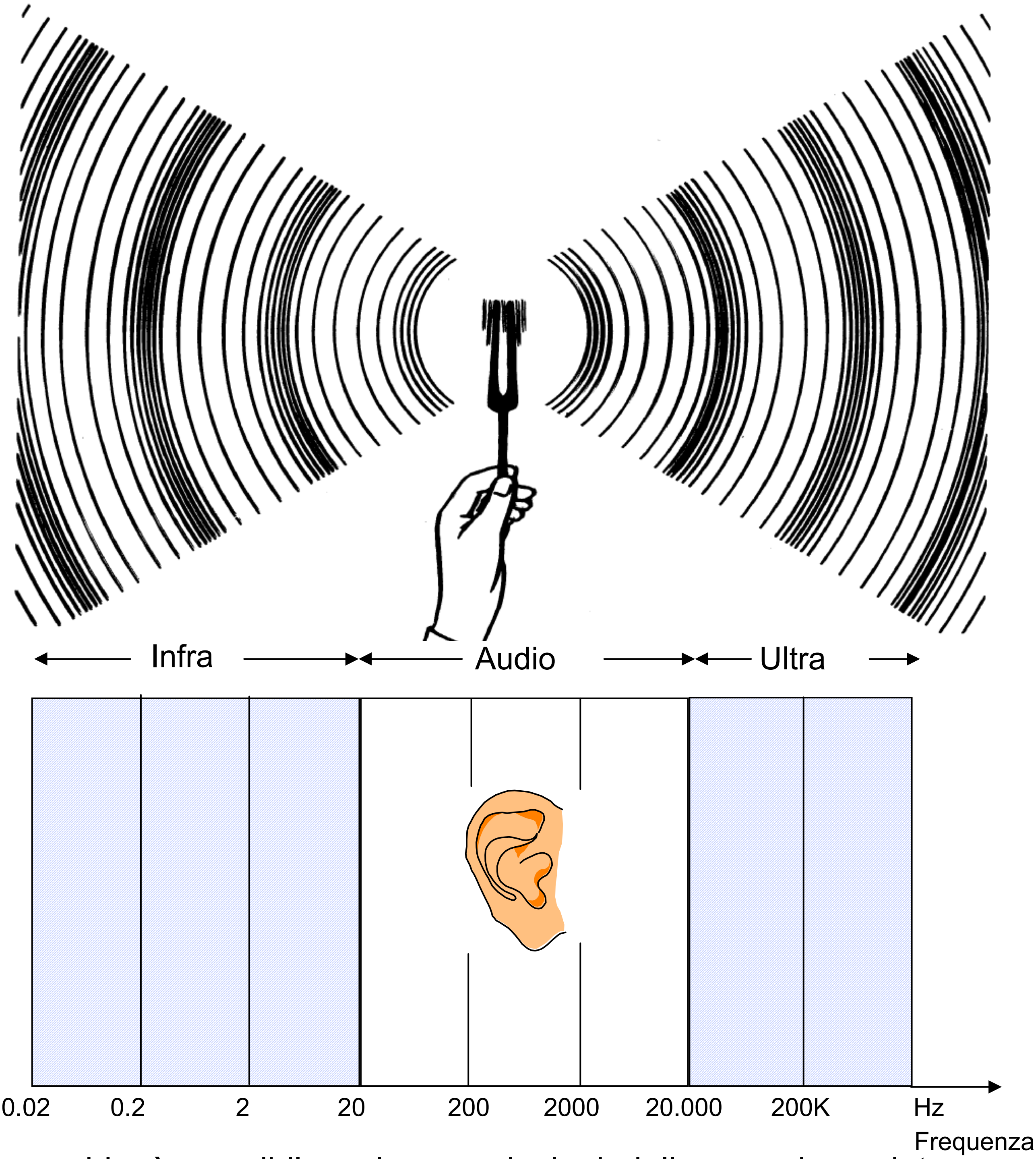
ACUSTICA PSICOFISICA

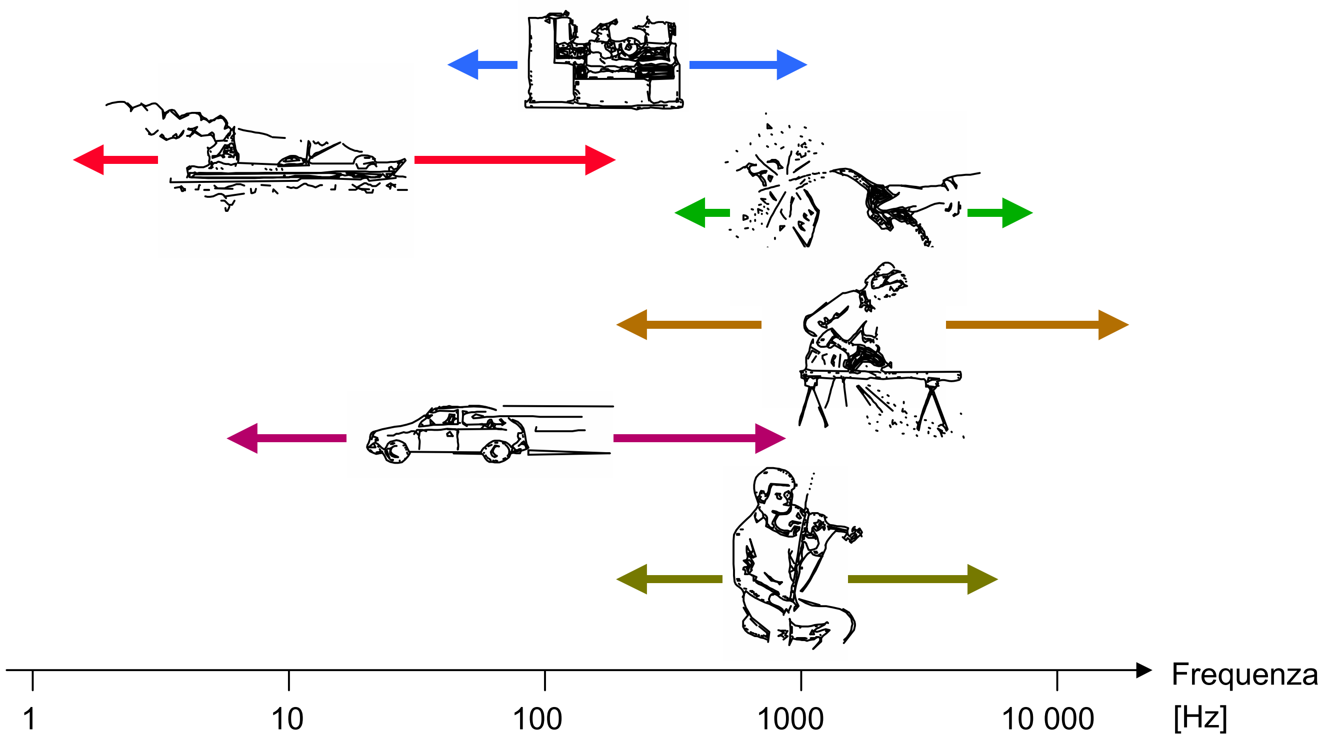
La FREQUENZA del suono

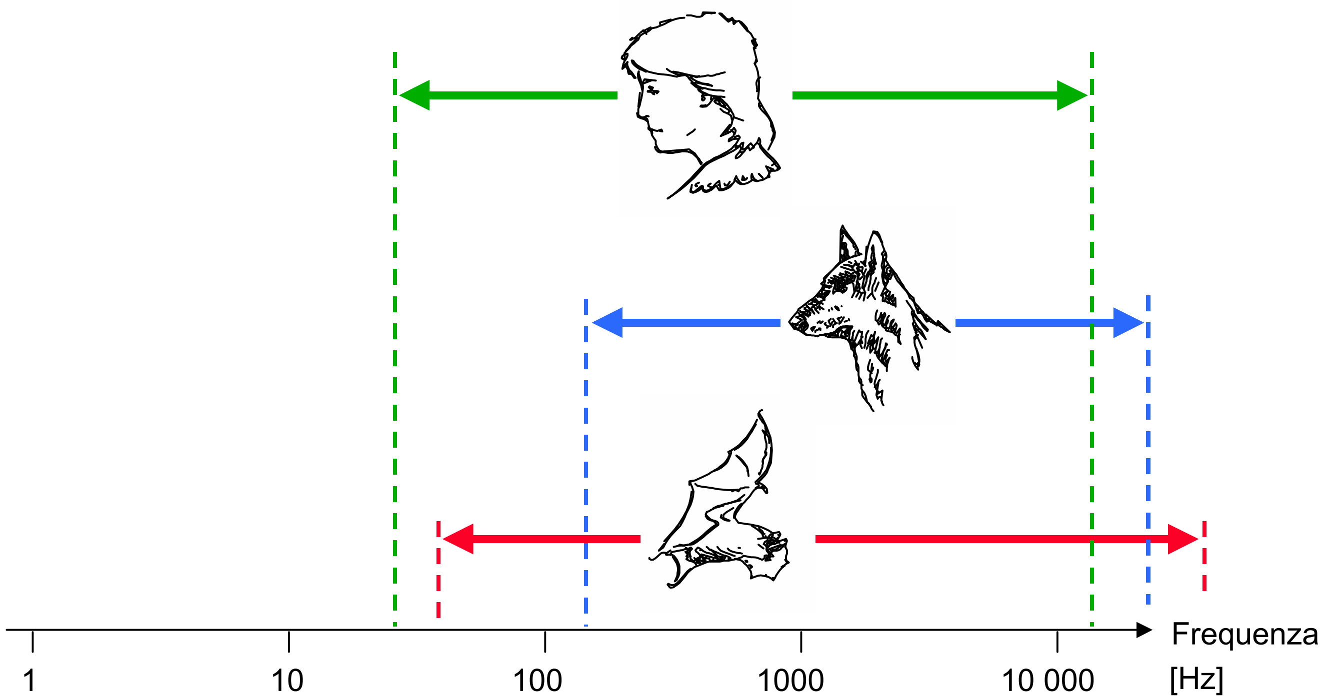


L'orecchio è sensibile solo a variazioni della pressione, intorno a quella media atmosferica, caratterizzate da oscillazioni aventi frequenza (cicli dell'oscillazione al secondo):

20 Hz < suono udibile < 20 kHz

infrasuoni ultrasuoni

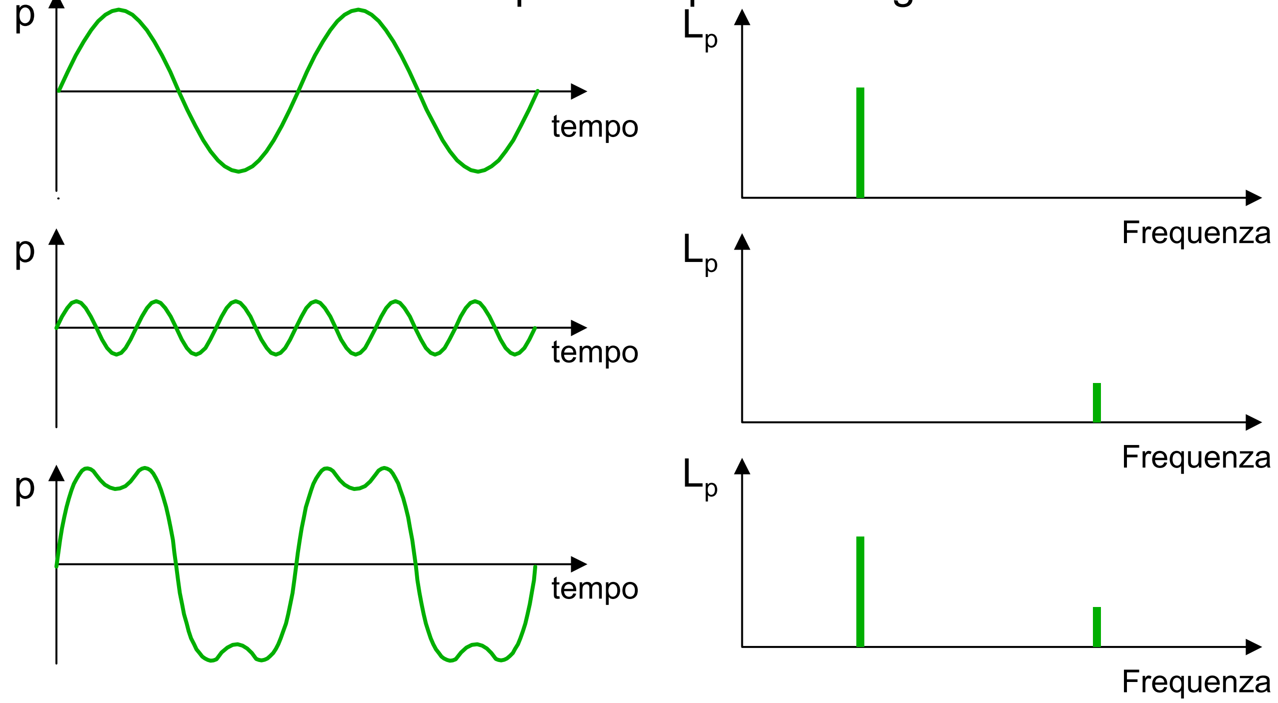

Frequenza
[Hz]
1
10
100
1000
10 000

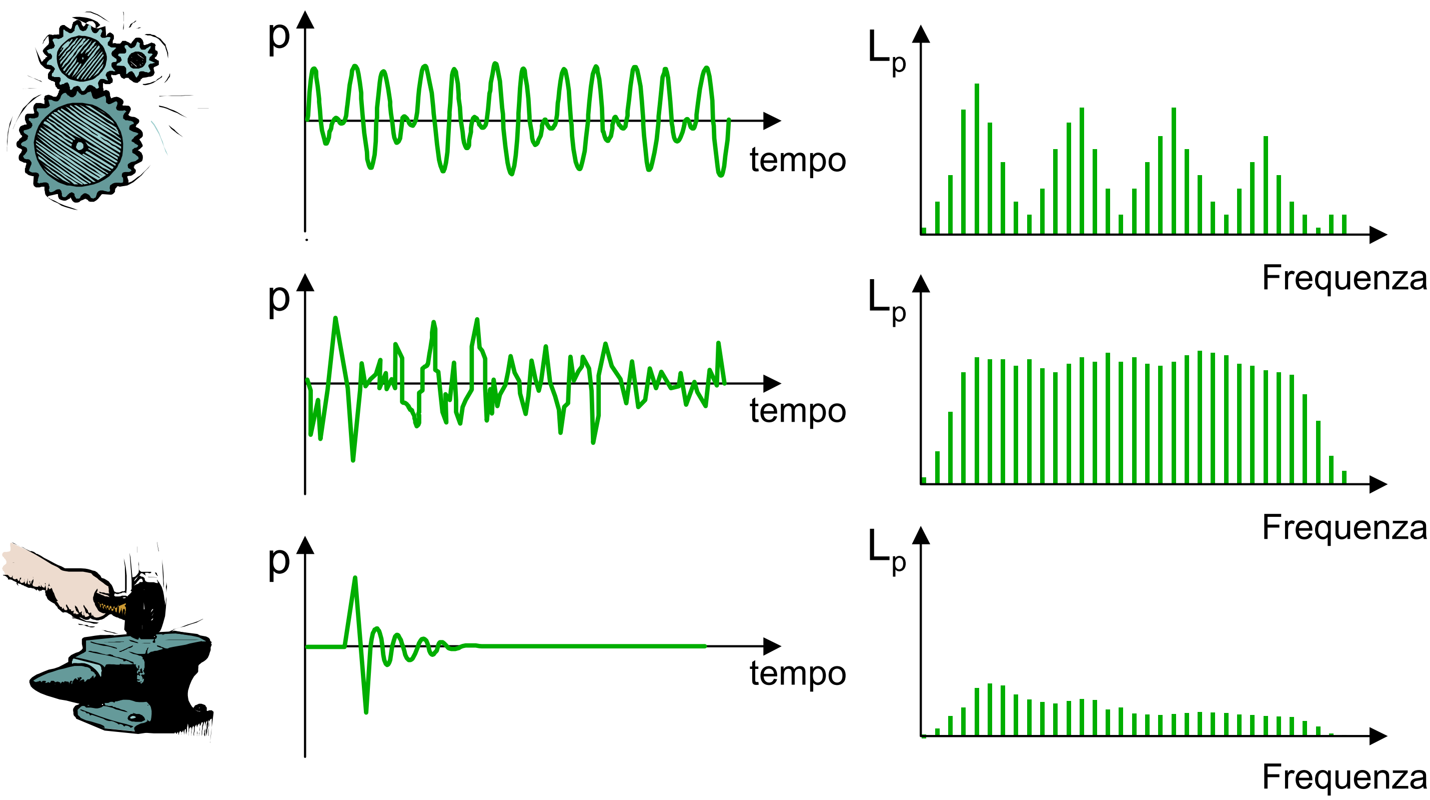

Frequenza
[Hz]
1
10
100
1000
10 000

Lo spettro di frequenza nei suoni puri e suoni complessi

Si dicono ***suoni puri*** o toni puri i suoni caratterizzati da un onda di una sola frequenza. Se si considera il loro "spettro" di frequenze si ha una sola riga in corrispondenza appunto di tale frequenza.

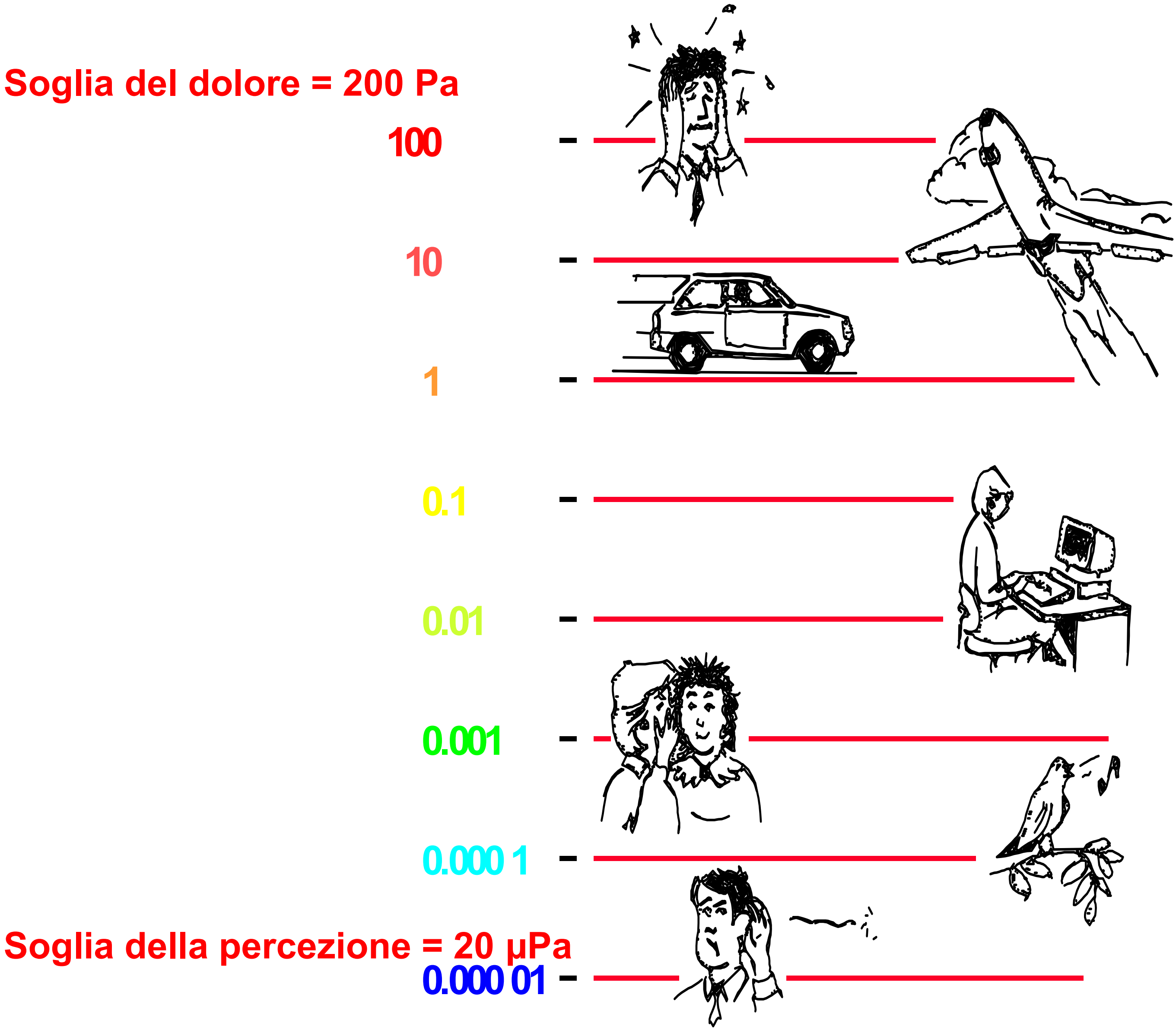
Suoni complessi sono invece quelli il cui spettro comprende molte componenti pure. Se le componenti sono così numerose da costituire praticamente un continuo si parla di spettro a larga banda.





Intervallo udibile di pressione sonora

Sperimentalmente si riscontrano valori ***dell'intervallo udibile*** che vanno da ***20* μPa** (livello minimo percettibile dall'orecchio umano) a ***100* Pa** (soglia del dolore)



Utilizzando una scala lineare per la misura della pressione acustica e l'unità di misura [Pa] nascono due problemi:

- necessità di numeri con almeno 6 cifre, interi o decimali a seconda che si usi il μPa o il Pa;

- cattiva correlazione della grandezza fisica (causa) con la sensazione (effetto), poiché la risposta dell'orecchio umano al suono, è di tipo logaritmico.

Le verifiche sperimentali di Weber e Fechner mostrano che:
la sensazione è proporzionale a ***log(J/J$_S$)*** dove ***J*** è una grandezza che misura la causa fisica che agisce sull'organo dell'udito e genera la sensazione mentre ***J_S*** è l'ampiezza di soglia sotto la quale la sensazione diventa nulla.
Per tale motivo si ottiene una corrispondenza di proporzionalità tra la grandezza fisica ***J*** e la misura della percezione dell'Uomo esprimendo il valore di ***J*** in termini di ***Livello*** (misurato con l'unità **decibel**) definito tramite una trasformazione logaritmica:

$$L_J = 10\, log\left(\frac{J}{J_0}\right)$$

con J_0 valore di riferimento pari alla soglia di udibilità: in tal modo quando $J=J_0$ si ottiene $L_J=log(1)=0$ e la trasformazione rappresenta correttamente anche la soglia assegnando ad essa un valore nullo del livello di sensazione sonora.

Si correla l'intensità dell'onda sonora ***I*** (W(m^2) alla percezione del suono introducendo la grandezza: ***L_I = Livello di intensità sonora***

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad [dB]$$

I [W/m^2]:	intensità sonora della sorgente;
I_0 [W/m^2]:	intensità sonora di riferimento che corrisponde alla soglia di udibilità per l'orecchio umano.

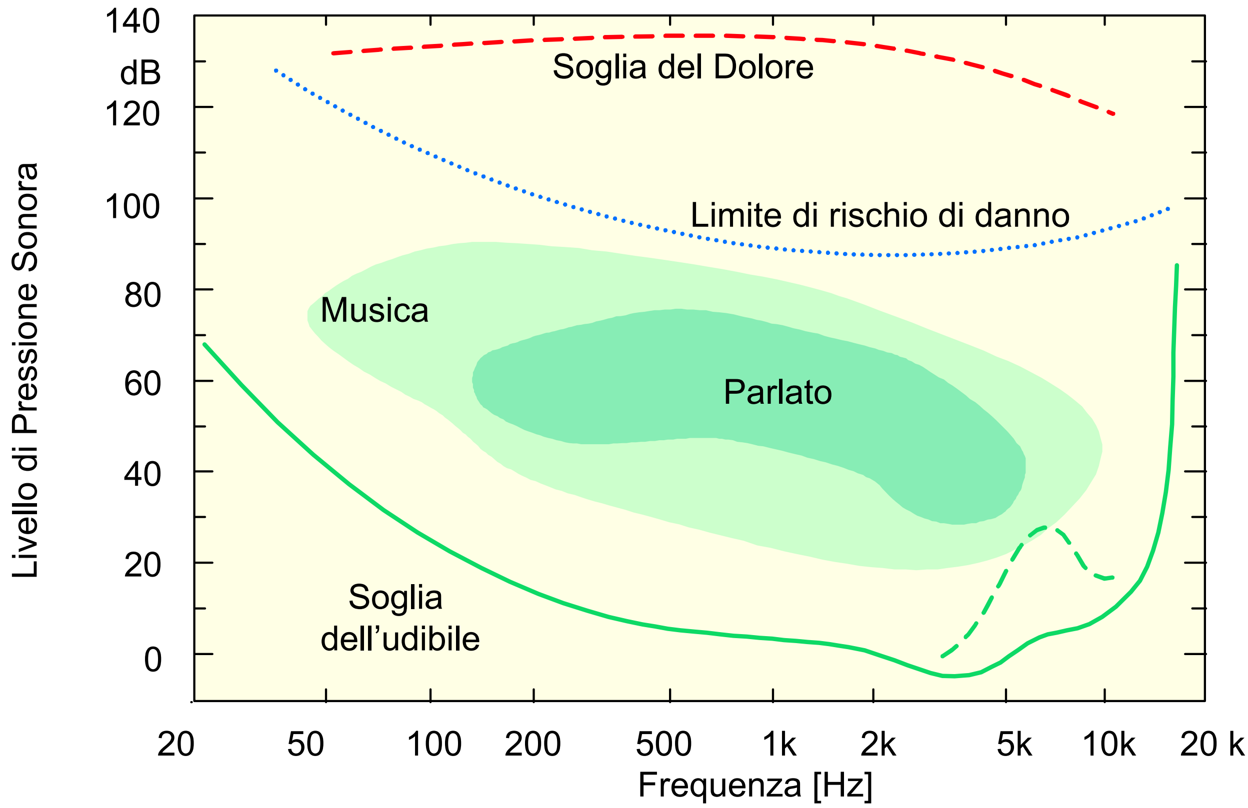
Analogamente si introduce il ***Livello di pressione sonora L_p*** , tuttavia è importante rilevare che il movimento del timpano dipende dalla potenza sonora incidente per unità di superficie (intensità acustica); questa è data dalla forza dell'onda per unità di superficie (pressione) per lo spostamento della membrana nell'unità di tempo (velocità). Poiché la velocità locale dell'aria (mezzo di propagazione) che vibra è proporzionale alla pressione (dal par. 20-1 si ha: $v = p/\rho c$) si ottiene che $I = p^2/\rho c$; pertanto la sensazione dipende dal quadrato della pressione quindi il livello di pressione si definisce come segue:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^{\,2}}\right)$$

$\boldsymbol{p_0}$ [Pa] : pressione sonora che corrisponde alla soglia di udibilità pari a 20 [μPa]

Le soglie di pressione ed intensità sono collegate dalla relazione sopra citata. Pertanto si ha:

$$I_0 = \frac{p_{eff}^{\;2}}{\rho_0 c} = \frac{\left(20 \cdot 10^{-6}\right)^2}{400} = 10^{-12}\ W/m^2$$



Potenza Sonora

E' la misura, nell'unità di tempo, dell'energia emessa da una sorgente [W], è utile quindi a descrive la causa del fenomeno acustico.

- La sua conoscenza consente di confrontare oggettivamente l'energia sonore emessa da sorgenti di rumore di tipo diverso.

- Note le caratteristiche acustiche di un ambiente se è nota la potenza delle sorgenti in esso contenute si è in grado di predire i livelli di pressione sonora in tale ambiente quando la sorgente sonora è in funzione.

La potenza sonora è descrittiva della causa del fenomeno acustico, la pressione invece dell'effetto.

Anche in questo caso risulta utile correlare la grandezza fisica ***W*** alla percezione umana. A tale scopo si introduce la grandezza **Livello di potenza sonora L_W** espressa in decibel:

$$L_W = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \qquad [dB]$$

con ***W:*** potenza sonora della sorgente [W]

W_0: potenza sonora di riferimento = 10^{-12} [W] corrispondente alla potenza di soglia di udibilità quando il suono ha la frequenza di 1000 Hz.

Valori indicativi della potenza sonora irradiata da alcune sorgenti $[W]$:

Razzo saturno	50 000 000
Squadriglia di jet	50 000
Motore di turboreattore	10 000
Aereo leggero al decollo	100
Timpani	25
Fortissimo orchestrale	10
Trombone	6
Martello pneumatico	1
Tromba	0,31
Pianoforte	0,27
Automobile in velocità	0,1
Clarinetto	0,05
Ventilatore centrifugo	0,01
Voce molto forte	0,001
Lavastoviglie	0,0001
Piccolo ventilatore	0,00001
Sussurro	0,000001

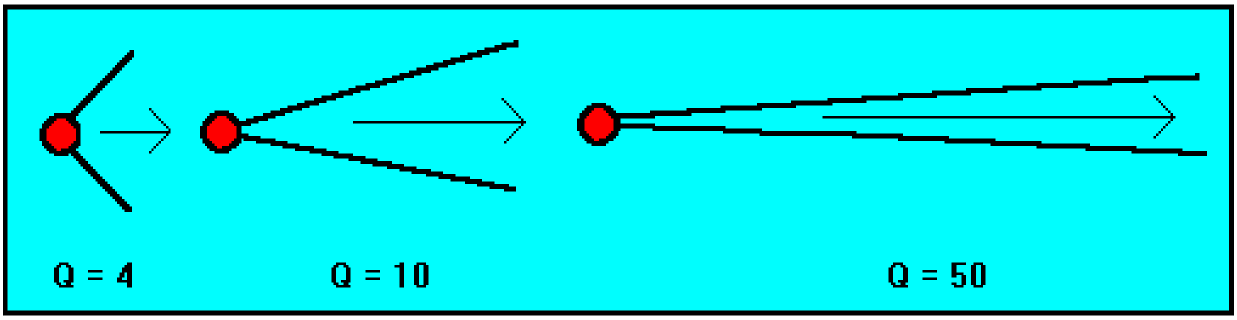
Si consideri una sorgente puntiforme. Le onde sonore che si propagano da essa sono onde sferiche. L'energia emessa si distribuirà su di una superficie sempre più grande mano a mano che l'onda si propaga.

Ciò significa che l'intensità sonora in un qualsiasi punto è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2}$$

con ***W:*** potenza sonora della sorgente [W];
d: distanza dalla sorgente [m];

Direttività



omnidirezionale è una sorgente che irradia uniformemente in tutte le direzioni, ha direttività unitaria; **monodirezionale** o **spot**, è una sorgente che focalizza su una sola direzione, al limite ha direttività tendente all'infinito.

Fattore di direttività Q (adimesionale)

$$Q = \frac{I}{I_0}$$

con **I** intensità sonora [W/m^2] in un determinato punto dello spazio, alla distanza **r** [m] dalla sorgente che emette con potenza **W** [W];
$\mathbf{I_0}$: Intensità sonora di riferimento calcolata come l'intensità che si genererebbe nello stesso punto se la medesima sorgente fosse omnidirezionale ovvero:

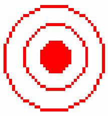
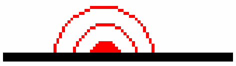
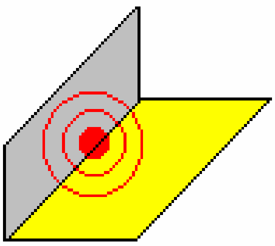
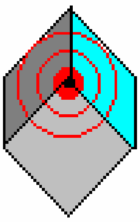
$$I_0 = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Indice di direttività q (in decibel)

$$q = 10 \log Q = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

esprime l'aumento in decibel del livello di potenza sonora dovuto alla direttività della sorgente considerata rispetto al livello che, a parità di potenza sonora, si otterrebbe nel medesimo punto dello spazio se la sorgente fosse omnidirezionale.

L'effetto di superfici riflettenti poste nelle immediate vicinanze della sorgente può essere rappresentato da un'opportuna direttività ricavabile in funzione di differenti configurazioni geometriche dalla tabella seguente:

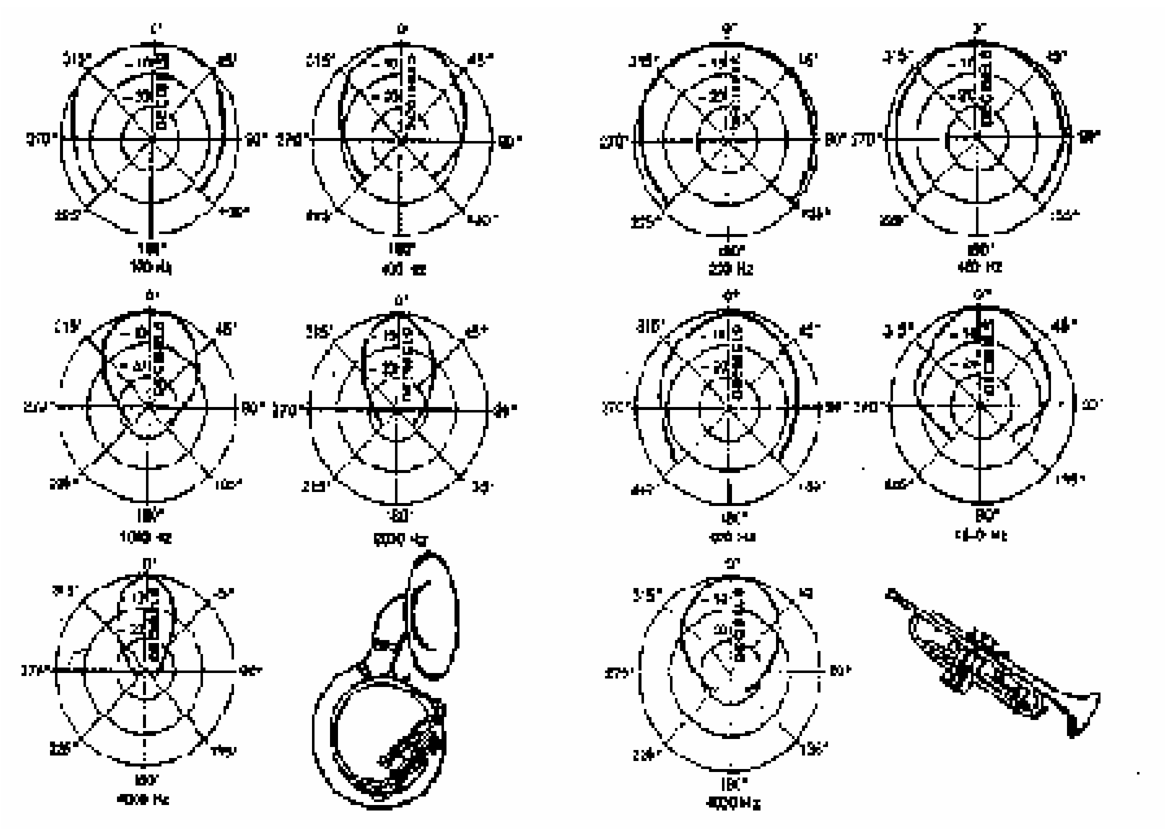
		Q	q
Sorgente in campo libero		1	0
Sorgente su di un piano		2	3
Sorgente tra due pareti perpendicolari tra loro		4	6
Sorgente in un angolo fra tre pareti ortogonali		8	9

L'intensità sonora per una sorgente puntiforme direzionale a una distanza *d* dalla sorgente si può esprimere con la relazione:

$$I = \frac{WQ}{4\pi d^2}$$

con ***W*** : potenza sonora della sorgente [watt];
Q : fattore di direttività [adimensionale]
d : distanza sorgente – ricevitore [m]

Si riportano a titolo esemplificativo i diagrammi di direttività di due strumenti musicali:



In definitiva:

- intensità, pressione e potenza sonora possono essere valutati in termini di livelli (L_I, L_p, L_W).

- Per la pressione si è scelto come riferimento il valore di soglia dell'orecchio umano, gli altri valori di riferimento sono stati correlati con questo usando le relazioni valide in campo libero.

- In campo libero si otterranno quindi gli stessi valori per i livelli di pressione e di intensità sonora a meno di correggere per valori di ρc diversi da 400 kg/m^{2}s

Alcune applicazioni

<u>Esempio 1</u> – Tagliaerba

Potenza acustica emessa = 0,01 W

Distanza sorgente – ricevitore = r = 1,5 m

$S = 2\pi r^2 = 14 m^2$

$I = 0.01/14 = 0.00071 \ W/m^2$

$L_I = 10\log(I/I_o) = 88{,}53 \ dB = L_p$

Esempio 2 – Due persone parlano contemporaneamente

non si possono sommare i livelli !!!!!

si possono sommare le pressioni:

$p_{tot}(t)=p_1(t)+p_2(t)$

Effetto di due suoni

$$p_{tot}(t)=p_1(t)+p_2(t)$$

$$p^2_{medio,\ tot}=\frac{1}{T}\int_0^T\left[p_1(t)+p_2(t)\right]^2dt$$

$$p^2_{medio,\ tot}=p_{1medio}{}^2+2(p_1p_2)_{medio}+p_{2medio}{}^2$$

Possiamo applicare l'ultima relazione ad onde sinusoidali, in quanto, in base alla teoria di Fourier sullo sviluppo in serie delle funzioni, un'onda qualsiasi si può sempre sostituire con una somma di sinusoidi di opportuna ampiezza, frequenza e fase.
Consideriamo il caso di due suoni puri con frequenza diversa. Le formule trigonometriche di prostaferesi, mostrano che un prodotto di sinusoidi equivale ad una differenza di cosinusoidi con opportuno argomento, tenuto conto che queste ultime hanno valore medio nullo, si deduce che la media nel tempo di $\boldsymbol{p_1 p_2}$ vale zero; pertanto si ha:

$$p^2_{medio,\ tot}=p_{1medio}{}^2+p_{2medio}{}^2$$

Due sorgenti di uguale intensità

$$p^2_{medio,\ tot} = p^2_{1medio} + p^2_{2medio} = 2p^2_{1medio}$$

$$L_p = 10\log(p_{tot}^2/p_o^2) = 10\log(2p_1^2/p_o^2) =$$

$$= 10\log(p_1^2/p_o^2) + 10\log(2)$$

$$= L_{p1}+3$$

Nel caso in cui le onde abbiano la stessa frequenza il valore medio del prodotto $\boldsymbol{p_1 p_2}$ non vale zero.

Si possono considerare i due casi estremi: onde della stessa frequenza e intensità, in fase (interferenza costruttiva) e onde della stessa frequenza e intensità, in opposizione di fase (interferenza distruttiva). Nel caso di interferenza costruttiva si ha:

$$p^2_{medio,\ tot} = p^2_{1medio} + 2(p_1 p_2)_{medio} + p^2_{2medio}$$

$$= 4p^2_{1medio}$$

$$L_p = 10\log(p_{tot}^2/p_o^2) = 10\log(4p_1^2/p_o^2) =$$

$$= 10\log(p_1^2/p_o^2) + 10\log(4)$$

$$= L_{p1}+6$$

Nel caso di interferferenza distruttiva si ha:

$$p_{tot}(t) = p_1(t) + p_2(t) = p_1(t) - p_1(t) = 0$$

$$\boldsymbol{L_p = -\infty}$$

Questo teoricamente praticamente il rafforzamento sarà un po' meno di 6 dB e la cancellazione provocherà un abbattimento di 20-30 dB

Due sorgenti con intensità qualsiasi

L'effetto complessivo di diverse sorgenti generiche, aventi diverso livello e diversa frequenza, si può valutare a partire dalle relative pressioni effettive:

$$p_{medio,\,tot}^{2} = p_{1medio}^{2} + p_{2medio}^{2}$$

$$p_1^2 = p_0^{\,2}\, 10^{(L_{p1}/10)} \qquad p_2^2 = p_0^{\,2}\, 10^{(L_{p2}/10)}$$

$$p_1^2 + p_2^2 = p_0^{\,2}\left(10^{(L_{p1}/10)} + 10^{(L_{p2}/10)}\right)$$

$$L_{ptot} = 10 \log \left[p_0^{\,2}\left(10^{(L_{p1}/10)} + 10^{(L_{p2}/10)}\right) / p_0^{\,2}\right]$$

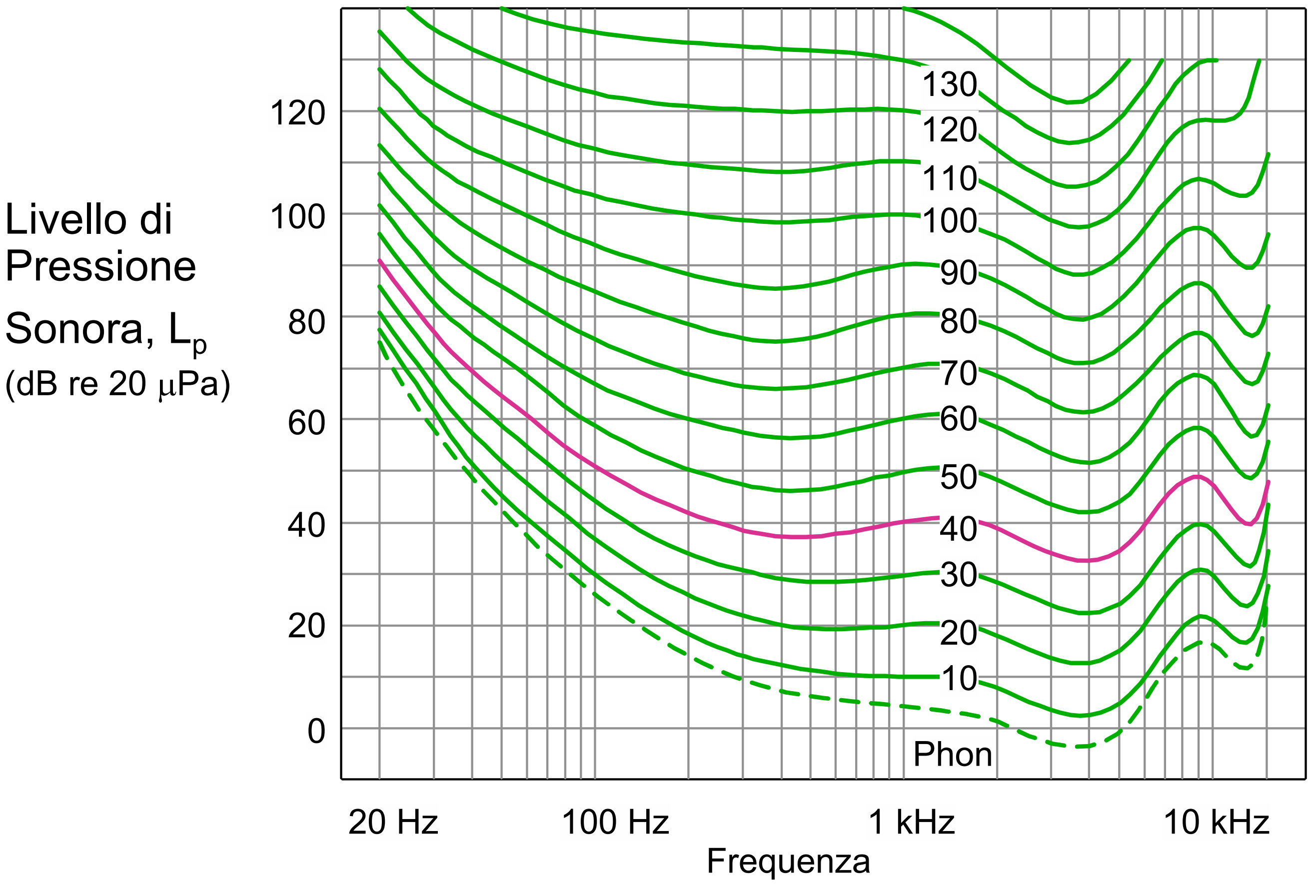
$$L_{ptot} = 10 \log \left[\left(10^{(L_{p1}/10)} + 10^{(L_{p2}/10)}\right)\right]$$

Curve di eguale sensazione per suoni puri sinusoidali

Per caratterizzare il comportamento dell'orecchio al variare delle due principali grandezze, la pressione e la frequenza del suono, sono state eseguite numerose prove sperimentali.

Le curve sotto riportate si riferiscono agli esperimenti di Fletcher e Munson che hanno determinato le coppie Livello di pressione-frequenza che danno la stessa sensazione (in termini di quantità o di "volume") che si ha quando la frequenza e quella di 1 kHz. Ogni curva è chiamata isofonica ed contrassegnata da un valore in [phon] pari al livello in dB della pressione a 1 kHz.

I risultati ottenuti riguardano suoni puri, cioè segnali sinusoidali, e quindi sono diverse da altre prove fatte con spettri più complessi atti a simulare il rumore.

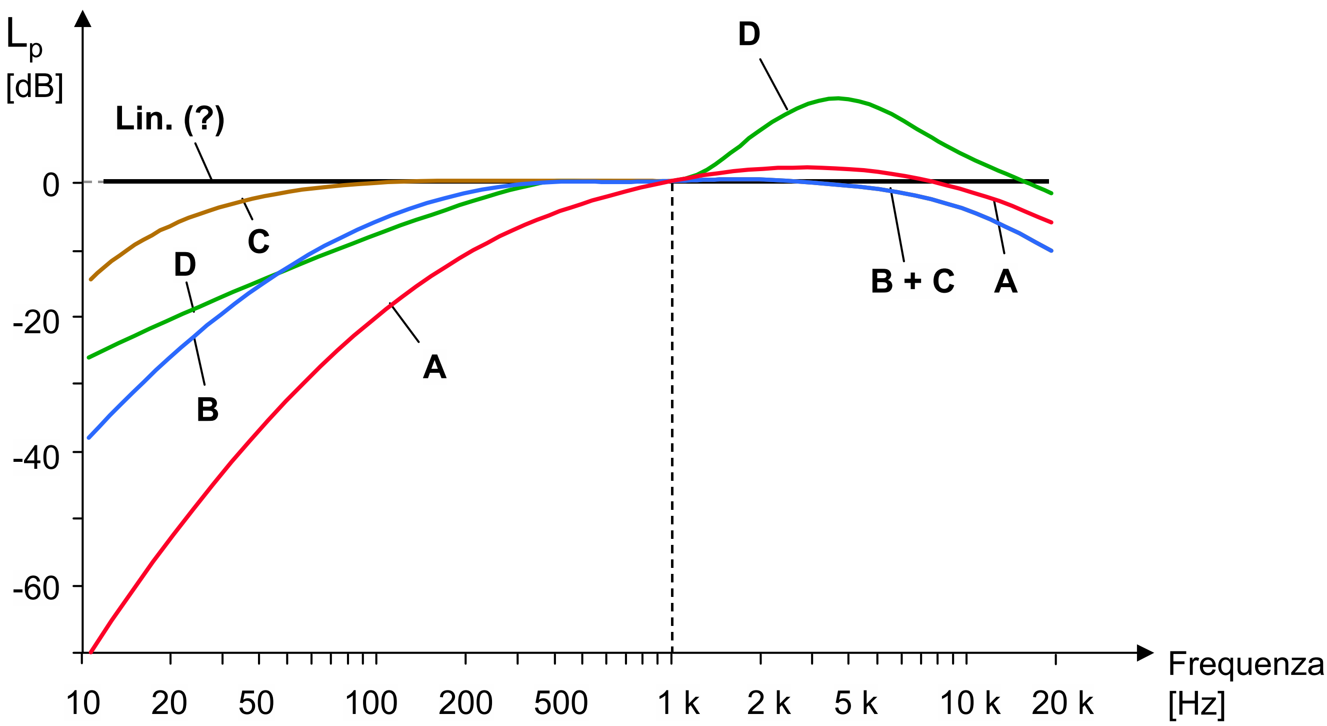


Audiogramma normalizzato di Fletcher e Munson

La misura del livello sonoro: il fonometro

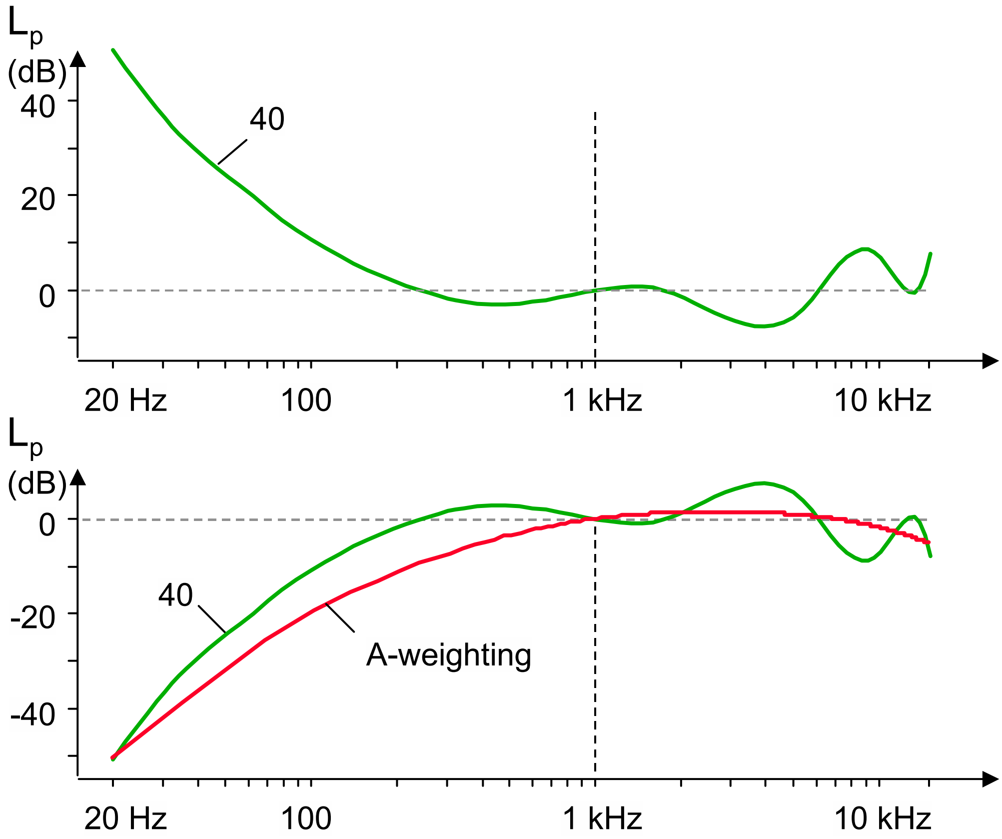
Per effettuare una misura oggettiva della sensazione sonora è messo a punto uno strumento che simula le caratteristiche dell'orecchio umano definite dall'audiogramma normalizzato di Fletcher e Munson.
Poiché tale diagramma mostra che il comportamento è variabile sia con la frequenza sia con l'ampiezza del livello, è stato diviso tutto il campo di udibilità in quattro zone e sono state definite a livello internazionale quattro curve con andamento (o **pesatura**) tale da rappresentare correttamente il comportamento dell'orecchio in ognuna delle zone.

- **curva A** : è derivata dalla curva isofonica di 40 Phon dell'audiogramma di Fletcher-Munson, ed è quindi teoricamente valida se i livelli di pressione sonora non sono elevati. In pratica è utilizzata quasi sempre, anche per livelli sonori elevati.
- **curva B** : è derivata dalla curva isofonica di 60 Phon dell'audiogramma di Fletcher-Munson, ed è quindi teoricamente valida per medi livelli di pressione sonora. In pratica è scarsamente utilizzata.
- **curva C** : è derivata dalla curva isofonica di 80 Phon dell'audiogramma di Fletcher-Munson, ed è quindi teoricamente valida per elevati livelli di pressione sonora. Viene abbastanza utilizzata anche se spesso è sostituita da una scala di ponderazione piatta (nessuna ponderazione)
- **curva D** : vuole simulare il comportamento smorzante dovuto ai muscoli tensori ed è teoricamente utilizzata solo in caso di pressione sonora elevatissima. In pratica è impiegata molto raramente, solo per alcun e misure di rumore di turbine di aereo.

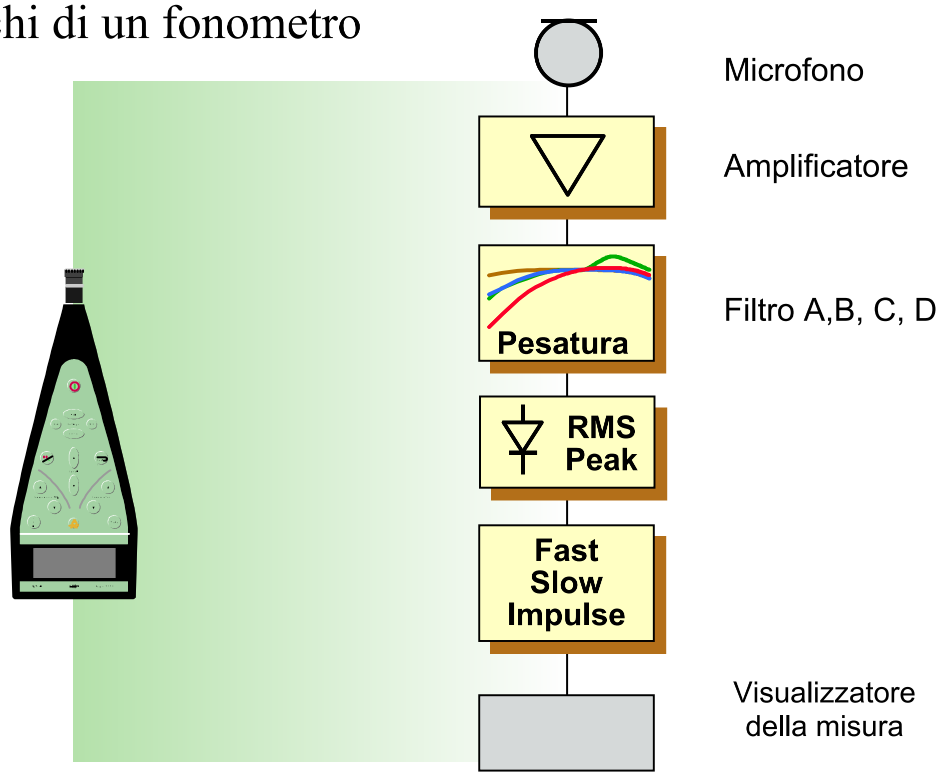


Ad esempio la curva di pesatura A che riguarda i livelli di più bassi viene costruita in modo da risultare complementare alla isofonica 40 phon e successivamente (curva rossa) resa meno tortuosa per poter essere realizzata con filtri elettrici sugli strumenti che misureranno i segnali elettrici prodotti da un microfono di alta qualità Lineare rispetto alla frequenze ed al livello sonoro).

- Isofonica 40 dB normalizzata a 0 dB at 1kHz
- Isofonica 40 dB Invertita confrontata con la curva A di ponderazione in frequenza



Schema a blocchi di un fonometro



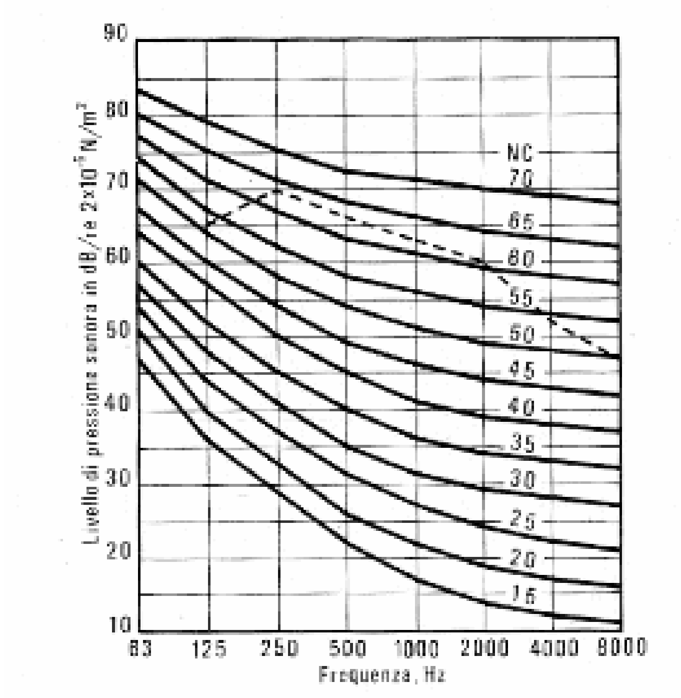
RUMORE -LIMITI DI ACCETTABILITA'

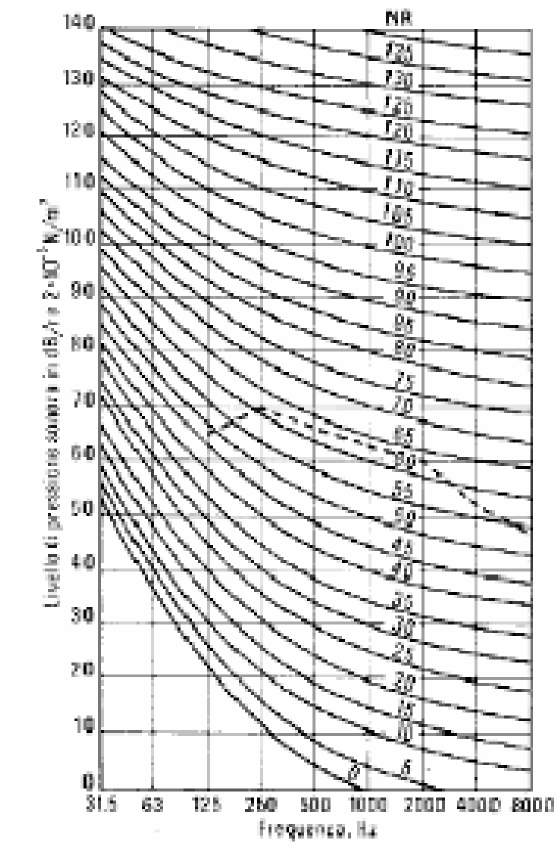
Limiti accettabili di rumorosità ponderati rispetto alla scala A, riferiti ad ambienti *vuoti*.

	dB(A)
Studio radiofonico o di registrazione	25
Sala da concerto o grande auditorio	30
Sala per musica da camera	30
Teatro	30
Chiesa	35
Stanze da letto di appartamento	35
Stanza di hotel	35
Aula scolastica	35
Stanza di ospedale	40
Studio televisivo	40
Sala per conferenze	**40**
Ufficio	40
Sala di tribunale	40
Biblioteca	**40**
Ufficio pubblico	45
Banca	45
Supermercato	45
Ristorante	45
Bar	45
Ambiente di soggiorno privato	45
Mensa	55
Garage	60
Officina	60
Laboratorio	60

Indici di valutazione del rumore

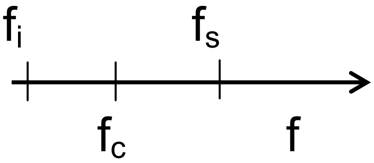
Stati Uniti: **diagramma a curve NC** o **Noise Critera**
Europa: **diagramma a curve NR** o **Noise Rating**





Considerando suoni a banda larga, il livello di pressione sonora può essere valutato con riferimento all'intero campo delle frequenza udibili: si parla di livello globale di pressione sonora.

Quando è utile valutare la distribuzione in frequenza dell'energia sonora si ricorre all'analisi spettrale; si determina cioè il livello di pressione sonora entro intervalli contigui di frequenza che ricoprono l'intero campo di interesse [bande].



f_s = frequenza di taglio superiore

f_i = frequenza di taglio inferiore

Δf $= f_s - f_i$ = ampiezza di banda

f_c = frequenza centrale

f_s/f_i = intervallo di banda

Analisi a *ampiezza di banda costante*

Es: **Δf** = 10 Hz

Δf = 1 Hz

Analisi a *ampiezza di banda percentuale costante*

- banda d'ottava
- banda di terzo d'ottava

Banda d'ottava:

$f_s = 2\, f_i$ $$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}71$$

Banda di terzo d'ottava:

$f_s = 2^{1/3}\, f_i$ $$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{\sqrt[3]{\sqrt{2}}} = 0{,}23$$

Calcolo di un Livello ponderato dB(A)

Condizionatore da finestra

f	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000 Hz**
Lp	**64**	**64**	**65**	**56**	**53**	**48**	**44**	**37 dB**

Pesature della curva A

-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1

Valori pesati finali

37,8	47,9	56,4	52,8	53,0	49,2	45	35,9

$$\frac{p^2}{p_0^2} = 10^{\frac{Lp}{10}}$$

$$p_{totale}^2 = p_0^2 \; [\, 10^{\frac{Lp1}{10}} + 10^{\frac{Lp2}{10}} + ... + 10^{\frac{LpN}{10}} \,]$$

$$p_{totale}^2 = p_0^2 \; [\, 10^{3,78} + 10^{4,79} + ... + 10^{3,59} \,]$$

Lp [dB(A)] = 10 Log (1 012 962,8) = 60 dB(A)