similar para los Japoneses, que son considerados o bien más molestos o bien menos molestos.

## CRITERIOS PSICOACÚSTICOS

Los criterios psicoacústicos nos pueden aportar más información que con el análisis espectral. La actitud subjetiva del individuo, el entorno físico en el que se realiza la escucha, el nivel de presión acústica en el oído y el espectro frecuencial del ruido son algunos de los factores que determinan la forma en la que evaluamos los sonidos. Algunos de los equipos actuales permiten el análisis utilizando parámetros psicoacústicos. Estos parámetros no están normalizados lo cual, complica extraordinariamente las posibles comparaciones de resultados entre los distintos laboratorios.

Los parámetros psicoacústicos tratan de relacionar las sensaciones subjetivas producidas por un sonido, con las mediciones físicas de ciertos aspectos del sonido. Sin embargo no son la panacea que nos va a solucionar la papeleta de valorar la molestia del ruido. Será necesario desarrollar nuevas metodologías que permitan cubrir dicha necesidad. Las figura 3 y 4 muestran la correlación entre dos parámetros psicoacústicos, sharpness y loudness, respecto del grado de molestia obtenido por las encuestas.

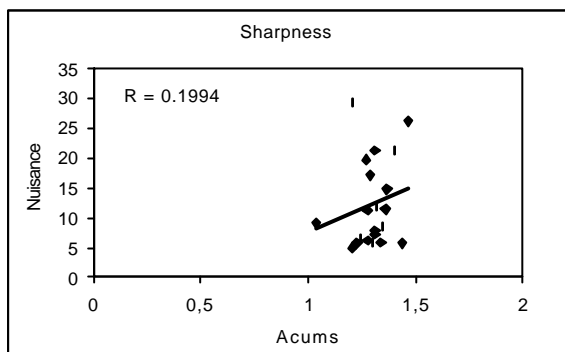


Figura 3

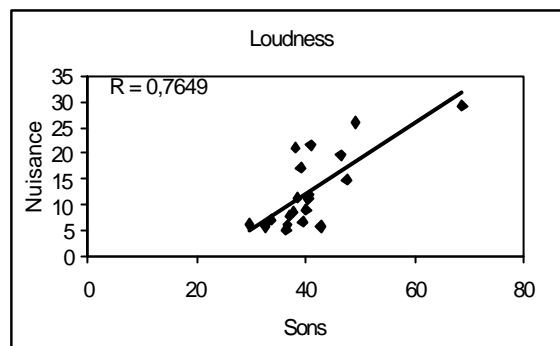


Figura 4

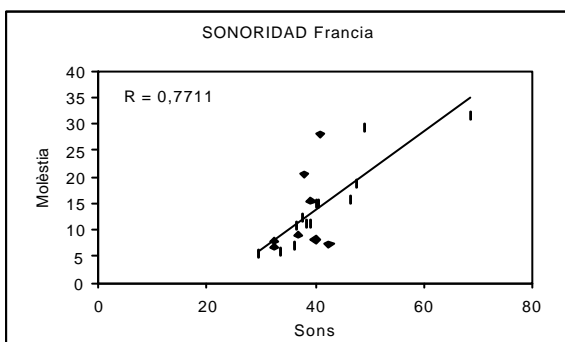


Figura 5

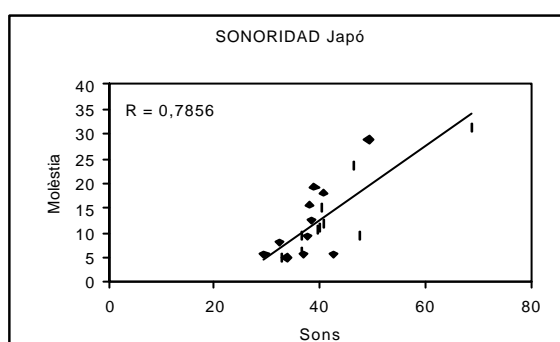


Figura 6

Como se puede observar la correlación obtenida para los casos analizados, entre el sharpness y la molestia es muy baja, 0,1994. En el caso de la sonoridad promedio para todos los grupos, la correlación es mayor, 0,7649.

La correlación mejora cuando se focaliza para un grupo en particular. Se puede observar en las figuras 5 y 6, que la correlación aumenta. De todos los parámetros psicoacústicos, la sonoridad es la que ofrece mayor nivel de correlación con las respuestas subjetivas. La sonoridad se ha calculado mediante el modelo de Zwicker, que está normalizado según ISO R532B.

A pesar de la buena correlación de la sonoridad con la molestia, en algunos casos, se observa que los resultados subjetivos se apartan bastante de los resultados medidos. Se percibe que hay algo más a tener en cuenta. Observando las señales de los distintos vehículos y preguntando los motivos por los que unos coches eran considerados más molestos que otros, se llegó a la conclusión de que se podía obtener una buena correlación entre la forma de la distribución estadística, el balance o equilibrio energético, y la curtosis de la señal.

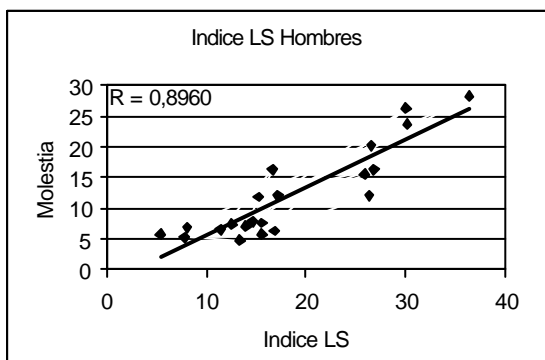


Figura 7

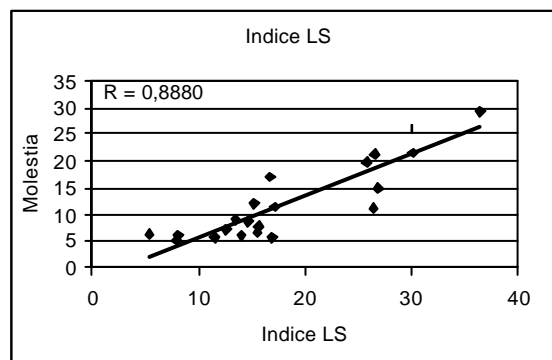


Figura 8

**CONCLUSIONES**

1. Los parámetros psicoacústicos no son suficientes para valorar con precisión el grado de molestia del ruido de automoción. Estos parámetros muestran una pobre correlación con las sensaciones subjetivas.
2. El análisis temporal, mediante nuevas técnicas deben ser utilizadas para obtener más información acerca de la evolución temporal de la señal, y que ayude a mejorar los sistemas de medición del grado de molestia. Mediciones utilizando el Leq o los dBA deben ser evitados, por ofrecer valores de correlación muy bajos.
3. Se está desarrollando un nuevo índice LS, basado en algunos parámetros psicoacústicos, y con la incorporación de nuevas técnicas de análisis desarrollados en nuestro laboratorio. La correlación de éste índice con las respuestas subjetivas, es bastante elevada. En el momento de redactar esta ponencia se dispone ya de una nueva versión mejorada, con correlaciones cercanas a 1, (0,95). Será presentado durante la exposición oral.
4. Conseguir un único índice que valore el grado de molestia del ruido, parece imposible por ahora, debido a las diferencias culturales, fisiológicas y de entorno en que se encuentra la población.