

Università degli studi di
Padova



ACUSTICA PSICOFISICA

Corso di Acustica applicata

Renato Lazzarin

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei
Sistemi industriali

L'acustica psicofisica studia le relazioni che intercorrono fra grandezze acustiche di tipo oggettivo e grandezze di tipo soggettivo legati ai meccanismi fisiologici di percezione.

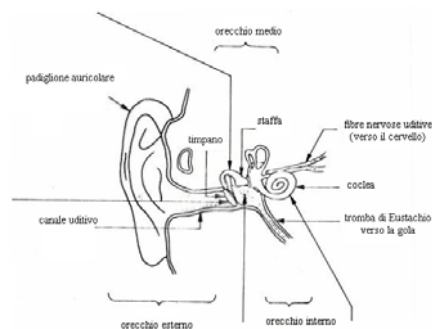
Lo studio si riferisce di solito ad un numero sufficientemente elevato di soggetti dall'udito perfetto (sotto i 25 anni di età!).

La comprensione dei risultati è facilitata dalla conoscenza almeno a grandi linee di anatomia e fisiologia dell'orecchio.

Anatomia dell'orecchio

L'orecchio viene tradizionalmente suddiviso in tre parti: l'orecchio esterno, medio ed interno.

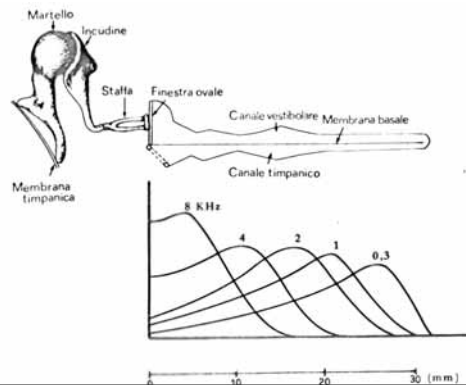
L'orecchio esterno comprende il padiglione auricolare ed il condotto uditivo esterno, canale lungo circa 27 mm con una sezione compresa fra 30 e 50 mm².



Il condotto uditivo termina nel timpano, membrana tesa di tessuto connettivo. L'orecchio medio comprende una cavità ossea entro la quale si trovano i tre ossicini (martello, incudine e staffa). Il martello è collegato alla membrana timpanica, mentre la staffa termina su di una membrana (finestra ovale) da cui comincia l'orecchio interno.

I movimenti di staffa e martello sono limitati da due piccoli muscoli (*tensor timpani e stapedio*): essi sono in grado di limitare i movimenti degli ossicini proteggendo l'orecchio dai suoni forti.

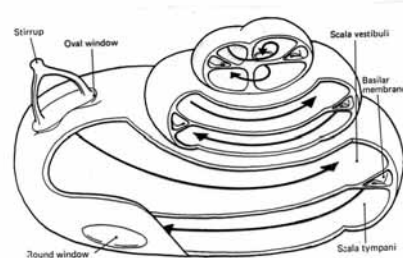
Il tempo di reazione per questa protezione è dell'ordine di 200 ms. L'orecchio interno comprende una serie di canali e camere di forma complessa, parte ossei e parte membranosi, chiamati labirinto.



Il labirinto può essere distinto in tre parti:

- (a) una cavità chiamata vestibolo che si apre sulla finestra ovale;
 - (b) tre canali a forma di anello chiamati canali semicircolari (organi preposti all'equilibrio, recettori statocinetici);
 - (c) un canale spiraliforme chiamato *cochlea* (chiocciola). Esso è lungo complessivamente 35 mm con 3 mm di diametro dove la staffa si attacca alla finestra ovale. Viene diviso in tre canali lungo tutta la lunghezza dalla membrana basilare e da quella di *Reissner*.
- La camera vestibolare (superiore) e quella timpanica (inferiore) contengono perilinf. La camera media contiene endolinf.

Sulla membrana basilare si trova la parete epiteliale sensoriale che costituisce con le sue cellule ciliate audiorecetrici (circa 30.000) l'*organo del Corti*.

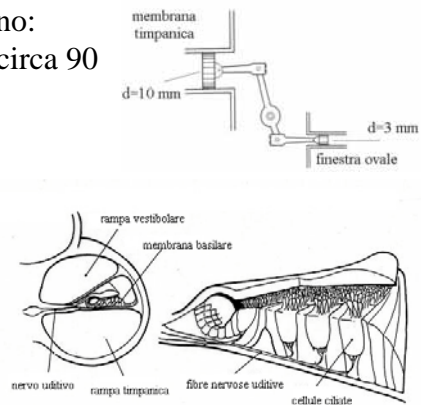


Fisiologia dell'orecchio

L'orecchio esterno funge da risuonatore acustico con poco o nessun effetto sotto i 1000 Hz e sopra i 7000 Hz e con particolare efficacia attorno ai 3000 Hz dove c'è un incremento di 10-12 dB di livello fra l'esterno e il timpano.

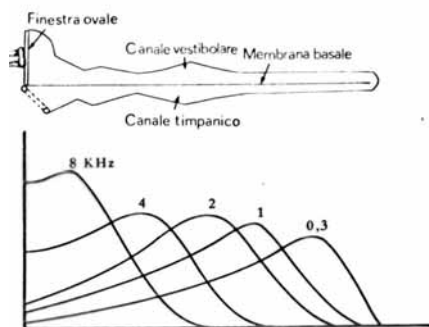
L'orecchio medio funziona come un sistema di leve con amplificazione 3 della forza che si applica su di un'area circa 30 volte minore del timpano: l'amplificazione meccanica è quindi di circa 90 volte.

Le vibrazioni si trasmettono dalla finestra ovale alla perilinfina nella rampa vestibolare e poi attraverso l'elicotrema arrivano alla rampa timpanica fino alla finestra rotonda che è molto cedevole per cui si annulla la pressione trasmessa dalla perilinfina.



Le variazioni di pressione provocano uno spostamento ondulatorio lungo la membrana basilare che si ripercuote sulle cellule ciliate producendo piccoli urti delle ciglia contro la membrana tectoria. La sollecitazione meccanica produce impulsi nervosi che il nervo acustico trasmette al cervello. Ciò avviene selettivamente. Infatti la membrana basilare è più sottile e tesa in prossimità della finestra ovale rispetto alla parte finale del dotto cocleare.

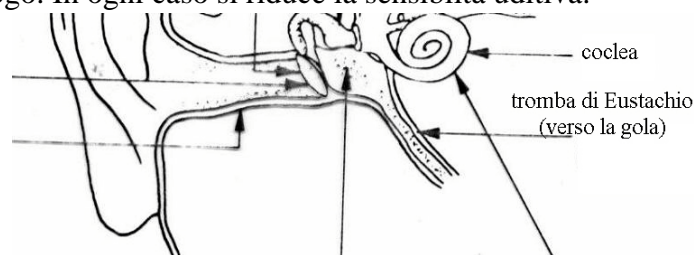
Perciò l'onda di pressione che si propaga nel canale provoca spostamenti diversi lungo la membrana a seconda della frequenza. Le frequenze più alte pongono in vibrazione la parte iniziale della membrana, mentre al diminuire della frequenza saranno influenzate parti sempre più lontane dalla finestra ovale.



Per il funzionamento dell'orecchio la pressione dell'aria entro l'orecchio medio deve eguagliare la pressione atmosferica. Per questo l'orecchio medio è collegato dalla *tromba di Eustachio* alla parte posteriore del cavo orale. Il tubo, normalmente chiuso, si apre sbadigliando consentendo l'equalizzazione della pressione.

Se per qualche motivo il tubo si blocca, il timpano ha meno libertà di vibrare e ne deriva una leggera sordità. Se lo sbilanciamento di pressione è forte si ha mal d'orecchi.

In caso di raffreddore la *tromba di Eustachio* ed anche la cavità dell'orecchio medio si riempiono di muco e l'equalizzazione non può aver luogo. In ogni caso si riduce la sensibilità uditiva.



L'inerzia degli ossicini è di ostacolo alla percezione di suoni di elevata frequenza, mentre l'orecchio esterno riflette suoni di grande lunghezza d'onda. Inoltre per basse frequenze la differenza di pressione fra rampa vestibolare e timpanica tende a zero: infatti il periodo è molto più lungo del tempo di propagazione della perturbazione.

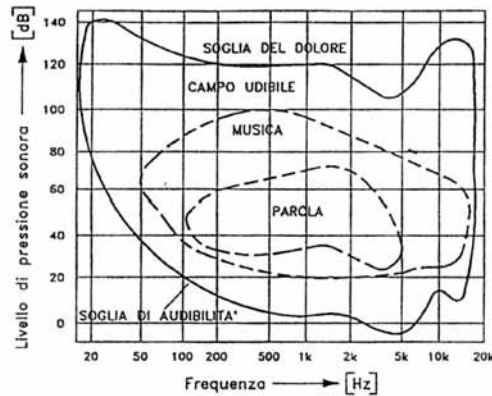
L'energia sonora giunge all'orecchio interno anche per conduzione ossea. E' il meccanismo principale con cui si sente la propria voce. Per attivare questa via il valore di L_p nell'aria deve superare di 60 dB la soglia di audizione normale. Esso è il limite superiore di protezione di tappi o cuffie, tanto più che la soglia si abbassa in presenza di questi dispositivi anche di 35 dB a 250 Hz.

Il campo di udibilità

La pressione di soglia dipende dalla frequenza (e da altri parametri, suono continuo o interrotto). Si può fare riferimento a toni puri, trovando la massima sensibilità a 3500 Hz con valori abbastanza stabili fra 500 e 7000 Hz. L'altra curva facilmente tracciabile è la soglia del dolore.

Per quanto riguarda il campo interno all'area appena delimitata, leggi psicofisiche proposte nel '800 da *Weber* e *Fechner* stabilivano che quando lo stimolo cresce in progressione geometrica, la sensazione cresce in progressione aritmetica:

$$\Delta S = K \frac{\Delta G}{G}$$



L'integrazione della precedente espressione implica che:

$$S = K \ln G + \text{cost}$$

Ponendo in questa espressione $S=0$ quando lo stimolo ha il valore di soglia G_0 si ha la scala dei decibel:

$$S = K \ln \frac{G}{G_0}$$

La scelta di *Fechner* di porre:

$$K = 10 \log_{10} e$$

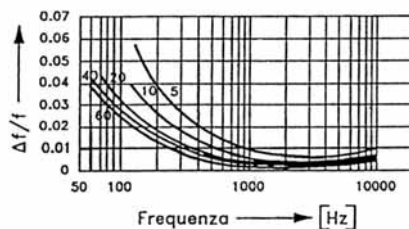
ha portato alla fine alla nota definizione:

$$S = 10 \log \frac{G}{G_0}$$

Se la relazione di *Fechner* fosse verificata alle varie intensità la curva di soglia si traslerebbe verso l'alto, mentre invece si ha un appiattimento verso la soglia del dolore.

Esiste poi una soglia incrementale sulla frequenza che varia con il livello sonoro e mostra la possibilità di una migliore rilievo % nella variazione ai livelli più alti di frequenza dove si apprezzano variazioni anche di qualche ‰ .

E' questo tipo di risposta che fornisce un limite al *wow and flutter* (una variazione nella velocità di scorrimento del nastro di un registratore fornisce variazioni di frequenza): per non essere udite devono avere valori inferiori allo 0,1%.



L'immagine mostra la variazione rilevabile rapportata alla frequenza al variare di questa e per diversi livelli della pressione sonora.

Va ricordato anche che l'espressione logaritmica risulta comoda anche per esprimere rapporti molto ampi fra le grandezze. Ad esempio nel caso del guadagno di un amplificatore, detta W_u la potenza in uscita e W_i quella in ingresso si scrive:

$$G = 10 \log \frac{W_u}{W_i}$$

Si opera spesso in termini di tensioni e dette Z_u e Z_i le impedenze, si ha che:

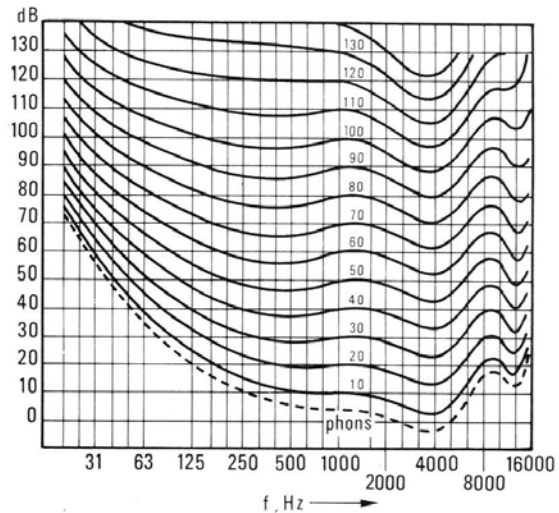
$$G = 10 \log \frac{V_u^2 Z_i}{V_i^2 Z_u}$$

Nel caso in cui $Z_u = Z_i$ allora l'espressione si semplifica nella seguente, usata spesso anche quando le due impedenze differiscano:

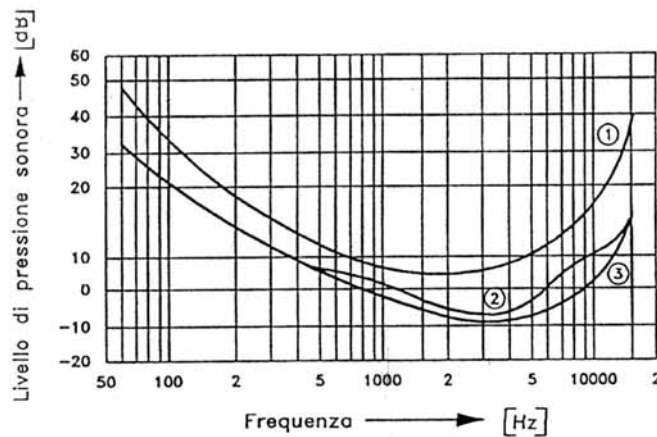
$$G = 20 \log \frac{V_u}{V_i}$$

La valutazione della sensazione soggettiva venne attuata da *Fletcher* su toni puri con confronto binario con un suono di riferimento di 1000 Hz. Venne così definita la scala dei *phon* che è un primo tentativo di stabilire una scala di intensità soggettiva.

L'audiogramma normale di *Fletcher e Munson* che ne deriva mostra che la sensibilità di percezione dipende fortemente dall'intensità e dalla frequenza.



Nell'audiogramma normale mancano molti fattori. Si consideri ad esempio la variazione sulla soglia che si ha a seconda di ascolto monoaurale in cuffia (1), di ascolto binaurale in campo libero (2) e in campo diffuso (3):



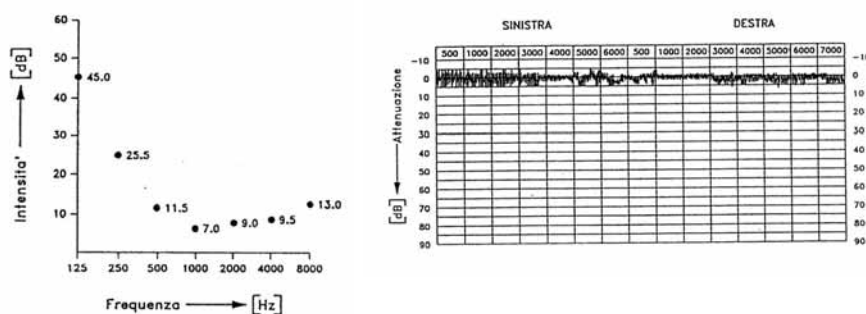
Per quanto riguarda la sensibilità dell'orecchio a cambiamenti nell'intensità di stimolazione, essa si può esprimere sempre in dB secondo la relazione:

$$DI = 10 \log \frac{I_1}{I_2}$$

Un cambiamento di intensità di 1 dB non viene praticamente percepito: sono necessari almeno 3 dB per la percezione. Con 5 dB si ha percezione chiara dell'intervenuta variazione, mentre la sensazione del raddoppio o del dimezzamento richiede in linea di massima una variazione di circa 10 dB (cioè di 10 volte l'intensità oggettiva).

Elementi di audiometria

Le prove di funzionalità dell'udito vengono realizzate mediante l'audiometro che genera toni puri di livello variabile in una cuffia. Lo strumento riproduce la curva di udibilità standard, variabile fino alla risposta del soggetto alle varie frequenze dell'audiogramma che deve essere piatto attorno allo 0 per un udito perfetto. Scostamenti di +/- 10 dB sullo 0 sono considerati normali.



La perdita dell'udito, salvo i casi di trauma acustico, è dovuta quasi sempre a danni cellulari dell'organo del Corti.

Essa è evidenziata da un incremento di soglia (*threshold shift*).

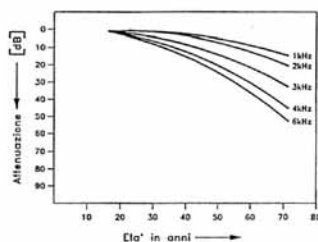
Le perdite di udito possono essere temporanee (TTS) o permanenti (PTS). Nel caso di TTS si torna alla normalità gradualmente una volta eliminate le cause che l'hanno prodotta: ad esempio prolungate esposizioni a valori superiori a 70 dB, peggio che con suoni intermittenti od impulsivi.

Alcuni soggetti risultano più sensibili di altri.

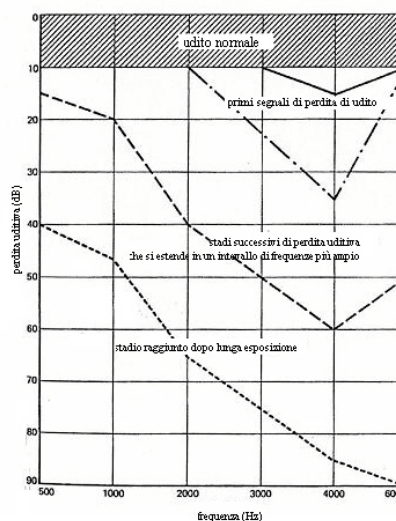
Lo spostamento di soglia avviene generalmente entro 2 ore dall'esposizione ed il recupero comincia dopo 1 ora e si completa in 24 ore.

Frequenti esposizioni a rumori di intensità e/o durata elevate possono indurre alla lunga a PTS.

La PTS è evidenziabile una volta depurata dell'effetto di indebolimento dell'udito dovuto all'età:



La sensazione soggettiva di perdita di udito si ha una volta raggiunta una perdita di 25 dB fra 500 e 2000 Hz. A quel punto l'organo del Corti è già compromesso dato che il fenomeno comincia fra 3 e 6 kHz (di qui la necessità di un esame audiometrico periodico ai soggetti esposti al rumore.



Esposizione al rumore

Viene valutato il L_{Aeq} da assumere come limite superiore per un'esposizione continua di 8 ore/giorno per 5 giorni alla settimana. Si utilizza la percentuale di rischio. Secondo i criteri ISO si considera significativa la perdita di udito quando la media aritmetica dell'innalzamento permanente di soglia PTS per le frequenze di 500, 1000 e 2000 Hz raggiunge 25 dB.

Per $L_{Aeq} < 80$ dB(A) non si ha incremento di sordità rispetto all'invecchiamento naturale dopo 40 anni.

Per $L_{Aeq} = 85$ dB(A) dopo 10, 20, 40 anni si passa dai valori dovuti all'età del 3, 7 e 33% al 6, 16 e 43% con un rischio aggiunto del 3, 6 e 10%.

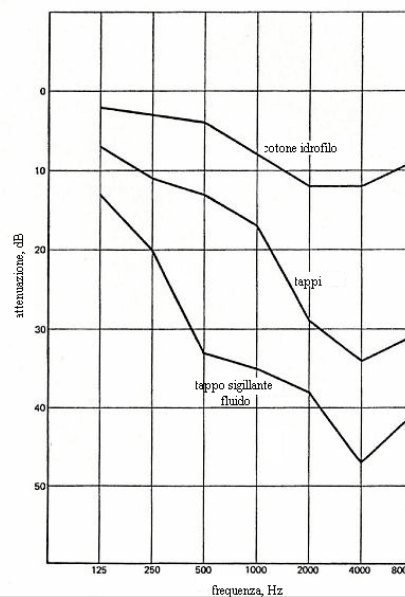
Per $L_{Aeq} = 90$ dB(A) si ha 10, 16, 21%.

Bisognerebbe considerare anche il livello max della pressione acustica. Data la variabilità individuale, è il test audiometrico periodico sopra gli 80 dB(A) che può individuare i soggetti a rischio.

Il criterio è basato sull'equivalenza dell'energia ricevuta, perciò un dimezzamento del tempo di esposizione può portare ad un aumento di 3 dB del valore accettabile.

Si deve infine tener conto di effetti extrauditivi del rumore come irritabilità, difficoltà di attenzione, aumento degli errori, riduzione della produttività, ecc.).

Nel caso non si possa intervenire altrimenti vi è il possibile ricorso a tappi o cuffie con i limiti di fianco riportati.

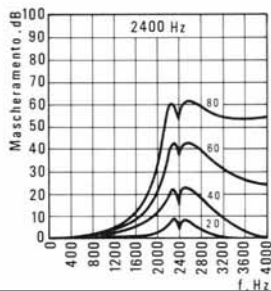


Il mascheramento e le bande critiche

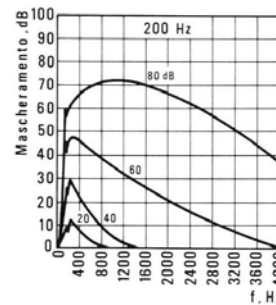
Quando l'osservatore sia sottoposto contemporaneamente a due suoni, a volte egli percepisce soltanto il più forte. Si dice allora che questo suono maschera l'altro.

La soglia di mascheramento è la pressione sonora alla quale il suono mascherato comincia ad essere percepito. Una prima valutazione può essere condotta con due toni puri: il primo di fissato livello e frequenza ed il secondo variabile.

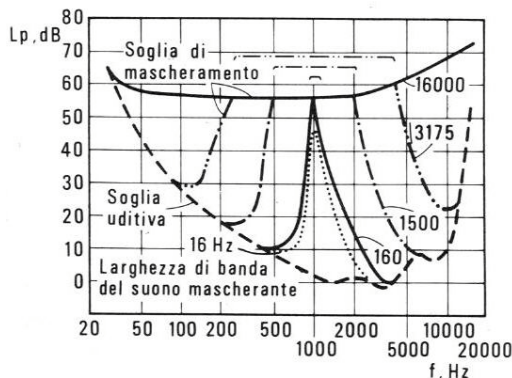
Si riconosce la maggiore attitudine dei suoni di minore frequenza a mascherare quelli di frequenza più alta.



L'abbassamento della soglia per frequenze assai prossime a quella mascherante è dovuto ai battimenti.



La figura rappresenta il mascheramento di toni puri da parte di un rumore con banda di diversa larghezza centrata su 1000 Hz e con densità di intensità sonora costante sulla banda e pari a 40 dB/Hz. Ancora si vede la maggiore efficacia nel mascherare suoni di più alta frequenza, com'è confermato dalla discesa più rapida della soglia verso le basse frequenze che non verso le alte.



larghezza, Hz	L_p , dB
16.000	82
3.175	75
1.500	72
160	62
16	52

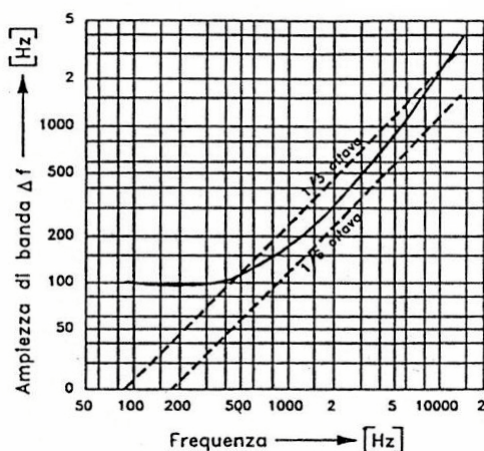
Il fenomeno si spiega con il fatto che un tono mascherante eccita la membrana basilare non solo nel punto preciso che corrisponde alla sua frequenza, ma in una zona più ampia che compete ad altre frequenze, la cui percezione viene in tal modo disturbata.

Il mascheramento da un rumore a spettro continuo è dovuto in massima parte ad una ristretta banda di frequenza del rumore centrato sulla frequenza del suono mascherato che prende il nome di *banda critica per l'audizione*. L'ampiezza della banda critica varia in generale al variare della frequenza.

L'analisi si può fare partendo da un rumore bianco, cioè con spettro di densità di potenza costante. Scelto un valore di frequenza per il tono puro, si osserva l'entità del mascheramento, cioè l'innalzamento di soglia per una certa banda di frequenza centrata sul tono mascherato. Se si allarga la banda del rumore bianco, si ha inizialmente un incremento proporzionale alla larghezza di banda che si riduce via via fino ad arrivare ad un valore costante.

Questa larghezza individua la banda critica.

La banda critica, a partire da circa 100 Hz aumenta proporzionalmente alla frequenza centrale: l'ampiezza di banda critica si può assimilare a circa 1/3 di ottava. E' un'ulteriore spiegazione all'ampio ricorso che si fa in acustica a questo intervallo di banda.



Questi effetti non solo sono importanti per stabilire se un certo suono può coprire rumori non graditi o se dei rumori possono mascherare suoni che devono essere chiaramente percepiti (ad esempio un allarme), ma anche perché influiscono sulla valutazione soggettiva di suoni complessi e rumori.

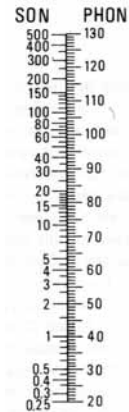
A partire dall'audiogramma normale e dalla scala dei *phon* è stata realizzata la scala dei *son*.

Nella scala dei *phon* un raddoppio dell'intensità soggettiva non comporta un raddoppio della percezione. Al di sopra dei 40 *phon* l'intensità percepita raddoppia ad ogni incremento di 10 *phon*. Questo invece si realizza con la scala dei *son*. Un aumento di 10 *phon* oltre i 40 comporta un raddoppio nel numero dei *son*.

$$L_{son} = 2^{\frac{LL_{phon} - 40}{10}}$$

La procedura fornisce risultati attendibili solo per toni puri. Per valutare la sensazione derivante da un suono complesso o da un rumore si può operare alternativamente:

- si calcola l'intensità soggettiva da un'analisi dello spettro del rumore in banda;
- si utilizza uno strumento di rilevazione che ricostruisca la risposta dell'orecchio.

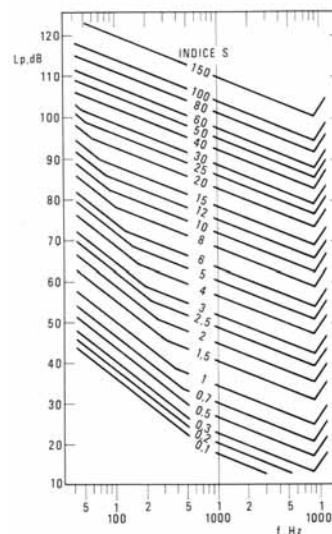


La prima metodologia ha trovato suggerimenti di vari studiosi (*Stevens, Zwicker, Kryter*) che tengono conto dell'effetto del mascheramento. Spesso si tratta di procedure a sviluppo grafico di impiego lungo e noioso.

La più semplice è la procedura di *Stevens* la cui base sono le curve di figura. Essa usa un fattore di pesatura $F=0,3$ per banda d'ottava e $0,15$ per $1/3$ di ottava.

- (A) Dato lo spettro del rumore si determinano gli indici per ogni banda;
- (B) l'influenza più grande è quella dell'indice più elevato (cfr. banda critica di audizione) e si fa ricorso alla relazione:

$$S_t = S_{max} (1 - F) + F \sum S_i$$



Ovviamente il rumore più disturbante è quello che presenta l'indice più elevato. La procedura dà buoni risultati per suoni continui in campo diffuso e con uno spettro privo di brusche discontinuità.

Un esempio può chiarire come si procede.

Si abbia il rilievo di uno spettro del rumore in un reparto di sbavatura:

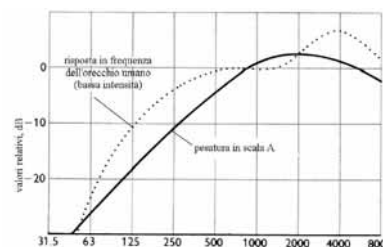
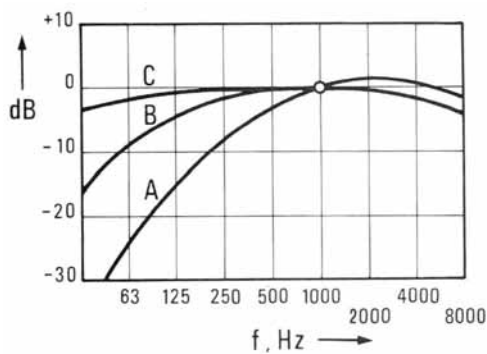
f_c , Hz	L_p , dB	S_i (son)
63	—	—
125	88	15
250	90	20
500	93	27
1000	98	60
2000	102	80
4000	96	60
8000	95	78
		340

Il valore max degli indici è 80 son, per cui:

$$S_t = 80(1 - 0,3) + 0,3 \times 340 = 158 \text{ son (113 phon)}$$

Procedure come queste sono efficaci soprattutto in termini comparativi.

Di fatto la procedura più utilizzata, perché più semplice, è la pesatura del segnale oggettivo del fonometro in modo da tener conto delle isofoniche dell'audiogramma normale. Le tre curve di pesatura sono ispirate alle isofoniche di 40, 60 e 80 phon e dovrebbero essere utilizzate rispettivamente per rumori di bassa, media ed alta intensità. Ragioni di semplicità hanno portato al quasi esclusivo impiego della scala A. Il risultato viene allora espresso in dB(A).



L'applicazione della pesatura è assai semplice anche a tavolino. Si parte dallo spettro in banda del rumore, ad esempio del reparto sbavatura prima considerato. Il livello oggettivo sarebbe stato di 105 dB. Lo spettro viene pesato come indicato in tabella fornendo sia lo spettro modificato che un valore globale di 106 dB(A). Qualora si fosse impiegata la scala C si sarebbe ottenuto 105 dB(C).

f_c , Hz	L_p , dB	correzione, dB	L_p modificato, dB
63	—	-26,2	—
125	88	-16,1	71,9
250	90	- 8,6	81,4
500	93	- 3,2	89,8
1000	98	0,0	98
2000	102	+ 1,2	103,2
4000	96	+ 1,0	97
8000	95	- 1,1	93,9

Tabella 2.2 Scala "A": valori correttivi per le varie bande di frequenza.

Frequenza [Hz]	Fattore correttivo	
	Banda in terzi di ottava	Banda di ottava
50	-30,2	
63	-26,2	-26,2
80	-22,5	
100	-19,1	
125	-16,1	-16,1
160	-13,4	
200	-10,9	
250	-8,6	-8,6
315	-6,6	
400	-4,8	
500	-3,2	-3,2
630	-1,9	
800	-0,8	
1000	0,0	0,0
1250	+0,6	
1600	+1,0	
2000	+1,2	+1,2
2500	+1,3	
3150	+1,2	
4000	+1,0	+1,0
5000	+0,5	
6300	-0,1	
8000	-1,1	-1,1
10000	-2,5	

La pesatura è ottenibile direttamente dal fonometro sia sullo spettro che sul valore globale.
Il risultato rispetto al valore di livello oggettivo dipende molto dalla distribuzione dell'energia sonora nello spettro.

Sorgente sonora	frequenza centrale di banda, Hz								dB(A)
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Rasoio elettrico a 50 cm	59	58	49	62	60	64	60	59	68
Lavatrice	60	68	59	62	59	60	62	69	70
Aspirapolvere a m 1	48	66	69	73	79	73	73	72	82
Condizionatore da finestra	64	64	65	56	53	48	44	37	60
Radio TV	49	62	64	67	70	68	63	39	74
Stereo HiFi ad alto volume	60	72	83	82	82	80	75	60	86
Suoneria telefono a m 2	—	41	44	56	68	73	69	83	83
Suoneria sveglia a m 2	—	46	48	55	62	62	70	80	80
Violino (livello max) a m 1,5	—	—	91	91	87	83	79	66	92
Conversazione forte a m 1	—	60	75	78	75	65	55	38	78
Automobile a m 5	78	77	73	69	65	62	56	50	71
Autocarro a m 5	89	86	81	77	73	70	67	64	80
Jet in decollo a km 3	90	95	100	98	95	88	80	75	99
Motociclo a m 5	92	96	93	89	79	73	70	63	89
Clacson d'auto a m 5	—	—	—	92	95	90	80	60	97
Centro di calcolo	78	75	73	78	80	78	74	70	84
Cucine	86	85	79	78	77	72	65	57	81

Criteri di rumore

Il criterio di tollerabilità di un rumore deve riferirsi a valutazioni di intensità soggettiva. Inoltre sulla tollerabilità influiscono la durata, l'andamento temporale (rumore continuo, intermittente, impulsivo) e il rumore di fondo.

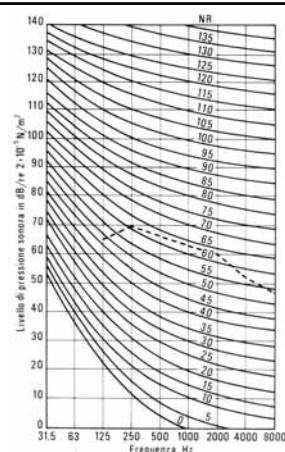
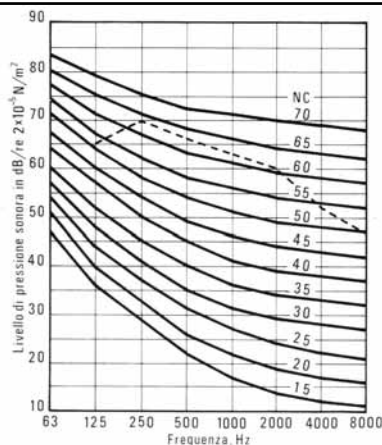
Per semplicità si fa riferimento per lo più:

- all'indicazione della scala A del fonometro;
- all'attribuzione di un indice al rumore a seconda di forma e posizione dello spettro sonoro.

La prima modalità è molto grossolana, ma certamente la più diffusa.

Si può avere una stessa indicazione per due rumori con spettro diverso e quindi diversamente disturbanti.

Il secondo procedimento si basa su di una serie di curve, rispettivamente NC (*Noise Criteria*) o NR (*Noise Ratings*). Ad ogni curva viene assegnato un indice di valutazione, che è il livello che compete alla frequenza di 1000 Hz.



Si attribuisce al rumore l'indice relativo alla curva più bassa al di sotto della quale resti l'intero spettro sonoro del rumore.

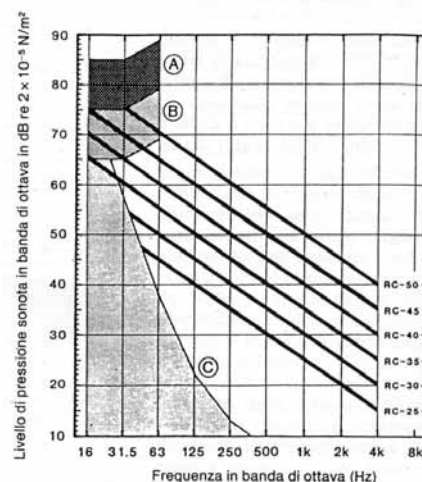
In tal modo l'indice di valutazione è determinato essenzialmente dal livello più alto di pressione sonora dello spettro. Lo spettro in figura dà NC 64 e NR 63. Tuttavia la curva più alta è toccata in NC a 250 Hz e in NR a 2000 ad indicare che le NC sono più appiattite.

I profili NC e NR non vanno assolutamente impiegati come criteri progettuali, dato che ne risulterebbe un rumore generalmente considerato fastidioso con prevalenti tonalità basse.

Le esperienze di applicazione del procedimento, in particolare negli USA, hanno mostrato che la verifica da esso proposta non è sufficiente a garantire la piena accettazione acustica di un ambiente da parte degli occupanti. Uno stesso indice poteva in alcuni casi dare un esito favorevole ed in altri registrare lamentele più o meno diffuse. Si concluse che in effetti l'indice sottovalutava il disturbo prodotto dalle componenti di alta e di bassa frequenza di un rumore anche se queste non interferivano con il parlato. Il fatto è che la loro presenza veniva avvertita come un rombo per le basse frequenze o un sibilo per le alte, considerati spesso fastidiosi. Inoltre non andavano trascurate le bassissime frequenze (la banda centrata a 16 Hz) che, anche se non direttamente percepibili all'orecchio, potevano produrre noiose vibrazioni in pannelli od oggetti presenti nell'ambiente.

Per ovviare a questi inconvenienti venne proposta (e inserita nel 1980 nei manuali ASHRAE) un'altra famiglia di curve: le curve RC (*Room Criterion*). Esse si estendono nelle basse frequenze fino a 16 Hz, mentre nelle alte si fermano a 4000 Hz. La figura riporta, oltre alla famiglia di curve da RC-25 a RC-50, caratterizzate da una pendenza costante di -5 dB/ottava, anche due zone A e B dello

spettro, dove le vibrazioni indotte nei pannelli presenti nell'ambiente possono essere rispettivamente chiaramente percepibili o moderatamente percepibili (limiti questi chiaramente sottovalutati dall'indice NR). La figura riporta infine la soglia di udibilità come dato di riferimento (curva C).



La tabella riporta i livelli di rumore considerati accettabili in ambienti di uso diverso: fornisce sia gli indici RC-N, NC e NR che il valore in dB(A), ottenibile per lo più dai primi con la semplice maggiorazione di 5 dB.

LOCALE Livelli accettabili di rumore

	RC-N, NC, NR	dB(A)
Studi di registrazione	20	25
Sale da concerto	20-25	25-30
Sale per conferenze, cinema	25-30	30-35
Abitazioni: camere da letto	25-30	30-35
Abitazioni: soggiorni	30-35	35-40
Uffici individuali	25-35	30-40
Uffici a pianta aperta	35-40	40-45
Aule scolastiche	25-35	30-40
Biblioteche	30-35	35-40
Ospedali (degenze)	25-30	30-35
Centri commerciali	35-45	40-50

Tramite i criteri di tollerabilità si danno indicazioni relative ai valori da ottenere negli ambienti a seconda dell'utilizzo.

Nel caso in cui il rumore non sia stazionario si considera il livello equivalente continuo L_{eq} :

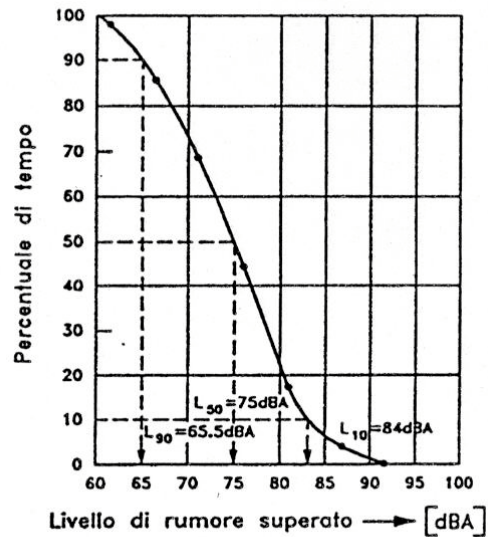
$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right] \quad \text{dove} \quad L(t) = 10 \log \frac{p^2(t)}{p_o^2}$$

In pratica la determinazione viene fatta a partire dai livelli che competono a diversi intervalli di tempo Δt in cui viene scomposto l'evento sonoro:

$$L_{eq} = 10 \log \sum \frac{\Delta t_i}{T} 10^{\frac{L_i}{10}}$$

L'uso corrente prevede la ponderazione A con possibilità di misure in tempo reale mediante integrazione a partire da un determinato istante.

Spesso può tornare utile effettuare l'analisi statistica dei livelli. Essa può essere realizzata attraverso appositi analizzatori o con il computer. Si ottiene la distribuzione cumulativa dei livelli, in cui sono tradizionalmente considerati importanti i livelli statistici L_{10} , L_{50} e L_{90} , cioè i valori di livello superato per il 10%, 50% e 90% del tempo. L_{50} è considerato valore mediano, L_{90} viene riguardato come rumore di fondo e L_{10} contrassegna gli eventi più rumorosi.



Un parametro suggerito come significativo della valutazione di disturbo arrecato dal traffico stradale è $(L_{10}-L_{90})$ definito come *Noise Climate*.

Il L_{eq} sottovaluta il disturbo arrecato da eventi rumorosi di durata limitata nel tempo, ma che si verificano ripetutamente come il passaggio di treni o di velivoli. Il livello riferito al singolo evento è quello ponderato A che, mantenuto costante per un periodo di tempo pari a 1 secondo è associato ad un'energia totale pari a quella dell'evento sonoro reale. Si definisce così il *SEL (Sound Exposure Level)*:

$$SEL = L_{Ax} = L(t) = 10 \log \left[\frac{1}{p_o^2} \int_{-\infty}^{+\infty} p_A^2(t) dt \right] \quad (t_o = 1 \text{ s})$$

L'indice si chiama *SEL* secondo ANSI e L_{Ax} secondo ISO.
In pratica si usa la seguente relazione:

$$SEL = L_{Ax} = L(t) = 10 \log \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt$$

Dove $L_A(t)$ è il livello sonoro istantaneo ponderato A e t_1 e t_2 gli estremi dell'intervallo di tempo durante il quale $L_A(t)$ non scende più di 10 dB al di sotto del livello max raggiunto nell'evento. Il SEL è la base per il calcolo di indici basati sull'energia media.

Se in un intervallo di tempo T si verificano n eventi singoli, ciascuno di livello L_{Ax} , si ha:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_1^n 10^{\frac{L_{Ax}}{10}}$$

Se gli n eventi hanno tutti lo stesso L_{Ax} , basta determinare un solo valore e la frequenza di ripetizione:

$$L_{eq} = L_{Ax} + 10 \log n - 10 \log T$$