Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

49498 - Acustica Applicata e Illuminotecnica L (A-K)

Dispensa n. 3

ANALISI IN FREQUENZA
IL SISTEMA UDITIVO UMANO

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008

Indice

I suoni sono caratterizzati da due componenti fondamentali:

- Un *tono puro* è caratterizzato da una singola frequenza
- I suoni reali sono composti da più frequenze, che ne determinano il *timbro*
- L'intensità di un suono è determinata dall'ampiezza della perturbazione della pressione sonora

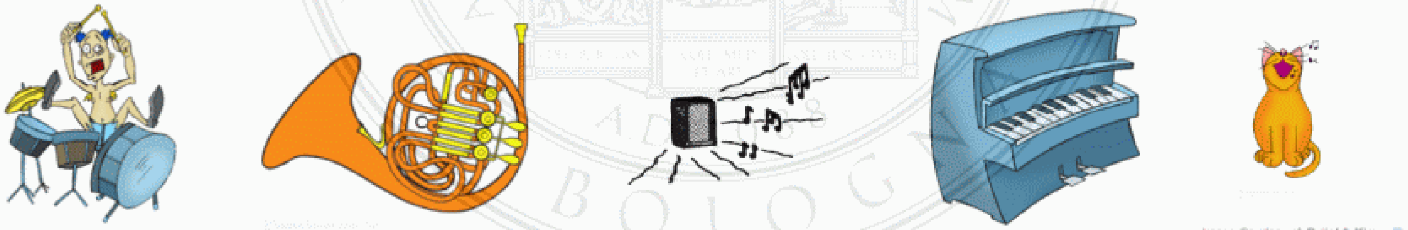


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Le sorgenti sonore generano suoni in un certo campo di frequenze

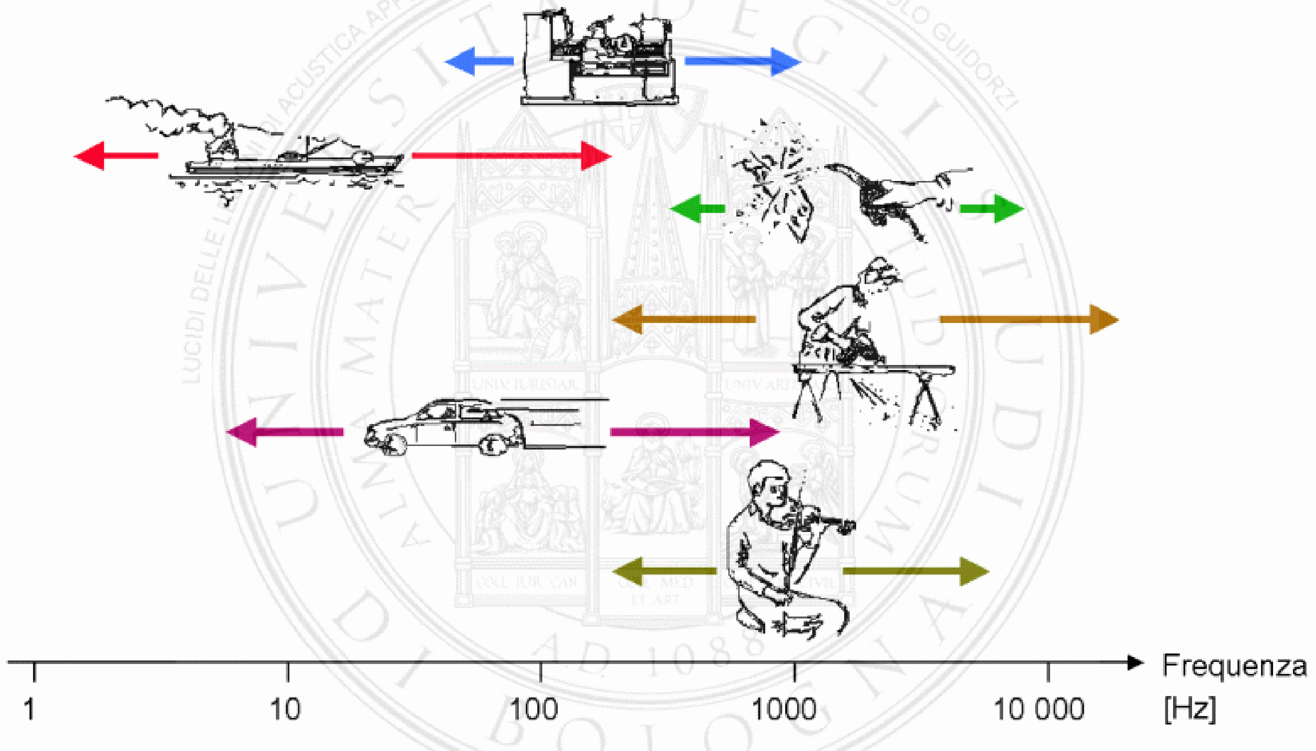
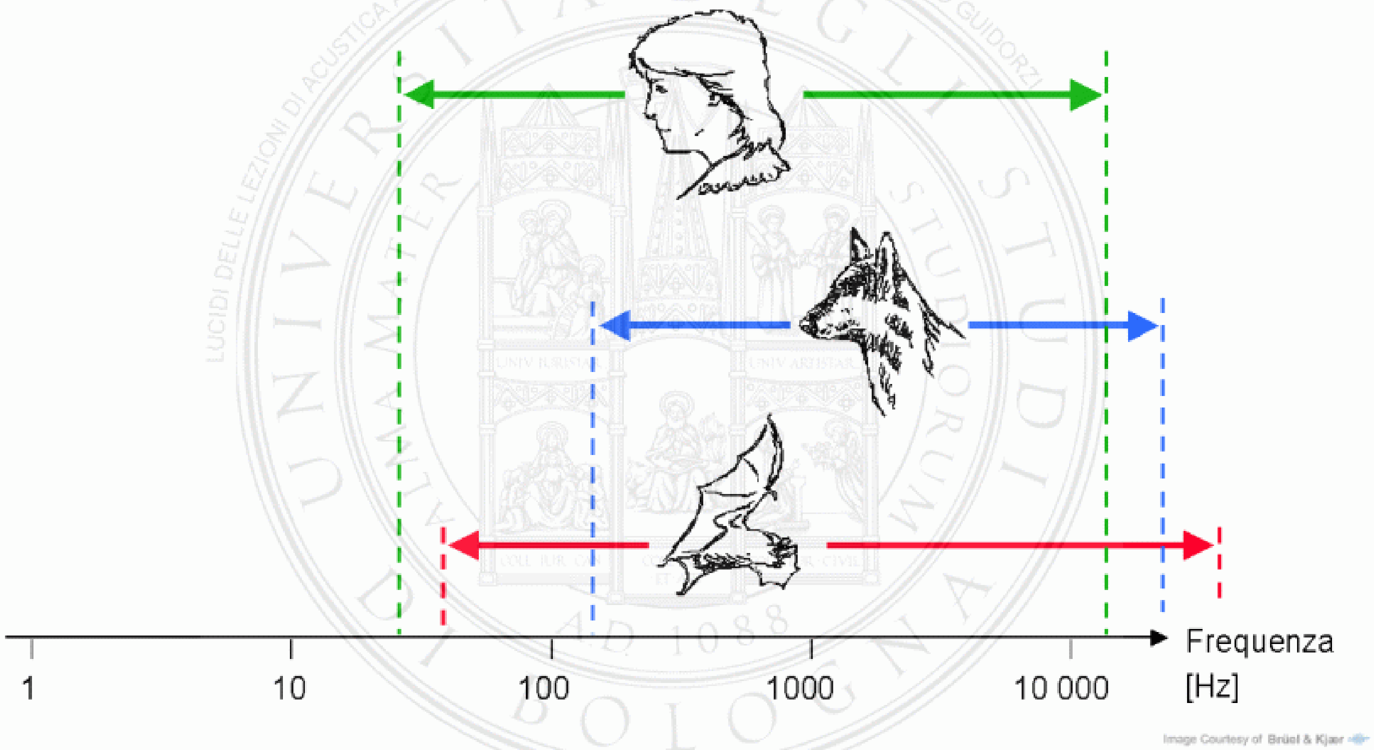
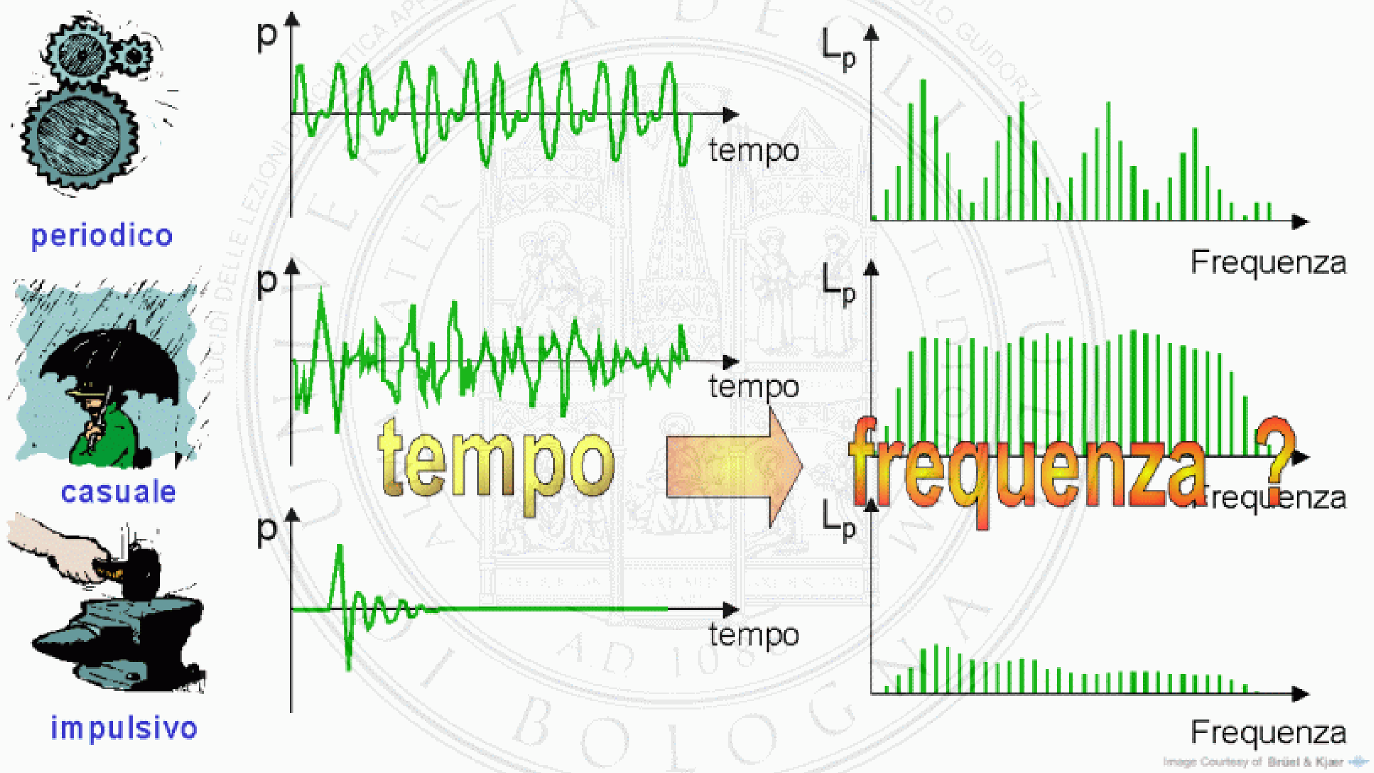


Image Courtesy of Brüel & Kjær

Il sistema uditivo umano medio percepisce suoni compresi tra 20 e 20000 Hz.



ANALISI IN FREQUENZA



ANALISI IN FREQUENZA

Mediante un'operazione matematica, la Trasformata di Fourier, è possibile analizzare un segnale, in particolare le onde sonore, e passare dal dominio del tempo al dominio delle frequenze (trasformata diretta) e dal dominio delle frequenze al dominio del tempo (trasformata inversa).
La teoria di Fourier ci dice che ogni suono è formato dalla somma di infinite sinusoidi, per ogni frequenza, da zero a infinito, ognuna con una determinata ampiezza e fase. Le ampiezze e fasi di queste sinusoidi determinano il timbro di un suono.
Si possono quindi calcolare le componenti spettrali di un dato suono, ognuna associata a una particolare frequenza. Si ottengono numeri complessi (modulo e fase o parte reale e immaginaria).
Nella pratica, non potendo analizzare tutte le frequenze da zero a infinito si restringe l'analisi a una porzione ristretta di frequenze. L'analisi su tutto lo spettro sarebbe comunque inutile visto che le frequenze di interesse per l'orecchio umano sono limitate (circa 20-20000 Hz) e le sorgenti sonore normalmente ricoprono solo parti limitate dello spettro acustico.

Baron Fourier.

Dominio del tempo ↕ Dominio della frequenza

$$X(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Trasformata diretta
Tempo → Frequenza

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\,\text{sen}(\omega t)$$

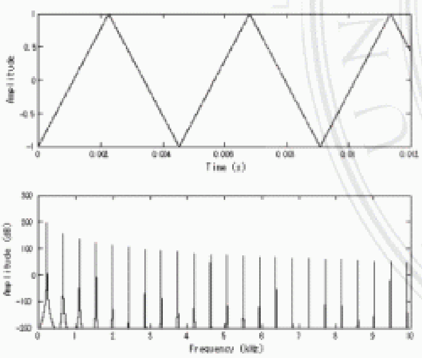
$$x(t) = F^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{+j2\pi ft} df$$

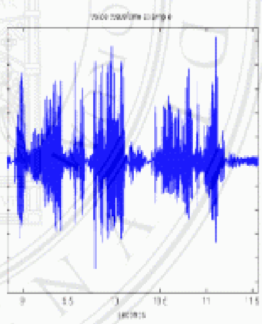
Trasformata inversa
Frequenza → Tempo

ANALISI IN FREQUENZA

L'analisi di Fourier si può applicare al caso di funzioni *discrete* nel dominio del tempo e della frequenza (DFT, Discrete Fourier Transform). Ciò significa che con apparecchi digitali si può campionare un suono (registrarlo senza perdere informazioni) ed effettuarne l'analisi nel dominio delle frequenze (analisi spettrale). In particolare ogni suono può essere scomposto in una somma di sinusoidi (dette armoniche) ognuna con frequenza multipla di una frequenza detta fondamentale. Ogni armonica avrà una determinata caratteristica di ampiezza e fase.

Tutti i calcoli per passare dal dominio del tempo (suono) al dominio della frequenza (spettro) sono oggi eseguiti dal calcolatore, grazie ad un algoritmo veloce detto FFT (Fast Fourier Transform)





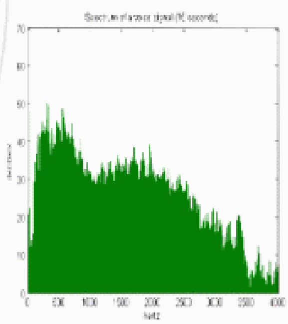
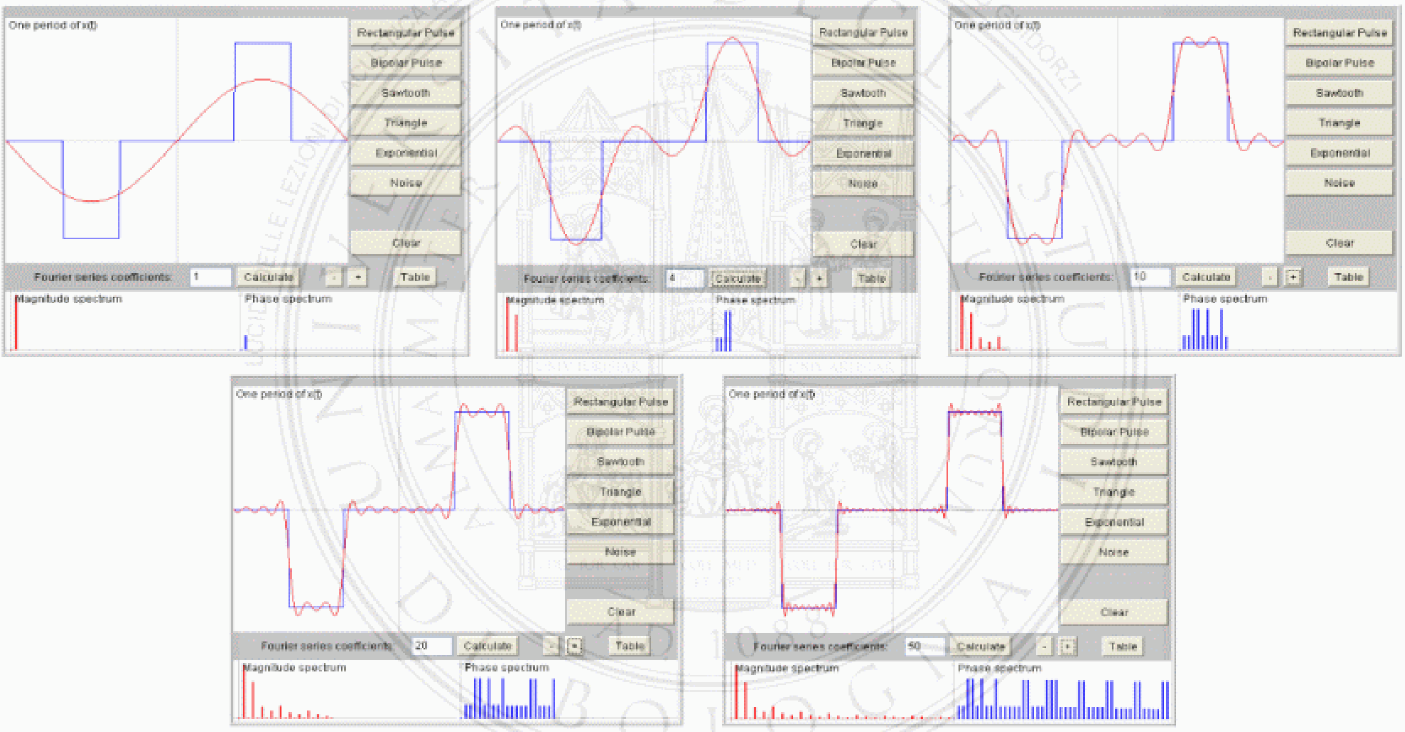


Image Courtesy of Brüel & Kjær

APPROSSIMAZIONE DI UN SEGNALE MEDIANTE SERIE DI FOURIER



http://www.jhu.edu/~signals/fourier2/index.html

SPETTRO DI TONI PURI E LORO COMPOSIZIONE

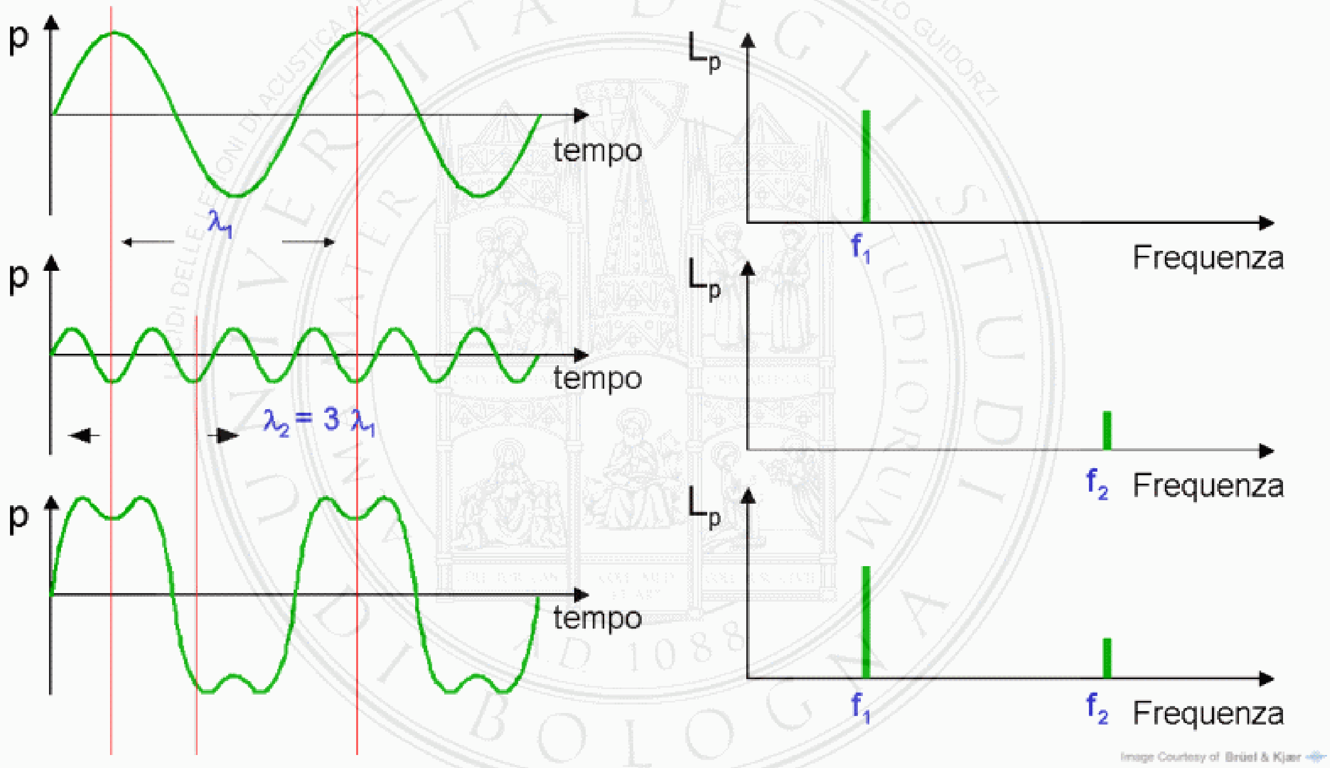


Image Courtesy of Brüel & Kjær

CONCETTO DI FILTRO

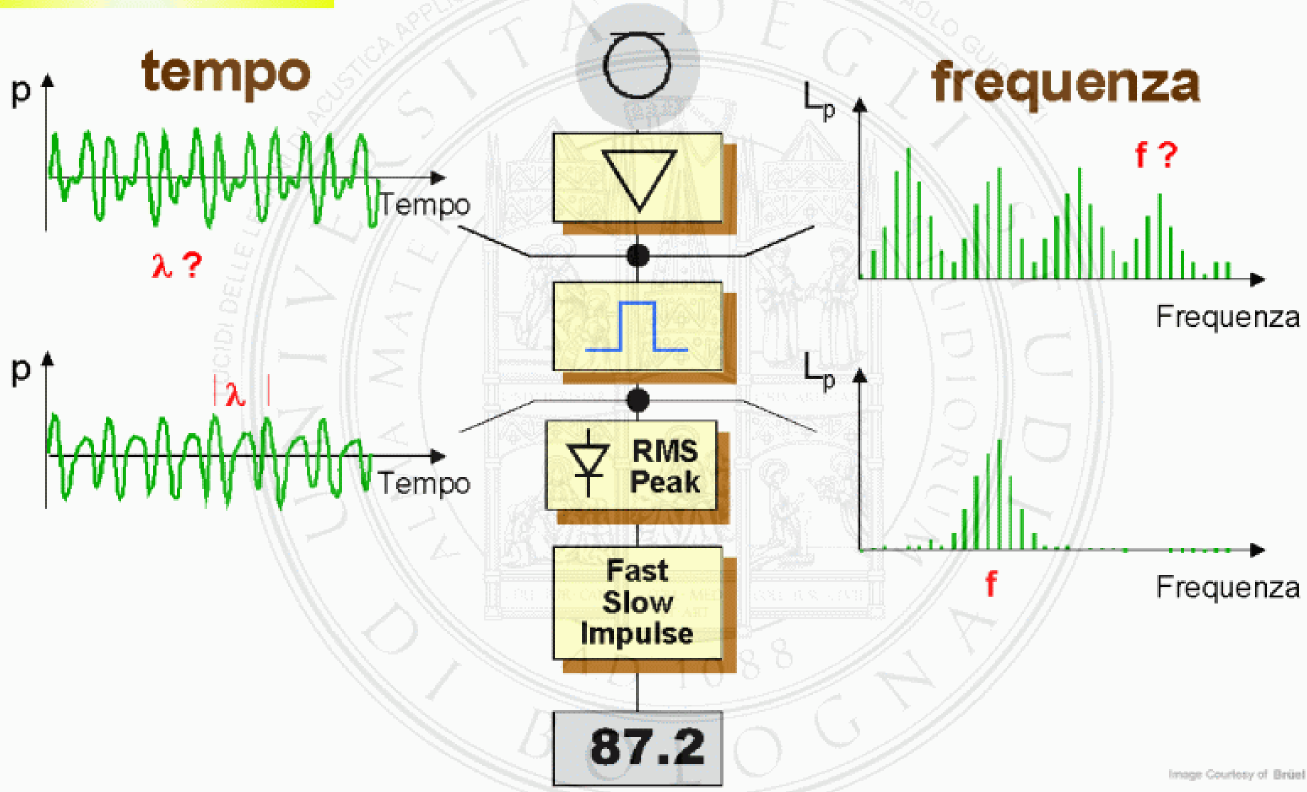
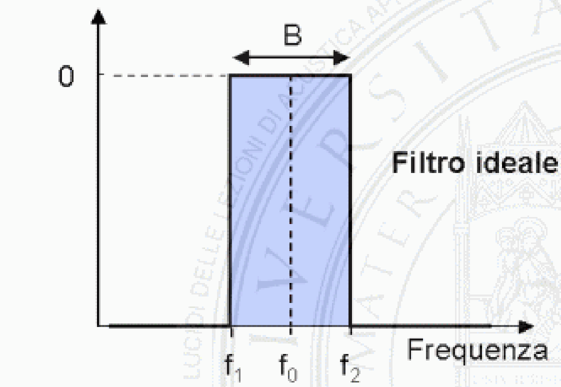


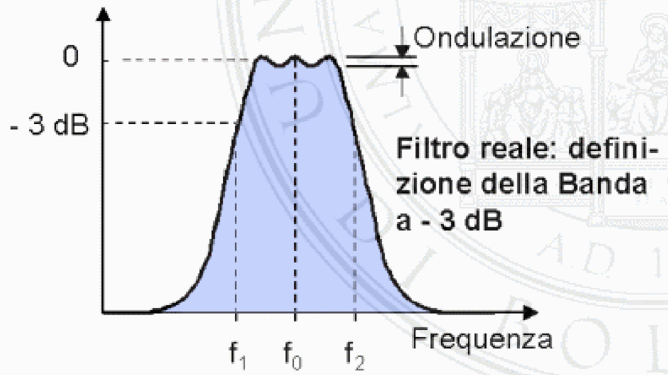
Image Courtesy of Brüel & Kjær

IL FILTRO IDEALE



Banda = $f_2 - f_1$

Centro Frequenza = f_0



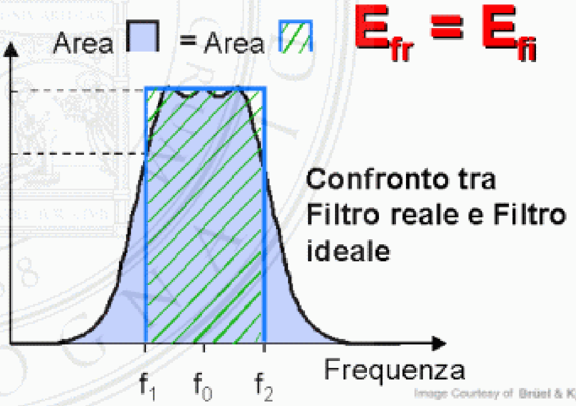
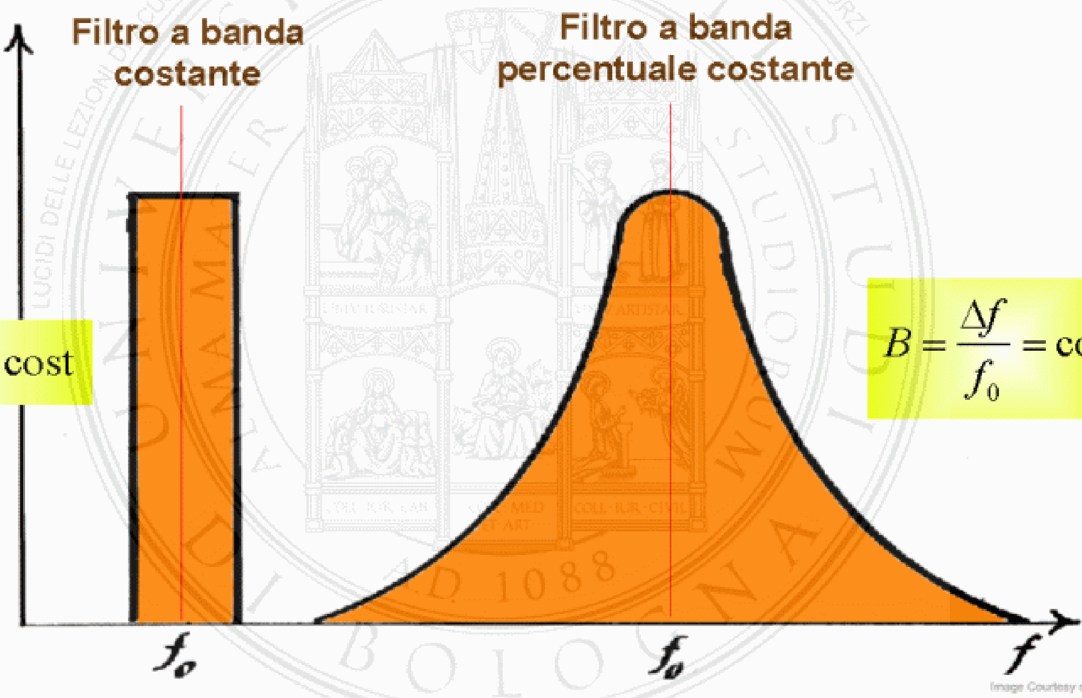


Image Courtesy of Brüel & Kjær

FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE

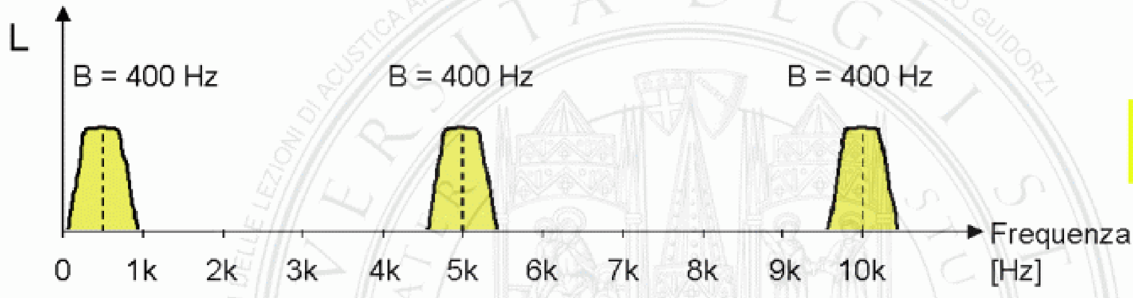
$$B = \Delta f = \text{cost}$$



$$B = \frac{\Delta f}{f_0} = \text{cost}$$

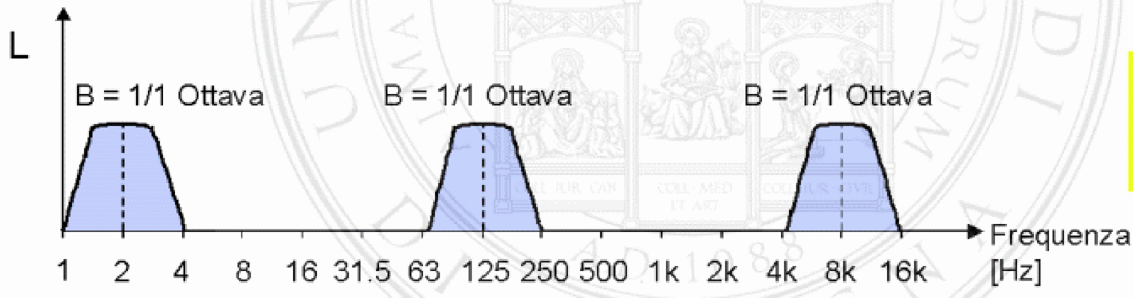
Image Courtesy of Brüel & Kjær

FILTRI A BANDA COSTANTE E PERCENTUALE COSTANTE



Asse della frequenza LINEARE
(generalmente usato nell'analisi delle vibrazioni)

$$B = \Delta f = \text{cost}$$



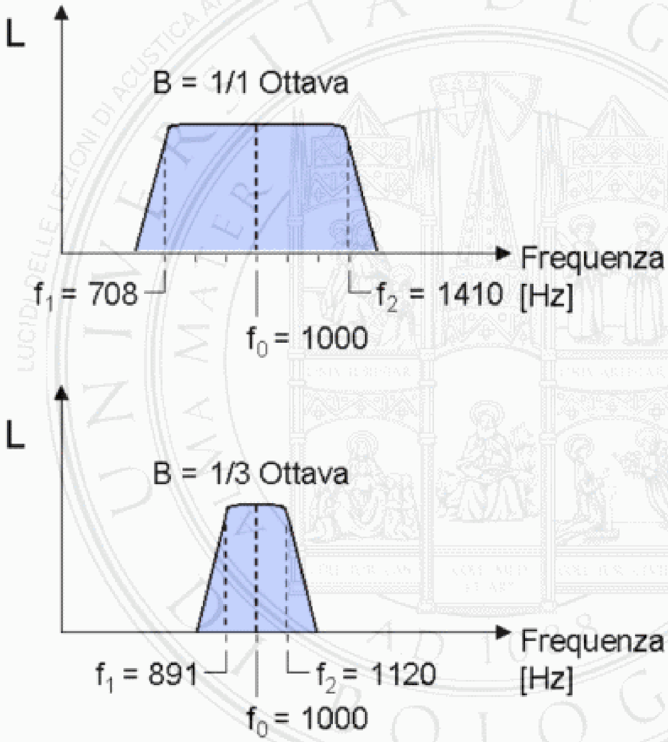
Asse della frequenza LOGARITMICO
(generalmente usato nell'analisi acustica)

$$B = \frac{\Delta f}{f_0} = \text{cost}$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA

$$B = \frac{\Delta f}{f_0}$$



$$f_{sup} = 2 f_{inf}$$
$$\Delta f = f_{sup} - f_{inf} = f_{inf}$$
$$f_0 = \sqrt{f_{sup} \cdot f_{inf}} = \sqrt{2} \cdot f_{inf}$$
$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 0,7 = 70\ \%$$

Sono bande ad ampiezza percentuale costante

$$f_{sup} = 2^{1/3} f_{inf}$$
$$\Delta f = f_{sup} - f_{inf} = (2^{1/3} - 1) f_{inf}$$
$$f_0 = \sqrt{f_{sup} \cdot f_{inf}} = 2^{1/6} \cdot f_{inf}$$
$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{(2^{1/3} - 1)}{2^{1/6}} \cong 0,23 = 23\ \%$$

Image Courtesy of Brüel & Kjær

Università degli studi di Bologna
49498 - ACUSTICA APPLICATA E ILLUMINOTECNICA L (A-K)
Ing. Paolo Guidorzi
ANALISI IN FREQUENZA - IL SISTEMA UDITIVO UMANO
3 - Filtri di 1/1 di ottava e 1/3 di ottava

BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA

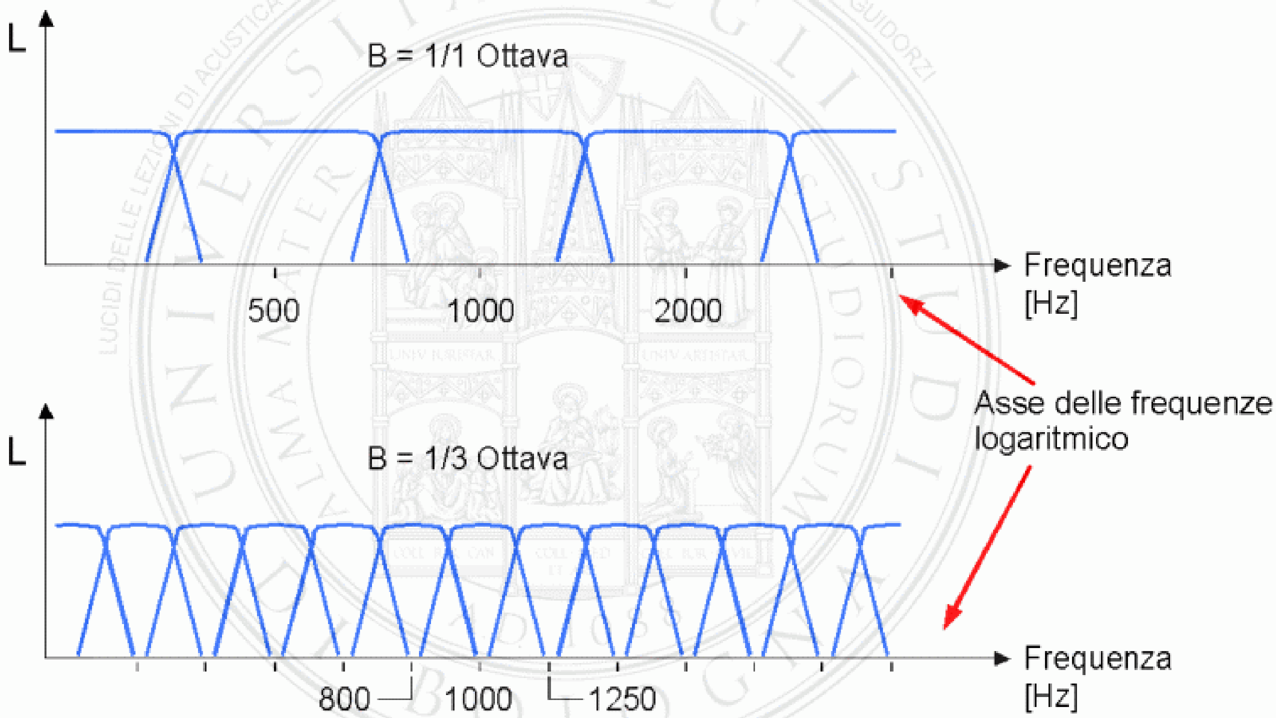


Image Courtesy of Brüel & Kjær

BANDE DI OTTAVA E BANDE DI 1/3 DI OTTAVA

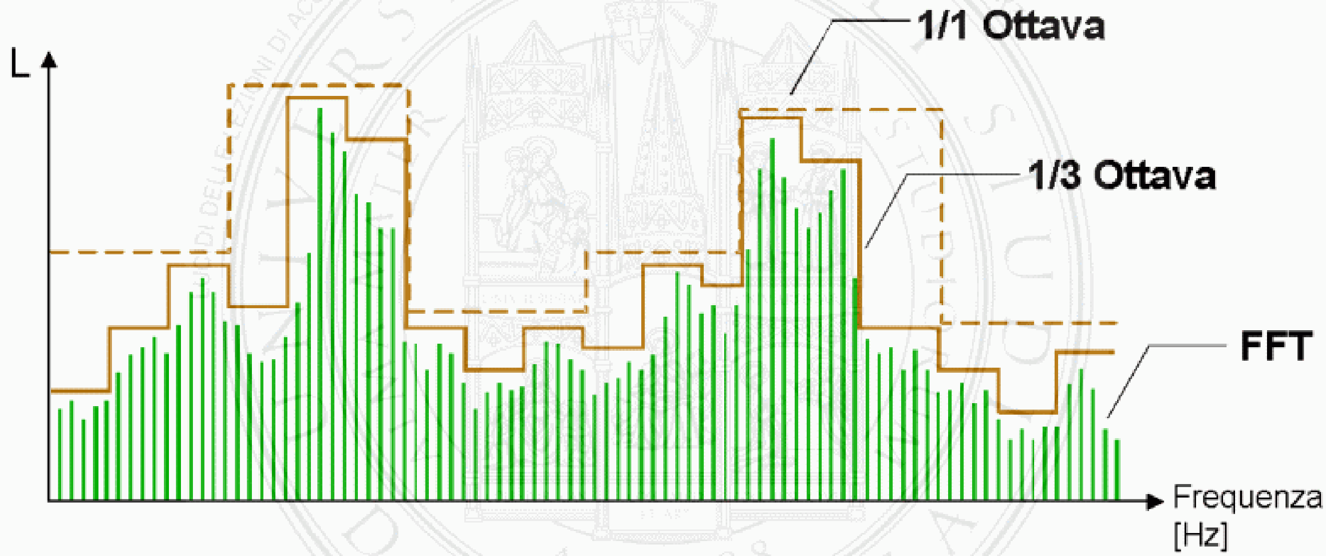


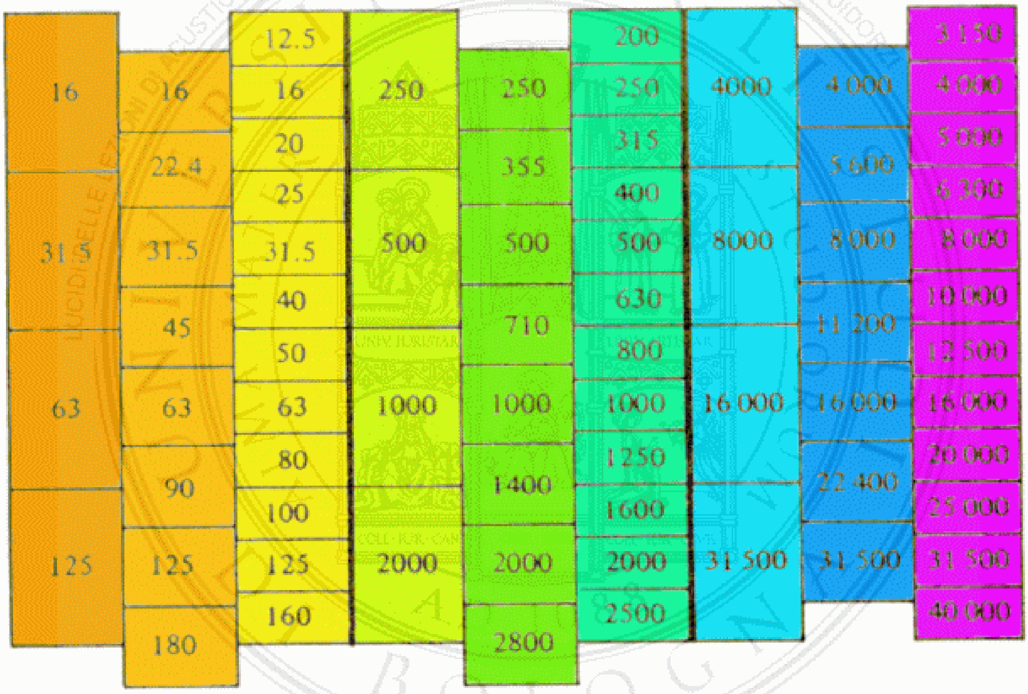
Image Courtesy of Brüel & Kjær

BANDE NORMALIZZATE (IEC1260)

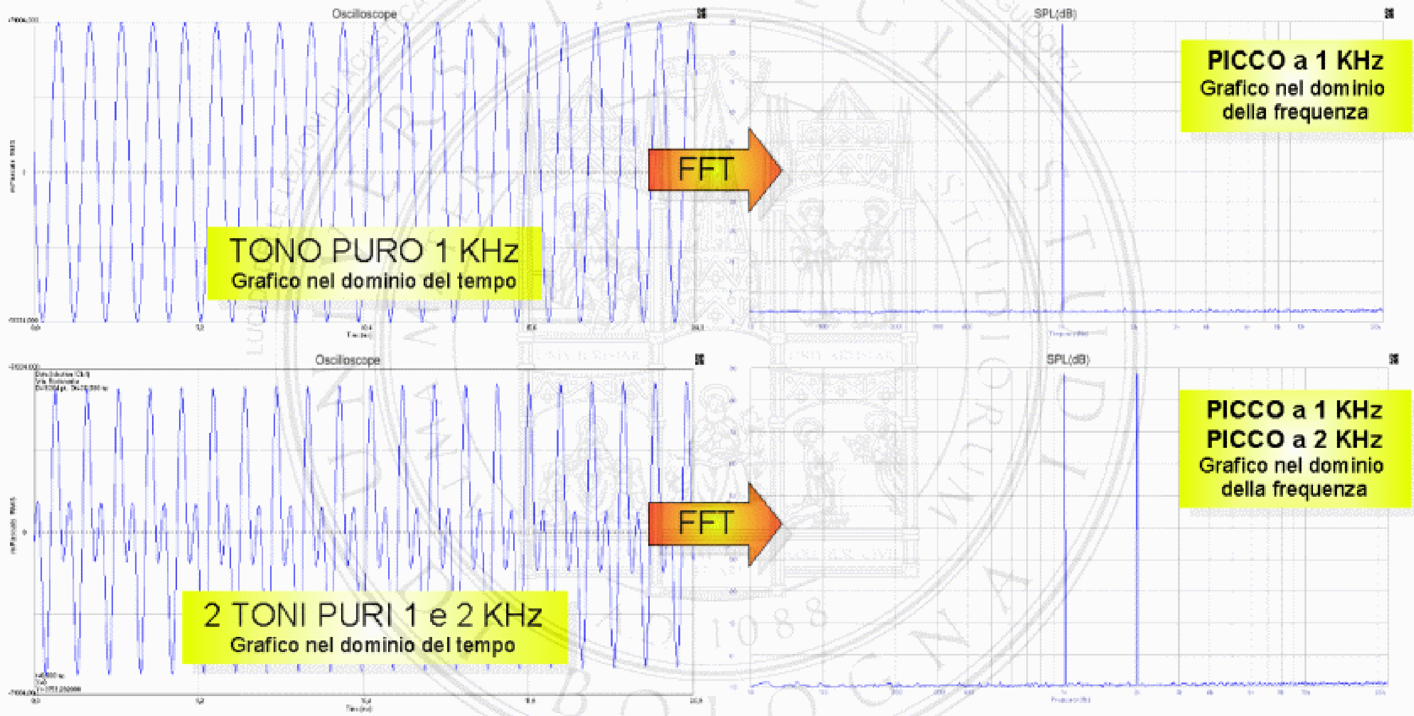
Banda No.	Centro frequenza Nominale Hz	Banda Filtro 1/3 ottava Hz	Banda Filtro 1/1 ottava Hz
1	1.25	1.12 – 1.41	
2	1.6	1.41 – 1.78	
3	2	1.78 – 2.24	1.41 – 2.82
4	2.5	2.24 – 2.82	
5	3.15	2.82 – 3.55	
6	4	3.55 – 4.47	2.82 – 5.62
27	500	447 – 562	355 – 708
28	630	562 – 708	
29	800	708 – 891	
30	1000	891 – 1120	780 – 1410
31	1250	1120 – 1410	
32	1600	1410 – 1780	
40	10 K	8910 – 11200	
41	1.25 K	11.2 – 14.1	
42	16 K	14.1 – 17.8 K	11.2 – 22.4 K
43	20 K	17.8 – 22.4 K	

Image Courtesy of Brüel & Kjær

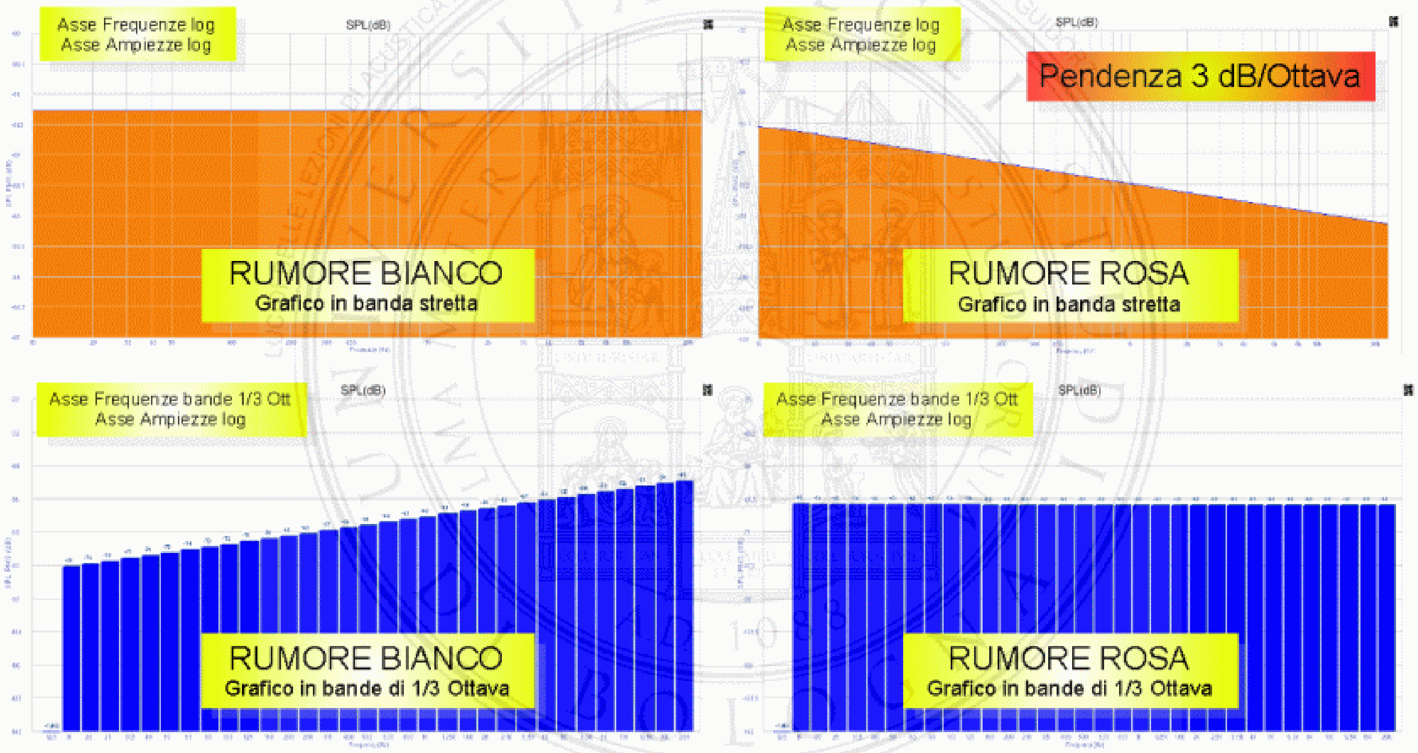
BANDE NORMALIZZATE (IEC1260) – Frequenze di centro banda (1/1, 1/2 e 1/3 di Ottava)



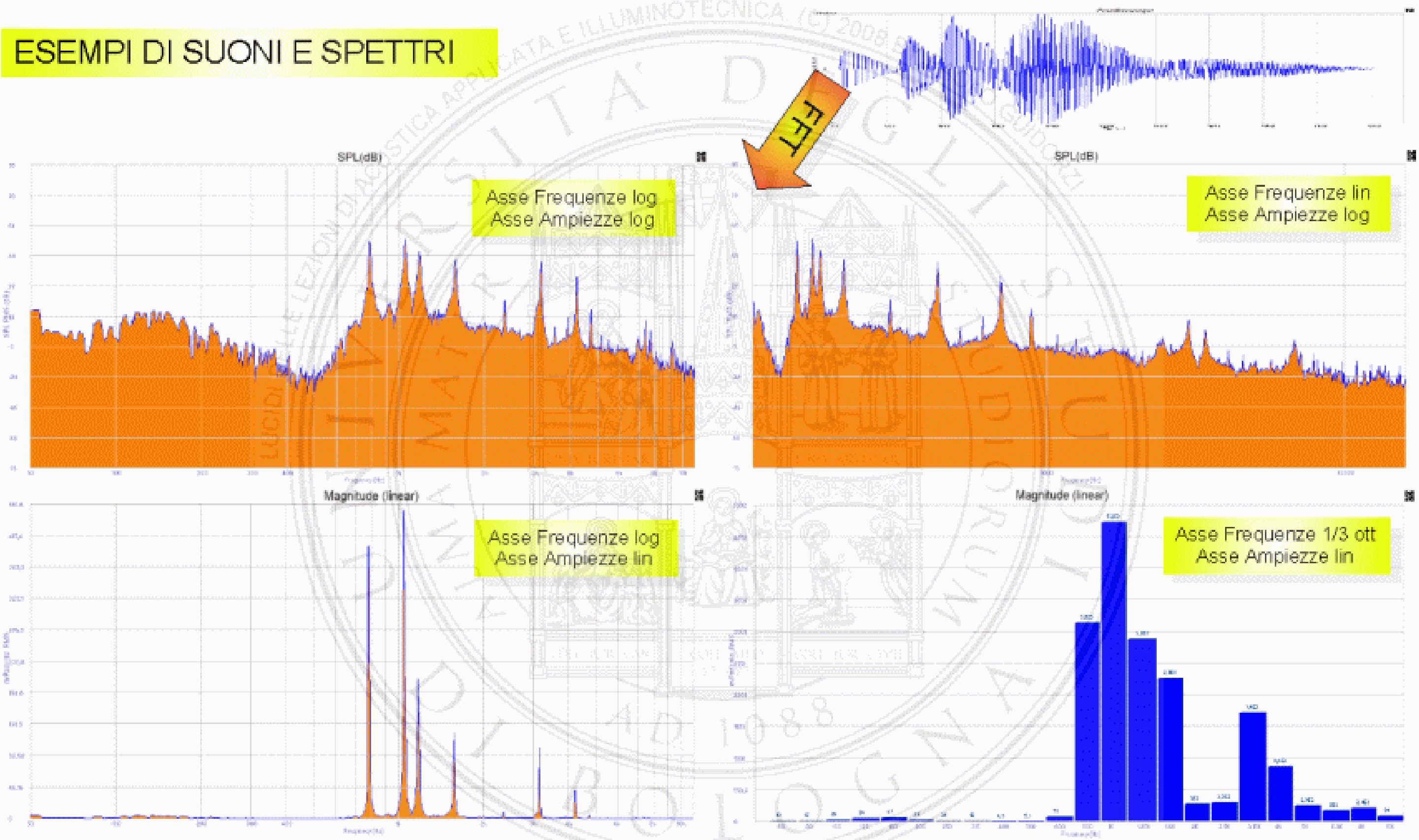
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



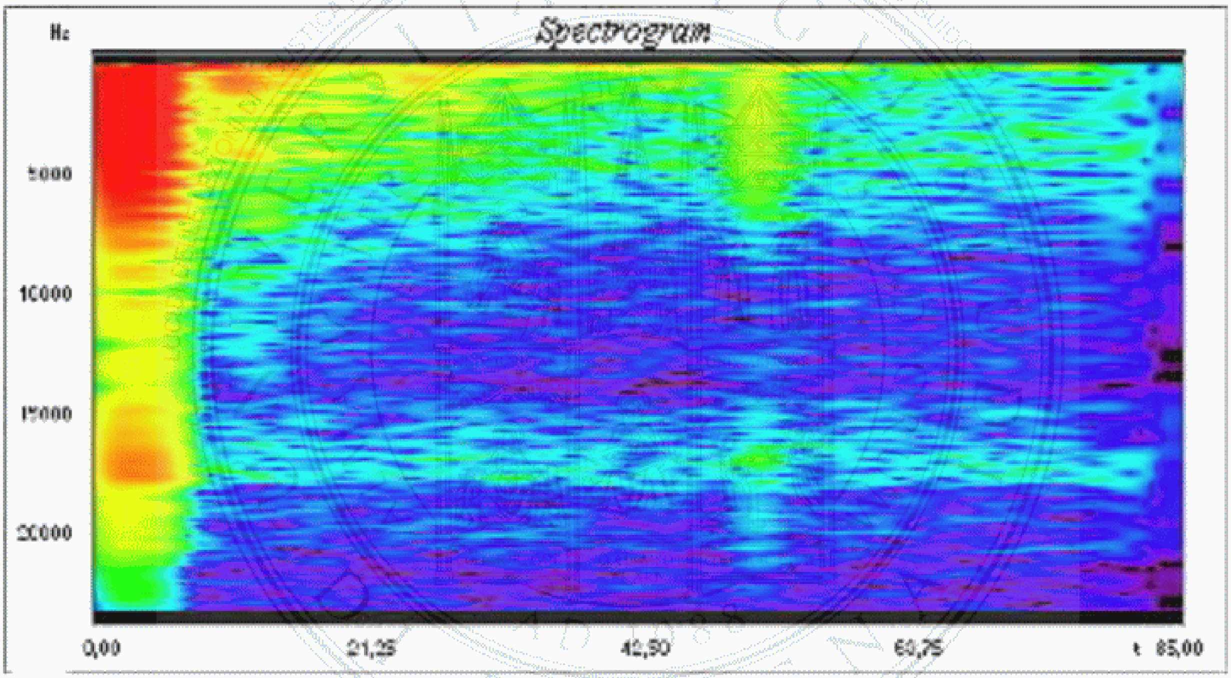
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



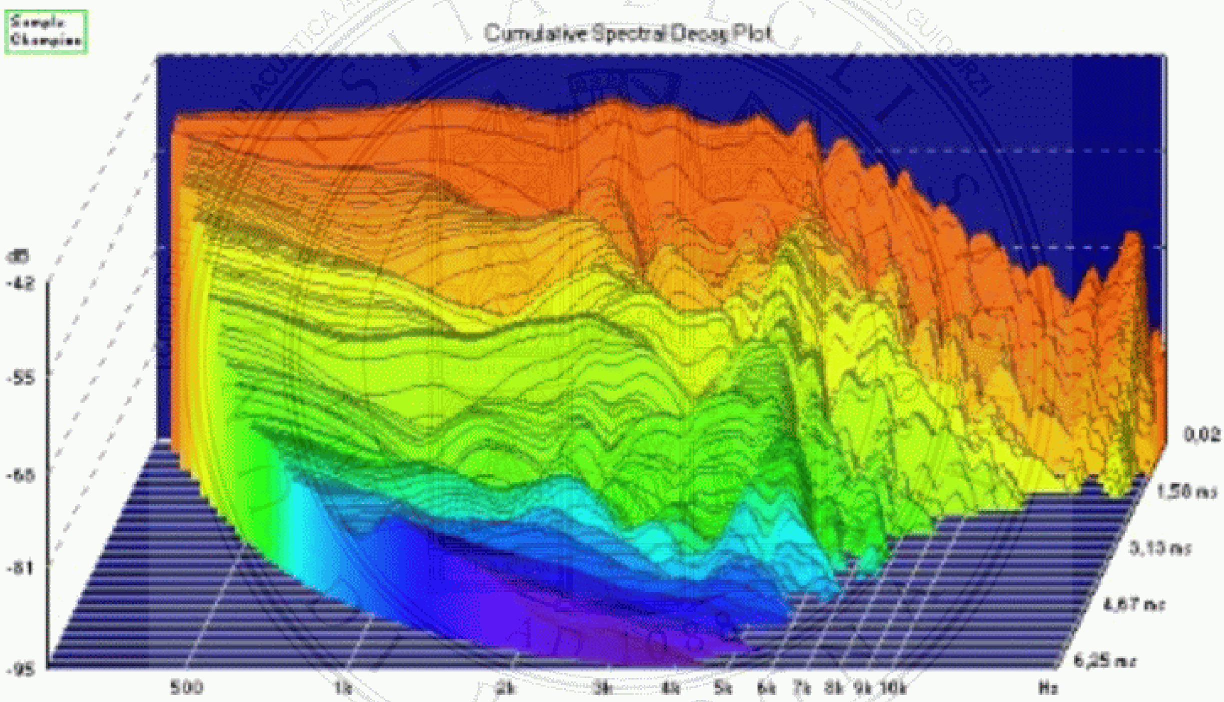
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



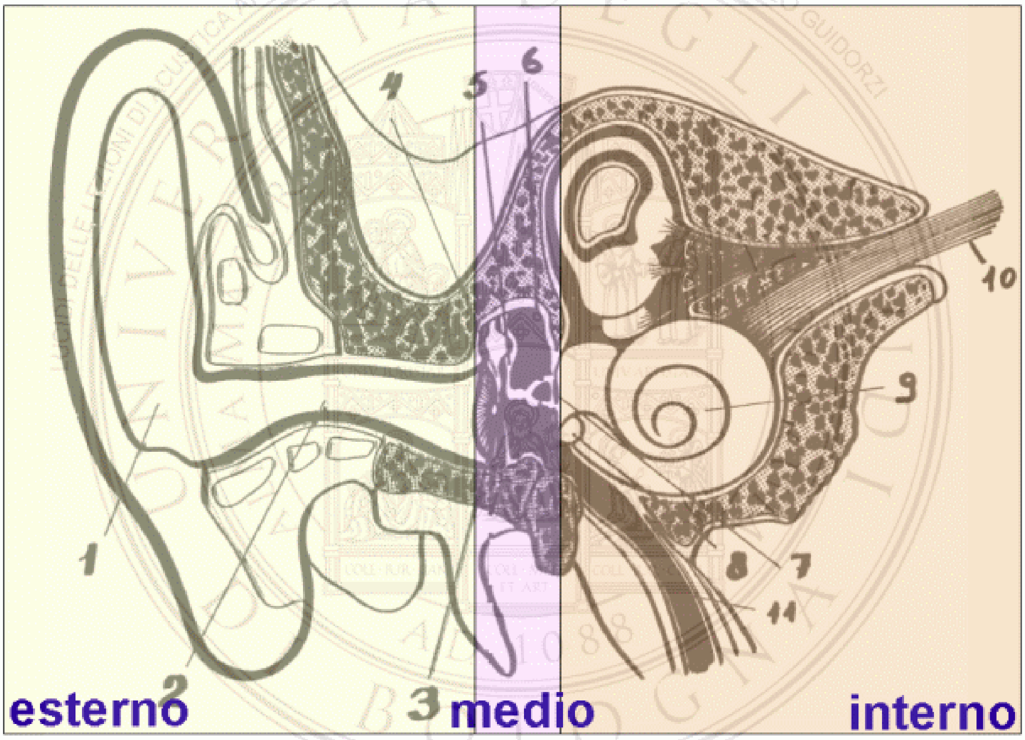
ESEMPI DI SUONI E SPETTRI

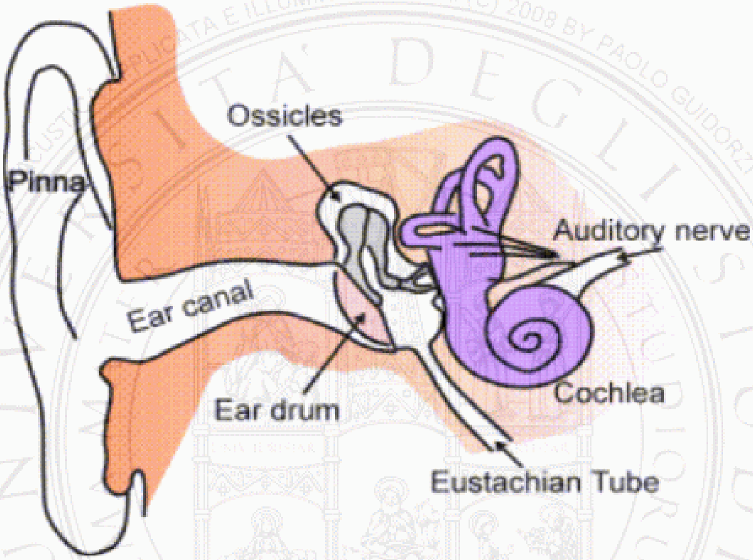


ESEMPI DI SUONI E SPETTRI



IL SISTEMA UDITIVO UMANO

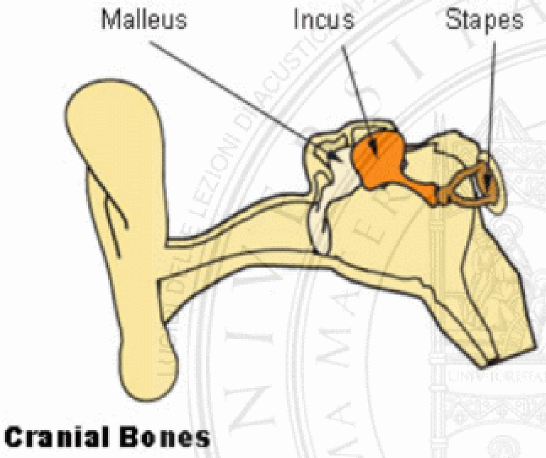


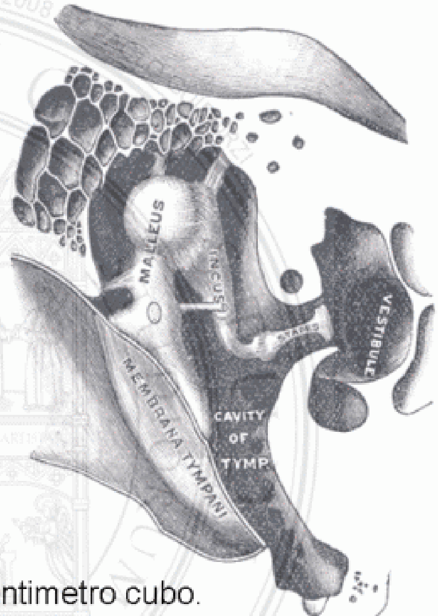


ORECCHIO ESTERNO: Il padiglione auricolare è posto all'esterno dell'orecchio, seguito dal condotto uditivo, che si conclude sulla membrana del timpano

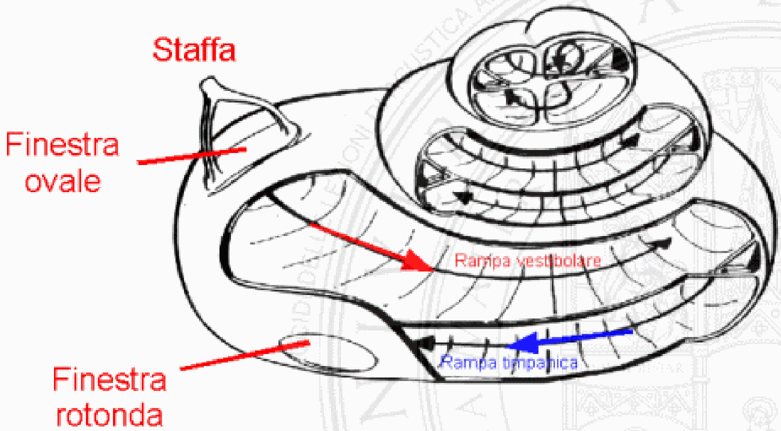
ORECCHIO MEDIO: contiene 3 ossicini (martello, incudine e staffa); è in comunicazione con naso e bocca tramite la tuba di Eustachio (riequilibrio di pressione)

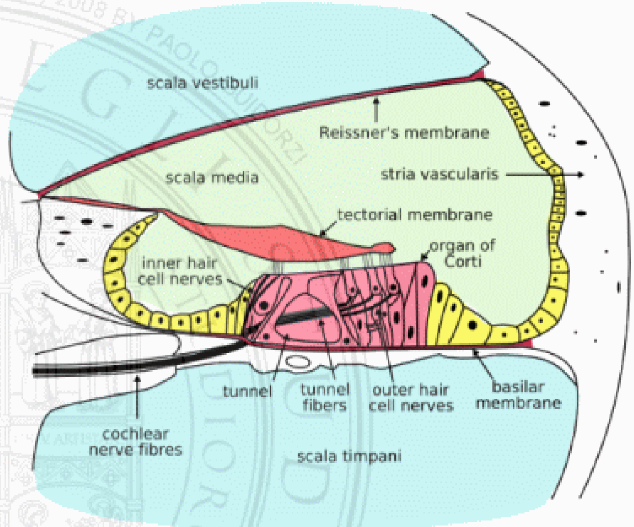
ORECCHIO INTERNO: chiocciola contenente cellule che “sentono” i suoni



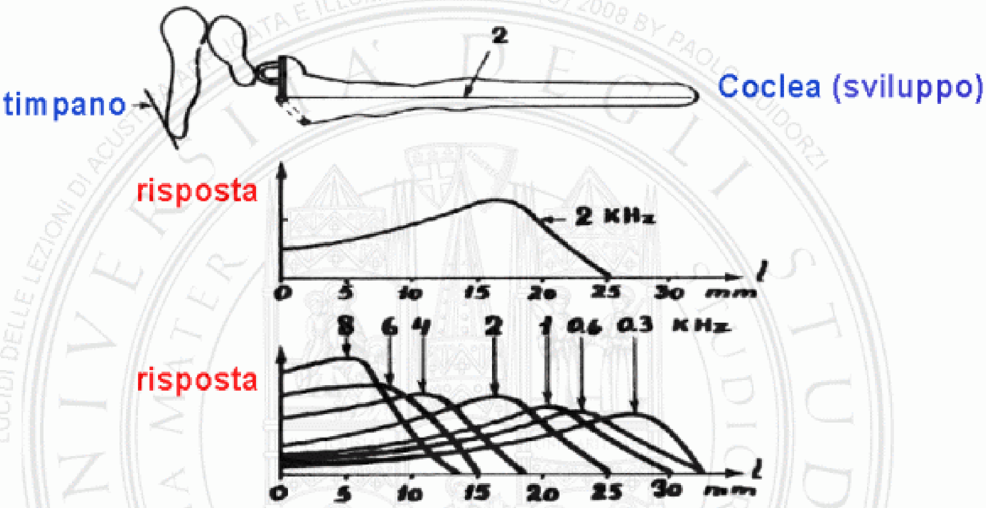


La cavità contenente i 3 ossicini ha dimensioni di circa 1 centimetro cubo.
Il martello è attaccato alla membrana timpanica, segue l'incudine e infine la staffa. Attaccato alla staffa è il muscolo stapedio. Il sistema formato dai 3 ossicini funziona come un adattatore di impedenza. Il sistema uditivo può in parte variare la sua impedenza tramite il muscolo stapedio, che irrigidisce la catena degli ossicini. Il riflesso stapediale si attiva all'arrivo di suoni superiori a 85 dB e permette di sentire meglio le basse frequenze. Fornisce solo in minima parte funzione protettiva a suoni troppo elevati. L'organo dell'udito non può proteggersi da suoni eccessivamente forti.





La staffa agisce come un pistone sulla finestra ovale, posta nella coclea (o chiocciola). La coclea è paragonabile a un piccolo tubicino attorcigliato su sé stesso e contenente un liquido simile ad acqua. In sezione è diviso in 3 parti: rampa vestibolare, rampa timpanica e condotto cocleare. La rampa vestibolare e quella timpanica sono congiunte all'estremità in modo da formare un condotto unico. Tra i due condotti, sulla membrana basilare, come in un sandwich, si trova l'organo del Corti, specificamente deputato alla funzione uditiva. Alla fine del condotto (rampa timpanica) è presente la finestra rotonda, una membrana elastica che serve a equilibrare le spinte sulla finestra ovale.



Lungo tutta l'estensione dell'organo del Corti sono presenti molte migliaia di cellule ciliate. Quando la staffa vibra in seguito a un suono, un'onda si propaga lungo la rampa vestibolare, proseguendo verso la rampa timpanica. Anche le cellule poste sulla membrana basilare sono poste in oscillazione. L'energia meccanica viene quindi trasformata in energia chimica e quindi elettrica (dell'ordine di 80 microV), raccolta dal nervo acustico. Le cellule ciliate poste nella coclea reagiscono in modo diverso alle varie frequenze a seconda della loro posizione. Vicino all'ingresso della coclea le cellule ciliate reagiscono alle frequenze acute, mentre verso l'apice le cellule "sentono" le frequenze basse. In pratica ogni cellula ciliata è sensibile a una determinata frequenza e l'orecchio effettua un'**analisi in frequenza** in tempo reale. Anche i suoni sono memorizzati dal cervello frequenza per frequenza.

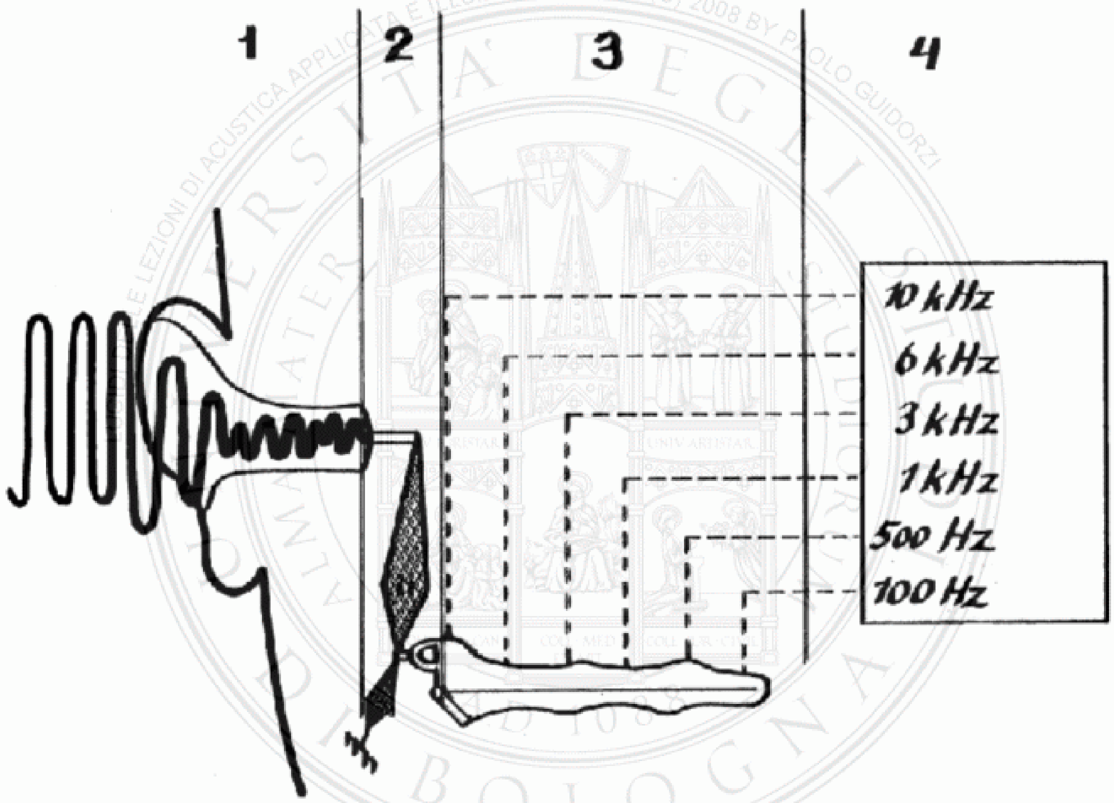


Image Courtesy of Brüel & Kjær

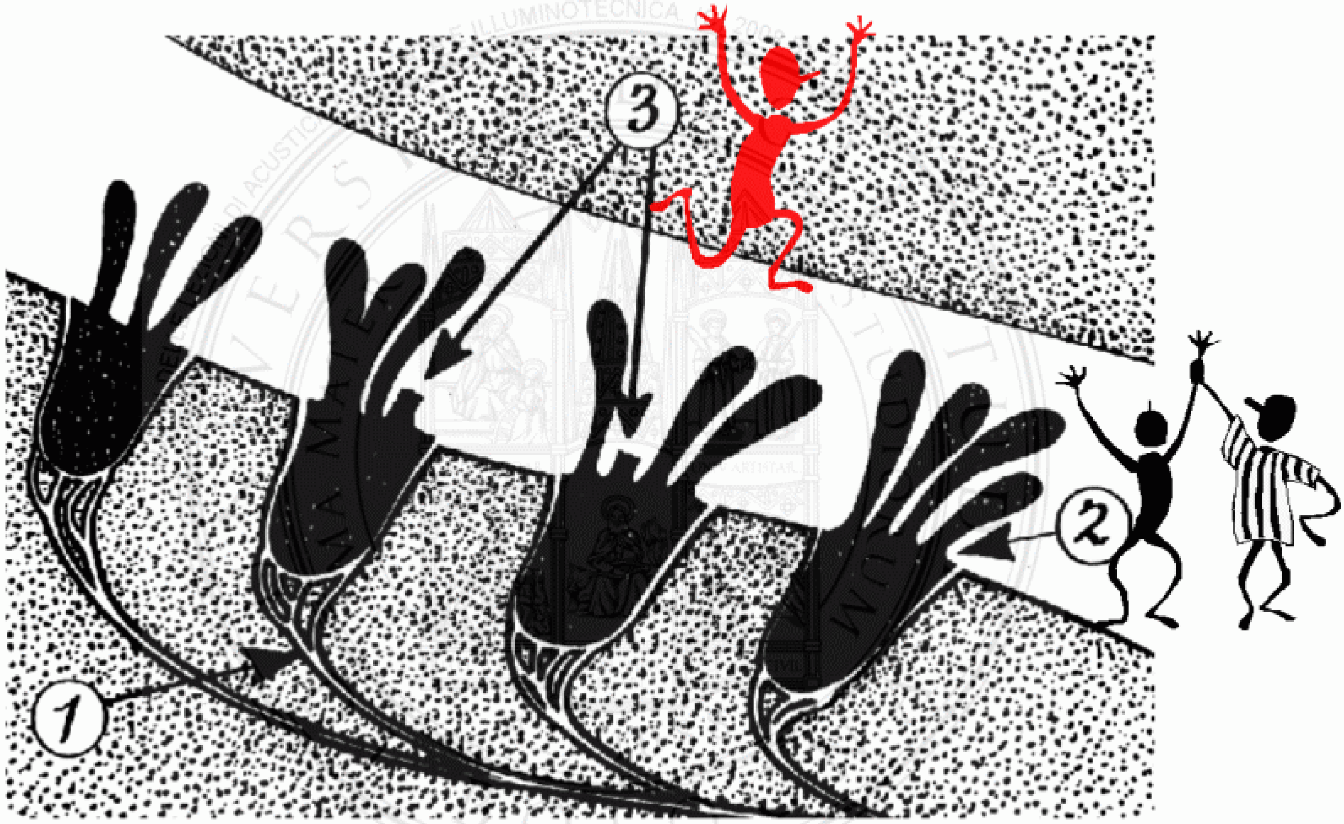


Image Courtesy of Brüel & Kjær

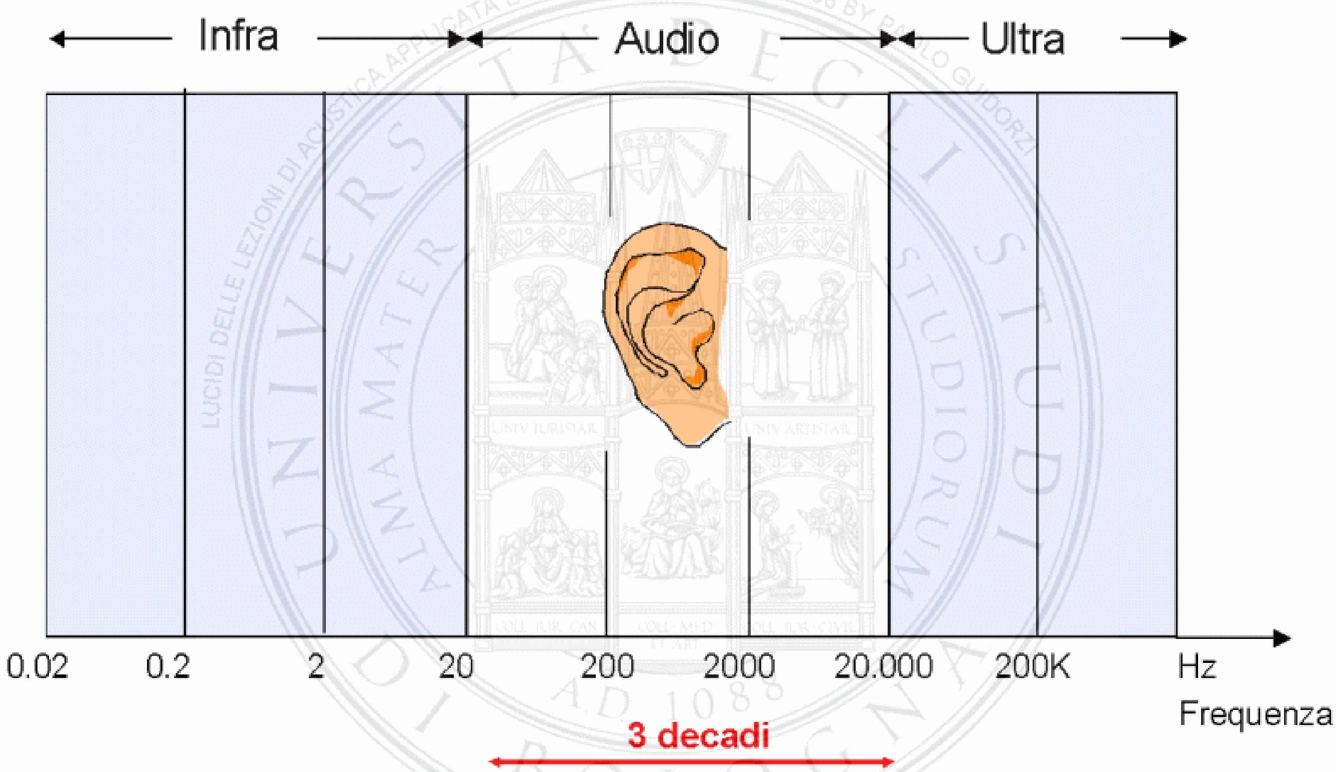
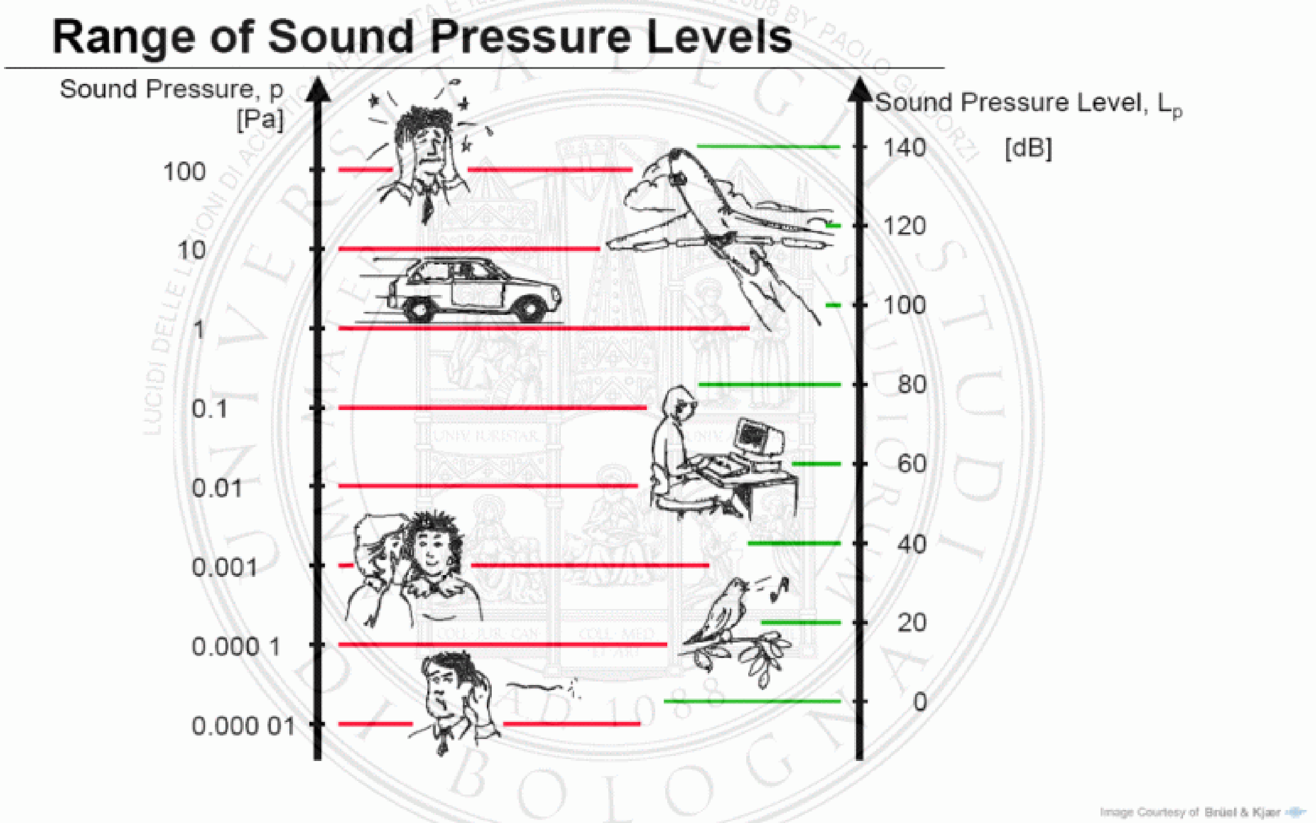
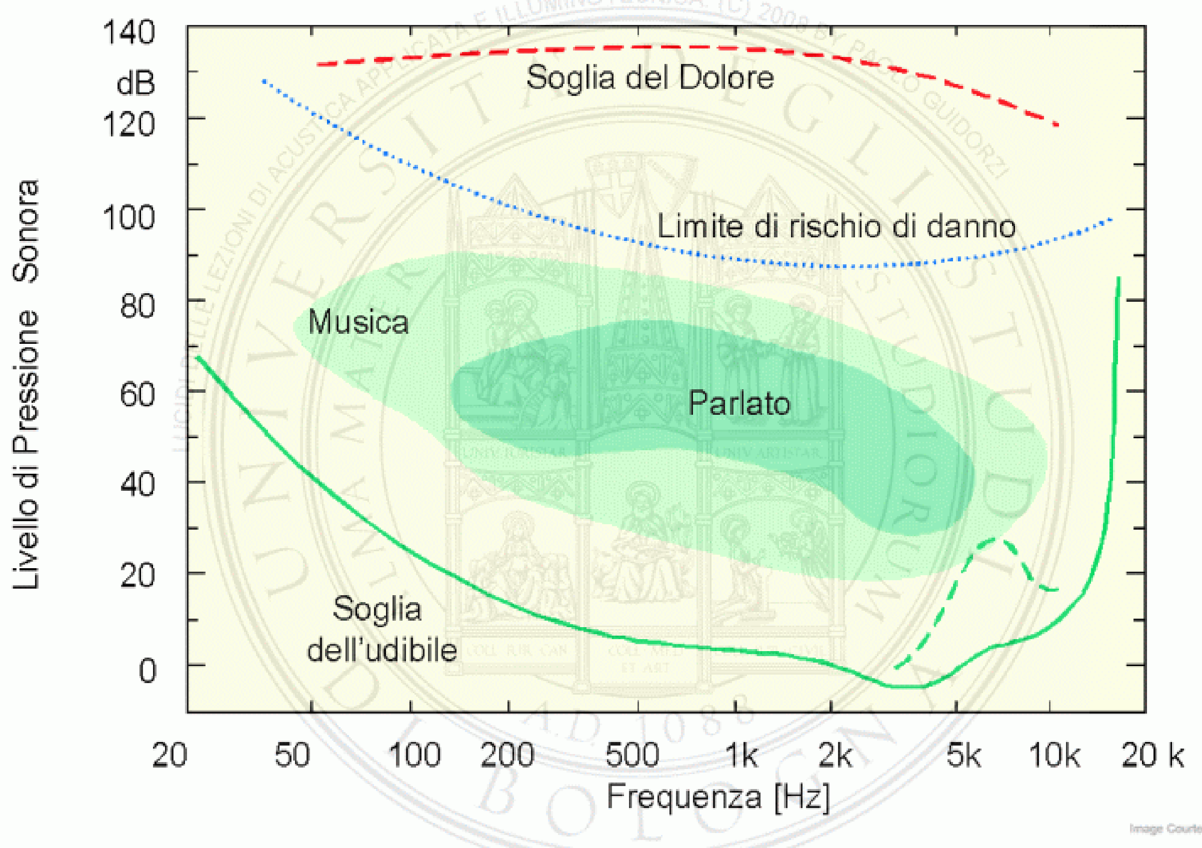


Image Courtesy of Brüel & Kjær

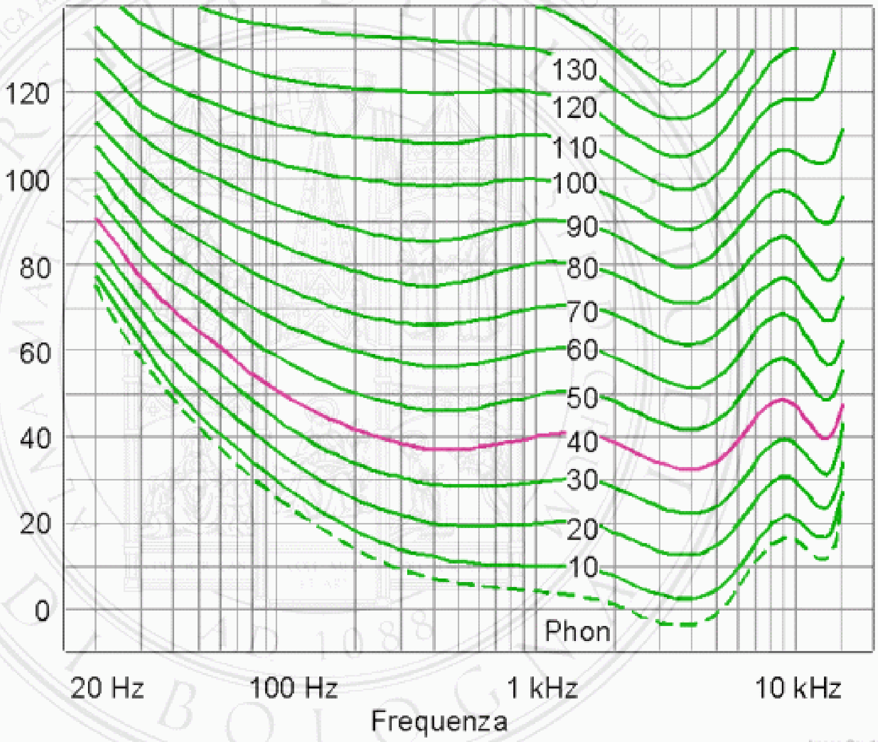

Range of Sound Pressure Levels
Sound Pressure, p [Pa]
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.000 1
0.000 01
Sound Pressure Level, L_p
[dB]
140
120
100
80
60
40
20
0
Image Courtesy of Brüel & Kjær


140
dB
120
100
80
60
40
20
0
Livello di Pressione Sonora
Soglia del Dolore
Limite di rischio di danno
Musica
Parlato
Soglia dell'udibile
20
50
100
200
500
1k
2k
5k
10k
20 k
Frequenza [Hz]
Image Courtesy of Brüel & Kjær

CURVE ISOFONICHE

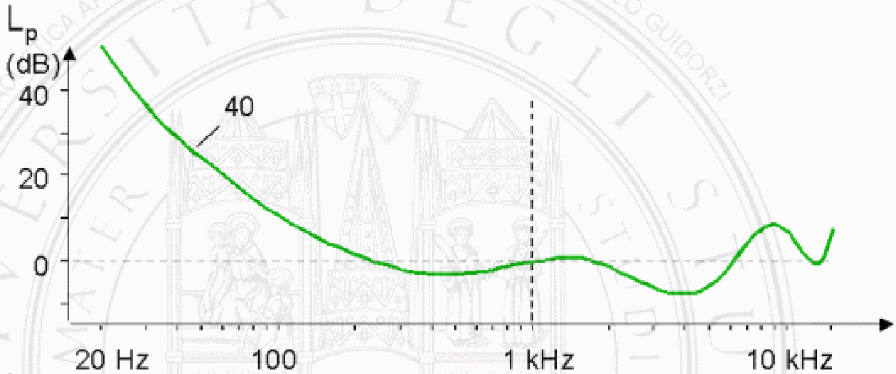
Norma ISO 226/1987: curve isofoniche

Livello di Pressione Sonora, L_p (dB re 20 μPa)

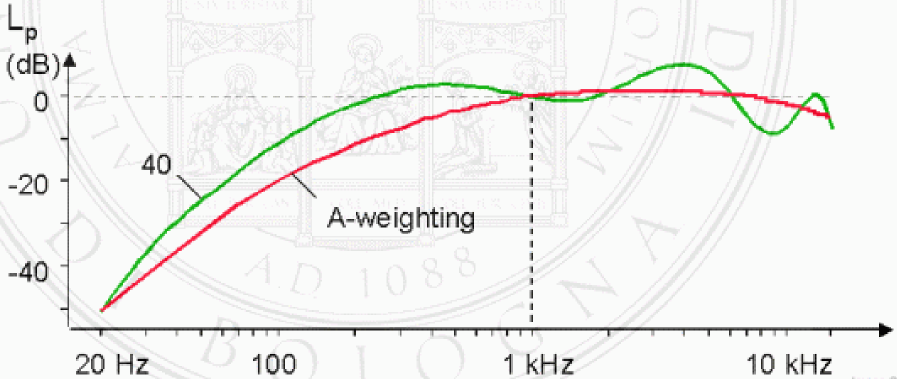


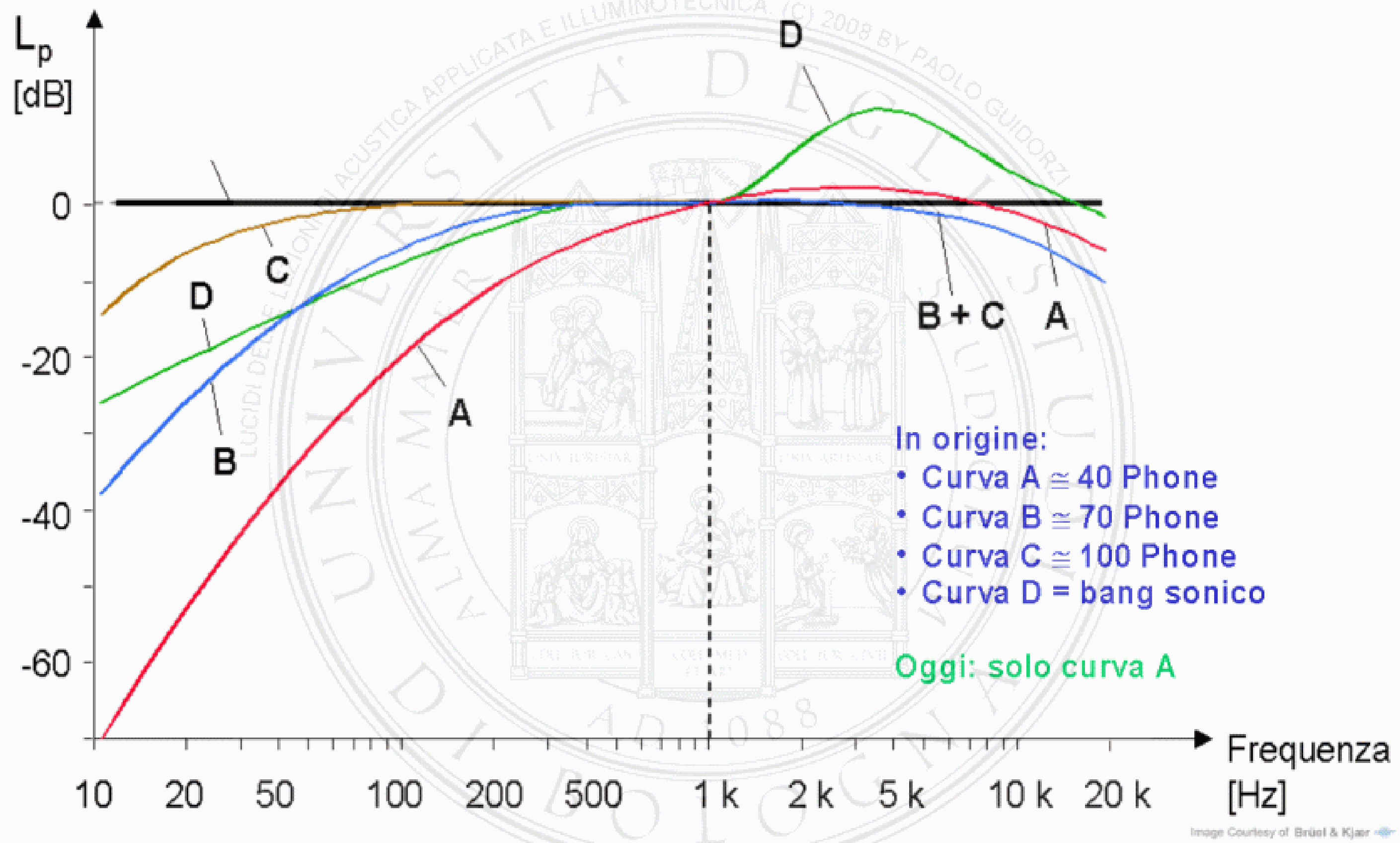
CURVE ISOFONICHE – PESATURA "A"

- Isofonica 40 dB normalizzata a 0 dB a 1kHz



- Isofonica 40 dB Invertita confrontata con la curva A di ponderazione in frequenza





CURVE ISOFONICHE – PESATURA "A"

I filtri di ponderazione si sono resi necessari per **adattare** la risposta lineare, in ampiezza ed in frequenza, della strumentazione di misura alla risposta non lineare del sistema uditivo umano per ottenere una misura fisica confrontabile con la **sensazione** sonora evocata dal fenomeno acustico.

In origine sono stati definiti tre filtri di ponderazione:

- Filtro A: da impiegarsi all'intorno di 40 Phone
- Filtro B: da impiegarsi all'intorno di 70 Phone
- Filtro C: da impiegarsi all'intorno di 100 Phone

In seguito alla confusione dovuta all'indeterminatezza dell'uso dei vari filtri di ponderazione e alla conseguente difficoltà di confronto dei dati è stato deciso di adottare solo il **filtro di ponderazione A**

Tutti i valori in dB determinati con l'impiego del filtro A devono riportare, dopo il termine dB, la lettera (A).

CURVE ISOFONICHE – COEFFICIENTI PER LA PESATURA "A"

Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
20	-50,5
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	-19,1
125	-16,1
160	-13,4
200	-10,9
250	-8,6
315	-6,6
400	-4,8
500	-3,2
630	-1,9

Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

PESATURA E FILTRI NEL FONOMETRO

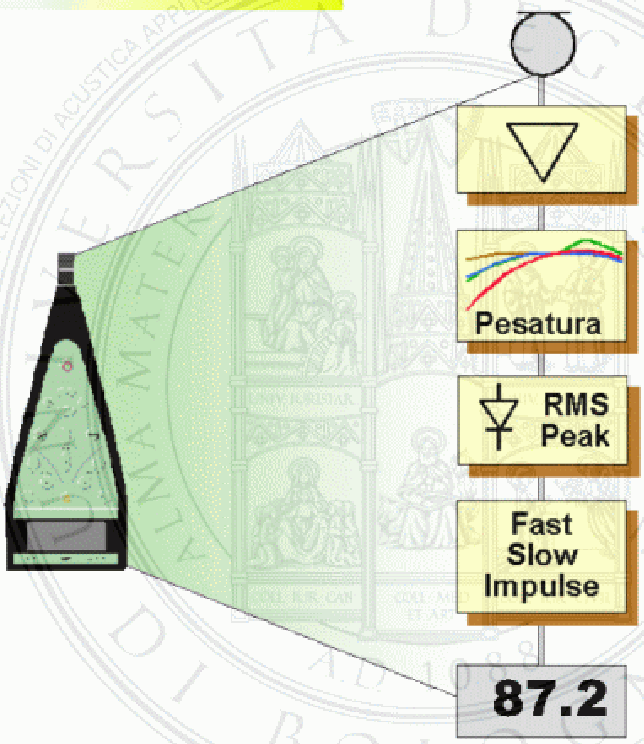


Image Courtesy of Brüel & Kjær

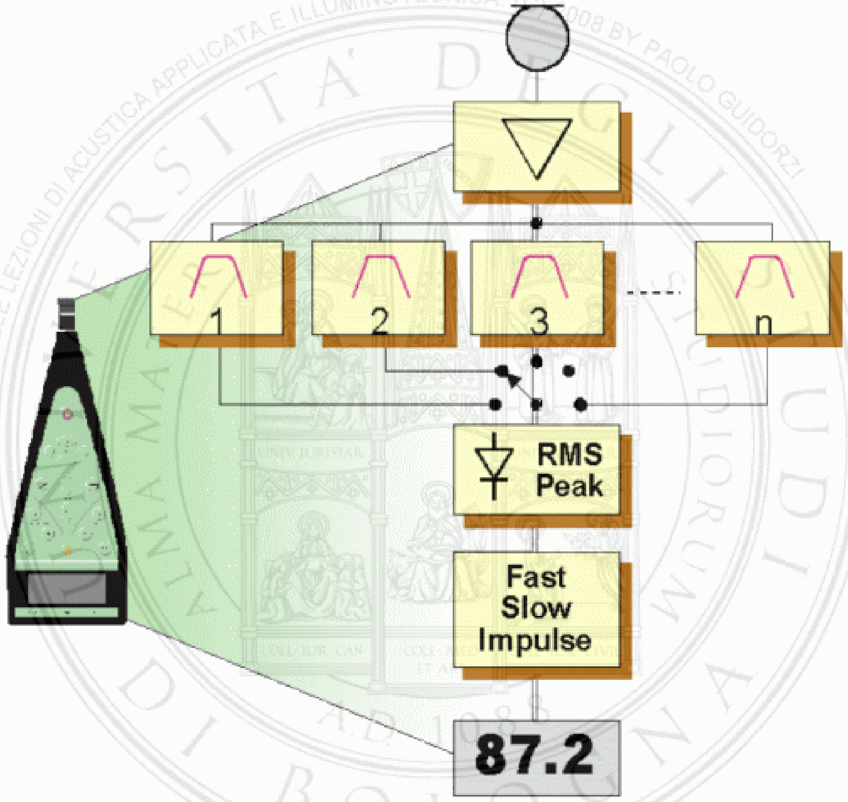


Image Courtesy of Brüel & Kjær

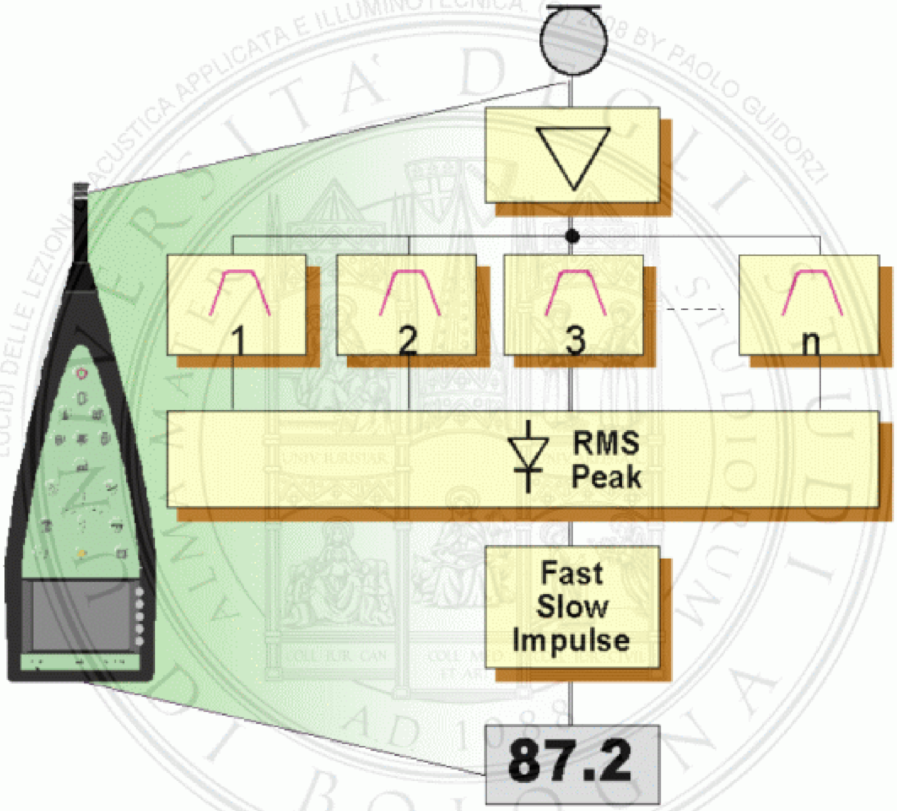


Image Courtesy of Brüel & Kjær

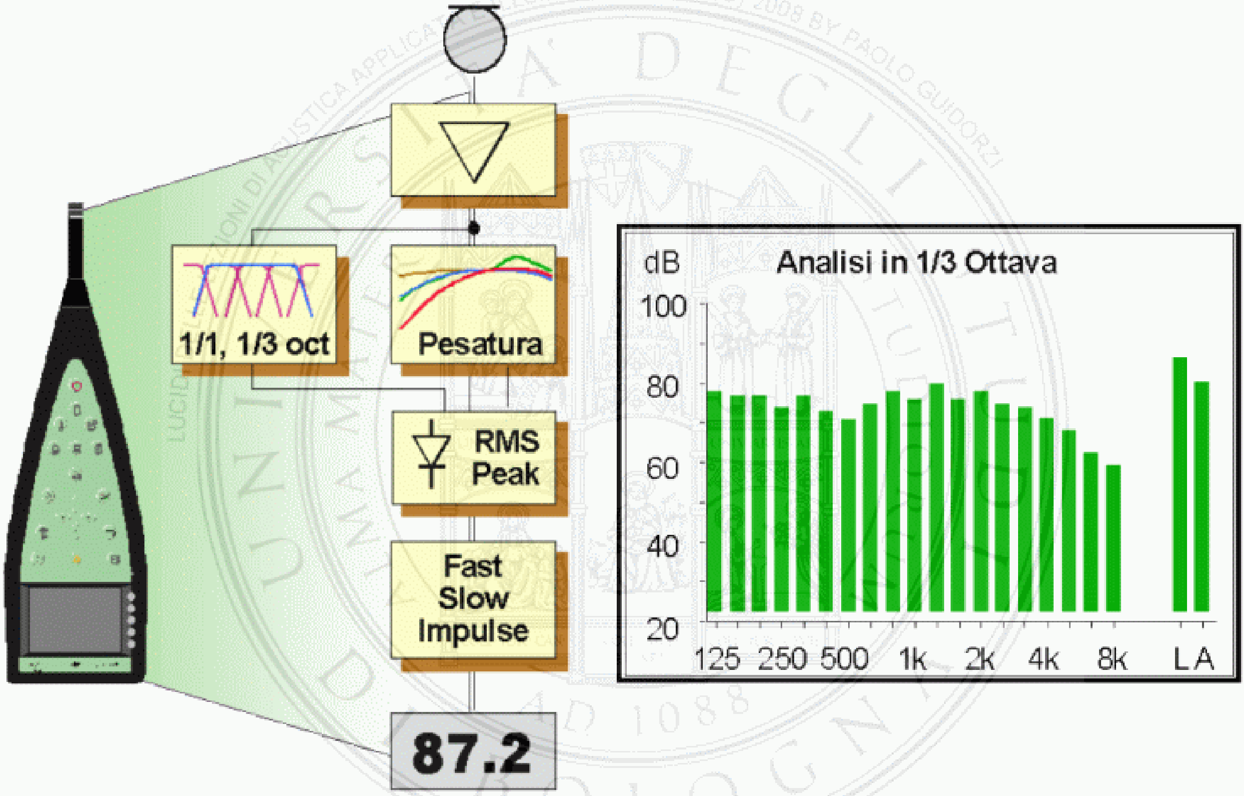
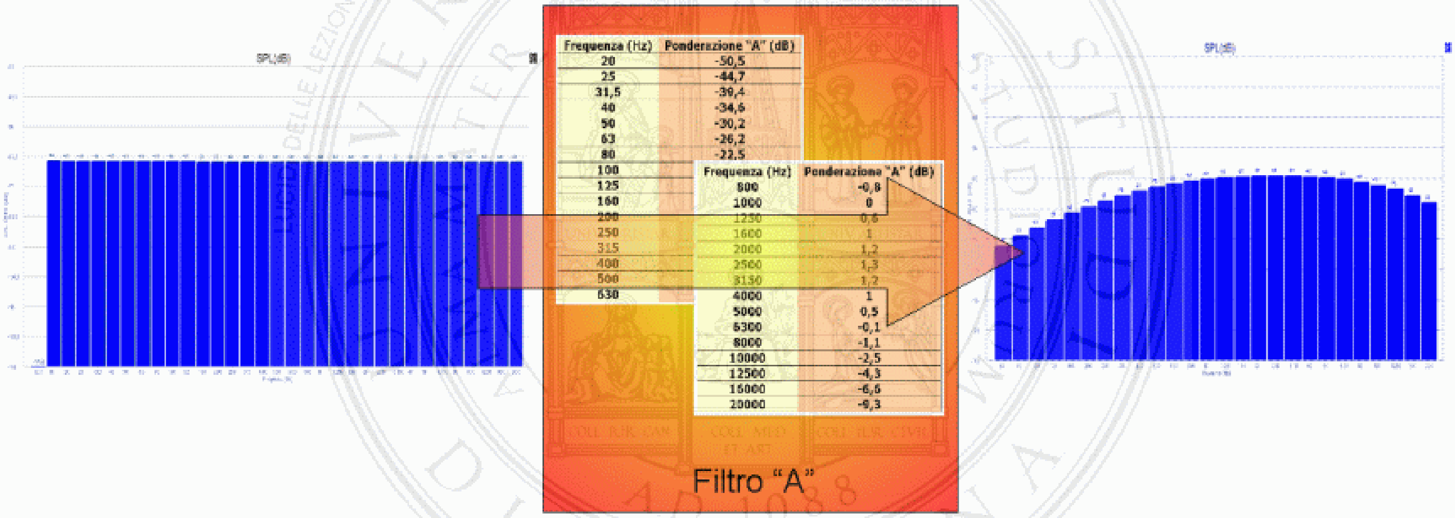


Image Courtesy of Brüel & Kjær

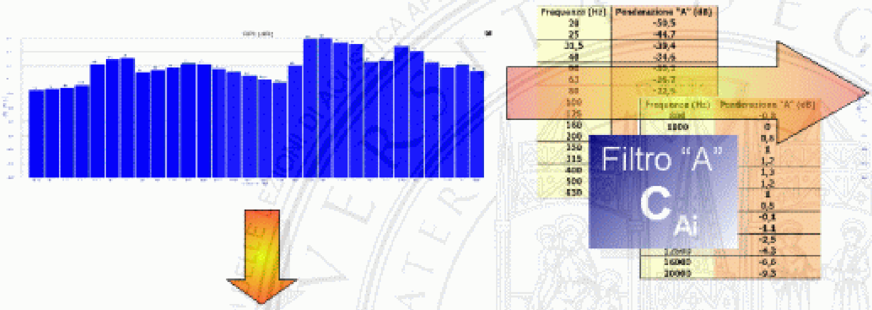
ANALISI IN FREQUENZA – Pesatura “A” di uno spettro in bande di 1/3 di Ottava



Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
20	-50,5
25	-44,7
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	
125	
160	
200	
250	
315	
400	
500	
630	

Frequenza (Hz)	Ponderazione "A" (dB)
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

LIVELLO SONORO GLOBALE LINEARE E PONDERATO "A"



Livello sonoro globale lineare

$$L_{Lin} = 10\log_{10}\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}} \qquad \text{dB}$$

n : numero di bande

L_i: Livello in dB nella i-esima banda

Livello sonoro globale ponderato "A"

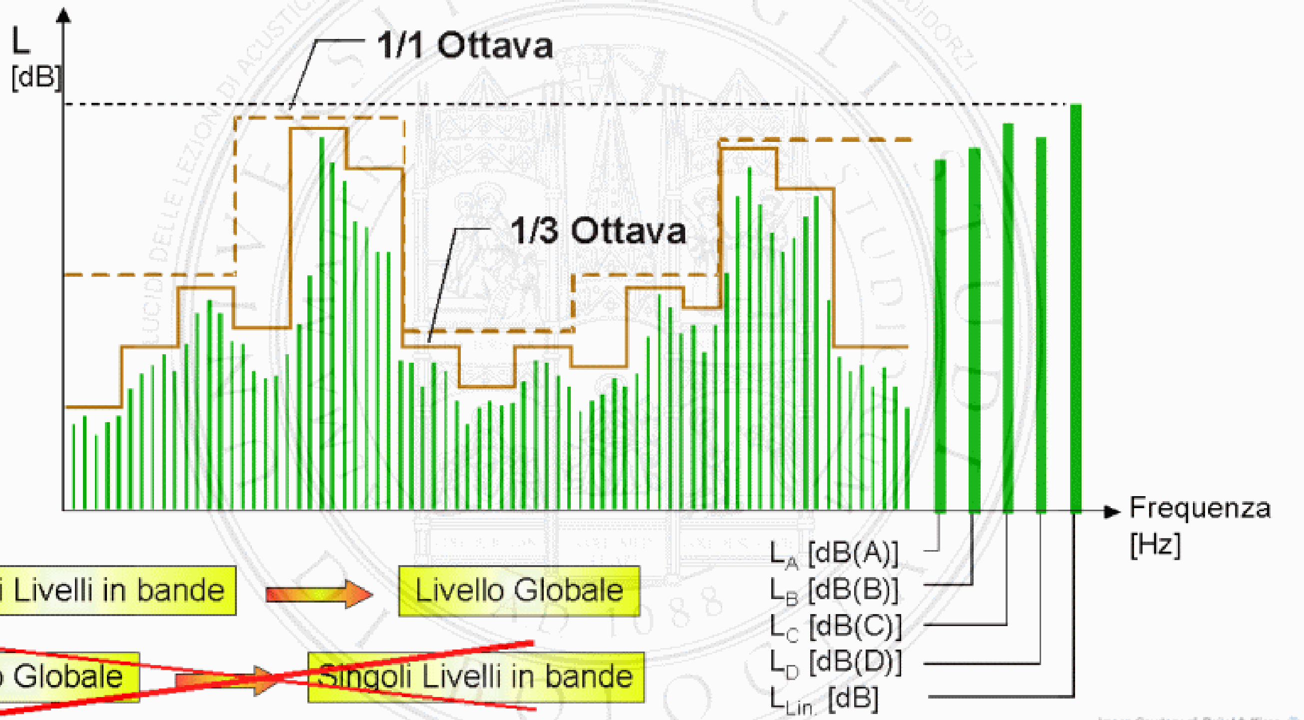
$$L_A = 10\log_{10}\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i + C_{Ai}}{10}} \qquad \text{dB(A)}$$

n : numero di bande

L_i : Livello in dB nella i-esima banda

C_{Ai} : Ponderazione "A" per il livello della i-esima banda

SPETTRO IN BANDE E LIVELLO GLOBALE



Singoli Livelli in bande → Livello Globale

~~Livello Globale → Singoli Livelli in bande~~

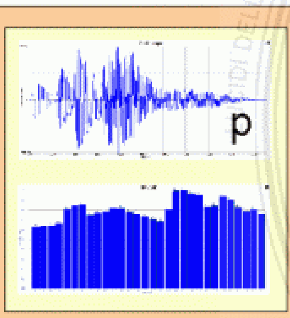
LIVELLO EQUIVALENTE PONDERATO "A"

Livello equivalente

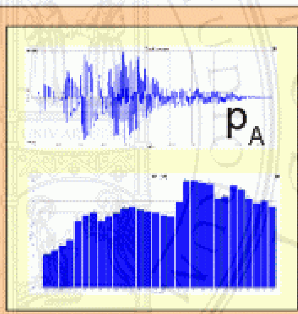
$$L_{eq,T} = 10\log_{10}\left\{\frac{1}{T}\int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^2 dt\right\} \quad \text{dB}$$

p: valori di pressione "lineari"

Livello equivalente ponderato "A"



Filtro "A"



$$L_{Aeq,T} = 10\log_{10}\left\{\frac{1}{T}\int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0}\right)^2 dt\right\} \quad \text{dB(A)}$$

p_A: valori di pressione ponderati "A"