

CRITERIOS PSICOACÚSTICOS PARA VALORAR LA MOLESTIA DEL RUIDO URBANO. NUEVO PARÁMETRO DE VALORACIÓN DEL RUIDO: INDICE LS.

REFERENCIA PACS: 43.50.Yw

Robert Barti
Departamento de Acústica
Ingeniería La Salle
Universidad Ramon Llull
Pg. Bonanova, 8
08022 Barcelona
E-mail: robert@salleURL.edu

INTRODUCTION

Noise test do by manufacturers according to European standard are not the same as noise measurements according to the same standard in city. Passby test measures Lmax during full acceleration test, while noise measurement in city uses Leq. Differences between noise from vehicles and noise in city is due to inadequate measurement procedure. Actual standards uses Leq and dBA weighted scales, but after our measurements it seems old fashioned procedures. Is necessary to review and modify the actual noise test, and propose newer tests in order to have more realistic measurements. Newer procedures must be used for noise analysis, and nuisance perceived by citizen purposes. Actual standard 96/20/CE about noise control does not reflects the actual urban traffic. A new method of measurement is described.

RESUMEN

Las pruebas de control de ruido que pasan los fabricantes de automóviles no son las mismas que las mediciones de control de ruido que se hacen en ciudad. La prueba de Passby mide el nivel máximo Lmax durante la máxima aceleración del vehículo, mientras que el ruido en ciudad se mide con el Leq. Las diferencias encontradas entre el ruido de la ciudad y de los vehículos son debidas a que las actuales pruebas y mediciones son inadecuadas. Las mediciones actuales utilizan Leq y dBA, que según nuestros trabajos son parámetros que no valoran la molestia del ruido. El actual estándar 96/20/CE no sirve para el control de ruido de vehículos. Se describe un nuevo método de medida.

INTRODUCCIÓN

Cuando paseamos por las ciudades podemos escuchar el ruido de los vehículos que nos rodean. Técnicamente las medidas de control de ruido sobre vehículos automóviles, se hace midiendo el nivel de presión acústica en dBA de pico y a 7,5 m de distancia. Esta prueba ideada en los 60, se hace en condiciones ideales sin obstáculos y con un ruido de fondo muy bajo. Dicha prueba consiste en una aceleración máxima con el vehículo sin carga partiendo de una velocidad constante de 50 Km/h en tercera velocidad. Sin embargo la situación en las ciudades es muy distinta. En ciudad tenemos que:

- a. El ciudadano no está a 7,5 m de distancia del vehículo.
- b. La zona de paso del vehículo no está libre de obstáculos sino más bien repleta de edificios cercanos con lo cual las condiciones de propagación son muy distintas.
- c. Los valores anotados corresponden a valores de pico, mientras que nuestro oído no trabaja con valores de



- pico sino eficaces.
- d. La ponderación A utilizada “a priori” no se ajusta a la verdadera sensibilidad del oído sometido a niveles de ruido habituales en los vehículos automóviles. Concretamente la ponderación A se ajusta para un nivel de presión de 40 Fons a 1KHz, mientras que el ruido de un automóvil solo a 7,5 m, se sitúa entorno a los 70 Fons.
 - e. El vehículo no trabaja en condiciones normales, ya que la prueba se hace sin carga. En caso de motocicletas esto no es un inconveniente, pero en caso de vehículos pesados el motor del vehículo va ha realizar un esfuerzo mucho menor.
 - f. La situación más habitual en tráfico rodado en ciudad es el arranque desde parado del vehículo, prueba que no se realiza en la actual directiva 96/20/CE.
 - g. Las mediciones de ruido en ciudad utilizan el Leq y el dBA.

Tenemos pues dos criterios distintos para medir el ruido. Con el paso de los años, el nivel máximo de ruido permitido se ha ido reduciendo. Es de esperar pues que el ruido en las ciudades se beneficie también de esta reducción de ruido. Si bien es conocido que el incremento de densidad de vehículos puede compensar la reducción de ruido obtenida en la ciudad, también es cierto que con demasiada frecuencia vemos que las calles de nuestras ciudades no permiten densidades de tráfico mayores ya que están al límite de su capacidad.

Medidas de ruido realizadas el año 1985 en una céntrica calle de Barcelona comparadas con el nivel de ruido el año 1995 en el mismo punto, presentan una reducción prácticamente imperceptible (<1dBA). La densidad de tráfico en el punto de medida fue muy similar en ambos casos, unos 3.000 veh./h. Destacamos que los niveles máximos de ruido permitidos de los vehículos el año 1995 estaba en promedio 8 dBA por debajo de los niveles máximos permitidos el año 1985. ¿Porqué no se ha reducido el ruido en la ciudad si los coches hacen menos ruido?

CONDICIONES DE LAS MEDIDAS

Se han grabado en cinta DAT el ruido de diferentes clases de vehículos: coches, motos y autobuses en diferentes condiciones de funcionamiento. La grabación se ha hecho en el centro de la acera de la calle. Se han escogido puntos suficientemente alejados de las fachadas de los edificios, aunque la influencia de estas es inevitable. Todo y que las medidas se hacían en ciudad, se procuraba escoger calles amplias y con un bajo nivel de circulación, con el objetivo de centrarnos en la influencia de un solo vehículo. Se han grabado los ruidos de los vehículos en dos condiciones: aceleración desde parado y a velocidad constante. En el caso de los coches y de las motos se han hecho registros con vehículos conocidos, mientras que los autobuses se han grabado en la calle. Los vehículos medidos no presentaban deficiencias graves. Para los vehículos conocidos se han hecho pruebas en condiciones ideales, es decir en pista de pruebas sin obstáculos en los alrededores.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Destacamos únicamente las gráficas más relevantes. En la figura siguiente podemos ver el espectro de ruido de las motos. Se indica el ruido procedente de motocicletas de ruedas anchas de 75cc sin marchas de reciente aparición en el mercado. Este tipo de motocicleta es muy abundante en nuestra ciudad. Dentro de estos modelos podemos encontrar motores de 2T o de 4T con cilindradas y potencias similares. Tal como se indica en la figura siguiente resulta evidente que el motor de 4T emite un nivel de energía acústica notablemente inferior que el equivalente en 2T, tanto en aceleración desde parado como a velocidad constante. Se observa que el motor de 2T da una mayor riqueza de energía en alta frecuencia. La sonoridad también es muy distinta; el motor de 4T se observa que es más “silencioso” que el de 2T.

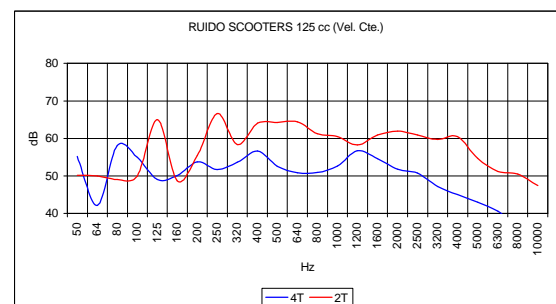


Fig. 1 Ruido de paso de una moto 125 cc a Vel. ctante

La motocicleta con motor de 2T da unos niveles de ruido globales unos 8 - 10 dB por encima del nivel de ruido de la motocicleta con motor de 4T entre 200 Hz y 10 KHz.

Si comparamos el ruido generado por diferentes vehículos, podemos encontrar tal como indica la figura siguiente, que los coches son los vehículos más silenciosos. Como se puede apreciar en los resultados gráficos, los autobuses resultan ser los vehículos con unos niveles más elevados de energía. Hay que destacar que los autobuses escogidos corresponden a modelos recientes. De aquí podría deducirse en consecuencia que los autobuses son los vehículos más molestos. Sin embargo, ésta conclusión no se ajusta mucho con la realidad. En una encuesta realizada en el 1995, y donde mayoritariamente las preguntas se realizaron entre gente joven, las motos son en principio, los vehículos considerados más ruidosos. Destacamos que el 80% de los encuestados tenían edades entre 20 y 30 años. ¿Porqué se considera más ruidosa a la motocicleta si el autobús emite mucho más ruido? La red de ponderación A mayoritariamente utilizada para la medida y el control de ruido, no se ajusta en absoluto a la realidad de los niveles de ruido de automoción. Esta ponderación penaliza mucho las bandas de baja frecuencia. Por un lado el contenido de energía a bajas frecuencias produce los conocidos efectos de enmascaramiento, dificultando la comunicación verbal entre personas y por tanto aumentando el grado de molestia. Por otro lado, los niveles altos de señal acústica hacen que nuestra percepción frecuencial se vea ampliada, y por tanto nuestras sensaciones sean distintas. Además también hay que tener en cuenta la evolución temporal de la señal y no únicamente su espectro promediado, ni mucho menos valores globales como el dBA que nos va a dar mucha imprecisión para valorar el grado de "insatisfacción" del ruido medido.

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA SEÑAL

Con el objetivo de obtener la máxima información posible, la señal grabada se analiza en modo temporal. Comparando las evoluciones temporales de los diferentes vehículos analizados, podemos observar una diferencia en la evolución temporal de la señal. Las figuras siguientes muestran que los vehículos que presentan picos de nivel muy pronunciados tanto temporalmente como espectralmente, son los que subjetivamente resultan más molestos. En este sentido mostramos dos arrancadas desde parado de dos motocicletas unas con motor de 2T y la otra con motor de 4T. La aceleración en ambos casos era similar, y la cilindrada y potencia prácticamente iguales.

El punto de medida y condiciones ambientales fueron exactamente los mismos. Los resultados expuestos son el resultado de promediar 4 pasadas con cada vehículo. Se puede observar que la evolución temporal que corresponde a la motocicleta con motor de 4T presenta menos irregularidades de nivel. Aunque existe una buena correlación entre los picos de la evolución temporal de la señal y la molestia que ocasiona el ruido del vehículo, no es del todo concluyente. Por ejemplo, algunos coches también presentan un pico en la señal temporal aunque mucho más amplio en duración, y sin embargo no se consideran tan molestos por los usuarios. Es necesario pues utilizar otro parámetro de medida.

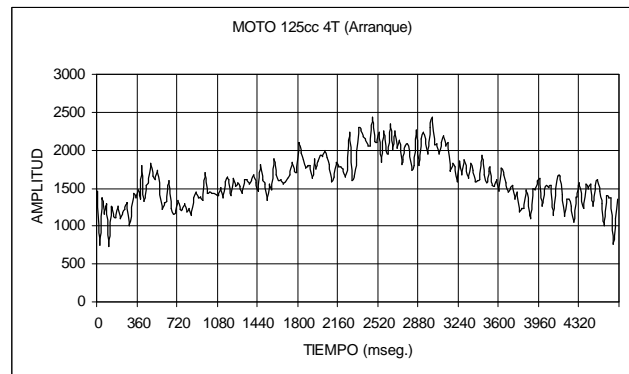


Fig. 2 Evolución temporal del arranque moto 4T.

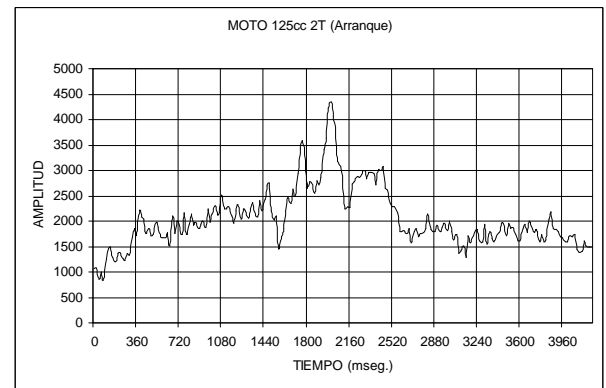


Fig. 3 Evolución temporal del arranque de moto 2T.



DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA

Con el objetivo de buscar una causa que pueda justificar porqué el ruido de las motos resulta siempre el más molesto a pesar de ofrecer niveles de energía notablemente inferiores al de los autobuses, se hace un análisis estadístico. El estudio se realiza por bandas de octava. En la figura siguiente se serva la distribución estadística global para cuatro clases de vehículos. En principio, tras realizar un análisis en lineal, no se observa ninguna particularida.

Pero si realizamos un análisis por octavas y estudiamos el balance del ruido, obtenemos gráficas como las mostradas en la figura 5. Se observa que para cada vehículo parece existir una buena relación entre la concentración de muestras en solitario en la banda de 1KHz, y la molestia del ruido de un vehículo. En las gráficas podemos ver los resultados para las motocicletas de 125cc. Notamos que las motocicletas presentan un pico destacado a 1KHz, que significa que el ruido generado por estos vehículos esta ubicado principalmente a frecuencias centrales. Así mismo en la distribución estadística del ruido generado por los coches se observa que la distribución de muestras a 63 Hz y 1 KHz es muy similar. Las bajas frecuencias pueden producir un efecto de enmascaramiento sobre las frecuencias medias y altas, de manera que la sensación de molestia percibida es menor, aun cuando su energía acústica sea similar o incluso superior. Con este efecto, las frecuencias medias no son percibidas con la misma sensación, y por ello son consideradas menos molestas. Este efecto explicaría porqué las motos se consideran más molestas que otros vehículos que tienen un nivel de energía superior.

En el ruido de las motocicletas el predominio de las componentes de 1KHz por encima del resto hace que el sonido sea más “agresivo” y por tanto más molesto. Además, el ruido tiene la máxima energía en una banda donde el oído tiene mucha sensibilidad. La presencia de componentes tonales hace que el sonido sea más molesto. Hay que pensar pues, en la necesidad de realizar pruebas diferenciadas de las actuales y utilizar descriptores diferentes para cada tipo de vehículo. Naturalmente si un vehículo produce un nivel de energía acústica muy superior a otro, sea cual sea el descriptor utilizado, obtendremos una buena relación entre las mediciones y las sensaciones. En este trabajo hemos escogido al azar vehículos de distintas clases, procurando que el ruido generado no fuera excesivo y se pudiera considerar “normal”.

En el apartado motocicletas, especialmente las de baja cilindrada, no se pudo tener la certeza de que no hubieran sido modificadas en el escape, motor, etc. con el objetivo ya conocido de obtener unas mayores prestaciones mecánicas. Generalmente estas modificaciones consiguen el propósito de un supuesto aumento de potencia en detrimento del ruido generado, que por regla general aumenta. La elección de cuales motocicletas eran analizadas, se hizo “a posteriori” y a simple oído. A pesar de todo, el grupo de vehículos analizados se corresponde con la media que se pueden encontrar en nuestra ciudad.

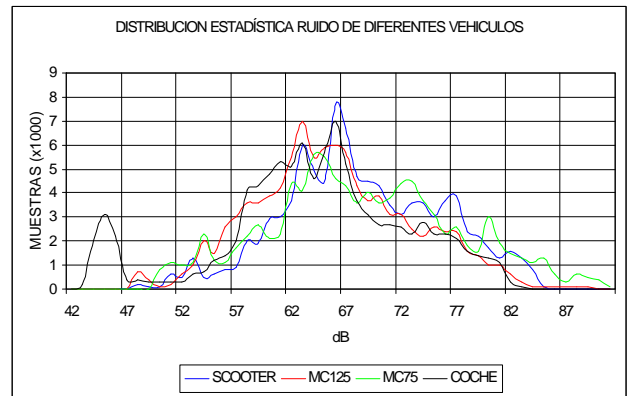


Fig. 4 Distribución estadística de distintos vehículos.

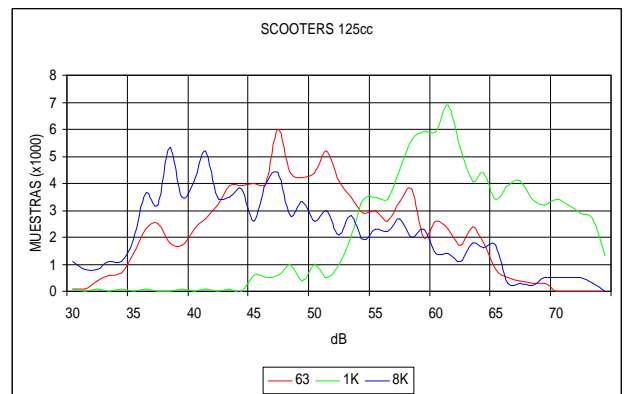
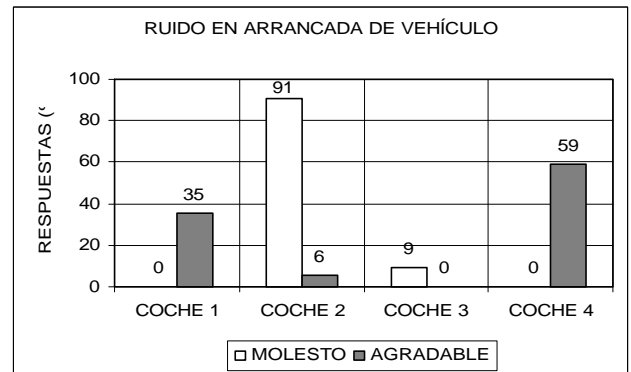


Fig. 5 Balance del ruido para motocicletas.

Ruido de automóviles.

Como es conocido, todos los vehículos pasan una prueba referente al nivel máximo de ruido. Dado que la prueba se realiza en unas condiciones que poco o nada tienen que ver con la realidad, y que además se mide a una distancia excesiva y con una ponderación “a priori” incorrecta, se han hecho una serie de pruebas encaminadas a ver hasta que punto estas mediciones de control actuales pueden reflejar la realidad del problema. Para ello se han analizado cuatro coches con características mecánicas y edades muy diferentes. El objetivo era reproducir la señal grabada para que una serie de personas indicaran sus preferencias. El primer vehículo de 4 años de antigüedad y en buen estado de conservación, era un turismo con motorización de gasolina y potencia elevada. El segundo vehículo era un utilitario con 11 de antigüedad aunque bien conservado. Su motor de gasolina y todos los elementos externos estaban en perfecto estado. El tercer vehículo de 6 años de antigüedad también era un turismo pero con motor diesel. El último con sólo 1 año era el más nuevo. Se trata de un vehículo deportivo con motor de gasolina y alta potencia. Sin duda el último era el más silencioso de los 4 vehículos sometidos a prueba, mientras que el segundo



El test se realizó en un espacio abierto libre de ruido y sin elementos u objetos que pudieran introducir reflexiones. Se han hecho dos clases de pruebas: Aceleración desde parado de los vehículos, y la prueba 96/20/CE tal como indica la actual normativa. El punto de medida ha sido el mismo en todos los casos, para no variar las condiciones de propagación acústica del entorno. Las mediciones se hicieron con unos intervalos de pocos minutos a fin de garantizar las mismas condiciones climatológicas. La ausencia de viento y un día soleado, hicieron más soportable toda la serie de mediciones. El ruido se ha grabado íntegramente sobre soporte digital DAT y posteriormente reproducido con auriculares asegurando la misma presión acústica. También se garantiza una respuesta en frecuencia totalmente plana sin introducir ningún tipo de distorsión perceptible por el oído. Las pruebas subjetivas consistieron en reproducir en el laboratorio, una serie de pasadas de los vehículos de forma secuencial. Las personas que intervinieron en las pruebas no habían escuchado antes los sonidos, y no sabían el orden de los vehículos.

El resultado del test era indicar cual de los cuatro vehículos se consideraba más “molesto” y cual era considerado más “agradable”. En total se preguntó a 52 personas jóvenes con edades comprendidas entre los 20 y los 26 años. Todas las personas sometidas a la prueba no presentaban ninguna deficiencia auditiva. Los resultados del test para la prueba según normativa 96/20/CE están resumidos en la figura siguiente.

Podemos ver que el coche 1 es el vehículo considerado más molesto por el 42%, mientras que los vehículos 3 y 4 se consideran igualmente ruidosos. Recordemos que el tercer vehículo es un diesel con 6 años de antigüedad, mientras que el 4 es un deportivo con 1 año de antigüedad. Aunque el calificativo “deportivo” pueda asociarse a “mas ruido”, la realidad es que se trata de un vehículo muy silencioso. Así mismo también se puede observar que el vehículo 2 es el segundo en cuanto a grado de molestia. Podemos observar que la clasificación no se ajusta con la realidad, ya que el segundo vehículo debería salir como el más ruidoso. La conclusión pues es clara y contundente. La actual normativa sobre control de ruido de vehículos no refleja la realidad. Ni siquiera sirve para clasificar el ruido procedente de diferentes vehículos con diferente grado

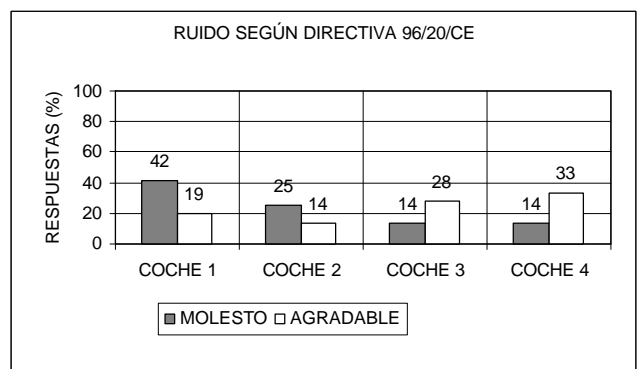


Fig. 6 Clasificación subjetiva según la prueba de la directiva 96/20/CE.

de molestia. El ciudadano no percibe los sonidos de la misma manera a como se mide. Como alternativa a la actual normativa 96/20/CE proponemos la prueba de aceleración del vehículo desde parado. Los resultados de esta prueba se resumen en la figura 7.

En este caso los resultados son bastante claros: el segundo coche es catalogado como el más ruidoso por un 91% de los encuestados, mientras que el ruido más agradable queda repartido entre el cuarto coche y el primero con un 59% y un 35% de respuestas respectivamente. Se observa que el término “agradable” se confunde con mucha frecuencia con “menos ruido”, lo cual no tiene porque ir a la par. De la prueba de arrancada del vehículo podemos ver también que la clasificación es muy clara. Los vehículos 1 y 4 no son considerados molestos en absoluto. En cambio los resultados de la prueba según normativa actual, ofrece una confusión en la clasificación de los vehículos. Por lo tanto, como podemos pretender reducir el ruido de los vehículos, si éstos han de pasar unas pruebas que son totalmente inadecuadas? Nuestro oído no nos engaña.

PARÁMETROS PSICOACÚSTICOS

La evaluación de un evento acústico viene determinada por numerosos parámetros. 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 se basan en una valoración más realista de la percepción del sonido. Concretamente algunos de ellos aportan más información que un simple espectro. Estos parámetros pueden ser utilizados para obtener mas información acerca de la molestia del ruido sobre el individuo. Como ya se ha demostrado en diversas ocasiones, el nivel de presión acústica no es suficiente para valorar la sensación que un ruido puede producir sobre un individuo. Entre los diversos parámetros psicoacústicos podemos encontrar: el loudness o sonoridad, el sharpness, o contraste acústico, el roughness o rumorosidad, entre otros.

En la tabla siguiente se resumen los principales parámetros psicoacústicos encontrados, juntamente con un nuevo concepto, el área de energía acústica que es una función que depende del nivel de la señal (dBLIN) y su distribución estadística. El análisis se aplica a los 4 vehículos de distintas características que se han comentado anteriormente. Se añade en la tabla otros 4 vehículos de similares características medidos a distinta distancia.

Como podemos observar, el índice de sonoridad crece a medida que el vehículo es más ruidoso. Pero no siempre la sensación de ruidosidad va ligada al valor de sonoridad. Lo mismo ocurre con la molestia no ponderada (UA) entre el C3 y el C4 que tiene un comportamiento distinto al notado por los observadores. Notamos que los vehículos C5 al C8 son similares a C1, C4 pero a una distancia mayor, con el objeto de comprobar la bondad del índice LS. Destacamos una coincidencia del 100% entre la valoración subjetiva de los observadores, y el índice LS.

PRUEBA DE ARRANCADA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Loudness	35,67	34,14	25,77	28,45	15,76	20,59	11,54	14,31
Sharpness	1,54	1,29	1,32	1,19	1,38	1,16	1,15	1,27
Fluctuation Strength	1,65	1,30	1,79	1,30	1,50	1,43	2,46	1,61
Roughness	10,99	10,83	8,74	9,91	8,93	7,71	8,38	7,54
Unbiased Annoyance	281,79	222,39	186,29	172,05	116,25	140,32	78,44	79,70
Loudness 10%	50,08	46,28	37,43	38,83	26,88	32,78	18,10	20,22
Articulation Index (NHV)	44,78	52,47	63,06	66,02	83,88	78,22	97,38	89,98
Area de energía	28,65	21,75	8,93	59,71	3,18	8,61	1,15	7,33
INDICE LS	332,68	250,77	145,90	163,49	45,17	75,65	5,56	21,89

Fig. 7 Valoración subjetiva de la nueva prueba.

Se observa también que la sonoridad se ajusta muy bien a la tendencia de la molestia en el caso de vehículos automóviles. Sin embargo en el análisis de ruido de aparatos electrodomésticos hay algunas sorpresas. Notamos que equipos con una mayor sonoridad ofrecen una menor molestia. Por lo tanto no es únicamente el



nivel de la sonoridad lo que puede molestar, sino otros factores. Notamos que el nuevo concepto de área de energía se ajusta muy bien al grado de molestia percibido. Hay que destacar como única excepción, que en el caso del vehículo C4, dicho parámetro no se ajusta bien a la realidad.

NUEVO MÉTODO PARA LA VALORACIÓN DEL RUIDO. INDICE LS

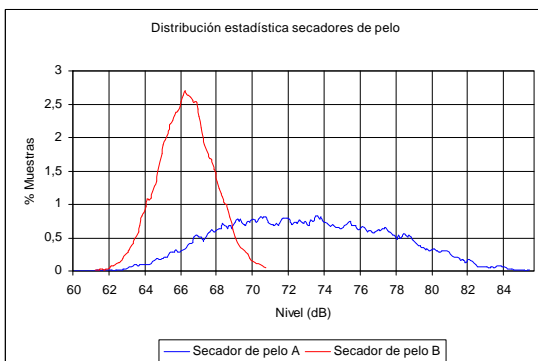
En la tabla anterior se adjunta el nuevo índice LS. Este índice ha sido desarrollado con el objetivo de obtener un parámetro que permita valorar con claridad el grado de molestia percibido. Este índice se ha obtenido mediante algoritmos de programación genética y sobre la base de mediciones en las condiciones mencionadas anteriormente. En el momento de redactar esta ponencia estamos en fase de aumentar la base de datos de entrenamiento del sistema, para permitir un mayor rango de aplicaciones. Los resultados obtenidos tienen una validez limitada por la potencia del sistema de cálculo. Inicialmente se utilizó un PC Pentium 200. Actualmente se utiliza un sistema más potente de cálculo.

El índice LS pretende ser aplicable a cualquier ruido. Para ello incluimos los resultados de aplicarlo a ruido de motocicletas. Comparamos las motocicletas sin cambio de ruedas anchas con motor de 2T con las de 4T.

También aplicamos el índice al ruido de aparatos electrodomésticos, secadores de pelo, exprimidores, ventiladores, etc. Notamos que el secador de pelo A ofrece un mayor nivel de sonoridad, y sin embargo se considera mucho más silencioso que el B. El índice LS sigue perfectamente esta sensación.

PRUEBA DE ARRANCADA	M 2T	M 4T
Loudness	47,77	43,35
Sharpness	1,49	1,41
Fluctuation Strength	1,25	1,21
Roughness	4,20	4,40
Unbiased Annoyance	304,53	241,24
Loudness 10%	56,58	48,52
Articulation Index (NHV)	27,74	33,85
Area de energía	39,74	75,90
INDICE LS	656,28	584,10

	Bat A	Bat B	Vent A	Vent B	Sec A	Sec B
Loudness	31,72	29,87	4,97	3,95	26,04	23,32
Sharpness	1,56	1,48	1,45	1,27	1,29	1,83
Fluctuation Strength	1,40	2,13	1,41	0,86	1,10	0,65
Roughness	8,00	8,25	8,06	6,98	627,00	4,13
Unbiased Annoyance	270,13	300,76	13,90	9,42	110,57	96,55
Loudness 10%	49,95	49,97	5,25	4,40	28,01	24,36
Articulation Index (NHV)	42,73	46,12	99,97	100,05	64,06	57,13
Area de energía	8,05	0,66	1,10	0,18	8,77	34,94
INDICE LS	300,18	271,45	0,16	0,06	105,21	112,10



El secador A presenta la distribución estadística que vemos en la figura 8. Su nivel global es de 75,1 dB mientras que el B nos da un nivel global de 66,2 dB. A pesar del elevado desnivel, el secador A es mucho menos molesto.

Fig. 8 Distribución estadística ruido de secador de pelo.



CONCLUSIONES.

1. La actual normativa 96/20/CE no es representativa de la utilización de vehículos automóviles en ciudad. Es necesario abandonar la ponderación A y el uso de los niveles equivalentes. Hay que pensar en nuevas pruebas, como la aceleración desde parado y el paso a velocidad constante, en lugar de las tradicionales. Estas pruebas reflejan las situaciones más habituales en las ciudades.
2. Los parámetros psicoacústicos nos pueden dar mucha más información para valorar el grado de molestia del ruido, que un simple análisis espectral.
3. Se presenta el nuevo índice LS v2.0, que basado en pruebas reales y mediante programación genética, valora el grado de molestia que el ruido ocasiona sobre las personas. Los primeros resultados nos han dado una perfecta predicción de la molestia ocasionada no sólo por el ruido de automoción, sino por el ruido generado por máquinas de uso cotidiano.

