

ºFACTORES DETERMINANTES EN EL CALCULO DE LA ASPEREZA DE SEÑALES ACUSTICAS POR EL METODO DE AURES

REFERENCIA PACS: 43.66.-x

A. Moreno*, F. Simón*, C. de la Colina* y A. Marchioni ‡

* Instituto de Acústica, CSIC

Serrano 144

Madrid 28006

‡ Laboratoire de Méchanique et d'Acoustique, CNRS

31 Chemin Joseph Aiguier

Marseille

SUMMARY

This work deals with the objective computation of roughness, a fundamental perceptive attribute of acoustic signals. Starting from the general theory of roughness, the Aures model, that describes this sensation as a series of processes that take place withing the human hearing, has been implemented in PC. A version of this model due to Daniel and Weber has been optimized. The inclusion of a threshold level of specific excitations in the 24 subjective frequency bands, to contribute to perception, is perhaps the more relevant contribution. The computational model has been tested for a large set of characteristic signals, of well known subjective roughness, showing a good agreement.

1 ATRIBUTOS PERCEPTIVOS DE LA CALIDAD DE LAS SEÑALES ACUSTICAS

Una de las definiciones de ruido mas extendidas consiste en considerar el ruido como todo sonido no deseado. Esta definición refleja de manera clara la importancia definitiva que en la valoración de los estímulos sonoros tiene la actitud subjetiva.

Aunque conceptualmente es importantísimo, es desde el punto de vista de las aplicaciones donde cobra particular interés el conocimiento de las características objetivas de las señales acústicas que producen percepciones cualitativamente bien definidas y cuantificables univocamente. Cuando esto es así las magnitudes subjetivas o atributos perceptivos tienen particular interés y un gran éxito en su aceptación generalizada, como es el caso de la sonoridad, de la tonalidad, exceso espectral, agudeza, etc.,.

Sin embargo y quizá debido a la mayor facilidad de valoración conjunta subjetiva, abundan en la literatura magnitudes subjetivas que no residen en un solo atributo y que generalmente su uso queda restringido a una tipología o incluso un solo tipo de ruido como es el caso de ruidosidad que funciona bien para el ruido de aviones. En esta categoría hay que incluir también la molestia (annoyance). En realidad son conceptos complejos que dependen de atributos básicos independientes. Son por tanto estos atributos básicos los que interesa discernir, en base a los cuales deberán poder evaluarse los aspectos globalizados de molestia, rechazo, ruidosidad etc. Algo parecido al concepto de bases ortogonales completas en el desarrollo de funciones mediante series, que por ejemplo juegan un papel tan importante en la transformada de Fourier.

Un elemento clave de estos atributos perceptivos básicos es que su modelización permita una cuantificación objetiva. O equivalentemente que a partir, exclusivamente, de las características físicas de la señal en cuestión pueda cuantificarse el valor subjetivo del atributo. Este paso requiere un conocimiento



suficientemente detallado del proceso perceptivo a la par que ayuda a una mejor comprensión del mismo, como en todo proceso de realimentación. La utilidad práctica alcanza entonces todo el interés al permitir, por una parte, establecer escalas numéricas de valoración y establecimiento de niveles de requisitos, y por otra la obtención inmediata, generalmente automatizada, de los valores que alcanza cualquier señal acústica.

Aun usando un bajo número de atributos perceptivos de base hay que destacar el éxito del algoritmo de Aures [1], [2], como valoración objetiva de la calidad subjetiva, o agrado, de señales acústicas en las aplicaciones prácticas, de particular relevancia en las aplicaciones en la industria del automóvil, aun con solo 4 atributos perceptivos: aspereza, agudeza, tonalidad y sonoridad. Entre los coeficientes de correlación parciales de cada atributo con la percepción globalizada destaca la sonoridad, indicando la importancia de esta magnitud. De hecho en muchas legislaciones es el único que se tiene en cuenta a través de la aproximación consistente en usar los niveles sonoros ponderados A, o los niveles Leq.

Basados en los generalmente bajos niveles de correlación de algunos de los atributos anteriores con la percepción global de agrado (o desagrado), el Departamento de Acústica Ambiental estableció un proyecto de investigación de nuevos atributos básicos de la calidad perceptiva de señales acústicas conjuntamente con el Grupo Psychoacoustique del Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique del CNRS, en Marsella. Focalizamos el máximo interés en atributos dependientes de la variabilidad temporal de las señales e incluimos otros atributos que podríamos llamar clásicos pero insuficientemente desarrollados y necesitados de un mayor volumen de resultados comparativos subjetivos-objetivos. En esta categoría se incluye la aspereza que constituye el tema del trabajo que aquí se presenta.

2 ASPEREZA. CONCEPTO Y MODELO DE AURES

La aspereza se considera un atributo perceptivo básico de la calidad de señales desde su mención por Helmholtz [3], que ha suscitado la atención de notables investigadores como el Nobel v. Békésy [4] o más recientes como Terhard [5], Aures [6], Kemp [7], Vogel [8] y Plomp y Steeneken [9], sobre todo. También se ha resaltado su enorme influencia en la calidad de la conversación [10], de donde quizá tomó el nombre, que en nuestro idioma se asociaría tal vez mejor con ronquera, palabra ronca. Nosotros usaremos aspereza debido a que representando bien el concepto permite una derivación natural para su unidad de medida: el asperio. (En inglés la magnitud se denomina roughness y la unidad asper).

El concepto fundamental de la aspereza está ligado a los efectos de fluctuaciones de la señal, fluctuaciones de la amplitud en señales moduladas en amplitud, en el entorno de 100 Hz. Pero el mismo atributo perceptivo se obtiene con señales moduladas en frecuencia, lo que incita a pensar que el auténtico agente de excitación sean las fluctuaciones de energía. Desde el punto de vista perceptivo, se han señalado dos aspectos no totalmente coincidentes según que la frecuencia de la señal portadora sea baja (500 Hz o inferior), o alta (2 KHz o mayor).

Como elemento fundamental de cuantificación aparece por tanto el valor de modulación (índice o factor de modulación m) pero referido al nivel medio de la señal. Se ha observado que para señales moduladas en amplitud contribuye según una relación potencial de exponente cercano a 2 [11].

(Los lectores familiarizados con el concepto y cálculo de la inteligibilidad según la función transferencia de modulación habrán descubierto ya ciertas analogías entre ambos procesos).

Otra dependencia funcional clave es la linealidad respecto de la suma de las contribuciones de las componentes en las distintas bandas críticas, de manera que el valor globalizado debe resultar de la adición de todas ellas. (Los conceptos de banda crítica y aditividad de las componentes juega también un papel clave en la sonoridad). Esta estructura funcional es una contribución fundamental debida a Aures [11] que se integra perfectamente con el concepto moderno del proceso auditivo. Las señales-funciones de excitación en las distintas bandas críticas, como componentes de la figura (pattern) general de excitación es hoy un concepto



clave del proceso de audición.

Dentro de cada banda crítica los factores de aspereza proceden del cociente entre el valor eficaz y el valor medio de la envolvente (que interpretan como el modulo) de las señales específicas. Estas resultan de la combinación de las componentes directas así como de la migración de las restantes componentes espectrales en las restantes bandas críticas. Los filtros de Terhard [12] proporcionan una aproximación suficiente de las cuantías de estas migraciones, y vienen definidos por sus dos pendientes, una S1 constante hacia las bajas frecuencias dada por

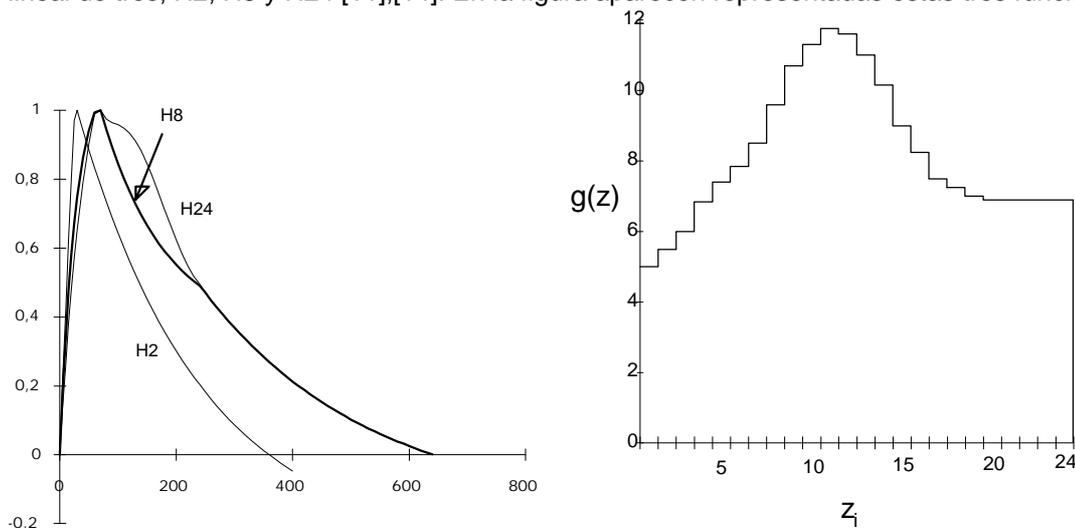
$$S1 = -27 \text{ dB/Bark}$$

y otra S2 hacia las altas frecuencias, dependiente del nivel de la componente espectral que emigra dada por

$$S2 = -24 - \frac{0.23}{f} + 0.2L \text{ dB/Bark}$$

donde la frecuencia f está dada en kHz, y el nivel L en decibelios. esta segunda pendiente del filtro muestra claramente el carácter alineal de la transformación tanto en nivel como en frecuencia.

La adaptación de las señales de excitación específicas al cálculo de la aspereza, previamente al cálculo de los valores eficaces, requieren ponderaciones espectrales, que se realizan sobre las envolventes, mediante las funciones H_i , $i = 1, 2, \dots, 24$, una para cada banda de bark, si bien todas se expresan como combinación lineal de tres, H2, H8 y H24 [11],[14]. En la figura aparecen representadas estas tres funciones básicas.



Los índices o factores de aspereza requieren otra ponderación introducida por Aures, en base a trabajos anteriores de Vogel [13], que aparece en la figura siguiente.

Queda por tanto

$$as_i = (m_i^* \cdot g_i)^2$$

Para adapta los valores subjetivos obtenidos para los ruidos modulados en amplitud se introducen finalmente elementos de corrección, que se consiguen mediante los coeficientes de correlación cruzada de las envolventes de las señales de excitación específicas con las de las bandas vecinas inferiores, c_{i-1} y superiores c_{i+1} . La expresión final de cálculo sería por tanto

$$As = b \sum_i a s_i c_{i-1} c_{i+1}$$

en donde b es un coeficiente de ajuste de escala. En el esquema de Daniel y Weber, donde los coeficientes de correlación cruzada están también elevados al cuadrado, este coeficiente debe ser inferior ya que se usan 48 bandas de ancho 1 bark, solapadas medio bark cada dos consecutivas, para cubrir el espacio frecuencial subjetivo.

3 IMPLEMENTACION OBJETIVA DEL MODELO DE AURES

En la implementación en ordenador del modelo de calculo de la aspereza hemos usado preferentemente una versión publicada por de Daniel y Weber [14], ya citada, como optimización del modelo de Aures.

Para permitir introducir el filtrado auditivo del oído externo y medio hemos obtenido de las publicaciones al respecto la respuesta espectral correspondiente a un muestreo temporal a KHz. En esta primera etapa nos hemos limitado a incidencia normal.

Los espectros de las excitaciones específicas se calculan sin mayores complicaciones mediante una rutina matricial, que incorpora un paso intermedio auxiliar de obtención del nivel de presión sonora, que es la magnitud usada en la formula de emigración desde las componentes espectrales hasta las distintas bandas de bark del espectro subjetivo.

Para facilitar la aplicación del filtrado de las excitaciones específicas hemos desarrollado las tres funciones H básicas en sencillas series de potencias, en lugar de las tablas numéricas de origen. Hemos procedido semejantemente con la función $g(z_i)$ de ponderación de los índices de aspereza parciales. Estas funciones se han presentado en forma gráfica en el apartado anterior, que el lector puede comparar con las que aparecen en las publicaciones de referencia.

todo el programa se ha realizado en Matlab, donde se dispone de una FFT discreta de alta velocidad, transformación clave, por cuestiones de tiempo en este proceso de cálculo de la aspereza.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo computacional se ha calibrado mediante su aplicación a señales de valores de aspereza bien conocidas entre las que hay que destacar la señal modulada en amplitud de nivel 60 dB, con una portadora senoidal de 1KHz, modulada en amplitud por una señal también senoidal de 70 Hz y factor de modulación del 100%. Esta señal se toma como unidad de medida de la aspereza y se le atribuye el valor de 1 asperio.

A partir de este punto se ha aplicado el programa de cálculo a conjuntos de señales fácilmente formulables por ecuaciones, en los cuales se hace variar uno solo de los parámetros significativos, y para los que se conocen los resultados de valoración subjetiva:

señales moduladas en amplitud, en donde se hace variar el factor de modulación, la frecuencia portadora, la frecuencia de modulación y el nivel,

señales moduladas en frecuencia donde se hacen variar el ancho de las excursión en frecuencia así como la velocidad de barrido.

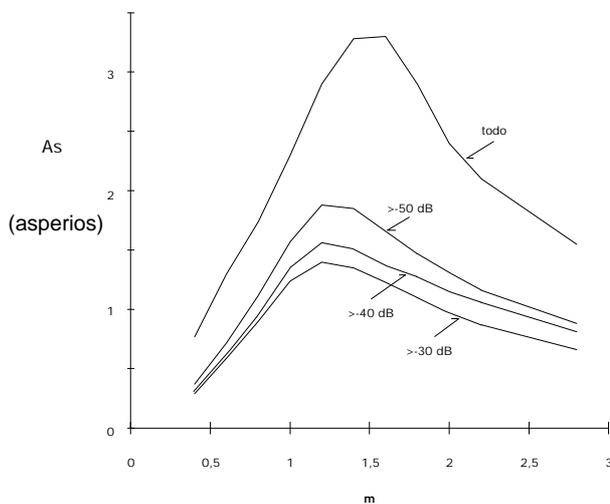
En una primera etapa hemos analizado la influencia de la definición de envolvente, en los valores numéricos obtenidos. Como los factores o índices de aspereza as_j vienen definidos conceptualmente por el cociente entre el valor eficaz y el valor medio de las envolventes de cada una de las excitaciones específicas, hemos analizado, en una primera etapa, la influencia de la definición de envolvente. Hemos partido de la definición rigurosa de envolvente a partir de la transformada de Hilbert, llegando como conclusión a poder



identificar la envolvente con el módulo de las señales específicas como aproximación mas sencilla, sin desviación apreciable de los valores de aspereza obtenidos.

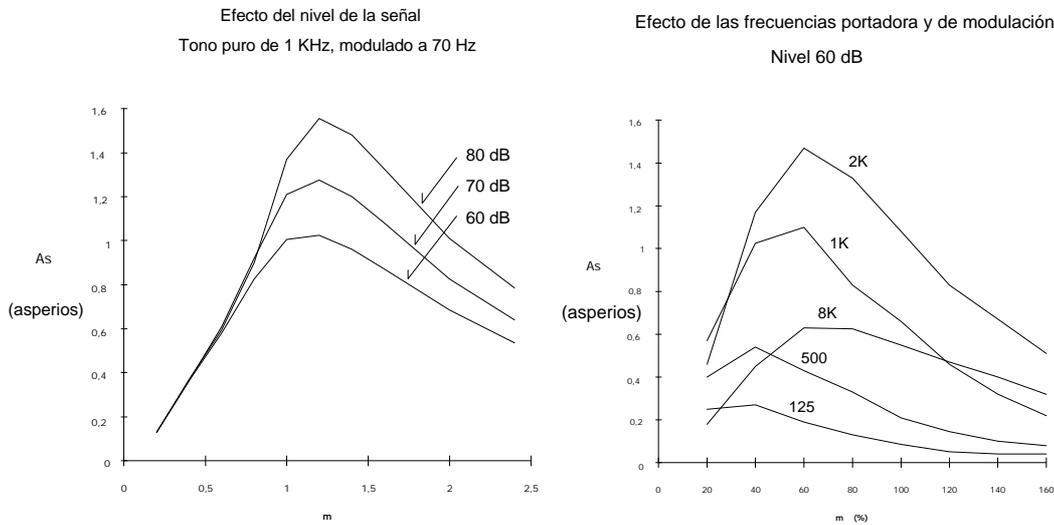
A continuación se han sintetizado los tipos de señales anteriormente indicados, a los que se ha aplicado el modelo computacional por conjuntos, como se ha dicho. Los resultados obtenidos en primera instancia manifestaban dependencias cualitativas de la aspereza respecto de los parámetros semejantes a los citados en la literatura que servían de chequeo, pero con valores mas altos y con los puntos de inflexión u otros elementos significativos descolocados. Las señales moduladas en amplitud, por su sencillez, variedad, y abundancia de datos de referencia, nos sirvieron para estudiar las causas de estas desviaciones. Encontramos necesario introducir un nuevo concepto, y solo uno, para conseguir una buena adaptación de los resultados: el establecimiento de umbrales de los niveles de las excitaciones específicas relativos a las componentes de mayor nivel. Así hemos encontrado para este nivel umbral el valor de 30 dB: no contabilizando las contribuciones de las excitaciones específicas con niveles 30 dB por debajo de las mas significativas en cada caso la concordancia con los valores de chequeo en prácticamente total. Este resultado apoya el aserto general en acústica de que una componente o señal que no existe o es de muy escaso nivel no contribuye a la sensación percibida. En la Figura aparecen comparativamente los resultados para una señal de 1 KHz, y 70 dB, modulada en amplitud por una señal de 70 Hz, para distintos valores del nivel umbral de rechazo. Valores inferiores a 30 dB para este umbral, tanto para esta señal como para las restantes estudiadas, muestran incrementos de las dispersiones con los valores de la literatura lo que indica que ya se eliminan componentes significativas. La Figura muestra el efecto del valor limite del umbral en la aspereza, para un tono puro de 1000 Hz y nivel 60 dB, modulada a 70 Hz, para valores significativos del factor de modulación.

Influencia del nivel umbral en la aspereza
Tono puro de 1 KHz y 60 dB, modulado a 70 Hz



Las Figuras que siguen muestran la variación de los valores computados de la aspereza, manteniendo -30 dB como umbral de rechazo. La primera combina los efectos en la aspereza del factor de modulación m y del nivel de la señal para un tono de 1000 Hz, modulado en amplitud. La segunda el efecto combinado de la frecuencia portadora y de la frecuencia de modulación en un tono puro de nivel 60 dB. Comparadas con figuras análogas de la literatura puede verse la bondad de los cálculos.





Los resultados obtenidos para señales moduladas en frecuencia mantienen el mismo grado de concordancia que las señales moduladas en amplitud., lo que refuerza aun mas la necesidad de introducir niveles umbrales de las excitaciones específicas como elemento importante en el ajuste numérico.

5 CONCLUSIONES

Hemos implementado un modelo computacional para el calculo objetivo de la aspereza de señales acústicas siguiendo el modelo de Aures con las optimizaciones de Daniel y Weber, contrastado para señales moduladas en amplitud y en frecuencia con los datos disponibles en la literatura para este tipo de señales.

Hemos desarrollado expresiones analíticas para las funciones H, de Aures, de filtrado de las excitaciones específicas, así como de la función de ponderación de las asperezas efectivas en las distintas bandas de ancho 1 bark, del espectro subjetivo.

Como novedad del modelo hemos fundamentado la necesidad de introducir niveles umbrales de las excitaciones específicas, que actúan a modo de filtro seleccionando las componentes de aspereza efectivas en las distintas bandas de ancho 1 bark. Hemos obtenido una primera aproximación para el nivel diferencial de estos umbrales, de valor constante en las distintas bandas de frecuencia subjetiva, aunque cabe esperar alguna dependencia en función de estas bandas críticas.

El modelo computacional desarrollado es apto para presentaciones por auriculares o en cámara anecoica con incidencia arbitraria, lo que resulta interesante ya que se disponen pocos datos subjetivos en estas condiciones.

También parece apto, en principio, para experimentar con ruidos complejos, representativos de señales reales del complejo mundo de ruidos del medio ambiente para valorar la calidad perceptiva de las mismas, de las que aun hay menos datos disponibles en cuanto a los atributos básicos de calidad. En este sentido estamos preparando series de señales naturales combinadas con señales sintéticas a fin de usar estas como elementos de control y referencia. De hecho se han comenzado algunas series de experiencias para lo que se han desarrollado protocolos que incluyen escalas abiertas y cerradas como elementos de refrendos mas distintivos.



AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto Factores físicos y psíquicos de la calidad perceptiva de señales acústicas, acogido al convenio de cooperación CSIC-CNRS, entre el Departamento de Acústica Ambiental del Instituto de Acústica, y el grupo Psychoacoustique del LMA de Marsella.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Aures, Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, *Acustica* 59 (1985), 286
- [2] E. Zwicker , H. Fastl, *Psychoacoustics*, Springer-Verlag, Berlin 1990
- [3] H. v. Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundage für die Theorie der Musik*, F. Wieweg & Sohnn Braunsweig, 1863
- [4]G. v. Békésy, Über akustische Rauigkeit, *Z. tech. Phy.* 16(1935) 276
- [5] E. Terhard, Pitch, consonance and harmony, *J. Acoust. Soc. Amer.* 55 (1974), 1061
- [6] W. Aures, Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer Empfindungsgrossen, *Acustica* 59 (1985) 282
- [7] S. Kemp, Roughness of frequency modulated tones, *Acustica* 50 (1982), 126
- [8] A. Vogel, Ein gemeinsames Funktionsschema zur Beschreibung der Lautheit und der Ruohikeit, Tesis, TU München 1974.
- [9] R. Plomp, H. J. M. Steeneken, Interference between two simple tones. *J. Acoust. Soc. Amer.* 43 (1967) 883
- [10] N. Isshiki et al. Differential diagnosis of hoarseness, *Folia Phoniatica* 21 (1969) 9-19
- [11] W. Aures, Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit, *Acustica* 58 (1985), 268
- [12] E. Terhard, Calculating virtual pitch, *Hearing Research* 1 (1979) 487-498
- [13] A. Vogel, Roughness and its relation to the timepattern of psychoacoustical excitatio, en *Facts and models in hearing* (Editores E. Zwicker y E. Terhard), Springer Verlag. New York 19174
- [14] P. Daniel, R. Weber, Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model, *Acustica* 81 (1995)

