

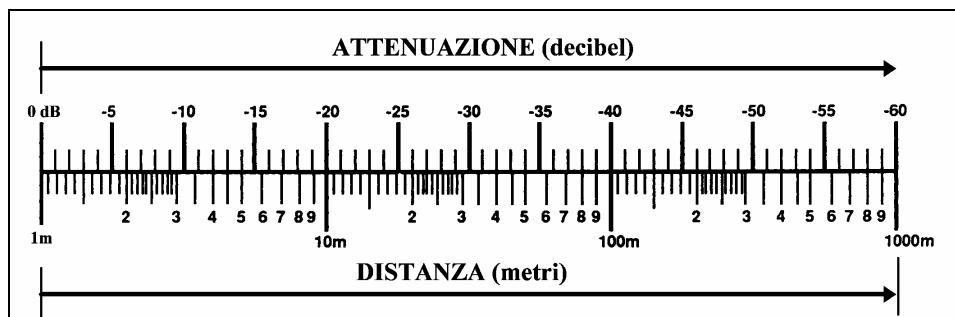
SUONO E PERCEZIONE (parte seconda)

Livello sonoro e distanza dalla sorgente

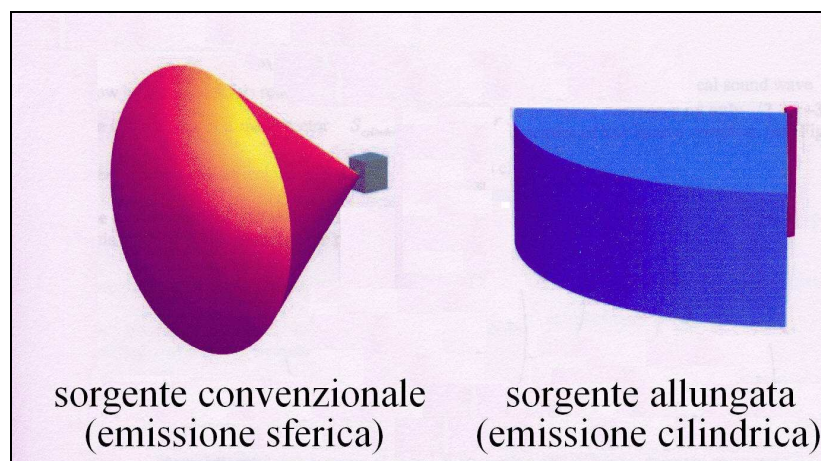
Il livello del suono diminuisce quanto più ci si allontana dalla sorgente che l'ha emesso. L'entità di tale diminuzione è determinata da svariati fattori, connessi sia con le modalità con cui la sorgente immette il suono in ambiente, sia con le condizioni ambientali e/o meteorologiche.

1) Effetto del genere di emissione

Allontanandosi da una sorgente sonora, la diminuzione di livello è in genere pari a 6 dB per ogni raddoppio della distanza.



Se la sorgente sonora è di forma molto allungata, essa emette onde di forma cilindrica anziché sferica e la diminuzione di livello per ogni raddoppio della distanza è di 3 dB.

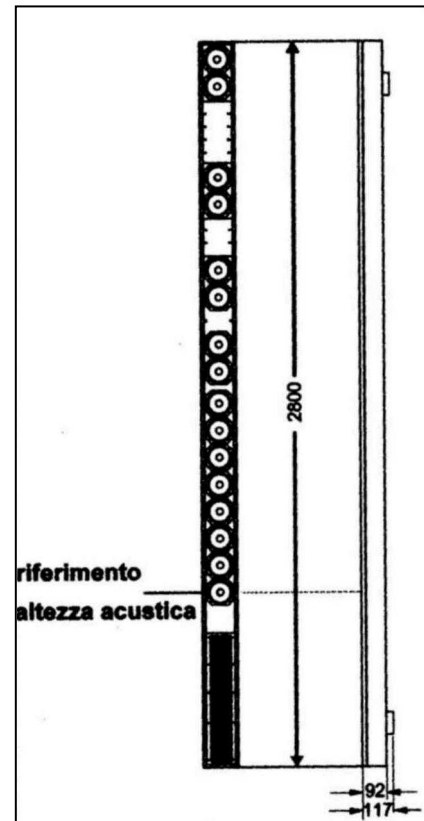


La relazione che lega il livello della pressione sonora ad una distanza D (denominato L_D) rispetto ad un livello di riferimento L_d , ad esempio il livello della pressione sonora alla distanza $d=1$ m dalla sorgente sonora è:

$$L_D = L_d + 20 \text{Log} \frac{d}{D}$$

Solo se la sorgente sonora è di forma molto allungata (es. Line array o diffusori acustici identici impilati uno sull'altro), la relazione precedente si riscrive nella seguente forma:

$$L_D = L_d + 10 \log \frac{d}{D}$$



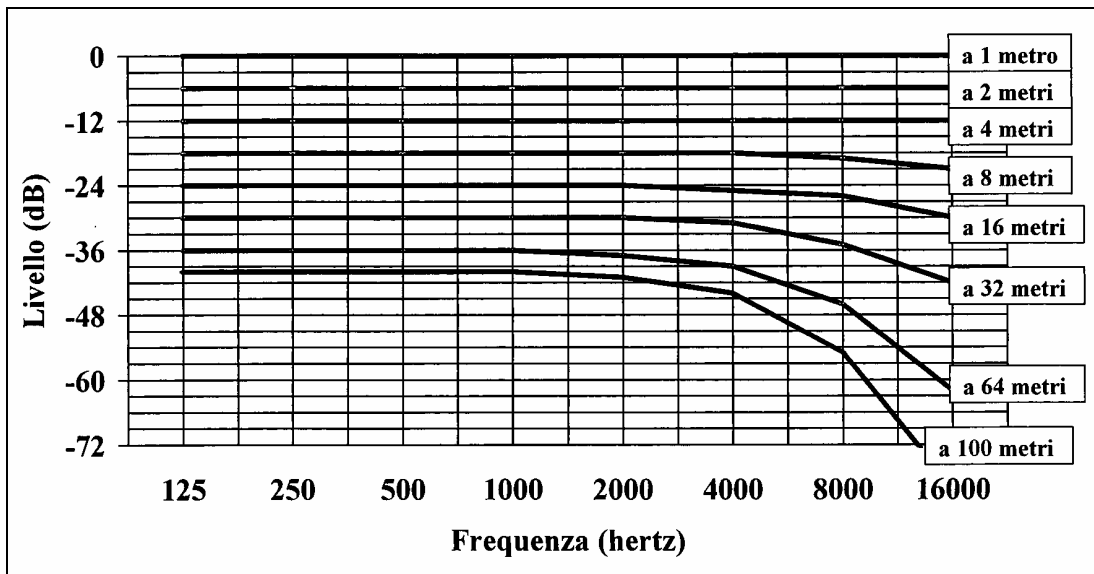
2) Effetto delle condizioni ambientali

Un suono si propaga con maggiore facilità con il caldo più che con il freddo. La velocità di propagazione del suono c aumenta all'aumentare della temperatura.

$$c = 20,1\sqrt{273 + ^\circ\text{C}}$$

Temperatura [°C]	Velocità [m/s]
-20	320
-10	326
0	332
+10	338
+20	344
+30	350
+40	356

L'umidità dell'aria attenua suoni di frequenze medio-alte, risultando insensibile per suoni di frequenze medio-basse.



ATTENUAZIONE DI LIVELLO IN FUNZIONE DELLA DISTANZA DA UNA SORGENTE SONORA
[TEMPERATURA 20°C, UMIDITÀ RELATIVA 60%]

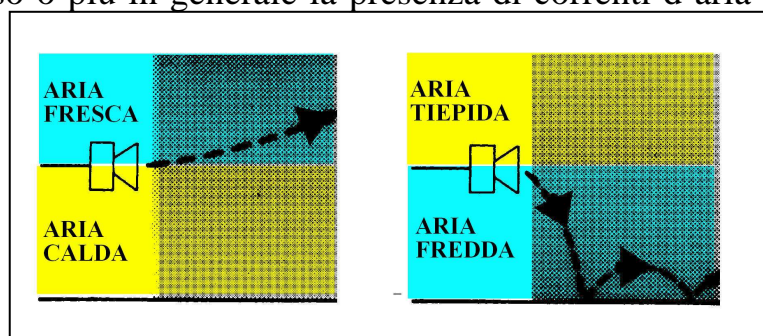


Grafici come il sono di importanza fondamentale quando si devono progettare sistemi di diffusione sonora per spazi molto estesi ovvero, come si suole dire, “a lunga gittata”. Difatti, il sistema stesso dovrà provvedere a compensare le perdite di livello delle componenti di frequenza medio-alta; in questo sta la cosiddetta “equalizzazione” dei livelli.

1) Effetto delle condizioni meteorologiche

Condizioni di tempo ventoso o più in generale la presenza di correnti d'aria provocano la variazione della temperatura con l'altezza dal suolo.

Ciò determina la deviazione della direzione di propagazione del suono per la dipendenza dalla temperatura della velocità con cui viaggia.



1) Al mare, d'estate: di giorno, la sabbia o i ciottoli della spiaggia sono scaldati dal sole. La temperatura al suolo è molto maggiore di quella dell'aria, oltretutto rinfrescata dalla brezza marina. Il suono viene dirottato verso l'alto e percorre distanze considerevoli.

2) In montagna, d'inverno: in tarda mattinata, il campo innevato presenta una temperatura minore di quella dell'aria. Il suono viene dirottato verso il basso e si attenua con maggiore facilità, ovvero percorre distanze più limitate del previsto.

Casi tipici del primo esempio si verificano nel corso del giorno dopo una intensa insolazione del terreno, il secondo è tipico si verifici all'alba di un giorno di sole o in presenza di neve sul terreno.

In una giornata assolata, se il terreno è gelato, la porzione superiore dell'onda sonora viaggia più velocemente di quella inferiore e questo a sua volta determina un'azione simile a quella di una lente, deviando l'onda verso il basso.

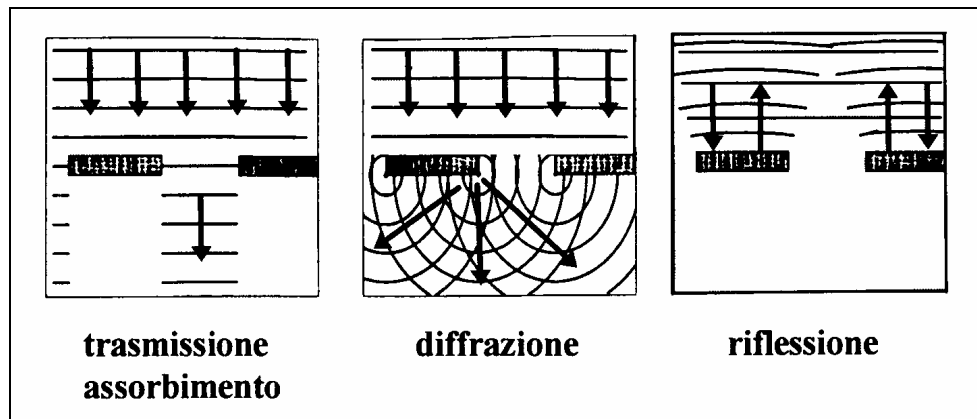
Il vento non è direttamente in grado di alterare velocità e direzione di propagazione di un'onda sonora, basti pensare che la velocità del suono è di oltre 1.200 km/h, contro gli 80-100 km/h di un vento molto forte.

La sua azione sul suono è invece tipicamente indiretta, in quanto il vento determina l'insorgenza di strati di aria a differenti temperature, ove l'onda sonora si propaga a velocità diverse.

Effetti di disturbo alla propagazione dei suoni

La presenza di muri, oggetti, ecc. lungo il percorso che separa la sorgente sonora dallo spazio destinato all'ascolto può essere di ostacolo per la corretta propagazione del suono.

Tipici effetti di disturbo: attenuazione di livello, deviazione della direzione di propagazione, interferenza, echi.



Se nel suo propagarsi un suono incontra un oggetto di dimensioni abbastanza grandi (in pratica dello stesso ordine di grandezza della sua lunghezza d'onda), una sua porzione più o meno consistente può essere riflessa, deviata di direzione o attenuata per effetto di tre fenomeni fisici noti come “riflessione”, “assorbimento” e “diffrazione”.

a) Effetti delle riflessioni

Gli effetti provocati dalle riflessioni sono principalmente:

- 1) Attenuazione di livello: una porzione di suono emesso in direzione dello spazio di ascolto viene deviato verso altre direzioni;
- 2) Interferenza: una porzione di suono emesso in direzioni divergenti da quelle utili viene ridiretto verso lo spazio d'ascolto andandosi a sovrapporre, con un certo ritardo, alla porzione di emissione “utile”.

b) Effetto dell'assorbimento

Se l'ostacolo su cui si infrange l'emissione sonora è assorbente, solo una porzione di essa sarà in grado di attraversarlo. L'effetto conseguente è una attenuazione di livello.

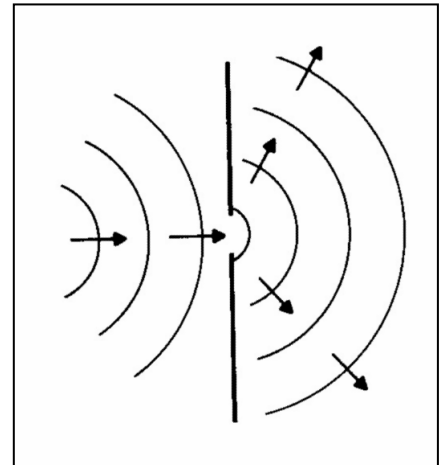
Più il materiale di cui è costituito l'ostacolo è assorbente, maggiore sarà la riduzione di livello cui il suono andrà soggetto.

c) Effetto della diffrazione

Se l'emissione sonora incontra un ostacolo, questa tende ad aggirarlo. Se l'ostacolo presenta delle aperture, una porzione di essa (le componenti

sonore di lunghezza d'onda del medesimo ordine di grandezza delle dimensioni delle aperture) le attraverserà subendo però un effetto di deviazione della direzione di propagazione.

La diffrazione può in tal modo determinare fenomeni di interferenza, con conseguenti attenuazioni o enfasi di livello.



In un ambiente chiuso, tutti i fenomeni esaminati potranno verificarsi nello stesso istante. Gli effetti “acustici” sul suono possono essere riassunti nei seguenti punti:

- 1) Risonanze, fenomeni che fanno risaltare, rinforzandoli di livello, suoni di determinate frequenze e che sono essenzialmente dovuti alla forma dell'ambiente;
- 2) Onde stazionarie, tipiche di ambienti di forma parallelepipedica o con almeno una coppia di ampie superfici piane e parallele, le quali riflettono avanti e indietro il suono. Determinano una distribuzione non uniforme del suono in ambiente;
- 3) Interferenze, tipici fenomeni dovuti a riflessioni singole (da una parete o un ostacolo) o multiple (riverberi). Possono comportare tutto un corollario di effetti, dalla cancellazione di un suono sino alla sua enfasi massima, passando per alterazioni timbriche nel caso di suoni complessi.
- 4) Echi, tipici soprattutto di ambienti chiusi di volume molto elevato (cattedrali, ecc.). Si tratta della replica a distanza di tempo di uno stesso suono.

Tempo di propagazione di una emissione sonora

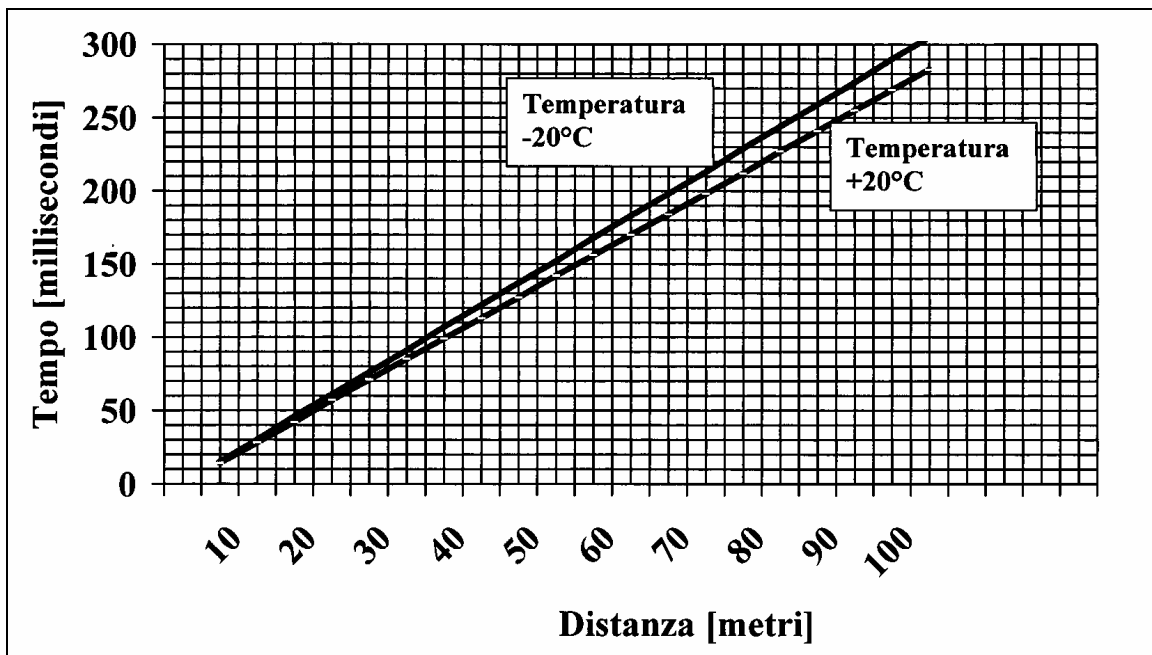
Oltre alla progressiva attenuazione di livello sonoro, con l'allontanamento da una sorgente si ha anche un incremento del tempo necessario affinché l'emissione sonora copra la distanza che separa la sorgente che l'ha generata dalla posizione considerata.

Il tempo di propagazione t_p , in secondi, è dato dal rapporto tra la distanza D da coprire, in metri, e la velocità di propagazione del suono c nelle condizioni ambientali in atto, espressa in metri al secondo.

$$t_p = \frac{D}{c}$$

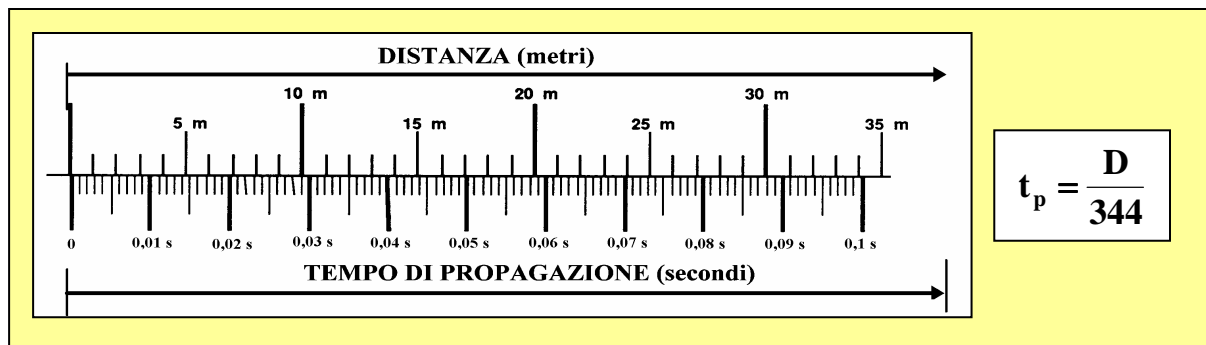
Per effetto della dipendenza della velocità di propagazione del suono dalla temperatura dell'aria, anche il tempo necessario al suono per coprire una certa distanza sarà dipendente da questa.

$$t_p = \frac{D}{20,1\sqrt{273 + \text{°C}}}$$



TEMPO DI PROPAGAZIONE DI UNA EMISSIONE SONORA IN FUNZIONE DELLA DISTANZA SORGENTE-ASCOLTATORE

Alla temperatura di 20 °C si ha:



Due emissioni sonore che convergono sul medesimo punto e che giungono in tempi differenti si dice siano *ritardate l'una rispetto all'altra*, mentre se giungono nello stesso istante si dice siano *allineate temporalmente*.

Sul piano percettivo, l'effetto della sovrapposizione di due emissioni sonore, di eguale frequenza, ritardate tra loro dipende dall'entità del ritardo e può andare dalla loro fusione in un unico suono rinforzato o indebolito (*interferenza*) a seconda dei casi, sino alla loro percezione come entità distinte, e si parla allora di *eco*. Ciò accade quando il ritardo tra le emissioni sonore supera i 50 ms.

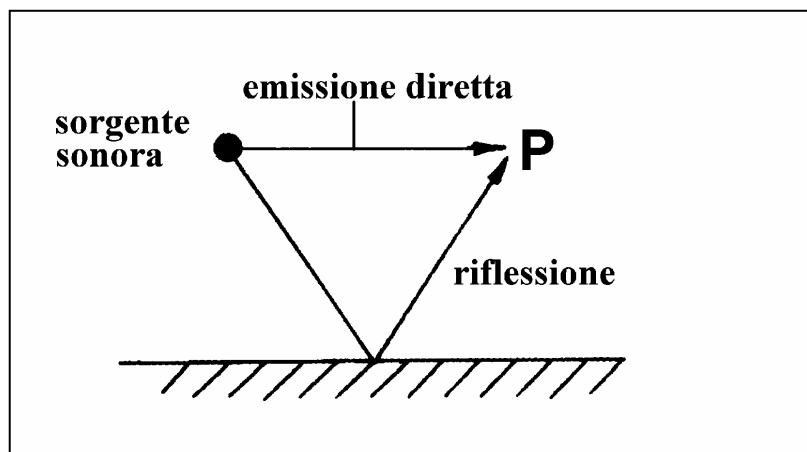
Se due emissioni ritardate sono generate nel medesimo istante dalla stessa sorgente sonora, è possibile stabilire la *differenza di cammino* ΔD da esse percorso partendo dal ritardo reciproco τ , essendo:

$$\Delta D = c \cdot \tau$$

in cui c è al solito la velocità di propagazione del suono.

Una delle possibili ragioni di un ritardo tra emissioni sonore di tali caratteristiche è la riflessione da una superficie di una di esse.

In tal caso la componente riflessa percorre un cammino più lungo della componente che perverrà nella posizione considerata seguendo un tragitto diretto, non spezzato.



Estensione della gamma dei suoni udibili

Due grandezze che spesso si rivelano utili per descrivere l'estensione di intervalli di frequenze sono la *decade* e l'*ottava*.



Una decade comprende un intervallo di frequenze che va da un limite minimo di frequenza F sino a dieci volte questo valore, ossia un intervallo $F \div 10F$.



Una ottava comprende viceversa un intervallo più ristretto, comprendendo tutte quelle frequenze che vanno da un limite inferiore di frequenza F sino ad un limite superiore di frequenza $2F$.

La gamma di frequenze percettibili da un essere umano varia da individuo ad individuo; per convenzione si considera come gamma audio quell'intervallo che va da una frequenza di 20 hertz sino ad una frequenza di 20.000 hertz.

La *gamma audio* o *banda audio* è di conseguenza costituita da un intervallo di frequenze che può essere quantificato in tre decadi:

prima decade	20 ÷ 200 hertz
seconda decade	200 ÷ 2.000 hertz
terza decade	2.000 ÷ 20.000 hertz

o anche, approssimativamente, in dieci ottave:

prima ottava	16 ÷ 32 hertz
seconda ottava	32 ÷ 64 hertz
terza ottava	64 ÷ 128 hertz
quarta ottava	128 ÷ 256 hertz
quinta ottava	256 ÷ 512 hertz
sesta ottava	512 ÷ 1.024 hertz
settima ottava	1.024 ÷ 2.048 hertz
ottava ottava	2.048 ÷ 5.096 hertz
nona ottava	5.096 ÷ 10.182 hertz
decima ottava	10.182 ÷ 20.364 hertz



In Acustica musicale, la frequenza di partenza della gamma di riferimento è centrata sui 16 Hz invece che sui 20 Hz, dunque la prima ottava “utile” coincide con l'intervallo di frequenze che va da 16 a 32 Hz.

Frequenze inferiori ai 20 Hz si dicono *subsoniche* o anche *infrasoniche* e frequenze superiori a 20 kHz si dicono *supersoniche*.

Non di rado, per analisi acustiche ed elettroacustiche, ci si riferisce non solo a ottave ma anche a porzioni di ottave (es. 1/3 ottava, ecc.).

Per individuare le frequenze interessate è necessario conoscere la *frequenza centrale* dell'intervallo che, come dice la sua denominazione, è la frequenza posta al centro dell'ottava di interesse.

Frequenze centrali cui è consuetudine fare riferimento sono:

125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000 Hz

Limite inferiore, limite superiore e larghezza di banda sono date da:

Frequenza inferiore dell'intervallo: $F_{\text{inf}} = \frac{2}{3} F_c$

Frequenza superiore dell'intervallo: $F_{\text{sup}} = 2F_{\text{inf}} = \frac{4}{3} F_c$

Larghezza dell'intervallo (banda passante) $\Delta F = F_{\text{sup}} - F_{\text{inf}} = \frac{2}{3} F_c$

F_{centrale} (Hz)	$F_{\text{inferiore}}$ (Hz)	$F_{\text{superiore}}$ (Hz)	$\Delta F = F_{\text{sup}} - F_{\text{inf}}$ (Hz)
125	83	167	83
250	167	333	167
500	333	667	333
1.000	667	1.333	667
2.000	1.333	2.667	1.333
4.000	2.667	5.333	2.667
8.000	5.333	10.667	5.333

Qualora il riferimento sia ad un intervallo di frequenze più stretto di un'ottava, ad esempio 1/3 di ottava, per ottenere la frequenza inferiore e quella superiore è necessario dividere per tre l'ottava, per cui:

Larghezza dell'intervallo (banda passante) $\Delta F = F_{\text{sup}} - F_{\text{inf}} = \frac{2}{9} F_c$

Dopodiché sarà:

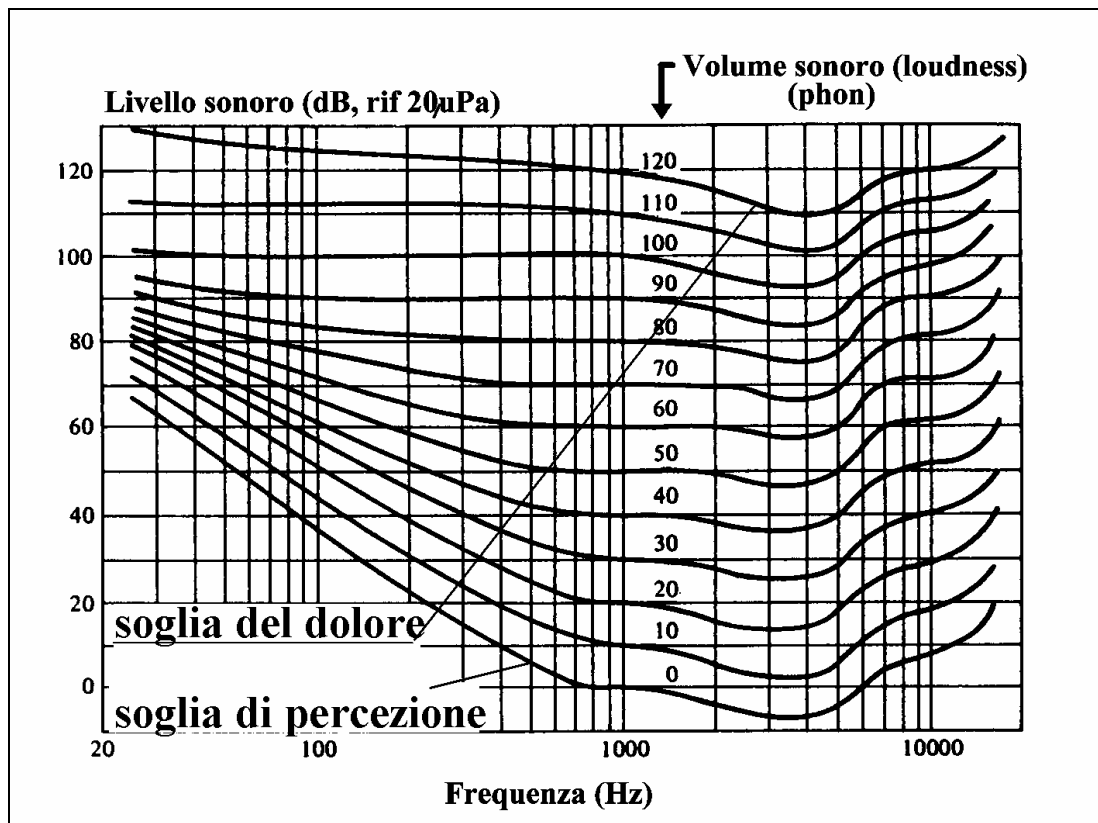
Frequenza inferiore dell'intervallo: $F_{\text{inf}} = F_c - \frac{1}{2} \Delta F = \frac{8}{9} F_c$

Frequenza superiore dell'intervallo: $F_{\text{sup}} = F_c + \frac{1}{2} \Delta F = \frac{10}{9} F_c$

Caratteristiche di sensibilità dell'apparato uditivo umano

Salvo che in presenza di livelli sonori molto elevati, l'apparato uditivo di un essere umano non è ugualmente sensibile a suoni di diversa frequenza, a parità di intensità degli stessi.

A parità di livello di pressione sonora, l'essere umano percepisce con maggiore facilità suoni di media frequenza piuttosto che suoni acuti o gravi. Detto in altre parole, la soglia di percettibilità per suoni acuti o gravi è superiore alla soglia di percettibilità per suoni di frequenza intermedia.



ANDAMENTO DELLA SENSIBILITÀ DELL'APPARATO Uditivo DI UN ESSERE UMANO IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA E DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA (FLETCHER E MUNSON, 1933).

La curva più in basso fornisce l'andamento della *soglia di sensibilità* dell'apparato uditivo umano in funzione della frequenza dell'emissione sonora.

Si deduce che per avere la prima percezione di un suono a 100 hertz è necessario incrementare il livello di pressione sonora di quasi 40 dB rispetto al livello di pressione che consente la prima percezione di un suono di frequenza 1.000 hertz (cento volte superiore, in termini assoluti).

All'opposto, per percepire un suono di frequenza pari a 10.000 hertz serve un aumento di livello pari a 10 dB rispetto al livello di pressione necessario per un suono di frequenza 1.000 hertz, ovverosia oltre tre volte il valore originario.

Sempre rispetto al riferimento a 1 kHz, un suono di frequenza pari a 4.000 hertz necessita di un livello sonoro inferiore di circa 8 dB, cioè più che dimezzato.

Le varie curve del grafico di Fletcher e Munson sono ricavate per successivi incrementi di 10 dB a partire dal livello sonoro di riferimento (20 micropascal a 1 kHz). Ogni curva è definita per uniformità di sensazione uditiva alle varie frequenze, ed a ciascuna di esse viene associata ad un valore in *phon*, una unità di misura appositamente introdotta per quantificare l'intensità della sensazione di ascolto (in inglese *loudness level*).

Si noti che all'aumentare dei livelli sonori le curve tendono a divenire sempre meno arcuate soprattutto verso l'estremo inferiore della banda audio.

A livelli sonori elevati, prossimi alla cosiddetta soglia del dolore (120 dB circa a 1 kHz), l'orecchio umano presenta differenze di sensibilità alle varie di frequenze quantificabili in soli 10 dB. Per contro, a livelli sonori appena percettibili, le differenze di sensibilità raggiungono quasi i 60 dB.

Livelli sonori dell'ordine prossimi alla soglia del dolore possono determinare danni permanenti all'udito.

Per quanto attiene all'analisi percettiva di fenomeni sonori reali, la curva da prendere come riferimento è dettata dall'entità del livello sonoro del fenomeno.

Ad esempio, nel colloquio tra due persone il livello sonoro medio è pari a circa 70 dB, quindi la curva di interesse è quella a 70 phon. In discoteca, il livello sonoro raggiunto si aggira intorno ai 100 dB, per cui la curva di riferimento è quella a 100 phon, e così via.

In termini relativi, è possibile fare riferimento a tabelle che indicano la variazione della capacità percettiva, espressa come differenza in decibel, tra un punto di riferimento (es. tipico la frequenza di 1 kHz) e la frequenza di interesse.

Frequenza (Hz)	Livello (dB)	Frequenza (Hz)	Livello (dB)	Frequenza (Hz)	Livello (dB)
30	+ 26	500	- 4	7.000	+ 3
40	+ 20	600	- 4	8.000	+ 6
50	+ 15	700	- 3	9.000	+ 7
60	+ 13	800	- 2	10.000	+ 6
70	+ 11	900	- 1	12.000	0
80	+ 9	1.000	0		
90	+ 7	2.000	- 3		
100	+ 6	3.000	- 7		
180	0	4.000	- 8		
300	- 4	5.000	- 5		
400	- 4	6.000	0		

ANDAMENTO DELLA CURVA DI LOUDNESS PER UN LIVELLO SONORO DI 70 dB SPL A 1 kHz

Frequenza (Hz)	Livello (dB)	Frequenza (Hz)	Livello (dB)	Frequenza (Hz)	Livello (dB)
30	+ 24	500	- 4	7.000	+ 3
40	+ 17	600	- 3	8.000	+ 6
50	+ 13	700	- 2	9.000	+ 5
60	+ 11	800	- 1	10.000	+ 5
70	+ 9	900	- 0,5	12.000	0
80	+ 7	1.000	0		
90	+ 6	2.000	- 3		
100	+ 5	3.000	- 7		
180	0	4.000	- 8		
300	- 4	5.000	- 5		
400	- 4	6.000	0		

ANDAMENTO DELLA CURVA DI LOUDNESS PER UN LIVELLO SONORO DI 80 dB SPL A 1 kHz

Da questa ultima tabella si ricava ad esempio che un suono di livello pari a 80 dB alla frequenza di 1 kHz ed un suono di livello pari a 85 dB alla frequenza di 100 Hz danno la sensazione di avere lo stesso “volume”.

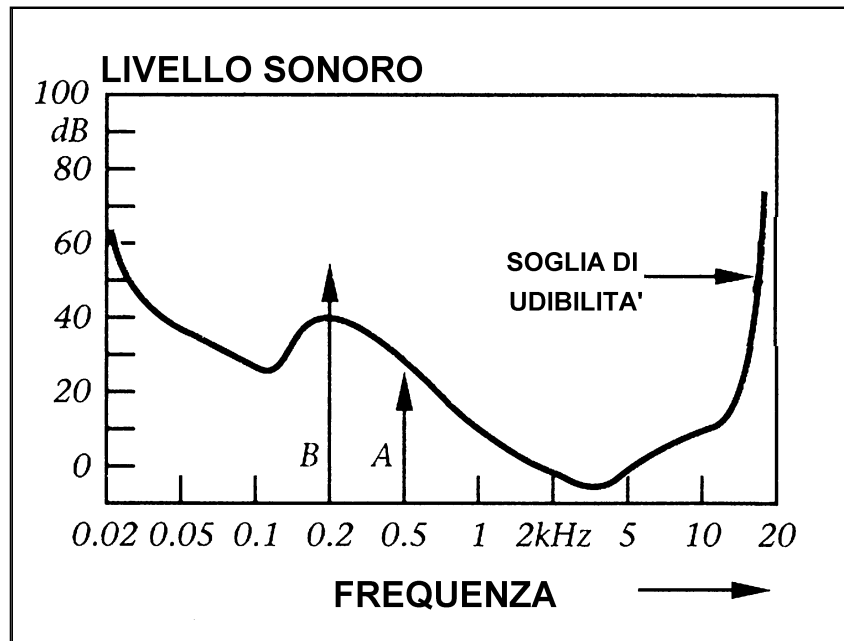
Il controllo “loudness” presente in molti amplificatori audio ha il compito di rendere più intense le componenti sonore di frequenze gravi ed acute rispetto a quelle di frequenze intermedie. Si tratta pertanto di una *compensazione fisiologica*. Come tale dovrebbe essere regolabile a seconda del livello di ascolto. In genere invece l’entità dell’intervento è prefissata, ciò che la rende in molti casi inutile se non addirittura controproducente.

L'effetto di mascheramento

Le curve di Fletcher e Munson subiscono sensibili modificazioni laddove l'emissione sonora sia costituita di almeno due componenti di frequenza non molto differenziate e di livello diverso.

In tal caso, per un fenomeno noto come *effetto di mascheramento*, la curva di sensibilità si modificherà rigonfiandosi nell'intorno della frequenza del suono più intenso riducendo conseguentemente, nel contempo, la sensibilità per tutto un intervallo di frequenze.

Se la seconda componente sonora (A in figura), per ipotesi di livello inferiore alla precedente (B in figura), ha una frequenza ad essa prossima, essa potrà risultare inaudibile anche se il suo livello è in valore superiore a quello proprio della curva di percezione, ovverosia se in presenza di questa sola componente il suo suono risulterebbe udibile ad un ascoltatore.



Vari sistemi "moderni" di digitalizzazione del segnale audio, come ad esempio l'ormai celebre formato MP3 ed il Minidisc della Sony basano le proprie procedure di selezione dei dati utili sulla curva di sensibilità e sull'effetto di mascheramento.

Percezione della direzione di provenienza dei suoni

Grazie al fatto che il nostro apparato uditivo è costituito di due orecchi, è possibile distinguere la direzione di provenienza di un suono, in modo da poter localizzare la posizione della sorgente sonora che lo emette .

Il meccanismo tramite il quale il nostro cervello ricostruisce una simile informazione è insito nel confronto tra quanto percepito dai due orecchi. Tale confronto avviene tanto in intensità quanto nel cosiddetto *tempo d'arrivo*.

Se una sorgente sonora si trova di fronte ad un ascoltatore, i due orecchi saranno soggetti al medesimo livello sonoro e l'emissione sonora raggiungerà i due orecchi nel medesimo tempo. Ciò è sufficiente al nostro cervello, anche ad occhi chiusi, a stabilire la provenienza frontale del suono.

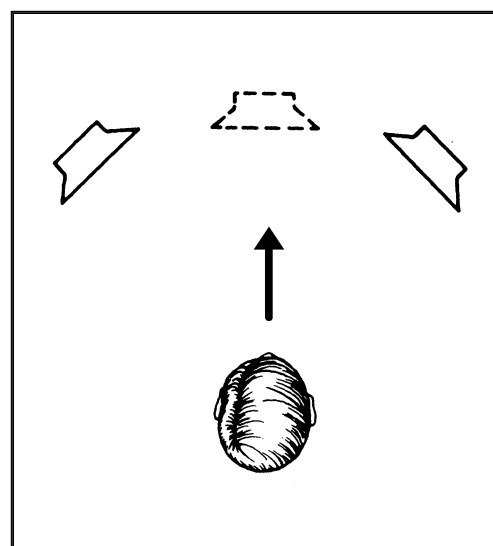
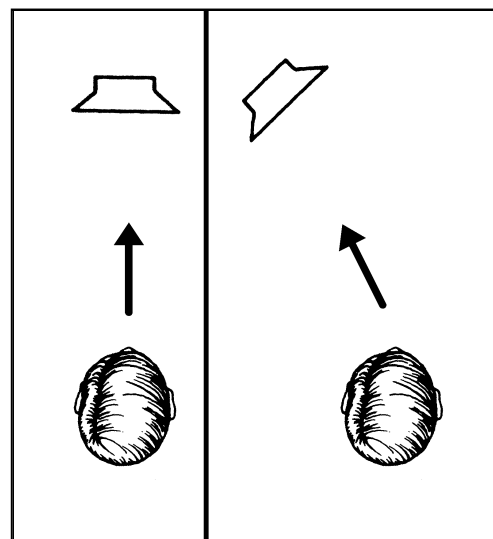
Se viceversa la sorgente è spostata verso sinistra, l'orecchio sinistro percepirà un livello sonoro più elevato ed inoltre con un certo anticipo sull'orecchio destro.

Tali informazioni consentono di risalire, con un buon grado di precisione, alla direzione di provenienza dell'onda sonora.

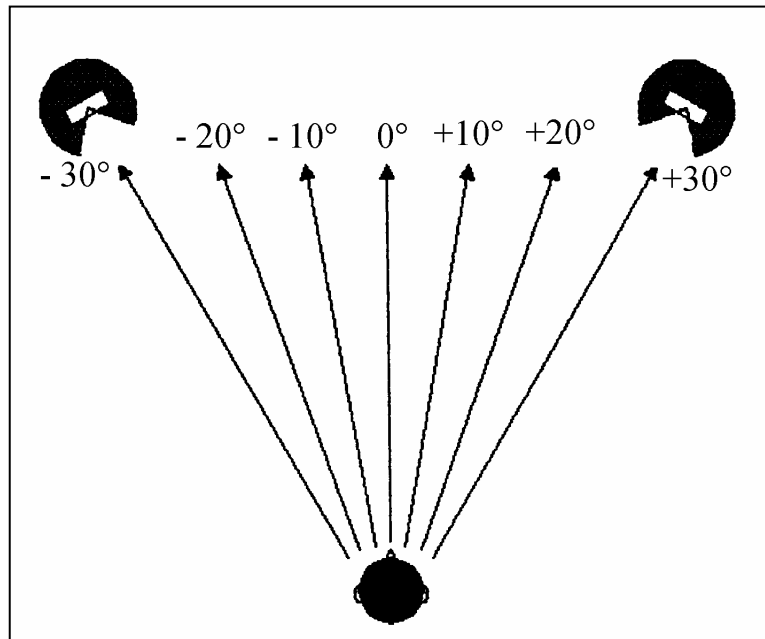
Questa importante proprietà dell'organo uditivo umano può essere sfruttata finché la sorgente sonora si trova entro una certa distanza (dipendente dall'intensità del suono da essa emesso, dall'ambiente in cui si trova e così via), dopodiché la ricostruzione della direzione di provenienza risulterà sempre più difficoltosa.

Quando di fronte all'ascoltatore sono presenti due sorgenti sonore, poste alla medesima distanza dall'ascoltatore, che emettono in contemporanea lo stesso suono, la sensazione sarà quella di una provenienza del suono da una unica sorgente da una direzione intermedia tra le due proprie delle sorgenti in funzione.

Si parla allora di *sorgente fantasma* o *canale fantasma* ("phantom source" o "phantom channel").

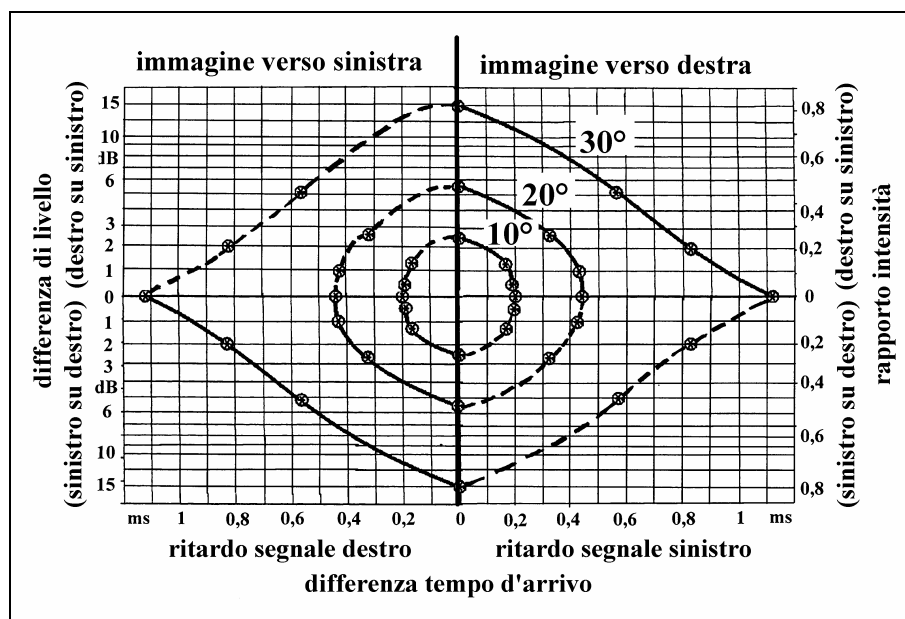


Se si fa in modo che una delle due sorgenti emetta con un livello sonoro superiore oppure (o nel contempo) o con un maggior ritardo rispetto all'altra, l'immagine della sorgente "fantasma" tenderà a spostarsi verso tale sorgente, in misura tanto maggiore quanto più grande è lo sbilanciamento tra le emissioni sonore.



LA CONFIGURAZIONE D'ASCOLTO IN STEREOFONIA E' A TRIANGOLO EQUILATERO E PREVEDE CHE L'ASCOLTATORE SI DISPONGA A PARI DISTANZA DAI DIFFUSORI ACUSTICI DESTRO E SINISTRO.

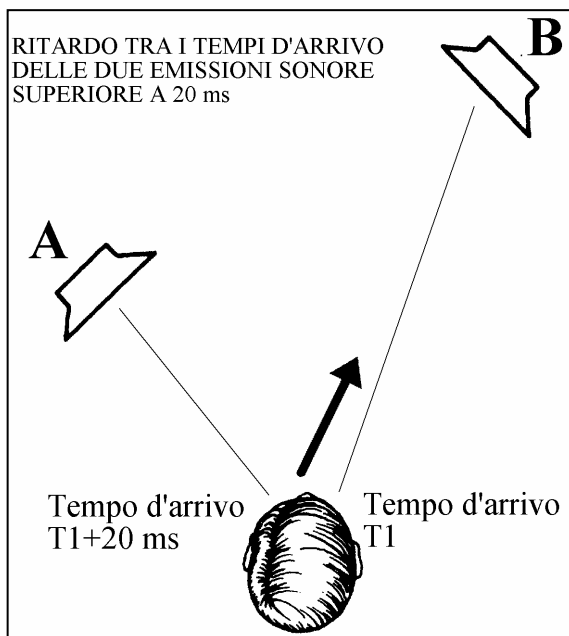
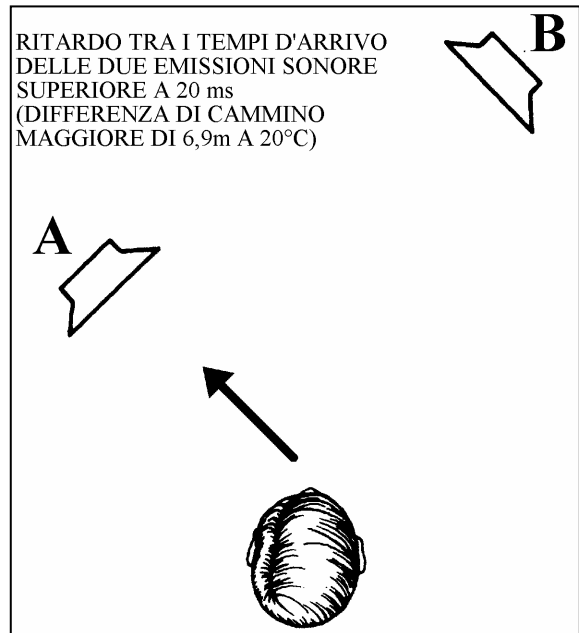
Com'è noto, tutti questi effetti sono sfruttati nelle tecniche di registrazione e di riproduzione sonora in stereofonia.



Lo stesso effetto si ha allontanando fisicamente una delle due sorgenti: l'immagine della sorgente "fantasma" tenderà a spostarsi verso la sorgente più vicina per effetto della diminuzione di intensità e dell'aumento del tempo d'arrivo dell'emissione sonora propria della sorgente più lontana.

Se il ritardo conseguente a questo allontanamento supera i 20 millisecondi, il cervello ricostruirà come direzione di provenienza quella tipica della sorgente sonora più vicina (A in figura) ed il livello sonoro apparente sarà dato dalla somma dei contributi delle due sorgenti (A+B).

Questo fenomeno è noto come *effetto precedenza*.

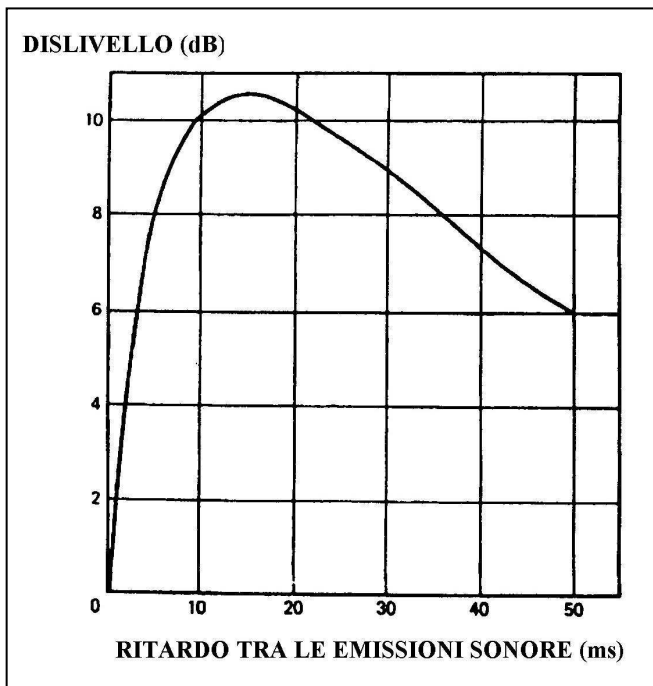


E' interessante notare che se si fa in modo da ritardare l'emissione dalla sorgente A in modo che l'emissione sonora dalla sorgente B pervenga alle orecchie dell'ascoltatore con un anticipo di 20 ms o maggiore, l'immagine virtuale si sposterà verso la sorgente B.

Il ritardo con cui deve essere inviato il segnale alla sorgente A deve essere tale da compensare la maggiore distanza che il suono emesso dalla sorgente B deve percorrere rispetto a quello prodotto dalla sorgente A, il tutto incrementato dei 20 ms richiesti.

Questo fenomeno è stato studiato con maggiore accuratezza da Haas, ragione per la quale si tende a confondere effetto precedenza con *effetto Haas*, pur non sottintendendo esattamente gli stessi concetti.

Difatti, se le emissioni sonore dalle sorgenti A e B non sono di pari livello, si ha tutto un corollario di conseguenze.



Il grafico a lato lega il ritardo tra le emissioni sonore, percepite in una certa posizione, ed il dislivello che le stesse devono possedere per dare la sensazione di un pari volume sonoro (*effetto Haas*).

Si sottolinea che l'esperienza cui il grafico si riferisce era teso ad individuare la relazione tra le emissioni affinché l'effetto fosse la percezione di entrambe le sorgenti come entità distinte; in tale circostanza, l'ascoltatore ha la sensazione che il suono provenga da una posizione compresa tra le

posizioni fisiche delle due sorgenti.

Ad esempio, due sorgenti distanziate tra loro (sia fisicamente come anche artificialmente) in modo che le rispettive emissioni siano ritardate l'una rispetto all'altra di 20 ms, daranno l'impressione di suonare ugualmente forte se la differenza di livello sonoro è pari a circa 10 dB a favore di quella ritardata.

Numericamente, date due sorgenti sonore A e B, se la sorgente che fa pervenire la sua emissione all'ascoltatore con un anticipo di 20 ms sull'altra genera un livello sonoro di 70 dB_{SPL} nella posizione di ascolto P, la seconda sorgente sonora, per dare l'impressione di suonare altrettanto forte, dovrà produrre un livello sonoro di 70+10=80 dB_{SPL} nella medesima posizione P.

Da tutto ciò si evince che l'effetto precedenza può essere visto come una applicazione particolare dell'effetto Haas.

Effetto di precedenza ed effetto Haas vengono sfruttati nei sistemi di rinforzo sonoro quando i diffusori acustici principali ("sorgenti primarie") non sono in grado di far pervenire un livello sonoro accettabile agli ascoltatori più lontani ed allora si aggiungono diffusori acustici ausiliari (diffusori acustici "di riporto" o "sorgenti secondarie") cui viene applicato un segnale di ingresso di livello opportuno e ritardato quel tanto che basta a mantenere la sensazione di direzione di provenienza dei suoni coerente con la posizione delle sorgenti primarie.

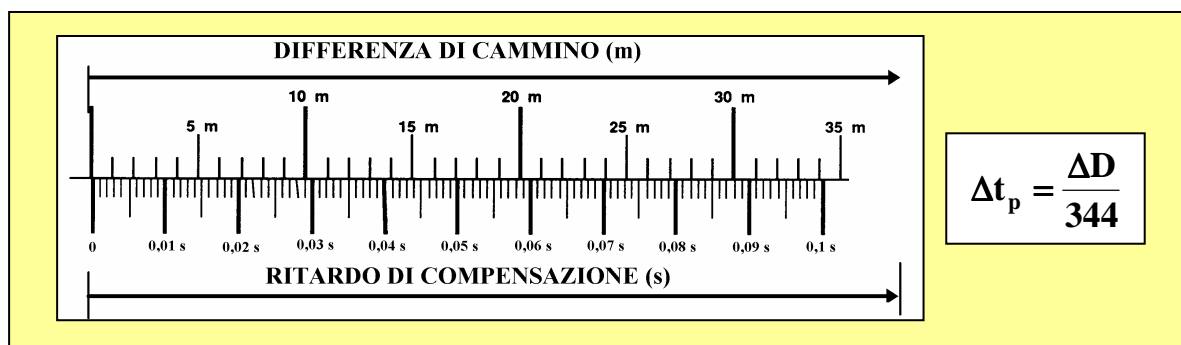
Poiché l'obiettivo non è che le due sorgenti sonore suonino ugualmente forte, ma che le rispettive emissioni sonore si fondano dando luogo ad un livello sonoro del valore desiderato e, nel contempo, che la direzione di provenienza

del suono percepita dall'ascoltatore sia quella propria della sorgente sonora primaria, i valori di dislivello letti sul grafico precedente dovranno essere diminuiti di 4-6 dB.

Prima della correzione per effetto Haas, i diffusori acustici primario e secondario dovranno essere allineati temporalmente, ovvero dovrà essere compensata la differenza di cammino ΔD introducendo un ulteriore ritardo Δt_p sul segnale inviato al diffusore acustico di riporto (sorgente secondaria).

$$\Delta t_p = \frac{\Delta D}{20,1\sqrt{273 + ^\circ C}}$$

Alla temperatura di 20 °C si ha:

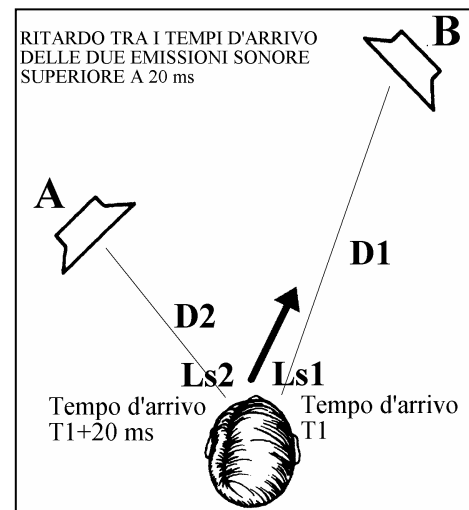


Esempio. La sorgente primaria B, a distanza $D_1=50\text{m}$ dalla posizione di ascolto P, produce ivi un livello sonoro di $L_{s1}=70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Si vuole elevarlo a $73 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ mediante uso di una sorgente secondaria A, a distanza $D_2=10 \text{ m}$ da P.

1) livello sonoro. Per aumentare di 3 dB il livello sonoro prodotto dalla sorgente B, la sorgente A dovrà produrre in P un livello sonoro di pari entità, cioè $L_{s2}=70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, ed un livello sonoro a 1m di $L_{s2@1m}=70+20\text{Log}D_2$, ossia 90dB_{SPL} , al fine di compensare l'attenuazione dovuta alla distanza D_2 .

2) ritardo. Perché si verifichino le condizioni previste dall'effetto precedenza, l'emissione primaria deve pervenire all'ascoltatore con un anticipo di 20 millisecondi su quella secondaria. Dunque il ritardo da impartire al segnale inviato alla sorgente secondaria vale:

$$\Delta t_p = \frac{D_1 - D_2}{344} 1.000 + 20 = 136\text{ms}$$



in cui 116 ms servono per l'allineamento temporale delle due sorgenti A e B, mentre i restanti 20 ms sono richiesti perché si manifesti l'effetto precedenza.

Caratteristiche di un programma musicale

Per analizzare con maggior facilità le caratteristiche del suono emesso da uno strumento musicale, è utile provvedere alla sua trasformazione in segnale elettrico.

Il segnale elettrico che si origina dalla conversione di una emissione sonora, ottenuta disponendo nella posizione prescelta un microfono di caratteristiche opportune, viene comunemente denominato *segnale audio*.

Analizzato nel dominio della frequenza (ad esempio impiegando un analizzatore di spettro) un segnale audio presenta una propria *distribuzione spettrale*, più semplicemente detta *spettro*, continuamente variabile nel tempo, mentre se analizzato nel dominio del tempo (ad esempio impiegando un oscilloscopio) esso presenta una apparentemente indecifrabile successione di frastagliature di livello più o meno ampio, cui si attribuisce il nome di *andamento temporale*.

Si consideri un esempio “elementare” di segnale audio, quello rappresentante l’esecuzione di una nota mediante uno strumento musicale; esso è caratterizzato da tre fasi distinte, cui possono essere attribuite, in ordine cronologico, le seguenti denominazioni:

- a) un *transitorio di attacco*, proprio dei primi istanti dall’inizio dell’esecuzione, ovvero dalla prima apparizione di un segnale elettrico;
- b) una *fase di quasi-stazionarietà*, il segnale musicale tende a evidenziare stabilmente alcuni suoi tratti distintivi;
- c) un *transitorio di decadimento*, il segnale si smorza sino ad azzerarsi.

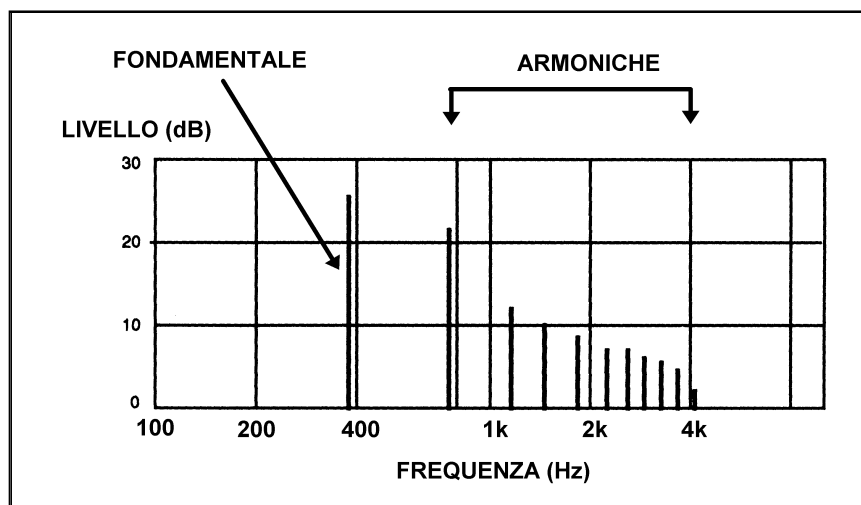
La durata di ciascuna di queste fasi non è mai precisamente quantificabile, ma lo è solo con un certo grado di approssimazione ed inoltre è estremamente variabile da strumento a strumento.

Per la completa comprensione delle caratteristiche e delle peculiarità del suono di uno strumento musicale si è soliti procedere ad un esame specifico per ognuna delle tre fasi, anche se indubbiamente attacco e fase di quasi-stazionarietà rivestono una importanza più spiccata di quella attribuibile al transitorio di decadimento.

Supponendo di “fotografare” un segnale musicale in un certo istante nella sua fase di quasi-stazionarietà ed analizzandolo nel dominio della frequenza, si può constatare la presenza di più componenti di vario livello e diversa frequenza.

In genere, la componente di frequenza inferiore viene denominata *fondamentale* o *armonica principale* o ancora *prima armonica* (nel lessico dei musicisti si parla invece di *suono armonico principale*), le altre componenti, che hanno la particolarità di presentare frequenze ottenibili moltiplicando un numero intero per la frequenza della fondamentale, sono dette *armoniche* (*suoni armonici* o

ipertoni nel lessico dei musicisti) e vengono classificate a seconda del loro “ordine di apparizione”.



DISTRIBUZIONE SPETTRALE DELLE VARIE COMPONENTI SONORE PER UNA NOTA DI SOL SUONATA CON UN FLAUTO TRAVERSO

Così, la seconda armonica presenta una frequenza pari a due volte quella della fondamentale, la terza armonica presenta una frequenza pari a tre volte quella della fondamentale, e così via.

In realtà, non sempre tutto ciò trova un puntuale riscontro. Esistono casi di strumenti musicali, come ad esempio il pianoforte, in cui la relazione tra fondamentali ed armoniche è meno precisa; in certi strumenti a percussione, poi, il suono è composto anche di componenti di frequenza inferiore alla fondamentale, componenti cui viene assegnato il nome di *subarmoniche*.

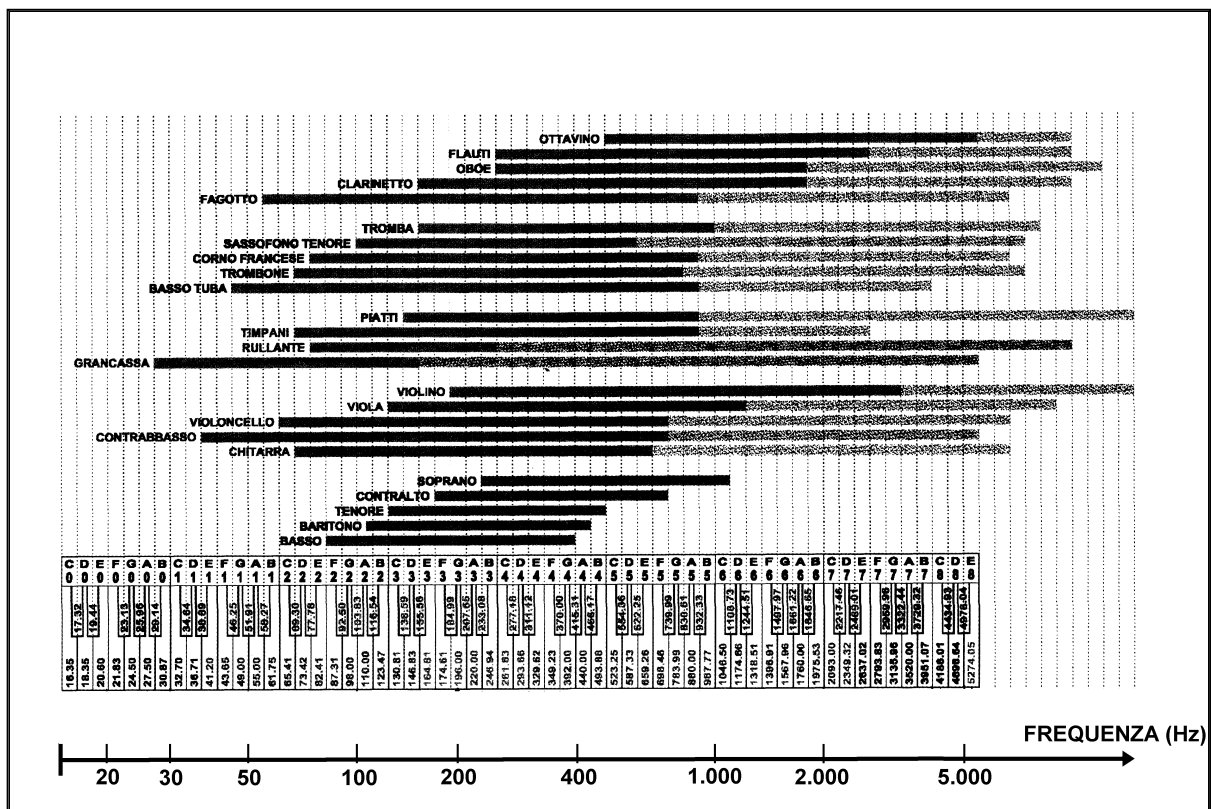
Tutto questo induce a concludere che il contenuto spettrale di un segnale musicale “elementare” nel senso già precisato può essere visto come costituito di una fondamentale e di più componenti di frequenza non necessariamente correlata con quella della fondamentale. A queste ultime l’Acustica riserva la denominazione generica di *parziali*.

In definitiva, il suono di ogni strumento musicale è caratterizzato da una gamma di componenti sonore la cui frequenza può essere racchiusa con soddisfacente approssimazione entro un certo intervallo.

Altre importanti caratteristiche del suono di uno strumento musicale sono:

- la *dinamica*, intesa come il rapporto, espresso in decibel, tra il massimo ed il minimo valore di pressione sonora rilevabile a distanza opportuna. Al di là di quello che si può essere portati a credere, la dinamica di uno strumento musicale non è mai molto elevata. Ciò che invece è molto elevata in certi strumenti (soprattutto a percussione) è la massima pressione sonora prodotta.

- l'attacco, in quanto estremamente variabile da strumento a strumento e come tale di per sé essenziale nel processo di riconoscimento dello strumento musicale; attacchi molto rapidi sono di norma accompagnati da intense parziali di ordine e frequenze elevate, i cui livelli possono superare di svariate volte quelli tipici delle medesime componenti osservati nella successiva fase di quasi-stazionarietà.
- lo smorzamento, anch'esso non di rado essenziale nel processo di riconoscimento dello strumento musicale



Generalmente, peraltro, un programma musicale vede la partecipazione di più strumenti musicali allo stesso tempo, dunque molte delle grandezze precedentemente introdotte subiscono importanti modificazioni o perdono addirittura di significato pratico.

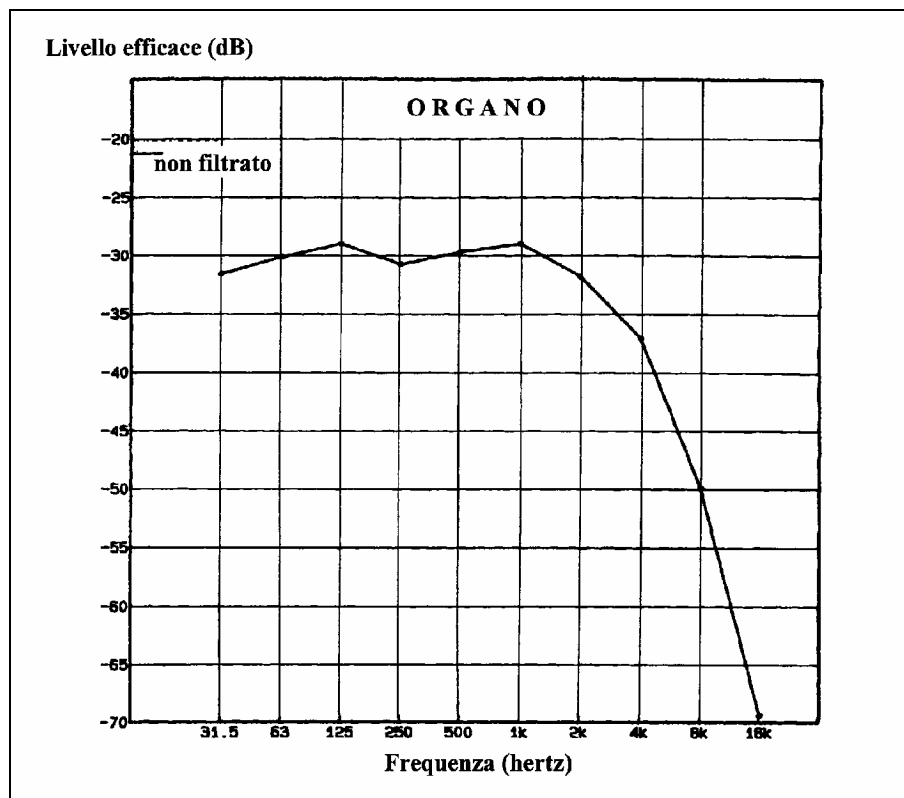
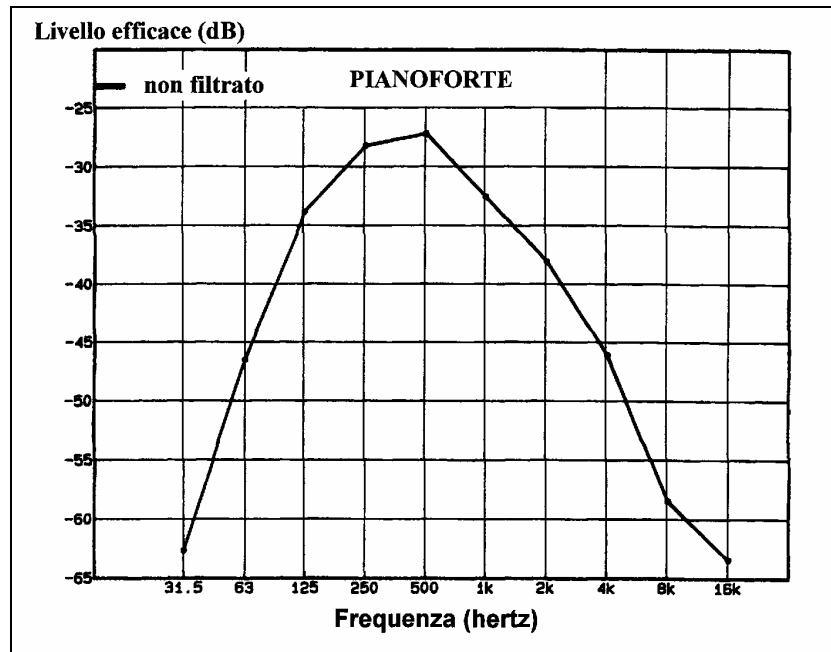
La dinamica, per esempio, può ampliarsi in modo particolare, in quanto si incrementa il divario tra minimo e massimo livello. Per fare un esempio, la dinamica di un tamburo è di poche decine di decibel ma se a suonare con esso è un triangolo, la dinamica dell'insieme può raggiungere facilmente i 120 dB.

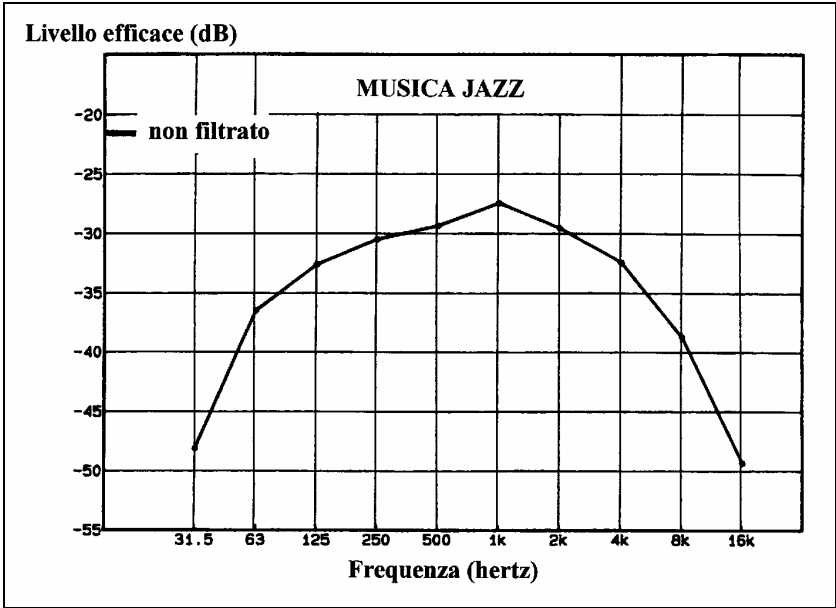
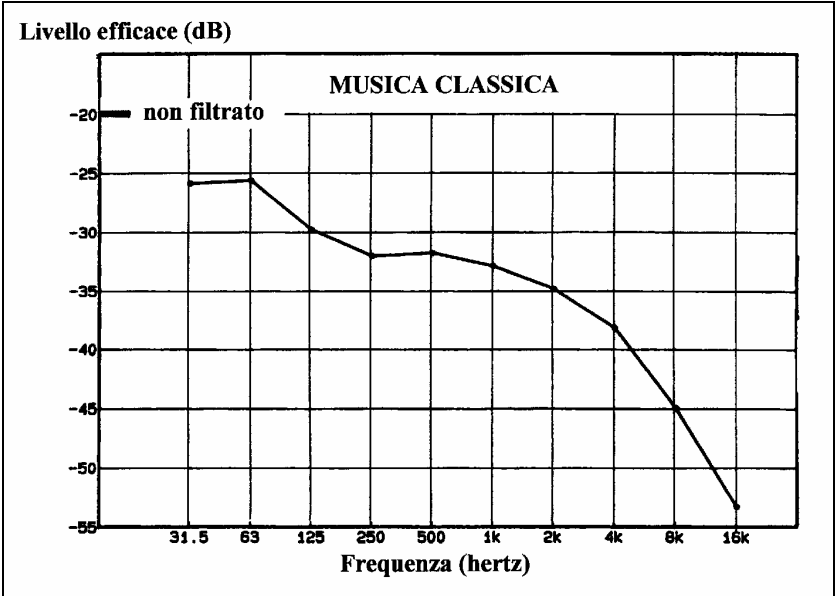
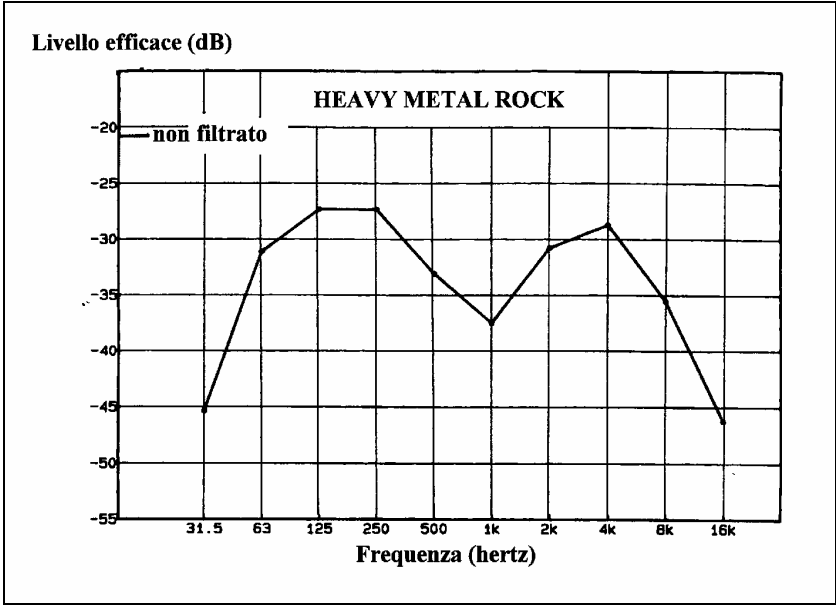
Molto importante diviene la *gamma di frequenze*, una sorta di finestra in cui sono contenute tutte le componenti, fondamentali ed armoniche, degli strumenti musicali dell'insieme considerato.

Distribuzione spettrale media di programmi musicali

Il contenuto in frequenza, o *distribuzione spettrale*, di un programma musicale dipende dal genere di musica e dal tipo di strumenti musicali impiegati.

Poiché il livello delle varie componenti sonore varia nel tempo, la distribuzione spettrale si modifica istante per istante. E' comunque possibile stabilire un andamento medio del livello sonoro in funzione della frequenza, spesso utile per comprendere i requisiti di un eventuale impianto di amplificazione.





Relazione tra fattori del suono e grandezze fisiche

Le peculiarità del suono di uno strumento musicale possono essere descritte sia in termini di aspetti legati alla sua percezione, sia in termini di osservazioni nei domini del tempo e della frequenza.

Ci si può chiedere a questo punto se esista la possibilità di collegare in via diretta ed inequivocabile le sensazioni uditive con precise osservazioni fisiche. La risposta, in senso assoluto, è negativa: in ogni caso si dovrà accettare una certa dose di approssimazione.

La sensazione di altezza di un suono è tipicamente legata alla frequenza della fondamentale. Più acuto è il suono percepito, più elevata è la frequenza della sua fondamentale

Ciò è tanto più vero se la frequenza della fondamentale è compresa nell'intervallo di frequenze per le quali la sensibilità dell'orecchio umana è massima.

Esistono però strumenti musicali dal suono ingannevole.

Il flauto dolce basso, per esempio, dà l'impressione di suonare un'ottava più in basso di quanto la frequenza della sua fondamentale non indichi; in tal caso l'errore di valutazione dell'orecchio ammonta ad una non trascurabile percentuale: il 100%.



La sensazione di volume di un suono, percepito in un ambiente ed in una posizione prestabilita, è in genere legata al valore efficace del livello della pressione sonora rilevato nel medesimo punto.

Il grado di approssimazione aumenta all'aumentare della complessità del suono percepito: suoni costituiti di una fondamentale e di un gran numero di armoniche sono quelli più difficilmente misurabili in termini di volume sonoro.

Ancora una volta, una stima risulta meno ardua se le frequenze delle armoniche (compresa la prima, cioè la fondamentale) sono comprese nell'intervallo di frequenze per le quali la sensibilità dell'orecchio umana è massima.

La durata di un suono è data dall'intervallo di tempo che separa l'istante di inizio dell'esecuzione e l'istante in cui tutte le sue componenti presentano un livello sonoro inferiore alla rispettiva soglia di percezione.

Questo ovviamente implica precise definizioni inerenti ambiente e posizione di ascolto, ed inoltre rimane il fatto che persone diverse possono attribuire ad un medesimo suono durate anche di gran lunga differenti, anche a parità di caratteristiche del campo sonoro in cui esse si trovano immerse.



Il timbro di un suono è principalmente legato alla distribuzione dei livelli delle sue parziali, armoniche o meno.

Ciò non sempre è vero. In taluni casi, il principale contributo alla timbrica è insospettabilmente dato dalle peculiarità dell'attacco. Una conferma di questo si ha registrando una nota di piano e riproducendola al contrario: il suono, pur mantenendo la medesima distribuzione dei livelli, ricorda più quello di un armonium che non quello di un pianoforte.

E' inoltre da rammentare che, per quanto sia dimostrabile che girando attorno ad uno strumento musicale (e a chi lo suona) la distribuzione dei livelli delle sue componenti subisce variazioni anche consistenti, il suo riconoscimento ad occhi chiusi non risulta mai compromesso.

Nella prossima puntata:

SUONO E PERCEZIONE pt. 3

- Caratteristiche della voce umana
- Diversità tra suono e rumore
- Rumori artificiali
- Il decibel