

# Richiami di Nozioni di Acustica Generale



## Richiami di Nozioni di Acustica Generale

### LA NATURA DEL SUONO

I fenomeni acustici sono delle perturbazioni di carattere oscillatorio che si propagano con una data frequenza in un mezzo elastico (gas, liquido o solido). Tali perturbazioni nascono per effetto delle sollecitazioni di pressione generate dalle vibrazioni di un corpo solido costituente la sorgente e sono in grado di eccitare il sistema uditivo dell'uomo.

Comunemente, vengono definiti "suoni" i segnali sonori composti da un certo numero di frequenze fisse e ben definite, ossia da una somma di onde componenti sinusoidali aventi particolari caratteristiche di periodicità, mentre vengono definiti "rumori" quei fenomeni completamente casuali costituiti da un numero infinito di componenti, ciascuna con caratteristiche di ampiezza e di fase puramente aleatorie.

Se si considera il fenomeno acustico in rapporto all'individuo che lo percepisce, possiamo definire un suono come rumore quando provoca una sensazione uditiva sgradevole, in quanto diverse sono le sensazioni da persona a persona e dipendono spesso da interessi particolari: stato d'animo, stato fisico, ecc.

Il problema, pertanto, non è quello di stabilire se un dato suono possa o meno definirsi "rumore" bensì quello di eseguire misure e controlli fonometrici che consentano di formulare un giudizio di valutazione sull'entità del disturbo arrecato dai rumori e di studiare i provvedimenti adatti a ridurre il disturbo stesso.

Diverse tecniche di misura sono richieste per trattare i diversi tipi di rumore ambientale; l'andamento del rumore è normalmente casuale e i metodi di misura possono essere raggruppati nei seguenti modi:

1. valutazione della sensazione sonora
2. valutazione del contenuto energetico
3. valutazione della variazione nel tempo

La perturbazione sonora che si propaga nell'aria, provoca una locale variazione di pressione ma di un'entità estremamente contenuta (da  $10^{-5}$  a  $10^2$  Pascal;  $1\text{atm} = 100.000$  Pascal) e con una velocità molto maggiore (da 20 a 20.000 volte per secondo - Hz) rispetto alle lentissime variazioni di pressione atmosferica. Per meglio comprendere il meccanismo di tale propagazione dell'onda acustica, si supponga che il mezzo elastico sia costituito dall'aria contenuta in un tubo rigido, chiuso ad un'estremità da un pistone in grado di muoversi con moto alternato lungo la direzione dell'asse del tubo.

Muovendo in avanti il pistone per un piccolo tratto, si comprime l'elemento d'aria in contatto con la superficie del pistone e quindi si ha un aumento locale di pressione.

Fermando il movimento del pistone, l'elasticità dell'aria provoca un'espansione che potrà però aver luogo soltanto nella direzione di allontanamento dal pistone (in quanto questo è un corpo rigido).

Le molecole che costituiscono l'elemento d'aria in pressione spingono allora quelle costituenti l'elemento adiacente comprimendolo; in questo modo, per spinte successive, ha luogo la propagazione lungo il condotto della perturbazione causata dal movimento del pistone.

Muovendo il pistone in senso opposto ha luogo esattamente lo stesso fenomeno: una momentanea depressione dell'elemento d'aria richiama altro gas dal volume adiacente che a sua volta lo richiama da quello precedente e così via, in questo caso si ha però un valore negativo della pressione.

Pressioni positive e negative sono intese come valori superiori o inferiori a quello della pressione atmosferica del gas (aria) posto nel tubo in condizioni di riposo.

Queste perturbazioni generate dal movimento del pistone non sono però percepibili come suono dall'orecchio umano: se un singolo fronte d'onda raggiunge il nostro orecchio noi possiamo al massimo recepire un "colpo" con un tono secco o sordo che dipende dalla velocità con cui è stato mosso il pistone.

Per avere una vera e propria generazione di suono è necessario avere la formazione di una serie continua di onde di pressione che equivale a muovere continuamente avanti e indietro il pistone con una certa velocità.

La meccanica di questa propagazione fa sì che sia necessario un certo tempo affinché un ipotetico elemento di gas, posto ad una certa distanza dal pistone, venga compresso; per il caso dell'aria è infatti necessario 1 secondo perché venga perturbato un elemento posto ad una distanza di circa 340 m dal pistone.

Anche altri materiali come acqua, acciaio, vetro, ecc. permettono la propagazione di onde grazie alle loro caratteristiche di elasticità, ma con velocità di propagazione molto differenti (vedi tabella).

La velocità di propagazione dipende dal modulo di elasticità del materiale (modulo di Young) e dalla sua densità, secondo la relazione

$$c = k \sqrt{E/\rho}$$

dalla quale si vede come la propagazione di onde sia molto più rapida in mezzi con un elevato modulo elastico e bassa densità.

Per l'aria, viene specificata anche la temperatura, dato che da essa la velocità (m/s) dipende abbastanza fortemente secondo una funzione che si può approssimare con  $c = 331,4 + 0,6 t$  (°C)

In campo acustico si fa riferimento principalmente a due tipi di propagazione: quella per onde piane (come nel caso del pistone) e quella per onde sferiche, che si differenziano nella forma della superficie che unisce i punti caratterizzati dallo stesso valore di pressione acustica.

### **PARAMETRI FISICI**

Relativamente ad una propagazione del tipo descritto, possiamo introdurre dei parametri fisici descrittivi:

Frequenza: numero di oscillazioni al secondo della pressione atmosferica -  $f$  (Hz)

Periodo: intervallo di tempo necessario per compiere una oscillazione completa (da un massimo a un minimo) -  $T$  (s)

Velocità di propagazione: spazio percorso dal fronte d'onda della perturbazione nell'unità di tempo -  $c$  (m/s)

Lunghezza d'onda: distanza tra due massimi di pressione -  $\lambda$  (m)

tra i quali valgono le seguenti relazioni:

$$T = 1/f \quad c = \lambda f$$

### **Pressione:**

valore della variazione di pressione atmosferica causato dalla perturbazione acustica -  $p$  (Pascal)

Si può caratterizzare la pressione sonora considerandone il valore efficace

$$p(\text{rms}) = 1/T \sqrt{\int P^2 dt}$$

Nel caso di andamento sinusoidale della pressione sonora si ha:

$$p(\text{rms}) = 1/T \sqrt{\int P^2(\text{max}) \sin^2 \omega t dt}$$

in cui  $p(\text{rms})$  è il valore istantaneo di compressione (o rarefazione) e  $T$  è il tempo di integrazione.

Sempre nel caso della variazione sinusoidale si può definire il valore massimo di picco della perturbazione  $p(p)$  ed il suo valore medio  $p(\text{medio})$ , e vale la seguente relazione:

$$\text{fattore di cresta } F_c = p(\text{picco}) / p(\text{rms})$$

La maggior parte dei suoni come qualsiasi rumore non ha però un'andamento semplice come quello sinusoidale, in quanto sia la frequenza sia l'ampiezza delle oscillazioni variano continuamente, ed in questo caso, pur potendo ancora definire una pressione efficace o di picco, non valgono più le semplici relazioni sopra esposte, ed è di fatto necessario descrivere il fenomeno in termini statistici.

Quando si deve analizzare un segnale complesso come un rumore, è normalmente necessario analizzarne il suo contenuto in frequenza, per poterne ricavare informazioni utili sull'origine dell'emissione e per la definizione di eventuali interventi di riduzione della rumorosità.

È importante allora citare l'esistenza di uno dei teoremi più importanti dell'analisi dei segnali: il teorema di Fourier che molto semplicemente permette di considerare qualsiasi segnale, per complesso che sia, come il ri-

sultato di una sovrapposizione di un numero infinito di segnali sinusoidali con diversa frequenza, ampiezza e fase.

Applicando allora un algoritmo matematico chiamato “Trasformata di Fourier” e’ possibile ricavare da un segnale variabile in funzione del tempo una funzione, che ne illustra la composizione in frequenza, detta “Trasformata di Fourier del segnale”.

Casi particolari di segnali sono poi il rumore bianco e il rumore rosa: il primo e’ un rumore avente un livello spettrale costante sopra un esteso intervallo di frequenze, il secondo e’ un rumore per il quale la ripartizione di energia per Hz decresce di 3 dB per ottava (ossia il livello spettrale decresce costantemente).

Un rumore casuale (random) e’ definito come tale quando sia l’ampiezza sia la frequenza variano in modo completamente casuale.

### **PARAMETRI DESCRITTIVI**

Una sorgente sonora e’ caratterizzata dall’energia che e’ in grado di irradiare nell’unita’ di tempo, altrimenti detta la sua Potenza sonora, misurata in watt.

Nel caso in cui la sorgente sia omnidirezionale, essendo l’aria un mezzo isotropo, che presenta cioe’ la stessa resistenza in ogni punto, questa energia si irradia nello spazio circostante in modo uniforme al variare della direzione e si avra’ quindi una propagazione per onde sferiche.

Considerando allora il caso semplice di una sorgente puntiforme (quindi omnidirezionale) che irradia nello spazio, la perturbazione da essa generata diminuirà di ampiezza man mano che ci si allontana dalla sorgente perche’ aumenta la superficie (fronte d’onda) di emissione.

In una posizione qualsiasi dello spazio si puo’ allora misurare la quantita’ di energia che fluisce attraverso una superficie nell’unita’ di tempo. Questa intensita’ del campo acustico e’ una grandezza estremamente importante ed, essendo una potenza acustica su una superficie, e’ misurata in watt/m

Il parametro che piu’ comunemente viene misurato in acustica e’ pero’ la Pressione sonora (misura fonometrica) in quanto la variazione di pressione atmosferica e’ una quantita’ relativamente semplice da rilevare.

E’ importante a questo punto vedere come i parametri acustici di potenza, intensita’ e pressione sono tra loro legati.

Tralasciando le inevitabili implicazioni matematiche si definisce il vettore Intensita’ sonora come il prodotto della variazione di pressione  $p$  per la velocita’ di movimento  $u$  delle particelle costituenti un ipotetico elemento d’aria:

$$I = p u$$

Nel caso di una propagazione in campo libero delle onde acustiche, si puo’ anche dimostrare che la pressione e l’intensita’ sono legate dall’impedenza caratteristica del mezzo:

$$p / u = \rho c$$

in cui  $\rho$  e’ la densita’ del mezzo e  $c$  e’ la velocita’ di propagazione.

Sostituendo allora nell’espressione precedente si ricava una relazione tra pressione e intensita’ valida per il campo libero:

$$I = p^2 (rms) / \rho c$$

La relazione tra potenza e intensita’ e’ insita nella definizione di quest’ultima: potenza su unita’ di superficie; e’ quindi possibile determinare la potenza emessa da una o piu’ sorgenti poste all’interno di una superficie chiusa, integrando nello spazio l’intensita’ misurata sulla superficie:

$$W = \int I ds$$

(W e' la potenza in watt; in molti testi la potenza acustica viene indicata con la lettera P ma si e' voluto qui evitare qualsiasi possibile confusione con la pressione p).

Questa e' una relazione valida anche se cio' che irradia energia acustica e che e' posto all'interno della superficie non ha un' emissione isotropica (omnidirezionale) come anche nel caso in cui la superficie di misura non ha forma regolare.

Nel caso semplice di una emissione per onde sferiche si ricava l'intensita' dalla potenza (W) attraverso la superficie di emissione:

$$I = W / 4\pi r^2$$

### LA SCALA DEI DECIBEL

Si e' visto che l'ampiezza di un suono (di un rumore) puo' essere determinata con una misura di pressione (Pascal).

L'orecchio umano e' pero' caratterizzato da una sensibilita' direttamente proporzionale alla quantita' di energia acustica, ed il contenuto energetico del rumore e' pertanto un importante elemento descrittivo del rumore stesso.

Questo viene spesso usato per valutare il disturbo e per paragonare due diverse sorgenti sonore.

La scala di ampiezze che interessano l'udito e' molto vasta: si passa infatti dalla soglia dell'udibile che e' pari ad una variazione piccolissima della pressione atmosferica di soli 20 Pascal alla soglia del dolore che comporta una variazione di pressione atmosferica di poco superiore a 100 Pascal; notare come la pressione atmosferica e' normalmente dell'ordine di 100.000 Pa (1.000 mBar).

Per queste ragioni e' stata introdotta una scala "relativa" di misura delle grandezze acustiche: la scala dei decibel.

Una scala relativa (normalmente logaritmica) prevede di riferire il valore assoluto di una grandezza ad una grandezza di riferimento opportunamente scelta, e per il caso della misura della pressione sonora e' stato adottato come riferimento il valore della soglia dell'udibile (20 Pascal) che assume quindi il valore di "0" dB. Esprimendo in dB una grandezza come la pressione sonora si parla di "livello di pressione sonora" definito come:

$$L_p = 20 \log p/p(\text{rif.}) \quad p(\text{rif.}) \text{ o } \{p(0)\} = 20 \mu \text{ Pa}$$

mentre per le altre grandezze, intensita' e potenza, si hanno relazioni analoghe per i livelli:

$$L_i = 10 \log I / I_0$$

$$L_w = 10 \log W / W_0$$

Si puo' notare come i valori di riferimento siano tra loro correlati, infatti:

$$I_0 = p_0^2 / \rho c \quad p_0 = 20 \mu \text{ Pa} \\ c = 400 \text{ (aria a } 0^\circ \text{C)}$$

$$I_0 = (2 \times 10^{-5})^2 / 400 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

Si deve porre attenzione ad effettuare operazioni matematiche con i livelli in dB perche' si tratta in effetti di valori relativi logaritmici.

Se per esempio si vogliono sommare un livello di pressione sonora di 50 dB con un altro di altrettanti 50 dB, il risultato non e' ovviamente 100 dB ma 53 dB, e si applica una relazione del tipo:

$$L_p \text{ somma} = 10 \log (10^{53/10} + 10^{53/10}) = 53 \text{ dB}$$

che in generale ha la forma di:

$$L_p \text{ somma} = 10 \log \sum 10^{L_p/10}$$

E' molto importante sottolineare la proporzionalita' tra potenza e intensita' con il quadrato della pressione, perche' essa comporta che:

- un raddoppio della potenza o dell'intensita' sonora aumenta il livello di esse di 3 dB
- un raddoppio della pressione sonora aumenta il livello di pressione di 6 dB.

Nello studio del contenuto energetico di un segnale si fa spesso riferimento ai seguenti due parametri:

a) Livello continuo equivalente: e' il livello di pressione sonora integrato sul periodo di misura T. Esso rappresenta il livello di pressione costante che ha lo stesso contenuto energetico del rumore reale misurato nello stesso periodo di tempo:

$$L_{eq,T} = 10 \log 1/T \int p^2(t) / p_0^2 dt \quad \text{dB}$$

b) Livello di esposizione sonora (SEL): e' il livello costante che, se fosse mantenuto per un secondo, avrebbe la stessa energia acustica dell'evento rumoroso misurato ed e' definito come:

$$SEL = L_{ea,T} = 10 \log 1/T_0 \int p^2(t) / p_0^2 dt$$

$$T_0 = 1 \text{ sec}$$

Vale la seguente relazione:

$$SEL = L_{eq,T} + 10 \log T / T_0 \quad \text{dB}$$

## ANALISI IN FREQUENZA

E' gia' stato introdotto il concetto di spettro in frequenza e vedremo ora di descrivere le tecniche di analisi strumentali piu' idonee per misurare il contenuto energetico delle componenti spettrali.

L'analisi di Fourier a cui si e' accennato in precedenza e' una metodologia normalmente impiegata ma che, nel caso della misura del rumore, fornisce un'analisi troppo dettagliata per gli scopi normalmente richiesti.

Per analizzare in frequenza un rumore vengono utilizzati dei filtri passa-banda che sono delle circuitazioni in grado di lasciar passare l'energia solo in un determinato intervallo di frequenza.

Parlare di frequenza significa normalmente descrivere un fenomeno "dinamico" cioe' in movimento, nei termini di quante volte una certa cosa accade durante il periodo di osservazione, o piu' precisamente nell'unita' di tempo.

Le due barette di un diapason in vibrazione "oscillano" circa 440 volte al secondo (440 Hz) e generano una nota caratteristica.

I corpi vibranti, in generale, sia che producano rumore o meno, vibrano in modo piu' o meno complesso ed e' con l'analisi in frequenza che diventa possibile scinderne le singole componenti, ottenendo cosi' delle dettagliate informazioni sulle sorgenti, per complesse che esse siano.

Un esempio in proposito lo si puo' trovare in molti macchinari industriali che presentano organi in rotazione, ruote dentate, cuscinetti, ecc. per i quali l'analisi in frequenza permette di discriminare il contributo energetico di ogni componente al rumore complessivo.

## TIPI DI FILTRI

I filtri servono a separare le diverse frequenze presenti nel segnale temporale.

Esistono formalmente 4 tipi di filtri:

- Filtro passa - basso
- Filtro passa - alto
- Filtro passa - banda
- Filtro a soppressione di banda

Per l'analisi in frequenza sono naturalmente impiegati i filtri passa - banda; in figura si puo' vedere il confronto tra un filtro ideale (praticamente impossibile da costruire) ed un filtro reale.

Le caratteristiche principali di un filtro passa - banda sono la sua larghezza di banda  $B$  che, per definizione nel caso di un filtro reale, viene misurata a - 3 dB ed e' dato dalla differenza delle frequenze  $f_1$  e  $f_2$

$$B = f_1 - f_2$$

e la frequenza centrale  $f_0$ .

Esistono fondamentalmente due tipi di filtro definiti:

- a banda costante, per i quali la larghezza di banda rimane sempre costante al variare del centro banda
- a banda percentuale costante (a banda relativa) per i quali la larghezza di banda e' una percentuale fissa della frequenza centrale, quindi all'aumentare di  $f_0$ , aumenta la larghezza di banda del filtro.

Di questo tipo fanno parte i filtri di banda d'ottava e quelli di banda di 1/3 d'ottava che sono comunemente usati con i fonometri.

La scelta di un tipo di filtro dipende evidentemente dalle applicazioni, ma un criterio preliminare prevede di dedicare alle vibrazioni i filtri a banda costante dal momento che segnali provenienti da strutture meccaniche spesso contengono serie di armoniche che sono piu' facilmente identificabili mediante una scelta di frequenze lineari (come quella appunto usata per i filtri a banda costante).

I filtri a banda percentuale costante (che usano scale logaritmiche di frequenza) sono invece spesso usati per misure di acustica in quanto approssimano abbastanza bene la risposta dell'orecchio umano.

## FILTRI IN BANDA D'OTTAVA

Per ottava si intende un intervallo in frequenza (dalla musica) per il quale la frequenza massima e' doppia di quella minima, per esempio da 20 a 40 Hz o da 1000 a 2000 Hz.

I filtri in banda d'ottava sono definiti a partire dalla frequenza centrale di 1000 Hz, dividendo o moltiplicando per un fattore 2: si avranno pertanto i seguenti centri banda  $f_c$ :

31,5 63 125 250 500 1000 2KHz 4KHz 8KHz 16KHz

Dette  $f_1$  e  $f_2$  le frequenze limite della banda, sono state definite le seguenti relazioni:

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{2} f_1 = f_1 \sqrt{2}$$

$$(f_2 - f_1) / f_c = (2 f_1 - f_1) / \sqrt{2} f_1 = 1 / \sqrt{2} = 0.7$$

quindi la larghezza di banda di un filtro in banda d'ottava e' pari a circa il 70% della frequenza centrale.

Per esempio per la frequenza centrale di 1000 Hz la banda va da 710 Hz a 1420 Hz.

## FILTRI IN BANDA DA 1/3 D'OTTAVA

In maniera del tutto analogo sono stati definiti dei filtri con una risoluzione in frequenza 3 volte maggiore per analisi spettrali piu' dettagliate.

I filtri in 1/3 d'ottava dividono lo spettro da 20 a 20KHz in bande con le seguenti frequenze centrali:

20 **31,5** 40 50 **63** 80 100 **125** 160 200 **250** 315

400 **500** 630 800 **1(kHz)** 1,25 1,6 **2** 2,5

3,15 **4** 5 6,3 **8** 10 12,5 **16** 20

Le frequenze centrali delle bande di 1/3 d'ottava sono ricavate con la seguente relazione:

$$f_2 = \sqrt[3]{2} f_1$$

$$f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{f_1 \cdot \sqrt[3]{2} f_1} = \sqrt[6]{2} f_1$$

da cui si ricava la larghezza di banda dalla:

$$(f_2 - f_1) / f_c = f_1 (\sqrt[3]{2} - 1) / f_1 \sqrt[6]{2} = 0.23$$

e risulta quindi che la larghezza di banda di un filtro di 1/3 d'ottava e' pari a circa il 23% della frequenza di centro banda.

## IL PRODOTTO BT

Se un segnale sinusoidale viene analizzato mediante un filtro, la risposta di questo aumenta gradualmente in valore fino a raggiungere un massimo dopo un intervallo di tempo T (tempo di risposta) pari a  $1/B$  dove B e' l'ampiezza di banda.

Questo significa, matematicamente, che bisogna lasciare al filtro un tempo per rispondere prima di iniziare ogni valutazione.

Ne consegue che l'analisi a banda stretta richiede piu' tempo di quella a banda ampia.

Se il filtro e' a banda percentuale costante, alla formula

$$BT = 1$$

e' preferibile la:

$$b n_f = 1$$

ove b e' la banda relativa (in %) e n il numero di periodi del centro di frequenze necessari a raggiungere un valore stabile per il filtro.

© S.C.S. Controlli e Sistemi

Richiami di acustica.doc - Amadasi G. - 20/10/00



Per eseguire l'analisi in frequenza di un segnale e' necessario, in base al tipo di segnale da inviare, scegliere un filtro a banda costante e con ampiezza di banda opportuna, il tempo medio necessario e in quale modo si vogliono osservare i risultati.

#### ESEMPI DI ANALIZZATORI IN FREQUENZA

1) Filtro passa banda sintonizzabile

E' un filtro a banda percentuale costante il cui metodo di funzionamento e' indicato dal nome stesso.

2) Filtri contigui

E' un metodo utile per coprire un ampio intervallo di frequenze usando piu' filtri con frequenza centrale fissata, passando da un filtro all'altro con una velocita' che sara' funzione del tempo di risposta del filtro e del tempo medio del rivelatore.

3) Analizzatori FFT

Sono analizzatori digitali in parallelo che fanno analisi simultaneamente in tutte le bande di frequenza riducendo cosi' di molto il tempo necessario.

Essi eseguono la "Trasformata rapida di Fourier" del segnale ossia calcolano il contenuto in frequenza di un segnale temporale e i risultati vengono visualizzati su uno schermo.

4) Analizzatori a filtri digitali

Questi analizzatori usano filtri digitali che hanno una velocita' di calcolo cosi' elevata che praticamente permette di lavorare in Tempo Reale nell'intervallo di frequenze 1,6 Hz (ossia i risultati vengono prodotti a mano a mano che arrivano i dati in ingresso).

Sono a banda percentuale costante (1/1 ottava e 1/3, 1/12, 1/24 di ottava) e vengono molto usati in acustica.

#### ANALISI SERIALE E IN PARALLELO

Per analisi "seriale" viene comunemente inteso il fatto di analizzare un fenomeno in frequenza in **una** sola banda di frequenza per volta, spostandosi poi man mano su tutte le bande di interesse.

Questo procedimento e' normalmente adottato per la strumentazione portatile di tipo compatto e leggero, e prevede comunemente l'impiego di filtri di tipo analogico, il vantaggio che gli analizzatori seriali sono in genere facili da usare, di piccole dimensioni e poco costosi e' pero' contrastato dal fatto che il loro tempo di analisi e' relativamente lungo e che il segnale deve necessariamente essere di tipo stazionario, o almeno ripetitivo.

L'analisi in parallelo invece e' caratterizzata da banchi di filtri "paralleli" di natura analogica o digitale ed e' evidentemente adatta sia per segnali stazionari che non stazionari.

Il tempo di analisi e' molto piu' breve ed e' allora associabile al concetto di analisi in tempo reale, che permette di seguire le variazioni di un fenomeno per tutto il tempo e in tutte le bande di frequenza, cio' puo' risultare molto importante nel caso si abbia a che fare con fenomeni rapidamente variabili nel tempo.

Se fino a qualche tempo fa questo tipo di analisi era destinata prevalentemente ai laboratori e non alle misure in campo, la moderna tecnologia elettronica sta ridimensionando questa distinzione (laboratorio/sul campo) per poter offrire analizzatori paralleli caratterizzati da una "buona" portatilita' ma pur sempre rispettando le caratteristiche di risposta dei filtri **digitali** in bande di 1/1, 1/3 d'ottava.

## **IL CONCETTO DI MISURA ED IL RIVELATORE RC**

Sono stati precedentemente introdotti i parametri “acustici” dei quali quello che viene piu’ comunemente impiegato e’ la pressione acustica, per la sua misura e’ necessario disporre di una strumentazione dedicata: il “Fonometro”.

Esso e’ principalmente costituito da un microfono che trasforma le variazioni di pressione atmosferica in un segnale elettrico proporzionale ad esse, e da un circuito di misura chiamato rivelatore.

Il piu’ semplice tipo di rivelatore e’ quello di tipo RC che e’ realizzato con un circuito costituito da un diodo, da una resistenza R e da un condensatore C in parallelo. Se un segnale ad onda quadra viene inviato in ingresso ad un circuito RC questo da’ una risposta rapida mentre quando il segnale in ingresso viene rimosso, quello in uscita diminuisce lentamente nel tempo con un andamento che e’ funzione dei valori di R e C. Si definisce costante di tempo  $\tau$  il prodotto RC: ad ogni intervallo di tempo pari a  $\tau$ , il segnale diminuisce del 37%.

Se il segnale in ingresso e’ sinusoidale, il risultato in uscita e’ un segnale costante sovrapposto ad alcune fluttuazioni che sono tanto piu’ piccole quanto maggiore e’ la costante di tempo. Il risultato fornito da un rivelatore RC e’ una misura del livello medio del segnale in ingresso.

### **RIVELATORI di tipo RMS**

I fonometri veri e propri sono dotati di circuiti di misura (rivelatori) che non misurano il livello medio del segnale, ma convertono il segnale elettrico prodotto dal microfono, passato eventualmente attraverso un filtro, nel suo valore RMS (valore quadratico medio), che altro non e’ che quel valore continuo (costante, cc o DC) che rappresenta l’ energia contenuta nel segnale in ingresso.

La circuitazione necessaria per ottenere il valore RMS di un segnale e’ costituita da diversi blocchi rappresentati in figura ognuno dei quali esegue una o piu’ delle varie operazioni necessarie.

il segnale in ingresso subisce le seguenti trasformazioni:

1)

attraversa un filtro che limita le sue componenti in frequenza alla banda passante del filtro

- nel dominio del tempo si nota un segnale piu’ semplice
- nel dominio della frequenza ci sono meno componenti

2)

il segnale in uscita dal filtro viene elevato al quadrato

- nel dominio del tempo tutto il segnale diventa positivo
- nel dominio della frequenza si ha una traslazione di frequenza e una formazione di componenti vicino all’ origine degli assi: componente continua (DC o 0 Hz)

3)

il segnale viene mediato nel tempo (integrazione)

- nel dominio del tempo il segnale assume un valore quasi costante
- nel dominio della frequenza si ha un effetto di “filtro” tendente ad eliminare tutte le componenti lasciando solo quella “continua” (DC)

4)

viene fatta la radice quadrata del segnale

Sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza si ha un abbassamento di livello, e si ottiene cosi’ il valore RMS del segnale filtrato.

***TRASDUTTORI ACUSTICI: IL MICROFONO***

Per trasduttore si intende quel dispositivo che e' in grado di convertire l'energia da una forma (ad esempio meccanica o elettrica) in un'altra. I trasduttori che si incontrano frequentemente nello studio della fisica acustica sono l'altoparlante che trasforma l'energia elettrica in acustica e il microfono che effettua la trasformazione inversa.

Il microfono in generale e' costituito da una parte meccanica (membrana), che viene posta in movimento dalle variazioni di pressione caratteristiche di una perturbazione acustica (suono-rumore) e da un sistema che trasforma tale movimento in variazioni di una determinata grandezza elettrica.

Elementi caratteristici del microfono sono la sensibilita': definita come rapporto tra la tensione di uscita e la pressione acustica del campo sonoro; la risposta in frequenza: cioe' il modo di variare della sensibilita' in funzione della frequenza dell'onda sonora; la direzionalita': cioe' il modo di variare della sensibilita' con la direzione di arrivo del suono.

Esistono vari tipi di microfoni ciascuno dei quali sfrutta principi diversi di funzionamento; esempio: microfoni a variazione di resistenza, elettrodinamici, a cristallo e infine quelli di tipo a condensatore detti anche a variazione di capacita' che risultano i piu' affidabili e quindi i piu' idonei per misure precise.

## PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il microfono a condensatore il cui schema e' mostrato in Fig.2, e' costituito fondamentalmente da una membrana metallica sottilissima e da una placca posteriore rigida: essi insieme costituiscono un vero e proprio condensatore il cui dielettrico e' l'aria.

E' noto che se ai capi di un condensatore di capacita' C applichiamo una tensione di polarizzazione V, sugli elettrodi viene a costituirsi una quantita' di carica Q data da:

$$Q = C \times V$$

Inoltre la capacita' di un condensatore a facce piane parallele e' determinata dalla seguente formula:

S

$$C = \frac{E \times S}{d}$$

dove E: costante dielettrica del mezzo

d: distanza fra gli elettrodi

S: superficie degli elettrodi

Sulla base delle relazioni sopra riportate e' possibile capire il funzionamento del microfono a condensatore e quindi come avviene la trasformazione di una pressione acustica in tensione elettrica.

Applicando agli elettrodi una tensione di polarizzazione costante e sottoponendo il microfono ad un campo acustico, le variazioni di pressione sonora agenti sulla membrana causeranno una variazione della distanza d fra la medesima (che oscillerà) e l'elettrodo posteriore, e una conseguente variazione di capacita' che a sua volta comporterà una variazione elettrica. In pratica da una variazione di pressione p (t) si ottiene una variazione di tensione V (t) piu' facilmente misurabile.

Alcuni microfoni non hanno però bisogno della tensione di polarizzazione in quanto prepolarizzati permanentemente i quali hanno subito in laboratorio un processo elettronico di alta precisione, tramite il quale gli elettrodi vengono caricati stabilmente con una ben definita quantita' di carica.

Simili trasduttori sono chiamati microfoni a elettrete e sono caratterizzati da un diaframma di polimero, la cui superficie e' rivestita da una pellicola di metallo.

Il condensatore formato da questo diaframma e dall'elettrodo posteriore rigido e' polarizzato da una carica intrappolata nello strato di polimero; tale polimero con una carica elettrica legata alle sue molecole e' appunto chiamato elettrete.

La membrana e' sensibilissima anche alle piu' piccole variazioni di pressione a tal punto che riuscirebbe a sentire persino quelle dovute alla pressione atmosferica, ma per evitare che un simile fenomeno possa provocare degli errori di misura, viene praticato un foro dietro l'armatura posteriore, detto di equalizzazione, che rende la pressione statica interna alla capsula uguale a quella esterna.

Il microfono che prevede il foro di equalizzazione in posizione posteriore consente di lavorare in presenza di forti umidita', in quanto la compensazione della pressione statica avviene attraverso un contenitore di gel di silice che ha il compito di asportare l'umidita' dell'aria.

E' importante notare che il foro di equalizzazione ha una impedenza acustica molto elevata la quale decresce considerevolmente dai 5 Hz in giu'. Questo vuol dire che l'effetto del foro si manifesta in pratica soltanto per variazioni di pressione molto lente, come per esempio quelle atmosferiche. E' evidente pero' che se si volesse misurare suoni a frequenze inferiori ai 5 Hz si renderebbe necessaria l'otturazione del foro di equalizzazione.

Al fine di evitare danneggiamenti del microfono, e' bene non toccare mai la membrana con le dita o altri oggetti: la griglia di protezione dovra' essere rimossa solo in casi di estrema necessita'.

Prima di eseguire una misura e' importante stabilire i parametri piu' convenienti, per esempio la risposta in frequenza, quella di ampiezza o altro, e in base alle scelte fatte ci si orienterà verso un particolare tipo di microfono e quindi a una determinata catena di misura.

Riuscire a scegliere un microfono adatto per tutti i tipi di misura e' praticamente impossibile: avere una buona sensibilita' come si vedra' va a scapito di una buona risposta in frequenza e viceversa. Esistono comunque dei microfoni di utilita' generale che riescono ad avere dei compromessi fra i vari fattori.

Si rende a questo punto necessaria una spiegazione di quello che e' il significato fisico dei parametri ora accennati.

## **SENSIBILITA'**

In generale per sensibilita' di un certo dispositivo capace di reagire ad una data azione, si intende quel valore minimo dell'azione che riesce a produrre la minima reazione apprezzabile.

Nel caso in esame il dispositivo si chiama microfono, l'azione e' la pressione sonora data in pascal e la reazione e' una tensione elettrica data in volts (o in millivolts). Quanto piu' grande e' la sensibilita' tanto piu' piccolo e' il valore minimo di pressione che lo strumento misuratore riesce a percepire sottoforma di tensione elettrica.

La caratteristica di sensibilita' in pratica determina il minimo livello di pressione sonora misurabile; il livello minimo e' dovuto al fatto che il segnale di pressione prodotto dal microfono si avvicina al livello del rumore di fondo dei circuiti di amplificazione posti a valle.

Conseguentemente per valori di pressione pari alla soglia minima, il segnale elettrico generato si rende indistinguibile dal rumore elettrico preesistente generando cosi' una evidente ambiguita' sulla misura.

Dire che un microfono ha una sensibilita' di 50 mV/Pa significa che una pressione  $p(t)$  di 1 Pa in ingresso al dispositivo produce in uscita una corrispondente tensione elettrica  $V(t)$  di 50 mV.

## **RISPOSTA IN FREQUENZA**

Supponiamo di avere in ingresso al microfono una pressione acustica la cui frequenza puo' essere variata con continuita' in tutta la gamma da 1 Hz fino a 20.000 Hz, mantenendo pero' costante il livello di pressione.

Eseguendo la prova e' possibile riscontrare alle varie frequenze una certa variabilita' della proporzione (definita dalla sensibilita') fra il segnale elettrico che si ottiene in uscita dal microfono e il corrispondente segnale sonoro in ingresso.

Alla luce di quanto descritto e' possibile definire la risposta in frequenza di un microfono come la gamma di frequenza in cui la conversione del segnale acustico in segnale elettrico avviene senza che i rapporti di ampiezza pressione/tensione vengano alterati.

L'estensione del su citato intervallo di frequenza, detto anche BANDA PASSANTE, e' caratterizzata da una frequenza inferiore ed una superiore, in corrispondenza delle quali il livello della sensibilita' si abbassa di 3 dB. Sia la sensibilita', sia la risposta in frequenza sono strettamente legate alle dimensioni del microfono.

In pratica si riscontra che la sensibilita' decresce al diminuire del diametro, mentre la gamma utile in frequenza aumenta. E' chiaro quindi che l'uso di un microfono che abbia una banda passante molto ampia, paga il prezzo in termini di sensibilita' e viceversa.

Per quanto riguarda la risposta in ampiezza, e' importante sottolineare che per ogni tipo di microfono esiste un livello di pressione massimo misurabile. Il fatto che esista un limite superiore di ampiezza e' dovuto alla membrana del microfono che supera i limiti di elasticita' con conseguente introduzione di distorsione.

Esiste un limite superiore della risposta in frequenza dovuta all'interferenza provocata dal corpo del microfono nel campo acustico.

Questo effetto si riscontra in campo libero ed alle alte frequenze in corrispondenza delle quali la lunghezza d'onda del segnale acustico e' cosi' piccola da diventare dello stesso ordine di grandezza del microfono.

Si verificano cosi' degli effetti di riflessione sulla superficie del microfono e di conseguenza la pressione che eccita il diaframma per suoni ad alte frequenze, non e' piu' quella esistente in quel punto prima della introduzione del microfono nel campo sonoro.

Per utilizzazioni in campo libero e affinche' il microfono abbia una risposta in frequenza piu' lineare possibile si rende necessario l'introduzione di effetti compensanti che sottraggono, frequenze per frequenze, gli incrementi di pressione. Il metodo utilizzato e' quello di una correzione meccanica della membrana in modo da

aumentare il suo smorzamento. La sensibilità del microfono diviene in tal maniera una funzione complementare all'incremento di pressione i cui effetti vengono così annullati.

Si nota che la risposta in frequenza globale assume una buona linearità e il segnale di uscita diviene proporzionale alla pressione sonora in assenza di microfono fino alle frequenze più alte possibili.

Bisogna a questo punto notare che qualora si vogliono effettuare delle misure in ambienti riverberanti, l'immissione del microfono nel campo non comporta alcun effetto collaterale. Infatti fenomeni di riflessione dell'onda acustica sulla superficie del microfono non provocano, all'aumentare della frequenza, quegli incrementi di pressione prima visti, proprio perché il campo di indagine è già riverberante.

L'uso dei microfoni per campo libero (cioè quelli che hanno subito la correzione meccanica) nelle misure in ambienti riverberanti risulta non corretto alle alte frequenze, in quanto la pressione acustica incidente viene attenuata secondo l'andamento della curva relativa allo smorzamento della membrana.

Da quanto detto risulta che anche quando si usa il microfono accoppiato meccanicamente con l'amplificatore (fonometro) occorrerà fare attenzione affinché il corpo dello strumento non si comporti da riflettore per le frequenze le cui lunghezze d'onda coincidono con le dimensioni del fonometro.

La migliore alternativa è sempre quella di allontanare il microfono dal fonometro per uno o più metri anche considerando il fatto che il corpo dell'operatore è a sua volta un riflettore. Dovendo operare vicino al fonometro per eseguire la misura è bene usare per il microfono una prolunga con il cavalletto. La parte del fonometro volta alla sorgente di rumore ha una forma affusolata tale da deviare le riflessioni rispetto al microfono. L'ingombro frontale è ridotto al minimo in modo da riflettere solo suoni con frequenze molto elevate.

Esiste anche una serie di microfoni adatti per misure in campo riverberante. La loro differenza rispetto ai tipi per campo libero è dovuta al fatto che sul diagramma non è stata apportata nessuna correzione meccanica. Il limite inferiore in frequenza dipende dal foro di equalizzazione (precedentemente descritto) il quale impedisce che all'interno del microfono ci sia una pressione statica diversa da quella esterna.

## DIREZIONALITÀ

Un altro fattore che caratterizza la qualità di un microfono è l'omnidirezionalità: un microfono ideale, posto in un determinato punto di un campo acustico, deve rilevare, senza alcuna attenuazione rispetto alla propria sensibilità le variazioni di pressione, qualsiasi sia la direzione di propagazione del suono.

È possibile notare una diminuzione dell'omnidirezionalità all'aumentare della frequenza a causa dell'interferenza del corpo microfonico con il campo acustico (simile effetto diventa ancora più evidente con lo strumento completo).

In un campo riverberante la pressione sonora rilevata in un punto, sarà la somma energetica delle onde sonore provenienti da diverse direzioni. In questo caso sarà necessario avere un microfono che abbia delle buone caratteristiche di omnidirezionalità.

Un misuratore di livello che non rispetti tali qualità, effettuerà la somma energetica con un errore proporzionale al suo discostarsi dalle condizioni di omnidirezionalità. Per cercare di contenere tale errore è possibile utilizzare dei particolari accessori che adattati sul microfono consentono di pesare equamente tutte le diverse componenti energetiche provenienti dalle varie direzioni.

In alternativa, compatibilmente col limite inferiore di ampiezza da misurare, si può scegliere un microfono più piccolo che per il suo ingombro produce una minore interferenza nel campo sonoro.

La scelta del tipo di microfono deve comunque essere effettuata in funzione delle normative che devono essere seguite (IEC o ANSI).

Mentre il microfono del tipo "campo libero" non può essere indicato nelle misure in campo diffuso (pena la misura di valori inferiori al reale) viceversa, il microfono del tipo a "pressione" può essere usato proficuamente anche in campo libero, purché si abbia l'attenzione di orientarlo a 90 gradi rispetto alla direzione di propagazione del campo diretto.

Quest'ultima condizione di misura è poi sempre consigliabile in presenza di campo misto (zone semiriverberanti)

I misuratori portatili sono normalmente dotati di microfoni da campo libero, disposti in modo tale (distanti dal corpo fonometrico) da far rientrare le loro caratteristiche di omnidirezionalità nei limiti prescritti dalle normative.

#### **SENSIBILITÀ ALLE VARIAZIONI DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI**

Il microfono a condensatore è un trasduttore particolarmente preciso e le sue caratteristiche non vengono influenzate dalle variazioni dell'umidità e della temperatura entro limiti molto ampi. La membrana è rivestita di quarzo per garantire la massima protezione in ambienti umidi e corrosivi.

In questo caso è necessario usare i tipi di microfoni provvisti di foro di compensazione della pressione statica e dotarli di deumidificatori, del dispositivo parapiooggia e dell'indispensabile schermo controvento.

#### **FONOMETRI**

Il segnale acustico dopo essere stato trasformato dal microfono in un equivalente segnale elettrico entra in un primo blocco (preamplificatore) che è normalmente solidale con il microfono, con il quale costituisce il cosiddetto stadio di ingresso. Il preamplificatore trasforma l'alta impedenza del microfono in bassa impedenza, permettendo così l'uso di cavi lunghi fra il microfono e lo strumento misuratore, molto spesso posti in zone diverse.

Dopo il preamplificatore è previsto un blocco che rivela la presenza di una situazione di sovraccarico presente in ingresso e tiene sotto controllo la dinamica del segnale in arrivo, inoltre avverte tramite una indicazione sul display la presenza di eventuali sovraccarichi.

In tal caso l'operatore potrà aggiustare il fondo scala agendo con appositi commutatori su un attenuatore d'ingresso, il quale permette di regolare l'escursione del segnale amplificandolo o attenuandolo a secondo dei casi.

Successivamente il segnale incontra dei particolari circuiti di filtraggio che provvedono a pesare opportunamente il segnale secondo quelle che sono le curve standards "A" e "C". In questo modo viene modificata la sensibilità dello strumento alle varie frequenze e, per il caso soprattutto della curva A, rendendola uguale con una buona approssimazione a quella dell'orecchio umano.

Solo per qualche fonometro è possibile inserire filtri esterni che consentono di eseguire l'analisi in frequenza in banda d'ottava e terzi di ottava, necessaria per l'individuazione delle varie componenti tonali del segnale.

Dopo una opportuna amplificazione intermedia, il segnale entra in un blocco rettificatore che provvede a trasformare in corrente continua il segnale elettrico in corrente alternata; più precisamente il segnale viene opportunamente elaborato in modo tale da avere in uscita dal blocco il suo valore efficace (RMS).

In questo blocco rettificatore (blocco RMS) sono normalmente inserite le costanti di tempo (tempi di integrazione o di rettificazione) che sono meglio note come: FAST (veloce), SLOW (lento) e in alcuni fonometri IMPULSE (impulso) e PEAK (picco). In pratica con esse si determina la risposta dello strumento alle variazioni del segnale.

Nella maggior parte dei casi la misura del suono riguarda segnali fluttuanti, cioè quei segnali che variano continuamente il loro livello e per effettuare una misura corretta bisogna essere in grado di apprezzare nella maniera più accurata possibile le variazioni del segnale. D'altra parte se il livello di pressione fluttua troppo rapidamente, l'ago del display analogico può muoversi in maniera così irregolare da rendere impossibile la lettura di un valore significativo.

Per questa ragione sono stati standardizzati vari tempi di risposta dello strumento, i primi due sono conosciuti come FAST e SLOW dei quali la costante FAST corrispondente a 125 ms (1/8 di secondo), fornisce una risposta dello strumento con reazione molto rapida e consente di seguire e misurare i livelli di rumore che non oscillano troppo velocemente.

La costante SLOW (1 secondo) fornisce invece una risposta più lenta, smorza così le fluttuazioni dell'ago dello strumento (o del display digitale) consentendo una più facile lettura che altrimenti risulterebbe di difficile interpretazione.

Se usando la caratteristica "veloce" (FAST), l'ago dello strumento oscilla di 4 o 5 dB, è necessario selezionare la costante di tempo con caratteristica "lenta" (SLOW), se poi anche in tal caso le oscillazioni

sono ancora ampie, e' necessario valutare una media e nella relazione bisogna tener conto anche dei valori massimi o minimi.

Nei moderni fonometri, il problema della misura di rumori oscillanti viene in parte risolto utilizzando un display digitale; in tal caso il valore delle misure viene aggiornato ogni secondo riportando il valore efficace (RMS) massimo che lo strumento ha misurato nel secondo precedente.

### **Nota**

La scelta dell'appropriata costante di tempo e' comunque sempre dettata dalle normative a cui devono fare riferimento le misure.

Nel caso in cui sia necessario misurare rumori impulsivi bisogna utilizzare un misuratore di livello sonoro che possieda la costante di tempo IMPULSE.

In tal caso infatti i tempi di risposta "F" e "S" di un semplice fonometro non sono sufficientemente veloci per dare una misura che sia rappresentativa della risposta soggettiva.

La costante e' caratterizzata da una risposta rapida a livelli crescenti (35 m.sec.) e molto lenta a livelli decrescenti (decresce di 3 dB al secondo); per suoni impulsivi si ottiene come detto una lettura migliore del livello rispetto a quella offerta da un misuratore di livello sonoro ordinario che usa costanti FAST e SLOW. Si tenga presente pero' che se si usano le tre costanti di tempo per un rumore che non varia in livello si ottiene la medesima lettura.

La caratteristica costante "Impulse" e' per esempio usata per misurare il rumore delle presse, di spari e sorgenti simili.

Un'altra costante di tempo, richiesta da alcune normative per la valutazione del rischio conseguente alla esposizione a rumore, e' quella relativa alla misura dei valori di picco. In tal caso lo strumento non esegue come per le tre costanti (F, S ed I) precedenti il valore efficace, ma valuta le ampiezze della cresta dell'onda acustica e per far cio' deve poter rispondere anche alle piu' veloci fluttuazioni del segnale: e' quindi necessario avere una risposta velocissima (Peak = 100 microsec).

In alcuni fonometri esiste un circuito di tenuta (Hold circuit) che consente di memorizzare dati caratteristici come il massimo o il minimo rendendo la lettura e l'interpretazione della misura piu' facile e completa.

Un importante parametro da tenere sempre presente nella scelta di un fonometro e' il FATTORE DI CRESTA: esso viene definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace (Peak/RMS).

Si e' visto che il circuito di misura del valore efficace (RMS) e' uno degli elementi che caratterizzano la qualita' di un fonometro; e' giusto quindi esaminare con cura il fattore di cresta dal quale si puo' valutare la velocita' di risposta del circuito, quindi la sua capacita' di ricavare il vero valore efficace di valori impulsivi: piu' alto e' il valore di cresta e piu' efficacemente lo strumento risponde al segnale impulsivo.

Molto spesso accade che il fenomeno acustico sotto esame abbia un andamento fluttuante molto irregolare a tal punto che la rilevazione per mezzo di un semplice fonometro risulta molto difficoltosa.

Ci sono due possibilita' per risolvere un simile problema: o applicare alcuni metodi matematici che tengono conto di certi parametri come il massimo e il minimo, misurabili con il normale fonometro (ma risultano molto laboriosi e poco attendibili), oppure utilizzare un particolare strumento che permette di misurare automaticamente la media energetica espressa in dB dei livelli di pressione sonora che si sono evoluti in un certo tempo di misura, di durata comunque superiore alle costanti di tempo standardizzate.

### **FONOMETRO INTEGRATORE DI PRECISIONE**

Vediamo brevemente i vari parametri di cui e' possibile determinare il valore in decibel:

- **L<sub>p</sub>**

e' il livello di pressione sonora misurato secondo le varie costanti Slow, Fast, Impulse o Peak, e presentato sul display digitale che ne aggiorna il valore ogni secondo

- **LEQ**

e' il valore medio o piu' precisamente il livello continuo equivalente inteso come il livello costante che avrebbe un rumore stazionario della stessa energia acustica totale del rumore fluttuante sotto misura con il medesimo tempo di durata T. Viene definito come:



dove  $P_0 = 20 \text{ uPa}$  e' la pressione di riferimento.

Il tempo di misura puo' essere qualunque fino al massimo consentito corrispondente all'esaurimento delle pile.

- **Lae o SEL**

definisce il livello di esposizione acustica e corrisponde a quel livello che mantenuto costante per un secondo risulta della stessa energia acustica totale del rumore misurato. In pratica non e' altro che il livello continuo equivalente riferito ad un secondo:

Si dimostra che il SEL e' legato al tempo di misura  $T$  e al livello continuo equivalente secondo la seguente relazione:

Dalla conoscenza del SEL e di LEQ e' possibile quindi risalire matematicamente al tempo  $T$ .

La determinazione del SEL puo' rendersi molto utile per esempio nello studio dei singoli eventi sonori come il passaggio di un aereo a bassa quota.

- **MAX**

e' possibile memorizzare il valore massimo che si e' presentato lungo tutto il periodo di misura.

## DOSIMETRI

La dose di rumore rappresenta in pratica l'energia totale "E" assorbita da un individuo che e' stato sottoposto per un dato tempo ad un determinato livello di pressione equivalente. La norma ISO R 1999 prescrive che un incremento di  $Leq$  di 3 dB deve essere accompagnato da una riduzione del 50% del tempo di esposizione. Infatti un aumento di 3 dB corrisponde ad un raddoppio di energia e percio' affinche' l'energia  $E$  rimanga costante, ad un raddoppio del valore energetico  $P$  corrispondera' un dimezzamento del tempo di esposizione  $T$ .

Per esempio un'esposizione a 93 dB (A) per 4 ore o a 96 dB (A) per 2 ore, producono entrambe una dose di rumore del 100%.

Negli USA e' permesso un incremento di 5 dB per ogni dimezzamento del tempo di esposizione (norme OSHA).

Un generico dosimetro ha un funzionamento analogo a quello di un fonometro da cui si dissocia a partire dall'uscita del circuito di ponderazione delle ampiezze, secondo i requisiti delle norme ( $q = 3 \text{ dB ISO}$ ;  $q = 5 \text{ dB OSHA}$ ), un sistema di integrazione per tempi lunghi provvisto di memoria ed infine un visualizzatore a quattro cifre dove e' indicata la dose di rumore in %.

## FILTRI

Per poter effettuare con un fonometro un'analisi in frequenza del segnale acustico e' necessario utilizzare particolari dispositivi come un filtro elettronico passa-banda.

Esso lascia passare senza alcuna attenuazione la gamma di frequenza compresa nella sua "banda-passante", mentre attenua fortemente le frequenze poste al di sotto e al di sopra di tale banda.

Le frequenze che il filtro lascia passare possono essere variate con continuita' o in maniera discreta e le frequenze centrali sono in genere prefissate da normative internazionali. La banda di frequenza propria di un filtro e la "larghezza di banda" (o banda passante), viene definita dalla differenza delle due frequenze per le quali il filtro introduce un'attenuazione di 3 dB.

Esistono due categorie di filtri passa-banda: filtri a banda costante e filtri a banda percentuale costante. I primi hanno una larghezza di banda ( $B$ ) che non varia al variare della frequenza centrale del filtro e sono filtri generalmente usati per analisi di precisione; i secondi hanno una larghezza di banda ( $B$ ) che e' un valore percentuale della frequenza centrale del filtro.

A quest'ultima categoria appartengono i filtri ad ottave e a terzi d'ottava, di uso diffusissimo che permettono di risolvere la maggior parte dei problemi legati alla determinazione della sensazione sonora e ai procedimenti di insonorizzazione.

## **LA CALIBRAZIONE DEI FONOMETRI**

Allo scopo di verificare l'esatta messa a punto del fonometro e' indispensabile controllare periodicamente la taratura dello strumento.

Un simile processo e' molto importante in quanto consente di valutare l'insorgenza o la presenza di eventuali difetti di funzionamento.

per la calibrazione esistono due metodi: la calibrazione interna e quella esterna.

## **CALIBRAZIONE INTERNA**

La calibrazione interna e' prevista con un segnale di riferimento stabilizzato (ricavato da un circuito oscillatore interno) tipicamente alla frequenza di 1 KHz e di ampiezza pari a 50 mV, corrispondente in decibel elettrici a 94 dB. I 94 dB di livello del segnale interno fanno perciò riferimento a un microfono la cui sensibilità corrisponde a 50 mV/Pa. Purtroppo non tutti i microfoni, anche se dello stesso tipo, hanno uguale sensibilità: conseguentemente e' necessario che i 94 dB di riferimento vengano opportunamente corretti in base all'effettiva sensibilità del microfono.

## **CALIBRAZIONE ESTERNA**

La calibrazione mediante il segnale di riferimento interno non tiene conto del microfono e del preamplificatore, ed è per questo che risulta necessaria la calibrazione mediante l'uso di calibratori esterni applicati sul microfono. Il calibratore e' uno strumento che genera un segnale acustico di riferimento stabile ad una precisa frequenza e con una definita ampiezza a cui bisogna riferirsi per verificare l'esatta taratura del fonometro.

Il pistonofono e' una sorgente sonora di riferimento funzionante a batterie e di alta precisione di +/- 0.15 dB. Esso puo' essere utilizzato in campo nelle condizioni ambientali piu' critiche senza che esso perda le caratteristiche di stabilita'. La frequenza di calibrazione e' di 250 Hz controllata in +/- 1% da un circuito elettronico alimentato dalle batterie interne, il livello sonoro prodotto dal pistonofono sui microfoni puo' essere di 114 o 124 dB +/- 0,15 dB; questo alto livello consente di effettuare calibrazioni anche in ambienti particolarmente rumorosi.

Ciascun pistonofono e' calibrato alla normale pressione atmosferica; un barometro che dovrebbe sempre essere fornito con esso riporta l'indicazione della correzione da apportare ai valori di calibrazione in funzione della pressione atmosferica.

L'uso e' semplicissimo: basta infilare il microfono nella cavita' del pistonofono impiegando gli adattatori in dotazione e premere il pulsante di accensione. Immediatamente il pistonofono produce il livello di pressione sonora costante sulla membrana del microfono.

Quando si effettua la calibrazione dei fonometri con un pistonofono è necessario disinserire le curve di ponderazione A e predisporre in lineare. Infatti il segnale di riferimento e' dato a 250 Hz e cade quindi proprio sotto l'attenuazione della curva A.

Un 'altro modello di calibratore è di tipo elettronico (il suo funzionamento si basa su un circuito oscillatore stabilizzato). Il segnale di riferimento che si ottiene ha tipicamente una frequenza di 1000 Hz ed un livello di pressione sonora pari a 94 o 114 dB entro +/- 0,3 dB. Esso va bene per qualsiasi curva di ponderazione: sia la curva "A" che la "B", la "C" e la "D" non danno alcuna attenuazione in corrispondenza dei 1000 Hz e quindi la predisposizione in "lineare" del fonometro prima della calibrazione in questo caso e' superflua.

## Principi di funzionamento dei fonometri integratori per la misura del livello continuo equivalente $L_{eq}$

Possono essere usati diversi metodi per la misura diretta o il calcolo del livello di pressione sonora equivalente continuo  $L_{eq}$  e per ognuno di essi esistono

vantaggi e svantaggi in relazione soprattutto al costo e alla precisione richiesta per la strumentazione.

Il metodo più diretto per valutare l'integrale è quello di campionare molto velocemente il segnale originale prodotto dal microfono  $p(t)$ , ma questo richiede una circuitazione elettronica complessa e non compatibile con l'esigenza di poter disporre di strumenti (fonometri) che possono essere utilizzati con una mano sola.

Per questa ragione sono allora normalmente impiegate delle tecniche analogico/digitali che vengono di seguito descritte.

Il primo sistema, semplice e poco costoso: una corrente elettrica proporzionale al quadrato del segnale in ingresso (pressione sonora) carica un condensatore  $C$  che funziona da integratore. Dopo un tempo di integrazione determinato (60 s) si legge la tensione ai capi del condensatore che risulta proporzionale al  $L_{eq}$  sul tempo.

Il fatto di dover misurare per un tempo abbastanza lungo (circa 60 secondi) comporta la misura di correnti molto piccole e quindi si incorre in una certa imprecisione di determinazione del  $L_{eq}$ .

Il secondo sistema funziona parzialmente sul principio dello schema precedente: una sorgente di corrente proporzionale al quadrato del segnale in ingresso ma, a differenza di esso, si ha un tempo di carica molto breve del condensatore (pochi microsecondi), in modo di avere la carica massima istantanea per elevati livelli sonori.

Quando la carica raggiunge un determinato valore, un interruttore elettronico scarica istantaneamente il condensatore, riavviandone il processo di carica.

Ogni riavanzamento rappresenta una carica completa del condensatore e quindi una frazione dell'integrale totale che sarà allora dato dalla somma dei processi di carica/scarica controllati elettronicamente con un opportuno dispositivo (contatore di base). Il valore del  $L_{eq}$  potrà allora essere ricavato dividendo semplicemente il contenuto del contatore di base per il tempo di misura.

Il terzo sistema consiste in un blocco iniziale per misurare il valore efficace (rms) secondo la normativa IEC 651 sui fonometri di precisione, seguito da un campionatore che converte in forma digitale il segnale analogico logaritmico. Sui campioni così ottenuti viene calcolato il livello  $L_{eq}$  sostituendo, nella definizione del  $L_{eq}$ , una sommatoria all'integrale secondo la relazione:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum P_i^2 / P_0^2 \right)$$

In cui i campioni  $n$  sono i valori quadrati mediati esponenzialmente (solitamente fast).

