



## FONOMETRIA

Angelo Farina<sup>1</sup>, Patrizio Fausti<sup>2</sup>

1) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Parma

2) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

### *Indice*

<b>1. IL FONOMETRO .....</b>	<b>2</b>
1.1 NORMATIVA E CLASSI DI PRECISIONE.....	2
1.2 GRANDEZZE MISURATE: PRESSIONE SONORA E LIVELLO DI PRESSIONE SONORA .....	3
1.3 IL LIVELLO EQUIVALENTE ED IL SEL .....	4
<b>2. STRUTTURA DEL FONOMETRO .....</b>	<b>6</b>
2.1 IL MICROFONO .....	6
2.1.1 <i>Microfoni a campo libero e microfoni ad incidenza casuale</i> .....	7
2.1.2 <i>Caratteristiche dei microfoni</i> .....	8
2.1.2.1 Sensibilità a circuito aperto .....	9
2.1.2.2 Gamma dinamica .....	9
2.1.2.3 Risposta in frequenza .....	9
2.1.2.4 Direzionalità.....	11
2.1.3 <i>Microfoni accoppiati in fase: cenni di intensimetria</i> .....	12
2.1.4 <i>Calibratori acustici</i> .....	13
2.1.4.1 Calibratori a stantuffo (pistonofoni).....	13
2.1.4.2 Calibratori a trasduttore elettroacustico.....	13
2.2 PREAMPLIFICATORE.....	14
2.3 AMPLIFICATORE .....	14
2.4 FILTRI DI PONDERAZIONE.....	15
2.5 FILTRI PER L'ANALISI IN FREQUENZA .....	15
2.6 RIVELATORE (CONVERTITORE RMS E CONVERTITORE LOGARITMICO).....	16
2.7 STRUMENTO DI LETTURA .....	17
2.8 MEMORIE.....	18
2.9 USCITE DEL FONOMETRO .....	18

## FONOMETRIA

A. Farina, P. Fausti

### 1. Il fonometro

Il fonometro è lo strumento utilizzato per la misura del livello della pressione sonora ed è di fondamentale importanza nella metrologia acustica.

#### 1.1 Normativa e classi di precisione

Le caratteristiche minime che un fonometro deve possedere sono oggi specificate nella norma IEC 61672 (suddivisa in 3 parti pubblicate dal 2002 al 2006) in sostituzione delle precedenti normative IEC 60651/2000 per i fonometri “normali” ed IEC 60804/2000 per i fonometri integratori. I fonometri omologati secondo le IEC 60651 e IEC 60804 prima del 2002 possono essere ancora utilizzati.

La pubblicazione delle 3 parti della norma IEC 61672 ha apportato importanti cambiamenti nelle specifiche dei fonometri. Le principali modifiche riguardano i seguenti aspetti:

- riduzione a 2 classi di precisione (1 e 2) rispetto alle 4 precedenti (da 0 a 3);
- tolleranze aumentate poiché includono le incertezze di misura tipiche di un laboratorio di prova ma complessivamente i margini per i produttori sono ridotti;
- sono fornite anche le incertezze di misura massime consentite per permettere ai produttori di calcolare la percentuale di tolleranza a loro disposizione;
- la ponderazione in frequenza “A” è rimasta obbligatoria per tutti i fonometri;
- la ponderazione “B” è stata rimossa in quanto non è più utilizzata in nessun riferimento legislativo;
- la ponderazione “C” è obbligatoria solo per i fonometri in classe 1;
- è stata aggiunta una nuova ponderazione in frequenza, facoltativa, denominata “zero” o “Z” che è lineare ( $\pm 1,5$  dB) nel campo di frequenza  $10 \div 20000$  Hz e sostituisce la risposta in frequenza facoltativa “linear o flat” della IEC 60651.

Per quanto riguarda le verifiche di conformità previste dalle procedure di omologazione, sono state introdotte ulteriori procedure, più restrittive delle precedenti. Ad esempio ...

Nella tabella sottostante sono riportate le 4 classi (da 0 a 3) stabilite dalle IEC 60651 e 60804. Le classi variano a seconda delle caratteristiche tecniche dei suoi componenti e della conseguente precisione delle misure.

Tipo	Categoria in base a IEC 60651 e 60804	Precisione
0	Di riferimento, da laboratorio	$\pm 0.4$ dB
1	Di precisione, da laboratorio	$\pm 0.7$ dB
2	Per misure sul campo	$\pm 1.0$ dB
3	Per misure di controllo	$\pm 1.5$ dB

In Italia, ormai da molti anni, è obbligatorio l'uso di fonometri in classe 1 per misure sul campo.

## 1.2 Grandezze misurate: pressione sonora e livello di pressione sonora

Qualsiasi fonometro è in grado di misurare il livello (in decibel) del valore quadratico medio della pressione acustica  $p_{rms}$ . Quest'ultimo, valutato nell'intervallo di tempo  $T$ , è definito come

$$(1) \quad p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

da cui si ottiene il rispettivo livello

$$(2) \quad L_p = 10 \log \left[ \frac{p_{rms}^2}{p_0^2} \right] = 10 \log \left[ \frac{1}{T \cdot p_0^2} \cdot \int_0^T p^2(t) dt \right]$$

dove  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ , che è il valore della pressione sonora di riferimento.

Va osservato che le suddette formule (1) e (2) si riferiscono ad un tempo di integrazione non ben definito, comunque abbastanza breve (tipicamente 1 periodo per un segnale periodico). In realtà i fonometri, come si vedrà più in dettaglio nel seguito, operano la misurazione del valore RMS mediante una media temporale. Essa può essere effettuata con due modalità distinte e molto diverse:

- media esponenziale
- media lineare

Nel primo caso, la media è teoricamente sempre in funzione, partendo da un tempo infinitamente passato, ma i valori istantanei di pressione sonora più "antichi" pesano meno di quelli "recenti", in quanto nella valutazione del valore quadratico medio si introduce una ponderazione esponenziale nel tempo, che porta a "dimenticare" progressivamente gli eventi remoti. L'espressione del valore "istantaneo" RMS, all'istante corrente  $\tau$ , valutato con media esponenziale è infatti la seguente:

$$(3) \quad p_{rms}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^\infty e^{-\frac{t}{T}} \cdot p^2(\tau - t) dt}$$

E si ottiene quindi un livello sonoro RMS "istantaneo" con media esponenziale:

$$(4) \quad L_p(\tau) = 10 \log \left[ \frac{p_{rms}^2(\tau)}{p_0^2} \right] = 10 \log \left[ \frac{1}{T \cdot p_0^2} \cdot \int_0^\infty e^{-\frac{t}{T}} \cdot p^2(\tau - t) dt \right]$$

È questo il valore proporzionale allo spostamento della lancetta dei vecchi fonometri analogici, che non sta mai ferma e si muove continuamente inseguendo la variazione del livello sonoro nel tempo.

Nel caso di media lineare, invece, la media è estesa ad un tempo molto lungo (secondi, minuti, ore), ma vale l'espressione (1) già vista, soltanto che il valore di  $T$  in essa contenuto non rappresenta più il brevissimo tempo di ripetizione di un segnale periodico, ma l'intera durata della misurazione.

La media lineare ha una durata finita, e non ha memoria del passato precedente: essa ha inizio nell'istante in cui si preme il pulsante di avvio (start) e termina nell'istante in cui si arresta la misura, premendo il pulsante di stop. Tutti i valori istantanei di pressione sonora contenuti in tale intervallo di tempo contribuiscono in egual misura al valore mediato complessivo.

Il livello sonoro che esprime (tramite la relazione 2) il valore in dB corrispondente al risultato della media lineare viene chiamato Livello Equivalente ( $L_{eq}$ ).

Il fonometro è inoltre in grado di misurare il livello (sempre in dB) del valore di picco della pressione acustica  $p_{pic}$ , ovvero la massima deviazione del segnale rispetto al valore non perturbato. Noti i valori massimi, in certo intervallo di tempo, di  $p_{rms}$  e  $p_{pic}$ , si ottiene una grandezza di notevole contenuto informativo sulla forma d'onda del segnale: il fattore di cresta  $F_C$

$$(5) \quad F_C = \frac{P_{pic}}{P_{rms}}$$

dove  $p_{pic}$  è la pressione di picco e  $p_{rms}$  è la pressione efficace.

È interessante osservare che il fattore di cresta ci consente di dedurre l'effettiva capacità dello strumento di fornire dei valori RMS attendibili nel caso di segnali a rapida variazione. Tanto più alto risulta il fattore di cresta accettabile dallo strumento tanto maggiore è la sua qualità: da un punto di vista pratico, si assume come buono un fattore di cresta uguale a 4 (cioè +12 dB).

In sostanza, un fonometro (analogico) di buona qualità è in grado di misurare correttamente un segnale che, pur avendo un valore RMS prossimo al limite superiore di livello sonoro del campo di misura selezionato, presenta saltuariamente picchi il cui valore istantaneo  $p_{pic}$  può eccedere il fondo scala dello strumento fino a oltre 12 dB.

Tuttavia la moderna strumentazione completamente digitale, che opera campionando la forma d'onda mediante un convertitore analogico-digitale, è caratterizzata dalla assoluta impossibilità di misurare un segnale che porti a valori istantanei eccedenti il fondo scala del convertitore. In tali strumenti, in presenza di segnali dotati di fattore di cresta elevato, dovendo il valore di Picco risultare inferiore al limite superiore del "range" di misura, si determina una significativa riduzione del campo dinamico effettivamente misurabile, inteso come differenza fra il valore massimo RMS ed il valore minimo RMS entro cui lo strumento può operare.

### 1.3 Il Livello Equivalente ed il SEL

Una generazione di fonometri intermedia, tuttora ampiamente diffusi, fa impiego di un rivelatore RMS analogico, seguito da una integrazione digitale effettuata da un piccolo microprocessore dedicato, di potenza di calcolo (e consumo) estremamente ridotti. Grazie a tale accorgimento non si verifica, in presenza di segnali con forte fattore di cresta, la riduzione del campo dinamico tipica degli strumenti puramente digitali, e tuttavia si ottiene ugualmente la possibilità di determinare un livello sonoro con media lineare su lungo periodo, cioè un Livello Equivalente. In sostanza, esso viene determinato dalla sommatoria di una serie di valori RMS misurati con media esponenziale effettuata con circuitazione analogica, e campionati con un rateo di campionamento molto contenuto (tipicamente 8-16 volte al secondo), secondo la relazione:

$$(6) \quad L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,rms}^2}{P_0^2} \right)$$

in cui in sostanza si fa il valore medio quadratico fra n valori "istantanei" del segnale RMS esponenziale di cui all'eq. (3).

Questo parametro ci consente di caratterizzare l'entità di rumori (anche notevolmente fluttuanti) con un unico indice numerico, in modo tale da poterli classificare in modo significativo ai fini della valutazione dei loro effetti indesiderati. In generale, il livello equivalente continuo può intendersi come il livello di un rumore continuo stazionario che, in un dato punto di osservazione, erogherebbe una quantità di energia sonora pari a quella effettivamente erogata dal rumore fluttuante nello stesso intervallo di tempo, come del resto si evince dalla stessa

definizione, sopra riportata. Si tratta, quindi, di una media energetica: da qui tutte le considerazioni sulle dipendenze temporali del parametro.

Ad esempio se un rumore che dura per 10s ha un  $L_{eq}$  di 60dB, se si considera nell'integrale un intervallo di tempo che include quei 10s e altri 10s di silenzio assoluto, si assiste ad un decremento del livello equivalente di 3dB (poiché si dimezza il contenuto energetico medio per secondo).

Tale fenomeno si chiama "diluizione temporale" dell'evento sonoro.

In presenza di eventi di breve durata, preceduti e seguiti da lunghi periodi di silenzio, il Livello Equivalente diviene dunque un parametro inadatto a caratterizzare la rumorosità dell'evento, in quanto operatori diversi otterrebbero valori di  $L_{eq}$  diversi, allungando o accorciando la durata della misura nei periodi di silenzio che circondano l'evento, e risulterebbe peraltro molto difficile sincronizzare inizio e fine della misura con gli istanti di inizio e fine dell'evento sonoro, che può essere estremamente breve.

Per ovviare a tale problematica, si definisce il livello di singolo evento ( $SEL$  "single event level") come:

$$(7) \quad SEL = 10 \log \left[ \frac{1}{T_0 \cdot p_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)^2 dt \right]$$

dove  $T_0$  è il tempo di riferimento pari ad 1s e, in modo del tutto analogo al livello equivalente (eq. 1), compare sotto integrale il quadrato della pressione sonora istantanea.

È bene osservare che, benchè l'integrale nel  $SEL$  si estende teoricamente all'infinito, sia prima che dopo l'evento sonoro da misurare, si valuta in pratica il contenuto energetico del segnale su un intervallo di tempo ragionevole, ma non infinitamente lungo, tale da comprendere le "code temporali" che precedono e seguono l'evento (inteso come raggiungimento di un valore massimo del livello sonoro "istantaneo" RMS a media esponenziale).

Per definire dei limiti di integrazione operativi, si adotta sovente il criterio secondo cui il segmento temporale da considerare è quello in cui il livello sonoro "istantaneo" RMS, a media esponenziale, è al di sopra di una soglia definita 10dB al di sotto del livello sonoro "istantaneo" RMS massimo.

Ciò deriva dalla normale considerazione secondo la quale, quando si sommano energeticamente due livelli sonori, la somma coincide con il maggiore dei due allorchè la differenza fra i livelli da sommare eccede i 10 dB.

Questo criterio è utilizzato anche nella normativa tecnica, ad esempio quella relativa alla misurazione del rumore prodotto dai treni o dagli aerei. In realtà, il criterio suddetto è scientificamente errato, in quanto, in base alla definizione (6) del  $SEL$ , la media energetica è estesa nel tempo, e dunque può benissimo verificarsi il caso in cui una lunga coda sonora prima o dopo il picco massimo contiene più energia del picco stesso (ovviamente se la coda è lunga ed il picco molto corto). L'utilizzo di tale criterio porta dunque, in generale, ad una sistematica sottostima del valore di  $SEL$  rispetto alla sua definizione, che può variare da frazioni di dB (treni molto lunghi e di rumorosità uniforme su gran parte del profilo) sino a parecchi dB (aerei).

Fortunatamente i fonometri più moderni consentono di impostare criteri molto più sofisticati per definire il segmento temporale su cui effettuare l'integrazione, tenendo conto del livello del rumore di fondo, e della durata del superamento o della discesa al di sotto di soglie prefissate.

Come risulta evidente dalla definizione, con il  $SEL$  il contenuto di energia globale del segnale, misurato lungo l'intero tempo di misura  $T$ , viene raggruppato in un intervallo di tempo di 1s.

$$(8) \quad SEL = L_{eq} + 10 \log \left[ \frac{T}{T_0} \right]$$

## 2. Struttura del fonometro

Esistono in commercio numerosi tipi di fonometri, differenti per numero di funzioni, per sensibilità, per il tipo di tecnologia utilizzata nelle diverse parti. Lo schema a blocchi di un fonometro è illustrato nella figura 1. Di seguito vengono descritte le varie parti che costituiscono un fonometro.

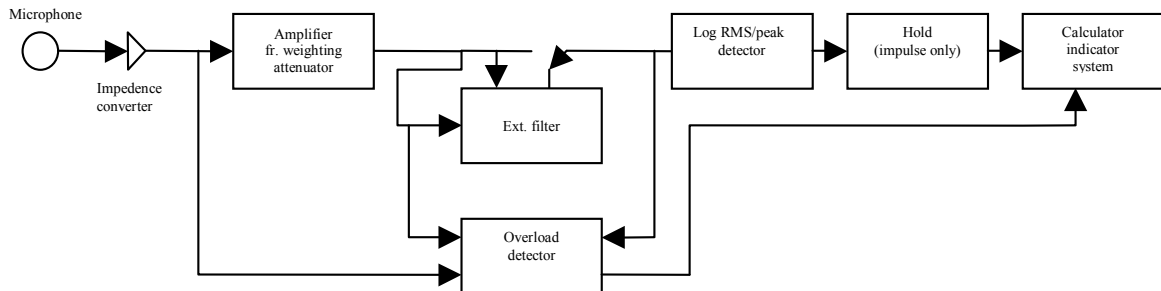


Figura 1 - Struttura di un fonometro

### 2.1 Il microfono

Il primo elemento di un sistema acustico di misura è il trasduttore. Sappiamo che l'onda sonora consiste in un'alternanza di rarefazioni e compressioni nel mezzo, in sostanza nella comparsa di una variazione oscillatoria della pressione dello stesso, variazione che abbiamo indicato col termine di pressione acustica. Affinché tale segnale possa essere interpretato ed elaborato deve essere convertito in un segnale di tipo elettrico. Proprio a questo serve il microfono. Idealmente esso dovrebbe trasformare l'energia acustica in energia elettrica con un comportamento estremamente lineare e con una ampia dinamica di pressione, per riuscire a rilevare correttamente qualunque evento sonoro di interesse. L'uscita del microfono è una tensione di valore modesto, dell'ordine del millivolt. In teoria il microfono dovrebbe generare un segnale elettrico riprodotto esattamente il segnale di pressione e dovrebbe essere completamente insensibile alle variazioni ambientali (temperatura, pressione atmosferica, umidità). In più il microfono non dovrebbe introdurre dei disturbi nel campo sonoro nel quale si colloca e dovrebbe mantenere una sensibilità costante nel tempo. Risulta evidente che tali condizioni non possono essere verificate nella pratica se non in maniera approssimata: è tuttavia opportuno ricordare che i microfoni in commercio hanno un comportamento soddisfacente per le varie applicazioni. I microfoni più diffusi sono quelli a condensatore, i cui pregi sono l'elevata sensibilità (superiore rispetto ad ogni altro tipo di microfono), la bassa sensibilità alle variazioni di temperatura e un'ampia risposta in frequenza. Per contro, però, tali microfoni sono molto sensibili all'umidità, la quale può portare a distorsione notevole del segnale elettrico che si concretizza nella comparsa di rumore di fondo e può portare addirittura alla rottura del dispositivo. Inoltre il microfono a condensatore risulta anche abbastanza fragile. Questo lo si comprende se si prende in considerazione la sua struttura.

Esso risulta costituito da un sottile diaframma (di titanio nei modelli più vecchi, di materiale plastico nei microfoni attuali), che risulta esposto al campo acustico e che è chiuso da un contropiatto rigido di metallo perforato, avente una posizione fissa. Tale contropiatto è incastrato su un dischetto dielettrico forato tramite un polo centrale. Il segnale di tensione in uscita viene rilasciato su un terminale placcato d'oro che è fissato al contropiatto ed isolato dallo chassis esterno del microfono (detto capsula) grazie ad un opportuno isolatore. La cavità interna della capsula è esposta alla pressione atmosferica mediante un piccolo foro, che prende il nome

di *foro di equalizzazione* ed il diaframma rimane protetto da una griglia metallica opportuna, secondo la figura 2:

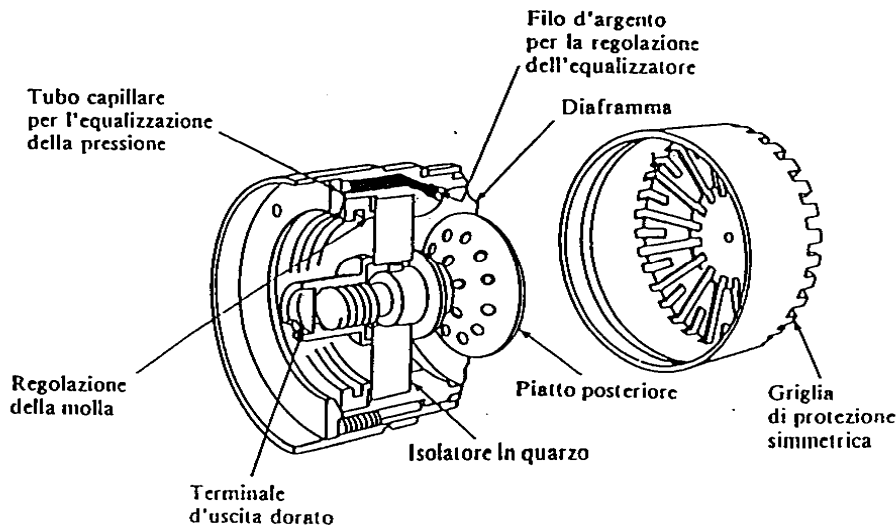


Figura 2 - Microfono a condensatore

La griglia ha la funzione di proteggere meccanicamente la costosa e delicata capsula del microfono e ridurre parzialmente i disturbi provocati dal vento. Per quest'ultimo scopo esistono, inoltre, opportuni involucri che si inseriscono nell'estremità superiore dello stesso. La forma dei fori della griglia può avere anche una influenza alle alte frequenze e questo effetto viene a volte utilizzato per l'equalizzazione della risposta in frequenza in questo campo. Il diaframma e il contropiatto costituiscono le lamine parallele di un condensatore ad aria polarizzato grazie ad una carica sita sul contropiatto. La vibrazione del diaframma, dovuta ad un opportuno campo acustico, va a variare istante per istante la distanza tra le piastre variando così la capacità del condensatore e, in ultima analisi, determinando la comparsa di una differenza di potenziale in uscita. Si osserva che è necessario uno specifico condensatore di disaccoppiamento fra i due poli, per fare in modo che il microfono risponda alla sola componente alternata del segnale. Esistono due tipologie di microfoni a condensatore: quelli esternamente polarizzati e quelli prepolarizzati. I primi hanno bisogno di una tensione continua (detta appunto tensione di polarizzazione) imposta tra diaframma e contropiatto (tipicamente di 200V), che viene fornita grazie ad un apposito alimentatore esterno. È importante che questa tensione sia particolarmente stabile e pulita al fine di evitare l'introduzione di disturbi nel processo di misura. Nei secondi, invece, il dischetto dielettrico che sostiene l'armatura fissa è costituito da cristalli anisotropi di elettretite, i quali contengono cariche elettriche imprigionate al loro interno che sono in grado di mantenere una tensione ai due poli di 200V senza bisogno dell'alimentatore esterno.

### 2.1.1 Microfoni a campo libero e microfoni ad incidenza casuale

Un'ulteriore classificazione dei microfoni a condensatore è legata al tipo di utilizzo. I microfoni a campo libero sono appositamente progettati per misurare un suono che proviene principalmente da un'unica direzione e consentono così di avere la massima accuratezza per un'incidenza di  $0^\circ$  (quando, in sostanza, risultano puntati verso la sorgente di rumore). Quando, però, tali microfoni si trovano in un campo diffuso, essi presentano un comportamento scorretto, in quanto sottostimano i livelli di pressione alle alte frequenze, che maggiormente risentono della direzionalità del dispositivo.

I microfoni con risposta ad incidenza casuale sono, invece, progettati proprio per avere una elevata accuratezza nel caso di campo diffuso o altamente riverberante. Essi prevedono delle

soluzioni circuitali interne atte a compensare in automatico le attenuazioni che normalmente si hanno nel ricevere le componenti di segnale ad alta frequenza in presenza di riverbero. Per contro, se utilizziamo tali microfoni in campo libero, dobbiamo avere l'accortezza di posizionarli con un angolo di incidenza di 70-80° rispetto alla sorgente altrimenti la misura risulta falsata (si arriva anche ad errori di 2-3dB), ed in particolare, in modo duale al caso precedente, risultano esaltate le componenti del segnale alle alte frequenze.

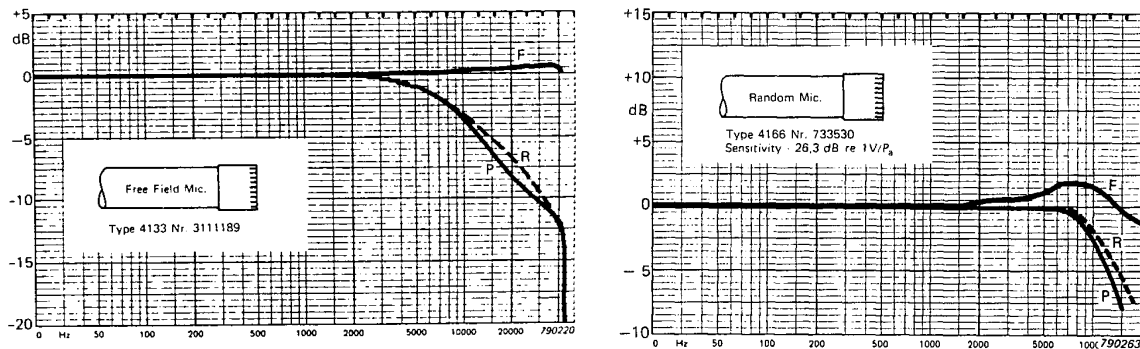


Figura 3 – Risposta in frequenza di microfoni a campo libero e ad incidenza diffusa

Il tipo di microfono in dotazione ai fonometri è legato generalmente alla normativa utilizzata nel paese in cui viene costruito il fonometro: la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) specifica l'utilizzo del microfono a campo libero, mentre l'Ente Nazionale Americano di Standardizzazione (ANSI) richiede l'uso dei microfoni ad incidenza casuale. Il microfono può comunque essere sostituito.

Alcuni fonometri e analizzatori di spettro, che sono forniti di serie di un microfono a campo libero, hanno la possibilità di modificare le proprie caratteristiche di risposta (per mezzo di uno specifico circuito elettronico di filtraggio, che consente la correzione cosiddetta frontal-random) per poter operare in maniera soddisfacente anche in campo diffuso: risulta comunque evidente che in tali condizioni l'impiego di un microfono a campo libero, pur applicando il filtro di correzione "random", avrà una accuratezza leggermente inferiore di quella che si otterrebbe impiegando un microfono per campo diffuso, e non inserendo alcun filtro di correzione (quindi lasciando il fonometro impostato su "frontal", che significa appunto "nessun filtro").

Quanto sopra è estremamente importante, e porta spesso a misure errate se non ben compreso: va anzitutto chiarito che la gran parte dei fonometri in vendita in Italia è dotato in origine di microfono a campo libero. Tuttavia è opportuno verificare caso per caso.

Inoltre si deve rammentare di impiegare la correzione "random" solo se sul fonometro è installato un microfono da campo libero (chiamato a volte "ad incidenza frontale"), e solo se il campo è veramente diffuso (quindi se le nostre orecchie non riescono a localizzare la direzione di provenienza del suono). L'impiego del filtro di correzione "random" in ambiente esterno, o in interno ma in mancanza di campo veramente diffuso, è sovente causa di misurazione di livelli sonori sovrastimati, soprattutto se il rumore è ricco di componenti ad alta frequenza, e se (come è usuale) si sta "puntando" la sorgente con il microfono.

### 2.1.2 Caratteristiche dei microfoni

Caratteristiche principali di un microfono sono la sensibilità a circuito aperto, la dinamica, la risposta in frequenza e la direzionalità. Queste sono sempre riportate nella carta di calibrazione del microfono e ne determinano il grado di qualità.



### 2.1.2.1 Sensibilità a circuito aperto

Essa indica il rapporto tra la tensione rilevata al terminale di uscita del microfono e la pressione sonora incidente a livello del diaframma. L'unità di misura è pertanto il mV/Pa.

Dalle caratteristiche di sensibilità del microfono dipende il livello minimo di pressione sonora misurabile. La sensibilità a circuito aperto viene calibrata alla frequenza di 250Hz ed è sempre riportata sulla carta di calibrazione del microfono stesso. Valori tipici di sensibilità sono compresi tra 10mV/Pa (bassa) e 50mV/Pa (alta). Ad esempio un microfono con una sensibilità di 50mV/Pa, in presenza di un livello sonoro pari a 94dB, erogherà 50mV, poiché a 94dB la pressione vale 1Pa. Se ora il livello sale di 20dB la pressione decuplica, per cui decuplica anche il segnale di uscita, ovvero a 114dB la pressione è di 10Pa e il microfono restituisce in uscita una tensione di 500mV.

Il microfono è montato su un preamplificatore, il cui scopo principale è quello di adattare l'impedenza del microfono con quella della circuiteria successiva. Un buon preamplificatore presenta verso il microfono un'impedenza virtualmente infinita, e conseguentemente non altera la sensibilità nominale dello stesso. A valle del preamplificatore, è possibile inserire cavi di prolunga o altri dispositivi, grazie alla capacità di erogazione di corrente fornita dal preamplificatore stesso. Il microfono a condensatore, viceversa, non sarebbe assolutamente in grado di erogare le correnti necessarie a pilotare un cavo di prolunga, o l'impedenza finita di ingresso della circuiteria elettronica del fonometro.

### 2.1.2.2 Gamma dinamica

È la differenza tra i più alti e i più bassi livelli di pressione sonora misurabili. Il limite inferiore della gamma dinamica rappresenta il minimo livello di pressione sonora che è misurabile col particolare preamplificatore e si raggiunge quando il segnale elettrico emesso dal microfono coincide con il rumore di fondo dell'amplificatore e dei vari filtri che sono posti in cascata; si ricorda, poi, che il rumore elettrico del preamplificatore dipende, in maniera rilevante, anche dalla capacità del microfono e va diminuendo all'aumentare della capacità. Il limite superiore della gamma dinamica rappresenta il livello di pressione massimo misurabile ed è legato unicamente alle caratteristiche di elasticità del diaframma che, superati i suoi limiti, introduce della distorsione.

### 2.1.2.3 Risposta in frequenza

È definita come il rapporto tra l'ampiezza della pressione acustica agente sul diaframma del microfono ad una certa frequenza e quella del segnale elettrico generato dal microfono stesso. La curva di risposta in frequenza del microfono viene calibrata in fabbrica con un attuatore elettrostatico che, posto sul microfono, va ad eccitare il diaframma in maniera simile alla pressione sonora. Le curve di risposta sono tracciate secondo una normalizzazione a 0dB. Tali curve sono progettate in modo da compensare tutti i fenomeni di interferenza e rifrazione che si verificano alle alte frequenze, ovvero quando le dimensioni fisiche del microfono risultano comparabili alle lunghezze d'onda del suono da misurare. Nella figura 3 sono mostrate le curve di risposta di due microfoni, uno a campo libero e uno a campo diffuso, di 1/2" di diametro, ottenute a circuito aperto, nel caso di un'incidenza a 0° (F), nel caso di incidenza diffusa (R) e nell'uso in pressione (P), cioè montato su un calibratore.

La curva di risposta in frequenza risulta influenzata anche dalla frequenza di risonanza del diaframma. Il valore di tale frequenza viene stabilito nella fase di progetto, tramite il controllo della massa, della tensione e della rigidità dello stesso, a seconda del tipo di microfono: il picco di risonanza viene più o meno smorzato in modo da rendere la curva di risposta in frequenza la più piatta possibile. Lo smorzamento del picco di risonanza può realizzarsi andando a variare il numero dei fori a livello del contropiatto. Più fori ci sono minore è l'effetto dello smorzamento sul diaframma. Dopo la frequenza di risonanza la risposta in frequenza del

microfono diminuisce in modo graduale. Si definisce taglio alle alte frequenze la frequenza alla quale la curva di risposta decresce di 3dB rispetto al riferimento di 0dB. La frequenza più bassa alla quale il microfono risponde con un segnale di uscita dipende dalla dimensione del foro di equalizzazione, che serve per mantenere la stessa pressione statica su entrambi i lati della membrana. Sotto i 5Hz, a rigore, tale foro andrebbe chiuso per rendere il microfono adatto alla misura di frequenze inferiori. Sopra i 5Hz, comunque, le dimensioni del foro sono abbastanza piccole da opporre resistenza alle onde sonore che potrebbero entrare nella cavità interna del microfono e la contropressione acustica sulla membrana assume valori trascurabili.

I microfoni a condensatore possono avere diverse dimensioni da 1 pollice ad 1/8 di pollice. È ovvio che, in base a tali dimensioni, si avrà una diversa sensibilità e una diversa risposta in frequenza. Nella figura 4, per i vari tipi di microfoni a condensatore, sono mostrate le corrispondenti risposte in frequenza e ampiezza, nonché i diversi range di livelli sonori misurabili. Si può constatare come la sensibilità di un microfono decresce al diminuire del suo diametro mentre la sua risposta in frequenza aumenta.

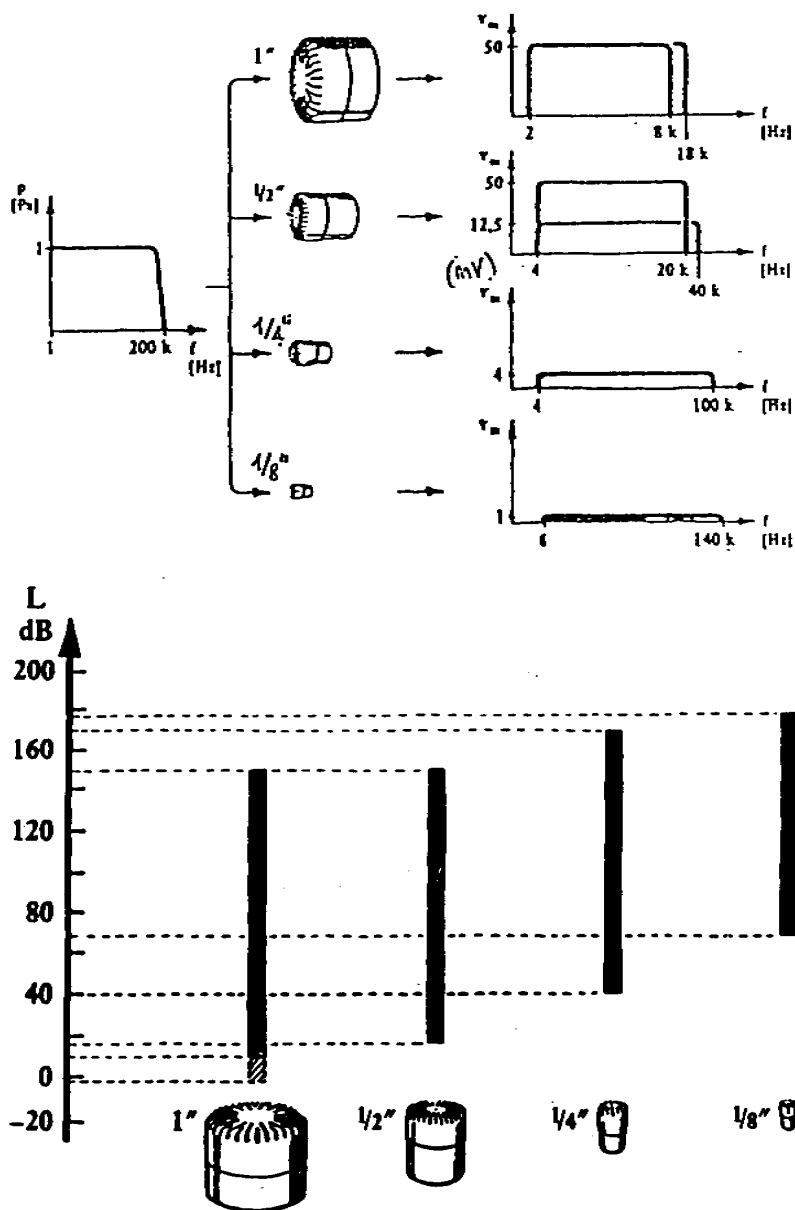


Figura 4 - Livelli e gamme di frequenze rilevabili in funzione delle dimensioni dei microfoni

#### 2.1.2.4 Direzionalità

Un'altro fattore caratterizzante è la direzionalità, ovvero la caratteristica di avere una risposta variabile a seconda dell'angolo di incidenza dell'onda sonora sul diaframma. Esistono in commercio due tipi di microfoni: quelli direzionali e quelli omnidirezionali. I primi presentano la massima risposta in corrispondenza ad una particolare direzione di incidenza del suono e tale risposta decresce man mano che ci si allontana da tale direzione. I secondi, almeno in teoria, devono avere la stessa risposta per qualunque direzione di provenienza del fronte sonoro. In realtà i microfoni di dimensioni più piccole (1/4" e 1/8") hanno le migliori caratteristiche di omnidirezionalità a tutte le frequenze della banda-audio. Essi, in sostanza, rispondono allo stesso modo a tutte le frequenze che arrivano da tutte le direzioni in quanto le loro dimensioni non hanno influenza sul campo sonoro alle frequenze di interesse. Per i microfoni più grandi, invece, si hanno risposte omnidirezionali solo per frequenze inferiori ai 5kHz.

Alle alte frequenze si osservano delle variazioni della risposta a seconda dell'angolo di incidenza. Nella figura 5 sono riportate le caratteristiche direzionali (diagramma polare) di un microfono per campo libero, omnidirezionale, di 1/2 pollice di diametro, al variare della frequenza. La direzione 0°-180° corrisponde alla direzione perpendicolare al diaframma del microfono.

Nella figura 6 sono schematizzate tali caratteristiche anche in funzione del montaggio del microfono rispetto al fonometro.

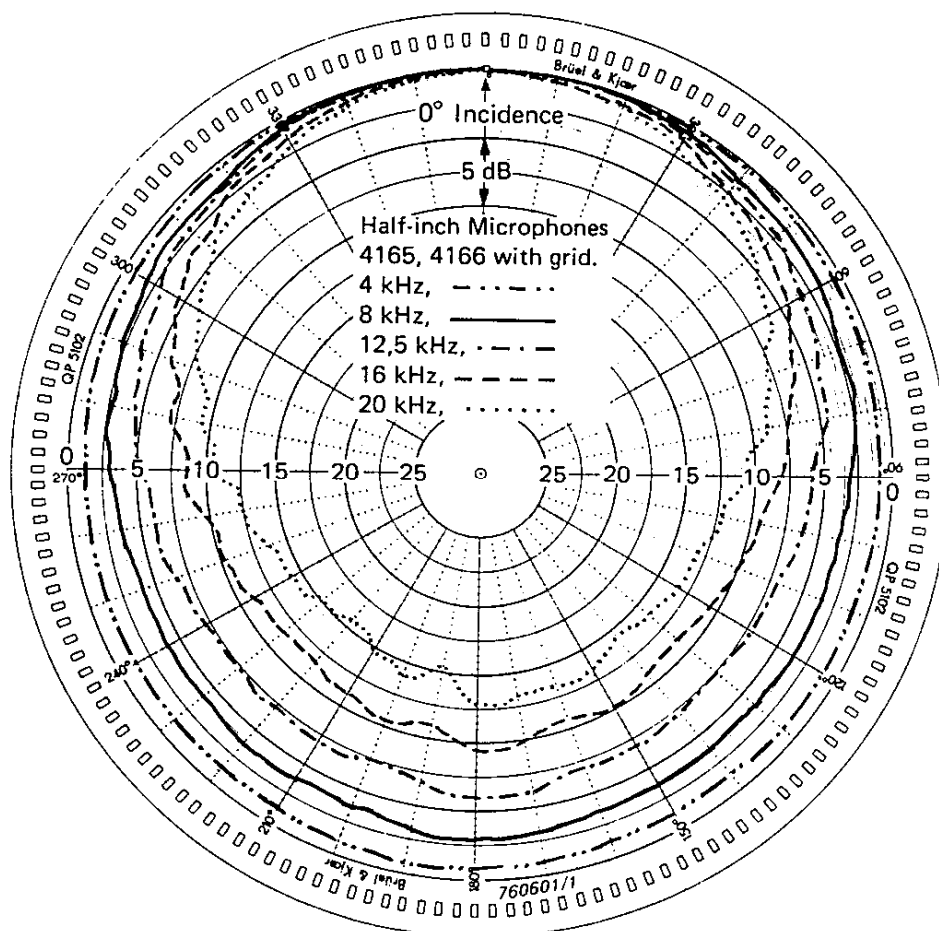


Figura 5 – Diagramma polare di un microfono da 1/2 pollice

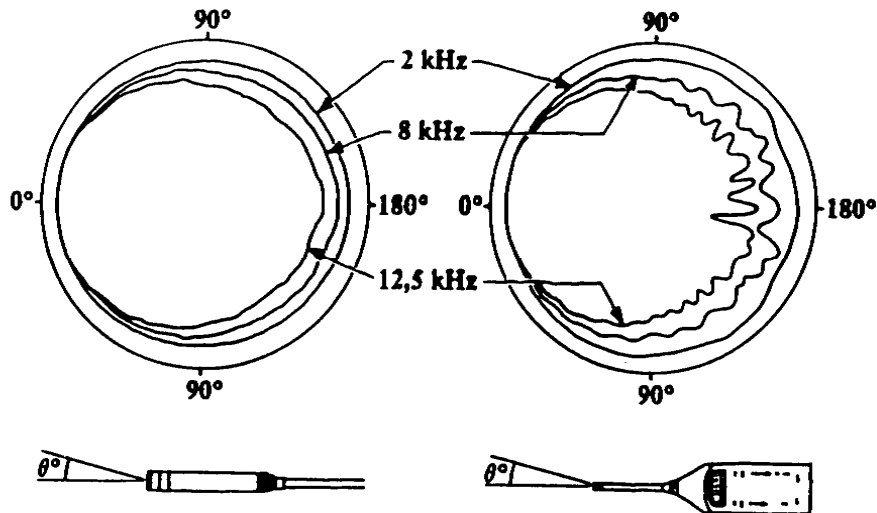


Figura 6 - Caratteristiche direzionali di un microfono da 1/2 pollice in funzione del montaggio sul fonometro

### 2.1.3 Microfoni accoppiati in fase: cenni di intensimetria

Un cenno particolare va fatto ai microfoni accoppiati in fase, utilizzati diffusamente in intensimetria.

Una grandezza di estremo rilievo nella metrologia acustica è l'intensità sonora, che abbiamo visto essere una grandezza vettoriale. Perciò la sua misura è particolarmente problematica, poiché è necessario anche tener conto della sua direzione: si dovrebbero utilizzare sofisticati strumenti di misura, muniti di trasduttori di velocità particolarmente complessi (es. anemometri a filo caldo di piccole dimensioni, in cui si escluda la componente continua del segnale, quali la sonda Microflow).

Una tecnica di misura particolarmente diffusa è quella indiretta, che fa uso di due microfoni a pressione accoppiati in fase (essi devono anche avere simile sensibilità e simile risposta in frequenza). Essi vengono posti ad una ben precisa distanza, che viene mantenuta costante in tutta la misura, in modo che lo stesso fronte d'onda pervenga ad essi sempre con il medesimo sfasamento. Quando un'onda sonora, che approssimeremo piana e progressiva, passa lungo la congiungente i due microfoni, questi ultimi rilevano due segnali di pressione diversi  $p_1$  e  $p_2$  sfasati tra di loro.

La relazione di Eulero ci consente di ottenere la velocità delle particelle nota la pressione:

$$(9) \quad \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\text{grad}(p) \Rightarrow u = - \int_{-\infty}^{\tau} \frac{\text{grad}(p)}{\rho} dt$$

Uno strumento digitale riesce rapidamente ad eseguire l'integrale nel tempo (diventa una semplice somma dei campioni acquisiti) ma è più difficile valutare il gradiente di pressione. Per evitare questo grosso inconveniente si approssima il gradiente di pressione con il rapporto tra la differenza delle pressioni rilevate dai due microfoni e la distanza che li separa:

$$(10) \quad \text{grad}(p) \cong \frac{p_2 - p_1}{d}$$

ma è bene ricordare che questa approssimazione vale solamente per lunghezze d'onda molto maggiori della distanza tra i due microfoni (ovvero per frequenze sufficientemente basse), in modo che l'errore commesso sia trascurabile. Tuttavia esiste anche un limite inferiore di

frequenza, legato all'errore di fase fra due segnali che tendono ad essere quasi identici allorchè la distanza fra i due microfoni diventa molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda. È per questo motivo (errore a bassa frequenza) che i microfoni devono essere perfettamente accoppiati in fase al fine di non misurare un gradiente di pressione errato.

#### 2.1.4 Calibratori acustici

Sono dei dispositivi in grado di produrre un livello di pressione nota e stabile sul diaframma di un microfono inserito nella sua cavità. Sono pertanto utilizzati per valutare la sensibilità della catena di misura prima e dopo ogni rilievo (in particolare possono servire ad eseguire la calibrazione del solo microfono). I calibratori più usati sono quelli a stantuffo meccanico e quelli a trasduttore elettroacustico e devono rispettare le prescrizioni della IEC 60942.

##### 2.1.4.1 Calibratori a stantuffo (pistonofoni)

Producono un livello noto di pressione sonora in una cavità chiusa, grazie al movimento di un apposito stantuffo (pistonofono). Il microfono da calibrare viene inserito nella cavità in modo da chiuderla. Successivamente un motore elettrico pone in movimento lo stantuffo: tale moto è uniforme e porta così alla produzione di un suono puro e stabile ad una specifica frequenza. Il livello di pressione sonora che viene prodotto all'interno della cavità del calibratore dipende dal valore della pressione atmosferica ambientale e dal relativo cambiamento di volume. Tipicamente il calibratore a stantuffo produce un livello sonoro molto elevato (di solito 124dB) ad una frequenza abbastanza bassa (di solito 250Hz). Diventa molto difficile realizzare meccanicamente un calibratore in grado di operare a frequenza più elevata, cosa che in molti casi sarebbe utile, poiché a 1000 Hz la curva di ponderazione "A" non ha effetto, mentre a 250 Hz essa dà luogo ad una attenuazione di 8.4 dB, e di questa occorre tener conto nella verifica della correttezza del livello sonoro indicato dallo strumento durante la taratura con il calibratore. La calibrazione della catena di misura eseguita con il pistonofono garantisce una precisione, in condizioni normali di pressione atmosferica, di  $\pm 0.2$ dB. Il calibratore a stantuffo fornisce delle prestazioni stabili nel tempo ma, per contro, ha il limite di fornire un unico valore di livello di pressione, molto elevata, e ad un'unica frequenza, abbastanza bassa.

##### 2.1.4.2 Calibratori a trasduttore elettroacustico

Si tratta di calibratori che producono un livello noto di pressione sonora entro una piccola cavità grazie ad un piccolo altoparlante che viene eccitato da un segnale stabilizzato proveniente da un oscillatore elettronico. Il livello di pressione sonora prodotto dipende solo in minima parte dalla pressione atmosferica e, in ogni caso, tale dipendenza può essere corretta in modo opportuno. Tali calibratori hanno una precisione di  $\pm 0.4$ dB. I più comuni generano un segnale a 1kHz con un livello di pressione di 94dB.

Molti di questi calibratori hanno un tasto che consente di elevare il livello sonoro (tipicamente a 114 dB), onde poter verificare la linearità in ampiezza della catena di misura.

Vi sono inoltre calibratori a trasduttore con una gamma di frequenze più ampia, da 125Hz a 2kHz.

È appena il caso di accennare al fatto che la taratura periodica del fonometro deve essere eseguita, presso un centro autorizzato SIT, con strumenti ben più completi e sofisticati. In particolare occorrono dei generatori di segnali acustici con frequenza compresa tra i 31.5Hz e i 16kHz con passi di ottava e con diversi livelli (es. 94, 104, 114, 124 dB). Solo con una procedura di verifica più articolata, infatti, possiamo essere sicuri del corretto funzionamento dello strumento globalmente inteso.

## 2.2 Preamplificatore

Si è già accennato in precedenza al blocco preamplificatore, che segue sempre il microfono del fonometro. Esso fornisce il supporto al microfono ma, soprattutto, ha la funzione di adattare le alte impedenze d'uscita del microfono alle basse impedenze necessarie per alimentare l'ingresso delle apparecchiature ad esso collegate. In tal modo viene minimizzata la perdita di segnale (che viene così trasferito in maniera efficiente al sistema successivo di filtraggio e misura), nonché la produzione di rumore elettrico. Tale stadio viene realizzato con un transistor di tipo **FET** (transistor a effetto di campo) in configurazione di **impedance converter**, in modo che il sistema microfono-preamplificatore possa erogare della corrente in uscita su un'impedenza di valore finito.

Infatti, il microfono a condensatore non funziona se chiuso su un carico poiché si ha l'inesco del processo di scarica del condensatore stesso. Invece, chiudendo il circuito su un'impedenza infinita o comunque molto grande, il condensatore non si scarica e la variazione di tensione viene rilevata nel circuito a valle.

È evidente che questo blocco determina la minima frequenza e la minima ampiezza misurabili, le quali sono legate alla sua impedenza d'ingresso e al suo rumore di fondo: poiché tale rumore non è mai inferiore ai 12-13dB, di solito il livello a 20dB è quello minimo rilevabile (e solo gli strumenti da laboratorio più raffinati possono arrivare a livelli inferiori). I preamplificatori microfonici necessitano di una alimentazione, che può essere compresa fra 28 V e 120 V (sempre DC). Tanto maggiore è la tensione di alimentazione, tanto minore è il rischio di sovraccarico del preamplificatore in presenza di suoni molto forti.

Va infine osservato che l'eventuale sovraccarico del preamplificatore **NON** viene segnalato dall'indicatore di "overload" dello strumento. Per poter misurare livelli sonori elevati con preamplificatori alimentati a bassa tensione, occorre inserire fra la capsula microfonica ed il preamplificatore stesso un apposito filtro attenuatore (di solito da 20 dB), costituito da un cilindretto filettato, che evita che sullo stadio di ingresso del preamplificatore giunga dal microfono una tensione troppo elevata.

## 2.3 Amplificatore

Riceve ed amplifica il segnale proveniente dal preamplificatore. In particolare è bene osservare che, in fase di progetto, occorre garantire che tale amplificatore (come del resto il preamplificatore) abbia una risposta in frequenza adeguata, ovvero contenga in banda passante la gamma in frequenza che il microfono collegato può individuare. Questa prerogativa, ancor più in generale, va mantenuta in tutta la catena di amplificazione per un corretto comportamento dello strumento.

Viene definita la dinamica in ampiezza dell'amplificatore come il rapporto tra il livello del suo rumore di fondo (a cui si aggiungono 5dB) e il livello a cui si verifica la saturazione del segnale. Per evitare che si realizzi la saturazione (dovuta all'instaurarsi di un comportamento non lineare dei componenti elettronici del blocco), ogni amplificatore è munito di un indicatore di overload che, con un giusto impiego dei commutatori degli attenuatori di ingresso ed uscita, consente di ottimizzare la misura per un qualsiasi fenomeno sonoro analizzato, permettendo anche un cambio del fattore di scala e della gamma di livelli di pressione presi in considerazione. Anche rumori molto forti, quali lo sparo di un cannone, possono così essere rilevati senza il pericolo di un troncamento in ampiezza del segnale elettrico prodotto. Del resto un fonometro ha di solito un campo dinamico compreso fra 60 dB (valore minimo consentito per un fonometro in classe I) e 110 dB, con un valore tipico di 80dB: gli attenuatori consentono di passare da un range 20-100dB ad uno 40-120dB e così via.

In realtà nei moderni fonometri il blocco amplificatore può anche essere dotato di guadagno fisso: con la tecnologia attuale, infatti, i componenti elettronici a valle possono gestire dei segnali di entità molto bassa senza problemi, mentre in passato era necessario aumentare il

livello del segnale per riuscire a discriminare il segnale utile dal rumore di fondo della circuiteria. Esistono ad esempio fonometri che misurano in un unico campo, da 30 a 140 dB.

## 2.4 Filtri di ponderazione

In cascata all'amplificatore sono presenti dei filtri di ponderazione che, se selezionati, vanno ad eseguire automaticamente una correzione sul segnale elettrico in ingresso, al fine di attenuare certe componenti dello spettro in frequenza ed esaltarne altre. L'obiettivo di tale operazione è quello di consentire una valutazione più accorta degli effetti del rumore misurato sull'uomo, noto che l'orecchio umano risulta più sensibile a certe frequenze (quelle alte) che non ad altre (quelle basse). Premesso che la percezione uditiva è caratteristica soggettiva, si sono comunque individuati quattro curve di ponderazione: A, B, C, D, normalizzate in campo internazionale.

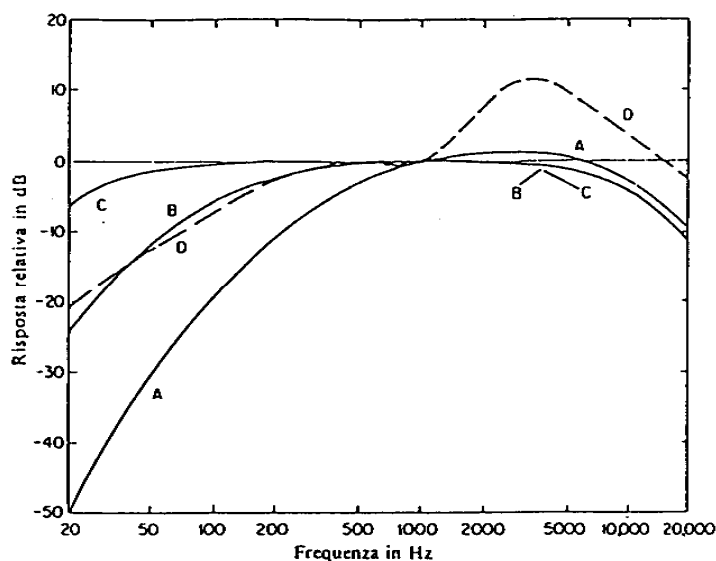


Figura 7 - Curve di ponderazione

In particolare nei fonometri è sempre presente il filtro della curva di ponderazione A, che tiene conto delle caratteristiche dell'orecchio umano e, perciò, va ad attenuare drasticamente le frequenze inferiori a 1kHz ed esalta le frequenze tra 1kHz e 5kHz. Ovvio che in questo modo hanno maggior peso, nella determinazione del livello globale, i contributi alle frequenze in cui l'orecchio è più sensibile. Spesso nei fonometri è presente anche la curva C (che rappresenta bene la risposta umana ai rumori impulsivi molto forti), mentre meno frequenti sono la curva B e la curva D (quest'ultima tipica per la misura del rumore prodotto da traffico aereo).

Anche se le normative sono concordi nel prevedere l'utilizzo della curva di ponderazione A nell'eseguire le misure, l'utilizzo combinato dei vari filtri può rivelarsi alquanto utile, soprattutto se lo strumento non dispone di altri dispositivi per l'analisi spettrale. Poiché infatti hanno diverse bande attenuate, confrontare le uscite dai diversi filtri ci consente di evidenziare la presenza di componenti sonore a specifiche frequenze.

## 2.5 Filtri per l'analisi in frequenza

In alcuni fonometri sono presenti anche dei filtri di tipo passa-banda specifici per eseguire l'analisi in frequenza del segnale sonoro. Tali filtri hanno delle bande di ampiezza opportuna, in modo da selezionare delle componenti spettrali attenuando drasticamente tutte le altre, site al di sotto e al di sopra. Si riesce così a scomporre in frequenza il segnale. Negli strumenti più vecchi tali filtri sono analogici e quindi bisogna analizzare una frequenza alla volta. Negli strumenti più moderni che utilizzano filtri digitali, l'analisi può essere eseguita in tempo reale a tutte le

frequenze. Normalmente nei fonometri si esegue un'analisi a banda percentuale costante, ovvero con la larghezza di banda che è un valore percentuale costante della sua frequenza centrale. In particolare si hanno dei filtri in bande di ottava e/o in 1/3 di ottava: le frequenze centrali di ogni banda sono, come noto, stabilite da una precisa normativa (EN/ISO 61260/95 e IEC 1260).

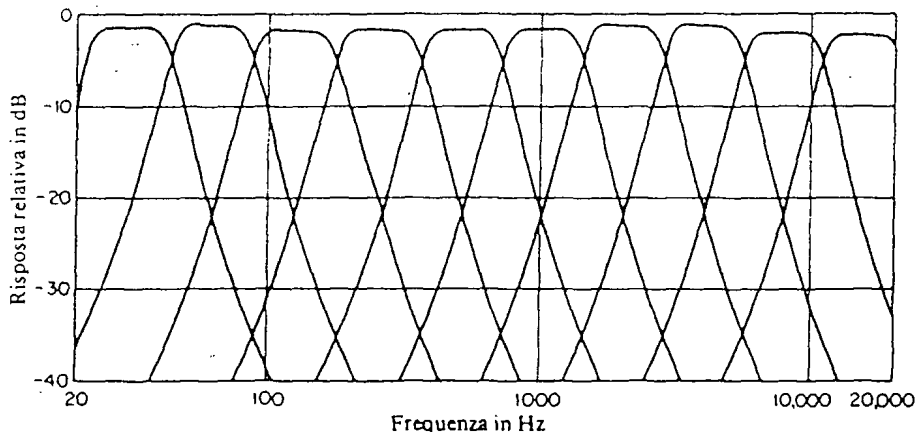


Figura 8 - Serie di 10 filtri in ottava da 31.5 a 16000 Hz

## 2.6 Rivelatore (convertitore rms e convertitore logaritmico)

Questo è un blocco essenziale del fonometro. Esso trasforma la tensione alternata del segnale elettrico, che gli viene fornito in ingresso dal tratto precedente della catena di misura, in una tensione continua che è proporzionale al valore efficace (convertitore rms) o al valore di picco del fenomeno acustico esaminato. È poi possibile, grazie ad un apposito convertitore logaritmico, passare dal valore efficace in Volt al livello in dB. Il sistema di calcolo campiona il segnale e calcola il livello equivalente oppure visualizza il livello istantaneo di pressione sonora con costante di tempo assegnata. Questi convertitori sono di tipo analogico in quasi tutti i fonometri (anche se possiedono un display digitale) e solo nei più recenti (fonometri con analizzatore di spettro in tempo reale incorporato) sono realizzati in tecnologia interamente digitale, cioè campionando la forma d'onda ad elevatissimo rateo (tipicamente 48000 volte al secondo o anche di più) e operando poi sui valori numerici così ottenuti tramite un apposito processore ad alta velocità, chiamato DSP. Con un convertitore analogico e invece sufficiente utilizzare 16 campioni al secondo per effettuare il calcolo del livello equivalente.

Negli strumenti con convertitore RMS analogico, possiamo impostare manualmente (di solito tramite un selettore) la costante di tempo di misura, cioè il valore di T nella formula della media esponenziale (eq. 3). La costante di tempo determina la rapidità con la quale lo strumento è in grado di seguire le fluttuazioni effettive del segnale. Per consentire diverse possibilità di analisi sono state normalizzate quattro costanti di tempo: Fast, Slow, Impulse (costanti tempo esponenziali) e Peak.

NOME	VALORE
Slow	1 s
Fast	125 ms
Impulse-livelli crescenti	35 ms
Impulse-livelli decrescenti	1.5 s
Peak	< 20 $\mu$ s



Le prime tre costanti di tempo si dicono esponenziali; infatti il valore del livello che viene fornito in un istante, è in realtà un valore determinato dall'andamento passato del livello che condiziona il risultato presente con un "peso" che decresce esponenzialmente all'aumentare della distanza temporale, fino (al limite) a non influire per niente, per tempi estremamente remoti. Il valore tipico delle costanti di tempo è la distanza temporale per cui l'abbattimento esponenziale della memoria si dimezza. Il valore relativo ad un certo istante viene poi utilizzato, in somma energetica, per fornire il valore presente, come mostrato dall'eq. (3).

Con la costante Fast lo strumento riesce a fornire una risposta abbastanza rapida. Con la costante Slow lo strumento fornisce una risposta più lenta e non è in grado di seguire le oscillazioni come con la costante Fast. I valori massimi con la costante di tempo Slow sono più bassi di quelli ottenuti con la costante Fast, mentre i valori minimi sono più alti.

Con la costante Impulse lo strumento risponde rapidamente con un tempo di salita di 35ms (ovvero dello stesso ordine di grandezza di quello dell'orecchio umano) fornendo il valore efficace del valore massimo dell'onda. La costante di tempo Impulse è però "asimmetrica", in quanto ha un tempo di decadimento molto lungo (1.5s), in modo da consentire una corretta lettura del livello raggiunto.

Questo è un retaggio del passato, quando gli strumenti avevano un indicatore a lancetta, e la lenta discesa dello stesso consentiva di "leggere" il valore massimo raggiunto in corrispondenza dell'evento impulsivo. Nei moderni strumenti digitali, il valore massimo con costante di tempo di 35ms verrebbe memorizzato esattamente anche se non si avesse un successivo lento decadimento.

La costante Impulse viene utilizzata soltanto per la verifica dei rumori con componenti impulsive con le modalità e nei casi previsti dalla legislazione vigente. In sostanza, si confrontano i tracciati temporali dei segnali con costante di tempo Impulse, Fast e Slow, e si considera "impulsivo" un evento sonoro solo allorché la differenza fra valore massimo Impulse e valore massimo Slow supera i 6 dB, essendo la durata dell'evento inferiore ad 1s lungo il tracciato Fast, (considerando come durata la distanza temporale fra i due punti, su tale tracciato Fast, posti prima e dopo il valore massimo raggiunto, ad un livello inferiore di 10 dB rispetto al valore massimo Fast).

Per consentire più agevolmente l'applicazione del criterio suddetto, gli strumenti moderni campionano simultaneamente il livello sonoro con tutte e tre le costanti di tempo esponenziali (Impulse, Fast, Slow), oltre a memorizzare anche il valore massimo assoluto della forma d'onda (valore di cresta, ovvero livello sonoro di picco, cioè misurato con costante di tempo Peak).

La costante Peak, per contro, ha un tempo di salita inferiore a 20 $\mu$ s e viene usata soprattutto negli ambienti di lavoro per rilevare i valori di picco di suoni impulsivi con durata più breve del tempo di risposta dell'orecchio. Questi suoni, in effetti, poiché sono in grado di attraversare tutti i sistemi di difesa dell'orecchio, possono arrivare direttamente alle cellule ciliari dell'orecchio interno, provocando danni irreversibili sullo stesso. Non a caso esistono specifiche normative che vanno ad imporre dei limiti per i valori di picco (130-140 dB, con ponderazione C o lineare rispettivamente).

A monte e a valle del rivelatore ci possono essere due uscite analogiche, che sono rispettivamente indicate come AC e DC, che consentono il collegamento con registratori magnetici o con plotter grafici di misura o altri strumenti di analisi.

## 2.7 Strumento di lettura

Serve a visualizzare i risultati della misura (con le eventuali, successive, elaborazioni). Può essere di tipo analogico a lancetta (per gli strumenti meno recenti) o digitale con specifico display (praticamente tutti, al giorno d'oggi). Si parla di fonometro istantaneo quando si visualizzano i valori dei livelli di pressione con l'uso delle costanti di tempo, mentre si parla di fonometro integratore quando si visualizzano i valori dei livelli equivalenti e del *SEL*, ottenuti mediante opportune integrazioni.

Sebbene i moderni fonometri-analizzatori digitali siano in grado di misurare il “vero” livello equivalente, cioè di implementare direttamente l’eq. 1) a partire dalla somma dei quadrati dei singoli valori di pressione sonora campionati, la maggior parte dei fonometri ricalcola il livello equivalente dalla successione temporale dei livelli “istantanei” con costante di tempo Fast, che vengono memorizzati dallo strumento con un cadenzamento temporale molto lento, tipicamente 8 volte al secondo. In questo caso, il calcolo del  $Leq$  avviene secondo l’eq. 6, e ciò porta ad un errore sistematico rispetto al valore “vero”, errore che comunque rimane sempre all’interno delle tolleranze stabilite per ciascuna classe di fonometri. Per ridurre l’errore di media entro i limiti della classe 0, occorre campionare il valore istantaneo “Fast” almeno 16 volte al secondo, anziché 8, come fanno invece di solito i fonometri di classe 1.

## 2.8 Memorie

Spesso è richiesto di memorizzare i risultati delle misure, per consentire delle elaborazioni più raffinate e dei confronti particolari.

### *Memoria di display*

Consente di salvare i dati visualizzati sul display a fine misura (livello minimo, livello massimo, livello equivalente...)

### *Memoria storica o Log*

Il fonometro consente di archiviare in questa memoria, ad intervalli di tempo prestabiliti, i valori misurati. Si ha così la possibilità di ricostruire il profilo sonoro temporale su un lungo periodo. Più frequentemente si memorizzano i dati e più accurato sarà, ovviamente, tale profilo. Tuttavia, per misure molto lunghe (una settimana) risulta sconveniente esagerare con la risoluzione temporale: se infatti si memorizzasse ogni s tutto quanto (spettro in terzi d’ottava, valori max e min con ciascuna costante di tempo, 8 valori istantanei fast, e magari anche i descrittori statistici di tutti i parametri suddetti) si otterrebbero dei files dati enormi, di difficile gestione sia all’interno della memoria del fonometro, sia in fase di trasferimento su PC. L’operatore deve dunque scegliere un ragionevole compromesso, in funzione della durata complessiva della misura, in termini di scelta dei parametri da memorizzare e di cadenza temporale delle memorizzazioni.

### *Memoria statistica*

Serve per consentire l’analisi statistica dei dati. In sostanza, ad ogni passo temporale di analisi (tipicamente 8 volte al secondo), si va a memorizzare nell’opportuna cella di un vettore il numero di volte in cui il livello sonoro (Fast) è stato compreso in un certo intervallo di livelli. Tipicamente si usa una risoluzione di 1 dB, ma in certi casi anche di 0.5 dB.

Al termine della misura, si normalizzano i contenuti del vettore dividendo per il numero totale di intervalli temporali memorizzati, e si rappresenta graficamente l’analisi statistica del livello sonoro mediante una curva che mostra, per ciascuna classe di ampiezza del livello sonoro (ad es. per ogni classe di 1 dB), quant’è la frazione del tempo complessivo in cui si è verificato un livello sonoro compreso in tale classe.

Tale curva, chiamata Analisi Statistica Distributiva, consente di evidenziare utili informazioni sulla compresenza di diverse sorgenti sonore, come verrà dettagliatamente mostrato nell’apposito capitolo 3.

## 2.9 Uscite del fonometro

### *Seriale (o USB nei modelli più recenti)*

Serve a pilotare il fonometro da un computer o per scaricare i dati contenuti nella memoria log. In alcuni modelli si può anche collegare direttamente una stampante.

### *AC-forma d'onda*

Il punto nel quale viene prelevato questo segnale dipende dal particolare modello del fonometro. Di solito si trova tra l'attenuatore ed il blocco ponderatore, in modo da essere sensibile alle variazioni del fondoscala dell'amplificatore, ma di non risentire della particolare curva di ponderazione in frequenza (quindi l'uscita è lineare).

In alcuni modelli, invece, essa è a valle anche del filtro che produce la curva di ponderazione in frequenza, e conseguentemente il segnale in uscita risente della stessa. In alcuni fonometri esistono due uscite AC, una lineare ed una con la ponderazione in frequenza.

L'uscita AC può essere collegata ad un registratore magnetico (tipicamente un registratore DAT), oppure direttamente ad un ingresso "line-in" della scheda audio del PC.

### *DC-livello*

Questo segnale viene prelevato subito dopo il convertitore lin-log, quindi non è il livello equivalente, ma un livello istantaneo Fast o Slow a seconda della costante di tempo utilizzata. Può essere utilizzata per pilotare un registratore grafico di livello o un plotter, o può essere memorizzato su un data-logger.

## **2.10 Riferimenti normativi**

[1] International Standard IEC 60651:1979..2000. Sound level meters.

[2] International Standard IEC 60804:1985...2000. Integrating-averaging sound level meters.

[3] International Standard IEC 61672-1:2002. Sound level meters – Part 1: Specifications.

[4] International Standard IEC 61672-2:2003. Sound level meters – Part 2: Pattern evaluation tests.

[5] International Standard IEC 61672-3:2006. Sound level meters – Part 3: Periodic tests.

[6] International Standard IEC 61260:1995. Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters.