



Tema 7: Sicoacústica I

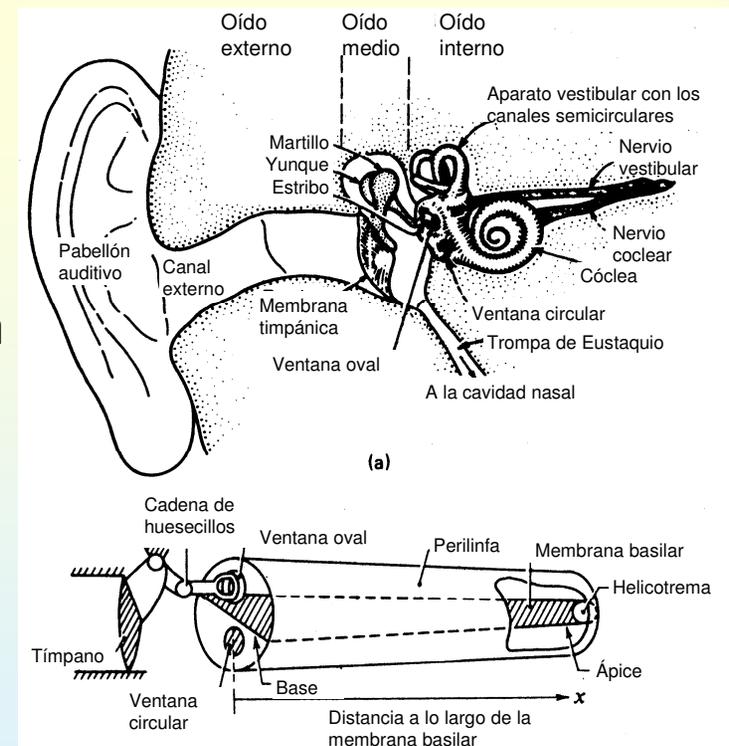
- El órgano auditivo.
- La teoría de la localización.
- Sonoridad y capacidad auditiva.
- Auralización.
- Percepción de sonoridad.
- El decibelio en acústica.
- Nivel de presión acústica (Sound Pressure Level).
- Niveles de presión acústica típicos.
- Cálculos con decibelios.
- Influencia de la frecuencia en la percepción de sonoridad de formas de onda simples.
- Consecuencias de las curvas isófonas.
- Curvas de ponderación frecuencial.
- Medida de la percepción de sonoridad (tonos puros).
- Efectos en la percepción de sonoridad.

El objeto de la sicoacústica es el estudio la percepción del sonido y de sus efectos en nosotros.

El órgano auditivo

- El pabellón auditivo acopla la impedancia exterior al canal auditivo y proporciona cierta directividad.
- El canal filtra las frecuencias y resuena a unos 4 a 5 kHz.
- El tímpano convierte vibraciones de presión en desplazamientos.
- Los huesos actúan de palanca con amplificación ~ 15 .
- La cóclea permite vibraciones **activas (realimentadas desde el cerebro)** de la membrana basilar, poblada de terminaciones nerviosas (pelillos) mayores a mayores intensidades.

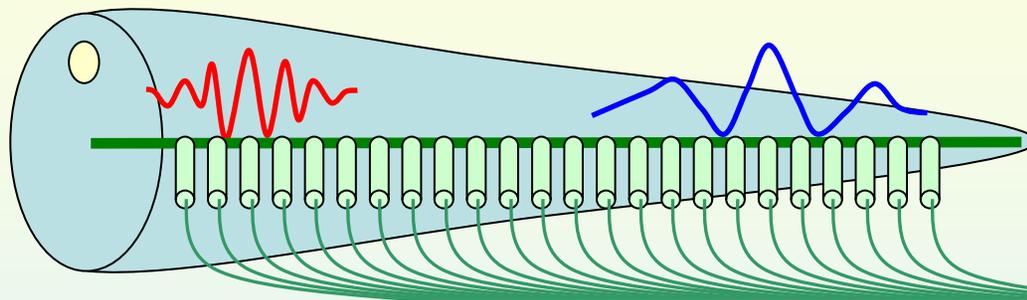
- La salida son pulsos (sinapsis) en fibras nerviosas codificadas en el haz nervioso.



Fuente: desconocida

La teoría de la localización

Las terminaciones nerviosas acaban en distintos lugares de la membrana basilar en una células pilosas y se producen impulsos nerviosos al resonar ésta, en diferentes regiones según la frecuencia. De esta manera el oído se configura como un analizador espectral continuo, en paralelo, con capacidad de discernir anchos de banda de aproximadamente un tercio de octava, llamados **bandas críticas**.



Vista de la cóclea desenrollada.

Más información en:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Altas frecuencias

Bajas frecuencias

Haz nervioso aferente

Consecuencias: dos sonidos de frecuencias próximas superponen sus efectos en la misma región de la membrana basilar por lo que apenas suman su efecto sonoro. Han de alejarse más que la banda crítica para que sumen su contribución a la percepción de sonoridad.

De ahí radica el frecuente uso de anchos de banda de tercios de octava en el análisis de sonidos.

Sonoridad y capacidad auditiva

•Codificación de la sonoridad

- La frecuencia de los pulsos nerviosos (sinapsis) de cada terminación pasan de un valor base (ruido) a ser crecientes con la intensidad acústica y en fase con la forma de onda hasta la saturación → intervalo $\ll 120$ dB.
- El gran rango auditivo de > 120 dB se debe a que se reparte entre intervalos contiguos y solapados de sensibilidad de las neuronas.
- Luego, hay neuronas especializadas en disparar con sonidos leves y otras en medios y otras en intensos.
- Las muy sensibles son las más proclives al daño por exceso.

•Pérdida de capacidad auditiva

- Se dañan las terminaciones más sensibles, reparándose con el descanso, total o parcialmente.
- Un daño repetido ocasiona deterioro permanente.
- La falta de redundancia en la información enviada al cerebro ocasiona confusión en la identificación del sonido, necesitándose una intensidad mayor que incremente la redundancia.

Auralización

- **Capacidad de identificar la orientación de procedencia de un sonido.**
 - **La cabeza humana es escasamente directiva, salvo a altas frecuencias. Pero es posible:**
 - La detección en acimut y elevación del origen de un sonido.
 - La detección de la distancia a la que se encuentra una fuente.
 - Se logran por combinación de diferencia de:
 - Sonoridad
 - Tiempo de llegada
 - Cambio espectral
 - Reflexiones en los hombros... entre ambos oídos, realizada en centros superiores del cerebro.

El efecto de reverberación se usa para juzgar la distancia.

El uso combinado de la vista y ladear la cabeza facilitan la localización, así como el que el sonido sea familiar.

Percepción de sonoridad

La percepción de **sonoridad** depende de muchos factores y es subjetiva.

Efectos del sonido en la sensibilidad auditiva:

- **Adaptación:** reducción de la percepción de sonoridad oyendo un sonido continuo.
- **Disminución transitoria del umbral de percepción.**
Pasa a ser permanente por repetición extendida en el tiempo.
- **Trauma**, para amplitudes grandes > 120 dB. Puede ser reversible o irreversible.

Percepción de sonoridad

Percepción de sonoridad: es subjetiva

Sonidos impulsivos.

- Si un sonido de amplitud fija:
 - dura menos de un segundo se percibe con menos sonoridad.
 - dura menos de 70 ms se percibe la energía en lugar de la intensidad → el *NIS* baja 3 dB al reducirse el tiempo a la mitad.

Sonidos continuos.

- Depende de manera compleja de su espectro:
 - A pesar de ello se usan ondas simples (sinusoidales) para estimar la sonoridad y se admite la simplificación de **sumar** las intensidades para obtener la sonoridad, como una primera aproximación.

El decibelio en acústica

Ley de Fletcher-Munson $\Delta S = K \frac{\Delta M}{M} \Rightarrow dS = K \frac{dM}{M}$

Aumento de percepción

Aumento relativo de excitación

Integrando con la condición inicial de $S = 0$ con $M = M_{ref}$:

$$S = K \ln\left(\frac{M}{M_{ref}}\right) \rightarrow S = K' \log_{10}\left(\frac{M}{M_{ref}}\right)$$

En acústica se toma $K' = 1$; $M \equiv I$; $M_{ref} \equiv I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$; resultando el **belio**

$\underbrace{NIS[B]}_{\text{Nivel de intensidad sonora en belios } L_I} = \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right)$; pero*: $I = \frac{(P_{rms})^2}{\rho_{at} a}$ Además el **decibelio** es una unidad próxima al mínimo cambio detectable, más acorde:

$\underbrace{NIS[dB]}_{\text{Nivel de intensidad sonora en decibelios}} = \underbrace{20 \log\left(\frac{P_{rms}}{P_{rms,ref}}\right)}_{\text{Nivel de presión sonora en decibelios } NPS[dB]; P_{rmsref} = 20\mu Pa} + \underbrace{10 \log\left(\frac{(P_{rms,ref})^2}{I_{ref} \rho_{at} a}\right)}_{\ll 1 \text{ dB a temperaturas normales.}}$

Nivel de presión acústica (Sound Pressure Level)

$$\underbrace{NPS[\text{dB}]}_{L_p[\text{dB}]} = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{rms,ref}} \right) \quad (/)$$

Coincide prácticamente con el nivel de intensidad acústica y lo denominaremos simplemente L de “level” o N de “nivel”

Ejercicio: Calcule en decibelios lo que supone duplicar la intensidad del umbral de percepción.

Si en la **ec. (/)** hacemos $(P_{rms}/P_{rms,ref})^2 = 2$, resulta: $L = 10 \log 2 = 3,01$ Luego, se produce un aumento de casi exactamente 3 dB.

Ejercicio: Calcule en decibelios lo que supondría **decuplicar** la intensidad del umbral de percepción.

Si en la **ec. (/)** hacemos $(P_{rms}/P_{rms,ref})^2 = 10$, resulta: $L = 10 \log 10 = 10$. Luego, se produce un aumento de 10 dB.

Nota: En estos apuntes se usa indistintamente niveles en castellano N y en inglés L

Niveles de presión acústica típicos

Presión acústica rms [Pascals]	NPS [dB]	Ambientes
200,0	140	A 30 m de un avión militar en despegue
63,0	130	Posición del operador de una remachadora neumática
20,0	120	Nivel máximo en una sala de calderas. Umbral de dolor
6,3	110	Posición del operador en una punzonadora automática
2,0	100	Taller de torneado automático, discoteca
0,63	90	Ambiente de obra civil con martillo neumático
0,2	80	Acera en una calle congestionada
0,063	70	Radio en volumen alto en una estancia
0,02	60	Restaurante en actividad
0,0063	50	Conversación hablada a 1 m
0,002	40	Conversación susurrada a 2 m
0,00063	30	Ruido de fondo en una biblioteca
0,0002	20	Ruido de fondo en estudio de grabación o de TV
0,00002	0	Umbral de percepción normal

Cálculos con decibelios

- Se puede calcular sin considerar $P_{rms,ref}$

$$\left. \begin{aligned} NPS_1 = L_1 &= 10 \log \left(\frac{P_{rms1}^2}{P_{rms,ref}^2} \right) \\ NPS_2 = L_2 &= 10 \log \left(\frac{P_{rms2}^2}{P_{rms,ref}^2} \right) \end{aligned} \right\} \rightarrow L_1 - L_2 = \Delta L = 10 \log \left(\frac{P_{rms1}}{P_{rms,ref}} \right)^2 - 10 \log \left(\frac{P_{rms2}}{P_{rms,ref}} \right)^2 = 10 \log \left(\frac{P_{rms1}}{P_{rms2}} \right)^2$$

Así, subir 3 db es duplicar, bajar 3 dB es reducir la mitad la magnitud considerada.

Subir/bajar 6 dB es multiplicar/dividir por 4

“

.”

Subir/bajar 10 dB es multiplicar/dividir por 10

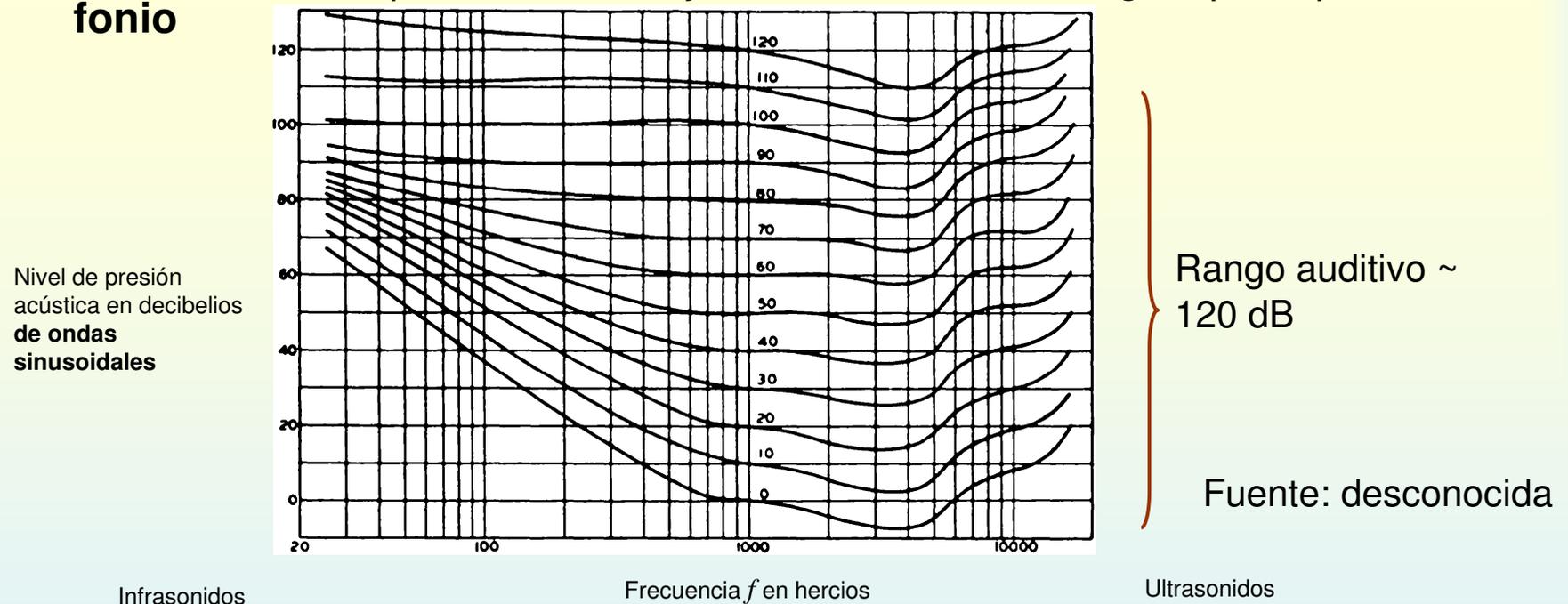
“

.”

El decibelio es una unidad “física” con una referencia fisiológica

Influencia de la frecuencia en la percepción de sonoridad de formas de onda simples

- Curvas isófonas para individuos jóvenes: unen *NPS* de igual percepción → **fonio**



El **fonio** (F) es el nivel acústico en dB de un **tono puro** que a 1.000 Hz provoca igual sensación de sonoridad. Luego a lo largo de una curva isófona se mantienen los fonios. Es una unidad fisiológica.

Estas curvas no establecen cuanto aumenta la percepción al aumentar *NPS*, sino una mera equivalencia a distintas frecuencias

Consecuencias de las curvas isófonas

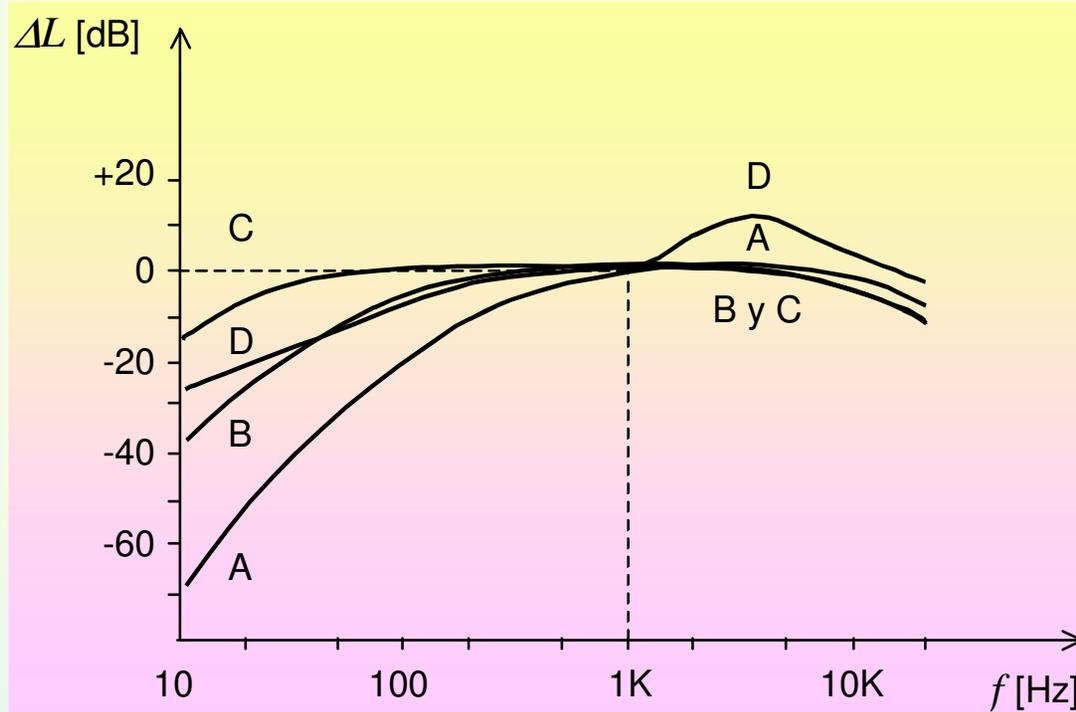
- El oído es menos sensible a bajas y altas frecuencias que a medias. Luego, hay que ponderar el sonido medido según la frecuencia para igualar su contribución.
- Se iguala la percepción a niveles elevados entre las distintas frecuencias (isófonas más planas).



- Curvas de **ponderación frecuencial** para dar una única cifra de ruido en dB (A, B, C y D).
- Necesidad de reforzar bajos y agudos en reproducción electroacústica a niveles de sonido más bajos que los naturales (loudness) y necesidad de rebajarlos al difundir música y palabra a niveles mas altos que los naturales (megafonía).

La **presbiacusia** es una subida del umbral de percepción a altas frecuencias con la edad, empezando aproximadamente a los 20 años.

Curvas de ponderación frecuencial



Se aplican al ruido entrante, rebajando el efecto de las componentes a bajas y altas frecuencias.

La A es la más usada, sigue (más o menos) la isófona de 40 dB, siendo el resto útiles para niveles acústicos elevados → dB(A).

p. e. a 100 Hz la isófona de 40 dB está en 60 dB, esto es +20 dB. A 100 Hz la ponderación A es -19,1 dB, casi igual

f_c (Hz)	31,5	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	
A_k	A (dB)	-39,4	-30,2	-26,2	-22,3	-19,1	-16,1	-13,2	-10,8	-8,6	-6,5	-4,8	-3,2
C_k	C (dB)	-3,0	-1,3	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0	0	0	0
f_c (Hz)	630	800	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4.000	5.000	6.300	8.000	
A_k	A (dB)	-1,9	-0,8	0	0,5	1	1,2	1,2	1,2	1,0	0,5	-0,2	-1,1
C_k	C (dB)	0	0	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,8	-1,3	-2	-3,0

(*)

Para octavas úsese el promedio logarítmico de los tres tercios: $A_{k,octava} = 10 \log \left(\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 10^{\frac{A_k}{10}} \right)$

Medida de la percepción de sonoridad (tonos puros)

- Los fonios no se pueden sumar para sumar efectos, al ser decibelios. Se componen como tales, logarítmicamente.
- Se ha observado experimentalmente que por encima de 40 fonios son necesarios 10 fonios más para duplicar la sensación de sonoridad.
- Unidad subjetiva: **el sonio** (S)
- 1 sonio = sonoridad de un tono puro de 40 dB a 1.000 Hz.
- Relación entre sonios y fonios:
- Los sonios se pueden sumar.
- Los sonidos reales son complejos, dificultando establecer con precisión su sonoridad con la mera suma de sonios.

$$S = 2^{\frac{F-40}{10}}$$

Efectos en la percepción de sonoridad

Hay no linealidades como:

- La parcial o fundamental ausente. El oído la agrega. Puede ser observado este fenómeno en:

http://en.wikipedia.org/wiki/Missing_fundamental

- **Enmascaramiento:** desplazamiento del umbral de percepción por proximidad de un sonido más intenso ($> +20\text{dB}$) a frecuencia menor \Rightarrow la suma de sonoridades solo puede realizarse si son frecuencialmente distantes.

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Psychoacoustics>

- Para complicar más las cosas, sonidos precedentes o sucedentes en el tiempo efectúan un enmascaramiento también, aunque menor, véase:

<http://sound.eti.pg.gda.pl/SRS/psychoacoust.html>

- Aplicación: MP3 y otras compresiones. Eliminan lo enmascarado, por inútil al no ser percibido.

El sonómetro

- Instrumento de mano, basado en un micrófono que muestra niveles acústicos, **midiendo de forma omni-direccional**.
- Es necesario alejarlo del cuerpo para evitar afectar a la medición. Mejor instalarlo sobre trípode con cable prolongador de micrófono.
- Responde al nivel rápidamente, si se elige la posición FAST (125 ms) y lentamente si se elige la posición SLOW (1.000 ms), que permite visualizar niveles cambiantes.
- La posición IMPULSE permite medir el pico de presión instantánea referido a 20 μPa .
- Suelen disponer de varias escalas de ponderación frecuencial (A, B, C y D), o incluso sin ella (LINEAR o FLAT).
- Los sonómetros integradores permiten medir L_{eq} y SEL .
- Pueden incorporar la medición de T_{60} y percentiles.
- Los hay que realizan espectros, medios e incluso instantáneos.
- Los de clase 1 son de alta precisión y los de clase 2 son válido para trabajos profesionales. Los de clase 3 son para meros estudios estimativos.
- Para que la medición sea legalmente válida es necesario que estén certificados.
- Se calibran con una caperuza que somete al micrófono a un campo acústico calibrado.

Cuestiones de autoevaluación, tema 7

- La separación de la información frecuencial de un sonido llegado al oído ¿ocurre en el oído interno o en centros superiores del cerebro?.
- La información que permite determinar la sonoridad de un ruido ¿es ya generada en el oído interno?.
- La membrana basilar vibra en distintas regiones ya sea la frecuencia de la onda incidente en ella.
- El oído humano percibe aproximadamente igual cambio de sonoridad entre 1000 μPa y 2.000 μPa que entre 100.000 μPa y 200.000 μPa .
- Por efecto de sonidos muy intensos las células sensibles de la membrana basilar que más fácilmente se deterioran son las responsable de engendrar pulsos en los intervalos más intensos.
- El nivel de intensidad acústica coincide en condiciones normales con el nivel de presión acústica.
- El nivel de presión acústica está basado en el cuadrado del valor eficaz de las oscilaciones de presión.

Actividades propuestas, tema 7

- La transmisión del sonido entre dos recintos de una vivienda puede hacer que el nivel del sonido baje hasta unos 60 dB e incluso más, lo cual significa que solamente pasa una milésima de la intensidad incidente en la partición. Sin embargo, el carácter logarítmico del oído humano hace que sonidos incidentes de más de 60 dB (una conversación en voz alta, o la radio, p. e.) puedan ser oídos en el recinto vecino. Compruébelo.
- Compruebe en un reproductor que al difundir música de orquesta a bajo volumen los graves (timbales, bajos, trompas y voz masculina) pierden importancia. Asegúrese de que no hay un efecto compensatorio tipo loudness control.
- Compruebe que subir 120 dB corresponde a multiplicar P_{rms} por 1 millón.
- Superponga la curva de ponderación frecuencia A, pero invertida (dB cambiados de signo) sobre la curva isófona de 40 dB (40 fonios) y verifique que está basada en ella, aunque es más suave y fácilmente realizable con componentes electrónicos pasivos.
- Compruebe que el sonido llega al oído interno no solamente por el canal auditivo, sino a través de los huesos del cráneo, tapando los oídos con la mano. Por ello, algunos micrófonos actúan sobre el cráneo.
- ¿Cuál sería un nivel de presión acústica típico en el aula?