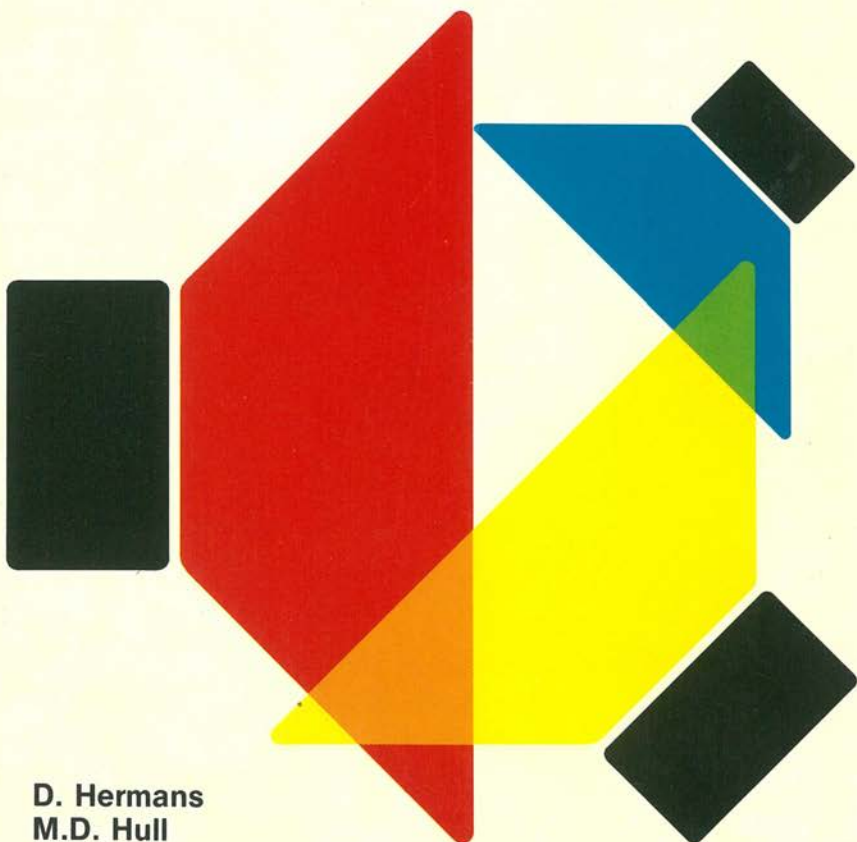


Progettazione di sistemi di altoparlanti



D. Hermans
M.D. Hull



GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON

Progettazione di sistemi di altoparlanti

**D. Hermans
M.D. Hull**



**GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON
Via Rosellini, 12
20124 Milano**

Copyright per l'edizione italiana: Gruppo Editoriale Jackson - Marzo 1985
Tratto da: "Designing hi-fi speaker system" della Philips-Elcoma
SUPERVISIONE TECNICA: Daria Gianni
GRAFICA E IMPAGINAZIONE: Francesca Di Fiore
COPERTINA: Silvana Corbelli
FOTOCOMPOSIZIONE: CorpoNove s.n.c. - Bergamo
STAMPA: S.p.A. Alberto Matarelli - Milano

Tutti i diritti sono riservati. Stampato in Italia. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta, memorizzata in sistemi di archivio, o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo, elettronico, meccanico, fotocopia, registrazione o altri senza la preventiva autorizzazione scritta dell'editore.

PREFAZIONE

Questo libro tratta l'analisi teorico-pratica di una parte dei sistemi acustici HI-FI; in particolare si considerano i sistemi in cassa acustica ermeticamente chiusa utilizzando altoparlanti a bobina mobile a radiazione diretta. Accanto a capitoli prettamente teorici ne avremo altri di tipo applicativo, in cui si descriveranno passo-passo i calcoli e la costruzione di tre tipi di sistemi acustici HI-FI utilizzando altoparlanti PHILIPS. Il testo potrà essere letto a più livelli: chi ha una preparazione matematica sufficiente (scuola tecnica) potrà prendere conoscenza approfondita di tutte le parti del libro, dalle considerazioni di principio ai risultati finali; mentre chi non ha tali basi teoriche può ugualmente impossessarsi delle regole fondamentali che gravitano attorno ai box acustici HI-FI pervenendo in ogni caso a risultati corretti.

Il testo inizia con l'introduzione di alcuni principi di produzione e propagazione dei suoni, a cui seguirà la spiegazione del funzionamento degli altoparlanti a bobina mobile e le loro caratteristiche.

Si inizia quindi a prendere in esame la progettazione del box ermetico e dei filtri cross-over. Il capitolo successivo è dedicato alle metodologie di misura delle caratteristiche degli altoparlanti e dei sistemi acustici con tecniche analogiche e digitali; infine si vedranno alcuni elementi di acustica ambientale.

INTRODUZIONE

Prima del 1925, la potenza d'uscita delle normali radio era solo di pochi milliwatt. Esse usavano valvole molto inefficienti e, poichè l'alimentazione era data da batterie, la corrente di funzionamento doveva essere mantenuta bassa. Nel 1920, E.W. Kellogg della General Electric Company, U.S.A., e C.W. Rice, progettarono un amplificatore dalla "inaudita" potenza di 1 W. Con questo "potente" strumento a disposizione, essi cominciarono a lavorare su un nuovo tipo di altoparlante che fosse in grado di dare un livello di uscita sufficiente.

Nel 1925 descrissero i risultati del loro lavoro ed entrarono sul mercato con il primo tipo di altoparlante a bobina mobile, come quelli che conosciamo oggi, completo di amplificatore di potenza.

L'altoparlante di Rice e Kellogg aveva un diametro di 6 pollici e bordo elastico. Il campo magnetico era fornito da una corrente continua che scorreva nella bobina. Presto si fece in modo che la corrente che formava il campo magnetico dell'altoparlante fosse la stessa che alimentava la radio. Nacquero così i più diffusi radioricevitori. Successivamente la Marconi Company brevettò l'idea di usare la bobina che forma il campo magnetico come livellatrice dell'alta tensione nell'alimentatore del ricevitore, ma, quando furono disponibili magneti permanenti sufficientemente efficienti, l'altoparlante visto precedentemente ebbe i giorni contati. Nonostante 50 anni di progresso scientifico e tecnico in tutti gli aspetti della riproduzione del suono, l'altoparlante a bobina mobile rimane sostanzialmente lo stesso oggi come era nel 1925 quando Rice e Kellogg rivelarono i risultati del loro lavoro. Materiali e metodi di produzione sono cambiati, così come le prestazioni. Ci sono stati infatti molti miglioramenti: differenti impedenze, diminuzione della distorsione e aumento della banda di frequenze riprodotta. Ma, dopo mezzo secolo di ricerche e di sviluppo, non è ancora stata studiata un'alternativa soddisfacente. Tenuto conto di tutti i miglioramenti dell'ingegneria audio, possiamo dire che l'ultimo ostacolo al traguardo della perfetta riproduzione sonora è l'altoparlante a bobina mobile. Pochi uomini del mondo civilizzato possono dire di non aver nemmeno un'altoparlante.

In genere ne posseggono più di uno. Ora anche le automobili posseggono l'impianto stereo. Ci sono letteralmente milioni e milioni di altoparlanti. Comunque, la situazione cambia; la sovrappopolazione e altri motivi fanno sì che le abitazioni siano di piccole dimensioni e, di conseguenza, anche gli impianti di ascolto domestici devono essere di dimensioni ridotte. La moderna richiesta è, cioè, per box acustici piccoli. Allo stesso tempo però è in aumento il numero di persone di livello economico relativamente alto che richiedono una elevata qualità di riproduzione, ed è disposta a pagare per ottenerla. Così, l'altoparlante, vecchio di 50 anni, è soggetto a nuovi sviluppi. Una riduzione delle dimensioni delle casse

acustiche significa una riduzione della loro efficienza alle basse frequenze: è necessaria una maggiore potenza d'ingresso per ottenere lo stesso livello sonoro; si è allora assistito ad un aumento della potenza d'uscita media degli amplificatori. Un semplice metodo per costruire buoni diffusori acustici è quello della cassa chiusa. Il suo costo è ragionevole e, in generale, questo metodo di montaggio è soddisfacente sia per il costruttore che per il cliente.

La cosa più importante, tecnologicamente parlando, è che le prestazioni possono essere accuratamente controllate.

SOMMARIO

I PARTE

CAPITOLO 1

EQUAZIONI D'ONDA ED ELEMENTI DI ACUSTICA

| | | |
|-------------------------------------|------|----|
| 1.1. Propagazione del suono | Pag. | 1 |
| 1.2. Equazione d'onda | » | 1 |
| 1.3. Elementi di acustica meccanica | » | 5 |
| 1.4. Impedenza di radiazione | » | 10 |
| 1.4.1 Descrizione qualitativa | » | 10 |
| 1.4.2 Analisi matematica | » | 11 |
| 1.4.3 Sostituzione serie-parallelo | » | 13 |
| 1.4.4 A'toparlante | » | 14 |
| 1.5. Intensità del suono | » | 16 |

CAPITOLO 2

L'ALTOPARLANTE A BOBINA MOBILE A RADIAZIONE DIRETTA

| | | |
|---|---|----|
| 2.1. Principi di funzionamento | » | 19 |
| 2.2. Conversione dell'energia a due stadi | » | 19 |
| 2.2.1 Circuito equivalente dell'altoparlante | » | 19 |
| 2.2.2 Impedenza dell'altoparlante | » | 22 |
| 2.3. Resistenza di radiazione | » | 22 |
| 2.4. Relazione tra impedenze elettriche e meccaniche | » | 25 |
| 2.5. Effetto dell'impedenza meccanica sulla potenza acustica | » | 27 |
| 2.6. Risposta in frequenza | » | 33 |
| 2.7. Smorzamento e fattore Q | » | 35 |
| 2.8. I coni degli altoparlanti | » | 37 |
| 2.9. Bordo del cono | » | 39 |
| 2.10. Direttività | » | 39 |
| 2.11. Non linearità e distorsione | » | 42 |
| 2.12. Sistemi multi via | » | 45 |
| 2.13. Magneti | » | 46 |
| 2.14. Caratteristiche degli altoparlanti | » | 49 |
| Sistema 1: a due vie, due altoparlanti, woofer, tweeter | » | 49 |
| Sistema 2: a tre trasduttori, woofer, mid-range e tweeter a cupola | » | 53 |
| Sistema 3: a tre vie, woofer, mid-range e tweeter a cupola | » | 59 |

II PARTE

CAPITOLO 3

PROGETTO DELLA CASSA A CHIUSURA ERMETICA.

| | | | |
|-------|--|---|-----|
| 3.1 | Lo schermo infinito | » | 67 |
| 3.2 | Circuito equivalente del sistema a chiusura ermetica | » | 68 |
| 3.3 | Determinazione dei valori di massa e della cedevolezza | » | 70 |
| 3.3.1 | Massa acustica | » | 70 |
| 3.3.2 | Calcolo della massa del carico d'aria | » | 73 |
| 3.3.3 | Cedevolezza della sospensione e del box | » | 75 |
| 3.4 | Valore degli elementi resistivi | » | 76 |
| 3.5 | Risonanza interna della cassa | » | 77 |
| 3.6 | Smorzamento e fattore di merito Q | » | 78 |
| 3.7 | Effetto della cedevolezza del box sulla frequenza di risonanza . . . | » | 82 |
| 3.8 | Considerazioni sulla potenza | » | 85 |
| 3.8.1 | Pressione sonora irradiata | » | 85 |
| 3.8.2 | Potenza nominale | » | 88 |
| 3.8.3 | Efficienza | » | 90 |
| 3.8.4 | Metodi di valutazione della potenza | » | 93 |
| 3.8.5 | Potenza operativa | » | 93 |
| 3.8.6 | Potenza musicale | » | 94 |
| 3.9 | Dimensioni del box e sua costruzione | » | 94 |
| 3.10 | Determinazione del volume nel box | » | 94 |
| 3.11 | Costruzione del box | » | 98 |
| 3.12 | Esempi di calcolo del volume nel box | » | 101 |
| | Cassa 1 (Sistema 1) woofer e tweeter | » | 101 |
| | Cassa 2 (Sistema 2) woofer, midrange e tweeter | » | 103 |
| | Cassa 3 (Sistema 3) woofer, midrange e tweeter | » | 105 |

CAPITOLO 4

FILTRI CROSS-OVER

| | | | |
|------|---|---|-----|
| 4.1 | Dati di progetto | » | 109 |
| 4.2 | Scelta delle frequenze di cross-over | » | 110 |
| 4.3 | Tipi di reti passive | » | 111 |
| 4.4 | Filtro cross-over ad impedenza costante per un sistema a due vie | » | 112 |
| 4.5 | Reti per sistemi a due vie | » | 116 |
| 4.6 | Effetto dell'impedenza dell'altoparlante | » | 118 |
| 4.7 | Risposta in fase | » | 122 |
| 4.8 | Ottenimento del responso lineare | » | 123 |
| 4.9 | Attenuatore ad impedenza costante | » | 127 |
| 4.10 | Scelta dei componenti del filtro | » | 130 |
| 4.11 | Filtri cross-over delle casse in esame (casse 1, 2 e 3) e misura della risposta in frequenza | » | 133 |

III PARTE

CAPITOLO 5

NORMATIVE E MISURE

| | | | |
|-------|---|---|-----|
| 5.1 | Standard nazionali ed internazionali | » | 147 |
| 5.2 | Condizioni standard per i test | » | 151 |
| 5.2.1 | Test dell'altoparlante non montato nel box | » | 151 |
| 5.2.2 | Test con altoparlante montato nel box | » | 152 |
| 5.3 | Modulo dell'impedenza e frequenza di risonanza | » | 157 |
| 5.4 | Resistenza della bobina mobile | » | 159 |
| 5.5 | Densità del flusso magnetico | » | 159 |
| 5.6 | Distorsione | » | 161 |
| 5.7 | Direttività | » | 161 |
| 5.8 | Misura del Q_t | » | 161 |
| 5.9 | Massa dinamica (determinazione) | » | 162 |
| 5.10 | Massa della bobina mobile e del cono (determinazione) | » | 162 |
| 5.11 | Cedevolezza meccanica delle sospensioni | » | 162 |
| 5.12 | Costante di trasduzione BI | » | 163 |
| 5.13 | Resistenza meccanica della sospensione | » | 163 |

CAPITOLO 6

TECNICHE DIGITALI DI MISURA

| | | | |
|-----|---|---|-----|
| 6.1 | Teoria della tecnica di misura digitale | » | 165 |
| 6.2 | Segnale di ingresso nelle misure digitali | » | 166 |
| 6.3 | Campionamento | » | 167 |
| 6.4 | Eliminazione del rumore casuale | » | 169 |
| 6.5 | Calcolo della funzione di trasferimento | » | 169 |
| 6.6 | Analisi del decadimento dell'onda | » | 169 |

CAPITOLO 7

SUONO DIRETTO E SUONO RIFLESSO

| | | | |
|-----|--|---|-----|
| 7.1 | Suono diretto | » | 173 |
| 7.2 | Suono riflesso | » | 174 |
| 7.3 | Campo di radiazione diretta | » | 176 |
| 7.4 | Livello sonoro totale | » | 176 |
| 7.5 | Misure dell'energia in ambiente riverberante | » | 177 |

CAPITOLO 8

ACUSTICA DELLA SALA D'ASCOLTO

| | | | |
|-----|---|---|-----|
| 8.1 | Risonanza in una piccola sala d'ascolto | » | 179 |
| 8.2 | Proprietà della stanza d'ascolto | » | 182 |
| 8.3 | Riverberazione ed Assorbimento | » | 183 |

| | | | |
|-------|---|---|-----|
| 8.4 | Posizionamento dei diffusori e prove di controllo | » | 183 |
| 8.5 | Potenza necessaria alla sonorizzazione di una sala di ascolto . . . | » | 184 |
| 8.5.1 | Gamma dinamica | » | 184 |
| 8.5.2 | Livello del rumore di sottofondo | » | 184 |
| 8.5.3 | Calcolo della potenza acustica necessaria | » | 185 |
| 8.5.4 | Stima della potenza nominale | » | 187 |
| 8.5.5 | Raccomandazioni generali | » | 190 |

1.a parte

In questa prima parte, si ricaveranno le formule che saranno utili nei capitoli successivi. Questo materiale potrebbe essere contenuto in un'appendice del testo, ma si preferisce presentarlo per primo in modo di avere una migliore continuità. Seguirà la progettazione meccanica ed elettrica degli altoparlanti a bobina mobile a radiazione diretta e quindi le caratteristiche degli altoparlanti utilizzati nei tre sistemi presi in considerazione.

CAPITOLO 1

EQUAZIONE D'ONDA ED ELEMENTI DI ACUSTICA

1.1. PROPAGAZIONE DEL SUONO

Consideriamo una superficie piana vibrante nell'aria. Quando essa si muove in avanti, verranno accelerate le particelle poste di fronte ad essa, comprimendo l'aria. Le particelle accelerate si scontreranno con altre particelle vicine trasferendo ad esse la propria quantità di moto; in questo modo si propaga nell'ambiente la compressione dell'aria. Quando la superficie si muoverà indietro, l'aria subirà invece una rarefazione. Le particelle di aria che si muovono riempiendo i vuoti sono spinte, nel loro movimento, da molte particelle distanti in modo che sia la rarefazione che la compressione si propaga all'esterno della superficie. Tali alternanze di compressioni rarefazioni dell'aria costituiscono l'onda sonora. L'onda si propaga con una certa velocità ed ogni particella si muove alternativamente nel mezzo con la stessa frequenza della superficie vibrante. La lunghezza d'onda λ , la frequenza f e la velocità di propagazione c sono messe in relazione dall'equazione $\lambda = c/f$.

A frequenze acustiche, non c'è tempo sufficiente per avere scambi di calore, quindi le variazioni di pressione sono essenzialmente adiabatiche e la loro media è in accordo con l'equazione

$$P \cdot V^\gamma = \text{costante} \quad (1.1)$$

dove P = pressione e V = volume.

Gamma è il rapporto tra il calore specifico a pressione costante e il calore specifico a volume costante. Per l'aria, $\gamma \approx 1,4$.

1.2. EQUAZIONE D'ONDA

Ora vogliamo ottenere l'equazione d'onda per un segnale acustico in un tubo o tronco di cono. Benché il calcolo è basato considerando piccoli i diametri rispetto

alla lunghezza d'onda, il risultato dell'equazione è valido anche per onde libere di forma sferica o piana (l'onda sferica può essere vista come un'onda che si propaga attraverso un certo numero di elementi tronco conici che si irradiano da un centro comune).

1.2.1. Equazione del moto

In figura 1.1 abbiamo un volume di aria contenuta in un tronco di cono. Le sezioni S_1 e S_2 sono perpendicolari alla direzione di propagazione x . Quando dx tende a 0, $S_1 = S_2 = S$; la massa dell'aria racchiusa è in questo caso data da $M = \rho S dx$ dove ρ è la densità. La forza sulla faccia sinistra di S è PS e la forza sulla faccia destra è

$$F_{RHS} = \{ P + (\partial P / \partial x) dx \} S,$$

così la risultante forza agente sulla massa M è

$$F = - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx \cdot S.$$

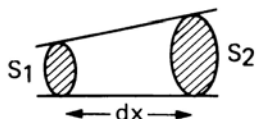


Figura 1.1

Allora, da $F = Ma = M dv/dt$, noi possiamo ottenere:

$$- \frac{\partial P}{\partial x} \cdot dx \cdot S = \rho \cdot S \cdot dx \frac{dv}{dt}$$

da dove

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \frac{dv}{dt} = 0. \quad (1.2)$$

Questo si ottiene anche se le sezioni S_1 e S_2 non sono uguali in quanto

l'aumento di forza sulla sezione più grande è bilanciato dalle componenti orizzontali della forza sulla faccia conica (vedi figura 1.2).

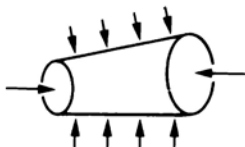


Figura 1.2

1.2.2. Equazione di continuità

Durante l'intervallo di tempo dt lo spostamento della massa sulla faccia sinistra è vS e sulla faccia destra è

$$\left\{ v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) dx \right\} \left\{ S + \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right) dx \right\}.$$

Allora, poichè nessuna massa può essere perduta tra S_1 e S_2 , il volume V ($= Sdx$) deve variare alla velocità

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \left(s \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial x} \right) dx. \quad (1.3)$$

1.2.3. Leggi dei gas

Differenziando rispetto al tempo l'equazione (1.1), otteniamo

$$\gamma PV^{\gamma-1} \frac{\partial V}{\partial t} + V^{\gamma} \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

dove $P = P_0 + p$, P_0 è la pressione statica e p è la pressione (sonora) alternata. Dunque ora possiamo scrivere

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} \text{ and } P \approx P_0$$

da cui

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \frac{V}{\gamma P_0} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (1.4)$$

Combinando le equazioni (1.3) e (1.4) otteniamo

$$-\frac{V}{\gamma P_0} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{S}{\gamma P_0} \frac{dx}{dt} \frac{\partial p}{\partial t} = \left(S \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial x} \right) dx$$

da cui

$$\frac{1}{\gamma P_0} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{S} \frac{\partial S}{\partial x} = 0$$

e

$$\frac{1}{\gamma P_0} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial (\ln S)}{\partial x} = 0. \quad (1.5)$$

Differenziando la (1.5) rispetto al tempo otteniamo

$$\frac{1}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \frac{\partial (\ln S)}{\partial x} = 0.$$

Differenziando l'equazione (1.2) rispetto a x, e sostituendo $\partial P = \partial p$, otteniamo

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} = 0.$$

Combinando queste due espressioni otteniamo l'equazione d'onda

$$\frac{\rho}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\partial (\ln S)}{\partial x}$$

dove, sostituendo il fattore $\rho/\gamma P_0 = 1/c^2$, dove c è la velocità di propagazione, avremo

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{\partial (\ln S)}{\partial x}. \quad (1.6)$$

Introduciamo ora il potenziale della velocità dato da

$$-\vec{v} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k}$$

dove \vec{v} è il vettore velocità e \vec{i}, \vec{j} e \vec{k} sono i vettori unitari di x, y e z (assi cartesiani). Nel caso unidirezionale avremo

$$v = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad i$$

e l'equazione (1.6) può essere scritta nella forma

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial (\ln S)}{\partial x} .$$

Se il tronco di cono è perfettamente rigido, S non è in funzione del tempo e sostituendo $\partial(\ln S)/\partial x$ con $d(\ln S)/dx$ avremo

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{d (\ln S)}{dx} . \quad (1.7)$$

Inoltre, dall'equazione (1.2)

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t}$$

che, nel caso unidimensionale, può essere scritta nella forma

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \left(-\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial t} \right)$$

da cui

$$P = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} . \quad (1.8)$$

1.3. ELEMENTI DI ACUSTICA MECCANICA

1.3.1. Impedenza acustica

L'impedenza meccanica Z_M è definita dalla relazione

$$Z_M = \frac{F}{v} .$$

Questo può essere rappresentato come un circuito costituito da un'impedenza

(figura 1.3) o da una mobilità (figura 1.4). In acustica sono più interessanti le grandezze pressione e volume che non forza e velocità delle particelle. L'impedenza Z_A è quindi definita dalla relazione

$$Z_A = \frac{p}{U}$$

dove p è la pressione del suono e U è la velocità del volume.

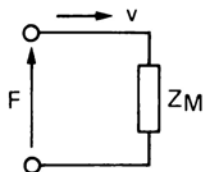


Figura 1.3

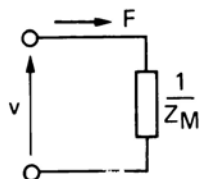


Figura 1.4

Quindi l'impedenza acustica presentata da una forza F agente su una area S che si muove a velocità v è data da

$$Z_A = \frac{F/S}{vS} = \frac{Z_M}{S^2} \quad (1.9)$$

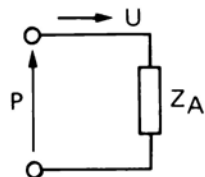


Figura 1.5

L'impedenza acustica può essere rappresentata anch'essa sia mediante un circuito con un'impedenza (figura 1.5) o una mobilità (figura 1.6). È talvolta

conveniente considerare l'impedenza acustica o meccanica per unità di area. Essa è chiamata impedenza specifica Z_s .

$$Z_s = \frac{p}{v} = \frac{Z_M}{S} = Z_A S. \quad (1.10)$$

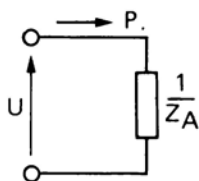


Figura 1.6

1.3.2. Analogia elettromeccanica

La tabella riportata nella pagina successiva illustra l'analogia tra gli elementi che caratterizzano l'impedenza acustica o meccanica e i loro corrispondenti elettrici.

1.3.3. Massa acustica

L'aria in un tubo aperto alle estremità di piccolo diametro (figura 1.7) si comporta come una massa; essa è molto rigida se comparata all'aria esterna e può essere

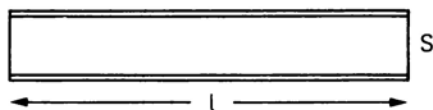


Figura 1.7

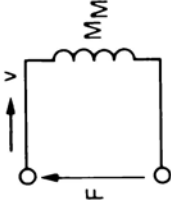
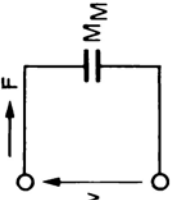
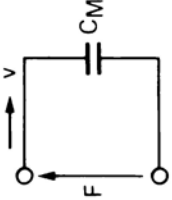
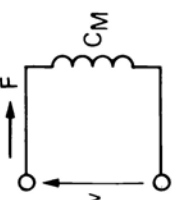
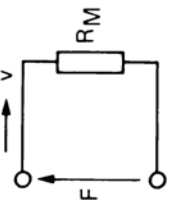
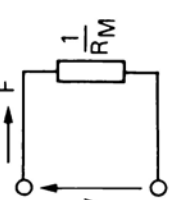
solo accelerata, non compressa. L'equazione del moto è quindi

$$F = M j \omega v$$

dove $F = pS$, $M = lS\rho$, $v = U/S$

da cui

$$p = \frac{l\rho}{S} j \omega U. \quad (1.11)$$

| equazione del moto | | | simbolo | |
|---|--|-----------------------------|---|---|
| elemento | generale | armonica | impedenza | mobilità |
| <p>massa, M</p> $F_1 = Ma = M \frac{dv}{dt}$ | | $F = Mj\omega v$ |  |  |
| <p>cedevolezza, C_M $(C_M = 1/k,$ dove $k = \text{costante}$ elastica)</p> | $F = kx = \frac{x}{C_M}$ $= \frac{1}{C_M} \int v dt$ | $F = \frac{v}{j\omega C_M}$ |  |  |
| <p>resistenza, R_M (atrito viscoso)</p> | $F = R_M v$ | $F = R_M v$ |  |  |

In questa equazione il termine ρ/s corrisponde alla massa acustica M_A ; quindi $p = M_A j \omega U$ (la massa acustica è proporzionale alla massa M dell'aria sottoposta ad accelerazione e , teoricamente, data dall'equazione $M_A = M/S^2$. In pratica, deve essere applicata una correzione per tener conto di come è terminato il tubo. Se il tubo termina nell'aria libera, la quantità l nell'equazione (1.11) diventa $l + 0,33 \sqrt{S}$; mentre se termina in uno schermo infinito, l diventa $l + 0,45 \sqrt{S}$.

1.3.4. Cedevolezza acustica

Se il tubo termina in un volume chiuso (figura 1.8), l'aria nel volume si comporterà come una cedevolezza; essa può essere solo compressa, non accelerata. Applicando l'equazione (1.1) avremo $P.V^\gamma = \text{costante}$ da cui

$$dP = - \frac{\gamma P_0}{V} dV$$

dove dP = pressione sonora = p ; dV = spostamento del volume = $U/j \omega$ così

$$p = \frac{\gamma P_0 U}{j \omega V}$$

e l'impedenza acustica

$$Z_A = \frac{P}{U} = \frac{\gamma P_0}{j \omega V}$$

dove il fattore $\gamma P_0/V$ corrisponde a una nuova costante. La cedevolezza acustica è

$$C_A = \frac{V}{\gamma P_0} \text{ o, poichè } \gamma P_0 = \rho c^2$$

$$C_A = \frac{V}{\rho c^2} \quad (1.12)$$

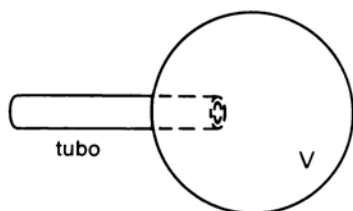


Figura 1.8

1.3.5. Resistenza acustica

Ogni mezzo in cui il flusso di aria è in fase o è direttamente proporzionale alla pressione applicata, può essere rappresentato come una resistenza acustica. Esempi sono schermi costituiti da maglie a trama fine, piccoli tubi forati, sottili fessure, materiali porosi.

1.4. IMPEDENZA DI RADIAZIONE

1.4.1. Descrizione qualitativa

Consideriamo una piccola sfera pulsante sinusoidalmente. Quando il raggio è massimo, la velocità della superficie e dell'aria circostante sono pari a zero e la pressione è massima. Quando il raggio è nel mezzo tra il massimo e il minimo la velocità della superficie è massima e la pressione è zero. Quindi la pressione acustica p è in anticipo rispetto alla velocità di 90° (vedi figura 1.9).



Figura 1.9

L'impedenza di radiazione in questo caso è puramente reattiva e può essere vista come una pura massa che si muove avanti e indietro.

Ora consideriamo una sfera pulsante, o una superficie piana pulsante, avente larghezza comparabile alla lunghezza d'onda. L'impedenza delle particelle non è, in questo caso, puramente reattiva: esse sono influenzate dalle particelle vicine che vibrano anche a causa della pressione locale. Per trovare l'impedenza di radiazione divideremo la pressione risultante per la velocità del volume. Poiché tale pressione è causata soprattutto dalle particelle vicine a quelle da noi considerate, essa sarà rallentata nel tempo a causa della distanza percorsa da tali particelle (vedi figura 1.10). L'impedenza quindi non è puramente reattiva, ha una componente resistiva. Se le dimensioni sono molto grandi l'impedenza diventa puramente resistiva. Questa componente resistiva è quella che conta per la radiazione dell'energia acustica.

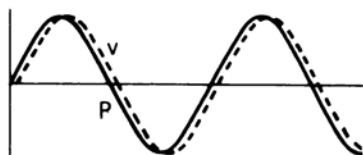


Figura 1.10

1.4.2. Analisi matematica

Consideriamo una sfera pulsante di raggio r e area della superficie $S = 4 \pi r^2$. Nell'equazione (1.7) possiamo sostituire x con r , da cui

$$\frac{d(\ln S)}{dx} = \frac{d(\ln S)}{dr} = \frac{1}{S} \frac{dS}{dr} = \frac{2}{r}$$

e l'equazione d'onda diventa

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r}.$$

Dunque, se noi cambiamo la variabile dipendente da ϕ a ϕ_r , otteniamo

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (\phi_r)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (\phi_r)}{\partial r^2}$$

per la quale la soluzione generale è

$$\phi_r = f\left(r - \frac{\omega t}{k}\right) + g\left(r + \frac{\omega t}{k}\right)$$

con f e g funzioni arbitrarie

dove il primo termine rappresenta l'onda uscente, il secondo termine rappresenta l'onda riflessa e la quantità k si riferisce al numero d'onda

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Per un'onda sferica libera abbiamo

$$\phi = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}.$$

Siamo ora in condizione di calcolare l'impedenza di radiazione meccanica, specifica od acustica. L'impedenza di radiazione specifica Z_{sA} è data da

$$Z_{sA} = \frac{p}{v}$$

dove

$$v = - \frac{\partial \phi}{\partial r}$$

e, dall'equazione (1.8),

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Così

$$Z_{sA} = \frac{\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}}{-\frac{\partial \phi}{\partial r}} = \frac{\rho j \omega \phi}{\left(\frac{1}{r} + jk\right) \phi} = \rho c \frac{jkr}{1 + jkr} \quad (1.13)$$

(vedi figura 1.11).

L'impedenza di radiazione meccanica è

$$Z_{MA} = S Z_{sA}, \quad Z_{MA} = 4 \pi r^2 \rho c \frac{jkr}{1 + jkr}.$$

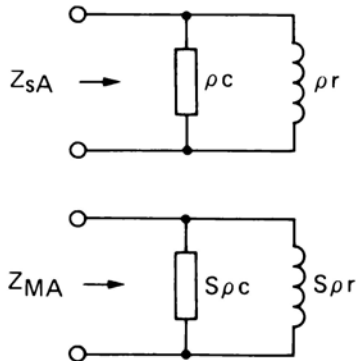


Figura 1.11

Il corrispondente circuito con la mobilità è dato in figura 1.12. L'impedenza di radiazione acustica Z_{AA} è data da

$$Z_{AA} = \frac{p}{U} \frac{Z_{MA}}{S^2}.$$

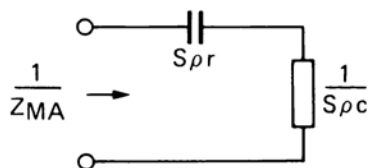


Figura 1.12

L'equazione (1.13) conferma la conclusione alla quale eravamo arrivati qualitativamente; cioè che l'impedenza di radiazione ha sia componente resistiva che reattiva.

- Per $kr \ll 1$ l'impedenza si comporta come una massa
- Per $kr \gg 1$ l'impedenza si comporta come una resistenza.

1.4.3. Sostituzione serie-parallelo

I circuiti-parallelo di figura 1.11 possono essere sostituiti dai circuiti-serie di figura 1.13. L'impedenza del circuito-parallelo è data da

$$Z_{\text{par}} = \frac{R_{\text{par}} + j\omega L_{\text{par}}}{1 + j\omega L_{\text{par}} / R_{\text{par}}}$$

e del circuito-serie da

$$Z_{\text{ser}} = R_{\text{ser}} + j\omega L_{\text{ser}}.$$

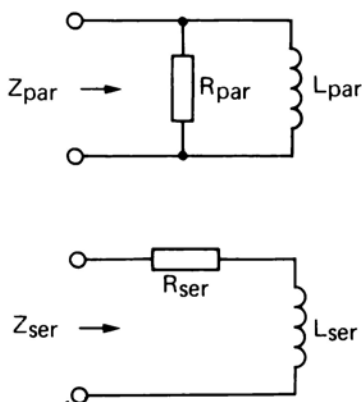


Figura 1.13

Razionalizzando il denominatore nell'espressione di Z_{par} e separando i termini otteniamo

$$Z_{\text{par}} = \frac{R_{\text{par}} + j\omega L_{\text{par}}}{1 + j\omega L_{\text{par}} / R_{\text{par}}} = j\omega \frac{R_{\text{par}}^2 L_{\text{par}}}{R_{\text{par}}^2 + \omega^2 L_{\text{par}}^2}$$

dove il primo termine è la componente resistiva e il secondo è la componente reattiva. Dunque, dato che deve essere $Z_{\text{par}} = Z_{\text{ser}}$, possiamo scrivere

$$R_{\text{ser}} = \frac{R_{\text{par}} \omega^2 L_{\text{par}}^2}{R_{\text{par}}^2 + \omega^2 L_{\text{par}}^2}$$

e

$$L_{\text{ser}} = \frac{R_{\text{par}}^2 L_{\text{par}}}{R_{\text{par}}^2 + \omega^2 L_{\text{par}}^2}.$$

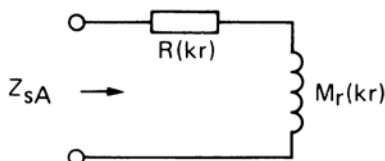


Figura 1.14

Se, per esempio, trasformiamo il circuito parallelo che rappresenta Z_{SA} (figura 1.11) nel circuito serie equivalente (figura 1.14) noi otterremo

$$R = \rho c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2}$$

$$M_r = \frac{\rho r}{1 + (kr)^2}.$$

1.4.4. Altoparlante.

L'impedenza meccanica di radiazione di un cono di altoparlante è $Z_{\text{MA}} = F/v$ dove F è la forza necessaria per vincere la resistenza dell'aria e v è la velocità del cono. Per la nostra analisi considereremo il cono come se fosse un pistone rigido. L'analisi di un pistone piatto e rigido oscillante in uno schermo infinito o in un tubo infinito è molto più complessa di quella riguardante una sfera pulsante. Quindi noi faremo solo un riassunto dei risultati.

- Per $kr \gg 1$, Z_A è la stessa della sfera pulsante: $Z_{\text{SA}} = \rho c$.
- Per tutti gli altri valori di kr , sia la componente resistiva che quella reattiva differiscono da quelle che si riferiscono alla sfera pulsante.

- Per $kr \ll 1$, la principale componente di Z_A è quella di una massa d'aria M_{MA} : per uno schermo infinito, $M_{MA} = 0,85 S \rho r$; per un tubo infinito, $M_{MA} = 0,6 S \rho r$ dove r è il raggio del pistone e $S = r^2$.

Nel circuito della mobilità per un pistone di raggio r in uno schermo infinito, come in figura 1.15, avremo $M_M = 0,85 r^3$

$$R_1 = \frac{2,27}{\pi r^2 \rho c} \quad R_2 = \frac{1}{\pi r^2 \rho c} \quad C_M = \frac{0,6}{r \rho c^2}$$

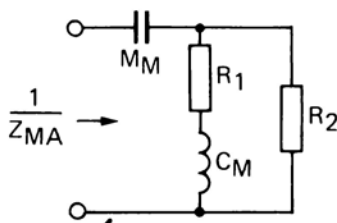


Figura 1.15

La componente resistiva è del massimo interesse perchè è quella che conta per la radiazione del suono.

- Per $kr \gg 1$

$$\frac{1}{Z_{MA}} \approx R_1 = \frac{1}{\pi r^2 \rho c}$$

e da qui $Z_{MA} = S \rho c$.

- Per $kr < 1$, che è caratteristico del range di frequenze sulle quali l'altoparlante lavora maggiormente,

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{0,7}{\pi r^2 \rho c} = \frac{0,221}{r^2 \rho c}$$

Il circuito equivalente della mobilità è dato in figura 1.16 e il circuito equivalente dell'impedenza è in figura 1.17. Quest'ultimo può essere trasformato nel circuito-

serie di figura 1.18, dove $R_{ser} = 1,57 M_{Mser} = 2,67 r^3$ dove R_{ser} è direttamente proporzionale alla potenza acustica irradiata W_A :

$$W_A = R_{ser} v^2. \quad (1.14)$$

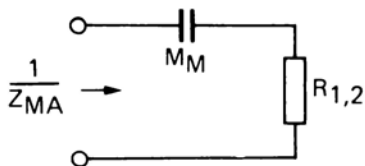


Figura 1.16

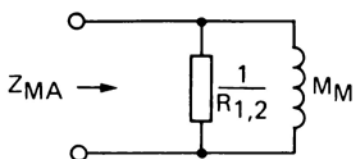


Figura 1.17

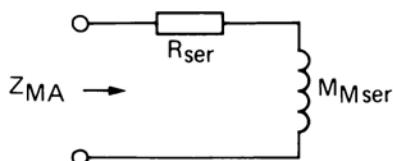


Figura 1.18

1.5. INTENSITÀ DEL SUONO

L'intensità del suono I in una data direzione è la stima dell'energia trasmessa attraverso un'area unitaria normale alla sua direzione. Essa è comunemente espressa in watts per metro quadro o per centimetro quadro. Matematicamente è il prodotto della pressione sonora per la componente in fase della velocità delle particelle: $I = \text{Re } p^* v \cos \theta$ dove p^* è il complesso coniugato del valore r.m.s. della pressione sonora, v è il valore r.m.s. della velocità delle particelle nella direzione di propagazione, θ è l'angolo tra la direzione di propagazione e la direzione per la quale si è misurata l'intensità della pressione sonora. Re indica che si intende la

parte reale del prodotto. Per un'onda che si propaga in forma piana o sferica, l'intensità nella direzione di propagazione

$$(\theta = 0) \text{ è } I = \frac{p^2}{c} . \quad (1.15)$$

1.6. LIVELLO DI POTENZA, DI INTENSITÀ E DI PRESSIONE

Essi sono rapporti utili per confrontare la potenza, l'intensità o la pressione misurate o calcolate con un valore di riferimento fissato. Sono espressi in dB e sono definiti come segue.

Livello di potenza,

$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}}$$

dove W è la potenza misurata o calcolata e W_{ref} è generalmente fissata in 10^{-12} watt.
Livello d'intensità,

$$IL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}}$$

dove $I_{ref} = 10^{-12}$ W/m².
Livello di pressione sonora,

$$SPL = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}}$$

dove $p_{ref} = 10^{-5}$ N/m². A condizioni normali ($\rho = 1,18$ kg/m³, $c \approx 344$ m/s), il livello di intensità e il livello di pressione sono quasi uguali: $IL \approx SPL - 0,1$ dB.

L'ALTOPARLANTE A BOBINA MOBILE A RADIAZIONE DIRETTA

2.1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Il funzionamento di tutti gli altoparlanti a bobina mobile si basa sugli stessi principi generali. In figura 2.1 è illustrata la struttura di un tipico altoparlante a bobina mobile a radiazione diretta, in cui il segnale di uscita dell'amplificatore alimenta la bobina mobile sospesa nel traferro di un potente magnete per mezzo di un anello di centraggio. Il cono è fissato dalla parte piccola alla bobina, e dalla parte grande al cestello mediante un bordo elastico. Poichè la corrente che scorre nella bobina produce un campo magnetico ad angolo retto rispetto al campo del magnete, l'attrazione e la repulsione di questi campi causa il movimento in avanti e indietro della bobina alla frequenza del segnale elettrico. Il movimento oscillante del cono, che è attaccato alla bobina, produce onde sonore nell'aria circostante.

2.2. CONVERSIONE DELL'ENERGIA A DUE STADI

2.2.1. Circuito equivalente dell'altoparlante

Per semplificare la spiegazione del funzionamento dell'altoparlante, tratteremo l'altoparlante come se fosse un convertitore di energia a due stadi. L'energia elettrica è prima convertita in energia meccanica la quale è a sua volta convertita in energia acustica, come è illustrato in figura 2.2. Questa conversione di energia deve essere ottenuta con il minimo di distorsione e con la massima efficienza.

Per ottenere il massimo trasferimento di energia dall'amplificatore all'altoparlante è necessario un buon accoppiamento di impedenze.

Sfortunatamente questo può essere ottenuto su una limitata gamma di frequenze a causa delle variazioni d'impedenza presentata all'amplificatore dall'altoparlante. Se noi supponiamo che l'altoparlante sia montato in uno schermo infinito, l'impedenza di radiazione Z_{AA} è la stessa per entrambe le facce dello schermo. Il circuito di figura 2.2 può essere modificato in uno dei circuiti di figura 2.3. In figura 2.3 (a) e figura 2.3 (b) tutti i componenti sono trasferiti nella parte elettrica. In figura 2.3 (c) i componenti sono trasferiti nella parte meccanica. Noi abbiamo sostituito la sor-

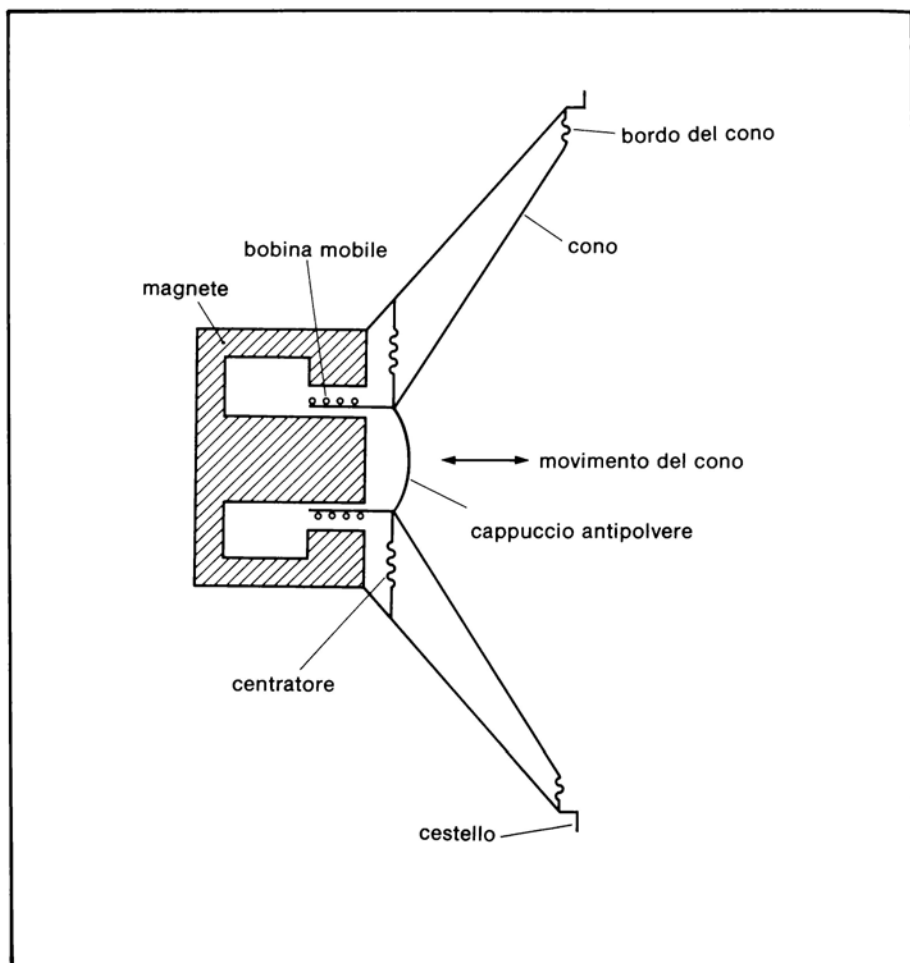


Figura 2.1 — Spaccato di un tipico altoparlante a bobina mobile Magnet: = magnete; voice coil = bobina mobile; Centring device = Centratore; cone = cono; cone movement = movimento del cono; cone surround = bordo del cono; frame = cestello; dust cap = cappuccio antipolvere.

gente di tensione (e_g) con l'impedenza elettrica in serie (Z_e) nel generatore di corrente (e_g/Z_e) con il parallelo all'impedenza (Z_e). Questo principio è usato per trasferire i componenti nella parte destra. Come ultimo passo, abbiamo sostituito il circuito composto da mobilità in un circuito di impedenze.

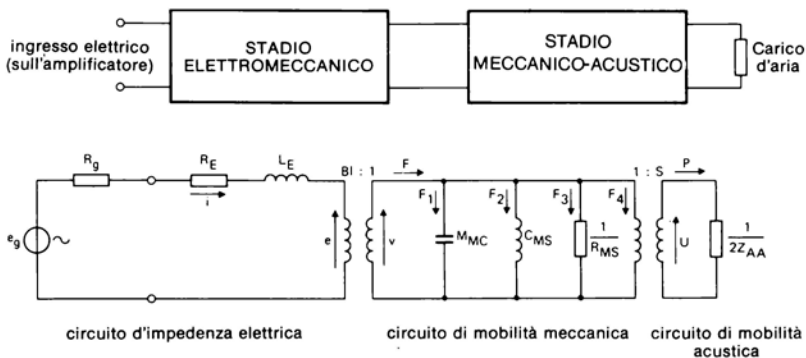


Figura 2.2 — Altoparlante visto come un convertitore di energia a due stadi: electrical input (amplifier) = ingresso elettrico (all'amplificatore); electro-mechanical stage = stadio elettromeccanico; mechano-acoustical stage = stadio meccanico-acustico; air load = carico d'aria; electrical impedance circuit = circuito di impedenza elettrica; mechanical mobility circuit = circuito di mobilità meccanica; acoustic mobility circuit = circuito di mobilità acustica.

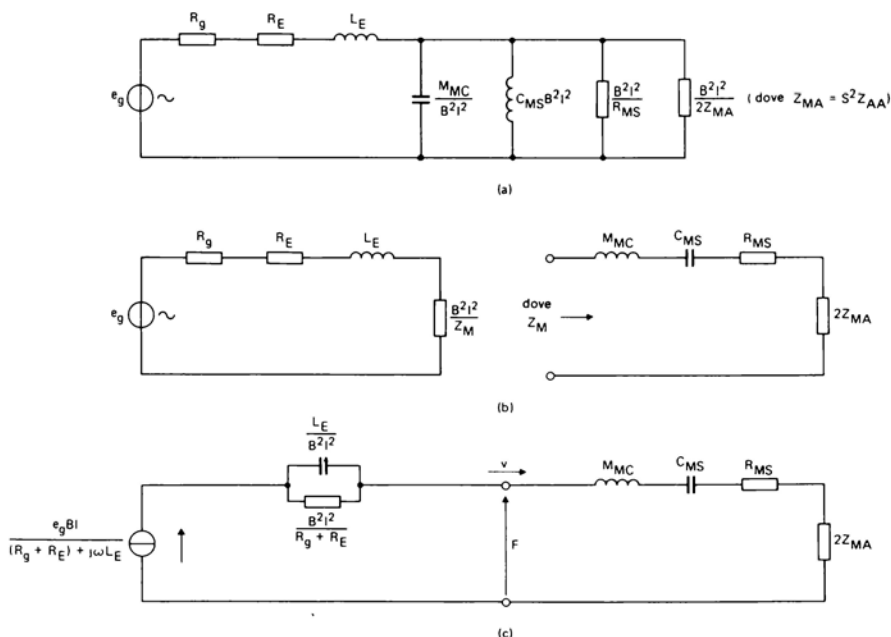


Figura 2.3 — (a), (b), (c) circuiti equivalenti di un altoparlante a bobina mobile.

2.2.2. Impedenza dell'altoparlante

Il rapporto tra la tensione alternata presente ai capi dell'altoparlante e la corrente che scorre di conseguenza, costituisce l'impedenza dell'altoparlante. Se esso fosse paragonabile ad una resistenza pura, non avremmo variazioni del suo valore al variare della frequenza del segnale che attraversa la bobina mobile. Abbiamo invece visto nel paragrafo 2.2.1. che il circuito equivalente di un altoparlante è ben più complesso. Si prenda in considerazione a questo proposito la figura 2.3.a. L'impedenza dell'altoparlante è costituita da tutto il circuito a destra della resistenza del generatore R_g . Avremo quindi una certa componente resistiva R_e in serie all'induttanza della bobina mobile L_e seguita da un circuito risonante RLC. La presenza di elementi reattivi fa sì che la corrente I possa non essere in fase con la tensione V ai capi dell'altoparlante, come invece sarebbe se si trattasse di una resistenza pura. Per definire l'impedenza occorreranno allora due valori: il «modulo», dato semplicemente dal rapporto dei moduli della tensione e della corrente, cioè

$$|Z| = \frac{|V|}{|I|},$$

e lo sfasamento, chiamato anche «argomento», tra le stesse grandezze.

In figura 2.3.d è illustrato l'andamento tipico del modulo e della fase dell'impedenza di un altoparlante al variare della frequenza. Analizzando queste curve vediamo che, a frequenze molto basse, l'altoparlante si comporta come una resistenza, con sfasamento $\simeq 0$ e $Z \simeq R_e$; ad un certo punto inizia la risonanza del circuito RLC che innalza il modulo dell'impedenza fino a raggiungere un punto massimo alla frequenza di risonanza. In questo caso la fase tende prima ad andare su valori positivi (comportamento induttivo) e quindi verso valori negativi (comportamento capacitivo) per poi portarsi di nuovo a zero. Infatti dopo la risonanza abbiamo un'altra zona in cui l'altoparlante si comporta quasi come se una resistenza, dopodiché comincia a farsi sentire l'influenza dell'induttanza della bobina mobile, aumentando di nuovo il modulo dell'impedenza e lo sfasamento. Il diagramma del modulo dell'impedenza è un parametro molto importante dell'altoparlante, soprattutto per quanto riguarda la progettazione dei filtri cross-over, di cui parleremo in seguito.

2.3. RESISTENZA DI RADIAZIONE

Supponiamo ora che gli altoparlanti siano montati su schermi infiniti, in modo che la radiazione posteriore non possa «contaminare» quella anteriore. In queste condizioni, il carico d'aria (l'aria su cui agisce il cono) appare come un'impedenza meccanica Z_{MA} . Il sottoscritto MA si riferisce a «aria, meccanica». L'impedenza meccanica è rappresentata dalla resistenza di radiazione R_{MA} in serie alla reattanza di radiazione X_{MA} . In pratica, per $kr < 1$, la reattanza di radiazione è rappresentata dalla massa

del carico d'aria, che chiameremo "massa di radiazione" M_{MA} . Possiamo quindi scrivere:

$$Z_{MA} = R_{MA} + j \omega M_{MA}. \quad (2.1)$$

È interessante ora considerare il comportamento della resistenza di radiazione, poichè essa è la componente dell'impedenza di radiazione che è in relazione alla potenza acustica sviluppata. In un sistema a bobina mobile, la massa di radiazione M_{MA} è spesso trascurabile perchè è posta in serie alla massa del cono M_{MC} che è molto più grande di M_{MA} . La figura 2.4 mostra la resistenza di radiazione e la reattanza di radiazione al variare della frequenza. Possiamo dimostrare (vedi paragrafo 1.4) che il valore R_{MA} , sulla porzione in pendenza della curva, è data da

$$R_{MA} = \left(\frac{1,57 \omega^2 r^2 \rho}{c} \right) \text{Ns/m (ohm meccanici)} \quad (2.2)$$

dove:

$\omega = 2 \pi f$ (f = frequenza di Hz),
 r = raggio del cono in metri,
 ρ = densità dell'aria = 1,18 kg/m³,
 c = velocità del suono = 344 m/s.

Questo è valido per $kr < 1$, che è la gamma di frequenze più importante per la maggior parte degli altoparlanti. La reattanza di radiazione X_{MA} è data da

$$X_{MA} = j \omega M_{MA} \quad (2.3)$$

dove la massa di radiazione M_{MA} è

$$M_{MA} = 2,67 r^3 \rho. \quad (2.4)$$

Le unità usate in figura 2.4 richiedono una ulteriore spiegazione. La frequenza è tracciata su scala normalizzata, l'asse orizzontale rappresenta la frequenza in termini di relazione tra le dimensioni del cono e la lunghezza d'onda del suono:

$$kr = 2 \pi fr/c = 2 \pi r/\lambda.$$

Questo è il rapporto tra la circonferenza dell'altoparlante e la lunghezza d'onda. Fino al punto in cui $kr = 2$, la resistenza di radiazione aumenta, in accordo con l'equazione (2.2) proporzionalmente a f^2 .

Per valori di $kr > 2$, la situazione cambia e le equazioni (2.2) e (2.3) non sono più applicabili. La resistenza di radiazione R_{MA} è in questo caso data da

$$R_{MA} = \pi r^2 \rho c \quad (2.5)$$

ed è quindi indipendente dalla frequenza.

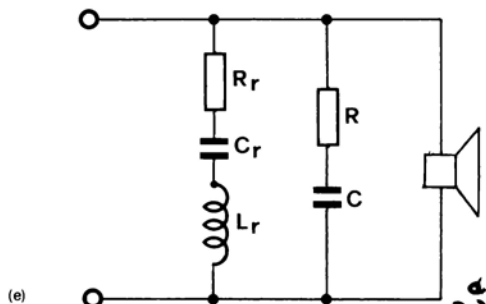
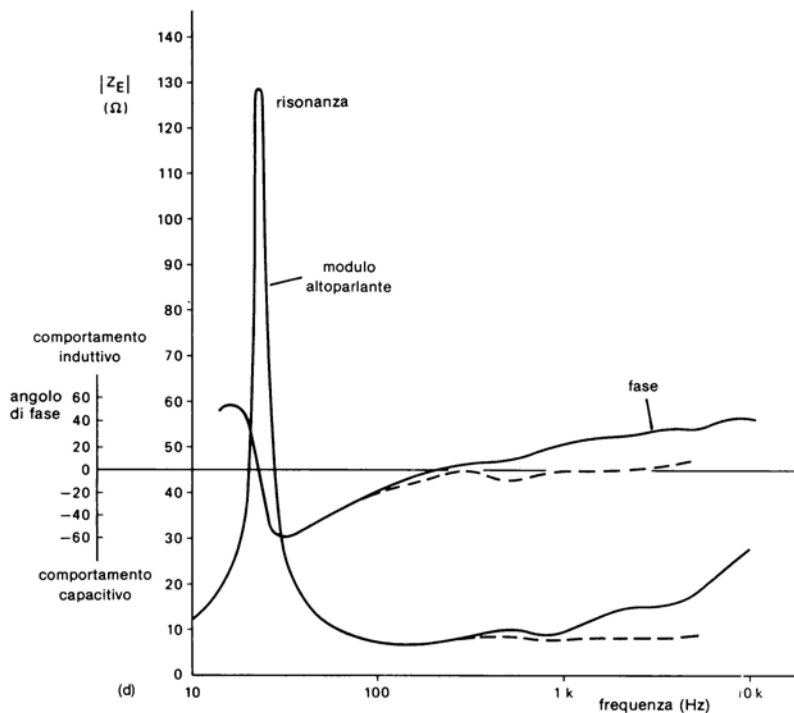


Figura 2.3 — (d): andamento tipico della fase e dell'argomento dell'impedenza. (e): circuito di compensazione che ha lo scopo di contenere le variazioni di impedenza e di ridurre lo sfasamento (si veda paragrafo 4.6, pag. 118).

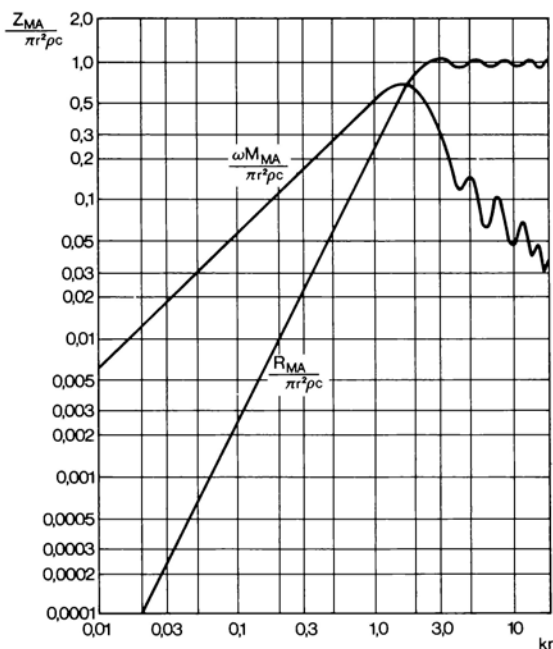


Figura 2.4 — Parte reale ed immaginaria dell'impedenza meccanica normalizzata del carico d'aria su una faccia di un pistone piano montato in uno schermo infinito. $Kr = 2 \pi fr/c = 2 \pi r/\lambda$.

2.4. RELAZIONE TRA IMPEDENZE ELETTRICHE E MECCANICHE

L'impedenza meccanica del cono collegato elasticamente al resto dell'altoparlante è rappresentata in figura 2.3 (b) dalla massa totale del cono M_{MC} , dalla cedevolezza della sospensione C_{MS} e dalle perdite R_{MS} causate soprattutto dalle sospensioni. In ogni caso, la componente resistiva più importante è la resistenza della bobina mobile R_E che agisce in serie alla sua induttanza L_E e alla resistenza di uscita dell'amplificatore. Dai principi di base sappiamo che la forza elettromagnetica emf introdotta dalla bobina è data da

$$e = Blv$$

dove $Z_M \rightarrow$

(2.6)

dove e è l'emf indotta nella bobina in volt, B è la densità di flusso magnetico radiale nel traferro in tesla (Wb/m^2), l è la lunghezza del filo della bobina in metri, v è la velocità della bobina in m/s.

Poiché la velocità della bobina può essere scritta come

$$v = \frac{F}{Z_M}$$

in cui F è la forza in newton ($= Bli$) e Z_M è l'impedenza meccanica. Possiamo allora scrivere

$$v = \frac{Bli}{Z_M} \text{ m/s}$$

e l'equazione (2.6) diventa

$$e = \frac{B^2 l^2 i}{Z_M} \quad (2.7)$$

dove i è la corrente in ampère nella bobina.

L'equazione (2.6) e (2.7) dicono che l'induzione magnetica è costante sull'intera lunghezza della bobina e indipendente dalle posizioni della stessa nel traferro. Ciò non è esattamente vero: la lunghezza e la posizione della bobina rispetto al traferro è molto importante nei confronti della distorsione. L'equazione

$$Bl = \int_0^1$$

è valida solo nella posizione di riposo e per piccoli movimenti della bobina. L'impedenza elettrica Z_E dovuta all'impedenza meccanica Z_M è dunque data da

$$Z_E = \frac{e}{i} = \frac{B^2 l^2}{Z_M} \quad Z_E = B^2 l^2 \frac{1}{R_{MS} + j \left(\omega M_{MC} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \right)} \quad (2.8)$$

L'impedenza meccanica del sistema composto dalla massa M , la cedevolezza C e la resistenza meccanica R può essere rappresentata da un equivalente circuito costituito da impedenze o da mobilità. Nel circuito dell'impedenza abbiamo:

$$v = \frac{F}{j \omega M + (1/j \omega C) + R}$$

e nel circuito della mobilità:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = \frac{v}{j \omega C} + v j \omega M + v R = v \left(\frac{1}{j \omega C} + j \omega M + R \right).$$

(vedi figura 2.5).

In entrambi i circuiti la sorgente della forza F è assunta costante, ma le relazioni sono valide anche per una sorgente a velocità costante. Esiste interazione tra impedenze elettrica e meccanica. L'impedenza meccanica è riflessa nell'impedenza elettrica e viceversa; per esempio la velocità del cono è influenzata dalla resistenza elettrica della bobina: ad una diminuzione della resistenza della bobina mobile corrisponde un aumento della resistenza meccanica effettiva del cono.

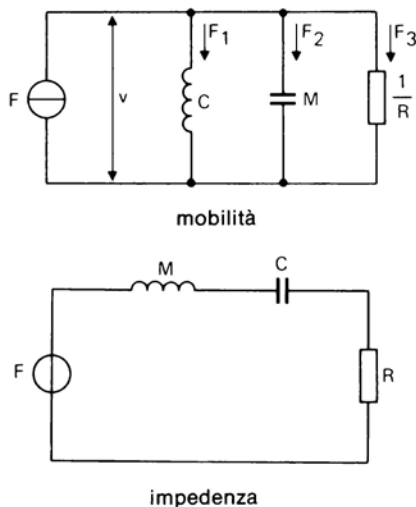


Figura 2.5 — Circuiti dell'impedenza e della mobilità di un semplice sistema vibrante - mobilità - impedenza.

2.5. EFFETTO DELL'IMPEDENZA MECCANICA SULLA POTENZA ACUSTICA

Per determinare il comportamento dell'altoparlante è necessario esaminare l'effetto di ciascun componente dell'impedenza meccanica. Per semplicità potremo per ora considerare il circuito equivalente dell'altoparlante ridotto ai componenti mostrati in figura 2.6.

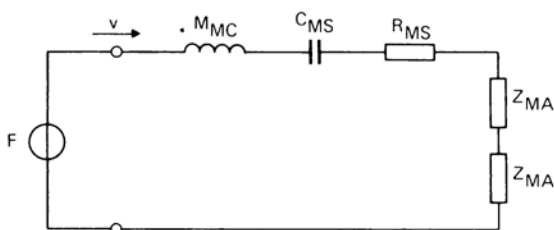


Figura 2.6 — Componenti meccaniche che determinano la velocità del cono.

Questo circuito è valido per una sorgente di forza costante o una sorgente di corrente costante ($F = Bli$). L'impedenza meccanica completa del cono è molto più grande di quella del carico d'aria, così che la corrente sarà determinata quasi interamente dal cono.

Esaminiamo ora l'effetto di ciascun componente meccanico, supponendo che il cono sia perfettamente rigido.

(a) Consideriamo predominante l'impedenza della massa. In questo caso possiamo scrivere:

$$v = \frac{F}{\omega M_{MC}} = \frac{F}{2 \pi f M_{MC}} \quad (2.9)$$

dove F è la forza applicata.

Ora, la potenza irradiata su un lato dello schermo infinito, che si sviluppa sulla resistenza di radiazione R_{MA} , è data dall'equivalente meccanico della legge di Ohm

$$W_A = v^2 R_{MA} \quad (2.10)$$

e, sostituendo l'equazione (2.9) nella (2.10), abbiamo

$$W_A = \frac{F^2}{4 \pi^2 f^2 M_{MC}^2} R_{MA} \quad (2.11)$$

Dall'equazione (2.2), abbiamo visto che R_{MA} è proporzionale ad f^2 per la parte pendente della curva al di sotto di $kr \approx 2$, così dall'equazione (2.11),

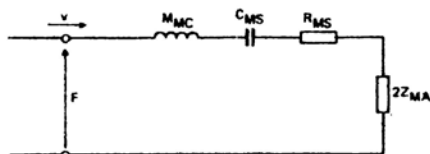
$$W_A \propto \frac{1}{f^2} \cdot f^2. \quad (2.12)$$

Quindi, la potenza irradiata è indipendente dalla frequenza. Nella parte piatta della curva di figura 2.4; per $kr > 2$, dall'equazione (2.5) vediamo che R_{MA} è costante, quindi

$$W_A = 1/f^2 \times \text{costante} \quad (2.13)$$

e quindi la potenza acustica scende con una pendenza di 6 dB/ottava.

Questa rappresenta la condizione di "controllo di massa" ed è illustrata in figura 2.7. Tale risultato è largamente valido per una sorgente di tensione costante come in figura 2.3 (c).



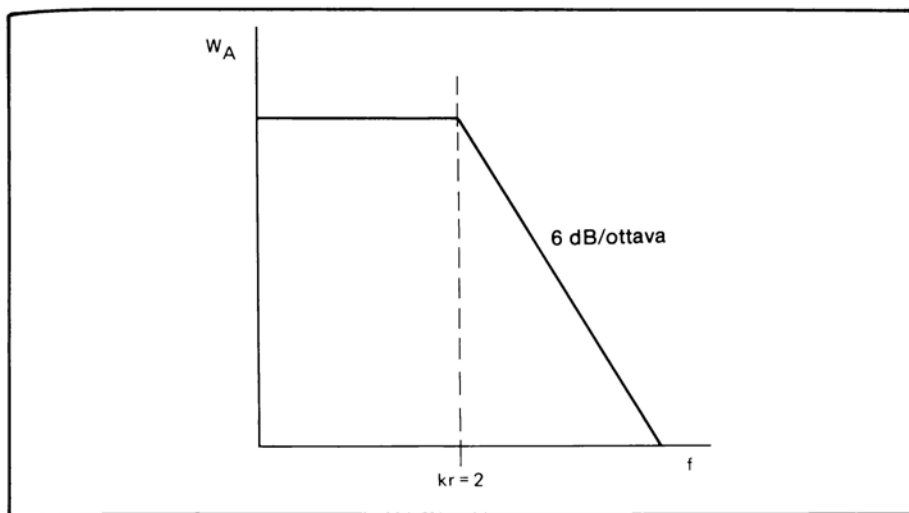


Figura 2.7 — Condizione di controllo di massa 6 dB/ottava.

(b) Supponiamo che R sia predominante. Con elevati fattori di smorzamento la resistenza $R = R_{MS}$ è l'elemento dominante per un generatore di corrente, oppure la resistenza $R = R_{MS} + B^2 I^2 / R_E$ può essere l'elemento dominante per un generatore di tensione costante. In questi casi

$$W_A = \frac{F^2}{R^2} R_{MA} \quad (2.14)$$

e quindi, dall'equazione (2.2),

$$R_{MA} \propto f^2, W_A = \text{costante} \times f^2. \quad (2.15)$$

Quindi la potenza irradiata, oltre il punto per il quale si ha $kr = 2$, aumenta all'aumentare della frequenza di 6 dB/ottava.

Sulla porzione della curva per la quale $kr > 2$, abbiamo $W_A = \text{costante} \times \text{costante}$. La potenza irradiata è quindi (in questo caso) indipendente dalla frequenza. Questa condizione è mostrata in figura 2.8 ed è conosciuta con il nome di "velocità" costante.

(c) Supponiamo che sia predominante la cedevolezza. Se la cedevolezza della sospensione è l'elemento più importante, possiamo scrivere

$$W_A = F^2 4 \pi^2 f^2 C_{MS}^2 R_{MA} \quad (2.17)$$

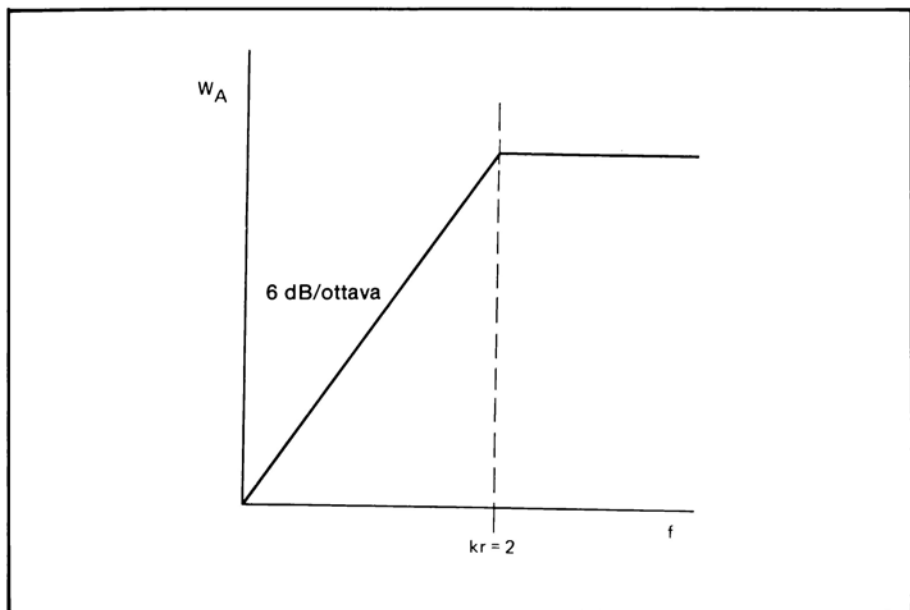


Figura 2.8 — Condizione di velocità costante 6 dB/ottava.

in questo caso, sulla parte pendente, avremo

$$W_A \propto f^2 \cdot f^2 = f^4. \quad (2.18)$$

La potenza irradiata, sotto questa ipotesi, aumenta all'aumentare della frequenza con pendenza 12 dB/ottava. Oltre la condizione $kr = 2$, nella porzione orizzontale della curva, abbiamo

$$W_A = f^2 \times \text{costante}. \quad (2.19)$$

Il che vuol dire che W_A aumenta all'aumentare della frequenza di 6dB/ottava. Questa è la condizione di controllo di cedevolezza mostrata in figura 2.9, situazione non incontrata normalmente. Abbiamo quindi visto le possibilità esistenti per rendere costante la potenza irradiata.

La maggior parte degli altoparlanti operano nella regione di controllo di massa, estesa il più possibile. Per estendere questa regione nella gamma delle basse frequenze, la frequenza di risonanza fondamentale

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{M_{MC} \cdot C_{MS}}}$$

deve essere mantenuta la più bassa possibile. Al di sotto f_0 noi abbiamo il controllo di cedevolezza:

$$\frac{1}{j \omega C_{MS}} > j \omega M_{MC}$$

e oltre f_0 abbiamo il controllo di massa:

$$j \omega M_{MC} > \frac{1}{j \omega C_{MS}} .$$

Per estendere questa zona anche nelle frequenze acute si possono usare alcuni artifici che fanno aumentare la frequenza per la quale $kr = 2$. Per un altoparlante a larga banda (full-range) si può usare un cono flessibile che badi a fare iniziare il fenomeno del break-up dalle frequenze per le quali si ha $kr = 2$. Da tale punto si avrà una riduzione progressiva del diametro del cono man mano che la frequenza aumenta. Un'altra tecnica è quella di usare filtri cross-over in modo da portare progressivamente le frequenze più acute ad altoparlanti più piccoli.

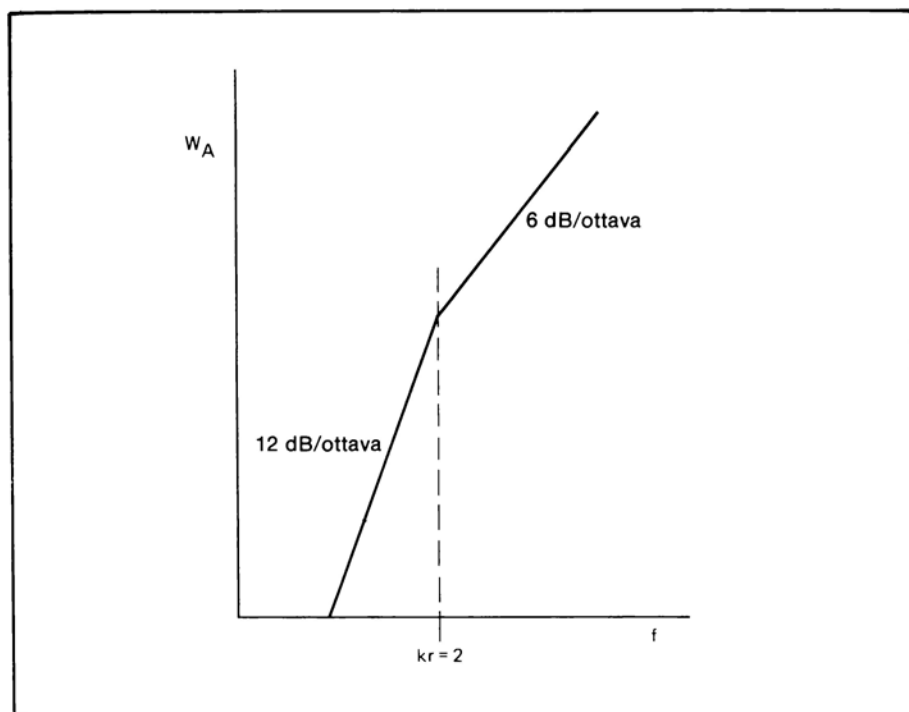


Figura 2.9 — Condizione di controllo di cedevolezza 6 dB/ottava - 12 dB/ottava.

Gli altoparlanti a tromba operano per lo più nella regione a velocità costante (alto fattore di smorzamento) perché, a causa della tromba, la resistenza di radiazione R_{MA} rimane costante anche a frequenze più basse.

I parametri visti in questo paragrafo, M_{MC} , R_{MS} , C_{MS} , sono dati dalle case costruttrici nei data-sheet degli altoparlanti.

Essi sono importanti soprattutto nel caso degli altoparlanti full-range e nei woofer, per il calcolo delle dimensioni della cassa. In alcuni casi, se non sono menzionati direttamente, tali parametri sono ricavabili da altre grandezze. Nella peggiore delle ipotesi, si possono ricavare sperimentalmente, come verrà descritto nella terza parte del libro. A volte, nei dati caratteristici degli altoparlanti, è data, anziché la cedevolezza meccanica C_{MS} , il termine V_{AS} , che è il volume d'aria avente cedevolezza uguale a quella delle sospensioni dell'altoparlante. Quest'ultimo termine è legato a C_{AS} (cedevolezza acustica delle sospensioni) dalla formula

$$V_{AS} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{AS}$$

oppure è legata a C_{MS} dalla

$$V_{AS} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{MS} \cdot A^2$$

essendo

$$C_{AS} = C_{MS} \cdot A^2.$$

ρ è la densità dell'aria, c è la velocità del suono e A è l'area effettiva del cono dell'altoparlante.

Quantificando, per una temperatura di 25°C, abbiamo

$$\rho \simeq 1,18 \text{ Kg/m}^3$$

$$c \simeq 344 \text{ m/s}$$

per cui

$$\rho \cdot c^2 \simeq 1,4 \times 10^5 \text{ Kg (m}^2 \text{ sec)}^{-1}$$

e

$$V_{AS} = 1,4 \cdot 10^5 \cdot C_{AS}.$$

2.6. RISPOSTA IN FREQUENZA

Siamo ora in condizione di studiare le prestazioni di un altoparlante nell'intera gamma audio. Possiamo dividere lo spettro di frequenze in quattro parti, come è mostrato in figura 2.10.

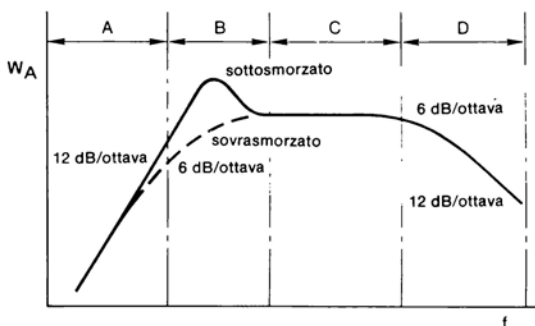


Figura 2.10 — Potenza sonora uscente da un altoparlante considerato come un pistone rigido posto in uno schermo infinito. Underdamped = sottosmorzato; Overdamped = sovrasmorzato; 12 dB/ottava (4 volte) - 6 dB/ottava (2 volte).

A frequenze molto basse il fattore controllante è la cedevolezza, e la potenza irradiata è proporzionale a f^4 , quindi sale a 12 dB/ottava all'aumentare della frequenza (zona A di figura 2.10).

Alla frequenza di risonanza fondamentale la resistenza meccanica netta è zero in quanto la reattanza delle masse del cono eguaglia la reattanza dovuta alla rigidità della sospensione, e l'impedenza meccanica è minima; l'altoparlante in questo modo si comporta come un circuito LCR- serie. L'impedenza elettrica, in queste condizioni, raggiunge il valore massimo. Subentra ora la questione dello smorzamento: se l'altoparlante è molto smorzato la corrente nella bobina mobile e la sua velocità sono quasi costanti. La variazione di potenza acustica è proporzionale alla resistenza di radiazione, cioè, dall'equazione (2.2), è proporzionale al quadrato della frequenza.

La zona B in figura 2.10 mostra le condizioni di risonanza. Dalle frequenze oltre la risonanza, dove $kr > 2$, la reattanza acustica netta è soprattutto dovuta alla massa del cono piuttosto che dall'aria accoppiata ad esso e, dall'equazione (2.12), vediamo che l'uscita acustica è indipendente dalla frequenza. Quindi in questa zona, di controllo di massa, viene irradiata una potenza acustica costante (zona C in figura 2.10). Per frequenze ancora più elevate dove $kr \gg 2$, occorre applicare la condizione descritta dall'equazione (2.13). La potenza irradiata scende inizialmente con una pendenza di 6 dB/ottava, tendendo poi a 12 dB/ottava a causa dell'aumento della reattanza induttiva della bobina mobile all'aumentare della frequenza. Questa è la zona D di figura 2.10.

Le precedenti considerazioni si riferiscono alla potenza acustica irradiata W_A . Se noi consideriamo la pressione sonora, le conclusioni rimangono le stesse per le regioni A, B e gran parte della zona C.

In queste condizioni il diagramma polare di un altoparlante in uno schermo infinito è quasi una semisfera perché le dimensioni del cono dell'altoparlante sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda. La sorgente del suono può essere cioè considerata puntiforme. Per le alte frequenze (la parte alta della zona C e tutta la zona D) il suono sarà irradiato principalmente nella direzione dell'asse del cono.

Per un pistone rigido e piatto la pressione sonora sull'asse è indipendente dalla frequenza nelle zone C e D, ma per un altoparlante conico di profondità H essa comincia a discendere alla frequenza per la quale $kH = 2$ (vedi figura 2.11).

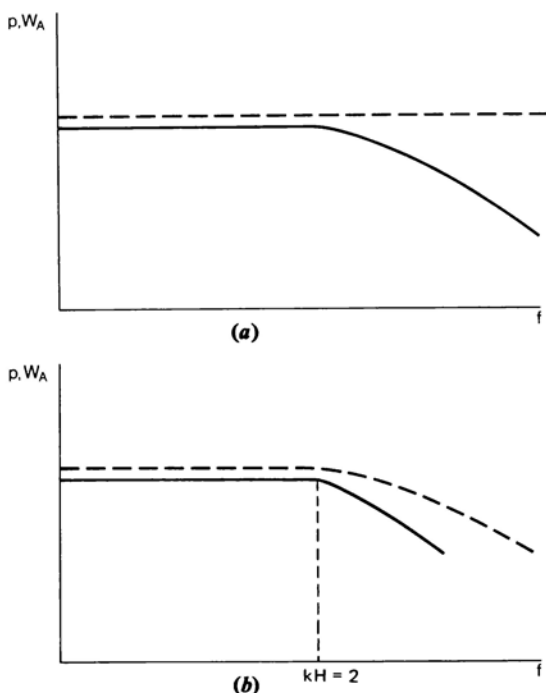


Figura 2.11 — Pressione sonora sull'asse (linea tratteggiata) e potenza sonora (linea continua) di: (a) un pistone rigido in uno schermo infinito; (b) un cono rigido in uno schermo infinito.

Questo perché le onde sonore originate da diverse parti del cono, percorrendo differenti distanze prima di raggiungere un determinato punto sull'asse, tendono a cancellarsi l'un l'altra.

2.7. SMORZAMENTO E FATTORE Q

Le parti dell'altoparlante che effettuano la conversione dell'energia elettrica in energia meccanica sono la bobina mobile e il sistema magnetico. Un'interessante caratteristica è questa: il sistema magnete-bobina mobile si comporta come un trasformatore con rapporto spire pari a Bl : 1, dove B è la densità del flusso magnetico nel traferro e l è la lunghezza del filo (vedi figura 2.2).

Un'altra caratteristica del sistema è che inverte le impedenze; la resistenza di smorzamento meccanico R , è relazionata alla resistenza elettrica R_E da

$$R' = \frac{B^2 l^2}{R_E} . \quad (2.20)$$

Le induttanze in serie poste su una faccia del circuito elettrico equivalente si presentano come un parallelo di capacità sull'altra faccia e viceversa. Questa è la differenza di base tra figura 2.3 (a) e figura 2.3 (c). Per fare un esempio pratico, consideriamo un altoparlante funzionante a bassa frequenza che "tocca" gli estremi a causa del raggiungimento della massima dinamica di escursione del cono. Si ha un aumento di resistenza meccanica che si rifletterà in una diminuzione di resistenza elettrica.

Consideriamo ora l'elemento trasduttore come un accoppiamento di impedenza; Bl avrà il valore ottimale in un certo intervallo delle frequenze basse. Tale valore è normalmente fissato in modo che il cono mantenga la condizione del controllo di massa sotto la frequenza di risonanza. Alla risonanza, dove la reattanza della massa del cono uguaglia la reattanza dovuta alla rigidità delle sospensioni, si cerca di ottenere un Q un po' inferiore all'unità, diciamo pari circa a 0,5, in modo da ottenere una condizione di non oscillazione e conseguentemente migliorare le prestazioni ai transienti.

Il fattore di merito meccanico Q_M è dato da:

$$Q_M = \frac{2 \pi f M_{MC}}{R_{MS}} \quad (2.21)$$

Se la resistenza è principalmente dovuta alla bobina mobile, possiamo scrivere

$$R' = \frac{B^2 l^2}{R_E}$$

e, ponendo R' al posto di R_{MS} nell'equazione (2.21), otteniamo il fattore di merito elettrico Q_E

$$Q_E = \frac{2 \pi f M_{MC} R_E}{B^2 l^2} \quad (2.22)$$

da cui

$$B \cdot l = \frac{2 \pi f M_{MC} R_E}{\sqrt{Q_E}} \quad (2.23)$$

Il fattore di merito totale Q_T è dato da

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_M} + \frac{1}{Q_E} \quad (2.24)$$

Il sistema magnete-bobina mobile è progettato usando questa espressione. L'accelerazione del sistema vibrante in funzione della frequenza varia con il Q allo stesso modo delle curve della pressione sonora di un altoparlante in uno schermo infinito. Sembrerebbe vantaggioso quindi scegliere il valore di Q oltre il valore unitario in modo da avere la massima estensione di risposta in frequenza in cui si ha la risposta piatta; ma, come sappiamo dalla teoria delle vibrazioni meccaniche, $Q = 0,5$ corrisponde alla condizione di smorzamento critico. Valori più alti danno un moto oscillatorio che danneggia il responso ai transistori. Nel calcolo del valore ottimale di Bl , il valore della resistenza elettrica della bobina mobile, R_E , non tiene conto della resistenza di uscita dell'amplificatore, R_g , che è in serie con essa. (vedi figura 2.3 (a)). Poichè R_g è normalmente molto più piccola di R_E , un elevato fattore di smorzamento è facilmente ottenuto (il fattore di smorzamento è il rapporto tra l'impedenza di carico e l'impedenza della sorgente). Con i moderni amplificatori a transistor

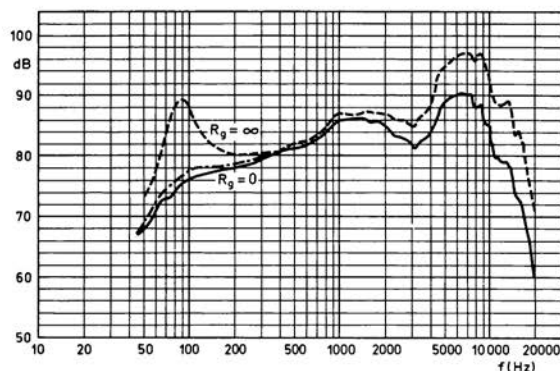


Figura 2.12 — Effetto della variazione della resistenza di sorgente sul responso dell'altoparlante. La linea tratteggiata rappresenta la condizione a corrente costante, $R_g = \infty$; la linea continua rappresenta la condizione a tensione costante, $R_g = 0$; la linea tratto-punto è il responso che si ha con un tipico amplificatore.

sono comuni anche i fattori di merito pari a 200. Poichè l'impedenza d'uscita dell'amplificatore è bassa, è importante che anche la resistenza dei fili di collegamento degli altoparlanti sia molto bassa in modo che essi non riducano in maniera significativa il fattore di merito. Un'interessante conseguenza dell'effetto della resistenza di sorgente è illustrata in figura 2.12. Le due curve mostrano il comportamento tipico di un woofer da 5" in una cassa da 5 litri riempita di lana di vetro. Una curva rappresenta il responso con una tensione costante all'ingresso, l'altra viene ottenuta alimentando l'altoparlante con una corrente costante. La condizione a tensione costante corrisponde ad una resistenza di sorgente pari a zero, mentre, nelle condizioni di corrente costante, la resistenza di sorgente può essere posta infinita. L'effetto delle variazioni della resistenza di sorgente da zero a infinito è chiaramente illustrata; un'elevata resistenza di sorgente causa un elevato Q.

Poichè gli amplificatori a transistori offrono una bassa resistenza d'uscita, e quindi si comportano quasi come fossero generatori di tensione costante, la condizione sottosmorzata mostrata in figura 2.12 non è normalmente presente (assumendo trascurabile l'effetto dei cavi di collegamento).

2.8. I CONI DEGLI ALTOPARLANTI

Sulla parte in pendenza della curva di R_{MA} , si può ragionevolmente supporre che il cono lavora sostanzialmente come un pistone rigido.

Questo non è più vero nel caso delle alte frequenze, dove il diametro del cono diventa comparabile alla lunghezza d'onda e dobbiamo considerare la propagazione longitudinale delle onde sonore nel materiale del cono.

Esso, in questo caso, si muove con ampiezze differenti su differenti zone della sua superficie. Questa è una proprietà che abilita un singolo cono di altoparlante ad operare su un largo range di frequenze invece di scendere a 12 dB/ottava, come mostrato, nel caso di un pistone rigido, in figura 2.7; questo perché l'effettivo diametro del cono diminuisce all'aumentare della frequenza. L'onda propagantesi lungo le pareti del cono si attenua man mano. Oltre il ginocchio della curva di R_{MA} , R_{MA} è proporzionale al quadrato del diametro effettivo (vedi equazione 2.5). Poichè la massa del cono, M_{MC} , è anch'essa proporzionale al quadrato del diametro, possiamo determinare la potenza irradiata W_A dall'equazione (2.9) e (2.10):

$$W_A = v^2 R_{MA} \propto \frac{1}{d^4} \cdot d^2 = \frac{1}{d^2} \quad (2.25)$$

Alle alte frequenze dunque il piccolo diametro del cono tende ad aumentare la potenza irradiata, spostando la condizione mostrata in figura 2.7 per un pistone rigido. La riduzione dell'effettivo diametro del cono è illustrata in figura 2.13. Poichè il cono è più rigido all'apice e alla base, la propagazione d'onda longitudinale è più veloce, quindi la lunghezza d'onda è maggiore all'apice che alla base.

Possiamo applicare la stessa linea di ragionamento alla zona pendente della curva di R_{MA} . Sotto il ginocchio, R_{MA} è proporzionale alla quarta potenza del diametro del cono (vedi equazione 2.2); e, poichè M_{MC} è proporzionale al quadrato del diametro, possiamo scrivere

$$W_A = v^2 R_{MA} \propto \frac{1}{d^4} \cdot d^2 = \text{COSTANTE.}$$

Da qui, per una data forza applicata e un dato materiale del cono, la potenza irradiata a frequenze basse è indipendente dal diametro del cono. In generale il cono dell'altoparlante deve avere un alto rapporto rigidità/peso e un ragionevole

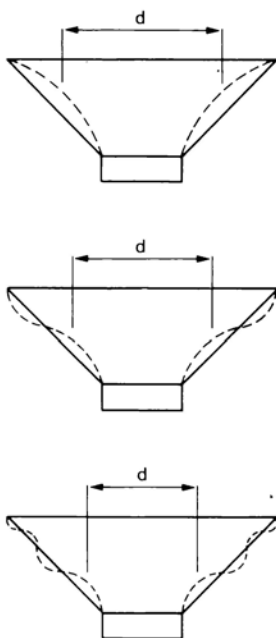


Figura 2.13 — Riduzione del diametro effettivo del cono con l'aumento della frequenza.

te elevato grado di attriti interni. Il cono dovrebbe ritornare rapidamente nella posizione di riposo dopo l'applicazione di una forma d'onda e, quindi, è importante l'elasticità del materiale. I metalli non sono quindi particolarmente buoni per questi usi.

Da uno scarso ripristino delle condizioni originarie del cono, si ottiene l'“effetto isteresi”. Il che succede quando gli attriti interni sono elevati se confrontati alla ri-

gidezza. L'isteresi disturba al medesimo tempo la risposta in frequenza, il responso ai transienti e produce distorsione. Test oggettivi non danno, normalmente, alcuna indicazione significativa della distorsione dovuta ad isteresi nel materiale del cono.

2.9. BORDO DEL CONO

I requisiti del bordo del cono sono i seguenti:

- formare un supporto flessibile per il margine del cono;
- essere impermeabile all'aria;
- essere senza risonanze;
- assorbire le onde ad alta frequenza che si propagano sul cono.

Normalmente il materiale di cui è costituito il bordo deve essere estremamente soffice e deve avere un'alta densità ed un elevato attrito interno.

Esempi di materiali adatti allo scopo sono: fibra acrilica ricoperta di gomma di poliuretano, fibre tessili e plastici al polivinilcloruro. Nella ricerca dell'ottenimento della maggiore larghezza di banda di potenza, alta efficienza, minima distorsione e miglior capacità di trattare i transienti, saranno senza dubbio trovati molti nuovi materiali. Uno degli ultimi materiali ottenuti e utilizzati con successo è la gomma di butile.

2.10. DIRETTIVITÀ

Dalla risposta in frequenza di figura 2.10, possiamo vedere che oltre la frequenza per la quale $kr \approx 2$ (normalmente tra 700 e 3000 Hz) l'uscita acustica diminuisce progressivamente. Per un pistone rigido la diminuzione è tra 6 e 12 dB/ottava.

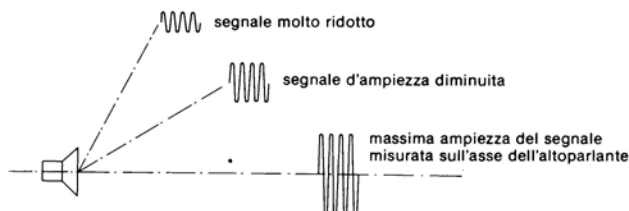


Figura 2.14 — L'ampiezza dei segnali ad alta frequenza decresce all'aumentare dell'angolo rispetto all'asse dell'altoparlante; very much reduced signal = segnale molto ridotto; reduced strength signal = segnale d'ampiezza diminuita; Maximum signal strength observed on speaker axis = massima ampiezza del segnale, misurata sull'asse dell'altoparlante.

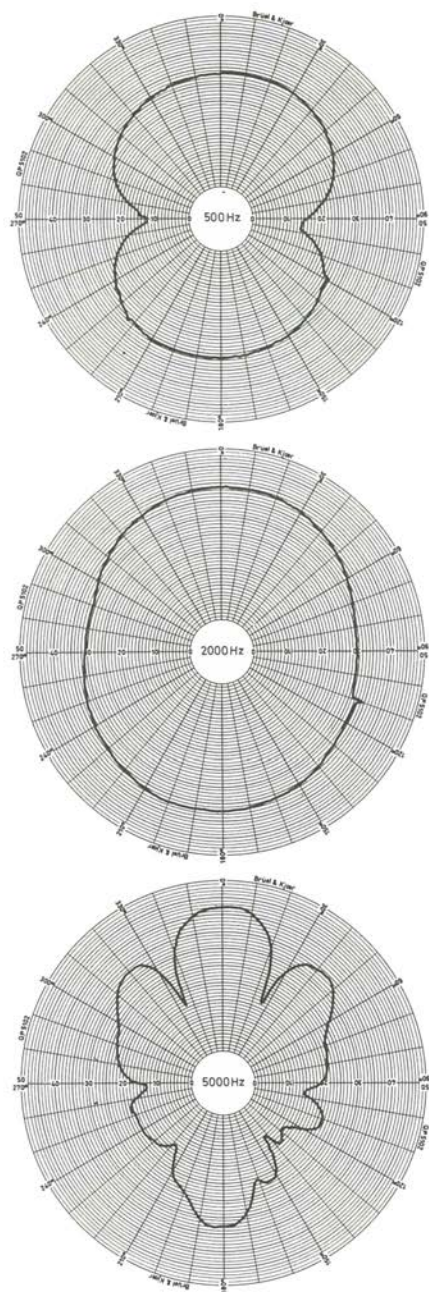


Figura 2.15 — Risposta polare di un tipico altoparlante di qualità a gamma estesa a differenti frequenze. Notare le diminuzioni di suono a 90° e 270° per la curva misurata a 500 Hz dovute alla cancellazione acustica.

Questo è più evidente di fianco l'altoparlante che non sull'asse. Ciò è dovuto al fenomeno della direttività, come si vede in figura 2.14. A causa dell' "effetto tromba" provocato dal cono una parte man mano più cospicua di potenza acustica è diretta lungo l'asse del cono, all'aumentare della frequenza, che non nelle altre direzioni.

I diagrammi di direttività sono mostrati, per un altoparlante a gamma estesa, in figura 2.15.

L'altoparlante è montato, tramite pinze, su una piattaforma girevole in una camera anecoica. Non è usato alcuno schermo acustico per separare le due facce dell'altoparlante. L'uscita acustica è registrata tramite un microfono mentre l'altoparlante ruota. Di maggiore interesse è il diagramma a 5.000 Hz. Questo indica chiaramente la direzione nella quale l'uscita sonora è prevalentemente proiettata (alle alte frequenze). A frequenze basse, l'uscita acustica è praticamente omnidirezionale. A causa delle riflessioni presenti in una sala d'ascolto (effetto del muro, delle pareti e del soffitto) la direzione della sorgente diventa quasi indistinguibile all'ascoltatore. Però, a frequenze comprese da 10.000 e 15.000 Hz, ci si può aspettare che l'altoparlante a gamma estesa mantenga un apprezzabile responso agli acuti solo in un piccolo angolo di circa 15° sull'asse. In altri casi il livello di risposta può

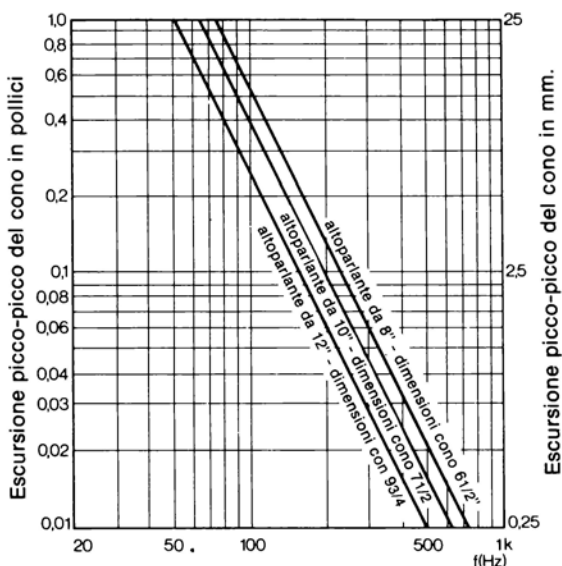


Figura 2.16 — Escursione del cono di altoparlante da 8", 10" e 12" montati in uno schermo infinito e irradianti un watt acustico su ciascuna faccia. Altoparlante da 8" - dimensioni del cono 6 1/2". Altoparlante da 10" - dimensioni del cono 7 1/2". Altoparlante da 12" - dimensioni del cono 9 3/4". Peak-peak cone excursion in inches = escursione del cono picco-picco in pollici / escursione del cono picco-picco in mm.

essere ottenuto entro più di 30° fuori dall'asse. Il limite superiore della risposta agli acuti è ovviamente determinata dalla massa della bobina mobile; in un altoparlante a gamma estesa, questo può richiedere l'uso di magneti molto grandi nei quali è immersa una bobina molto corta.

2.11. NON LINEARITÀ E DISTORSIONE

La distorsione è causata da non linearità nel sistema di sospensione del cono e dal cono stesso. In più, l'insufficiente uniformità del campo magnetico, causando delle variazioni dell'induttanza elettrica della bobina mobile quando essa è in movimento, è anch'essa causa di distorsione. L'azione della sospensione dovrebbe essere lineare oltre il massimo valore dell'escursione del cono, in modo da rendere il moto del cono direttamente proporzionale alla forza applicata. Per ampi movimenti del cono ciò è generalmente difficile da ottenere; in figura 2.16 è illustrato un grafico che dà gli spostamenti e deve effettuare il cono in funzione della frequenza per una data pressione sonora. La maggior parte degli altoparlanti hanno il cono formato da una pasta cartacea modellata opportunamente.

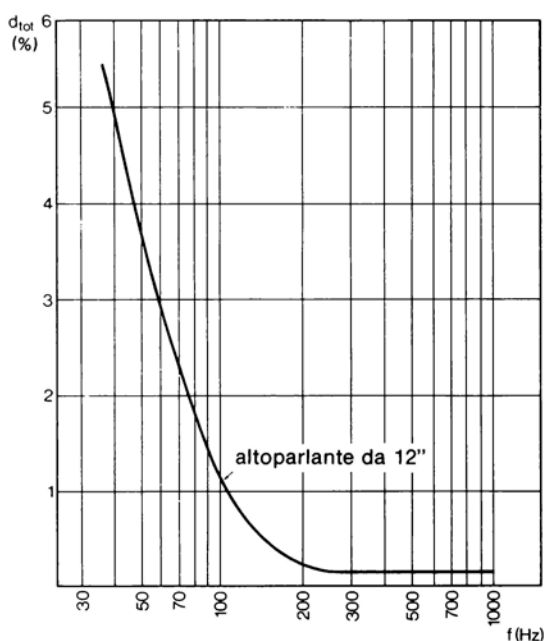


Figura 2.17 — Tipica distorsione in funzione della frequenza per un altoparlante di alta qualità ad un watt d'ingresso. Altoparlante da 12".

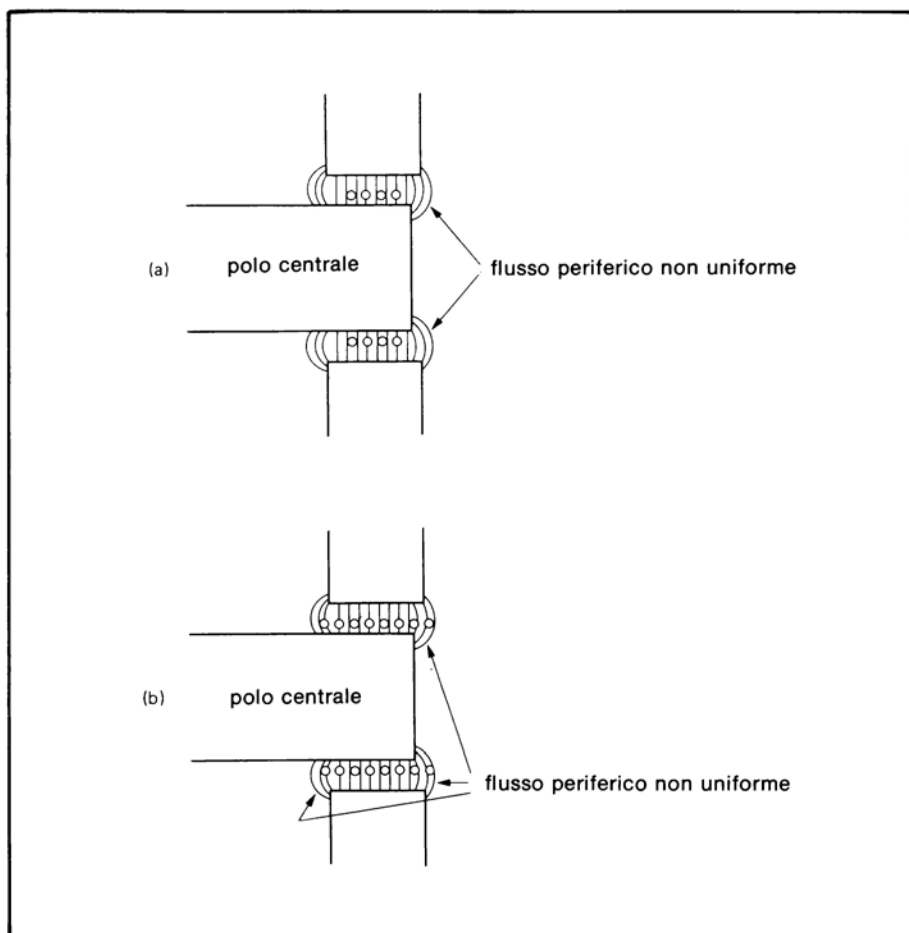


Figura 2.18 — Metodi di riduzione della distorsione causata dalla densità del flusso magnetico non uniforme nel traferro. (a) bobina mobile corta, (b) bobina mobile lunga.
Non uniform fringe flux = flusso periferico non uniforme; centre pole = polo centrale (2 volte).

Questo materiale può essere notevolmente non lineare, specialmente se è troppo sottile. Raddoppiando lo spessore del cono si riduce l'efficienza, ma si riducono anche le distorsioni sulla maggior parte della gamma di frequenza. La distorsione a bassa frequenza di un tipico altoparlante da 12" a larga banda è illustrata in figura 2.17. Tranne il caso in cui il campo magnetico dove si muove la bobina è uniforme, il movimento del cono non sarà lineare con il segnale d'ingresso. Per vincere questa non linearità si impiegano due metodi (vedi figura 2.18).

Se si usa bobina corta, il suo movimento nella zona periferica delle linee di flusso del traferro è evitabile. Se è usata una bobina mobile lunga, un estremo della bobina si muove nella regione ad elevata densità di flusso mentre l'altro si muove nella regione a bassa densità di flusso. Il prodotto spire per flusso tagliato rimane costante. Fino a questo punto abbiamo considerato solo la distorsione d'ampiezza; un altro tipo di distorsione è quella "di modulazione" che nasce quando un tono basso, che dà luogo ad un grande spostamento del cono, e un suono acuto, che richiede invece un piccolo spostamento, sono riprodotti contemporaneamente. Supponendo che siano presenti solo le frequenze f_1 e f_2 , la distorsione di modulazione farà comparire le nuove frequenze $f_2 \pm f_1$, $f_2 \pm 2f_1$, ecc. La più importante è $f_2 \pm f_1$, cioè la banda laterale del primo ordine.

La distorsione di ampiezza si ha soprattutto nelle bande laterali di ordine pari. Per un cono con cedevolezza e sistema magnetico simmetrico la banda laterale del secondo ordine $f_2 \pm 2f_1$ è probabilmente quella di maggior ampiezza. Si può dimostrare che la distorsione di modulazione è data da

$$d_m = 0,0013 s_1 f_2 \quad (2.27)$$

dove s_1 è lo spostamento del cono in mm. alla frequenza, bassa, f_1 ed f_2 è la frequenza che viene modulata. La distorsione di modulazione è dunque espressa come percentuale dell'ampiezza del segnale f_2 . Esempio: consideriamo un altoparlante di 10" a larga banda con un'ampiezza di escursione del cono r.m.s. di 12,5 mm. ad una determinata frequenza bassa. Alla frequenza di 800 Hz. avremo una distorsione di

$$d_m = 0,0013 \times 12,5 \times 800 = 13\%.$$

Essendo l'ampiezza della distorsione proporzionale all'ampiezza del moto del cono, è importante che essi diano i più ridotti possibile. La distorsione totale è la somma r.m.s. della distorsione d'ampiezza e della distorsione di modulazione

$$d_{tot} = \sqrt{(d_a^2 + d_m^2)}. \quad (2.28)$$

Un altro aspetto della linearità è il responso ai transienti, che consiste nell'abilità dell'altoparlante a riprodurre impulsi di breve durata senza distorsione dei fronti d'onda e, particolarmente, senza aggiunta di alcuna frequenza. Un buon responso

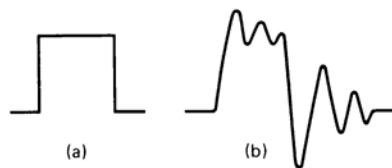


Figura 2.19 — Responso del cono ai transienti. (a) impulso di ingresso, (b) movimento del cono.

ai transistori richiede una caratteristica in frequenza dolce ed un buon responso in fase. Questi sono normalmente difficili da ottenere in un sistema meccanico complesso. Dopo aver rimosso l'impulso di pilotaggio, l'elemento mobile eccitato dalla bobina ma non necessariamente rigidamente accoppiato ad essa, continua ad oscillare per proprio conto. (vedi figura 2.19).

2.12. SISTEMI MULTI VIA

I sistemi di altoparlanti multi via hanno i seguenti vantaggi:

- pressione sonora e responso in potenza piatti; questo perché ogni altoparlante è progettato per operare al di sotto del ginocchio della curva caratteristica di R_{MA} . Il fenomeno del "break-up" del cono può essere evitato.
- capacità di trattare elevate potenze: lo spettro di potenza è diviso fra i vari altoparlanti; in questo modo il sistema è capace di ricevere una maggiore potenza che non se fosse un solo altoparlante.
- miglioramento dei diagrammi polari, perché ogni altoparlante opera in una regione dove la lunghezza d'onda è lunga rispetto alle dimensioni dell'altoparlante; così ogni altoparlante può essere visto come una sorgente puntiforme.

Solo alla frequenza di cross-over, questo può dar luogo a difficoltà. Nei punti dell'area d'ascolto dove le distanze tra due altoparlanti che operano alla stessa frequenza differiscono fra loro di $1/2$ lunghezza d'onda, la pressione sonora avrà una diminuzione a tale frequenza.

Il tweeter a cupola di plastica è un altoparlante molto popolare negli impieghi ad alta frequenza. Esso funziona a cavallo del ginocchio della curva di R_{MA} , e non ha difficoltà nella parte precedente di tale curva. Può invece aver problemi oltre il ginocchio, dove è richiesta la flessione del cono.

Il progetto della rete di cross-over, potrebbe essere sempre ottenuta sperimentalmente. L'uso indiscriminato delle formule che esprimono i valori di induttanza e capacità in termini di frequenza di cross-over e impedenza nominale dà luogo a risultati spesso insoddisfacenti. Le impedenze di cui bisogna tener conto sono la impedenza d'uscita dell'amplificatore (quasi zero) e l'impedenza dell'altoparlante, che è complessa. Ottimi risultati possono essere ottenuti solo per mezzo di tentativi, mediante sostituzione dei vari componenti della rete con elementi di valore leggermente diverso da quelli calcolati. Per ridurre le dimensioni fisiche degli induttori dei filtri possono essere usati nuclei di ferrite.

Devono però essere considerati due importanti aspetti: isteresi e saturazione. Salvo il caso in cui si prendono le dovute precauzioni, essi danno luogo a modifiche di varie caratteristiche.

L'isteresi del nucleo di una induttanza in un filtro cross-over può causare una completa perdita di definizione del suono.

Inoltre, ad alti livelli di potenza, la corrente che scorre in un'induttanza può portare alla saturazione il nucleo di ferrite.

2.13. MAGNETI

L'equazione 2.22 dimostrò che il Q dell'altoparlante è proporzionale all'inverso del quadrato di Bl , che è il prodotto della densità del flusso nel traferro per la lunghezza del filo della bobina mobile. L'efficienza, quindi, è strettamente relazionata alla densità di flusso nel traferro, e per un altoparlante efficiente è necessario un forte magnete.

La classica curva $B-H$ in questo caso non interessa; noi stiamo trattando di magneti permanenti per cui è importante la curva di demagnetizzazione di figura 2.20. Il prodotto $B-H$ indica l'energia nel materiale per un dato valore di B , e il massimo valore di $B-H$ sulla curva di demagnetizzazione rappresenta il punto di lavoro ideale per il materiale magnetico in condizioni statiche. Per far lavorare il sistema magne-

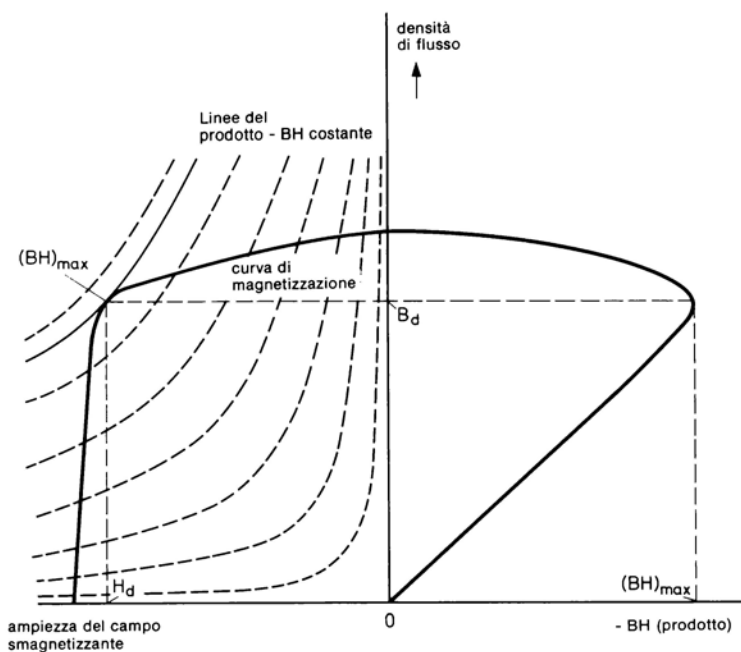


Figura 2.20 — Curve di demagnetizzazione con linee a $B \cdot H$ costante.
Demagnetizing field strength = ampiezza del campo demagnetizzante.

tico, costituito dal magnete e dal traferro, in condizioni di stabilità occorre scegliere il punto di lavoro un poco più in alto del punto per il quale il prodotto $B \cdot H$ è massimo. Questo si può vedere in figura 2.21.

In pratica la demagnetizzazione del materiale non è costante e le variazioni di densità di flusso seguono la linea chiamata "recoil line". Questo è illustrato in figura 2.22.

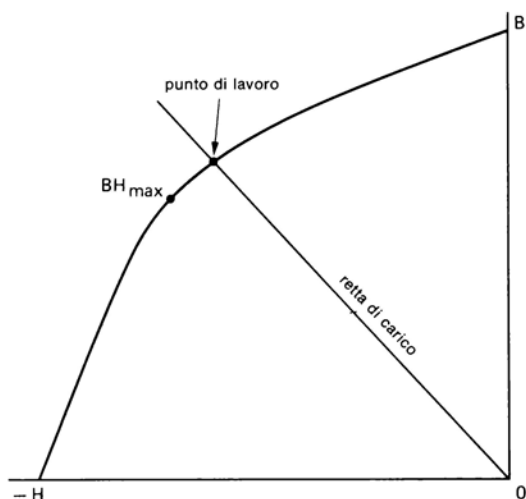


Figura 2.21 — La migliore stabilità si ottiene operando al di sopra del punto massimo $B \cdot H$.

Load line = linea di carico; operating point = punto operativo.

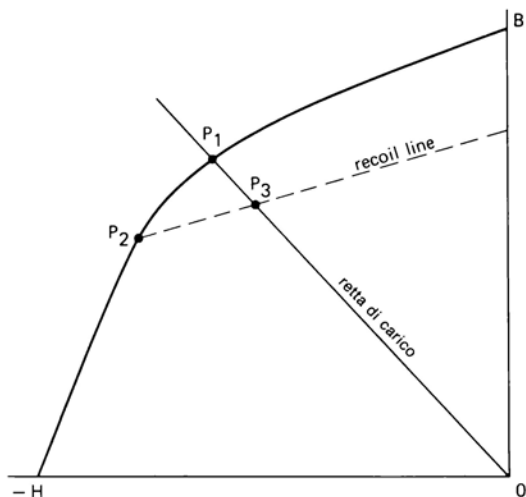


Figura 2.22 — Se il punto operativo scende sotto il ginocchio della curva, ritorna alla linea di carico attraverso la recoil line.

Il punto di lavoro P_1 può cadere al di sotto del ginocchio della curva di demagnetizzazione fino a P_2 , a causa di un campo demagnetizzante esterno, un aumento del traferro o una diminuzione della temperatura che causa una variazione della curva di demagnetizzazione. Quando poi le condizioni previste sono restaurate, il punto di lavoro si sposterà da P_2 a P_3 seguendo la "recoil line" parallelamente a una parte della curva di demagnetizzazione. I valori di B e $B-H$ quando il punto di lavoro passa da P_1 a P_3 subiranno una diminuzione. Per evitare questa situazione P_1 deve essere scelto ad una distanza di sicurezza oltre il ginocchio, senza però sacrificare troppo il prodotto $B-H$. Per riottenere il valore di $B-H$ richiesto occorrerà aumentare le dimensioni del magnete. Molti materiali magnetici sono stati usati per formare i sistemi magnetici degli altoparlanti; i più usati sono: la ferrite anisotropica e il ticonal anisotropico. La ferrite è formata da ossido di ferro polverizzato che viene pressato e sinterizzato. Esso può essere levigato con elevata accuratezza. Il ticonal può contenere alcuni o tutti i seguenti materiali: titanio, cobalto, nickel, ferro, alluminio, rame. Tale magnete viene formato per estrusione e può inoltre essere levigato. Le principali differenze tra questi materiali sono che mentre la ferrite è caratterizzata da un'elevata coercitività e resistività, il ticonal ha un elevato valore di magnetismo residuo e un elevato prodotto di energia. Per un dato traferro, la lunghezza del magnete è proporzionale ad H , e l'area della sezione trasversale è proporzionale a B . Occorrono quindi due configurazioni di base:

ferrite: sezione larga, lunghezza ridotta.

ticonal: sezione corta, lunghezza elevata.

Essi sono illustrati in figura 2.23.

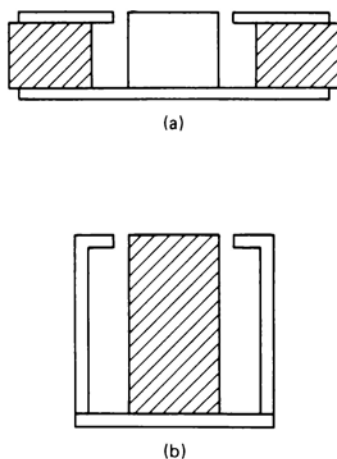


Figura 2.23 — Configurazione di complessi magnetici di uso comune. (a) magnete in ferrite, (b) magnete in ticonal.

Oggi si tende a rendere meno profonde le casse acustiche, di conseguenza l'altoparlante con magnete in ferrite è il più comune. Un altro importante vantaggio della ferrite è la sua economicità. Un vantaggio del magnete in ticonal è invece il suo basso campo magnetico disperso dovuto allo schermo metallico che caratterizza la struttura di tale sistema magnetico; questo è importante quando l'altoparlante è montato in televisori a colori presso il tubo catodico.

2.14. CARATTERISTICHE DEGLI ALTOPARLANTI

Vediamo ora le caratteristiche degli altoparlanti utilizzati nei tre sistemi che noi esamineremo. Tali caratteristiche sono in parte misurate da esemplari in normale commercio, ed in parte dedotte dai data sheet della PHILIPS. Questa casa adotta per gli altoparlanti delle sigle dalle quali si possono dedurre alcune loro caratteristiche: le prime due cifre indicano il diametro del cono, in pollici; le tre cifre che seguono indicano il tipo di magnete e la lettera dopo la barra indica se l'altoparlante è un woofer (W), un mid-range (Sq) o un tweeter (t). L'ultima cifra indica l'impedenza nominale.

Nei grafici della risposta in frequenza saranno indicati anche i residui di distorsione. La differenza in dB tra la pressione acustica totale e la pressione dovuta alla distorsione armonica può essere convertita in % di distorsione secondo la seguente tabella:

| ΔP | % |
|------------|-------|
| 40 dB | 1 % |
| 30 dB | 3 % |
| 20 dB | 10 % |
| 10 dB | 30 % |
| 0 dB | 100 % |

SISTEMA N. 1

Questo sistema è a due vie-due altoparlanti. Può essere realizzato con impedenza nominale di 4 ohm o 8 ohm.

WOOFER : AD 70601/W4/W8

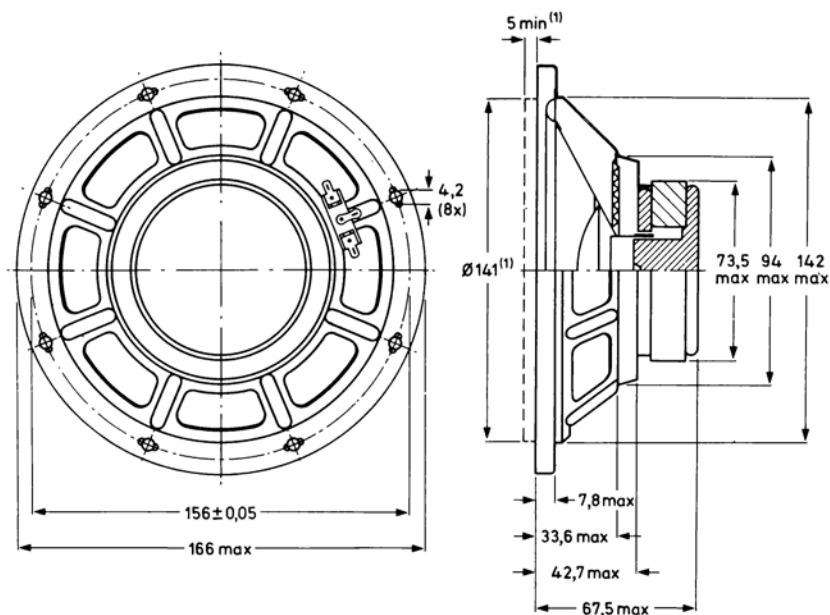


Figura 2.24 — Dimensioni in mm.

| | | | |
|---|------|----------|------------|
| Impedenza nominale | 8 | Ω | (tipo w 8) |
| Resistenza della bobina mobile | 6,7 | Ω | |
| Frequenza di risonanza | 40 | Hz | |
| Fattore di merito totale Q_t | 0,75 | | |
| Potenza nominale, componente montato in un box chiuso di 80 litri, senza filtro | 30 | W | |
| Potenza max. sopportata | 60 | W | |
| Potenza operativa | 12,5 | W | |
| Energia nel traferro | 140 | mJ | |
| Densità di flusso | 0,93 | T | |
| $B \cdot l$ ad 1 A | 5,5 | Wb/m | |
| Massa totale delle parti in moto M_{MC} | 13,2 | g | |
| Cedevolezza, altop. libero | 1,2 | mm/N | |
| Diametro effettivo del cono | 125 | mm | |

TWEETER : AD 2296/T4/T8

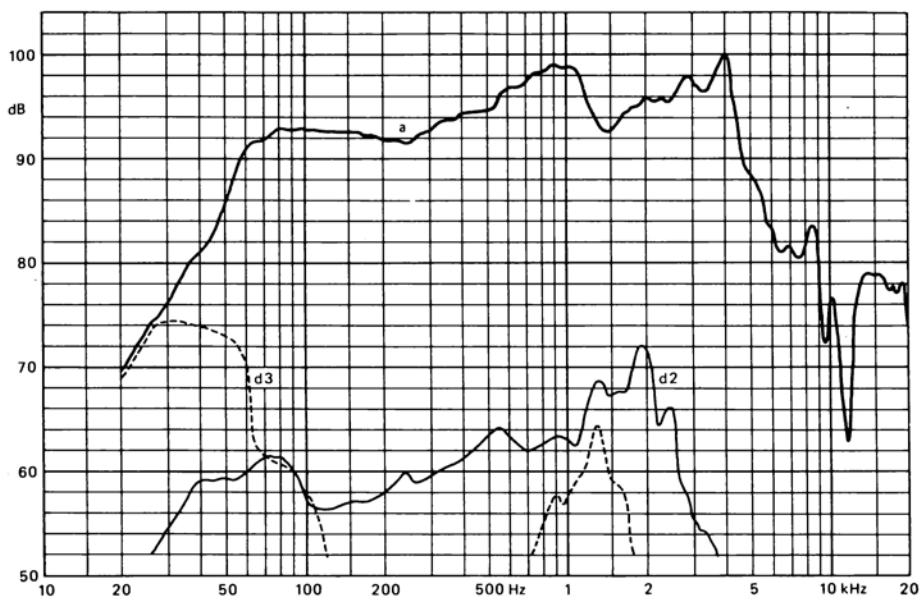


Figura 2.25 — Risposta in frequenza dell'AD 70601, misurata in camera anecoica alla potenza operativa; altoparlante montato in un box ermetico da 80 L. riempita di 0,5 Kg. di lana di vetro.
Curva a: pressione sonora; curva d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

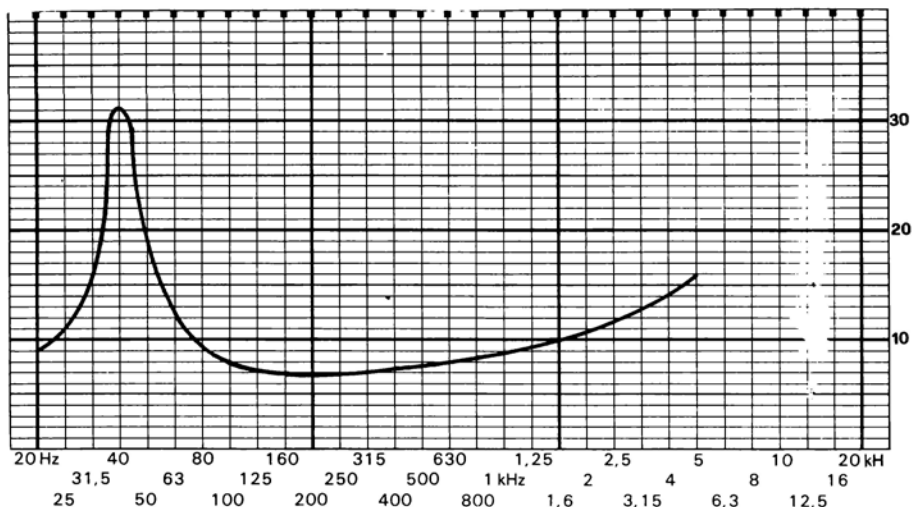


Figura 2.26 — Modulo dell'impedenza dell'AD 70601/W8.

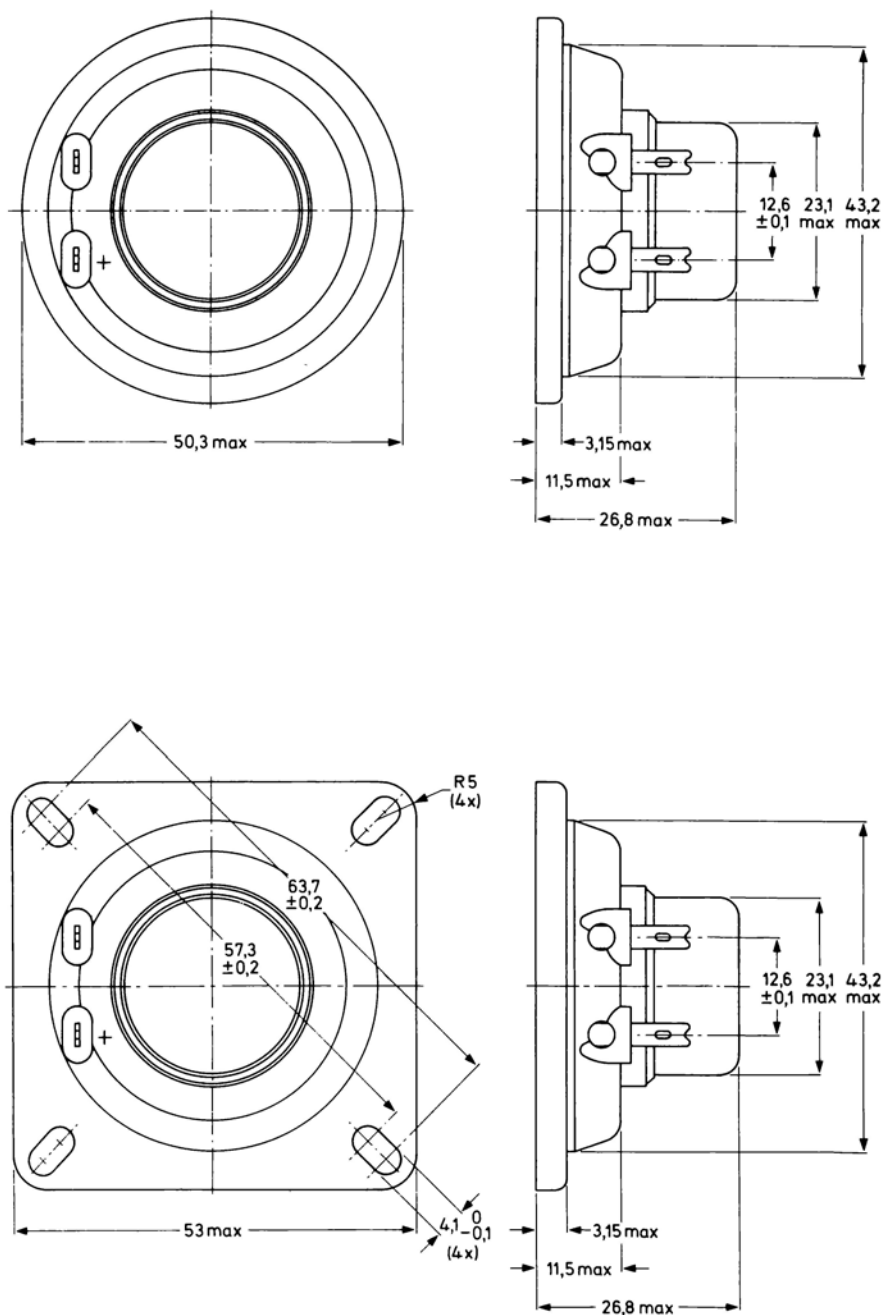


Figura 2.27 — Dimensioni in mm.

| | | | |
|---|------|----------|------------|
| Impedenza nominale | 8 | Ω | (tipo T 8) |
| Resistenza della bobina mobile | 6,3 | Ω | |
| Frequenza di risonanza | 1300 | Hz | |
| Potenza nominale | 3 | W | |
| Potenza nominale dell'altop. connesso ad un filtro passa alto con -3 dB a 3000 Hz | 6 | W | |

SISTEMA N. 2

Il sistema di altoparlanti n. 2 utilizza tre trasduttori, dei quali il mid-range e il tweeter sono a cupola. Anche questa cassa può essere realizzata sia nella versione a 4 ohm che in quella da 8 ohm.

WOOFER : AD 80652/W4/W8

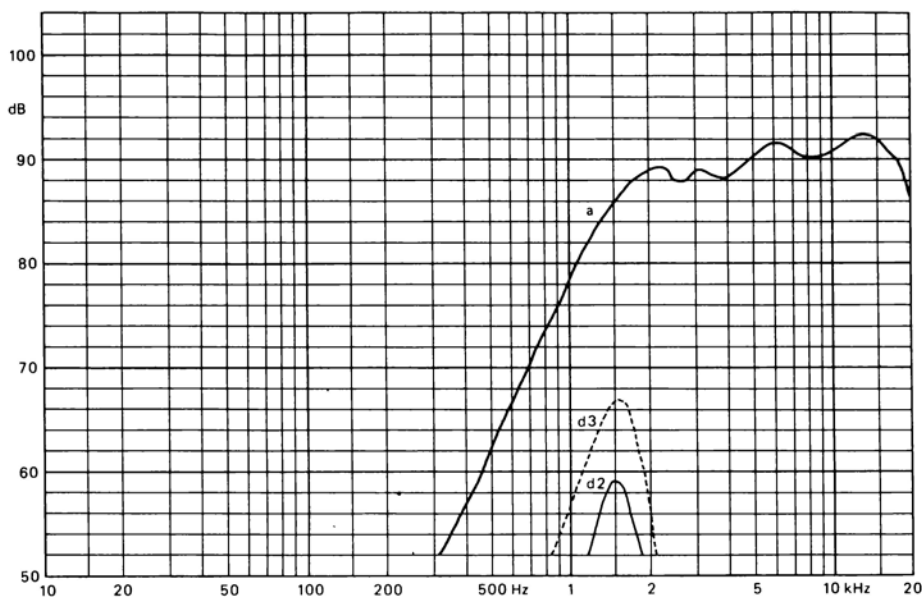


Figura 2.28 — Risposta in frequenza dell'AD 2296 misurata in camera anecoica ad una potenza di 1,5 W.

Curva a: pressione sonora; curve d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

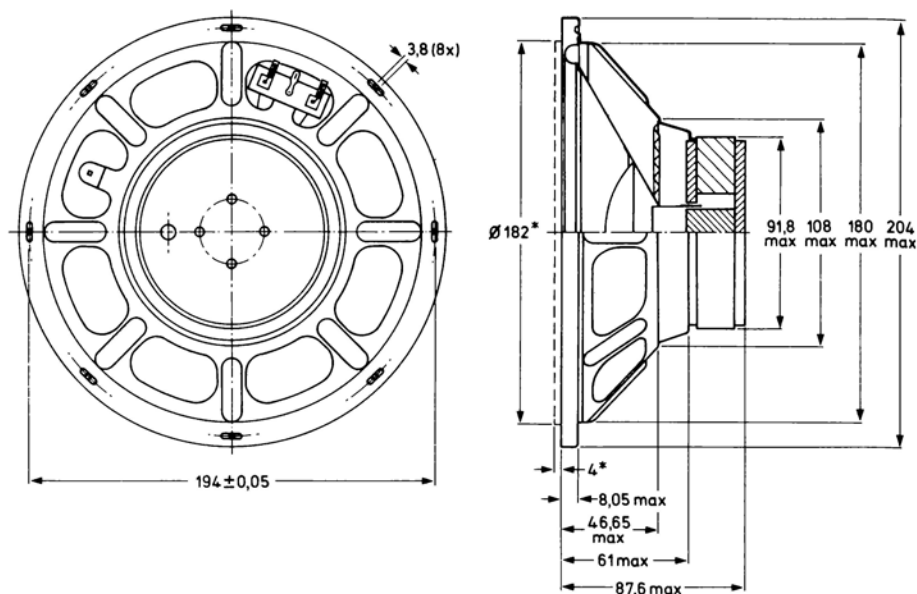


Figura 2.29 — Dimensioni in mm.

| | | | |
|---|------|------|------------|
| Impedenza nominale | 4 | ohm | (tipo W 4) |
| Resistenza della bobina mobile | 3,48 | ohm | |
| Frequenza di risonanza | 40 | Hz | |
| Fattore di merito totale Q_t | 0,49 | | |
| Potenza nominale, componente montato in un box chiuso di 25 litri, senza filtro | 50 | W | |
| Potenza max. sopportata | 100 | W | |
| Potenza operativa | 3,8 | W | |
| Energia nel traferro | 299 | mJ | |
| Densità di flusso | 1,1 | T | |
| $B \cdot l$ a 1 A | 5,4 | Wb/m | |
| Massa totale delle parti in moto M_{MC} | 17,5 | g. | |
| Cedevolezza, altop. libero | 1,02 | mm/N | |
| Diametro effettivo del cono | 160 | mm | |

MID-RANGE : AD 0211/Sq4/Sq8

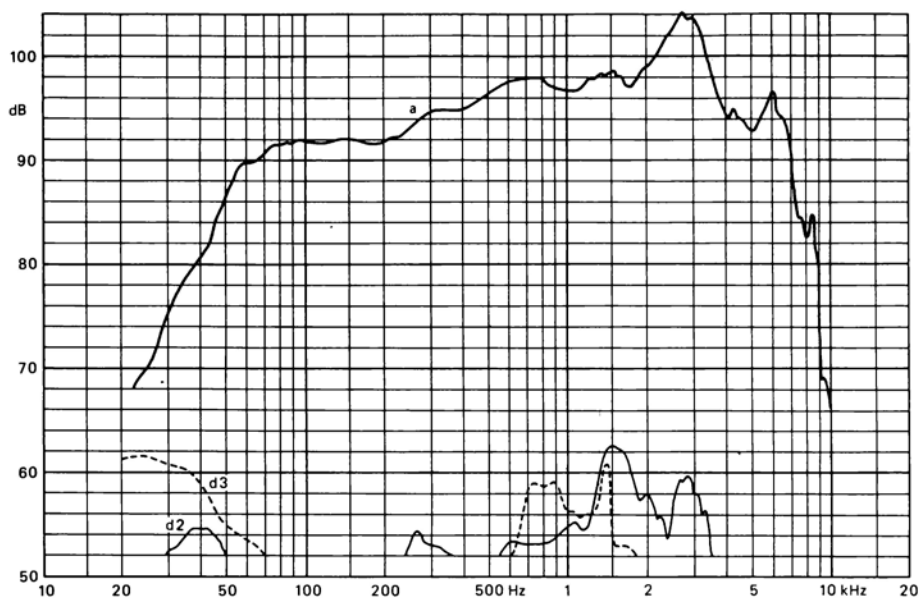


Figura 2.30 — Risposta in frequenza dell'AD 80652 misurata in camera anecoica alla potenza operativa. Altoparlante montato in box chiuso ermeticamente da 25 l., riempito con 1 Kg. di lana di vetro. Curva a: pressione sonora; curve d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

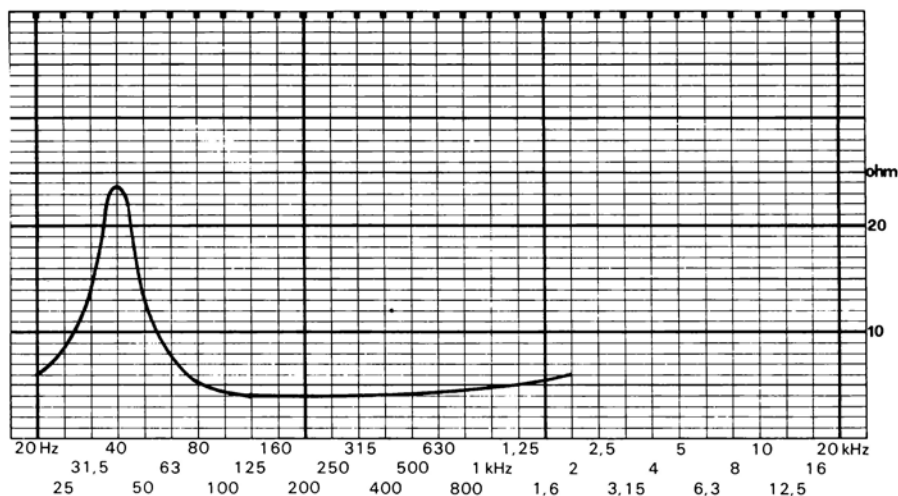


Figura 2.31 — Modulo dell'impedenza del woofer AD 80652/W4.

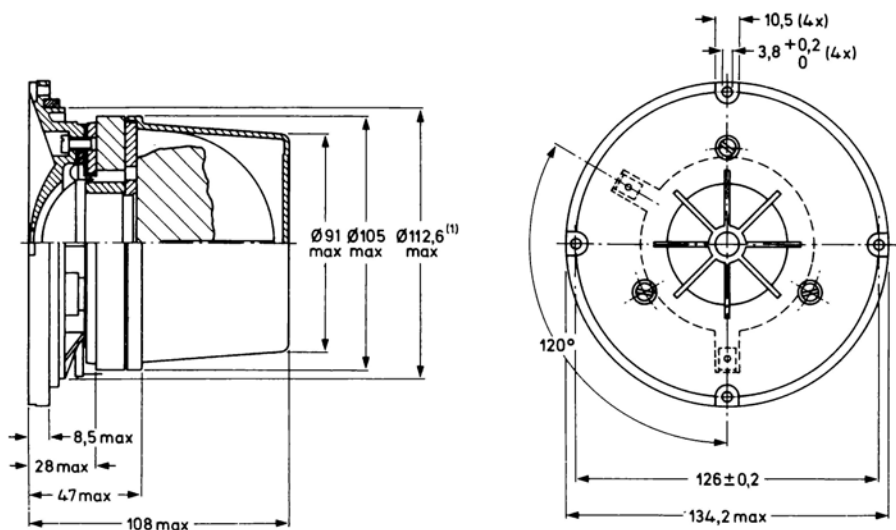


Figura 2.32 — Dimensioni in mm.

| | | | |
|--|-----|-----|------------|
| Impedenza nominale | 4 | ohm | (tipo Sq4) |
| Resistenza della bobina mobile | 3,4 | ohm | |
| Potenza nominale dell'altoparlante senza filtro | 20 | W | |
| Potenza nominale dell'altoparlante con filtro passa alto | 50 | W | |
| Potenza operativa | 5 | W | |

TWEETER : AD 1630/T4/T8

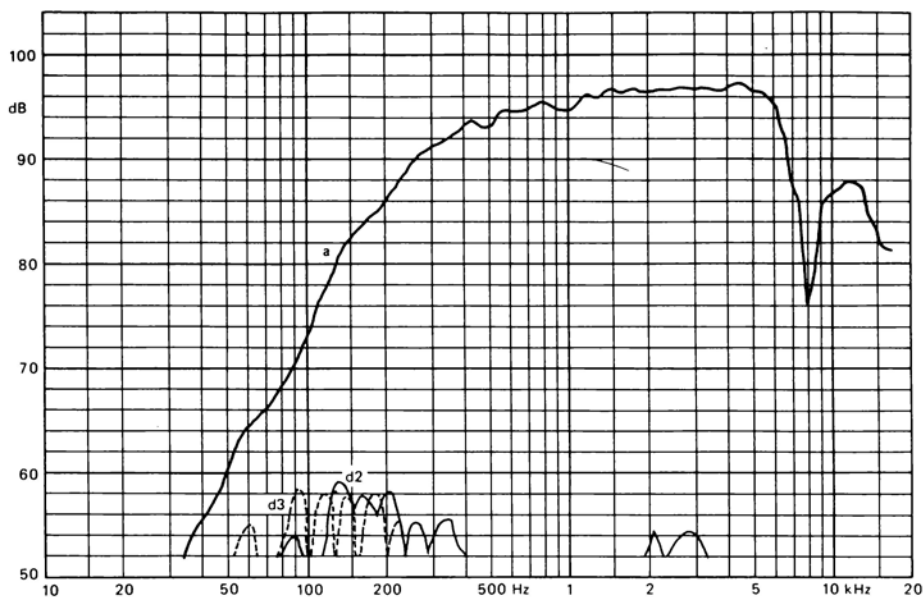


Figura 2.33 — Risposta in frequenza dell'AD 0211, misurata in camera anecoica alla potenza operativa.

Curva a: pressione acustica; curva d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

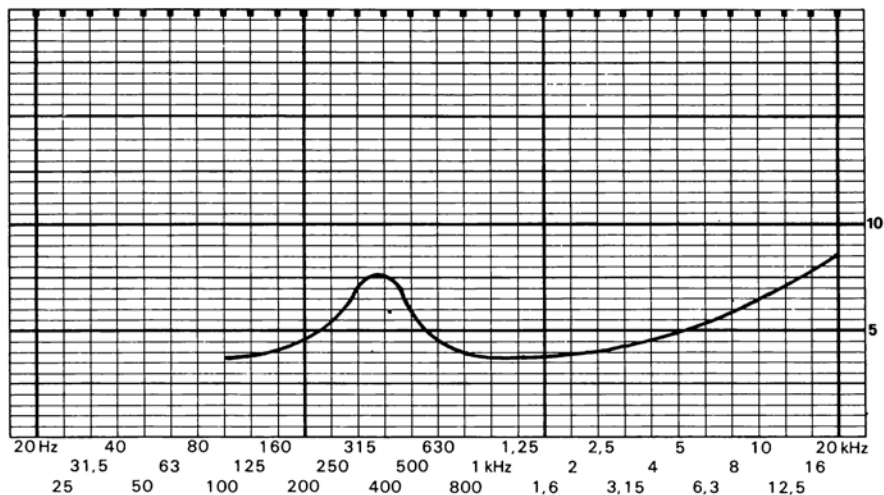


Figura 2.34 — Modulo dell'impedenza del mid-range AD 0211/SQ4.

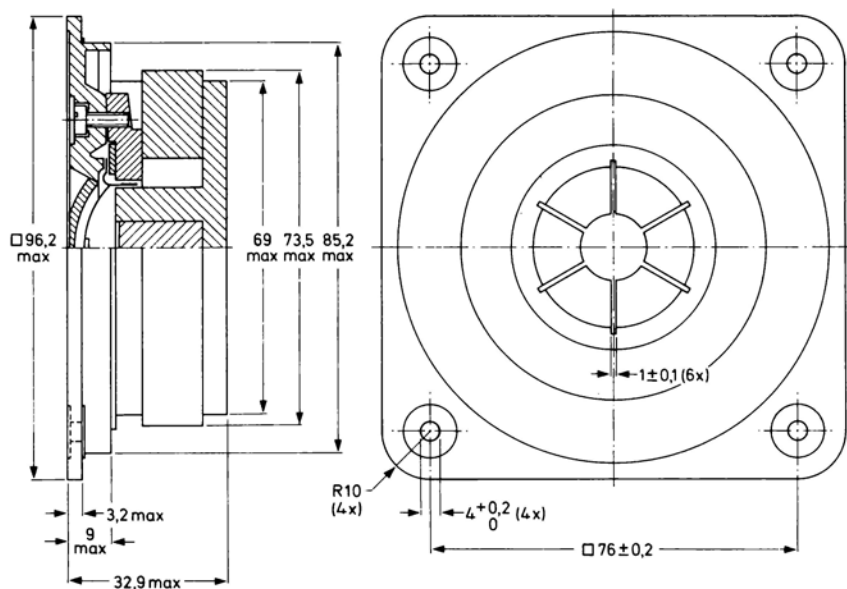


Figura 2.35 — Dimensioni in mm.

| | | |
|---|------|-----|
| Impedenza nominale | 4 | ohm |
| Frequenza di risonanza | 1300 | Hz |
| Potenza nominale, con filtro a 12 dB/oct. tagliato a 2000 Hz | 20 | W |
| Potenza nominale, con filtro a 12 dB/oct. tagliato a 4000 Hz | 50 | W |
| Potenza operativa | 3 | W |

SISTEMA N. 3

Anche questo sistema è un tre vie-tre altoparlanti con mid-range e tweeter a cupola. Di questa cassa esiste solo la versione a 4 ohm, che però utilizza il woofer da 8 ohm.

WOOFER : AD 12200/W8

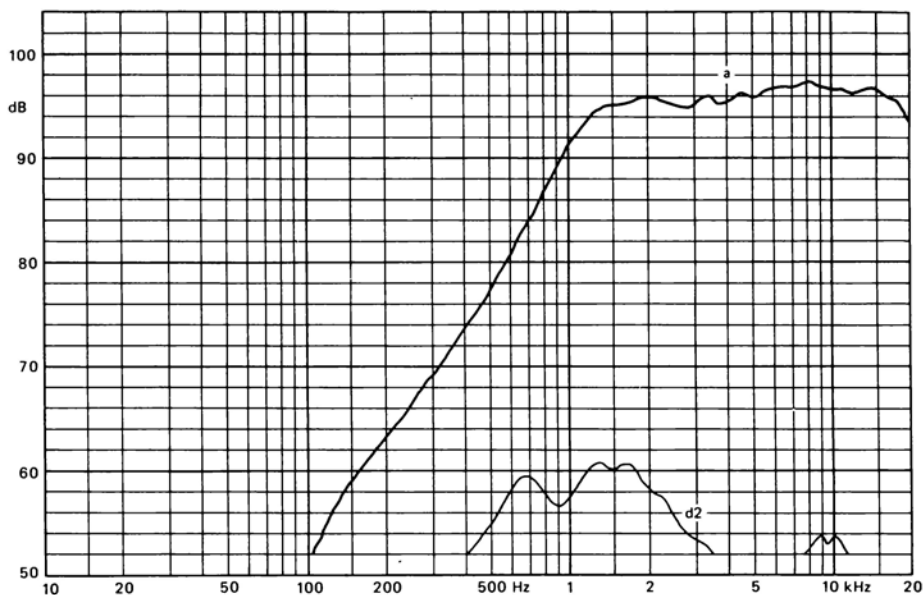


Figura 2.36 — Curva a: pressione sonora misurata in camera anecoica dell'AD 1630; curva d2: distorsione di seconda armonica, misurata alla potenza operativa di 3W in camera anecoica.

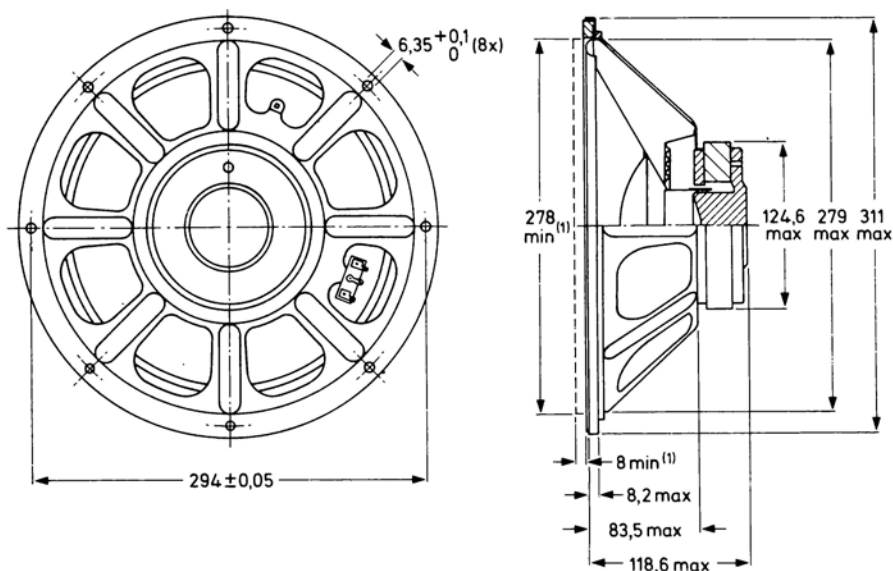


Figura 2.37 — Dimensioni in mm.

| | | |
|---|----------------------|------|
| Impedenza nominale | 8 | ohm |
| Resistenza della bobina mobile | 6,67 | ohm |
| Frequenza di risonanza | 24 | Hz |
| Fattore di merito totale Q_t | 0,33 | |
| Potenza nominale, componente montato in un box chiuso da 80 litri, senza filtro | 80 | W |
| Potenza massima sopportata | 150 | W |
| Potenza operativa | 5 | W |
| Energia nel traferro | 508 | mJ |
| Densità di flusso | 0,72 | T |
| $B \cdot l$ a 1 A | 13 | Wb/m |
| Massa totale delle parti in moto | $62 \cdot 10^{-3}$ | Kg |
| Cedevolezza, altop. libero | $0,88 \cdot 10^{-3}$ | m/N |
| Diametro effettivo del cono | 250 | mm |

MID RANGE : AD 02160/Sq4

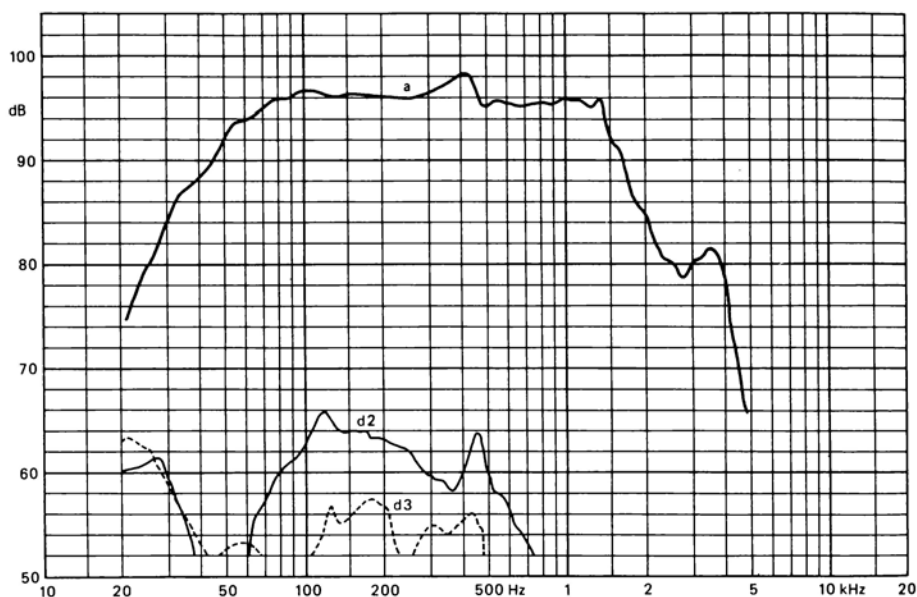


Figura 2.38 — Risposta in frequenza misurata in camera anecoica dell'AD 1220 alla potenza operativa.

Curva a: pressione sonora; curve d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

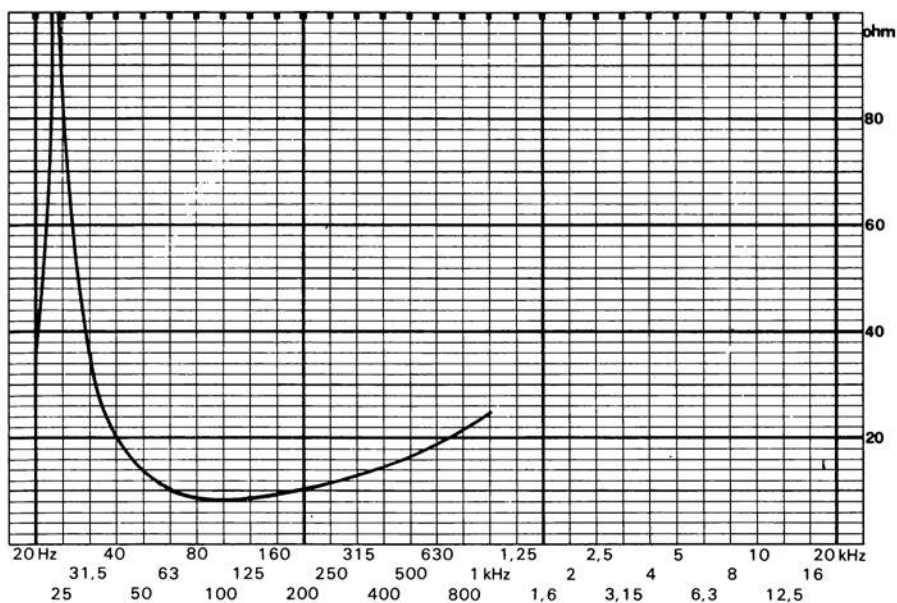


Figura 2.39 — Modulo dell'impedenza del woofer AD 1220/W8.

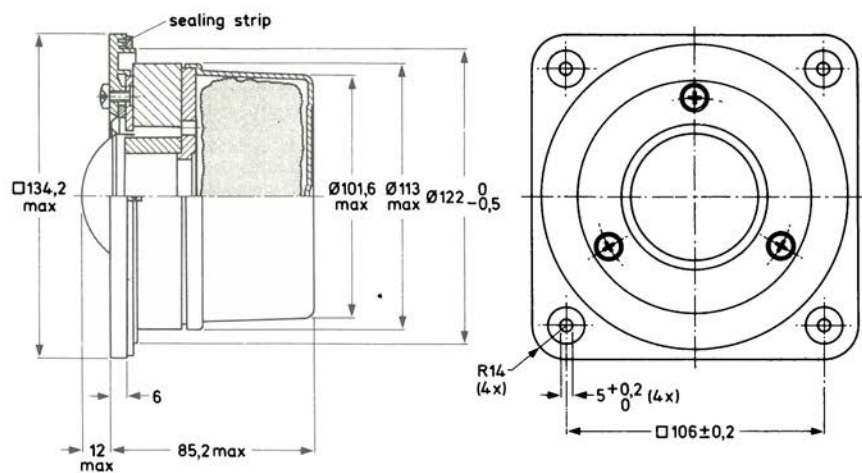


Figura 2.40 — Dimensioni in mm.

| | | |
|--|-----|-----|
| Impedenza nominale | 4 | ohm |
| Resistenza della bobina mobile | 3,4 | ohm |
| Potenza nominale dell'altop. con filtro passa alto a 12 dB/oct. | | |
| C = 36 microF, L = 1,2 mH | 30 | W |
| Massima potenza sopportata | 60 | W |
| Potenza operativa | 4 | W |

TWEETER : AD 01605/T4

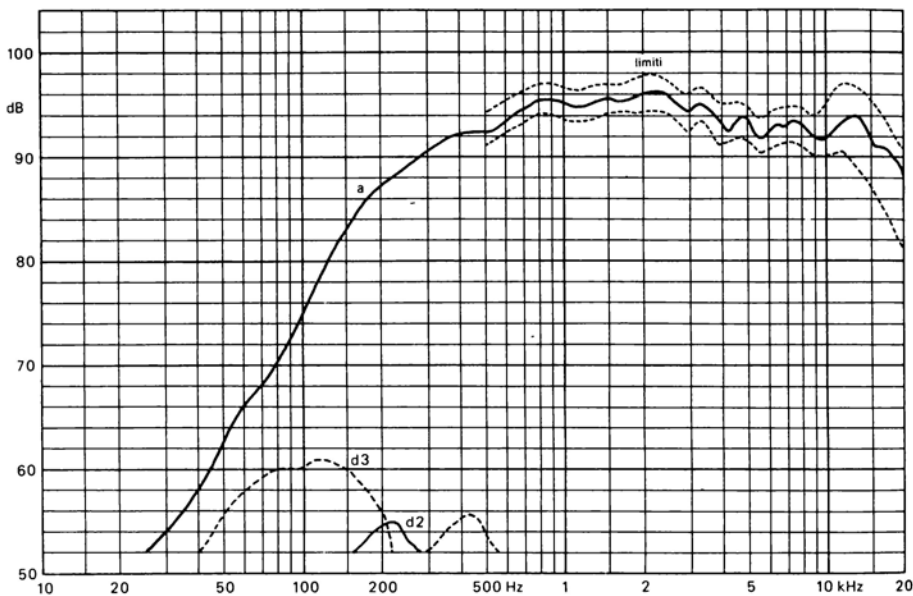


Figura 2.41 — Risposta in frequenza dell'AD 02160 misurata in camera anecoica. Curva a: pressione sonora; curve d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

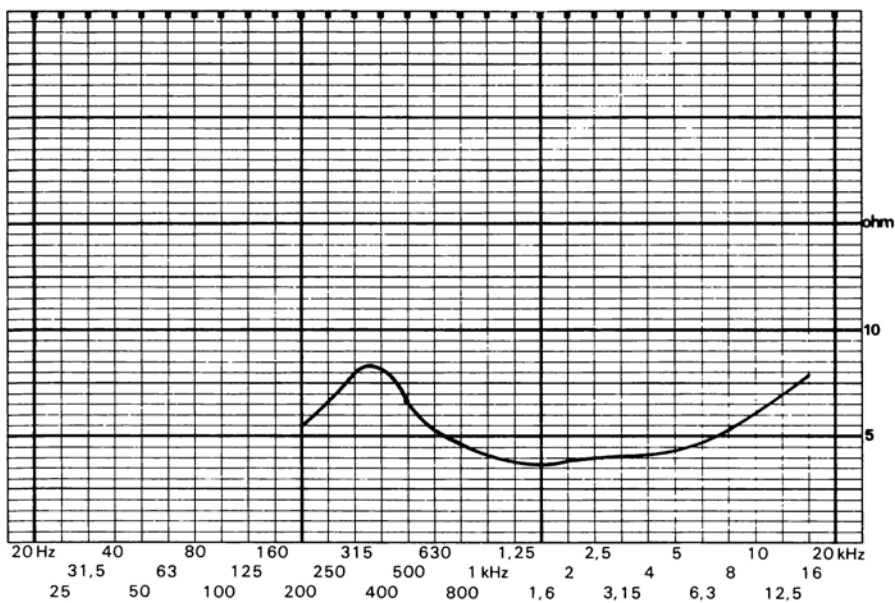


Figura 2.42 — Modulo dell'impedenza del mid-range AD 02160/SQ4.

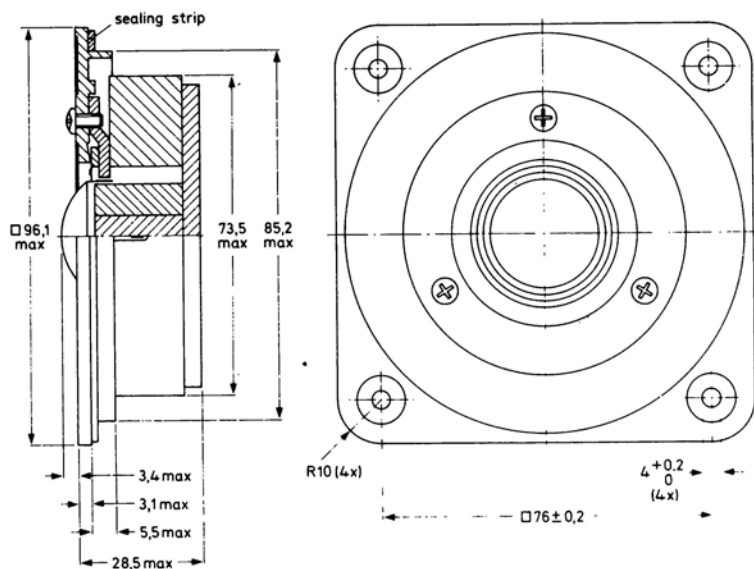


Figura 2.43 — Dimensioni in mm.

| | | |
|---|------|-----|
| Impedenza nominale | 4 | ohm |
| Frequenza di risonanza | 1250 | Hz |
| Potenza nominale, con filtro a 12 dB/oct. tagliato a 2000 Hz | 20 | W |
| Potenza nominale, con filtro a 12 dB/oct. tagliato a 4000 Hz | 50 | W |
| Potenza operativa | 5 | W |

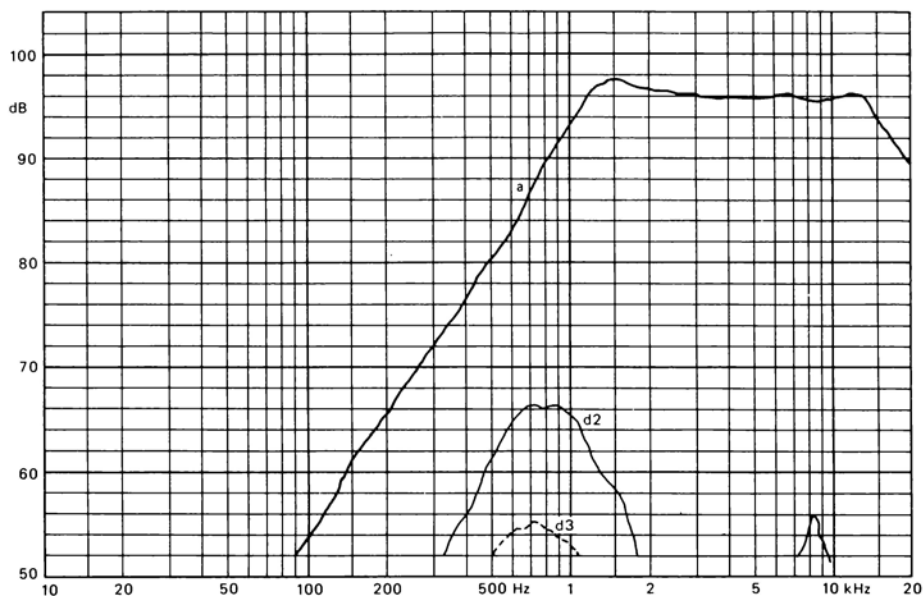


Figura 2.44 — Curva a: pressione acustica misurata in camera anecoica; curve d2 e d3: distorsione di seconda e terza armonica.

2.a parte

Nella prima parte abbiamo trattato il funzionamento dell'altoparlante a bobina mobile funzionante liberamente, cioè non montato in alcuno schermo. Discuteremo ora il comportamento dell'altoparlante chiuso in un box ermetico, l'uso di due o più altoparlanti in un sistema multivia e il progetto della rete di cross-over richiesta da tale sistema.

PROGETTO DELLA CASSA A CHIUSURA ERMETICA

3.1. LO SCHERMO INFINITO

Consideriamo un altoparlante montato in un piccolo schermo. Quando il cono si muove in avanti l'aria posta di fronte ad esso viene compressa mentre l'aria posteriore si espande; ciò si può vedere in figura 3.1. L'aria compressa va anche al di là del bordo dello schermo; l'impedenza dell'aria (per un altoparlante non montato) è bassa e quindi la pressione sonora irradiata è ridotta. L'effetto di riduzione della pressione sonora è più pronunciato quando la distanza che l'onda sonora deve compiere per andare dalla parte anteriore a quella posteriore dell'altoparlante è pari a mezza lunghezza d'onda. A 40 Hz, per esempio, con l'altoparlante montato al centro, lo schermo, per prevenire la cancellazione del suono, dovrebbe essere di 4,25 metri quadri minimi. Aumentando le dimensioni dello schermo migliora l'isolamento tra le due faccie dell'altoparlante. Un isolamento completo è ottenibile con uno schermo infinitamente grande; il che è ovviamente una soluzione impossibile. Un completo isolamento può essere ottenuto, comunque, piegando lo schermo attorno il retro dell'altoparlante in modo da formare una cassa chiusa in cui la radiazione posteriore è completamente soppressa.

Il box chiuso è conosciuto con diversi nomi:

- schermo infinito (definizione non appropriata)
- cassa a schermo chiuso
- sospensione acustica
- chiusura ermetica.

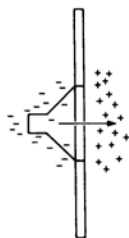
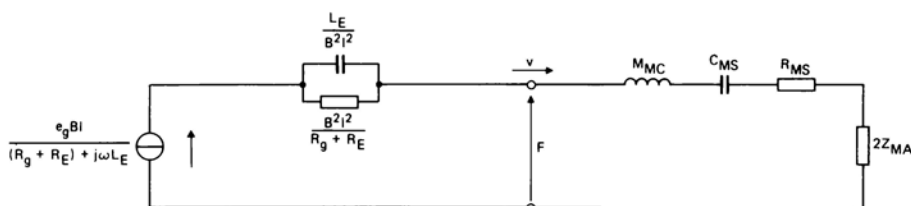


Figura 3.1 — Altoparlante montato su una piccola tavola schermante soggetto a corto circuito acustico alle basse frequenze.

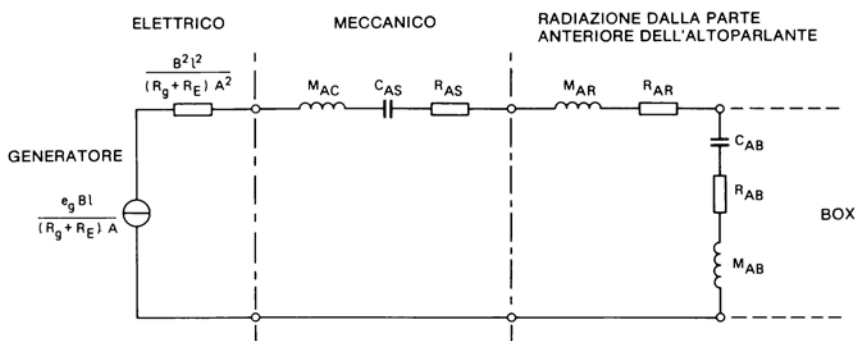
Il termine "chiusura ermetica" pone in rilievo la più importante caratteristica della sua costruzione, ed è il termine usato in questo articolo. Benchè la chiusura ermetica e lo schermo infinito sono spesso considerati sinonimi, essi hanno tra loro una grande differenza di significato. L'aria nella chiusura ermetica è costretta e quindi agisce come una molla sui movimenti del cono in dentro e in fuori. Questo non avviene nel caso dello schermo infinito.

3.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SISTEMA A CHIUSURA ERMETICA

Vediamo ora cosa succede quando inseriamo un altoparlante in un box ermetico. Se il volume interno della cassa è molto grande, lo spostamento dell'aria dovuto al movimento del cono dell'altoparlante sarà trascurabile rispetto al volume d'aria presente nel box.



(a)



(b)

Figura 3.2 — (a) Circuito equivalente di un altoparlante a bobina mobile; (b) circuito equivalente, per le frequenze basse, dello stesso altoparlante montato in cassa chiusa ermeticamente - il cono è considerato un pistone rigido. Questo circuito è valido fino a circa 500 Hz. Radiation from front of speaker = radiazione dalla parte anteriore dell'altoparlante.

Se invece il volume è piccolo, il movimento del cono darà luogo a una variazione sensibile della pressione all'interno della cassa.

Otterremo allora una marcata differenza di funzionamento rispetto al caso precedente. L'aria contenuta nella cassa ermetica agisce aumentando la rigidità del cono dell'altoparlante; questo effetto è più pronunciato per volumi piccoli. In accordo con l'equazione del primo articolo (paragrafo 1.3.4.) la cedevolezza acustica del volume chiuso V_B è $C_{AB} = V_B / \gamma P_0$.

Poichè alle basse frequenze il cono si comporta come un pistone rigido, noi possiamo disegnare di nuovo il circuito equivalente mostrato in figura 3.2 (a) ottenendo trasferendo tutti gli elementi nella parte acustica del circuito. Gli elementi meccanici discussi precedentemente (paragrafo 2.4) vengono divisi per il quadrato dell'area effettiva del cono in modo da ottenere l'impedenza acustica in ohm acustici m.k.s. L'impedenza elettrica dovuta all'induttanza della bobina mobile (L_E) può essere trascurata al di sotto dei 500 Hz. La doppia impedenza di radiazione $2Z_{MA}$ in figura 3.2 (a) deve essere rimpiazzata da due impedenze: l'impedenza di radiazione davanti alla cassa (M_{AR} , R_{AR}) e l'impedenza del carico acustico dovuto alla cassa chiusa (C_{AB} , R_{AB} , M_{AB}). Il nuovo circuito equivalente è illustrato in figura 3.2 (b). Consideriamo ora gli elementi che lo compongono.

E_g rappresenta la tensione di uscita dell'amplificatore senza carico, B è la densità di flusso nel traferro in tesla (1 tesla = 1 Wb/m² = 10⁴ gauss), e l è la lunghezza del filo della bobina mobile in metri. R_E è la resistenza in continua della bobina mobile in ohm e R_g è l'impedenza d'uscita dell'amplificatore in ohm. (R_g al denominatore rende conto degli effetti dell'impedenza di uscita dell'amplificatore sullo smorzamento del sistema). L'area effettiva del cono in m² è rappresentata da A . La parte meccanica dell'altoparlante è stata ridotta a 3 termini. Precedentemente avevamo usato M_{MC} per rappresentare la massa meccanica della bobina e del cono. Dividendo M_{MC} per A^2 noi convertiamo questa quantità in una massa acustica, M_{AC} , espressa in kg/m⁴. Similmente, R_{MS} in figura 3.2 (a) ora diventa R_{AS} (la resistenza acustica del sistema di sospensioni in m⁵/N). Tutte queste quantità possono essere determinate direttamente in laboratorio come vedremo in seguito. Consideriamo ora la restante parte del circuito di figura 3.2 (b). M_{AR} è la resistenza di radiazione acustica in ohm acustici m.k.s. I valori di queste quantità sono in relazione alle dimensioni dello schermo, non al volume delle casse, perchè rappresentano la radiazione interiore. C_{AB} rappresenta la cedevolezza acustica in m⁵/N e R_{AB} rappresenta la resistenza acustica nel box chiuso. Quest'ultimo termine è misurato in ohm acustici m.k.s. e dipende dall'assorbimento entro la cassa. M_{AB} è la massa acustica dell'aria posta dietro al cono. La figura 3.2 (b) può essere ulteriormente semplificata nella forma di figura 3.3, che è un semplice circuito-serie con frequenze di risonanza f_o' data da

$$f_o' = \frac{1}{2 \pi \sqrt{M_A C_A}} \text{ Hz} \quad (3.1)$$

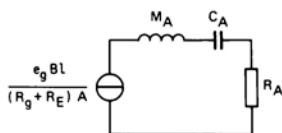
dove

$$M_A = M_{AC} + M_{AR} + M_{AB} \text{ Kg/m}^4 \quad (3.2)$$

e

$$C_A = \frac{C_{AS} C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} \text{ m}^5/\text{N}. \quad (3.3)$$

I simboli f_o e ω_o sono stati adottati, nella prima parte della serie di articoli, per indicare la frequenza di risonanza di un altoparlante in aria libera (senza cassa o schermo). I simboli f_o' e ω_o' corrispondono alla frequenza di risonanza dell'altoparlante montato in un box chiuso.



$$C_A = \frac{C_{AS} C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} \quad M_A = M_{AC} + M_{AR} + M_{AB}$$

$$R_A = \frac{B^2 I^2}{(R_E + R_E) A^2} + R_{AS} + R_{AR} + R_{AB}$$

Figura 3.3 — Versione semplificata della figura 3.2 (b).

3.3. DETERMINAZIONE DEI VALORI DELLA MASSA E DELLA CEDEVOLZZA

3.3.1. Massa acustica.

L'equazione 3.1 è fondamentale nel progetto di un sistema in cassa ermetica. Si consideri per primo la quantità M_A rappresentante la massa acustica totale. Questa quantità è la somma di M_{AC} , che è la massa acustica della bobina mobile e del cono, M_{AR} , che è la massa acustica del carico d'aria della faccia frontale del cono e M_{AB} , massa acustica del carico d'aria della parte posteriore del cono. Queste quantità sono definite da:

$$M_{AC} = \frac{M_{MC}}{A^2} \text{ kg/m}^4 \quad (3.4)$$

dove M_{MC} è la massa meccanica della bobina mobile in kg e A è l'area effettiva del cono in m^2 .

$$M_{AR} = \frac{M_{MR}}{A^2} \text{ kg/m}^4 \quad (3.5)$$

dove M_{AR} è la massa meccanica del carico d'aria sulla parte anteriore del cono in kg.

$$M_{AB} = \frac{M_{MB}}{A^2} \text{ kg/m}^4 \quad (3.6)$$

dove M_{MB} è la massa meccanica dell'aria posta dietro al cono in Kg. Si noti che le quantità acustiche possono essere dedotte dalle loro corrispondenti meccaniche.

Tabella 3.1 — Determinazione della massa della bobina mobile e del cono

| grandezze acustiche | |
|---|--|
| 1. | $f_o = \frac{1}{2 \pi \sqrt{(M_{AC} + M'_{AR}) C_A}} \quad (3.7)$ <p>Dove: M_{AC} = massa delle parti in movimento in kg/m^4 M'_{AR} = massa totale del carico d'aria per entrambe le facce del cono in kg/m^4 C_A = cedevolezza delle sospensioni in m^5/N</p> |
| 2. massa aggiunta | $M_{AX} (= \frac{\text{mass in kg}}{A^2} \text{ kg/m}^4).$ |
| 3. nuova frequenza di risonanza | $f_m = \frac{1}{2 \pi \sqrt{(M_{AC} + M'_{AR} + M_{AX}) C_A}} \quad (3.8)$ |
| 4. dividendo l'equazione (3.7) con la (3.8) e manipolando | $M_{AC} = \frac{M_{AX} f_m^2}{f_o^2 - f_m^2} - M'_{AR}, \quad (3.9)$ <p>Dove:</p> $M'_{AR} \approx \frac{2 \times 0,16}{r} \text{ kg/m}^4. \quad (3.10)$ |

grandezze meccaniche

$$f_o = \frac{1}{2 \pi \sqrt{(M_{MC} + M'_{MR}) C_M}} \quad , \quad (3.11)$$

Dove:

M_{MC} = massa del sistema mobile in kg

M'_{MR} = carico d'aria totale per entrambe le facce del cono in kg

C_M = cedevolezza delle sospensioni in m/N

massa aggiunta

m kg.

$$f_m = \frac{1}{2 \pi \sqrt{(M_{MC} + M'_{MR} + m) C_M}} \quad . \quad (3.12)$$

dividendo l'equazione (3.11) con la (3.12) e manipolando

$$M_{MC} = \frac{m f_m^2}{f_o^2 - f_m^2} - M'_{MR} \quad , \quad (3.13)$$

Dove:

$$M'_{MR} \approx 2 \times 1,58 \, r^3 \, \text{kg}. \quad (3.14)$$

Nota: M'_{AR} e M'_{MR} sono la somma dei valori frontale e posteriore dati dalle equazioni (3.15) e (3.16) in tabella 3.2 e r è il raggio del cono in metri.

La procedura è la seguente: si misura la frequenza di risonanza dell'altoparlante in aria libera; si pone successivamente una massa di pochi grammi sul cono e si misura la nuova frequenza di risonanza, che sarà più bassa della precedente. La massa totale può quindi essere calcolata e, sottraendo la massa dal carico d'aria è facilmente determinabile la massa delle parti in movimento. Il metodo di calcolo è dato in tabella 3.1.

Le equazioni dalle (3.7) alle (3.10) mostrano la procedura usando quantità acustiche, mentre le equazioni dalla (3.11) alla (3.14) usano quantità meccaniche, con le quali la maggior parte dei lettori ha una maggiore familiarità. La differenza essenziale tra le quantità acustiche e le meccaniche è che le masse acustiche sono ugua-

Tabella 3.2 — Determinazione della massa del carico d'aria

| montaggio | anteriore | | posteriore | |
|---|---|----------------------------|---|----------------------------|
| | acustica M_{AR} (kg/m ⁴) | meccanica M_{MR} (kg) | acustica M_{AB} (kg/m ⁴) | meccanica M_{MB} (kg) |
| non montato, spazio libero o camera anecoica | $\frac{0,16}{r}$ (3.15) | $1,58 r^3$ (3.16) | $\frac{0,16}{r}$ (3.15) | $1,58 r^3$ (3.16) |
| schermo infinito | $\frac{0,32}{r}$ (3.17) | $3,15 r^3$ (3.18) | $\frac{0,32}{r}$ (3.17) | $3,15 r^3$ (3.18) |
| piccola cassa ermetica | $\frac{0,23}{r}$ (3.19) | $2,27 r^3$ (3.20) | $\frac{0,375 k}{r}$ (3.21) | $3,75 k r^3$ (3.22) |

r = raggio effettivo del cono in m, k = fattore di caricamento di massa (vedi figura 3.5). I numeri tra parentesi si riferiscono alle formule del testo.

li alle masse meccaniche divise per A^2 , e le cedevolezza meccaniche sono uguali alle cedevolezza acustiche moltiplicate per A^2 .

Le loro unità di misura differiscono quindi di un fattore pari a m^4 .

3.3.2. Calcolo della massa del carico d'aria

Nel calcolo delle caratteristiche di un altoparlante occorre tenere conto della massa dell'aria spostata dal cono. La sua inerzia influenza il segnale elettrico che alimenta l'altoparlante. Quando il box è molto grande l'impedenza di radiazione anteriore è quella di uno schermo infinito. Quando la cassa ha un volume inferiore a 220 litri il comportamento è quello di un pistone posto al termine di un lungo tubo. In questa serie di articoli tratteremo solo il caso di box piccoli, la discussione non tratterà il caso generale. In tabella 3.2 sono rappresentate le masse acustiche e meccaniche del carico d'aria sul cono.

A causa dell'influenza del box ermetico sulla radiazione del suono occorre tener conto delle relazioni tra l'area del cono e quella delle pareti della cassa. La tabella 3.2 riassume le equazioni che permettono di ottenere il carico d'aria in differenti condizioni.

Le masse meccaniche date in tabella 3.2 possono essere ottenute direttamente dalla figura 3.4. Le espressioni date nella stessa tabella per il carico d'aria sulla faccia posteriore del cono in un piccolo box ermeticamente chiuso contiene la costante k che è proporzionale al rapporto tra l'area effettiva del cono e l'area delle pareti della cassa. Il valore di k in funzione delle aree relative è tracciato nel grafico di figura 3.5.

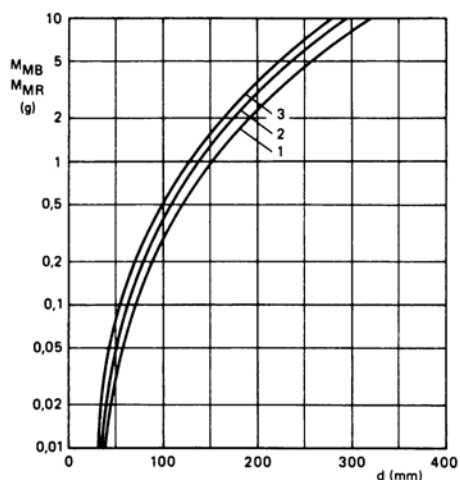


Figura 3.4 — Variazione della massa del carico d'aria su una faccia del cono in funzione del diametro effettivo dell'altoparlante.

Curva 1: box ermetico, faccia anteriore dell'altoparlante; curva 2: schermo infinito, faccia anteriore; curva 3: box ermetico, faccia posteriore dell'altoparlante (moltiplicato per k - vedi figura 3.5).

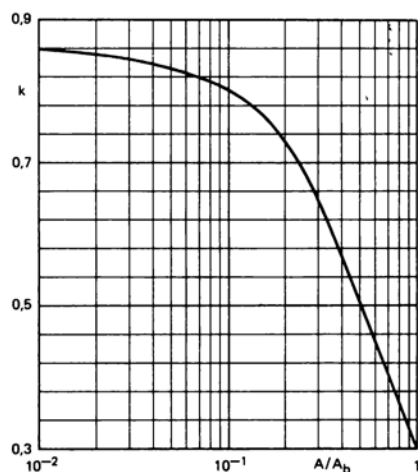


Figura 3.5 — Variazione del fattore k in funzione del rapporto A/A_b (area effettiva del cono/area della tavola schermante).

3.3.3. Cedevolezza della sospensione e del box

Consideriamo ora la cedevolezza di un sistema di sospensione per altoparlante. La cedevolezza acustica è data da:

$$C_{AS} = C_{MS} A^2 \text{ m}^5/\text{N} \quad (3.23)$$

dove C_{MS} la cedevolezza meccanica delle sospensioni in m/N e A è l'area effettiva del cono. La cedevolezza meccanica può essere facilmente determinata ponendo un piccolo peso sul cono con l'altoparlante disposto verticalmente e misurando lo spostamento del cono per mezzo di un micrometro:

$$C_{MS} = \frac{\text{spostamento (mm)}}{\text{massa applicata (g)} \cdot 9,8} \text{ m/N.} \quad (3.24)$$

Alternativamente, si può usare l'equazione (3.11) se sono note le masse M_{MC} e M'_{MR} :

$$C_{MS} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 (M_{MC} + M'_{MR})} \text{ m/N.} \quad (3.25)$$

la cedevolezza acustica del box è data da:

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma P_0} \text{ m}^5/\text{N}, \quad (3.26)$$

dove V_B è il volume dell'aria nella cassa in m^3 , P_0 è la pressione atmosferica normale (10^5 N/m^2) e γ (rapporto tra il calore specifico dell'aria a pressione costante e quello a volume costante) è 1,4 per una compressione adiabatica in una cassa rivestita internamente di materiale assorbente (non piena).

Le quantità acustiche possono essere convertite nelle corrispondenti meccaniche dividendo per la cedevolezza o moltiplicando le masse per A^2 . Prendendo l'equazione (3.26), otteniamo

$$C_{MB} = \frac{C_{AB}}{A^2} = \frac{V_B}{\gamma P_0 A^2} \text{ m/N}, \quad (3.27)$$

dove C_{MB} rappresenta la cedevolezza meccanica del box. Dalla legge dell'espansione e compressione adiabatica, ricaviamo l'espressione della velocità del suono

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}} \quad (3.28)$$

dove $\gamma P_o = \rho c^2$ e ρ è la densità. Sostituendo questo al posto di P_o nella (3.27), otteniamo

$$C_{MB} = \frac{V_B}{\rho c^2 A^2} \text{ m/N} \quad (3.29)$$

Da qui, si può ottenere la rigidezza della cassa:

$$S_B = \frac{\rho c^2 A^2}{V_B} \text{ N/m.} \quad (3.30)$$

Questa equazione mostra che la rigidezza non dipende solo dal volume del box ma anche dall'area effettiva del cono.

3.4. VALORE DEGLI ELEMENTI RESISTIVI

In figura 3.3 sono stati combinati i componenti resistivi di figura 3.2 in un singolo elemento:

$$R_A = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E) A^2} + R_{AS} + R_{AB} + R_{AR} \quad (3.31)$$

in ohm acustici m.k.s. Esaminiamo ora ogni termine di questa equazione.

Prima di tutto vediamo che queste sono quantità acustiche a causa del termine A^2 che appare al denominatore del primo termine.

Moltiplicando tutto per A^2 otteniamo:

$$R_M = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E)} + R_{MS} + R_{MB} + R_{MR} \quad (3.32)$$

che esprime l'equazione 3.31 in ohm meccanici m.k.s.

I valori dei termini dell'equazione (3.31) possono essere determinati direttamente mediante calcoli o, usando gli equivalenti termini meccanici, mediante misure. La resistenza di radiazione acustica R_{AR} per una piccola cassa chiusa è data da:

$$R_{AR} \approx \left(\frac{f}{10} \right)^2 \text{ ohm acustici m.k.s.} \quad (3.33)$$

dove la frequenza f è tale che $2 \pi r < \lambda$, cioè $kr < 1$. (r è il raggio del cono). La resistenza acustica della sospensione è data da:

$$R_{AS} = \frac{R_{MS}}{A^2} \text{ ohm acustici m.k.s.} \quad (3.34)$$

dove R_{MS} sarà trattata in seguito. La resistenza acustica del box, R_{AB} , è discussa nel prossimo paragrafo.

3.5. RISONANZE INTERNE DELLA CASSA

Quando la profondità della cassa eguaglia mezza lunghezza d'onda, viene eccitato il primo modo di vibrazione fondamentale. La reattanza del box è data da:

$$X_{AB} = \omega M_{AB} - \frac{1}{\omega C_{AB}} \quad (3.35)$$

Alla risonanza ωM_{AB} è maggiore di $1/\omega C_{AB}$; la reattanza X_{AB} diventa positiva e raggiunge un valore elevato. Questo ridurrà molto la potenza irradiata a meno che non si prendano delle precauzioni in modo da diminuire il valore di X_{AB} alla frequenza di risonanza.

La frequenza di risonanza in funzione della profondità della cassa è disegnata in figura 3.6. Per assorbire l'energia a queste e a tutte le altre frequenze più elevate, si pone del materiale acusticamente assorbente all'interno del box; i materiali più usati sono: lana di vetro, fibre di acetato, lana di roccia, feltro. Materiali plastici schiumosi come la schiuma poliuretano (non la qualità "aperta") sono troppo densi, nel senso che l'aria non può fluire attraverso essi. A frequenze basse, in una piccola cassa, è sufficiente, in genere, uno spessore di circa 25 mm. di materiale assorbente fissato alle faccie interne della cassa (sopra, sotto, dietro). L'impedenza che si presenta dietro al cono è

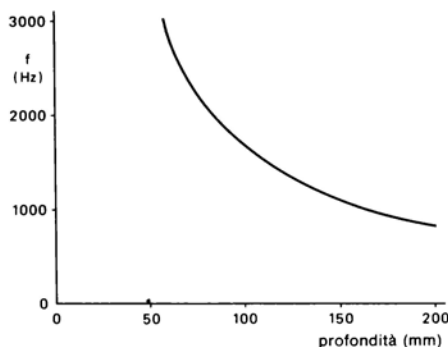


Figura 3.6 — Frequenza di risonanza fondamentale di un box in funzione della profondità dello stesso.
Depth = profondità.

$$Z_{AB} = R_{AB} + jX_{AB} \quad (3.36)$$

dove le componenti di X_{AB} sono definite dalle equazioni (3.21) e (3.26). Il termine R_{AB} rappresenta la resistenza acustica della cassa ed è data da:

$$R_{AB} = \frac{R_{AM}}{\omega^2 C_{AB}^2 R_{AM}^2 + 1 + \frac{V_B}{\gamma V_M} + \frac{V_B^2}{\gamma^2 V_M^2}} \quad (3.37)$$

$R_{AM} = R_l/3A_M = 1/3$ della resistenza di flusso totale del materiale fissato nel box diviso per l'area occupata dal materiale stesso. Per un materiale spesso 25 mm. e area A_M (in m^2), R_{AM} è $33/A_M$ ohm acustici m.k.s., V_B è il volume totale del box in metri cubi e V_M è il volume del materiale acustico applicato, sempre in metri cubi. L'equazione (3.37) è applicabile solo nel caso in cui il materiale acustico non occupa più del 10% del volume totale.

3.6. SMORZAMENTO E FATTORE DI MERITO Q

Abbiamo dimostrato che un altoparlante montato in un box ermetico può essere trattato come fosse una serie di componenti elettrici. Così possiamo scrivere:

$$Q_T = \frac{\omega \omega' M_A}{R_A} \quad (3.38)$$

dove Q_T è il fattore di merito totale del circuito, $\omega \omega' = 2 \pi f \omega'$, dove $f \omega'$ è la frequenza di risonanza e M_A e R_A sono definiti dalle equazioni (3.2) e (3.31) rispettivamente. In pratica il valore di Q_T può essere facilmente determinato misurando i punti a meno 3 dB sulla curva della velocità del cono in funzione della frequenza ai lati della frequenza di risonanza. Dall'equazione (2.6) (paragrafo 2.4) sappiamo che $e = Blv$ da cui Bl , per un particolare altoparlante, è una costante per cui la velocità v è proporzionale ad e . Usando il circuito di figura 3.7, la tensione ai capi della bobina mobile è data da

$$e = V_1 - iR_E = V_1 - \frac{V_2}{1000} R_E.$$

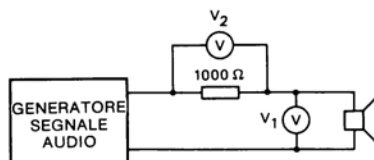


Figura 3.7 — Circuito per la determinazione della frequenza di risonanza e del fattore di merito Q.

Quindi i valori V_1 e V_2 possono essere determinati sperimentalmente. R_E è la resistenza in continua della bobina mobile. I valori di e possono essere tracciati su un grafico in funzione della frequenza.

Il valore di Q_T per un altoparlante pilotato a corrente costante è dato da

$$Q_T = \frac{f_0'}{\Delta f}$$

dove Δf è la larghezza di banda a meno 3 dB. La figura 3.8 illustra la risposta alla risonanza di un tipico altoparlante montato in un box ermetico per differenti valori di Q_T . Consideriamo ora l'effetto della resistenza di uscita dell'amplificatore R_g sul valore di Q_T . Nel metodo della determinazione di Q_T già visto, l'inserimento della resistenza da 1 K ohm in serie produce una corrente quasi costante che attraversa la bobina dell'altoparlante ($R_g \rightarrow \infty$). Così il primo termine dell'equazione (3.31) diventa

$$\frac{B^2 I^2}{(R_g + R_E) A^2} \approx 0.$$

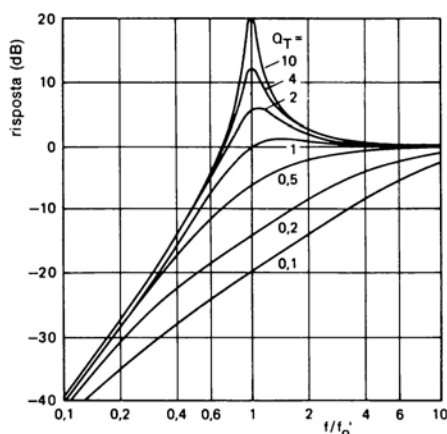


Figura 3.8 — Risponso in frequenza normalizzato di un tipico altoparlante per basse frequenze a differenti valori di Q_T .

In pratica, però, i moderni amplificatori a transistor hanno una resistenza di uscita molto bassa, tendente a zero, e il primo termine dell'equazione (3.31) diventa

$$\frac{B^2 I^2}{(R_g + R_E) A^2} \approx \frac{B^2 I^2}{R_E A^2}$$

Possiamo quindi distinguere due valori di Q_T :

- 1) Q_{T1} , che rappresenta il fattore di merito quando $R_g \rightarrow \infty$

$$Q_{T1} \approx \frac{\omega_0' M_A}{(R_{AB} + R_{AS} + R_{AR})} , \quad (3.39)$$

- 2) Q_{T2} , che rappresenta il fattore di merito quando $R_g \rightarrow 0$

$$Q_{T2} \approx \frac{\omega_0' M_A}{\frac{B^2 l^2}{R_E A^2} + R_{AB} + R_{AS} + R_{AR}} , \quad (3.40)$$

I reciproci di queste equazioni possono essere scritti nella forma

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q_{T2}} &= \frac{B^2 l^2}{\omega_0' M_A R_E A^2} + \frac{R_{AB} + R_{AS} + R_{AR}}{\omega_0' M_A} = \\ &= \frac{B^2 l^2}{\omega_0' M_A R_E A^2} + \frac{1}{Q_{T1}} . \end{aligned} \quad (3.41)$$

M_A è la massa acustica in kg/m^4 , e, moltiplicando per A^2 , possiamo esprimere questo in termini di M_M , la massa meccanica totale misurata in kg., dove

$$M_M = M_{MC} + M_{MR} + M_{MB} . \quad (3.42)$$

M_{MC} è la massa meccanica della bobina mobile e del cono, M_{MR} è data dall'equazione (3.20) e M_{MB} dalla (3.22).

Possiamo ora riscrivere l'equazione (3.41) sostituendo M_M al posto di M_A/A^2 ,

$$\frac{1}{Q_{T2}} = \frac{B^2 l^2}{\omega_0' M_M R_E} + \frac{1}{Q_{T1}} , \quad (3.43)$$

dove B è la densità di flusso magnetico in tesla e l è la lunghezza del filo della bobina mobile in metri. Il primo termine nella parte destra dell'equazione (3.43) rappresenta lo smorzamento dovuto alla resistenza della bobina mobile ed al sistema magnetico. Chiamando questo termine $1/Q_E$, possiamo scrivere:

$$\frac{1}{Q_{T2}} = \frac{1}{Q_E} + \frac{1}{Q_{T1}} . \quad (\text{vedi eq. (2.24) par. 2.7})$$

L'importanza di questa equazione deve essere messa in rilievo.

La risposta in frequenza di un altoparlante è sempre ottenuta usando una sorgente a tensione costante, essa è quindi paragonabile ai risultati ottenibili con l'altoparlante alimentato da un amplificatore con bassa resistenza d'uscita. Tali curve sono quindi differenti dalle stesse fatte usando una sorgente a corrente costante (figura 3.7) ed il confronto dei risultati ottenuti diventa molto difficoltoso. Dall'equazione (3.40) è evidente che, con un dato altoparlante, ci sono solo due possibilità di alterare Q_T : o modificando il box per far variare il valore di M_A tramite la variazione del valore di k (equazione 2.21) oppure variando la componente resistiva R_{AB} , R_{AS} o R_{AR} .

La prima di queste, R_{AB} , è la resistenza acustica del box (vedi equazione (3.37)). R_{AS} , che è la resistenza acustica della sospensione e dipende dal tipo di altoparlante. R_{AR} , la resistenza di radiazione, è funzione della frequenza (vedi equazione (3.33)). Quindi noi possiamo controllare Q_T , trascurando la resistenza di uscita dell'amplificatore, mediante la variazione di R_{AB} ottenuta modificando il valore di R_{AM} , (equazione (3.37)).

Abbiamo visto il risultato dell'equazione (3.37) nel caso di uno spessore di materiale assorbente pari a 25 mm.; (l'equazione generale è difficile da usare). È ovvio che non possiamo aumentare l'area del rivestimento di materiale fono assorbente una volta che ogni parte delle pareti interne sono state coperte.

Il seguente passo è quindi quello di imbottire il box con materiale fono assorbente; vediamo il problema da un punto di vista più semplice. Riscriviamo l'equazione (3.26):

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma \cdot P_0} \cdot$$

La cedevolezza acustica del box, C_{AB} , è inversamente proporzionale a γ . Per processi adiabatici γ vale 1,4 a pressione e temperatura normale. Cosa succede quando il box è pieno di materiale smorzante?

Se lo spazio di aria è completamente pieno di materiale soffice e leggero, la compressione e l'espansione diventano isoterme. L'altoparlante genera energia nel box che il materiale converte in calore.

Questa situazione porta ad un sovrasmorzamento alle frequenze più basse della risposta in frequenza caratteristica. In condizioni isoterme la velocità del suono diminuisce passando da 344 m/s a 292 m/s e quindi si modificano i risultati delle espressioni dove compare c .

Il fatto che il valore di γ nelle equazioni (3.26) e (3.27) non è 1,4 ma 1 ci dice che il riempimento del box ha lo stesso effetto sulla cedevolezza di un aumento del 40% del volume. Il metodo usato praticamente per la progettazione di casse acustiche ermetiche per sistemi di altoparlanti è quello di seguire prima metodi analitici basati su punti certi e poi operare ritoccando il riempimento totale o parziale del box con materiale fono assorbente per ottenere le caratteristiche desiderate. Quindi l'ottenimento del Q_T voluto è, oltre che una questione di calcolo, anche un fatto di esperienza. Il valore di γ sarà solitamente compreso tra 1 e 1,4. Il lettore intenzionato alla costruzione di casse acustiche svilupperà senza dubbio delle regole empiriche

di progetto; dovrà però tenere sempre presente che il materiale assorbente non deve influire radicalmente sul volume del box. Una difficoltà che incontra spesso il progettista è la decisione attorno al valore di Q_T da raggiungere.

Non ci sono basi analitiche per tale scelta. I valori più usati, compresi tra 0,5 e 1,4, si possono dedurre dalla letteratura in merito. Nulla vieta comunque di realizzare sistemi di altoparlanti con un Q_T di valore più elevato, che tendono a "risuonare" o sistemi più "tranquilli" con Q_T basso. Nell'ultimo caso, la probabilità di sottosmorzamento è tollerabile. Nel primo caso, un alto valore di Q_T può dare buoni risultati solo raramente, in quanto è facile che ad alti livelli sonori il sistema non sia più in grado di trattare correttamente i transienti. Per una soddisfacente risposta ai transienti, si suggerisce il seguente valore di Q_T :

$$Q_T < \frac{f_0'}{30} \quad (3.44)$$

Stabilire di quanto Q_T deve essere inferiore a $f_0'/30$ è compito del progettista; tenendo anche conto che in alcuni sistemi HI-FI, sono applicati fattori anche più elevati di questi. Ogni realizzazione, su questa questione, sviluppa una propria filosofia. Come i pianoforti, i sistemi di altoparlanti hanno le loro proprie qualità tonali. Alla fin fine, per valutare i risultati, si devono sempre e comunque adoperare un paio di orecchie e una mente aperta. Quando i bassi diventano "costretti" e sovrasmorzati occorre rimuovere del materiale assorbente dal box. La situazione più corretta si ha quando i bassi sono "rilassati" e ampi, ma non "disordinati".

3.7. EFFETTO DELLA CEDEVOLZZA DEL BOX SULLA FREQUENZA DI RISONANZA

Scriviamo l'espressione che dà la frequenza di risonanza di un altoparlante, non montato in box, in camera anecoica:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi C_{AS} \sqrt{(M_{AC} + 2 M_{AR})}} \quad (3.45)$$

dove M_{AC} è la massa acustica del sistema vibrante. M_{AR} è la massa acustica del carico d'aria su ogni faccia del cono e C_{AS} è la cedevolezza acustica della sospensione definita dall'equazione (3.23).

Quando prendiamo lo stesso altoparlante e lo montiamo in un box chiuso ermeticamente, l'equazione (3.45) è modificata dalla massa acustica del carico d'aria e dalla cedevolezza acustica dovute al box. Riferendoci alla figura 3.2, possiamo riscrivere l'equazione (3.45) nella forma:

$$f_0' = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{C_{AS} + C_{AB}}{C_{AS} C_{AB} (M_{AC} + M'_{AR} + M_{AB})}} \quad (3.46)$$

dove M'_{AR} è il nuovo valore del carico d'aria di fronte al cono dell'altoparlante dato dall'equazione (3.19), M_{AB} è la massa acustica del carico d'aria del retro del cono, e C_{AB} è la cedevolezza del box data dall'equazione (3.26).

Consideriamo i rapporti delle equazioni (3.45) e (3.46), possiamo ora determinare la variazione della frequenza di risonanza dovuta all'effetto della cassa.

$$\frac{f_0'}{f_0} = \sqrt{\left\{ \left(1 + \frac{C_{AS}}{C_{AB}} \right) \frac{M_{AC} + 2 M_{AR}}{M_{AC} + M'_{AR} + M_{AB}} \right\}} \quad (3.47)$$

Poichè $M'_{AR} \approx 1,4 M_{AR}$ possiamo scrivere l'equazione (3.47) nella forma

$$\begin{aligned} \frac{f_0'}{f_0} &= \sqrt{\left\{ \left(1 + \frac{C_{AS}}{C_{AB}} \right) \times \frac{M_{AC} + M'_{AR} + 0,6 M_{AR} + M_{AB} - M_{AB}}{M_{AC} + M'_{AR} + M_{AB}} \right\}} = \\ &= \sqrt{\left\{ \left(1 + \frac{C_{AS}}{C_{AB}} \right) \times \left(1 + \frac{0,6 M_{AR} - M_{AB}}{M_{AC} + M'_{AR} + M_{AB}} \right) \right\}} \quad (3.48) \end{aligned}$$

Esaminiamo ora i valori della massa acustica. Dall'equazione (3.15) abbiamo:

$$2 M_{AR} = \frac{2 \times 0,16}{r} = \frac{0,32}{r}, \text{ dalla equazione (3.19) } M'_{AR} = \frac{0,23}{r}$$

e dalla equazione (3.21)

$$M_{AB} = \frac{0,375 k}{r}.$$

Il valore di k nell'equazione (3.21) dipende dall'area dello schermo occupata dall'altoparlante. Se l'area dell'altoparlante è circa 1/3 di quella dello schermo, k vale circa 0,65 (vedi figura 3.5). In questo caso avremo

$$M_{AB} \approx 0,24/r.$$

Dunque, se l'altoparlante occupa 1/3 o meno dell'area dello schermo, possiamo scrivere, al posto delle (3.48), la seguente formula approssimata:

$$\frac{f_0'}{f_0} \approx \sqrt{\left\{ 0,87 \left(1 + \frac{C_{AS}}{C_{AB}} \right) \right\}}, \quad (3.49)$$

che rappresenta il rapporto tra la frequenza di risonanza dell'altoparlante nella cassa e quella nello spazio libero. Non ci sono differenze nell'usare, per queste espressioni, unità meccaniche o elettriche perché quello che interessa sono i loro rapporti. Per maggior semplicità, possiamo riferirci alla rigidità riscrivendo l'equazione (3.49) nella forma:

$$\frac{f_0'}{f_0} \approx \sqrt{\left\{ 0,87 \left(1 + \frac{S_b}{S_s} \right) \right\}}, \quad (3.50)$$

dove S_b è il reciproco della cedevolezza del box data dall'equazione (3.29),

$$S_b = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot A^2}{V_B} \quad \text{N/m} \quad (3.51)$$

e S_s è la rigidità delle sospensioni dell'altoparlante. La figura 3.9 mostra le variazioni di f_0'/f_0 in funzione del rapporto S_b/S_s .

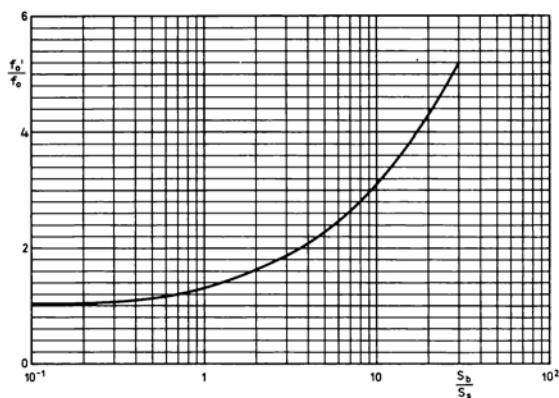


Figura 3.9 — Variazione della frequenza di risonanza in funzione del rapporto tra la cedevolezza dell'altoparlante e del box.

Dalla (3.51) si può ricavare il volume del box necessario per avere una determinata cedevolezza C_{MS} o C_{AS} :

$$V_B = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot A^2}{S_b} = \rho \cdot c^2 \cdot A^2 \cdot C_{MS} = \rho \cdot c^2 \cdot C_{AS} \quad (3.51)'$$

3.8. CONSIDERAZIONI SULLA POTENZA

3.8.1. Pressione sonora irradiata

Il livello di pressione sonora (SPL) è definito da:

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.52)$$

dove P è la pressione misurata e P_{ref} , la pressione sonora di riferimento, è $2 \times 10^{-4} \mu\text{bar}$ ($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}$). Il livello di potenza acustica (PWL) della sorgente del suono, è dato da:

$$\text{PWL} = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.53)$$

dove W è la potenza acustica in watt, e W_{ref} è 10^{-12} watt. Così una sorgente che irradia un watt acustico dà luogo ad un livello di potenza acustica pari a 120 dB. Alle basse frequenze l'altoparlante agisce come una sorgente di suono sferica. Vogliamo ora calcolare i livelli sonori che un altoparlante deve generare in una stanza d'ascolto specifica. Consideriamo in particolare il caso, comune, di un impianto stereo in una stanza di piccole dimensioni. Supponiamo che il suono sia creato dagli altoparlanti posizionati nell'angolo. Possiamo dimostrare che il livello di pressione sonora nel campo vicino chiuso dalle pareti è dato da:

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{A_w} + \frac{4}{R} \right) \quad (3.54)$$

dove A_w è l'area della parete irradiante (quella dietro ai diffusori) in m^2 , $R = \alpha A / (1 - \alpha)$ è l'area della superficie totale della stanza in m^2 e α è il coefficiente di assorbimento medio, mediamente pari a circa 0,15. Consideriamo una stanza lunga 5 m, larga 4 e alta 3. Nel primo caso metteremo gli altoparlanti all'estremità della stanza e calcoleremo la potenza richiesta per produrre un livello di pressione sonora di 90 dB all'interno della stanza.

$$A = 94 \text{ m}^2 \quad R = (0,15 \times 94)/0,85 = 16,6 \text{ m}^2 \quad A_w = 12 \text{ m}^2$$

dunque

$$\frac{1}{A_w} + \frac{4}{R} = \frac{1}{12} + \frac{4}{16,6} = 0,324 \text{ e } 10 \log_{10} \left(\frac{1}{A_w} + \frac{4}{R} \right) = -4,9$$

dall'equazione (3.53)

$$PWL = 10 \log_{10} W + 120 \text{ dB} \quad (3.55)$$

e, sostituendo questo nella (3.54), otteniamo:

$$SPL = 10 \log_{10} W + 120 - 4,9 \text{ dB}$$

così

$$10 \log_{10} W = SPL - 120 + 4,9 \text{ dB} = 90 - 120 + 4,9 = -25,1$$

$$\log_{10} W = 2,51$$

$$W = 3,09 \text{ mW.}$$

Dunque, per ottenere una pressione sonora di 90 dB all'interno della stanza, occorrono circa 3 mW di potenza acustica. Se spostiamo gli altoparlanti lungo le pareti della stanza la potenza acustica aumenta a 3,16 mW, perché deve essere scoperta una maggiore area della parete di radiazione. Ora, se la circonferenza del cono è minore della lunghezza d'onda del suono riprodotto, il sistema di altoparlanti può essere trattato come se fosse una sorgente sferica di suono. La potenza sonora P alla distanza r dal box in campo libero è data da:

$$P = \frac{f \rho U_c}{2r} \text{ N/m}^2, \quad (3.56)$$

dove f è la frequenza in Hz e U_c è la velocità di volume r.m.s. del cono in m^3/s . Alle basse frequenze, sotto la risonanza, dove l'altoparlante è sotto il controllo di massa, possiamo definire la velocità di volume di riferimento $U_{c \text{ ref}}$ mediante l'espressione:

$$U_{c \text{ ref}} = \frac{e_g B l}{(R_g + R_E) 2 \pi A f M_A} \quad (3.57)$$

da cui la pressione sonora di riferimento P_{ref} è

$$P_{\text{ref}} = \frac{e_g B l}{(R_g + R_E) 4 \pi r A M_A}, \quad (3.58)$$

r è la distanza dell'altoparlante in m, A è l'area effettiva del cono in m^2 e M_A è quel-

la data dall'equazione (3.2). Possiamo ora determinare l'attuale velocità di volume U_c dal circuito equivalente di figura 3.2:

$$U_c = \frac{e_g B l}{A (R_g + R_E) \sqrt{\{ R_A^2 + (\omega M_A - 1/\omega C_A)^2 \}}}$$

dove

$$(\omega M_A - 1/\omega C_A)^2 = \omega \omega' M_A^2 \left(\frac{\omega}{\omega \omega'} - \frac{\omega \omega'}{\omega} \right)^2$$

e, dall'equazione (3.1)

$$\omega \omega'^2 = \frac{1}{M_A C_A} .$$

Inoltre, dall'equazione (3.38):

$$Q_T = \frac{\omega \omega' M_A}{R_A} ,$$

così si può scrivere:

$$U_c = \frac{e_g B l}{(R_g + R_E) \omega \omega' A M_A \sqrt{\left\{ \frac{1}{Q_T^2} + \left(\frac{\omega}{\omega \omega'} - \frac{\omega \omega'}{\omega} \right)^2 \right\}}} \quad (3.59)$$

Sostituendo l'equazione (3.59) nella (3.56) e dividendo per la (3.58) possiamo ottenere la seguente espressione che dà il rapporto tra la pressione sonora irradiata e quella di riferimento:

$$20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20 \log_{10} \frac{\omega}{\omega \omega'} - 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{Q_T^2} + \left(\frac{\omega}{\omega \omega'} - \frac{\omega \omega'}{\omega} \right)^2 \right\} \quad (3.60)$$

dove ω è la frequenza per la quale si è calcolata la pressione sonora. Quando le misure sono fatte usando un microfono posto a una data distanza davanti all'altoparlante, il responso caratteristico segue l'equazione (3.60). Il livello di riferimento, se è richiesto l'effettivo valore di pressione, deve sempre essere enunciato. Un'importante caratteristica illustrata dall'equazione (3.60) è che il livello di pressione sonora alla risonanza differisce dalla pressione sonora di riferimento oltre la risonanza di:

$$20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = - 10 \log_{10} \frac{1}{Q_T^2} = 20 \log_{10} Q_T. \quad (3.61)$$

3.8.2. Potenza nominale

La potenza nominale è la massima potenza continua che l'altoparlante è in grado di trattare. Essa non deve essere confusa con la potenza musicale, descritta nel paragrafo 3.8.6., che è la potenza sopportabile in regime impulsivo, rappresentante il normale lavoro di un altoparlante che riproduce musica o parlato.

La potenza nominale è misurata applicando una tensione di rumore ai terminali dell'altoparlante e misurando la tensione in r.m.s. ai capi della bobina mobile. La tensione di picco del rumore è clippata ad un livello uguale al doppio della tensione r.m.s..

L'altoparlante deve essere capace di resistere al segnale per cento ore continuamente e mantenere le sue specifiche anche dopo il test (eccetto per la frequenza di risonanza che può diminuire). La massima potenza applicabile è definita da $PHC_1 = V^2/R$ dove R è l'impedenza dell'altoparlante dichiarata dal costruttore. Lo stesso principio si applica ad un sistema multivia, ma in quel caso la potenza nominale, PHC_1 , può essere definita per i singoli altoparlanti così come per il sistema totale, PHC_2 : $PHC_2 = V_1^2/Z$ e $PHC_1 = V_2^2/Z$, dove V_1 è la tensione di prova applicata al filtro cross-over e V_2 è la tensione ai capi dell'altoparlante (vedi figura 3.10). È possibile costruire un sistema di altoparlanti in cui ogni altoparlante è capace di sopportare la potenza nominale dichiarata per il sistema totale. Questo, però, sarebbe costoso, quindi gli altoparlanti per le alte frequenze sono comunemente in grado di sopportare una potenza inferiore a quella degli altoparlanti per le frequenze basse. Ricordando che la più elevata frequenza fondamentale prodotta da uno strumento musicale è a poco più di 4.000 Hz, è evidente che il tweeter, che non sarà soggetto a frequenze inferiori a 3.000 Hz, dovrà trattare principalmente le armoniche dei segnali fondamentali. Poiché le armoniche delle note hanno un'intensità molto più bassa della fondamentale, possiamo sicuramente usare altoparlanti per note medie e acute con una ridotta potenza nominale.

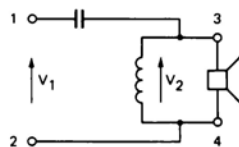


Figura 3.10 — Circuito di misura della potenza inviata dal sistema e di quella entrante nell'altoparlante.

Vogliamo ora stabilire il valore della massima potenza sopportabile da ogni altoparlante in un sistema che sia in grado di trattare correttamente tutte le situazioni musicali possibili.

Ci sono molte variabili in gioco, la più ovvia delle quali è la dipendenza dal tipo di suono che il diffusore deve riprodurre.

A causa di ciò bisogna tener presente un certo margine di sicurezza. Un grande numero di ricerche ha portato ad un diagramma di distribuzione di energia alle varie frequenze per vari tipi di musica che oggi è diventato uno standard (norma).

In Europa le norme IEC DIN definiscono lo spettro di rumore che è usato per provare altoparlanti e sistemi di altoparlanti. Esso è mostrato in figura 3.11. Come è ovvio per la maggior parte dei lettori, l'energia contenuta nella moderna musica pop ha una distribuzione spettrale differente di quella prodotta da un'orchestra di musica classica. La linea spessa in figura 3.11 è il nuovo standard raccomandato che tiene conto di tali differenze. La figura 3.12 è invece il risultato di studi effettuati su molte registrazioni. Tali curve possono essere usate per determinare approssimativamente la divisione della potenza totale (PHC₂) tra gli altoparlanti di un sistema multivia. Se, per esempio, consideriamo un sistema a due vie con frequenze d'incrocio a 1.200 Hz, il punto della curva a cui corrisponde la frequenza di 1.200 Hz corrisponde, sulle ordinate, al 75%. Questo indica che la divisione di energia tra il woofer e tweeter è circa 75 : 25.

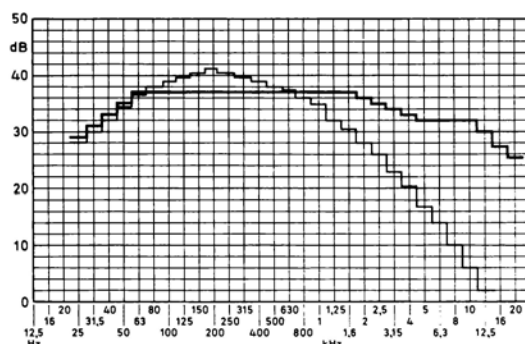


Figura 3.11 — Curva di rumore DIN 45500 (linea fine) usata per la misura e la caratterizzazione della potenza nominale. La curva alternativa IEC (linea spessa) è anch'essa presa comunemente in considerazione.

In un sistema dalla potenza di 20 W il woofer dovrebbe essere capace di sopportare almeno 15 W e il tweeter 5 W. Occorre poi tener conto di un certo margine di sicurezza in quanto il rapporto fra i contenuti energetici delle varie frequenze può essere modificato considerevolmente variando la posizione dei controlli di tono dell'amplificatore. La figura 3.12 deve quindi essere considerata un'utile guida per vedere, approssimativamente, i contenuti energetici delle varie bande di frequenza. Usandola per determinare la tipica distribuzione di potenza di un sistema a tre vie, pilotato da un amplificatore da 40 W, con frequenze di cross-over di 630 e 2.500 Hz,

otteniamo i seguenti valori minimi di potenza che devono sopportare i vari altoparlanti: 25,6 W per il woofer, 8,8 W il midrange e 5,6 W il tweeter. In conclusione, è forse necessario un avvertimento. A volte vengono commessi errori nel provare gli altoparlanti perché non si tiene conto della ridotta capacità di sopportare potenza degli altoparlanti per le frequenze acute. La risposta in frequenza si ottiene infatti sweepando in frequenza un segnale sinusoidale di ampiezza fissa applicato al sistema di altoparlanti. Se non si tiene conto della ridotta potenza sopportabile degli altoparlanti per le alte frequenze, questo tipo di misura può causare danni agli altoparlanti stessi.

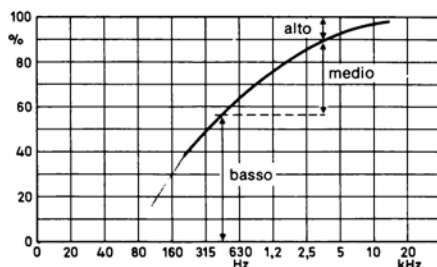


Figura 3.12 — Tipica distribuzione di potenza in un sistema multivia. La curva è ricavata da misure fatte su molte registrazioni musicali. È una curva tipica che può subire variazioni a causa del contenuto in frequenza del suono riprodotto dal sistema, dalle caratteristiche dell'amplificatore e dalla posizione dei controlli di tono.

3.8.3. Efficienza

La potenza acustica irradiata da entrambe le faccie del cono dell'altoparlante è

$$W = |v|^2 R_{MR} \quad (3.62)$$

dove v è la velocità del cono in m/s e R_{MR} è la resistenza di radiazione meccanica in ohm meccanici m.k.s..

Supponendo che la reattanza induttiva della bobina mobile sia trascurabile rispetto a $(R_g + R_E)$, la velocità della bobina mobile è data da:

$$v = \frac{e_g B l}{(R_g + R_E) (R_M + j X_M)} \quad (3.63)$$

in cui

$$R_M = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E)} + R_{MS} + 2 R_{MR} X_M = \omega M_{MD} + 2 X_{MR} - \frac{1}{\omega C_{MS}},$$

dove M_{MD} è la massa del diaframma, X_{MR} è la reattanza di radiazione meccanica e C_{MS} è la cedevolezza meccanica delle sospensioni. Elevando al quadrato il modulo di v e sostituendo nell'equazione (3.62) otteniamo:

$$W = \frac{2 e_g^2 B^2 l^2 R_{MR}}{(R_g + R_E)^2 (R_M^2 + X_M^2)} \quad (3.64)$$

La massima potenza ottenibile dell'amplificatore si ha quando la resistenza interna dello stesso è uguale alla resistenza in d.c. dell'altoparlante; essa è

$$W_E = \frac{e_g^2}{4 R_g} \quad (3.65)$$

Dividendo l'equazione (3.64) per la (3.65) e moltiplicando per 100 otteniamo l'efficienza dell'altoparlante in relazione alla massima potenza di uscita dell'amplificatore:

$$\eta = \frac{W}{W_E} \times 100 = \frac{800 B^2 l^2 R_g R_{MR}}{(R_g + R_E)^2 (R_M^2 + X_M^2)} \% \quad (3.66)$$

Questo è conosciuto come efficienza della potenza disponibile.

Per tracciare il grafico della risposta in frequenza senza rappresentare la potenza acustica effettivamente irradiata, è utile definire l'efficienza di riferimento. L'efficienza della potenza disponibile di riferimento, per entrambe le faccie del cono, è

$$\eta_{ref} = \frac{800 B^2 l^2 R_g R_{MR}}{\omega^2 (R_g + R_E)^2 (M_{MC} + 2 M_{MR})^2} \quad (3.67)$$

Alle basse frequenze

$$R_{MR} = \frac{\omega^2 A^2 \rho}{2 \pi c}$$

quindi, l'equazione (3.67) diventa:

$$\eta_{ref} = \frac{800 R_g B^2 l^2 A^2 \rho}{2 \pi c (R_g + R_E)^2 (M_{MC} + 2 M_{MR})^2} \quad (3.68)$$

Questo dà la risposta in frequenza caratteristica nella zona piatta oltre la risonanza. Il rapporto tra la risposta a frequenze medie e basse dato dall'equazione (3.66), dove la radiazione non è direzionale, e l'efficienza della potenza disponibile di riferimento è

$$\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} = \frac{\omega^2 (M_{MC} + 2 M_{MR})^2}{R_M^2 + X_M^2} \quad (3.69)$$

Una situazione interessante si ha alla risonanza, dove $X_M = 0$, e l'equazione (3.69) diventa

$$\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} = \frac{\omega_0^2 (M_{MC} + 2 M_{MR})^2}{R_M^2} = Q_T^2. \quad (3.70)$$

Così, se non conosciamo l'efficienza della potenza disponibile di riferimento, possiamo facilmente determinare l'efficienza alla risonanza, poichè dall'equazione (3.70)

$$\eta = \eta_{\text{ref}} \cdot Q_T^2. \quad (3.71)$$

I valori delle efficienze dati dalle equazioni (3.66) e (3.67) e (3.68) sono per entrambe le faccie dell'altoparlante; quindi per ottenere l'efficienza della sola radiazione anteriore occorre dividerle per due. Quando l'altoparlante è montato in una cassa acustica ermetica, l'effetto dell'impedenza della faccia posteriore modifica le precedenti equazioni. L'impedenza di radiazione dipende anche dalle dimensioni delle pareti della cassa. La cedevolezza del box, che dipende soprattutto dal suo volume, influenza anch'essa l'impedenza di radiazione della faccia posteriore. Se noi ci limitiamo ad una trattazione puramente matematica della potenza nominale e dell'efficienza, i risultati che otterremo sarebbero di difficile uso. Ricorreremo quindi a metodi approssimati che danno luogo a risultati sufficientemente accurati in tutti gli usi pratici. Nel caso in cui l'altoparlante sia pilotato da un amplificatore con $R_g = 0$, l'efficienza può essere definita da

$$\eta = \frac{W_A}{W_{in}}$$

dove $W_A = v^2 R_{MR}$, è la potenza acustica irradiata e $W_{in} = i^2 R_E$ è la potenza acustica applicata che viene dissipata dalla resistenza della bobina mobile. Oltre la frequenza di risonanza, la potenza acustica irradiata può essere espressa come

$$W_A = v^2 R_{MR} = \left(\frac{B l i}{\omega M_M} \right)^2 R_{MR}.$$

Per un grande box, R_{MR} può essere considerato lo stesso di quello di uno schermo infinito

$$R_{MR} = 1,57 \cdot \omega^2 \cdot r^4 \cdot \frac{\rho}{c}$$

da cui

$$\eta = \left(\frac{B l i}{\omega M_M} \right)^2 \frac{1,57 \omega^2 r^4 \rho}{c} \times \frac{1}{i^2 R_E} = \frac{1,57 B^2 l^2 r^4 \rho}{M_M^2 R_E c} \quad (3.72)$$

Dove $M_M = M_{MC} + M_{MR} + M_{MB}$ e la resistenza della bobina mobile è

$$R_E = \frac{\sigma l}{s}$$

dove σ = resistività specifica del filo, l è la lunghezza e s è l'area della sezione del filo. Inoltre, la massa della bobina mobile M_C , è data da

$$M_C = l \cdot s \cdot \beta$$

dove β è la densità del filo.

Per sostituzione avremo

$$\frac{l^2}{R_E c} = \frac{M_C}{\sigma \beta} \quad \text{da cui} \quad \eta = \frac{1,57 B^2 M_C r^4 \rho}{\beta M_{M2} \sigma} \quad (3.73)$$

3.8.4. Metodi di valutazione della potenza.

In Europa, per determinare le prestazioni degli altoparlanti, è conveniente adottare gli standard tedeschi (DIN) in quanto non esiste un'alternativa che tratti il problema in maniera soddisfacente.

In questo paragrafo svilupperemo il problema solo dal punto di vista dei sistemi di altoparlanti HI-FI. Accanto alla potenza nominale che abbiamo già trattato, ci sono due distinti livelli di potenza da considerare: - potenza operativa; - potenza musicale.

Essi hanno scopi diversi l'uno dall'altro e non sono in relazione diretta tra loro.

3.8.5. Potenza operativa

La potenza operativa è la potenza che occorre inviare all'ingresso del sistema in modo da produrre una pressione sonora di 12 ν b a 1 metro di distanza (o 4 ν b a 3

m). Prendendo $2 \times 10^{-4} \text{ } \nu_b$ come il livello di pressione sonora di riferimento abbiamo $12 \text{ } \nu_b \approx \text{SPL } 96 \text{ dB}$ ($4 \text{ } \nu_b \approx \text{SPL } 86 \text{ dB}$). Questa definizione semplificata stabilisce un riferimento per i prossimi calcoli. Per determinare la potenza operativa, la misura deve essere effettuata con l'altoparlante in condizione di campo libero (schermo infinito) e il livello medio di pressione sonora (sull'asse) tra 100 e 4000 Hz (o un'altra gamma di frequenze a seconda del tipo di altoparlante) deve essere di 96 dB a un metro di distanza. La potenza operativa è, naturalmente, in Watt elettrici ed è determinata semplicemente aumentando il segnale elettrico fino a quando non è generata la pressione sonora richiesta alla giusta distanza.

3.8.6. Potenza musicale

La potenza musicale è il picco di potenza che può essere applicato all'altoparlante o al sistema per brevi periodi (al max 2 secondi) senza alcuna distorsione udibile. Si impiega un segnale sinusoidale compreso tra 250 Hz fino al limite inferiore delle frequenze riproducibili. In generale il valore della potenza musicale è molto più elevato di quello della potenza nominale.

3.9. DIMENSIONI DEL BOX E SUA COSTRUZIONE

Un vantaggio dei sistemi a box ermetico è che non esiste volume o forma ottimale. Pareti con proporzioni di 5:3 e 4:3 sono comuni, ma non c'è ragione per cui tali proporzioni non siano aumentate a 2:1 o più, a patto che si raggiunga una soddisfacente sistemazione dell'altoparlante. Il primo modo normale di vibrazione interna si ha quando la lunghezza d'onda diventa uguale alla profondità del box.

La massima profondità può essere calcolata dalla frequenza di cross-over, cioè, se la frequenza di cross-over è 500 Hz, $\lambda/2 = 344 \text{ mm}$ da cui si deduce che la profondità deve essere più corta di questa misura. Però, con il materiale assorbente nel box, se la profondità è maggiore di $\lambda/4$, la reattanza della faccia posteriore X_{AB} è positiva e il carico sul retro del cono si avvicina a quello di uno schermo infinito. Quindi la profondità interna del box dovrebbe essere situata tra $1/2$ e $1/4$ della lunghezza d'onda della frequenza di cross-over. Può essere vantaggioso anche non posizionare l'altoparlante al centro dello schermo, montare gli altoparlanti a livello dello schermo (a raso), specialmente i tweeter e mid-range e usare un materiale sufficientemente spesso per le pareti del box in modo da evitare risonanze dei pannelli. Con quest'ultimo accorgimento possono essere evitati gli svantaggi del montaggio centrale del woofer.

3.10. DETERMINAZIONE DEL VOLUME DEL BOX

Il problema principale nella costruzione delle casse acustiche a chiusura ermetica sta nella determinazione del volume necessario a far funzionare nel migliore dei modi il woofer utilizzato.

Tale volume infatti, attraverso la corrispondente cedevolezza dell'aria in esso contenuta, influenza il comportamento dell'altoparlante alle basse frequenze. La relazione tra volume d'aria e cedevolezza è stata descritta nel paragrafo 3.7. I fattori che determinano la risposta a bassa frequenza di un certo altoparlante inserito in un box ermetico sono principalmente due:

- 1) fattore di merito del sistema $Q't$
- 2) frequenza di risonanza dell'altoparlante in cassa $f'o$.

Quanto il fattore di merito faccia variare la risposta in frequenza, è illustrato nella figura 3.8.

Il ruolo che gioca la frequenza di risonanza è ovvio: una variazione della stessa dà luogo a una traslazione delle curve di figura 3.8 verso destra se la $f'o$ aumenta, verso sinistra se diminuisce.

Occorre però notare che $Q't$ e $f'o$ non sono indipendenti fra loro: a una variazione di una delle due consegue una variazione dell'altra; in particolare, se $f'o$ diminuisce, diminuisce anche $Q't$, mentre aumenta se la frequenza di risonanza aumenta.

Una volta noti $Q't$ e $f'o$, possiamo tracciare la risposta in frequenza teorica dell'altoparlante alle basse frequenze, cioè fino a frequenze aventi una lunghezza d'onda acustica non inferiore al raggio del cono dell'altoparlante ($kr < 1$). La formula che mette in relazione la pressione sonora $Q't$ e $f'o$ in funzione della frequenza f , è quella tipica dei filtri passa alto del 2° ordine, essendo il sistema altoparlante-cassa ermetica un sistema vibrante del secondo ordine.

$$|A|_{dB} = 20 \log \frac{f^2}{\sqrt{\left(\frac{f \cdot f'o}{Q't}\right)^2 + (f'o^2 - f^2)^2}} \quad (3.74)$$

Con l'aiuto di questa formula, mediante una calcolatrice, possibilmente programmabile, è possibile tracciare la risposta a basse frequenze di un sistema acustico avente determinati valori di $Q't$ e $f'o$. Naturalmente, da un certo altoparlante, non potremo ottenere valori di fattore di merito e di risonanza qualsiasi, ma solo determinate coppie. Ad esempio, se la frequenza di risonanza dell'altoparlante in aria libera è di 30 Hz, è impossibile scegliere per l'altoparlante in cassa una frequenza di risonanza inferiore, nè un valore di $Q't$ inferiore a quello del solo altoparlante, Q_t .

Il fattore di merito totale dell'altoparlante libero, cioè senza cassa, è dato da:

$$Q_T = \frac{\omega_o \cdot M'_A}{R'_A} \quad (2.24)$$

dove

$$M'_A = M_{AC}$$

e

$$R'_A = R_{AS} + R_{AF}$$

Quest'ultima equazione è ricavabile dal paragrafo 2.7, tenendo conto delle relazioni tra grandezze acustiche ed elettriche e tra resistenze elettriche e meccaniche. Il fattore di merito totale dell'altoparlante in cassa vale invece (vedi paragrafo 3.6)

$$Q'_T = \frac{\omega'_0 M_A}{R_A} \quad (3.38)$$

dove

$$M_A = M_{AC} + M_{AR} + M_{AB}$$

e

$$R_A = R_{AE} + R_{AB} + R_{AS} + R_{AR}.$$

Con R_{AE} ho designato il termine

$$R_{AE} = \frac{B^2 l^2}{R_E \cdot A^2}$$

Questo vuol dire che in entrambi i casi, il circuito equivalente semplificato è quello illustrato in figura 3.3, mentre sono diversi i valori dei componenti. La (2.24) e la (3.38) potrebbero già mettere in relazione la frequenza (tramite $\omega = 2 \pi f$) e il Q_t , ma in modo ancora troppo complesso per un facile calcolo, in quanto, a priori, è difficile calcolare R_{AB} , che dipende dalla resistenza al flusso d'aria prodotta dal materiale smorzante posto all'interno della cassa (equazione 3.37), nonché M_{AB} , che dipende dalle dimensioni del box stesso che non conosciamo. Bisogna quindi effettuare ulteriori semplificazioni. Possiamo, a questo proposito, notare che, quando un altoparlante viene messo in una cassa, aumentano sia R'_A che M'_A . Supponiamo che questi elementi aumentino nella stessa misura, cioè $R_A = R'_A \cdot \alpha$ e $M_A = M'_A \cdot \alpha$ avremo ora

$$Q'_T = \frac{\omega'_0 \cdot M'_A \cdot \alpha}{R'_A \cdot \alpha}.$$

Facendo il rapporto tra i due fattori di merito otteniamo:

$$\frac{Q'_T}{Q_T} = \frac{\omega'_o \cdot M'_A}{R'_A} \cdot \frac{R'_A}{\omega_o \cdot M'_A} = \frac{\omega'_o}{\omega_o} = \frac{2 \pi f'_o}{2 \pi f_o}$$

Possiamo quindi dire che, con una certa approssimazione,

$$\frac{Q'_T}{Q_T} \approx \frac{f'_o}{f_o} \quad (3.75)$$

Da questa formula possiamo stabilire il Q'_t per una data f'_o o viceversa, e quindi scegliere la coppia Q'_t - f'_o che dà la risposta in frequenza voluta, tenendo presenti i limiti, già descritti nel paragrafo 3.6 che può assumere il fattore di merito Q'_t per ottenere un corretto smorzamento del sistema.

Bisogna ora determinare una formula che dia il volume del box necessario ad ottenere, da un dato altoparlante, le caratteristiche volute. A questo proposito la formula (3.49)

$$\frac{f_o}{f'_o} \approx \sqrt{0,87 \cdot \left(1 + \frac{C_{MS}}{C_{MB}}\right)} \quad (3.76)$$

dove al posto di C_{AS}/C_{AB} si è sostituito C_{MS}/C_{MB} , rapporti aventi lo stesso valore. Ricavando C_{MB} otteniamo

$$C_{MB} = \frac{0,87 \cdot C_{MS}}{\left(\frac{f_o}{f'_o}\right)^2 - 0,87} \quad (3.77)$$

Conoscendo il valore di C_{MB} , la cedevolezza meccanica del box, è possibile calcolare il suo volume, tramite l'equazione (3.51')

$$V_B = 1,4 \cdot 10^5 \cdot A^2 \cdot C_{MB} \quad (3.51')$$

Come conclusione, vediamo il riassunto delle fasi necessarie alla determinazione del volume del box, una volta a conoscenza del fattore di merito Q_t , della frequenza di risonanza f_o e della cedevolezza meccanica C_{MS} dell'altoparlante in oggetto.

- 1) Determinare, tramite la (3.75), ed eventualmente tracciando la risposta in frequenza teorica per mezzo della (3.74), i valori di Q'_t e f'_o che vogliamo far assumere al sistema.

- 2) Calcolare tramite la (3.77) il valore della cedevolezza meccanica del box C_{MB} .
- 3) Ricavare con la (3.51') il volume ottimale della cassa.

3.10.1. Volume occupato dall'altoparlante

Il montaggio dell'altoparlante in cassa incide sul volume del box. Se esso è applicato sul retro dello schermo, può ridurre il volume in maniera significativa. Se lo si monta sul fronte dello schermo, l'effetto che esso ha sul volume del box dipende dalle dimensioni dei fori praticati sullo schermo per accomodare l'altoparlante e dalle dimensioni dell'altoparlante stesso.

3.11. COSTRUZIONE DEL BOX

È essenziale che il progetto della cassa sia fatto in modo tale da ottenere la massima rigidità. Se la rigidità e la tenuta d'aria sono rispettate, il box darà prestazioni in accordo con le sue caratteristiche acustiche di progetto. Vibrazioni del pannello e scarsa tenuta ermetica introdurranno distorsioni e faranno diminuire (notevolmente) la potenza nominale riproducibile del woofer. Per la costruzione dei pannelli possono essere usati una grande varietà di materiali. Il legno massiccio non è raccomandato a causa della tendenza ad incurvarsi.

Si dovrà usare il multistrato o il pannello, che dovrà essere di ottima qualità, molto compatto. Lo spessore dei pannelli può variare da un minimo di 1,5 cm. a 2 o 2,5 cm. a seconda delle dimensioni della cassa: maggiori sono le sue dimensioni, maggiore dovrà essere lo spessore del legno. Spesso è utile inserire un puntello tra la parete anteriore e quella posteriore della cassa, realizzato con una stasetta di legno.

Gli spigoli dei pannelli possono essere uniti nel modo preferito, facendo in maniera che la chiusura rimanga a tenuta d'aria. Si dovranno usare chiodi e abbondante colla vinilica, che impedirà all'aria di passare attraverso le fessure. Agli angoli della cassa sono utili delle stasette di rinforzo.

Una particolare attenzione si deve porre ai terminali d'ingresso, dove è facile che ci siano perdite d'aria. Si possono usare i contatti a pressione utilizzati anche per le uscite degli amplificatori, in genere di colore rosso/nero. Sono dotati di due linguette alle quali va fissato il filo che andrà all'interno della cassa. Tali linguette verranno infilate in due fori praticati nella parte posteriore del box che verranno poi accuratamente sigillati con colla. Può essere utile inserire tali prese in un incavo del mobile in modo da non danneggiare le stesse nel caso si appoggi la cassa sul pannello posteriore.

È bene realizzare il box in modo che non sporgano i pannelli laterali dal pannello frontale, come invece accadeva in casse di qualche anno fa, in quanto tale bordo non può che peggiorare la riproduzione musicale a causa di diffrazioni indesiderate del suono.

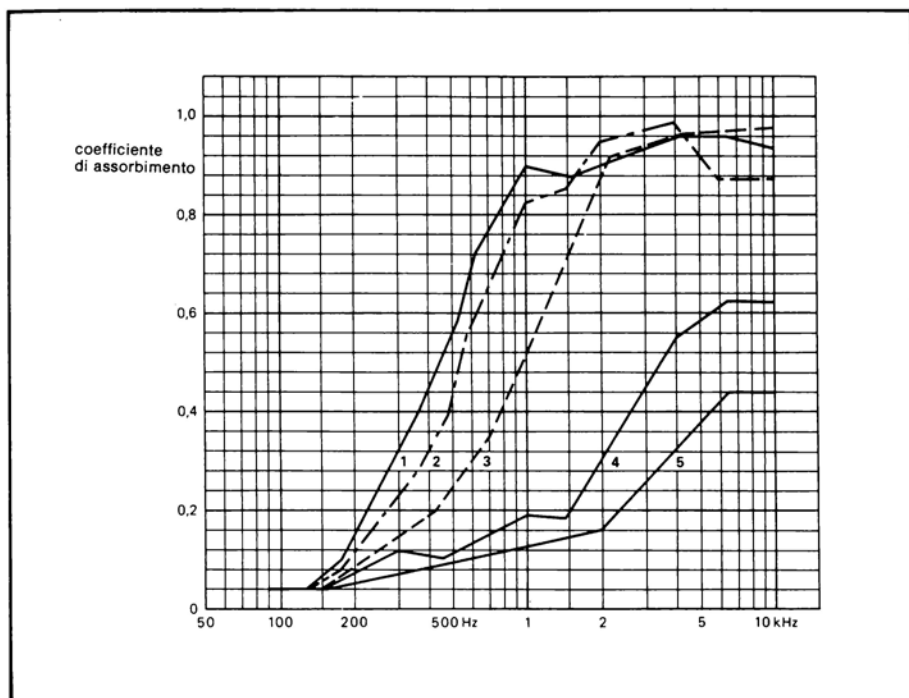


Figura 3.13 — L'assorbimento relativo di comuni materiali smorzanti.

Curva 1: kapok soffiato. Curva 2: cascami di cotone. Curva 3: lana di vetro. Curva 4: cascami di lana. Curva 5: fibre in poliestere.

Conviene quindi costruire casse molto semplici, come è illustrato in figura 3.14, realizzabili anche da chi ha poca esperienza in falegnameria. Gli altoparlanti verranno fissati dall'esterno della cassa, in maniera di rendere il piano dell'altoparlante parallelo al pannello frontale. Questo metodo ha vari vantaggi:

- 1) evita le ulteriori diffrazioni che si avrebbero a causa dello spessore del legno se si montassero gli altoparlanti dall'interno;
- 2) consente di realizzare la cassa senza alcuna parete "apribile" per accedere all'interno del box, il che semplifica ulteriormente la sua costruzione ed è in grado di mantenere un livello di ermeticità più spinto.

Per evitare perdite d'aria in corrispondenza dei bordi degli altoparlanti, occorre applicare, nel caso mancasse, una spugnetta autoadesiva sul bordo che andrà a contatto con il legno del mobile. Strisce di spugna autoadesiva del tipo usato per lo stesso motivo sui battenti delle porte sono adatte allo scopo.

Come materiali smorzanti possono essere usati: lana di vetro, kapok e cascami di cotone, che offrono un buon coefficiente di assorbimento. Un'indicazione delle caratteristiche relative di alcuni materiali assorbenti è data in figura 3.13. Il materiale preferito in tutte le condizioni è la lana di vetro in quanto le variazioni delle sue caratteristiche sono trascurabili. Benchè la lana di vetro sia circa tre volte più cara del kapok, il suo uso è più che giustificato sul piano della stabilità. A causa del suo alto coefficiente di assorbimento può essere usato un sottile strato per rivestire l'interno del box. Nel caso di piccole casse, dove la maggiore dimensione è nell'ordine dei 450 mm, uno spessore di 12 mm di materiale assorbente può essere già adeguato.

Questa è la minima quantità di materiale assorbente utilizzabile, e serve per evitare riflessioni all'interno della cassa che si ripercuoterebbero negativamente sull'uscita acustica dell'altoparlante. Abbiamo però visto nel paragrafo 3.6 che tale ma-

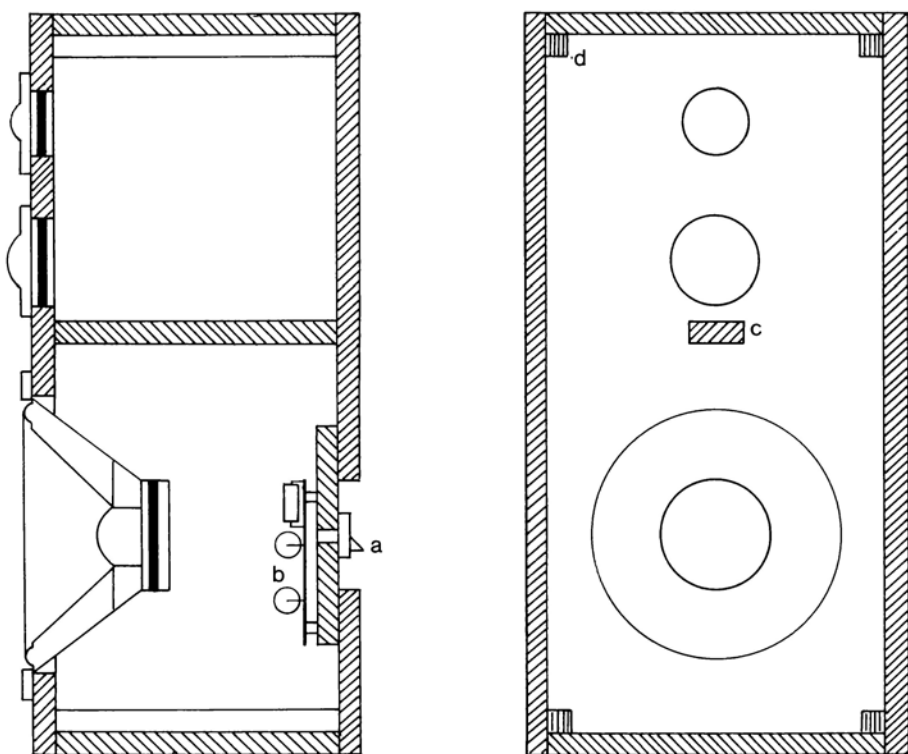


Figura 3.14 — Spaccato laterale e posteriore di una cassa acustica. (a) morsetti di ingresso; (b) filtro cross-over; (c) puntello di rinforzo tra i pannelli anteriore e posteriore; (d) stasette di rinforzo per gli angoli.

teriale modifica il $Q't$ e la frequenza di risonanza, agendo quasi come se si variesse il volume del box. La procedura illustrata nel paragrafo 3.10 non tiene conto del materiale assorbente messo nella cassa.

Essa dà luogo ad un volume del box che, normalmente, è leggermente inferiore a quello che darebbe il $Q't$ e la f' di progetto. Quindi, inserendo o togliendo materiale assorbente all'interno della cassa, si può "accordare" il sistema sul $Q't$ e la f' voluti, naturalmente entro certi limiti.

La cassa, se realizzata in legno truciolato, non ha un aspetto molto gradevole. Per migliorare l'estetica occorre rivestire l'esterno del box, lavoro ottenibile utilizzando vari materiali. Se si riveste anche il pannello frontale, si può evitare il problema della copertura tramite tela necessaria ad occultare il pannello stesso e gli altoparlanti. Tale lavoro, oltre ad essere un po' complesso, comporta un certo peggioramento o almeno una variazione del suono a causa della non perfetta trasparenza acustica delle tele facilmente reperibili in commercio e dell'intelaiatura necessaria a tendere la tela stessa. I più bravi potranno impiallicciare la cassa con legno, o, più semplicemente, si possono usare i fogli di plastica autoadesiva che riproducano il disegno del legno. Un'altra soluzione può essere quella di stuccare la cassa e dipingerla con vernice, come se si trattasse della carrozzeria di un'automobile.

Un'ultima idea piuttosto interessante è quella di rivestire la cassa delle frequenze medio-alte sui pannelli della cassa; che potrebbero peggiorare il suono riprodotto.

3.12. ESEMPI DI CALCOLO DEL VOLUME DEL BOX

Nel paragrafo 2.14 abbiamo visto le caratteristiche dei tre woofer che ora prenderemo in esame per il calcolo del volume delle rispettive casse. Al calcolo teorico seguiranno le misure effettuate sui prototipi. La lana di roccia utilizzata nelle prove, facilmente reperibile presso i fornitori di materiali per l'edilizia, è del tipo soffice, dello spessore di 4 cm., venduta generalmente in rotoli.

CASSA 1

Il woofer AD 70601 ha le seguenti caratteristiche principali:

| | | |
|----------------------------------|------|------|
| Frequenza di risonanza | 40 | Hz |
| Fattore di merito in aria libera | 0,75 | |
| Cedevolezza delle sospensioni | 1,2 | mm/N |
| Diametro effettivo del cono | 125 | mm |

Dobbiamo scegliere i valori di $Q't$ e f_0 del sistema.

Con altoparlanti di piccolo diametro, è sconsigliabile cercare di estendere molto la risposta in frequenza mantenendo bassi valori di $Q't$ e f_0 perchè così facendo, occorrerebbero casse di volume piuttosto grande, che offrirebbero al cono dell'altoparlante una elevata cedevolezza. Questo darà luogo, a frequenze molto basse, ad ampie oscillazioni del cono, che potrebbero portare facilmente l'altoparlante in distorsione. La capacità di potenza indistorta diventerebbe di conseguenza piuttosto bassa. Occorre quindi scegliere fattori di merito $Q't$ relativamente elevati, che, pur innalzando la frequenza di risonanza, aumentano anche l'efficienza nell'intorno della stessa.

Per questo altoparlante prenderemo in considerazione un fattore di merito pari a 1,37, a cui corrisponderà una frequenza di risonanza di circa

$$f_0 = \frac{Q't}{Q_t} \cdot f_0 = \frac{1,37}{0,75} \cdot 40 = 73 \text{ Hz.}$$

Ora possiamo, tramite la formula (3.77), calcolare la cedevolezza che deve avere l'aria contenuta nelle casse:

$$C_{MB} = \frac{0,87 \cdot C_{MS}}{\left(\frac{f_0}{f_0}\right)^2 - 0,87} = \frac{0,87 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{(1,83)^2 - 0,87} = 4,2 \times 10^{-4}$$

Tramite la (3.51') calcoliamo ora il volume interno della cassa:

$$V_B = 1,4 \cdot 10^5 \cdot A^2 \cdot C_{MB} = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,00015 \cdot 4,2 \cdot 10^{-4} \simeq 9 \text{ l.}$$

Si è scelta una cassa dalle dimensioni interne pari a 327 x 239 x 125 millimetri, il cui pannello frontale completo di fori per gli altoparlanti è illustrato in figura 3.15.

Le misure sperimentali sul prototipo hanno dato i seguenti risultati:

a) cassa senza lana di roccia

$$Q't = 1,45 \qquad f_0 = 80 \text{ Hz}$$

b) cassa con un pannello di lana di roccia avente dimensioni 40 x 320 x 230

$$Q't = 1,35 \qquad f_0 = 77 \text{ Hz}$$

c) cassa con due pannelli di lana di roccia di dimensioni pari al caso b):

$$Q't = 1,32 \qquad f_0 = 75 \text{ Hz}$$

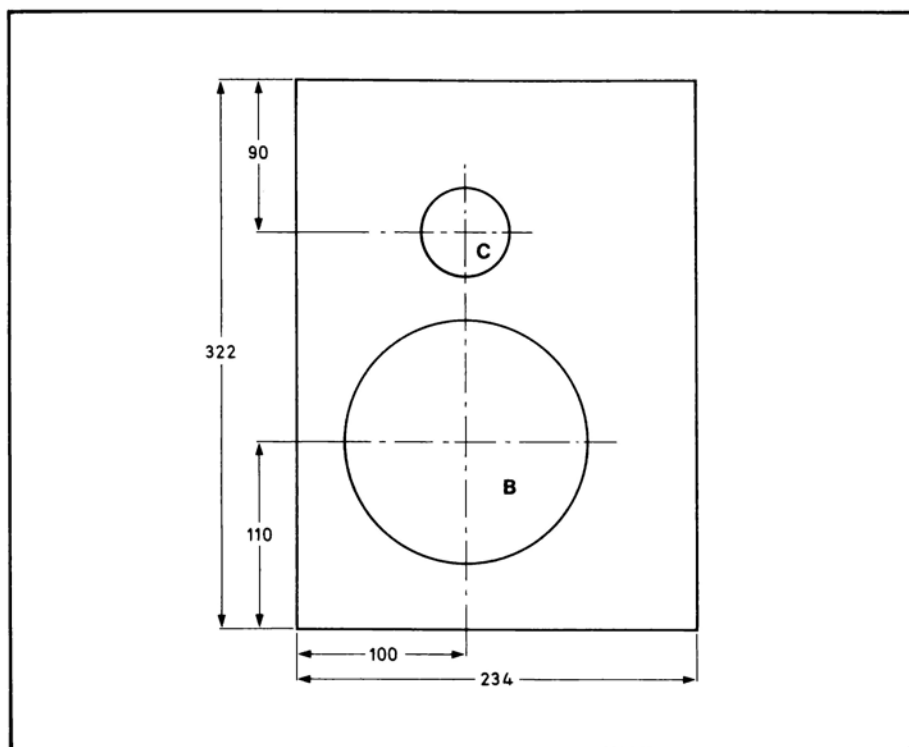


Figura 3.15 — Disegno del pannello frontale della cassa 1; diametro dei fori: C = 43,5 mm; B = 142,5 mm.

CASSA 2

Le caratteristiche utili del woofer AD 80652 sono le seguenti:

| | | |
|----------------------------------|------|------|
| Frequenza di risonanza | 40 | Hz |
| Fattore di merito in aria libera | 0,49 | |
| Cedevolezza delle sospensioni | 1,2 | mm/N |
| Diametro effettivo del cono | 160 | mm |

In virtù del minore fattore di merito e del maggior diametro di questo altoparlante rispetto a quello precedente, possiamo scegliere un fattore di merito dell'altoparlante in cassa Q't più basso, che consente un limitato aumento della frequenza di

risonanza. Il maggior diametro dell'altoparlante consente la riproduzione indistorta di segnali a bassa frequenza ad un livello più elevato di quella ottenibile dall'altoparlante della cassa 1, perché le necessarie escursioni del cono sono più limitate; a questo proposito si osservi la figura 2.16.

Una coppia $Q't - f_0$ che dà luogo ad una cassa di dimensioni ragionevoli è la seguente: $Q't = 0,79$, da cui otteniamo una frequenza di risonanza di

$$f_0 = \frac{0,79}{0,49} \cdot 40 = 64,5 \text{ Hz.}$$

Calcoliamo ora la cedevolezza dell'aria contenuta nella cassa necessaria ad ottenere le caratteristiche volute:

$$C_{MB} = \frac{0,87 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{64,5}{40}\right)^2 - 0,87} = 5,1 \cdot 10^{-4}.$$

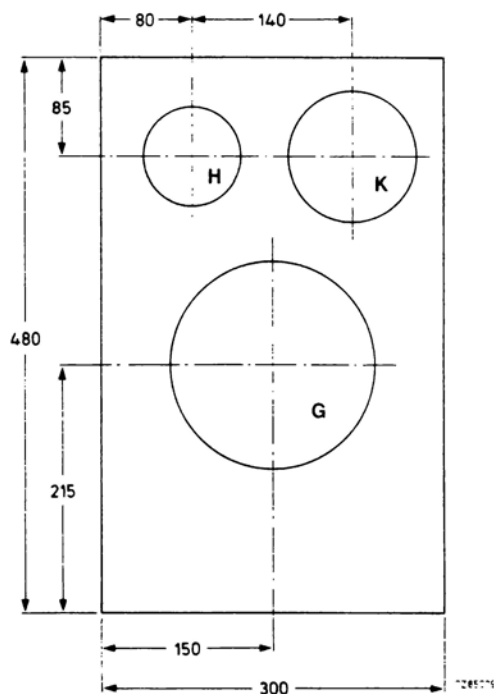


Figura 3.16 — Disegno del pannello frontale della cassa 2; diametro dei fori: $H = 85,5$ mm; $K = 113,5$ mm; $G = 180,5$ mm.

Il volume interno del box sarà:

$$V_B = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,0004 \cdot 0,51 \cdot 10^{-3} = 29 \text{ litri.}$$

Si è scelta una cassa di dimensioni interne pari a:

$$480 \times 300 \times 220 \text{ mm.}$$

il cui disegno del pannello frontale completo di fori per gli altoparlanti è illustrato in figura 3.16.

Le misure effettuate sul prototipo hanno dato risultati in stretto accordo con le previsioni teoriche. Vediamo ora i risultati di queste misure, riportanti il fattore di merito $Q't$ e la frequenza di risonanza f_0 in funzione della quantità di lana di roccia inserita nella cassa.

a) cassa senza pannelli di lana di roccia:

$$Q't = 0,86 \qquad f_0 = 66,5 \text{ Hz}$$

b) cassa con 2 pannelli di lana di roccia aventi ciascuno dimensioni pari a 40 x 300 x 480 mm:

$$Q't = 0,83 \qquad f_0 = 65 \text{ Hz}$$

c) cassa con 4 pannelli di lana di roccia di dimensioni pari a quelle del caso b):

$$Q't = 0,79 \qquad f_0 = 63 \text{ Hz}$$

CASSA 3

In questa cassa è stato usato il woofer AD 12200, avente le seguenti caratteristiche principali:

| | | |
|----------------------------------|---------------------|-----|
| Frequenza di risonanza | 24 | Hz |
| Fattore di merito in aria libera | 0,33 | |
| Cedevolezza delle sospensioni | $0,8 \cdot 10^{-3}$ | m/N |
| Diametro effettivo del cono | 250 | mm |

Per le stesse ragioni dette in merito alla cassa 2, possiamo supporre di abbassare ulteriormente il fattore di merito in modo di ottenere un ottimo smorzamento del sistema e una bassa frequenza di risonanza.

Consideriamo ad esempio un valore del fattore di merito pari a 0,63, a cui corrisponderà una frequenza di risonanza dell'altoparlante in cassa di

$$f_0 = \frac{0,63}{0,33} \cdot 24 = 46 \text{ Hz.}$$

La cedevolezza dell'aria nel box dovrà essere di

$$C_{MB} = \frac{0,87 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{46}{24}\right)^2 - 0,87} = 0,24 \cdot 10^{-3}$$

da cui si può calcolare il volume interno della cassa:

$$V_B = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,0024 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} = 80 \text{ litri.}$$

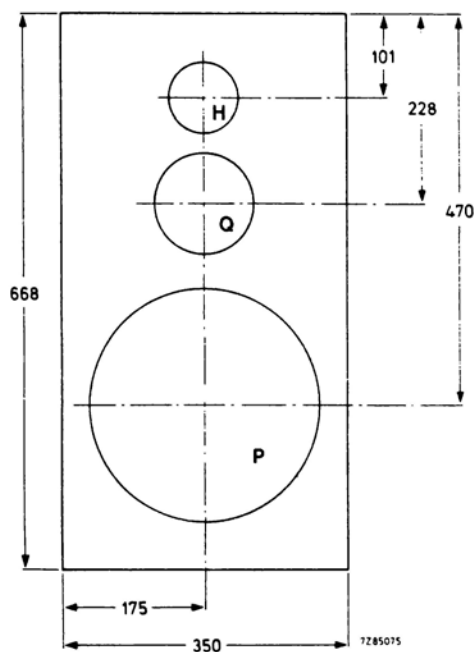


Figura 3.17 — Disegno del pannello frontale della cassa 3; diametro dei fori: H = 85,5 mm; Q = 122 mm; P = 280 mm.

La cassa avrà le seguenti dimensioni interne:

$$688 \times 350 \times 342 \text{ mm.}$$

Il pannello frontale è disegnato in figura 3.17. Si noti la disposizione verticale degli altoparlanti, che consente di ottenere una dispersione angolare più regolare.

Le misure pratiche sul prototipo hanno dato i seguenti risultati:

a) cassa senza lana di roccia:

$$Q't = 0,71$$

$$f_o = 49 \text{ Hz}$$

b) cassa con pannelli di lana di roccia di dimensioni 40 x 668 x 350

$$Q't = 0,68$$

$$f_o = 48 \text{ Hz}$$

c) cassa con 4 pannelli di lana di roccia del tipo usato nel caso b)

$$Q't = 0,64$$

$$f_o = 46,5 \text{ Hz}$$

d) cassa con 6 pannelli di lana di roccia del tipo usato nel caso b)

$$Q'3t = 0,6$$

$$f_o = 45 \text{ Hz}$$

Dai risultati delle misure sperimentali di queste tre casse, possiamo notare che, nonostante il notevole numero di approssimazioni introdotte al fine di ottenere formule applicative molto semplici, vi è un'ottima concordanza tra le previsioni teoriche e le rilevazioni sperimentali. La cassa che dà luogo alle maggiori tolleranze è la 1, probabilmente a causa del ridotto volume e dell'elevato fattore di merito in gioco, che danno un peso maggiore alle semplificazioni fatte.

In figura 3.18 vediamo le risposte in frequenza teoriche delle tre casse, calcolate mediante la formula 3.74. Di questo grafico è interessante notare il picco di circa 3,5 dB sopra il livello normalizzato di 0 dB, della cassa 1 nell'intorno della frequen-

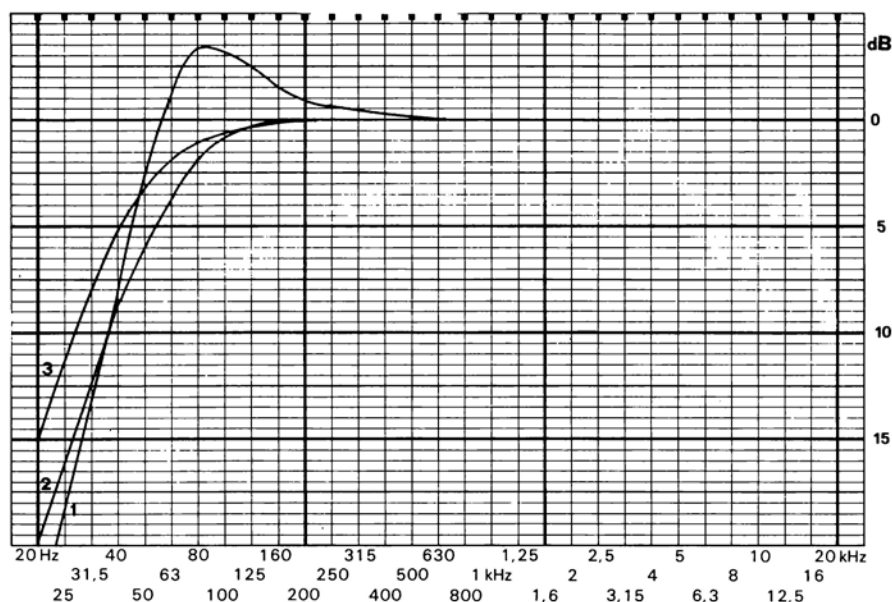


Figura 3.18 — Risposta a bassa frequenza teorica delle tre casse.

Le curve 1, 2, 3 si riferiscono, rispettivamente, alla cassa 1, 2, 3.

za di risonanza dovuta al fattore di merito relativamente elevato. Un altro aspetto interessante è la differenza di pressione sonora di ciascuna cassa tra i 40 Hz e gli 80 Hz.

Per la cassa 1 tale differenza ammonta a circa 12 dB, per la 2 abbiamo circa 6,5 dB, mentre per la 3 abbiamo una differenza di soli 4 dB. Questo denota chiaramente la maggiore capacità della cassa più grande di riprodurre frequenze molto basse rispetto alla cassa 2 e, in maggiore misura, alla 1.

FILTRI CROSS-OVER

La radiazione del suono di un altoparlante a bobina mobile diventa più direzionale all'aumentare della frequenza. Poichè la pressione sull'asse rimane costante il suono fuori dall'asse, alle alte frequenze, tende a scendere. Il vantaggio di un sistema multivia è che gli altoparlanti possono essere pilotati solo nella ragione dove essi operano in maniera più soddisfacente. Al di fuori di queste frequenze il segnale viene inviato agli altoparlanti che sono adatti alla riproduzione delle alte frequenze. Per ottenere le migliori prestazioni di un sistema multivia il segnale elettrico in ingresso al sistema deve essere diviso in modo che ciascun altoparlante riceve solo i segnali che deve riprodurre.

Le risposte in frequenza caratteristiche degli altoparlanti devono potersi sovrapporre leggermente le une alle altre in modo da mantenere il responso lineare attraverso tutta la gamma audio. Il punto al quale i segnali cessano di alimentare un altoparlante e sono incanalati sull'altoparlante che riproduce la gamma adiacente di frequenze, è chiamata frequenza di cross-over. Le caratteristiche di risposta in frequenza dell'altoparlante devono essere tenute in conto per stabilire il punto delle frequenze di cross-over e la pendenza d'attenuazione. È importante fare in modo che ciascun altoparlante generi una corretta quantità di energia acustica per la parte di spettro audio che gli compete.

4.1. DATI DI PROGETTO

Il progetto delle reti di cross-over è in funzione di questi fattori:

- frequenze di cross-over
- potenza nominale degli altoparlanti
- direttività e comportamento in frequenza degli altoparlanti
- sensibilità (efficienza) degli altoparlanti
- caratteristica in frequenza del sistema completo.

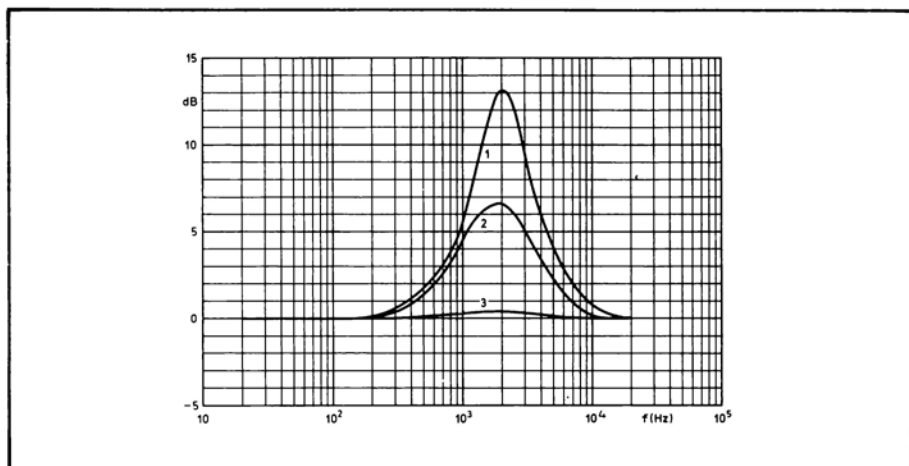


Figura 4.1 — Caratteristica in frequenza del controllo di presenza.

Curva 1: massimo; curva 2: posizione intermedia; curva 3: minimo.

Consideriamo quest'ultimo punto; l'obiettivo del progetto è, normalmente, quello di ottenere una risposta in frequenza il più lineare possibile su tutta la gamma riprodotta. In combinazione con un amplificatore di caratteristiche lineari, la risposta in frequenza dovrebbe essere piatta, con i controlli di tono dell'amplificatore in posizione centrale. La discussione che seguirà avrà come obiettivo l'ottenimento di una risposta in frequenza lineare.

4.2. SCELTE DELLE FREQUENZE DI CROSS-OVER

La scelta delle frequenze di cross-over è un compromesso tra la risposta in frequenza di ciascun altoparlante e la regolarità delle transizioni tra un altoparlante e un altro alle frequenze di cross-over. Dipende inoltre dai requisiti di potenza del sistema. Se alla frequenza di cross-over scelta, la massima potenza sopportabile di uno degli altoparlanti diventa eccessiva, si può, aggiustando la frequenza di cross-over, ottenere il margine di sicurezza richiesto.

La relazione tra la distribuzione di potenza e la frequenza di cross-over è stata spiegata nel paragrafo 3.8.2. Nel caso in cui l'aggiustamento delle frequenze di cross-over non dà i richiesti margini di sicurezza, possiamo usare un altoparlante differente con una maggiore potenza nominale o due o più altoparlanti dello stesso tipo connessi in maniera tale da rispettare l'impedenza del sistema totale.

Ci sono due metodi di base per dividere i segnali:

- cross-over elettronico;
- rete di filtri passivi.

Quando si usa un sistema a cross-over elettronico, è facile ottenere la variazione del livello del segnale a ciascun altoparlante e quindi ottenere il bilanciamento tonale.

È desiderabile evitare discontinuità nel responso degli altoparlanti in ogni circostanza, ma se questo avviene nella regione intorno ai 2000 Hz, ciò può essere particolarmente fastidioso. Da quanto detto precedentemente possiamo concludere che, se le discontinuità possono essere evitate, la scelta delle frequenze di cross-over dipende dalle caratteristiche degli altoparlanti menzionate prima.

4.3. TIPI DI RETI PASSIVE.

Ci sono due tipi base di filtri passivi. Il primo consiste di passa alto e passa basso separati posti in serie o parallelo che hanno un ingresso a due terminali e l'uscita a quattro terminali. Il secondo è conosciuto come rete a resistenza costante e, visivamente identico al primo, differisce per i valori dei componenti. Il vantaggio di quest'ultimo tipo non sta solo nel fatto di aver un'impedenza d'ingresso costante al variare della frequenza ma, nel caso del sistema di altoparlanti a due vie, abbiamo che altoparlanti con le stesse impedenze hanno uguali valori dei componenti dei filtri. L'approccio "classico" al progetto dei filtri è basato sulla teoria della linea di trasmissione, usando impedenze e parametri iterativi fittizi.

L'impedenza iterativa è simile all'impedenza caratteristica delle linee di trasmissione. Facendo terminare il filtro su un'impedenza uguale a quella caratteristica, un'identica impedenza appare, riflessa, ai terminali d'ingresso. In pratica però, l'impedenza caratteristica ha sempre un valore, reale o complesso, che può essere mantenuto indipendente dalla frequenza. L'impedenza iterativa, invece, non può essere simulata da un'impedenza reale; alla frequenza di cut-off essa può essere 0 o infinita, nella zona in cui non attenua è reale, resistiva con un valore variabile, mentre nella parte di frequenze che vengono eliminate è una reattanza immaginaria positiva o negativa. Nonostante la somiglianza tra l'impedenza caratteristica e l'impedenza iterativa, non è corretto assumere che la terminazione dell'ultima sezione di un filtro classico su una resistenza costante darà luogo alla corretta impedenza riflessa all'ingresso attraverso i filtri progettati per il giusto valore d'impedenza. Comunque, nei pressi della frequenza di cut-off, questo non è esattamente vero, e l'uso di convenzionali filtri passa alto e passa basso del tipo a m-derivata ha permesso la realizzazione dei filtri a resistenza costante per scopi HI-FI. Mentre il progetto dei filtri su basi classiche richiede una terminazione corretta ad entrambi gli estremi, i filtri a resistenza costante non sono critici per quanto riguarda la resistenza d'ingresso. Se le uscite sono correttamente terminate, l'impedenza d'ingresso è una resistenza costante e il responso sarà indipendente dall'impedenza della sorgente. Poiché i moderni amplificatori a transistor possono essere considerati come generatori di tensione costante con impedenza pari a zero, segue che le prestazioni sono indipendenti dall'accoppiamento corretto tra l'impedenza d'uscita dell'amplificatore e l'impedenza d'ingresso del filtro. Quello che varia è la potenza inviata al sistema di altoparlante.

4.4. FILTRO CROSS-OVER AD IMPEDENZA COSTANTE PER UN SISTEMA A DUE VIE

Le reti cross-over per HI-FI hanno i seguenti punti caratteristici:

- attenuazione alle frequenze di cross-over pari a 3 dB;
- la pendenza della caratteristica di trasferimento alla frequenza di cross-over è pari a mezza pendenza finale del filtro;
- la pendenza finale tende asintoticamente a una linea retta tesa dalla frequenza di cross-over avente pendenza di 6 dB/oct. moltiplicato per il numero di elementi reattivi (vedi figura 4.2);
- quando due filtri di caratteristiche complementari sono alimentati da una sorgente comune e le due uscite sono correttamente terminate, la potenza totale alle uscite sarà costante lungo tutta la banda passante;
- quando due filtri complementari hanno in uscita il carico con il giusto valore di resistenza (cioè sono correttamente terminati), l'impedenza presentata ai loro ingressi comuni sarà una resistenza costante pari alle resistenze di terminazione;
- lo sfasamento del segnale alla frequenza di cross-over è pari alla metà del suo sfasamento massimo;
- la differenza di fase tra le uscite dei filtri complementari è costante e dipende dal numero di elementi reattivi.

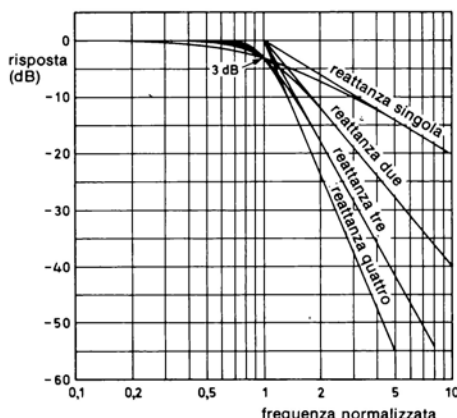


Figura 4.2 — Risposte tipiche del filtro cross-over a resistenza costante in funzione del numero di elementi reattivi usati.

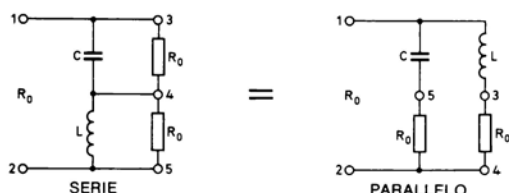


Figura 4.3 — Quando i valori dei componenti sono scelti in modo da ottenere $R_0 = \sqrt{L/C}$, l'impedenza presentata ai terminali d'ingresso è pari ad R_0 .

Le caratteristiche di trasferimento del filtro in funzione del numero di elementi reattivi che lo compongono sono illustrate in figura 4.2.

La rete a resistenza costante è derivata dai circuiti di figura 4.3.

Se i valori dei componenti sono scelti per ottenere $R_0 = \sqrt{L/C}$, l'impedenza presentata ai terminali d'ingresso è costante e pari ad R_0 a tutte le frequenze. A frequenze inferiori a quella di cross-over, f_1 , tutta la potenza entrante si sviluppa ai terminali 3 e 4; per frequenze superiori ad f_1 , tutta la potenza entrante si sviluppa ai terminali 4 e 5. Ai lati della frequenza f_1 la pendenza di attenuazione caratteristica è, approssimativamente, 6 dB/oct.

Questa pendenza è, normalmente, considerata troppo bassa e può quindi essere incrementata aumentando il numero di elementi reattivi del filtro. Gli altoparlanti di normale progettazione per HI-FI richiedono di solito filtri con attenuazione caratteristica di 12 dB/oct. I valori delle induttanze e delle capacità si possono determinare, nel caso del filtro a 6 dB/oct. dalle formule seguenti:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} ;$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}} ;$$

$$R_0 f_1 = \frac{1}{2 \pi C}$$

da cui

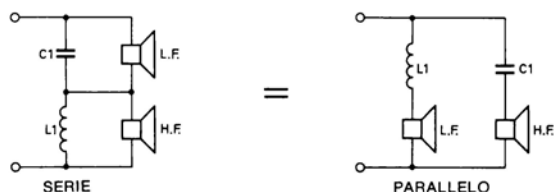
$$C = \frac{1}{2 \pi f_1 R_0}$$

e

$$L = \frac{R_0}{2 \pi f_1}$$

Nel caso di un filtro a singola reattanza, quindi, la reattanza di ciascun componente è posta uguale a R_0 alla frequenza di cross-over.

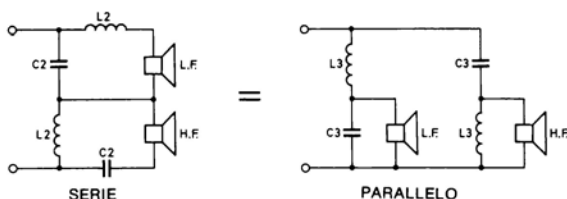
Per filtri con due reattanze per via (a 12 dB/oct.) i componenti hanno valori che danno luogo ad una reattanza pari a $R_0 \times \sqrt{2}$ nel caso parallelo e $R_0 / \sqrt{2}$ nel caso serie. Questo significa che nello stesso filtro, entrambe le induttanze hanno lo stesso valore e così anche le capacità. La figura 4.4 mostra lo schema di un filtro cross-over per sistemi a due vie.



6 dB/ottava

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_1 R_0}$$

$$L_1 = \frac{R_0}{2\pi f_1}$$



12 dB/ottava

$$C_2 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_1 R_0}$$

$$L_2 = \frac{R_0}{2\pi f_1 \sqrt{2}}$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_1 R_0 \sqrt{2}}$$

$$L_3 = \frac{R_0 \sqrt{2}}{2\pi f_1}$$

Figura 4.4 — Reti cross-over a resistenza costante per sistemi a due vie con frequenze di cross-over pari a f_1 .

I valori dei componenti sono dati, per differenti frequenze di cross-over, nella tabella 4.1 per filtri a 6 dB/oct., e in tabella 4.2 per filtri a 12 dB/oct. In figura 4.5 sono illustrati due schemi di filtri aventi frequenze di cross-over pari a 1000 Hz.

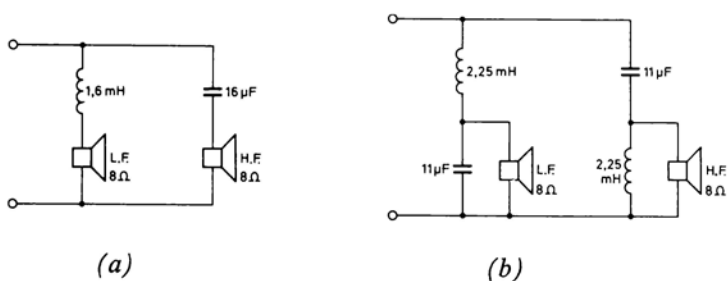


Figura 4.5 — (a) Filtro cross-over per sistemi a due vie. L'attenuazione è di 6 dB/ottava (simmetrica). La frequenza di cross-over è 1000 Hz. (b) Filtro cross-over per sistema a due vie. L'attenuazione è di 12 dB/ottava (simmetrica). La frequenza di cross-over è pari a 1000 Hz.

Tab. 4.1 - Valori dei componenti del filtro a 6 dB/ottava di fig. 4.4

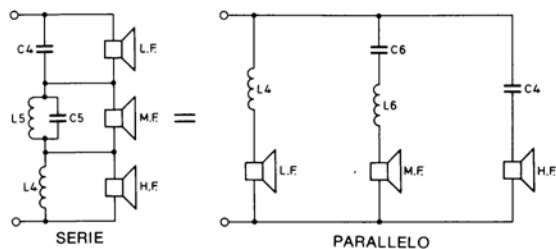
| f_1 (Hz) | R_0^* (Ω) | L_1 (mH) | C_1 (μ F) |
|---------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| 500 | 5 | 1,6 | 64 |
| | 10 | 3,2 | 32 |
| | 20 | 6,4 | 16 |
| 700 | 5 | 1,1 | 45 |
| | 10 | 2,3 | 23 |
| | 20 | 4,5 | 11 |
| 1000 | 5 | 0,8 | 32 |
| | 10 | 1,6 | 16 |
| | 20 | 3,2 | 8 |
| 1200 | 5 | 0,7 | 26 |
| | 10 | 1,3 | 13 |
| | 20 | 2,6 | 7 |
| 1600 | 5 | 0,5 | 20 |
| | 10 | 1,0 | 10 |
| | 20 | 2,0 | 5 |
| 2000 | 5 | 0,4 | 16 |
| | 10 | 0,8 | 8 |
| | 20 | 1,6 | 4 |
| 2400 | 5 | 0,3 | 13 |
| | 10 | 0,7 | 7 |
| | 20 | 1,3 | 3 |

Tab. 4.2 - Valori dei componenti del filtro a 12 dB/ottava di fig. 4.4

| f_1 (Hz) | R_0^* (Ω) | L_2 (mH) | C_2 (μ F) | L_3 (mH) | C_3 (μ F) |
|---------------|-------------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| 500 | 5 | 1,1 | 90 | 2,2 | 45 |
| | 10 | 2,2 | 45 | 4,5 | 22 |
| | 20 | 4,5 | 22 | 9 | 11 |
| 700 | 5 | 0,8 | 64 | 1,6 | 32 |
| | 10 | 1,6 | 32 | 3,2 | 16 |
| | 20 | 3,2 | 16 | 6,4 | 8 |
| 1000 | 5 | 0,5 | 45 | 1,1 | 22 |
| | 10 | 1,1 | 22 | 2,2 | 11 |
| | 20 | 2,2 | 11 | 4,5 | 5,5 |
| 1200 | 5 | 0,47 | 37 | 0,94 | 19 |
| | 10 | 0,94 | 19 | 1,87 | 9,4 |
| | 20 | 1,87 | 9 | 3,75 | 4,7 |
| 1600 | 5 | 0,35 | 28 | 0,7 | 14 |
| | 10 | 0,7 | 14 | 1,4 | 7 |
| | 20 | 1,4 | 7 | 2,8 | 3,5 |
| 2000 | 5 | 0,28 | 22 | 0,56 | 11 |
| | 10 | 0,56 | 11 | 1,1 | 5,5 |
| | 20 | 1,1 | 5,5 | 2,2 | 2,8 |
| 2400 | 5 | 0,23 | 19 | 0,47 | 9,4 |
| | 10 | 0,47 | 4,7 | 0,94 | 4,7 |
| | 20 | 0,94 | 9,4 | 1,87 | 2,3 |

4.5. RETI PER SISTEMI A TRE VIE

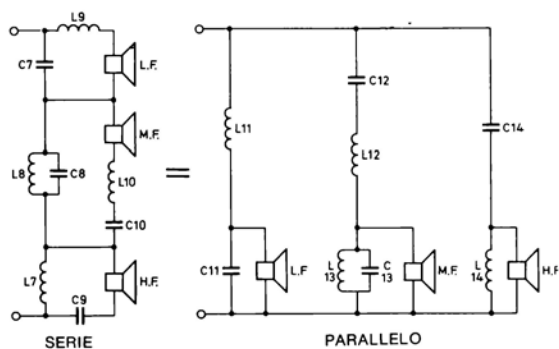
Le reti per sistemi a tre vie richiedono una sezione addizionale del filtro per l'altoparlante midrange. Sono coinvolte due frequenze di cross-over; una tra il woofer ed il midrange e una tra il midrange e il tweeter. Per filtri simmetrici, dove le frequenze di cross-over per i due altoparlanti che si incrociano solo le stesse, i valori dei componenti per le reti del filtro passivo a resistenza costante possono essere calcolati dalle formule di figura 4.6. Un approccio alternativo alla realizzazione di tali filtri sta nell'uso di due filtri a due vie messe in serie in modo da formare un filtro a tre vie. Il principio è illustrato in figura 4.7. La frequenza alla quale il woofer è tagliato è la frequenza di cross-over del filtro A. I segnali di frequenza più acuta



6 dB/ottava

$$L_4 = L_5 = \frac{R_0}{2\pi f_1} \quad L_6 = \frac{R_0}{2\pi f_2}$$

$$C_4 = C_5 = \frac{1}{2\pi f_2 R_0} \quad C_6 = \frac{1}{2\pi f_1 R_0}$$



12 dB/ottava

$$C_7 = C_{10} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_1 R_0} \quad C_8 = C_9 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_2 R_0}$$

$$L_7 = L_{10} = \frac{R_0}{2\pi f_2 \sqrt{2}} \quad L_8 = L_9 = \frac{R_0}{2\pi f_1 \sqrt{2}}$$

$$C_{11} = C_{12} = \frac{1}{2\pi f_1 R_0 \sqrt{2}} \quad C_{13} = C_{14} = \frac{1}{2\pi f_2 R_0 \sqrt{2}}$$

$$L_{11} = L_{13} = \frac{R_0 \sqrt{2}}{2\pi f_1} \quad L_{12} = L_{14} = \frac{R_0 \sqrt{2}}{2\pi f_2}$$

Figura 4.6 — Reti di filtri cross-over a resistenza costante per sistemi a tre vie.

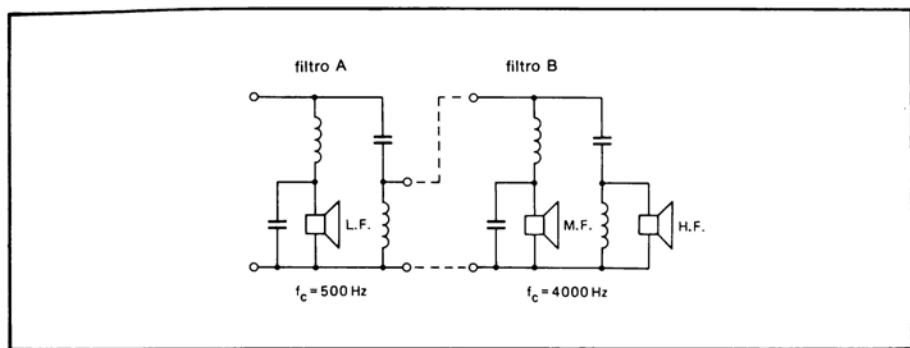


Figura 4.7 — Approccio alternativo al progetto dei filtri a tre vie.

alimentano il filtro B attraverso i terminali "tweeter" del filtro A. La gamma acuta di frequenza è divisa tra midrange e tweeter in accordo con le frequenze di cross-over del filtro B. Questo metodo è molto semplice e offre facilmente eccellenti risultati.

4.6. EFFETTO DELL'IMPEDENZA DELL'ALTOPARLANTE

Noi abbiamo supposto che l'altoparlante costituisca, per il filtro cross-over, un carico costante e puramente resistivo.

In pratica esso varia con la frequenza a causa dell'induttanza e dell'impedenza di moto della bobina mobile. Alla risonanza l'impedenza è alta, e cade rapidamente all'aumentare della frequenza dopo di che aumenta ancora, ma più lentamente. L'effetto delle variazioni di impedenza sulle caratteristiche del filtro, tenuto anche conto della risposta in frequenza, suggerisce che, per ottenere una risposta in frequenza piatta nella zona di cross-over, si può utilizzare un filtro "asimmetrico", cioè un filtro con pendenza d'attenuazione diversa per ciascuna via: 6 dB/oct. per il woofer e 12 dB/oct. per il canale dei toni alti. Vediamo ora un altro metodo per compensare le variazioni di impedenza degli altoparlanti. L'impedenza dell'altoparlante vista dalla rete di cross-over può essere resa discretamente costante mediante l'uso della rete di compensazione illustrata in figura 4.8. L'impedenza di tutti gli altoparlanti aumenta all'aumentare della frequenza, diventando più induttiva. Essa può essere riportata a resistiva aggiungendo un circuito RC-serie in parallelo all'altoparlante. Benché non sia perfetto, la scelta dei valori di R e di C mediante calcoli e successivi esperimenti danno luogo a un'impedenza globale ragionevolmente costante su almeno un'ottava sopra e una sotto dalla frequenza di cross-over, che è la zona più critica.

Un metodo approssimato per la determinazione di R e di C della rete linearizzatrice dell'impedenza può essere il seguente.

Si determina, sul grafico che dà l'impedenza in funzione della frequenza dell'altoparlante in esame, la frequenza, che chiameremo f_1 , per la quale l'impedenza sale ad un valore pari a circa 1,5 volte il suo valore nominale Z_{nom} .

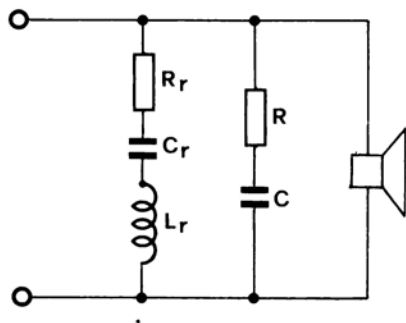
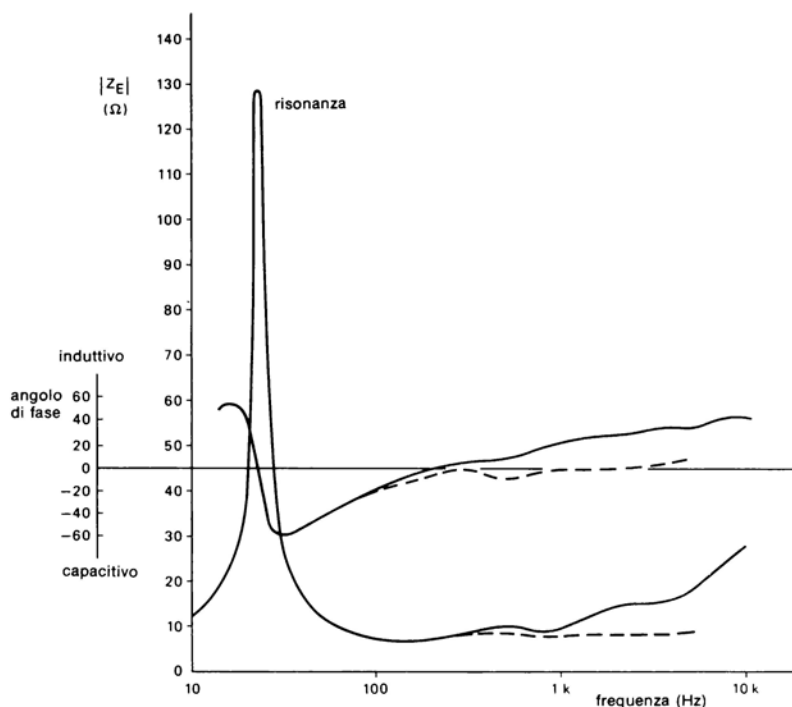


Figura 4.8 — L'impedenza di un altoparlante varia considerevolmente con la frequenza. Il circuito RC in parallelo all'altoparlante riduce la componente induttiva e l'angolo di sfasamento dell'impedenza in modo che l'impedenza dell'altoparlante si avvicini alla sua resistenza nominale. I valori di R e C possono essere scelti inizialmente calcolandoli usando le caratteristiche dell'altoparlante date dal costruttore, e quindi modificandoli sperimentalmente.

La capacità C la calcoleremo mediante la seguente formula:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_1} \cdot$$

Dove $R = 1,5 \cdot Z_{nom}$.

Un altro punto in cui l'impedenza dell'altoparlante subisce una notevole variazione è alla risonanza. Anche qui la risposta in frequenza di un filtro al quale è applicato l'altoparlante può subire una notevole variazione rispetto al caso di determinazione resistiva.

Per evitare ciò, si può usare in parallelo all'altoparlante una rete risonante RLC che dia luogo ad un'impedenza con un andamento speculare a quello della risonanza dell'altoparlante. Questo circuito è consigliabile per il mid-range e per il tweeter, mentre è inutile per il woofer, in quanto il filtro cross-over taglia il segnale inviato a tale trasduttore solo alle alte frequenze, mentre alle basse, e quindi alla risonanza, è quasi come se non ci fosse. Perciò le variazioni di impedenza del woofer in tale zona non comportano variazioni della tensione ai suoi capi.

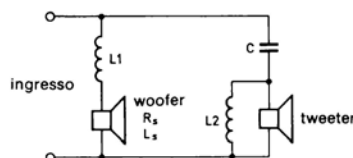


Figura 4.9 — L'induttanza L_1 è in serie alla bobina mobile del woofer. Il valore di tale componente si riduce in pratica al valore L'_1 dato da $L'_1 = L_1 - L_s$. L'induttanza L_s è quella della bobina mobile alla frequenza di cross-over. L_1 è il valore teorico calcolato nel progettare il filtro considerando l'altoparlante una resistenza pura.

Vediamo ora un calcolo approssimato di R_r , L_r e C_r , che sono i componenti della rete in esame il cui schema è illustrato in figura 4.8.

Prima di tutto occorre conoscere le seguenti caratteristiche dell'altoparlante:

- 1) frequenza di risonanza f_r ;
- 2) fattore di merito Q_t ;
- 3) valore massimo dell'impedenza alla risonanza Z_{max} ;
- 4) impedenza media (nominale) dell'altoparlante Z_{nom} .

Esse possono essere dedotte dalle caratteristiche del trasduttore fornite dalla costruttrice, oppure possono essere misurate sperimentalmente, come verrà descritto in seguito.

Una volta in possesso di tali dati possiamo calcolare R_r , L_r e C_r mediante le seguenti formule:

$$R_r = \frac{Z_{\max} \cdot Z_{\text{nom}}}{Z_{\max} - Z_{\text{nom}}}$$

$$C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot Q_t \cdot R_r}$$

$$L_r = \frac{Q_t \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot f_r} \quad .$$

Si potrà poi valutare il grado di linearizzazione ottenuto misurando la nuova caratteristica di impedenza. Occorre evitare che essa raggiunga valori minimi troppo bassi, ripetendo eventualmente i calcoli ponendo per Z_{nom} un valore più elevato. Mediante queste relazioni e, eventualmente, qualche aggiustamento sperimentale, sono facilmente ottenibili curve di impedenza lineari entro 2 ohm da 20 a 20.000 Hz.

ESEMPIO DI CALCOLO:

caratteristiche dell'altoparlante:

$$f_1 = 2 \text{ KHz}; Z_{\text{nom}} = 4 \text{ ohm}; f_r = 250 \text{ Hz}; Q_t = 1; Z_{\max} = 10 \text{ ohm};$$

da cui otterremo:

$$R = 4 \cdot 1,5 = 6 \text{ ohm}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 2000} = 0,0000133 \simeq 13 \text{ } \mu\text{F}$$

$$R_r = \frac{10 \cdot 4}{10 - 4} \simeq 6,6 \text{ ohm}$$

$$C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 1 \cdot 6,6} = 0,0000965 \simeq 100 \text{ } \mu\text{F}$$

$$L_r = \frac{1 \cdot 6,6}{2 \cdot \pi \cdot 250} = 0,0042 = 4,2 \text{ mH}.$$

4.7. RISPOSTA IN FASE

È essenziale che la risposta in fase di un filtro cross-over sia accuratamente considerata. La rete di cross-over, composta di elementi reattivi, introduce cambiamenti di fase nel sistema. In una sezione a singolo elemento, quando la frequenza aumenta dal punto di cross-over, la variazione di fase tra l'ingresso e l'uscita si approssima ai meno 90° per il woofer, mentre l'uscita delle alte frequenze (per il tweeter) tende a diventare in fase con l'ingresso. Così, quando la frequenza decresce dal punto di cross-over, la fase dell'uscita ad alta frequenza si avvicina ai + 90° relativamente all'ingresso, mentre l'uscita delle basse frequenze tende a diventare in fase con l'ingresso. Come possiamo vedere in figura 4.10, la differenza di fase tra l'ingresso e le uscite alla frequenza di cross-over è di 45° e c'è una differenza di fase costante pari a 90° tra le due uscite.

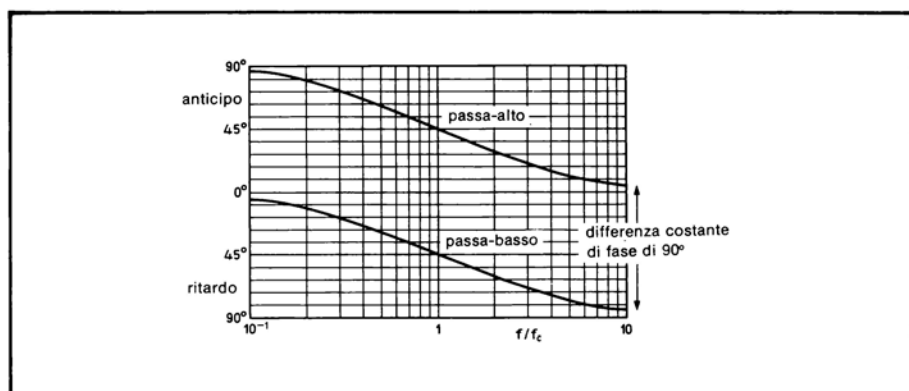


Figura 4.10 — Differenza di fase delle uscite rispetto all'ingresso per un filtro a 6 dB/ottava chiuso sull'appropriata resistenza.

La somma dei segnali alle uscite del filtro cross-over a 6 dB/oct. dà luogo ad una risposta in frequenza e fase ideale; identica a quella del segnale entrante. Dagli altri filtri (a 12 o, peggio, 18 dB/oct.) non si possono ottenere queste ottime prestazioni. Il 6 dB/oct. è dunque, a mio avviso, per applicazioni HI-FI, il filtro da preferire, a patto che si abbiano a disposizione altoparlanti con una risposta in frequenza alquanto più ampia di quella che sono chiamati a riprodurre; almeno di due ottave. Se questo non avviene, conviene utilizzare filtri a pendenza più elevata, a 12 dB/oct.. In figura 4.11 abbiamo la risposta in fase di tali filtri. Le differenze di fase tra le uscite è 180° e c'è uno sfasamento di 90° tra l'ingresso e le uscite alla frequenza di cross-over. A volte, nel caso del 12 dB/oct., bisogna agire per prevenire la condizione di controfase che può portare alla cancellazione acustica del segnale. Con una rete avente 180° di differenza di fase tra le uscite si può semplicemente invertire le connessioni di uno degli altoparlanti.

La bobina mobile è elettricamente alimentata in controfase, quindi è invertita e il movimento del cono è in fase a quello dell'altro altoparlante connesso al filtro.

Un altro metodo atto ad evitare la cancellazione del segnale dovuta alla situazione di controfase, è quello di incrociare i due filtri adiacenti a -1 dB anziché a -3 dB. Questo si può ottenere calcolando il filtro passa-basso ad una frequenza di circa 1,4 volte più elevata di quella di incrocio; cioè, se f_t è la frequenza di incrocio a -1 dB, la nuova frequenza di taglio da utilizzare nei calcoli del filtro passa-basso sarà

$$f_t = f_t \cdot 1,4.$$

Il passa alto sarà invece calcolato a una frequenza 1,4 volte più bassa, cioè a

$$f_t = \frac{f_t}{1,4}.$$

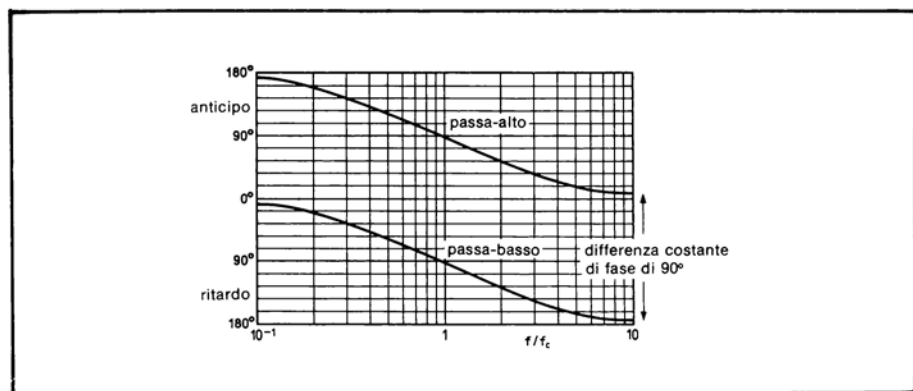


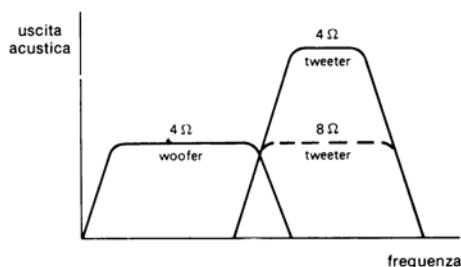
Figura 4.11 — Differenze di fase tra le uscite e l'ingresso di un filtro cross-over a due elementi terminato sull'appropriata resistenza.

Dunque la questione della fase è di grande importanza ed è usuale dare un'indicazione di polarità ai terminali della bobina mobile. Quando una tensione continua è applicata alla bobina mobile in modo che il connettore indicato positivo dell'altoparlante è connesso al terminale positivo della tensione, il cono si muove in avanti. Le curve delle figure 4.10 e 4.11 sono applicabili solo quando le reti terminano su resistori. Ne consegue che tutto ciò che abbiamo detto intorno al responso in fase sarà modificato dall'angolo di fase dell'altoparlante alla frequenza di cross-over; (differenza di fase tra la tensione ai capi della bobina e la corrente che la attraversa). Un esempio della variazione dell'angolo di fase e del valore dell'impedenza di un altoparlante in funzione della frequenza è mostrato in figura 4.8.

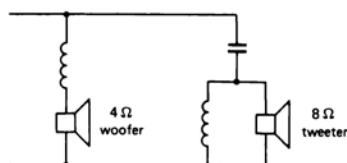
4.8. OTTENIMENTO DEL RESPONSO LINEARE

Per ottenere una transizione lineare tra un altoparlante e un altro è importante selezionarli in modo che la loro differenza di sensibilità sia contenuta entro circa

2 dB. Una maggiore differenza causerà un "gradino" udibile nella risposta come illustrato in figura 4.12 (a). Nel caso in cui le sensibilità degli altoparlanti siano diverse e non esistano elementi di sensibilità simile, l'altoparlante con sensibilità mag-



(a)



(b)

Figura 4.12 — Altoparlanti con differenti sensibilità usati nello stesso sistema danno luogo a un gradino nel responso totale del sistema (a). Questo può essere superato riducendo la sensibilità dell'altoparlante per le note acute sostituendo con un tipo simile di impedenza maggiore (b). In tal modo si otterrà un responso totale piatto e un aumento della potenza nominale del sistema.

giore può essere sostituito con un tipo simile ma con impedenza più elevata (vedi figura 4.12 (b)). Questo darà luogo ad una riduzione della potenza entrante e quindi dell'uscita acustica. Lo stesso effetto può essere ottenuto inserendo resistori di basso valore, di adatta potenza, in serie all'altoparlante di sensibilità più elevata. Si possono inoltre combinare entrambi i metodi. È poi necessario assicurare che un altoparlante sia capace di trattare correttamente il segnale anche al di là della frequenza di cross-over. Se i due altoparlanti hanno risposte in frequenza che non si sovrappongono apprezzabilmente, quando essi saranno connessi attraverso un filtro che introduce ulteriori 3 dB di attenuazione alla frequenza di cross-over, la risposta in frequenza totale presenterà un avvallamento in corrispondenza di tale punto. Questo è mostrato in figura 4.13.

Il fondamentale obiettivo del progetto di un filtro cross-over è quello di ottenere il migliore accostamento delle caratteristiche acustiche dei differenti altoparlanti che compongono il sistema. Questo può dar luogo ad alcune modifiche del tipo

standard di filtro già discusso. Un esempio di questo è illustrato nelle figure 4.14 e 4.15. La curva di pressione sonora del woofer e del tweeter misurati sull'asse è mostrata in figura 4.14 (b). Usando un filtro di tipo convenzionale con frequenze di cross-over pari a 2000 Hz si ottiene una risposta del sistema con un picco nella regione di cross-over perchè le caratteristiche in frequenza di entrambi gli altoparlanti sono relativamente elevate in tale zona. Questo è illustrato in figura 4.14c. Il picco può essere evitato scegliendo una frequenza di taglio più bassa per il woofer e più elevata per il tweeter come si vede in figura 4.15. È chiaro che c'è ora una differenza tra i punti a -3 dB e le frequenze di cross-over dei filtri terminati su resistenze pure (2000 Hz) o su un altoparlante (1700 Hz).

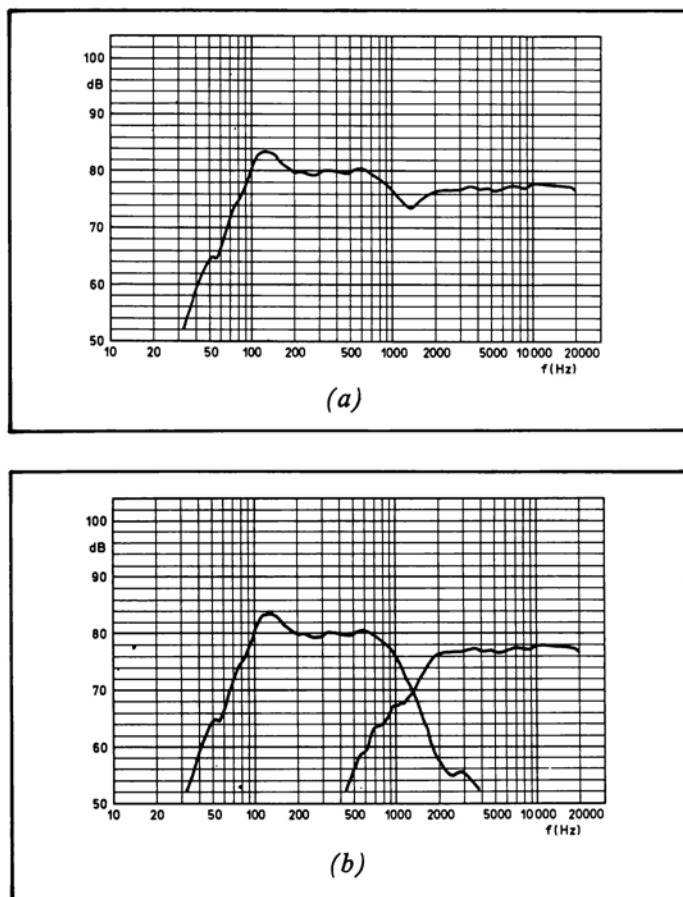


Figura 4.13 — (a) Risposta in frequenza di due altoparlanti con caratteristiche che si sovrappongono in maniera insufficiente. (b) Responso dei singoli componenti. Notare l'abbassamento della curva al punto di cross-over.

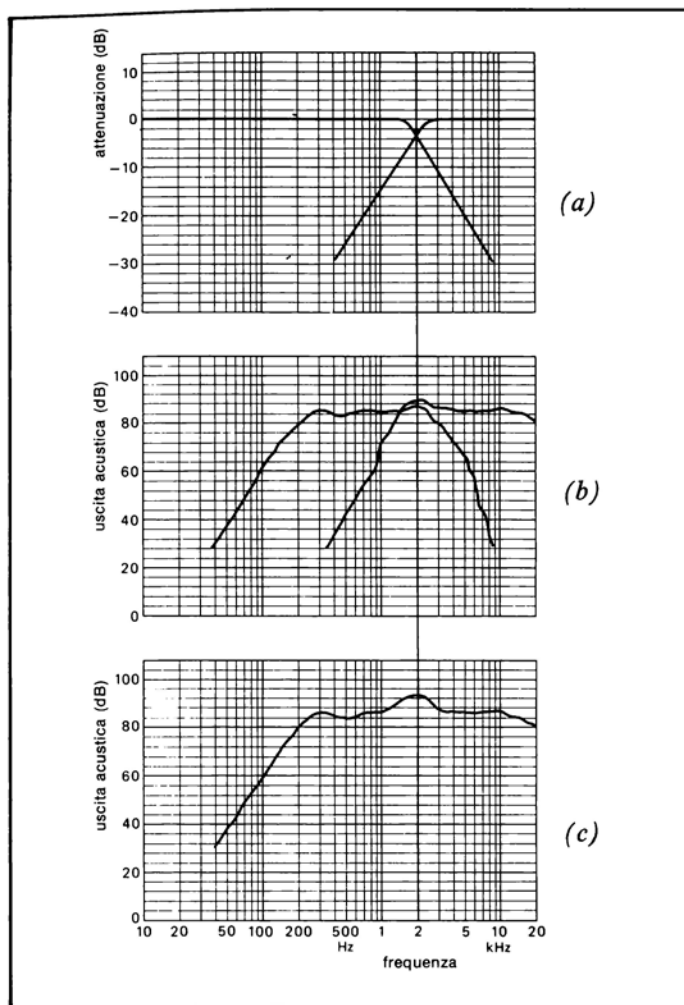


Figura 4.14 — (a) Caratteristiche ideali di un filtro cross-over. (b) Risposta in frequenza di due altoparlanti che mostrano entrambi un picco nella regione di cross-over. (c) Risposta totale del sistema filtro-altoparlanti delle figure (a) e (b), notare il picco alla frequenza di cross-over.

Il filtro cross-over deve essere progettato tenendo in conto sia gli altoparlanti che il box usato. Seguono poi le analisi preliminari e la costruzione del prototipo, misurando i risultati ottenuti con il filtro cross-over all'esterno del box. Così facendo si potranno variare facilmente parametri del filtro e/o invertire le connessioni degli altoparlanti fino ad ottimizzare le prestazioni.

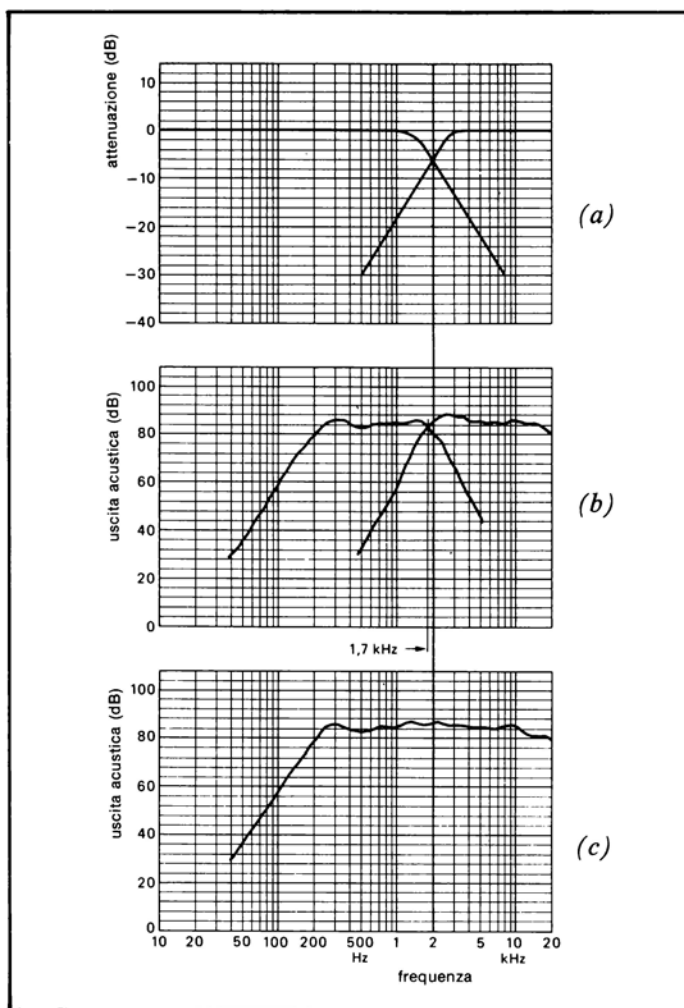


Figura 4.15 — Risposta in frequenza del filtro di figura 4.14 (a) riprogettato in modo da ottenere una precoce caduta della risposta del woofer e un aumento della frequenza di taglio del tweeter. (b) La frequenza di cross-over del filtro chiuso sugli altoparlanti diventa 1700 Hz e la risposta in frequenza totale del sistema (c) è molto lineare.

4.9. ATTENUATORE A IMPEDENZA COSTANTE

Per poter utilizzare altoparlanti aventi diverse efficienze, o per adattare meglio uno stesso diffusore ad ambienti aventi differenti caratteristiche acustiche, possono essere utili partitori che riducono la tensione entrante in un trasduttore. Poichè

i filtri che abbiamo calcolato precedentemente sono in funzione dell'impedenza di carico, occorre che tale impedenza non vari anche agendo sull'attenuatore, che sarà posto tra il filtro e l'altoparlante.

Per far lavorare correttamente l'attenuatore, il trasduttore dovrà essere completo delle reti linearizzatrici dell'impedenza viste precedentemente. Se Z_{nom} è l'impedenza nominale dell'altoparlante e A_v è il rapporto tra la tensione entrante nel partitore e quella uscente, abbiamo (vedi figura 4.16):

$$A_v = \frac{V_2}{V_1}$$

$$R_1 = \frac{Z_{nom} \cdot A_v}{1 - A_v}$$

$$R_2 = Z_{nom} - \frac{R_1 \cdot Z_{nom}}{R_1 + Z_{nom}} \quad .$$

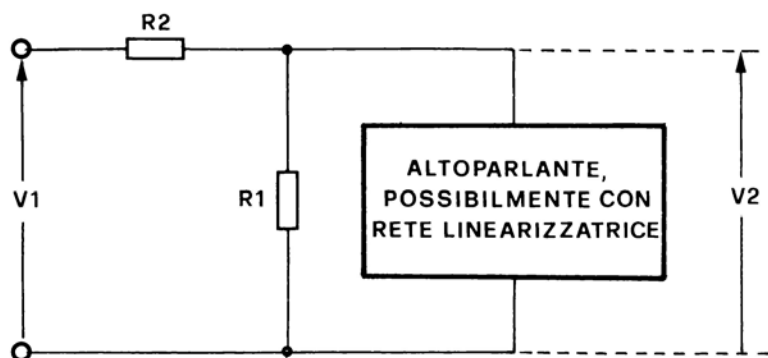


Figura 4.16 — Schema dell'attenuatore a impedenza costante.

Se, ad esempio, vogliamo realizzare un partitore che attenni di 3 dB il segnale entrante, occorrerà prima trasformare il guadagno in dB ($A_{v_{dB}}$) nel corrispondente guadagno A_v , e quindi calcolare R_1 e R_2 .

Questa tecnica di partizione della tensione da inviare all'altoparlante si può applicare solo per mid-range e tweeter. Infatti quest'ultimo deve lavorare con un'impedenza vista dai suoi morsetti la più bassa possibile in modo da essere ottimamente smorzato.

Per questo motivo è utile scegliere un woofer o con efficienza minore o con impedenza maggiore di mid e tweeter. Il maggior livello sonoro sviluppato da questi ultimi altoparlanti può essere poi diminuito dal partitore qui descritto. In alcuni casi

(ambienti molto assorbenti) sarà invece necessario non attenuare il segnale che arriva agli altoparlanti delle vie alte per riequilibrare la gamma sonora, altrimenti carente in tale zona.

Un metodo più semplice di diminuire la potenza inviata ad un traduttore è quello illustrato in figura 4.17. Questo sistema non mantiene costante l'impedenza vista dal filtro al variare dell'attenuazione.

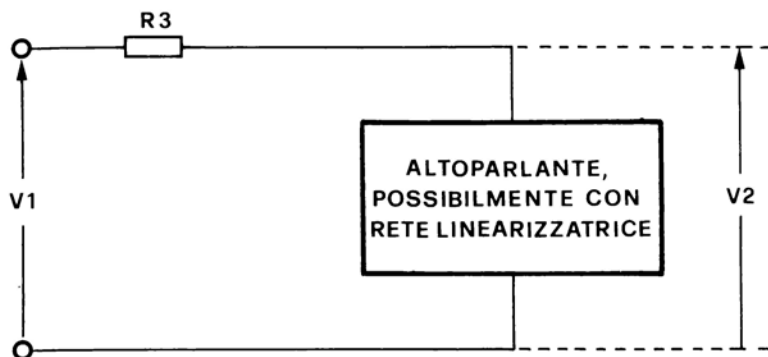


Figura 4.17 — Schema dell'attenuatore semplificato.

Pur essendo dunque meno preciso del precedente, è usato molto spesso in virtù della maggiore semplicità.

La resistenza R_3 è data dalla seguente relazione:

$$R_3 = \frac{Z_{nom}}{A_v} - Z_{nom}.$$

ESEMPIO DI CALCOLO

Abbiamo un altoparlante avente $Z_{nom} = 4 \text{ ohm}$; vogliamo realizzare un partitore che dia i seguenti valori di attenuazione: 0, -1,5, -3 dB.

| $A_{v_{dB}}$ | A_v | R_1 | R_2 | R_3 |
|--------------|-------|----------|----------|----------|
| 0 | 1 | ∞ | 0 | 0 |
| -1,5 | 0,84 | 21 ohm | 0,64 ohm | 0,76 ohm |
| -3 | 0,707 | 9,6 ohm | 1,17 ohm | 1,65 ohm |

R_1 e R_2 si riferiscono al partitore a impedenza costante, R_3 si riferisce al partitore semplificato. Le resistenze potranno essere del tipo a filo da circa 5 W. La formula che mette in relazione $A_{v_{dB}}$ ad A_v è la seguente:

$$\left(\frac{A_{v_{dB}}}{20} \right) \quad A_v = 10.$$

4.10. SCELTA DEI COMPONENTI DEL FILTRO

Una volta calcolati i valori di induttanze e condensatori necessari alla realizzazione dei filtri, occorre scegliere il tipo di tali componenti. Come si sa le bobine e i condensatori reali sono ben lontani dall'essere perfetti. A prescindere dalle tolleranze sul valore nominale, essi manifestano caratteristiche più complesse di quelle di una semplice bobina o di un condensatore. I circuiti equivalenti semplificati di tali elementi reali sono illustrati in figura 4.18.

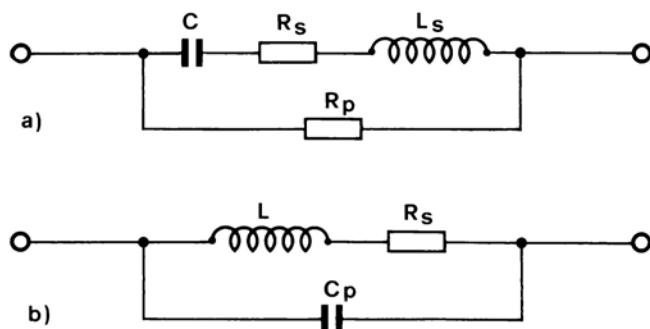


Figura 4.18 — (a) Circuito equivalente di una capacità reale; b) circuito equivalente di una induttanza reale.

Nel nostro caso di tutti questi effetti parassiti sono importanti solo quelli relativi alle resistenze-serie R_s . La caduta di tensione su R_s dà luogo ad una diminuzione di potenza inviata al carico e a un comportamento del filtro diverso da quello da noi calcolato. Per esempio, supponiamo di avere un condensatore da 10 microF. con una $R_s = 1$ ohm che alimenta un altoparlante da 5 ohm. La frequenza di taglio da noi calcolata è pari a 3183 Hz, mentre quella reale, dato che la resistenza effettiva in serie al condensatore è di $5 + 1 = 6$ ohm, diventa 2652 Hz. Nel caso del filtro a 12 dB/oct., oltre a questi effetti, abbiamo una variazione del fattore di merito Q dello stesso.

Occorre utilizzare quindi C ed L con il più basso valore di R_s possibile.

BOBINE

Le bobine si dovranno costruire. Per ottenere bassi valori di R_s occorrerà utilizzare fili di grosso diametro, ed, eventualmente, nuclei di materiale ferromagnetico all'interno dell'avvolgimento in modo da aumentare l'induttanza a parità di numero di spire, e quindi di diminuire la lunghezza del filo necessario. Anzichè usare formule, spesso di difficile applicazione, ho realizzato tabelle che, per bobine costruite in determinati modi, danno il numero di spire necessario ad ottenere un certo valore di induttanza.

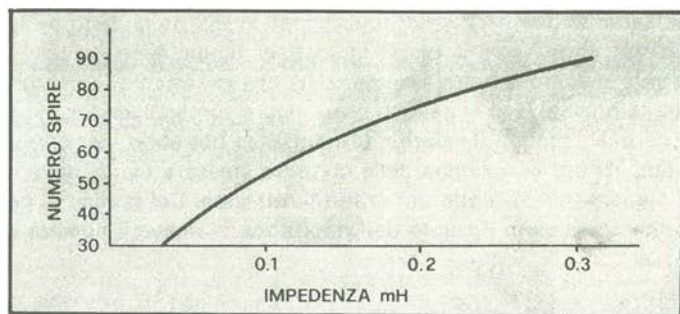


Figura 4.19 — Impedenza in funzione del numero spire di una bobina realizzata nel modo indicato in figura 4.21 (a).

Le figure 4.19 e 4.20 illustrano le tabelle che si riferiscono a bobine costruite nel modo indicato in figura 4.21.

Le prime, costituite da un nucleo di ferrite di 1 cm di diametro e 5 cm di lunghezza sono per bobine di valore basso e medio. Le seconde, realizzate con il nucleo di ferrite da 1 cm di diametro e 10 cm di lunghezza sono per bobine di induttanza medio alta. I nuclei di ferrite sono del tipo normalmente usato nelle radio a modulazione di ampiezza. Il filo impiegato è del tipo smaltato da 0.8 mm di diametro.

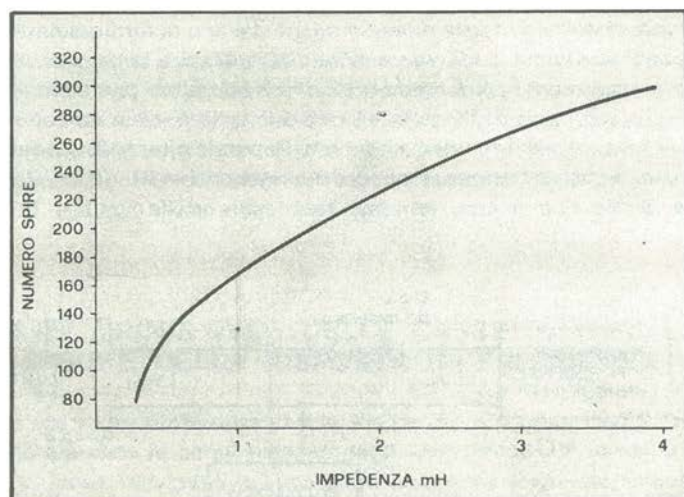


Figura 4.20 — Impedenza in funzione del numero spire di una bobina realizzata nel modo indicato in figura 4.21 (b).

Le bobine saranno avvolte a strati sovrapposti aventi un numero massimo di spire per ciascuno strato pari a quelli indicati in figura 4.21.

Tra uno strato e l'altro è bene avvolgere del nastro isolante in modo da rendere più compatta la bobina. Non si devono usare nuclei toroidali (che si chiudono su se stessi) perché così facendo il valore dell'induttanza potrebbe, per correnti relativamente elevate, variare in funzione della corrente stessa a causa della saturazione del nucleo. Questo non succede per le ferriti rettilinee. Dal grafico di figura 4.19 o 4.20, una volta conosciuto il valore dell'induttanza, si ricava il numero di spire ne-

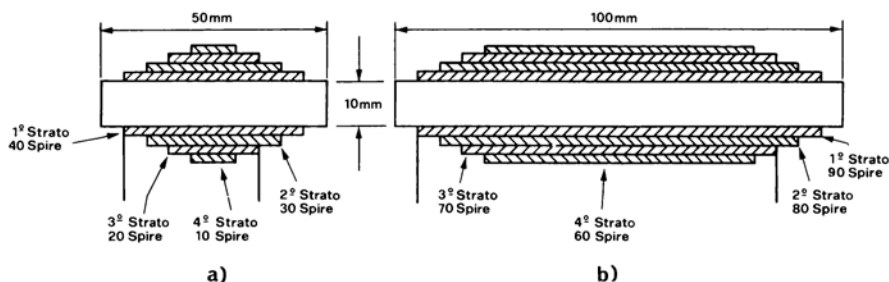


Figura 4.21 — Costruzione delle bobine (sezione). (a) Relativa al grafico di figura 4.19. (b) Relativa al grafico di figura 4.20.

cessario alla sua realizzazione. Questo numero dovrà essere preso come indicativo in quanto il valore dell'induttanza dipende anche dal tipo di ferrite e dal modo in cui si è fatta la bobina. Quindi si avvolgerà circa il 10% di spire in più e si collegherà la bobina ad un circuito del tipo di figura 4.22 con R_1 di valore pari a circa 50 R_s , dove R_s è la resistenza seria dell'induttanza che può essere misurata con un ohmetro in grado di effettuare misure in decimi di ohm. Sapendo che, se L è il valore dell'induttanza che ci serve, la frequenza a -3 dB è data da $f = R_1 : (2 \cdot \pi \cdot L)$, si svolgeranno spire di filo fino a che, per tale frequenza, si ha $V_{out} = 0,7 V_{in}$.

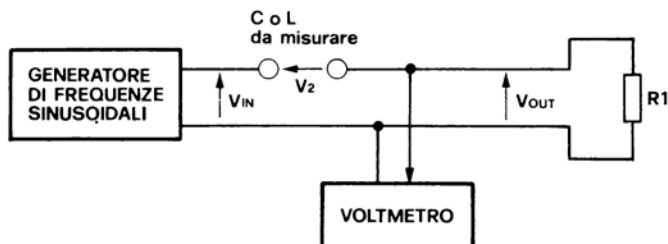


Figura 4.22 — Circuito per la misura di induttanza e capacità.

A questo punto si fisserà la bobina.

Non volendo utilizzare nuclei di ferrite, è possibile realizzare bobine avvolte "in aria", sfruttando come supporto un rocchetto di opportune dimensioni. Esistono già parecchie pubblicazioni che riportano tabelle o formule dalle quali si possono ricavare le informazioni necessarie per la costruzione delle bobine, per cui non mi dilungo oltre su questo argomento.

CAPACITÀ

I condensatori che offrono il minor valore di R_s sono i tipi non elettrolitici, a carta o in polyester. A questi tipi bisogna rivolgersi tutte le volte che è possibile, in pratica fino a valori attorno ai 10-20 microfarad. Per capacità superiori si è costretti a passare o ai tipi elettrolitici non polarizzati, che però sono di scarsa reperibilità, o ai normali elettrolitici da 50 o più volt di tensione di lavoro. In quest'ultimo caso, dato che la tensione ai quali sono sottoposti è alternata, occorre collegarli a due a due in coppia di valore uguale con i terminali contrapposti (+—, —+). La capacità del condensatore non polarizzato risultante è pari alla metà di quella di ciascun condensatore della serie. Le capacità possono essere anche poste in parallelo per ottenere il valore desiderato. Il circuito di figura 4.22 può essere utilizzato anche per la misura di C , considerando che la frequenza a -3 dB è data da $f = 1/(2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C)$.

COSTRUZIONE DEL FILTRO

I componenti del filtro cross-over possono essere montati su una basetta di circuito stampato o utilizzando ancoraggi del tipo usati un tempo per i montaggi dei circuiti a valvole.

La basetta andrà fissata all'interno della cassa. Se si ha intenzione di effettuare modifiche successive, la si potrà fissare all'esterno della stessa, facendo fuoriuscire i fili di collegamento degli altoparlanti e sigillando i fori di passaggio per evitare di perdere l'ermeticità della cassa. È molto importante che i vari componenti del filtro siano meccanicamente molto stabili, in modo da evitare vibrazioni indesiderate. Si potranno ad esempio fissare con del collante.

4.11. FILTRI CROSS-OVER DELLE CASSE IN ESAME E MISURE DELLA RISPOSTA IN FREQUENZA

Vedremo ora i filtri cross-over che la Philips ha progettato per le tre casse di cui abbiamo già visto le caratteristiche degli altoparlanti utilizzati e le dimensioni dei box. Essi sono improntati ad una certa semplicità circuitale, non prevedendo circuiti di linearizzazione dell'impedenza né attenuatori variabili. A volte sono assenti le celle dei filtri passa basso, affidando il taglio delle alte frequenze al comportamento dell'altoparlante in tale gamma. Questi filtri sono frutto di notevoli mo-

difiche in sede di ottimizzazione della risposta in frequenza e di ascolto effettivo del diffusore, per cui spesso i valori dei componenti usati differiscono dai valori che si otterrebbero usando i procedimenti descritti nel paragrafo 4.

È comunque possibile, volendo, utilizzare filtri più complessi, usando gli accorgimenti descritti nell'articolo, con i quali, se il lavoro viene fatto con cura, si potrebbero ottenere risultati globali anche superiori di quelli, già ottimi, ottenibili dai filtri che ora vado a descrivere.

CASSA 1

Elenco componenti per la versione a 4 ohm dello schema di figura 4.23:

$L1 = 0,5 \text{ mH}$

$L2 = 0,2 \text{ mH}$

$C1 = 8 \text{ microF.}$

Elenco componenti per la versione a 8 ohm:

$L1 = 0,8 \text{ mH}$

$L2 = 0,5 \text{ mH}$

$C1 = 3,3 \text{ microF.}$

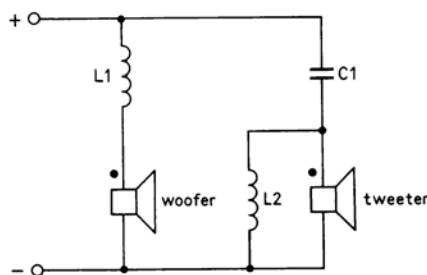


Figura 4.23 — Filtro cross-over adatto alla cassa 1.

Dal grafico di figura 4.24, si può vedere che il punto di cross-over del passa basso ($\sim 1,5 \text{ KHz}$) differisce da quello del passa alto ($\sim 4 \text{ KHz}$).

Si ha quindi un incrocio di tipo "aperto". Questa situazione viene attenuata dal fatto che le curve della figura suddetta sono relative al caso di terminazione resistiva, mentre pilotando gli altoparlanti vengono in parte modificate. In particolare l'induttanza della bobina mobile del woofer tende a spostare in avanti il taglio del passa basso; inoltre il woofer utilizzato ha un'efficienza maggiore alle frequenze medie che alle basse (vedi figura 2.25). All'ascolto della cassa si nota una leggera flessione delle frequenze medio-alte, che dà luogo comunque ad una riproduzione piuttosto piacevole, effettuando automaticamente una sorta di controllo "loudness".

In figura 4.25 abbiamo la risposta in camera anecoica della cassa in esame assieme ai residui di distorsione di seconda e terza armonica.

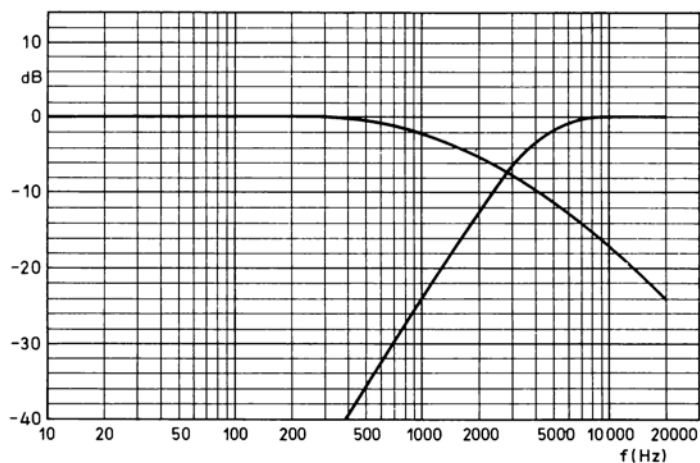


Figura 4.24 — Risposta in frequenza del filtro di figura 4.23 su carico resistivo.

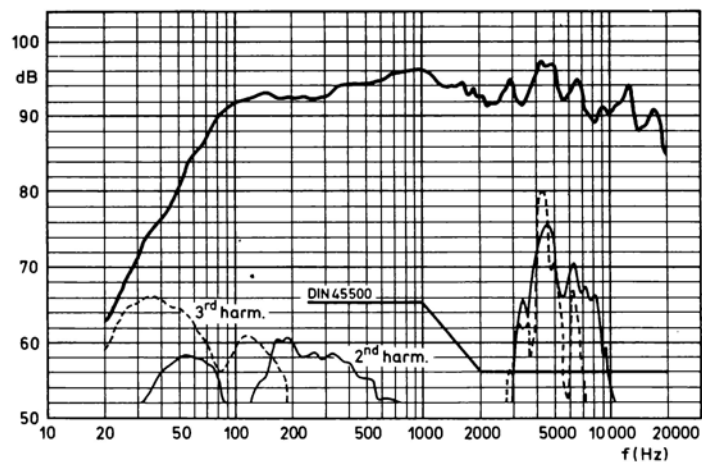


Figura 4.25 — Risposta in frequenza e distorsione misurate in camera anecoica.

In figura 4.26 abbiamo la risposta in frequenza della cassa in un ambiente riverberante. Questa misura si realizza pilotando il diffusore con rumore rosa e, mediante un analizzatore di spettro, si traccia la curva. L'altoparlante è situato nell'angolo di una stanza riverberante di 192,5 m³.

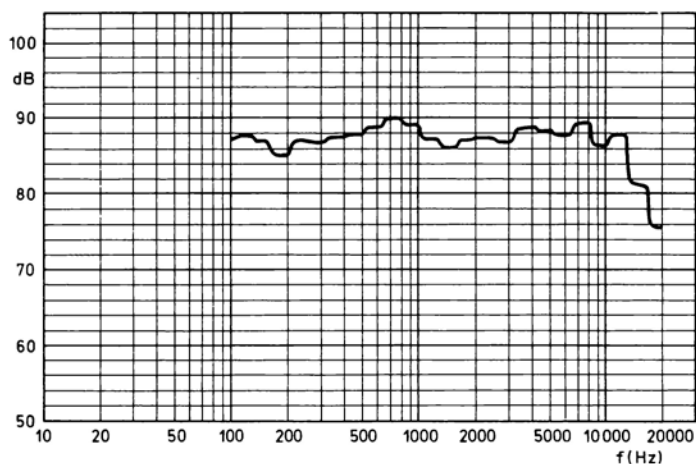


Figura 4.26 — Risposta in frequenza in ambiente riverberante.

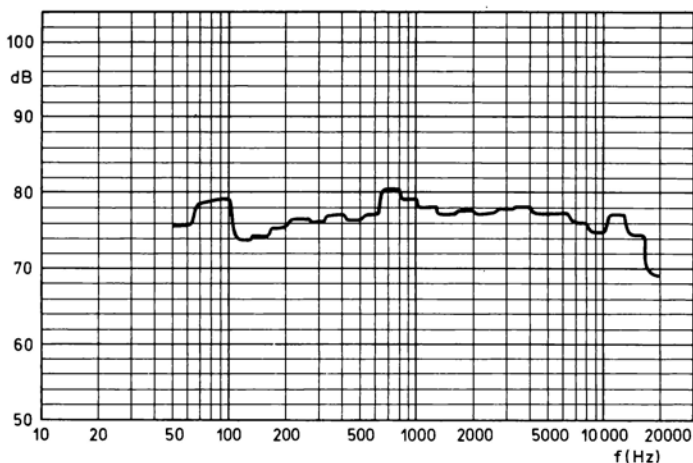


Figura 4.27 — Risposta in frequenza in un tipico ambiente domestico.

Infine, in figura 4.27, si può vedere la risposta in frequenza della cassa misurata in una tipica stanza d'ascolto domestica. Anche qui si utilizza rumore rosa. La stanza è di 4,8 m. di larghezza, 7,1 m. di lunghezza e 2,84 m. di altezza (volume = 97 m³).

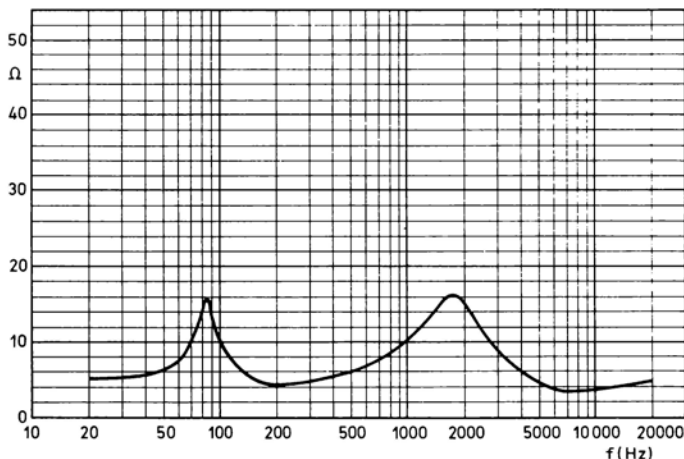


Figura 4.28 — Curva dell'impedenza relativa alla versione a 4 ohm della cassa 1.

Le misure di risposta in frequenza che abbiamo visto si fanno pilotando il diffusore alla potenza operativa, che in questo caso vale 9 W.

La potenza nominale è di 20 W. In figura 4.28 abbiamo la curva dell'impedenza, relativa alla versione a 4 ohm.

CASSA 2

Il filtro progettato dalla PHILIPS per questa cassa è illustrato in figura 4.29.

I valori dei componenti sono i seguenti:
versione a 4 ohm:

| | | |
|----------------|----------------|-----------------|
| L1 = 1 mH | L2 = 0,6 mH | L3 = 0,1 mH |
| C1 = 47 microF | C2 = 22 microF | C3 = 6,8 microF |
| R1 = 1,8 ohm | R2 = 1,2 ohm | R3 = 1,8 ohm |

versione a 8 ohm:

| | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $L1 = 2,1 \text{ mH}$ | $L2 = 1,2 \text{ mH}$ | $L3 = 0,2 \text{ mH}$ |
| $C1 = 22 \text{ microF}$ | $C2 = 10 \text{ microF}$ | $C3 = 3,3 \text{ microF}$ |
| $R1 = 3,9 \text{ ohm}$ | $R2 = 2,2 \text{ ohm}$ | $R3 = 3,9 \text{ ohm}$ |

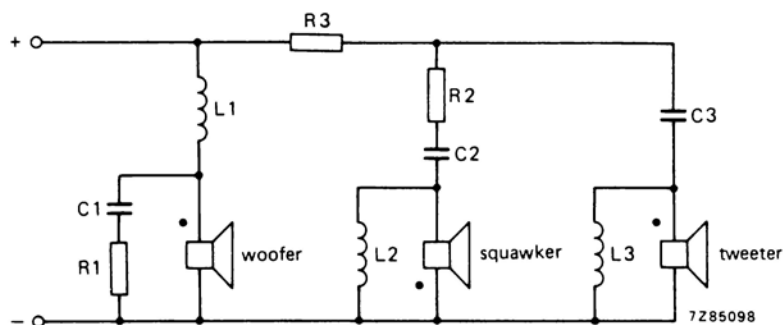


Figura 4.29 — Filtro cross-over per la cassa 2.

In figura 4.30 sono illustrate le risposte dei filtri su carico resistivo (linea continua) o sui propri altoparlanti (linea tratteggiata).

Le frequenze di cross-over sono a circa 1500 e 7000 Hz. Da notare che il mid range non è tagliato verso l'alto. Le resistenze R3 e R2 attenuano il segnale inviato

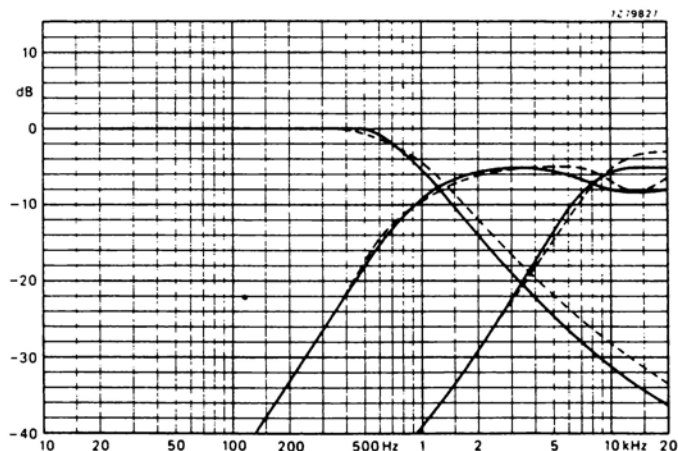


Figura 4.30 — Risposta in frequenza del filtro di figura 4.29. Linea continua = su carico resistivo; curva tratteggiata = filtro caricato sui rispettivi altoparlanti.

alle due vie superiori. Il mid range ha la polarità dei morsetti invertita rispetto agli altri due altoparlanti.

La potenza operativa di questo sistema di altoparlanti è di 7 W, mentre la potenza nominale è di 50 W.

Nelle figure 4.31, 4.32, 4.33 sono illustrate le risposte in frequenza della cassa nei tre casi già visti per la cassa 1.

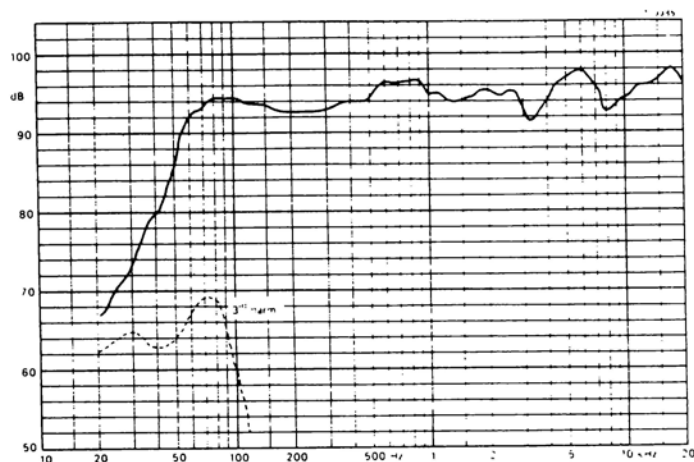


Figura 4.31 — Risposta in frequenza e distorsione misurate in camera anecoica.

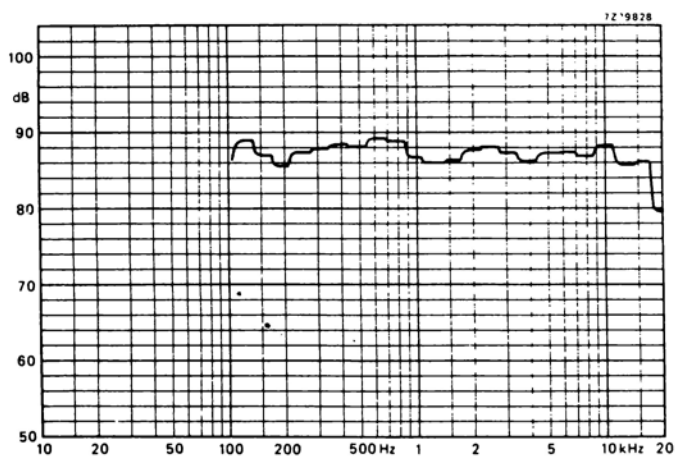


Figura 4.32 — Risposta in frequenza in ambiente riverberante.

In figura 4.34 è riportata la curva dell'impedenza nella versione da 8 ohm. Il suono di questo diffusore è estremamente buono, regolare ed esteso, con un notevole effetto presenza.

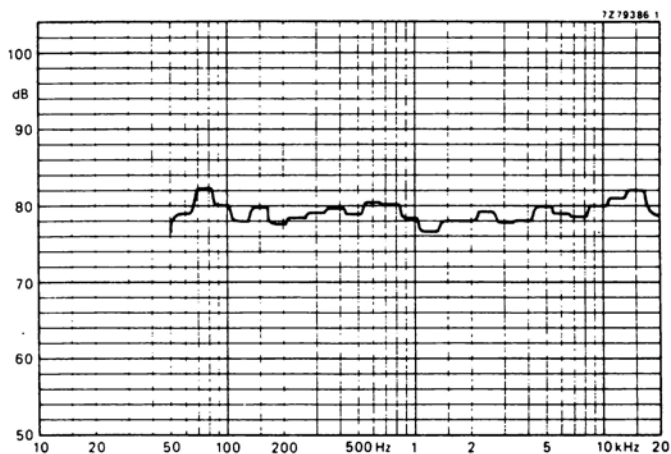


Figura 4.33 — Risposta in frequenza in un tipico ambiente domestico.

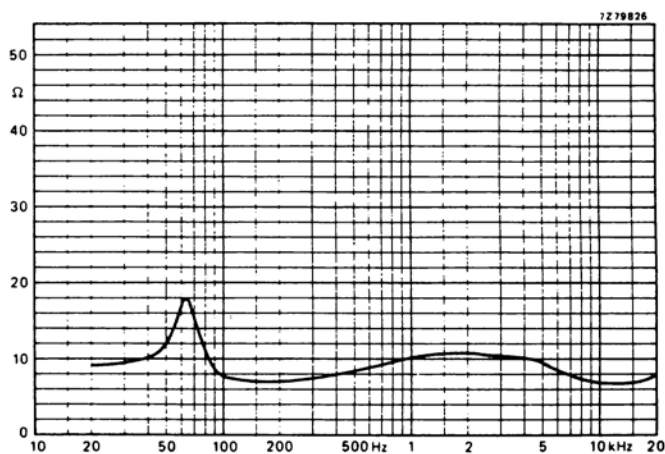


Figura 4.34 — Curva dell'impedenza relativa alla versione a 8 ohm della cassa 2.

In figura 4.35 è disegnato il filtro utilizzato per questo diffusore, e in figura 4.36 si può vedere la sua risposta in frequenza su carico resistivo e sui rispettivi altoparlanti. Il woofer è tagliato a 6 dB/oct. mentre mid e tweeter a 12 dB/oct. Non esiste passa basso per il mid range.

I valori dei componenti del filtro di questo sistema, che può essere realizzato solo nella versione utilizzando woofer da 8 ohm e mid e tweeter da 4 ohm, sono i seguenti:

| | | |
|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| $L1 = 4 \text{ mH}$ | $L2 = 0,8 \text{ mH}$ | $L3 = 0,35 \text{ mH}$ |
| $C1 = 15 \text{ microF}$ | $C2 = 3,3 \text{ microF}$ | $R1 = 6,8 \text{ ohm}$ |

Il mid range qui utilizzato ha una risposta in frequenza molto estesa verso le alte frequenze. Al tweeter è allora affidato il compito di riprodurre quel poco che manca al mid range nell'estremo superiore; ecco quindi spiegata la presenza della R1, di valore relativamente elevato.

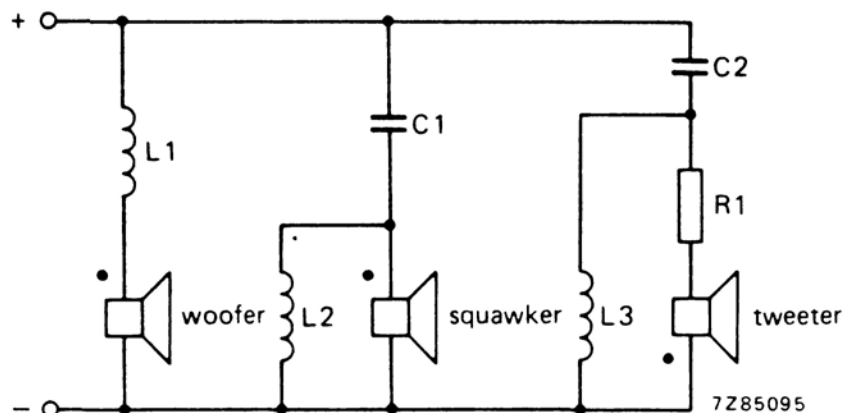


Figura 4.35 — Filtro cross-over adatto alla cassa 3.

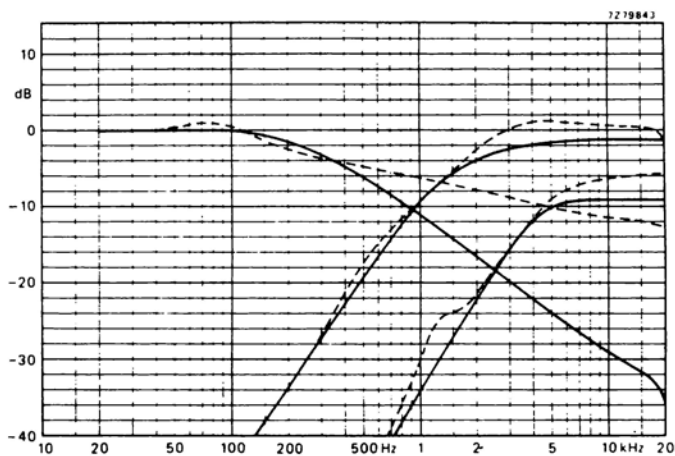


Figura 4.36 — Risposta in frequenza del filtro di figura 4.35. La linea tratteggiata si riferisce al caso di terminazione del filtro sui rispettivi altoparlanti; la linea continua al caso di terminazione resistiva.

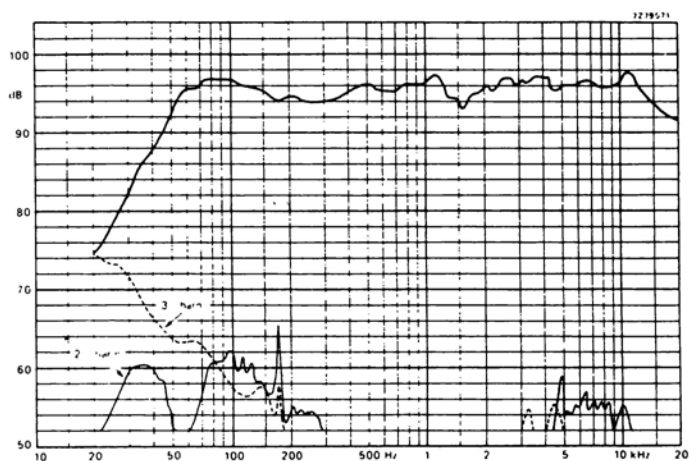


Figura 4.37 — Risposta in frequenza e distorsione misurate in camera anecoica.

Nelle figure 4.37, 4.38, 4.39 sono illustrate le risposte in frequenza del diffusore nei vari ambienti presi in considerazione.

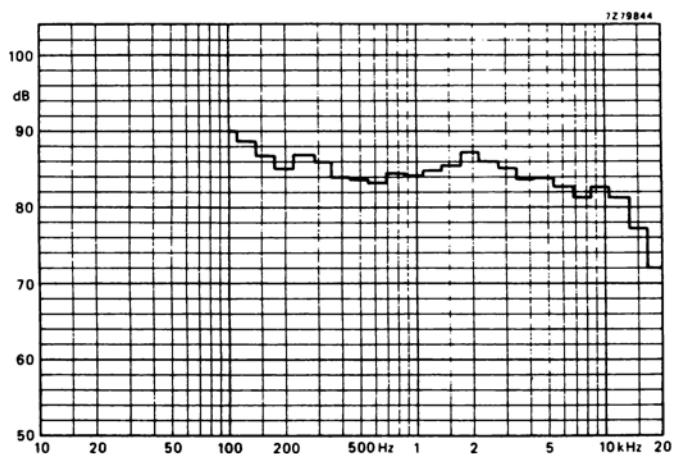


Figura 4.38 — Risposta in frequenza in ambiente riverberante.

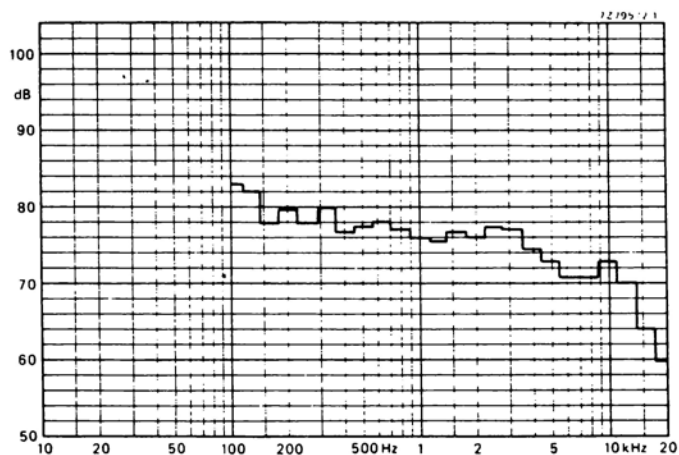


Figura 4.39 — Risposta in frequenza in un tipico ambiente domestico.

La potenza operativa è di 12 W, mentre la potenza nominale ammonta a 100 W. In figura 4.40 è disegnata la curva di impedenza.

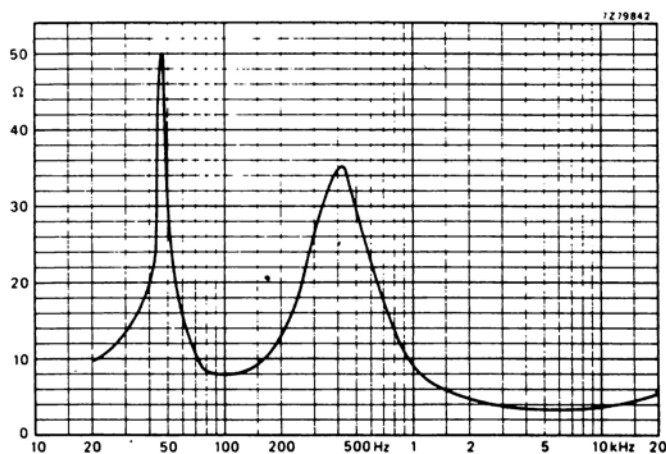


Figura 4.40 — Curva dell'impedenza della cassa 3.

Il suono di questo diffusore è molto buono, arioso ed aperto. A causa di un incrocio un po' "aperto" tra mid range e woofer, la gamma mediobassa è leggermente indietro rispetto al resto. Vista l'eccellenza dei componenti usati, in particolare l'ottimo mid range a cupola, ritengo che con una circuitazione del filtro cross-over un poco più curata, si possano ottenere risultati ancora superiori di quelli, già ottimi, ottenibili dal filtro qui descritto.

3.a parte

Nella terza parte tratteremo le misure delle caratteristiche dell'altoparlante e del sistema di altoparlanti con una parte dedicata alle tecniche di misura digitali. La serie di articoli termina con una discussione sul suono diretto e riflesso e sull'acustica delle sale d'ascolto.

NORMATIVE E MISURE

5.1. STANDARD NAZIONALI E INTERNAZIONALI

In Europa gli standard più usati per definire un prodotto HI-FI sono le norme DIN 45573 e DIN 45500. Una piccola targa, applicata sui prodotti HI-FI, è comunemente usata per indicare che sono stati osservati gli standard. Non è nostro proposito trascrivere tali norme in questa pubblicazione; parleremo solo dei punti più interessanti che nasceranno dalla discussione. Le norme HI-FI DIN 45500 definiscono i requisiti che deve avere la risposta in frequenza misurata in mezzo campo libero (2π steradiani) mediante l'uso di curve standard (figura 5.1). Quando la curva della risposta in frequenza è stata determinata, vi si sovrappone il grafico di figura 5.1. Le due curve devono ovviamente essere tracciate nella stessa scala. Si fa corrispondere la linea mediana del grafico dello standard al responso medio del sistema di altoparlanti. Il responso di tale sistema è definito conforme alle norme HI-FI se rimane all'interno delle linee limite inferiore e superiore del grafico di figura 5.1. In figura 5.2 è illustrata la curva di risposta di un tipico sistema di altoparlanti a tre vie in cassa ermeticamente chiusa. In figura 5.3 si dimostra che tale sistema è conforme alle norme DIN 45500. La curva di figura 5.1 è spesso tracciata su un foglio di plastica trasparente per un facile uso in laboratorio. In questo modo è possibile sovrapporre direttamente tale curva sul foglio del registratore grafico

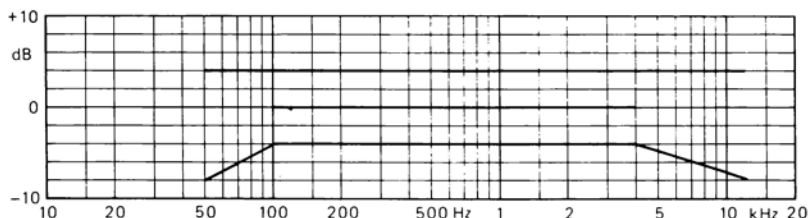


Figura 5.1 — Norme HI-FI DIN 45500. Il responso degli altoparlanti deve essere compreso tra i limiti superiore ed inferiore per un livello medio coincidente con la retta centrale.

che ha tracciato la curva della risposta in frequenza del sistema; naturalmente le scale di entrambe le curve devono essere le medesime. Ci sono molti tipi di altoparlanti e di sistemi di altoparlanti che presentano grandi variazioni di prestazioni per situazioni acustiche differenti. Sono quindi stati sviluppati vari metodi di test per provare gli altoparlanti in varie condizioni ambientali. Due condizioni sono spesso riferite a:

- 1) 2π steradiani o $\frac{1}{2}$ campo libero, dove la condizione acustica della sola faccia anteriore dell'altoparlante approssima quelle dello spazio libero. Tale condizione è illustrata in figura 5.4, dove l'altoparlante è posto in uno schermo chiuso interno alle pareti di una stanza anecoica.

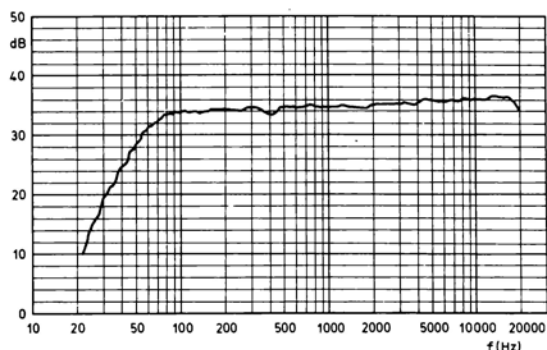


Figura 5.2 — Risposta in frequenza di un sistema di altoparlanti multivia in box a chiusura ermetica.

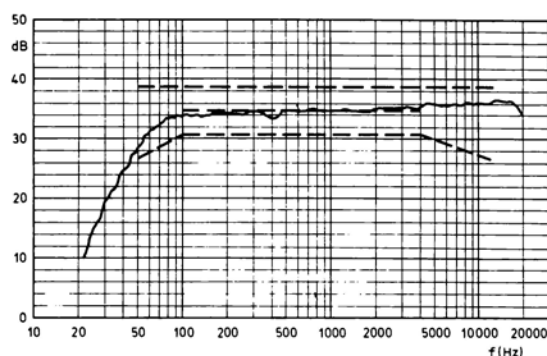


Figura 5.3 — La risposta in frequenza di figura 5.2, sovrapposta alla caratteristica DIN 45500 (figura 5.1), mostra che il sistema di altoparlanti è conforme alle norme HI-FI.

- 2) 4π steradiani o "campo libero" è definito nella pubblicazione IEC 268-5 (sotto-clausola 3.3). La condizione acustica approssima quella dello spazio libero.



Figura 5.4 — Misura di un altoparlante effettuata in $\frac{1}{2}$ campo libero.

In entrambi i casi la misura è operata in condizioni anecoiche in modo che essa rispecchi le caratteristiche intrinseche dell'altoparlante non intaccate (per quanto possibile) dalle riflessioni.

Comunque, è possibile ottenere le caratteristiche pure dell'altoparlante da misurazioni fatte in ambiente normale, dove cioè sono presenti le riflessioni delle pareti, mediante l'uso di moderne tecniche di misura. Questo sarà discusso nel paragrafo 6.

Lo spazio libero e il $\frac{1}{2}$ spazio libero sono largamente usati come condizioni standard e, di fatto, può essere fatta una conversione tra i due metodi. In figura 5.5 è mostrata la curva che può essere usata, in certe circostanze, per convertire la caratteristica misurata sull'asse in 4π steradiani di un altoparlante in cassa ermetica o bass-reflex all'equivalente caratteristica misurata in 2π steradiani. Le condizioni per le quali è valida la conversione sono le seguenti: il box ha un'area frontale

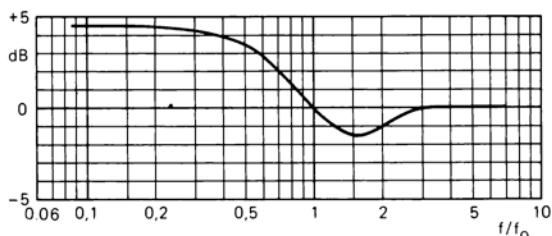
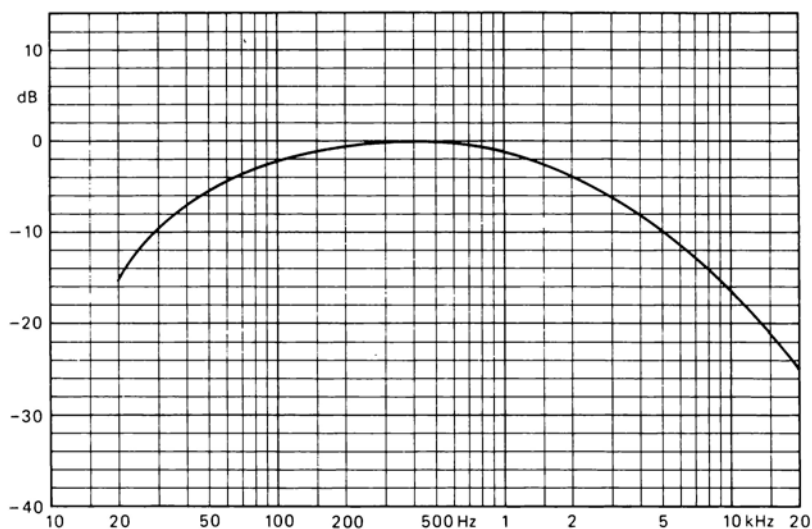


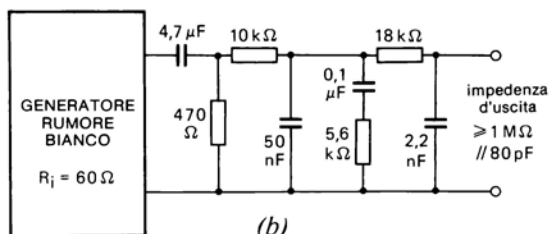
Figura 5.5 — In alcuni casi la curva di risposta dell'altoparlante misurata nel campo di 4π steradiani può essere convertita alla misura fatta su $\frac{1}{2}$ spazio libero (2π steradiani) usando la curva qui disegnata.

massima di circa 30 x 60 cm. e la dimensione inferiore (d) è quella dalla quale si ricava la frequenza di transizione $f_0 = 120/d$ Hz. La dimensione d deve essere misurata in metri e il box non deve avere un volume superiore a 40-50 litri. È inoltre importante che il costruttore dica se è stata usata tale conversione per ottenere un particolare tipo di caratteristica. La determinazione della potenza nominale è stata discussa nel paragrafo 3.8.6. L'adatto segnale pensato necessario per questa misura è ottenuto da una sorgente di rumore bianco filtrato in modo da ottenere la richiesta distribuzione di frequenze. Il responso del filtro è descritto dalle norme DIN 45573 e illustrato in figura 5.6. Tale standard è preso in considerazione anche dalle norme IEC.

La risposta in frequenza del sistema è definita come la gamma compresa tra le frequenze basse e alte che scendono di 8 dB dal livello medio del segnale.



(a)



(b)

Figura 5.6 — (a) Ampiezza relativa delle frequenze di un segnale di rumore usato per i test degli altoparlanti. (b) Filtro necessario per ottenere tale distribuzione di frequenze partendo da rumore bianco.

5.2. CONDIZIONI STANDARD PER I TEST

Le condizioni atmosferiche standard per le prove sono:

temperatura, $20 \pm 25^\circ \text{C}$; umidità relativa, 45 — 75%; pressione atmosferica, 860 — 1060 mbar (86 — 106 kPa).

Le caratteristiche ambientali possono, come abbiamo già dichiarato, avere differenti forme.

5.2.1. Test dell'altoparlante non montato nel box

Un facile e riproducibile test è la misura della risposta in frequenza di un altoparlante libero in camera anecoica. Il test si presta facilmente alle misure per i controlli di qualità. Una curva di risposta ottenuta usando questo metodo è disegnata in figura 5.7(a). Essa è relativa ad un altoparlante a gamma estesa da quattro pollici.

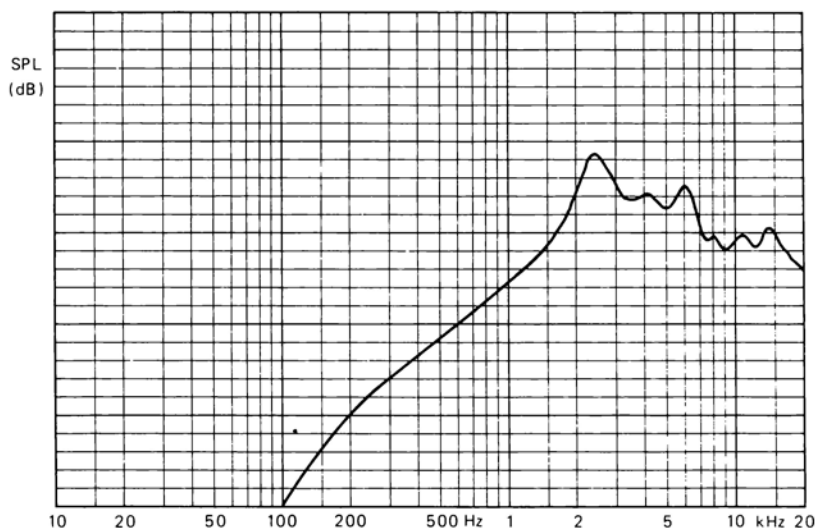


Figura 5.7 — (a) Risposta in frequenza di un altoparlante a gamma estesa tipo AD 40500M4. La curva è misurata su 4π steradiani con l'altoparlante non montato in box.

SPL = Pressione Sonora (Sound Pressure Level)

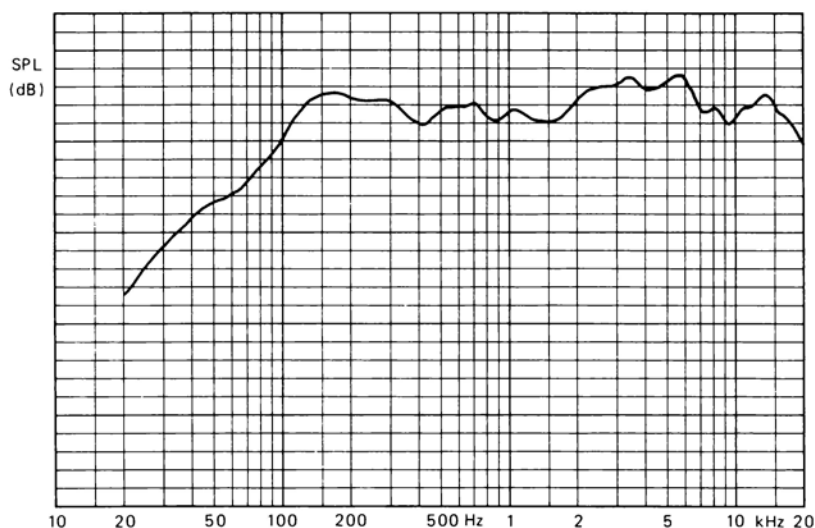


Figura 5.7 — (b) La curva è misurata su 2π steradiani con l'altoparlante montato su uno schermo a norme IEC. Entrambe le caratteristiche si riferiscono alla pressione sonora misurata sull'asse dell'altoparlante in camera anecoica.

5.2.2. Test con altoparlante montato nel box

Gli altoparlanti possono essere provati montati in schermo o in cassa ermeticamente chiusa in condizioni di campo libero o $\frac{1}{2}$ campo libero. La figura 5.7 offre il confronto tra le prove con l'altoparlante libero (non montato nel box) e quella con l'altoparlante montato in cassa a norme IEC. Ci sono molti test che cercano di simulare la risposta in frequenza di un altoparlante in cassa in un ambiente tipico, per esempio in una stanza di soggiorno. Le figure 5.8 forniscono il confronto tra le risposte in frequenza di un altoparlante in cassa ermetica rilevate in camera anecoica, in camera riverberante, in mezzo spazio libero e in un ambiente che simula un soggiorno. Per varie ragioni le misure sono fatte usando differenti livelli di potenza e differenti distanze microfono - altoparlante, quindi il confronto diretto, in realtà, non è possibile ma gli effetti delle differenti condizioni ambientali sono abbastanza chiari. Il familiare responso in camera anecoica (a) varia, a causa delle riflessioni ambientali, dal grafico (b) relativo ad un ambiente riverberante; questi due grafici possono a loro volta essere confrontati con la risposta in frequenza rilevata in una stanza di soggiorno (d).

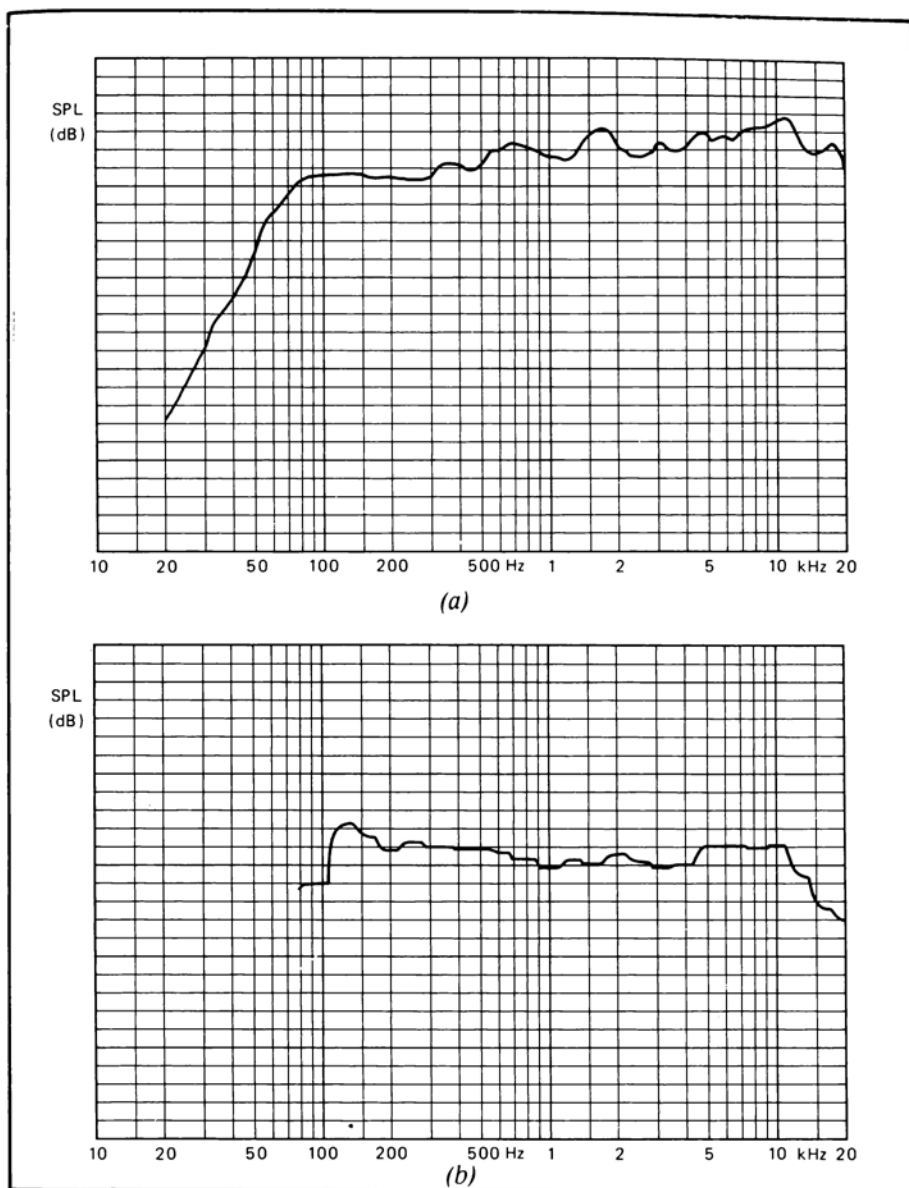


Figura 5.8 — Risposta in frequenza di un sistema di altoparlanti a tre vie in cassa acustica ermeticamente chiusa misurata in varie condizioni. (a) Caratteristica ottenuta in camera anecoica. (b) Risposta ottenuta in ambiente riverberante.

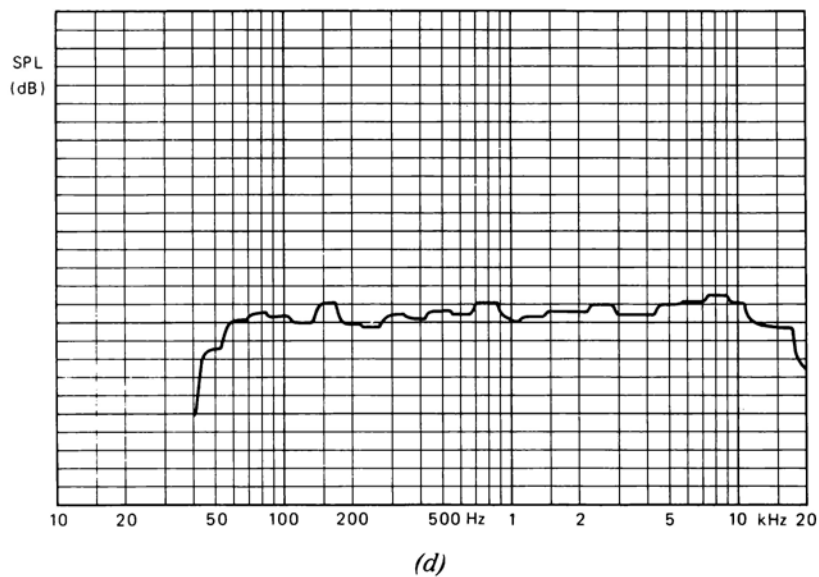
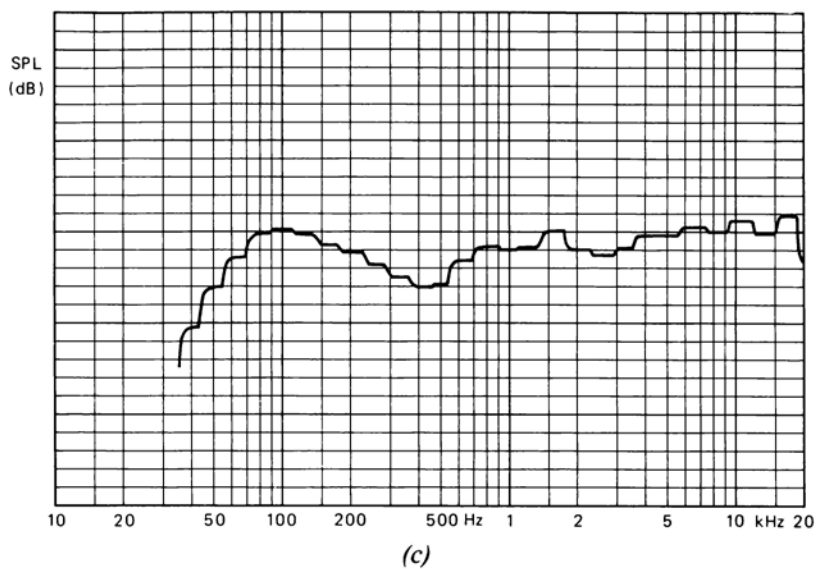


Figura 5.8 — (c) Misura su $\frac{1}{2}$ campo libero. (d) Risposta del sistema misurata in una stanza domestica.

La misura su un campo di 2π steradiani (c) esibisce una caduta della risposta attorno ai 400-500 Hz. Una stanza di soggiorno tipica è, senza dubbio, piuttosto difficile da definire e non esiste uno standard generalmente accettato. I risultati delle misure effettuate in tale ambiente devono quindi essere accompagnati da una descrizione piuttosto completa del modo con cui sono state effettuate le misure. Un aspetto che certamente ha avuto effetto sulle misure ottenute è la disposizione delle casse rispetto alle pareti, pavimento e soffitto della stanza. La figura 5.9 confronta la pressione sonora in funzione della frequenza, misurata sull'asse, di un altoparlante posto in diverse posizioni di un tipico ambiente domestico. Con la cassa posta sul pavimento (a) si nota un aumento nelle frequenze basse attorno ai 60-70 Hz e attorno ai 200 Hz; assieme a questa traccia è disegnata la curva di risposta di un altoparlante posto a 60 cm. dal pavimento (linea spezzata). Spostando l'altoparlante indietro, verso la parete (b) la caratteristica dell'altoparlante mostra un nuovo aumento alle frequenze basse, che è ulteriormente incrementato quando l'altoparlante è posto in un angolo della stanza (c). Il suono, riflesso dalle superfici adiacenti, forma una "sorgente immagine" cosicchè l'effetto è di un aumento della direzionalità della sorgente, particolarmente per quanto riguarda le basse frequenze. Le condizioni ambientali che approssimano una stanza di soggiorno usate dalla Philips per i test degli altoparlanti è il ri-

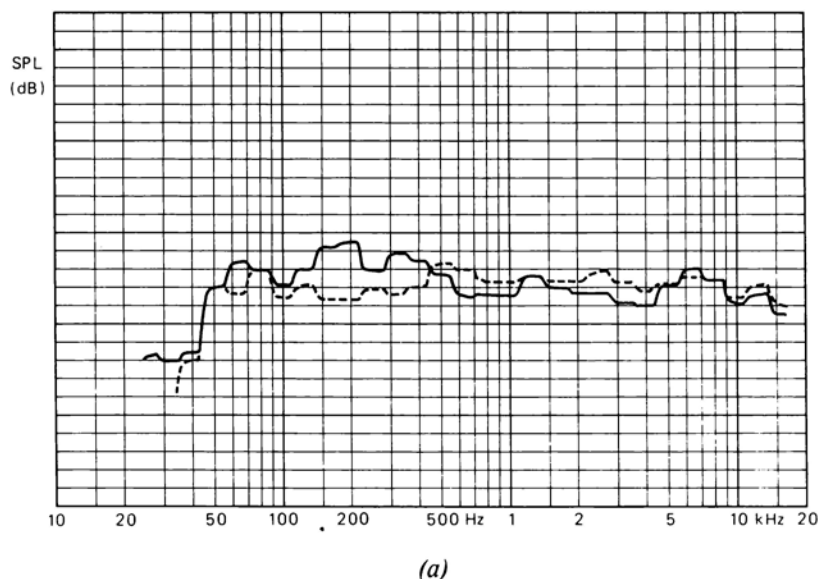
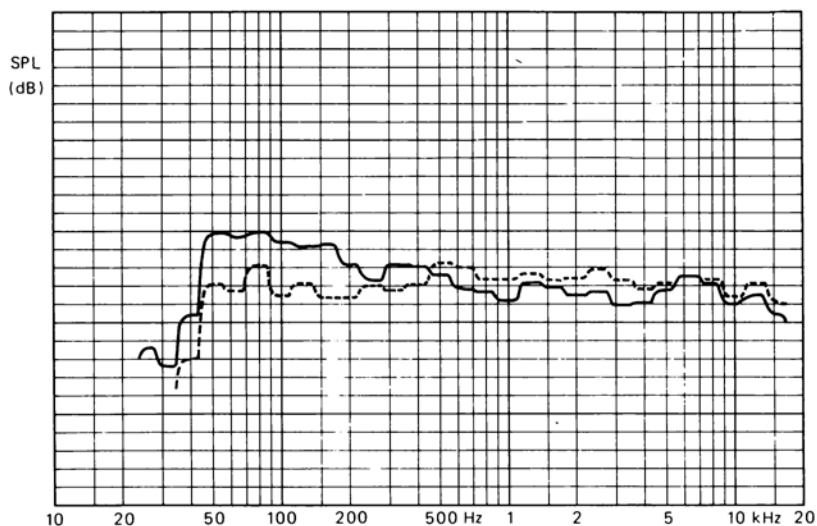
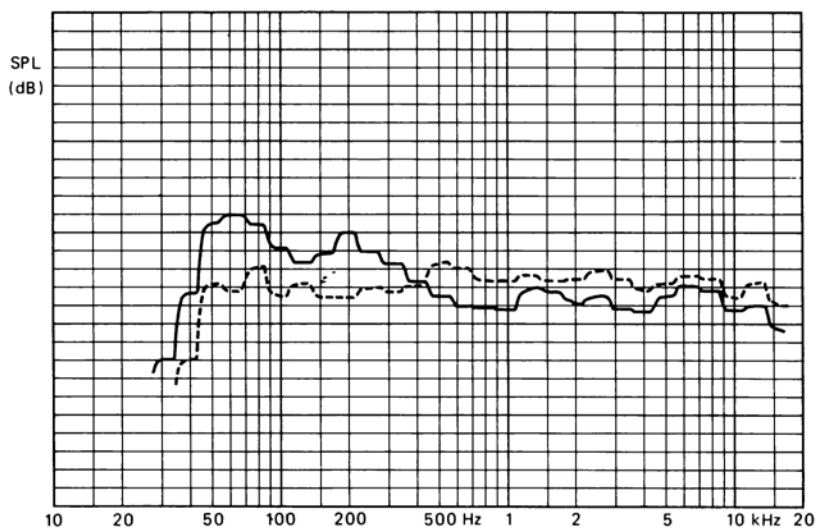


Figura 5.9 — Effetto delle posizioni relative altoparlante-pareti-pavimento sulla risposta in frequenza. La caratteristica di un altoparlante posto a 0,6 m dal pavimento e a 0,8 e 2 m dalle pareti è mostrata dalla linea tratteggiata; essa si può confrontare con la linea continua che rappresenta (a) l'altoparlante sul pavimento, (b) contro la parete e (c) nell'angolo della stanza.



(b)



(c)

Figura 5.9

sultato di un esauriente studio delle condizioni in ambienti domestici. Le condizioni di misura sono stabilite in modo da evitare l'insorgenza di onde stazionarie ed il tempo di riverberazione della stanza è una media dei tempi rilevati in stanze di soggiorno vere. In figura 5.10 è illustrato il risultato delle misure di riverberazione fatte in molti ambienti domestici e europei.

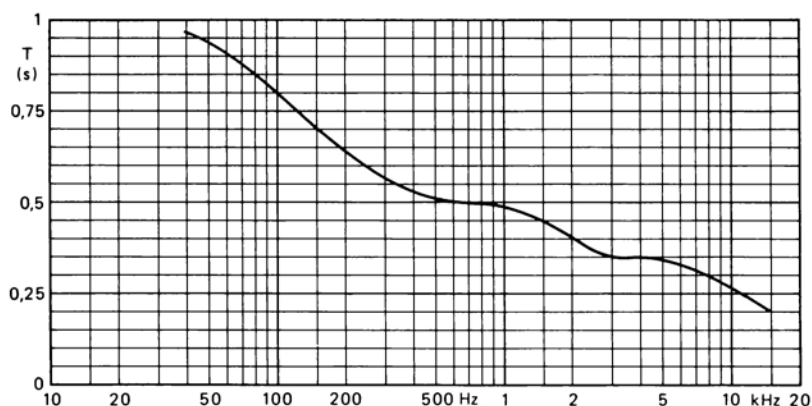


Figura 5.10 — Tempo di riverberazione medio in una stanza domestica, ottenuta da un gran numero di misure fatte in case europee.

5.3. MODULO DELL'IMPEDENZA E FREQUENZA DI RISONANZA

Il circuito necessario alla misura del modulo dell'impedenza in funzione della frequenza è illustrato in figura 5.11.

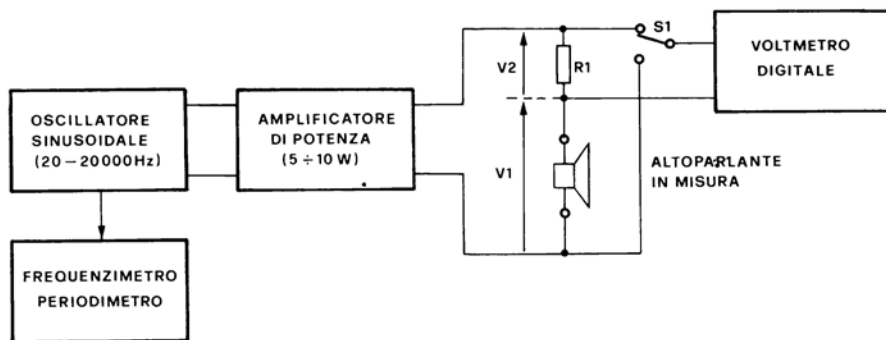


Figura 5.11 — Schema elettrico e set di strumenti necessario alla misura del modulo dell'impedenza in funzione della frequenza.

È realizzato in modo tale che la precisione della misura non dipende nè dalla stabilità in ampiezza della tensione alternata di uscita dell'amplificatore alle varie frequenze nè dalla risposta in frequenza del voltmetro (almeno entro certi limiti).

La tensione ai capi dell'altoparlante, V_1 , potrà essere compresa tra $2 V_{eff}$ e $1 V_{eff}$. Il valore della resistenza R_1 , sulla quale si stabilisce la tensione V_2 che è funzione del modulo dell'impedenza dell'altoparlante, potrà andare da 0,2 ohm a 1 ohm. Maggiore è l'impedenza media dell'altoparlante in esame, maggiore dovrà essere R_1 , in modo che la tensione V_2 non sia mai troppo bassa e quindi difficilmente valutabile. Normalmente, nel punto di massima impedenza (alla risonanza) si devono avere tensioni di circa 20 mV. Sarà quindi necessario commutare la portata del voltmetro quando si commuta S_1 da V_1 a V_2 .

La misura vera e propria potrà essere fatta nel modo seguente.

Si realizzerà una tabella come quella riportata qui sotto come esempio:

| FREQUENZA Hz | V1 mV | V2 mV | MODULO IMPEDENZA ohm |
|--------------|-------|-------|----------------------|
| 20 | 1820 | 40 | 9,1 |
| 25 | 1840 | 33 | 11,1 |
| 31,5 | 1860 | 25,5 | 14,5 |

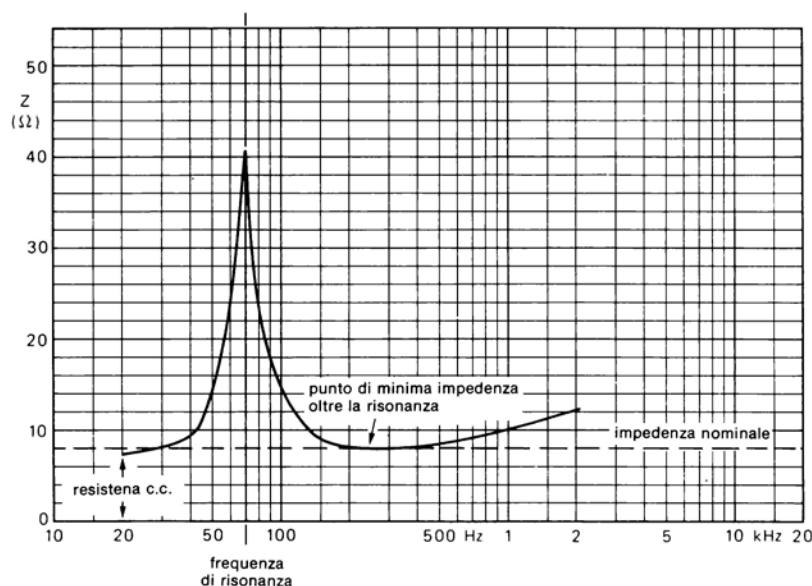


Figura 5.12 — L'impedenza nominale è il modulo del valore minimo che assume l'impedenza dell'altoparlante oltre la frequenza di risonanza.
 Rated impedance = impedenza nominale; lowest point above resonance = punto di minima impedenza oltre la risonanza.

dove il modulo dell'impedenza è dato dalla seguente relazione:

$$Z = \frac{V_1}{V_2} \cdot R_1.$$

Una volta determinati i valori di Z nei vari punti, si potrà tracciare la curva del modulo dell'impedenza.

Un'analisi particolarmente accurata va fatta nell'intorno della risonanza per determinare il punto preciso di massimo dell'impedenza Z_{\max} a cui corrisponde la frequenza di risonanza. Soprattutto per i woofer, in questa zona conviene effettuare la misura della frequenza mediante un periodometro, in quanto a frequenze molto basse, intorno ai 30 Hz, la misura del frequenzimetro non è molto accurata, limitandosi per forza a sole due cifre. Con un periodometro, i 30 hz potranno essere letti come $1/30 = 0,03333$ sec. cioè 33,33 ms, con un'accuratezza maggiore, avendo a disposizione 4 cifre significative. In questo modo si potrà distinguere facilmente anche il mezzo Hz.

In figura 5.12 è illustrato un esempio di curva di impedenza con indicati alcuni punti caratteristici.

5.4. RESISTENZA DELLA BOBINA MOBILE

La resistenza della bobina mobile è normalmente misurata con un ohmmetro a d.c. e sarà normalmente del 15-20% inferiore all'impedenza nominale.

5.5. DENSITÀ DEL FLUSSO MAGNETICO

La densità del flusso magnetico è misurata lungo l'altezza del traferro con una sonda costituita da una bobina e un galvanometro.

5.6. DISTORSIONE

Per determinare la distorsione si applica un segnale sinusoidale all'altoparlante in modo da avere una media di 96 dB SPL = 2×10^{-4} microbar (20 micro Pa). tra i 100 e 8000 Hz ad una distanza di 1 metro. La frequenza fondamentale è cancellata con un filtro elimina-banda a spillo. Il segnale risultante rappresenta la distorsione. La natura e le cause della distorsione degli altoparlanti è stata discussa nel paragrafo 2.11.

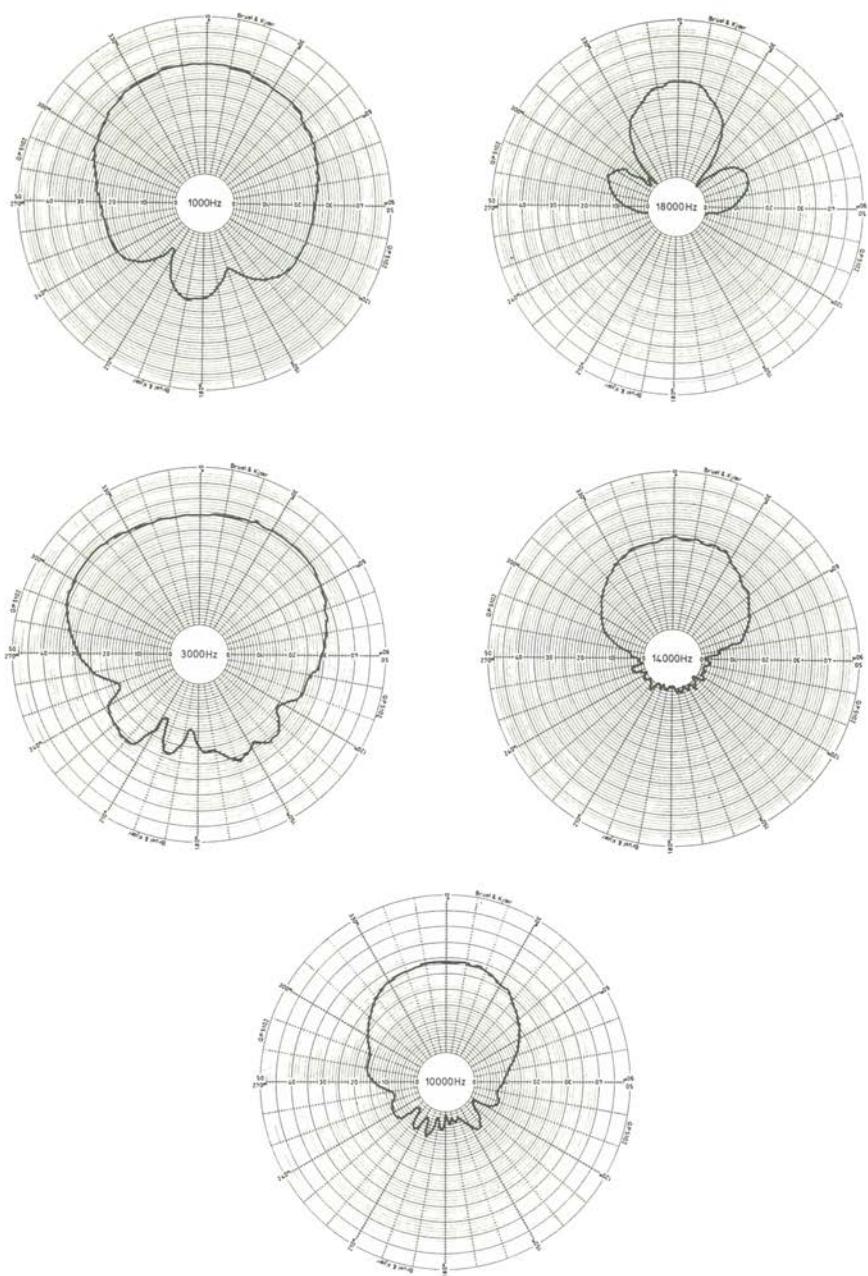


Figura 5.13 — Risposta polare di un tweeter a cupola da 1" a cinque frequenze differenti.

5.7. DIRETTIVITÀ

La direttività degli altoparlanti e la sua misura è stata discussa precedentemente nel paragrafo 2.10. L'altoparlante, montato al centro di un girevole, è pilotato da un segnale a frequenza e ampiezza costante. Si fa ruotare l'altoparlante di 360° mentre il microfono, fissato ad 1 metro di distanza, rivela le variazioni di pressione sonora al variare dell'angolazione dell'altoparlante e manda i risultati ad un registratore a carta che traccia il diagramma polare. Se l'altoparlante non è montato in cassa, si nota l'effetto del corto circuito acustico alle basse frequenze e l'aumento di direttività alle alte frequenze.

Le figure 2.15 illustrano chiaramente questi effetti relativi ad un altoparlante di qualità a gamma estesa.

Le figure 5.13 illustrano il responso polare di un tweeter a cupola da 1" a 5 frequenze differenti. Anche in questo caso la direttività aumenta con la frequenza e il responso polare a 18000 Hz mostra una marcata direttività, due ben definiti lobi ai lati ed una radiazione posteriore non misurabile. A 1000 Hz il responso polare è più uniforme, con un massimo di fronte all'altoparlante e due minimi sul retro.

5.8. MISURA DEL Q_t

Il fattore di merito totale dell'altoparlante in aria libera, Q_t o quello dell'altoparlante in cassa, Q'_t , possono essere determinati con una certa facilità usando il metodo proposto da Thiele e Small intorno al 1971. Mediante il procedimento descritto nel paragrafo 5.3, si dovrà misurare:

- 1) la frequenza di risonanza f_o
- 2) il valore dell'impedenza alla risonanza Z_{max}
- 3) conoscendo la resistenza della bobina mobile R_o , si determinano le due frequenze ai lati della risonanza per le quali il modulo dell'impedenza assume un valore pari a $Z_1 = \sqrt{R_o \cdot Z_{max}}$.

Chiamiamo tali frequenze f_b e f_a .

Il fattore di merito Q_t sarà dato dalla relazione

$$Q_t = \frac{f_o}{f_a - f_b} \cdot \sqrt{\frac{R_o}{Z_{max}}}.$$

Vediamo ora un esempio di calcolo del Q'_t di un altoparlante in cassa: abbiamo $R_o = 3,48 \text{ ohm}$ $Z_{max} = 23 \text{ ohm}$ $f_o = 66,5 \text{ Hz}$.

L'impedenza Z_1 sarà data da $Z_1 = \sqrt{3,48 \cdot 23} = 8,9$ ohm misuriamo ora le frequenze f_a e f_b , che supponiamo risultino $f_b = 53$ Hz $f_a = 83$ Hz.

Il fattore di merito Q_t è quindi dato da

$$Q_t = \frac{66,5}{83 - 53} \cdot \sqrt{\frac{3,48}{23}} = 0,86.$$

Le misure necessarie ad ottenere il Q_t sono piuttosto critiche, è bene quindi che vengano effettuate con molta accuratezza, ripetendo più volte la procedura.

5.9. MASSA DINAMICA

La massa dinamica dell'altoparlante m_d è composta dal carico d'aria M'_{MR} e dalle masse delle parti in movimento dell'altoparlante M_{MR} . Per determinare la massa dinamica è necessario in primo luogo misurare, oltre alla frequenza di risonanza f_o , la frequenza di risonanza f_m che si osserva quando si fissa sul cono dell'altoparlante una massa m di pochi grammi. La massa dinamica è data da

$$M_d = M_{MC} + M'_{MR} = \frac{m f_m^2}{f_o^2 - f_m^2} \quad (5.1)$$

(vedi paragrafo 3.3.1.).

5.10 MASSA DELLA BOBINA MOBILE E DEL CONO

La massa delle parti in movimento di un altoparlante può essere ottenuta semplicemente pesando queste parti, oppure mediante l'equazione (5.1): $M_d = M_{MC} + M'_{MR}$. La massa del carico d'aria M'_{MR} è data dall'equazione (3.14) come $2 \times 1,58 r^3$ kg., dove r è il raggio effettivo del cono in metri. La massa delle parti in movimento, M_{MC} , è quindi ottenuta sottraendo M'_{MR} da M_d .

5.11. CEDEVOLEZZA MECCANICA DELLE SOSPENSIONI

Se conosciamo la frequenza di risonanza e la massa dinamica dalle (3.11) e (5.1) abbiamo

$$f_o = \frac{1}{2 \pi \sqrt{C M_d C_M}}$$

quindi

$$C_M = \frac{1}{\omega_o^2 M_d} \text{ m/N.} \quad (5.2)$$

5.12. COSTANTE DI TRASDUZIONE BI

La forza f esercitata quando attraverso la bobina mobile fluisce una corrente i è data dall'espressione $F = Bli$ newton.

Se l'altoparlante è montato con il cono rivolto verso l'alto, ed è applicata una massa m di peso conosciuto al cono, il cono si sposterà indietro. La corrente i che riporterà il cono alla posizione originale permette la valutazione della costante di trasduzione BI mediante la formula

$$BI = \frac{9,8 \text{ m}}{i'} \quad (5.3)$$

La massa m è in kg, il fattore 9,8 è necessario per convertire questo in newton.

5.13. RESISTENZA MECCANICA DELLA SOSPENSIONE

La resistenza di radiazione meccanica della sospensione può essere misurata facendo la misura sull'altoparlante non montato. Dall'equazione (3.28) noi sappiamo che:

$$R_A = \frac{\omega_o' M_A}{Q_{T1}}$$

da cui, per un altoparlante non montato in cassa, abbiamo

$$R_{MS} + R_{MR} = \omega_o \frac{(M_{MC} + 3,15 r^3)}{Q_{T1}} \quad (5.4)$$

dove R_{MR} è la resistenza di radiazione meccanica dell'altoparlante non montato che è circa $8,45 \times 10^{-6} + r^6 \times f^4$ ohm meccanici m.k.s. e può quindi essere ignorato.

TECNICHE DI MISURA DIGITALI

È piuttosto sorprendente notare che anche nelle misure delle prestazioni degli altoparlanti il computer offre prestazioni superiori, in velocità ed attendibilità, ai metodi tradizionali. Le caratteristiche degli altoparlanti e dei sistemi possono essere ottenute dall'analisi matematica del responso del sistema ad un singolo impulso. In più, con tecniche di campionamento del segnale, possiamo rilevare risposte in frequenza anche in ambiente riverberante non influenzate dai suoni riflessi, mentre con tecniche di "averaging" possiamo annullare gli eventuali rumori di fondo casuali. La camera anecoica non è quindi essenziale nelle misure degli altoparlanti effettuate con questa tecnica.

6.1. TEORIA DELLA TECNICA DI MISURA DIGITALE

L'altoparlante (o il sistema completo) può essere completamente caratterizzato dalla funzione di trasferimento complessa $T = S_y/S_x$.

S_x e S_y sono le trasformate di Fourier dell'ingresso e dell'uscita, come illustrato in figura 6.1. La figura 6.2 illustra, in modo semplificato, il processo di analisi. La tecnica di campionamento veloce è usata per ottenere e memorizzare il segnale di uscita dell'altoparlante. Il risultato della conversione analogico-digitale di ogni

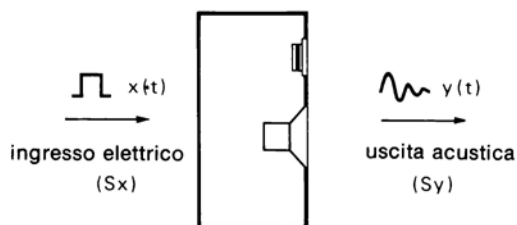


Figura 6.1 — L'altoparlante o il sistema di altoparlanti può essere caratterizzato dalla funzione di trasferimento complessa $T = S_y/S_x$.

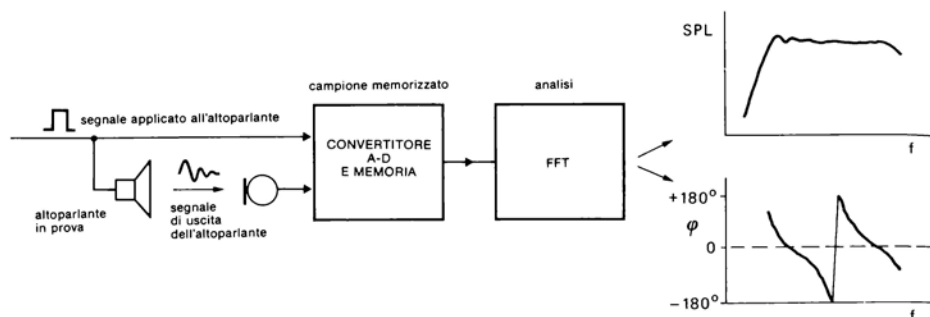


Figura 6.2 — Le caratteristiche di un altoparlante (o di un sistema) possono essere ottenute analizzando la risposta ad un impulso. Tale risposta viene convertita in una serie di numeri digitali, memorizzata e quindi analizzata mediante la fast Fourier transform.

Speaker input signal = segnale applicato all'altoparlante; sample stored = campione memorizzato; A-D converter & store = convertitore A-D e memoria.

campione è memorizzato e, quindi, si valuta la trasformata di Fourier dei segnali d'ingresso e d'uscita in modo da ottenere la funzione di trasferimento T . Da questi dati si possono valutare varie caratteristiche dell'altoparlante che vengono visualizzate opportunamente dando luogo a grafici che danno:

- il livello di pressione sonora (SPL) che corrisponde al modulo $|T|$,
- il responso in fase (φ) che corrisponde alla fase di T ;
- il ritardo dovuto al sistema che corrisponde a $\frac{d\varphi}{d\omega}$.

6.2. SEGNALE D'INGRESSO

Il più conveniente segnale d'ingresso per fare questo tipo di misura è un impulso di onda quadra. Questo segnale è formato da uno spettro in frequenza che segue una relazione ampiezza/frequenza conforme alla funzione $\frac{\sin x}{x}$. Una data scelta della durata dell'impulso assicura una caratteristica ampiezza/frequenza abbastanza piatta nella gamma delle frequenze audio. Riferendoci alla figura 6.3, una durata dell'impulso di 10 micros. ($1/t = 100$ kHz) assicura un responso relativamente piatto tra 0 Hz e 20 KHz (P e Q di figura 6.3 (b)) in modo che l'uscita ri-

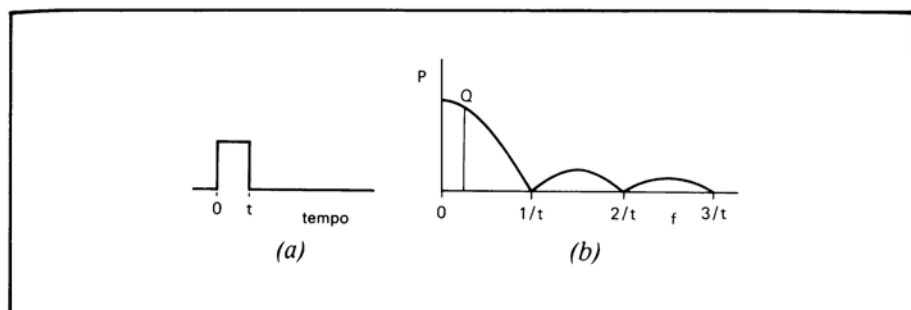


Figura 6.3 — Il segnale d'ingresso è un impulso rettangolare (a). Esso è composto, nel campo delle frequenze, da una serie di componenti sinusoidali che hanno un'ampiezza corrispondente alla funzione $|\sin x/x|$ (b). Un impulso di $10 \mu s$ ($1/t = 10^5$ Hz) ha una distribuzione di ampiezza sufficientemente piatta delle frequenze componenti comprese tra 0 e 20 KHz.

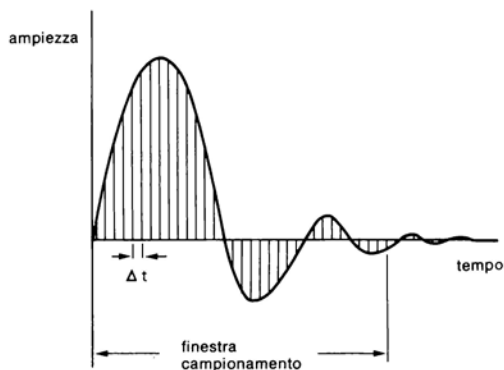
chieda una piccola (o nessuna) correzione causata dalla non linearità del segnale d'ingresso. Un miglioramento della linearità è ottenuto con un impulso più breve, ma la larghezza e l'ampiezza dell'impulso deve essere sufficientemente grande per impartire una sufficiente energia all'altoparlante in modo da avere un'uscita sonora di livello utile ad essere analizzata.

6.3. CAMPIONAMENTO

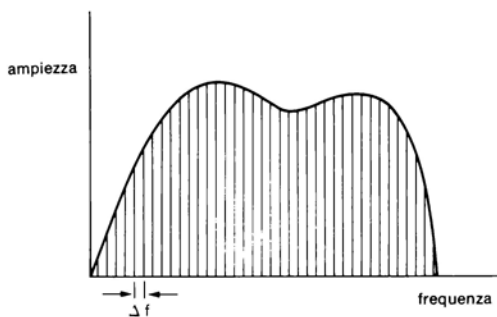
La pressione sonora SPL generata dall'altoparlante è percepita da un adatto microfono e applicata a un convertitore analogico-digitale che opera la conversione ad intervalli di tempo regolari Δt .

L'informazione campionata è quindi memorizzata. Il processo di campionamento veloce (cioè un piccolo Δt in figura 6.4 (a)) è il sistema di rilevamento delle caratteristiche dell'altoparlante più accurato. Esiste una costrizione inevitabile che limita la frequenza di campionamento, ma può essere matematicamente dimostrato che sono sufficienti poco più di due campioni per ciclo per descrivere completamente una forma d'onda sinusoidale. In altre parole, la minima frequenza di campionamento è pari a poco più del doppio della massima frequenza che viene visualizzata (usualmente 20 KHz). Il tempo di campionamento, cioè il periodo sul quale la forma d'onda è osservata, è inoltre soggetto ad esigenze contraddittorie: un periodo di campionamento lungo è essenziale per rivelare e trattare le componenti a bassa frequenza del segnale; ma considerazioni di ordine pratico limitano la "finestra" di campionamento ad un tempo ragionevole, T , che deve cessare prima che qualche

suono riflesso arrivi al microfono per far sì che il suono campionato sia solo il suono diretto proveniente dall'altoparlante. Oltre a questo, la dimensione della "finestra", T , definisce la spaziatura, Δf , dell'uscita trattata nel campo delle frequenze. Vedi figura 6.4 (b).



(a)



(b)

Figura 6.4 — L'uscita dell'altoparlante (a) è campionata ad intervalli di tempo Δt all'interno della "finestra temporale" T . La risposta in frequenza (b) ottenuta dall'analisi dell'uscita dell'altoparlante è costituita da elementi spazati, nel campo delle frequenze, di Δf . La risposta in frequenza della figura è linearmente in funzione della frequenza; però può essere anche disegnata in funzione del logaritmo della frequenza. La frequenza di campionamento limita la massima frequenza rilevabile ($f_{\max} < 0,5 \Delta t$); T limita la minima frequenza rilevabile e determina gli intervalli Δf .

6.4. ELIMINAZIONE DEL RUMORE CASUALE

Quando si effettuano le misure, se il segnale d'ingresso ha un'energia insufficiente, possono sorgere problemi relativi al rumore. In questo caso si possono fare più misurazioni, i risultati delle quali vengono sommati cumulativamente in memoria. I suoni casuali tenderanno in media ad annullarsi vicendevolmente, mentre le informazioni significative vengono sommate. Il risultato è un'ottima approssimazione del puro responso dell'altoparlante, purché si sia dimensionata correttamente l'ampiezza della finestra di campionamento per assicurare che il suono ricevuto non comprenda alcun suono riflesso.

6.5. CALCOLO DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Usando l'algoritmo della "FFT = fast Fourier transform", l'ampiezza (pressione sonora in camera anecoica) e la fase possono essere calcolate e visualizzate su un adatto terminale. Il ritardo

$$\frac{d\varphi}{d\omega}$$

può essere dedotto, semplicemente, dallo stesso processo, in modo da presentare, molto rapidamente, un set di caratteristiche completo.

Accanto alla proprietà di velocità, si può notare che, quando si usa una adatta finestra di campionamento, questa tecnica produce la caratteristica del sistema in campo libero. Questo non è il caso della camera anecoica, dove sono di solito presenti onde stazionarie a bassa frequenza. Un'altra considerazione in favore delle tecniche digitali è questa: l'informazione è facilmente memorizzabile in una qualunque memoria di computer, e quindi può essere estratta e visualizzata ancora per fare confronti, in tempi successivi all'analisi, senza ricorrere alle apparecchiature necessarie per le prove.

6.6. ANALISI DEL DECADIMENTO DELL'ONDA

Le tecniche digitali si prestano ad un'analisi del decadimento dell'onda; ciò permette di valutare le risonanze dell'altoparlante e le riflessioni del box che sono altrimenti difficili o impossibili da ottenere. Il suono è una variazione di pressione in funzione delle frequenze e del tempo. Un modello a tre dimensioni, frequenza-tempo-pressione SPL, può essere visualizzata usando tecniche digitali di processo del segnale. L'altoparlante è pilotato da un segnale comprendente tutto lo spettro audio con una caratteristica ampiezza/frequenza ragionevolmente piatta, ed è

osservata la caratteristica pressione sonora sull'asse. Se all'istante t il segnale applicato all'altoparlante è ridotto istantaneamente a zero, l'uscita acustica decade in modo piuttosto complesso. Tale decadimento è caratterizzato dalle risonanze che sorgono nel sistema elettrico/meccanico/acustico. Usando le tecniche di campionamento e di analisi già descritte, può essere disegnato il "paesaggio" tridimension-

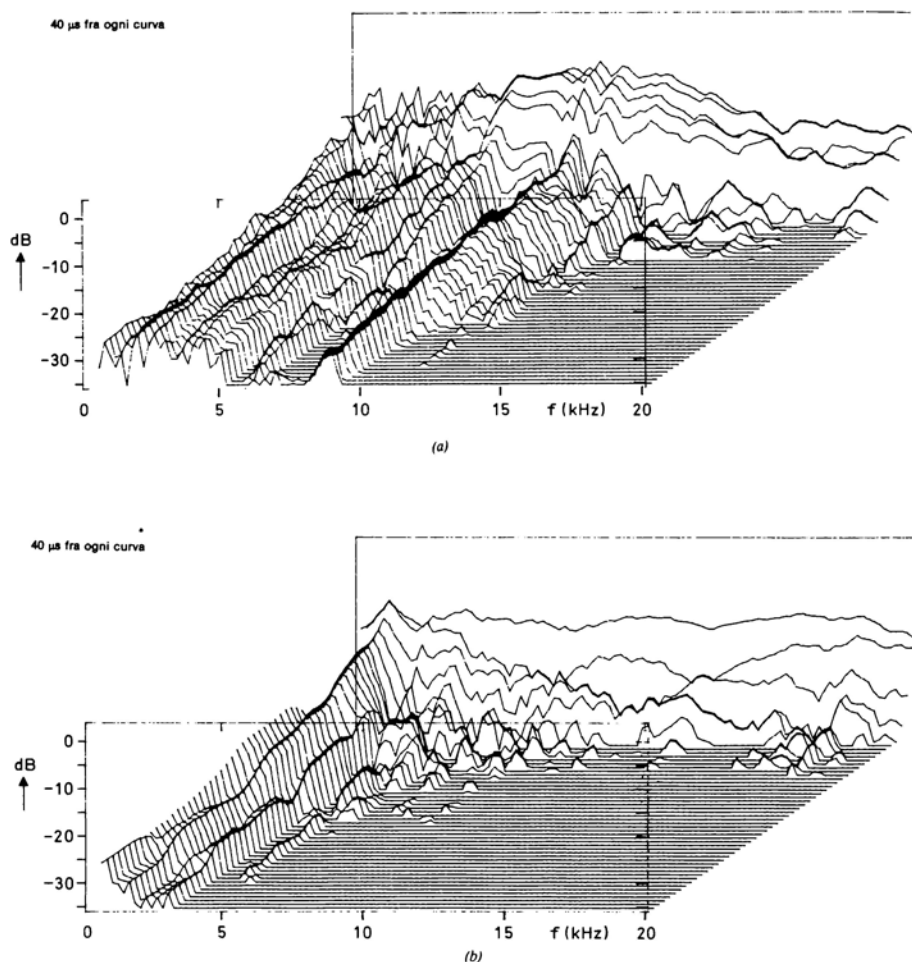


Figura 6.5 — Decadimento caratteristico di un altoparlante a gamma estesa (a) e di un tweeter a cupola (b). I picchi lungo l'asse delle frequenze appaiono come corrugazioni parallele all'asse dei tempi che rappresentano le frequenze di risonanza. Le corrugazioni parallele all'asse delle frequenze indicano le riflessioni (contro le pareti del box). 40 μ s between each curve = 40 μ s tra ogni curva.

nale della pressione acustica al microfono. Tali caratteristiche sono illustrate in figura 6.5 per un altoparlante a gamma estesa (a) e un tweeter a cupola (b).

I campioni presi ad intervalli regolari danno luogo, dopo l'elaborazione, ad un grafico tridimensionale che illustra le linee del tempo di decadimento della pressione SPL attraverso tutto lo spettro di frequenze. Le linee posteriori ai contorni sono omesse per non creare confusione nel disegno. Le risonanze normalmente mascherate nelle normali curve della pressione sonora, sono evidenti, nel diagramma tridimensionale, come delle linee a frequenze fisse (parallelamente all'asse dei tempi), mentre le riflessioni si evidenziano come corrugazioni parallele all'asse delle frequenze poste ad intervalli di tempo costanti. Il "panorama" quindi ci dà delle informazioni in più sulle caratteristiche degli altoparlanti (o sistemi di altoparlanti) che non i metodi tradizionali di misura e corrispondono molto bene al modo in cui le nostre orecchie percepiscono il suono. Idealmente l'altoparlante dovrebbe dare luogo a una linea di pressione SPL piatta, con un veloce ed uniforme decadimento dopo che il segnale è cessato. Nel caso ideale non dovrebbero essere presenti nessun tipo di corrugazione. Queste caratteristiche sono state disegnate processando il segnale in modo da eliminare le informazioni non importanti, cosicché il disegno delle caratteristiche dell'altoparlante nello spazio libero si presenta più chiaramente.

SUONO DIRETTO E SUONO RIFLESSO

Il livello di pressione sonora di un suono prodotto da una sorgente puntiforme in un ambiente silenzioso, ha delle componenti dovute alla radiazione diretta della sorgente e componenti che sono dovute al suono riflesso dell'ambiente.

7.1. SUONO DIRETTO

Consideriamo una sorgente puntiforme di potenza acustica, W , che irradia in modo uguale in tutte le direzioni in condizioni di spazio libero (senza riflessione) (vedi figura 7.1). La densità di energia, E , ad una distanza r dalla sorgente può essere dedotta dall'espressione $W dt = E 4 \pi r^2 c dt$ dove c è la velocità del suono (344 m/s). Riscrivendo l'espressione, otteniamo

$$E = \frac{W}{4 \pi r^2 c} \quad (7.1)$$

possiamo inoltre definire la densità di energia come

$$E = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (7.2)$$

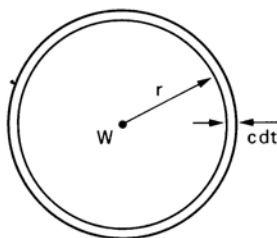


Figura 7.1 — Densità d'energia a distanza r dalla sorgente puntiforme $= W/4 \pi r^2 c$.

dove p è la pressione sonora in N/m^2 (o Pa) e ρ è la densità (normalmente circa $1,18 \text{ kg/m}^3$). Dal paragrafo 1, equazione (1.15), osserviamo che l'intensità del suono è data dall'espressione

$$I = \frac{p^2}{\rho c}.$$

Dunque, dalle equazioni (7.1) e (7.2) possiamo scrivere

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

oppure

$$I = \frac{W Q}{4 \pi r^2} \quad (7.3)$$

dove Q è il fattore di direttività della sorgente direzionale: esso è il rapporto tra l'intensità di radiazione, nella direzione considerata, della sorgente direzionale rispetto a quella che dovrebbe essere osservata nello stesso punto se la sorgente fosse della stessa potenza ma omnidirezionale.

7.2. SUONO RIFLESSO.

Prendendo la stessa sorgente considerata nel paragrafo 7.1 e piazzandola in un normale ambiente d'ascolto osserviamo l'insorgenza di suoni riflessi che si propagheranno nello spazio circostante la sorgente. Se essa irradia la stessa potenza acustica, W , la densità di energia in ogni punto sarà data dalla somma dei contributi dovuti al suono diretto ($W/4 \pi r^2 c$) e quelli dovuti al suono riflesso. Se poi la sorgente è spenta, l'energia sonora decade esponenzialmente, cioè $E = E_0 e^{-\alpha t}$ dove E_0 è la densità di energia all'istante in cui facciamo cessare il segnale prodotto dalla sorgente. Il tempo di riverberazione, T , è il tempo al quale il suono diminuisce di 60 dB dopo che la sorgente è stata spenta. In questo modo, si ha $e^{-\alpha T} = 10^{-6}$, ed il coefficiente di riverberazione, α , è $6 \ln 10/T$. Il tempo di riverberazione, per una particolare stanza varierà con la frequenza; quindi, per un particolare suono, esso dipenderà dal contenuto frequenziale del suono stesso. Il valore dell'energia assorbita dopo che si è spenta la sorgente del suono è dato da

$$\frac{dE}{dt} = -\alpha E$$

e quindi, al momento dello spegnimento ($t = 0$) il valore dell'assorbimento è αE_0 . Questo corrisponde al valore dell'assorbimento mentre la sorgente del suono sta irradiando, e quindi $W d t = \alpha E_0 V d t$ dove V è il volume della stanza. Con passaggi matematici e sostituendo $6 \ln 10/T$ al posto di α , questa espressione fornisce la equazione della densità di energia sonora del suono riflesso dovuta alla sorgente di potenza conosciuta W nella stanza di volume V e tempo di riverberazione T :

$$E = 0,072 \frac{W T}{V} . \quad (7.4)$$

Altre espressioni applicabili al suono riflesso sono le seguenti: lunghezza media dei liberi percorsi:

$$d = \frac{4 V}{S} \quad (7.5)$$

(S = area della superficie totale delle pareti della stanza).

Assorbimento

$$A = S [- \ln (1 - \bar{\alpha})] = S \bar{\alpha} \quad \text{dove} \quad \bar{\alpha} \ll 1 \quad (7.6)$$

($\bar{\alpha}$ è il coefficiente di assorbimento medio della stanza).

Tempo di riverberazione

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (7.7)$$

oppure

$$T = 0,16 \frac{V}{A + 4 \cdot V \cdot m}$$

dove V è il volume della stanza in metri cubi, A è l'assorbimento per metro quadrato e m è l'assorbimento dell'aria.

Costante della stanza

$$R = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (7.8)$$

se

$$\bar{\alpha} \ll 1, R = A.$$

$$I = \frac{p^2}{4 \rho c} = \frac{W}{R} \quad (7.9)$$

7.3. CAMPO DI RADIAZIONE DIRETTA

L'ascoltatore nella stanza riceverà sia i suoni diretti provenienti dall'altoparlante che i suoni riflessi. Il rapporto tra suoni diretti e suoni riflessi dipende dalle posizioni relative dell'altoparlante e dell'ascoltatore. Vicino all'altoparlante il suono diretto sarà molto più elevato del suono riflesso, che risulterà inudibile.

Lontano dall'altoparlante il rapporto diminuirà. I luoghi in cui il suono diretto eguaglia il suono riflesso definiscono il contorno all'interno del quale il suono diretto è predominante, mentre all'esterno è predominante il suono riflesso. Tale contorno, per una sorgente puntiforme omnidirezionale di suono, può essere calcolato mediante le equazioni (7.1) e (7.4). Il raggio r_0 dell'area dove il suono diretto è dominante è così dato da

$$r_0 = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (7.10)$$

Per i sistemi di altoparlanti reali occorre tenere anche in considerazione il fattore di direttività.

7.4. LIVELLO SONORO TOTALE

La pressione sonora alternata totale è la somma del suono diretto e del suono riflesso. Per un punto a distanza r dalla sorgente, la pressione sonora dovuta alla radiazione diretta può essere ottenuta dall'equazione (7.3),

$$I = \frac{W Q}{4 \pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad .$$

Quindi

$$p^2 = \frac{W Q \rho c}{4 \pi r^2} \quad .$$

La pressione sonora dovuta al suono riflesso è ottenuta dall'equazione (7.9):

$$I = \frac{p^2}{4 \rho c} = \frac{W}{R} \quad .$$

La pressione sonora totale (diretta + riflessa) è data da

$$p^2 = W \rho c \left(\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4}{R} \right). \quad (7.11)$$

Manipolando l'equazione (7.11) si ottiene

$$\frac{p^2}{p_{ref}^2} = \frac{W}{W_{ref}} \frac{W_{ref} \rho c}{p_{ref}^2} \left(\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4}{R} \right).$$

Il livello di pressione sonora (SPL) ed il livello di potenza (PWL), come definito nella prima parte, è dunque

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} + 10 \log_{10} \frac{W_{ref} \rho c}{p_{ref}^2} + \\ &+ 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \\ \text{SPL} &\approx \text{PWL} + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4}{R} \right). \end{aligned} \quad (7.12)$$

7.5. MISURE DELL'ENERGIA IN AMBIENTE RIVERBERANTE

La stanza riverberante usata per le misure sull'altoparlante è progettata in modo tale che il suono indiretto è maggiore del suono diretto; cioè

$$\frac{4}{R} \gg \frac{1}{4 \pi r^2}$$

Poichè la distanza r tra l'altoparlante e il microfono è di solito più di un metro e $R \approx A$, l'equazione (7.12) può essere riscritta come $\text{PWL} = \text{SPL} - 10 \log. 4/A$, o, usando l'equazione (7.7) $\text{PWL} = \text{SPL} - 10 \log. 25T/V$.

Così, per esempio, se $V = 200 \text{ m}^3$, $\text{PWL} = \text{SPL} - 10 \log. T/8$.

L'ultimo termine è il fattore di correzione che converte la curva di pressione sonora nell'equazione curva dell'energia.

ACUSTICA DELLA SALA D'ASCOLTO

La sala d'ascolto è, normalmente, il soggiorno. Gli unici modi che ha l'ascoltatore di modificare la sua acustica sono quelli di cambiare la posizione di tappeti, tappezzerie e mobili.

8.1. RISONANZE IN UNA PICCOLA SALA D'ASCOLTO

In una sala d'ascolto il suono può viaggiare non solo avanti e indietro tra opposte pareti, ma anche attorno alla stanza per le riflessioni su pareti adiacenti. Per alcuni angoli di riflessione si possono creare onde stazionarie. Poichè ci sono due paia di pareti e soffitto e pavimento, ci possono essere tre gruppi di modi di oscillazione. La frequenza di risonanza delle camere rettangolari sono date dall'equazione di Rayleigh

$$f_n = \frac{c}{2} \left\{ \left(\frac{n_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{n_W}{W} \right)^2 + \left(\frac{n_H}{H} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (8.1)$$

Dove:

- f_n = ennesima frequenza di risonanza (Hz)
- c = velocità del suono (344 m/s)
- L = lunghezza della stanza (m)
- W = larghezza della stanza (m)
- H = altezza della stanza (m)

e n_L , n_W e n_H sono i numeri interi 0, 1, 2, 3

La più bassa frequenza di risonanza prodotta, f_c , dipende dalla lunghezza della stanza ed è definita dall'equazione

$$f_c = c/2L. \quad (8.2)$$

Tab. 8.1 - Le prime frequenze modali in tre tipiche stanze domestiche

| stanza = 6,75 × 3 × 2,6 m | | stanza = 7 × 3,75 × 2,7 m | | stanza = 9 × 5 × 3,6 m | |
|------------------------------|-------|------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| frequenza (Hz) | modo | frequenza (Hz) | modo | frequenza (Hz) | modo |
| 25,19 | 1.0.0 | 24,29 | 1.0.0 | 18,90 | 1.0.0 |
| 50,40 | 2.0.0 | 45,33 | 0.1.0 | 34,00 | 0.1.0 |
| 56,67 | 0.1.0 | 48,57 | 2.0.0 | 37,80 | 2.0.0 |
| 62,00 | 1.1.0 | 51,43 | 1.1.0 | 38,90 | 1.1.0 |
| 65,39 | 0.0.1 | 63,00 | 0.0.1 | 47,22 | 0.0.1 |
| 70,10 | 1.0.1 | 66,44 | 2.1.0 | 50,83 | 2.1.0 |
| 75,56 | 3.0.0 | 67,48 | 1.0.1 | 50,86 | 1.0.1 |
| 75,80 | 2.1.0 | 72,86 | 3.0.0 | 55,70 | 3.0.0 |
| 82,54 | 2.0.1 | 77,59 | 0.1.1 | 58,20 | 0.1.1 |
| 86,52 | 0.1.1 | 79,52 | 2.0.1 | 60,50 | 2.0.1 |
| 90,10 | 1.1.1 | 81,29 | 1.1.1 | 61,20 | 1.1.1 |
| 94,44 | 3.1.0 | 85,80 | 3.1.0 | 66,10 | 3.1.0 |
| 99,92 | 3.0.1 | 90,67 | 0.2.0 | 68,00 | 0.2.0 |
| 113,3 | 0.2.0 | 93,86 | 1.2.0 | 70,60 | 1.2.0 |
| 114,9 | 3.1.1 | 96,30 | 3.0.1 | 73,76 | 3.0.1 |
| 116,1 | 1.2.0 | 102,9 | 2.2.0 | 77,79 | 2.2.0 |
| 124,0 | 2.2.0 | 106,4 | 3.1.1 | 81,22 | 3.1.1 |
| 130,7 | 0.0.2 | 110,4 | 0.2.1 | 82,79 | 0.2.1 |
| 130,8 | 0.2.1 | 116,3 | 3.2.0 | 88,52 | 3.2.0 |
| 132,2 | 1.0.2 | 120,6 | 2.2.1 | 91,00 | 2.2.1 |
| 136,2 | 3.2.0 | 125,9 | 0.0.2 | 94,44 | 0.0.2 |
| 140,1 | 2.0.2 | 128,3 | 1.0.2 | 96,32 | 1.2.2 |
| 140,2 | 2.2.1 | 132,3 | 3.2.1 | 100,3 | 3.2.1 |
| 142,5 | 0.1.2 | 133,8 | 0.1.2 | 100,4 | 0.1.2 |

Ponendo, nell'equazione di Rayleigh, $n_L = 1$, $n_W = 0$ e $n_H = 0$, si ottengono gli stessi risultati dell'equazione (8.2). È prodotta inoltre una serie di armoniche, ottenute ponendo i termini $n_L = 2, 3, \dots$

La tabella 8.1 dà la frequenza di risonanza dei primi 24 modi di oscillazione per tre differenti stanze rettangolari, le cui dimensioni sono illustrate in figura 8.1. Se la sorgente del suono è posta nell'angolo di una di queste stanze, è possibile eccitare tutti questi modi di oscillazione. Tali onde stazionarie modificano di molto le

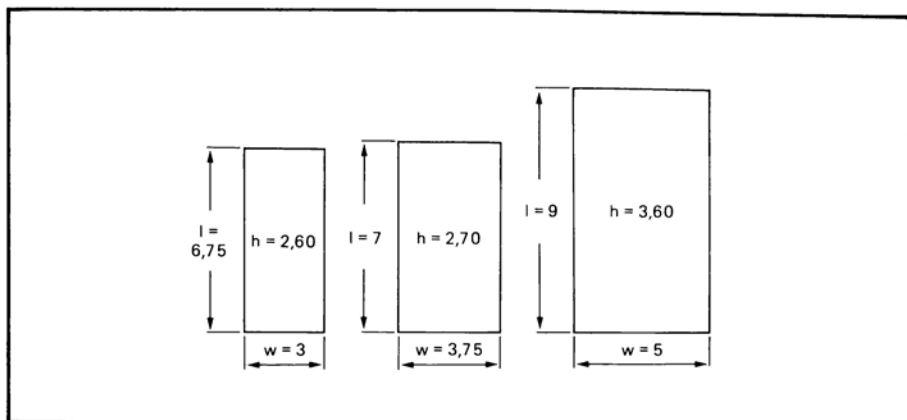


Figura 8.1 — Dimensioni di tre stanze domestiche usate per i confronti.

condizioni di ascolto, in particolare a frequenze basse. Le loro ampiezze dipendono dall'assorbimento. Ciascun modo di oscillazione ha una differente distribuzione di pressione sonora, e la sua costante di smorzamento dipende dall'assorbimento delle stanze e dal volume delle stesse. Quando il suono è cessato, la pressione sonora di ciascun modo decade esponenzialmente con una velocità dipendente dalla propria costante di smorzamento.

In una tipica stanza di piccole dimensioni sono stati misurati anche più di 25 dB di differenze di livello di pressione sonora.

Durante il processo di decadimento, se due modi di oscillazione sono vicini (in frequenza) possono sorgere battimenti. In una grande stanza l'effetto di battimento è trascurabile in quanto vi è una migliore diffusione del suono, mentre in una piccola stanza ci sono poche risonanze al disotto dei 120 Hz (limite inferiore della voce maschile) distribuite in modo discontinuo. A queste frequenze sorgono, nella riproduzione della voce umana, rimbombi a basse frequenze e, a causa dello spettro discontinuo, non può essere ottenuta, in una piccola stanza, il "suono della grande sala". Le frequenze modali delle tre stanze considerate, possono essere tracciate graficamente; la figura 8.2 mostra come le stanze grandi hanno la più lineare distribuzione in frequenza di risonanze naturali, mentre le stanze piccole saranno rimbombanti nella riproduzione della voce maschile. Nel grafico sono date le prime 50 frequenze di risonanza. Nel caso di una stanza molto grande, la prima frequenza di risonanza è infrasonica; essa non ha effetti importanti. Sono più significative invece le ampiezze dei modi di ordine elevato che possono essere udite e che sono, ovviamente, più ridotte che non nel caso della piccola stanza. Una riproduzione naturale può essere quindi ottenuta solo in una grande stanza; nelle stanze piccole sono inevitabili delle "colorazioni del suono".

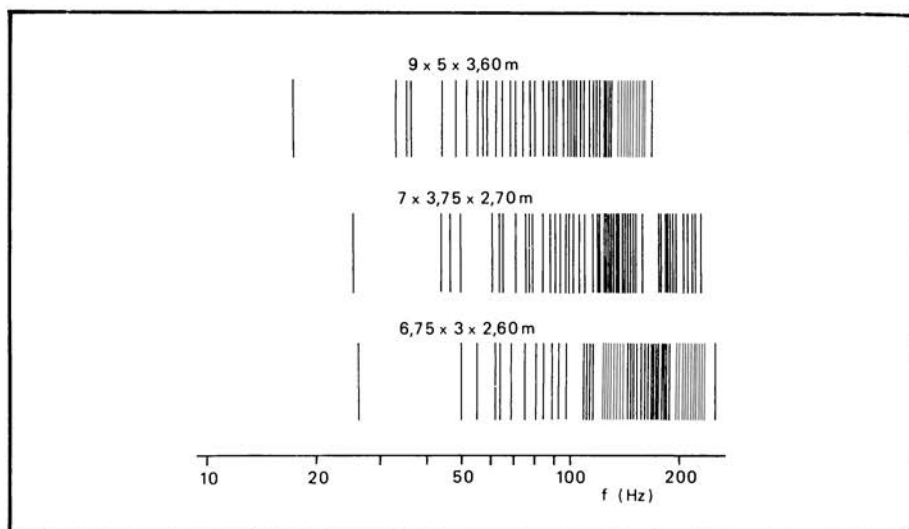


Figura 8.2 — Le prime 50 frequenze modali delle stanze di figura 8.1.

8.2. PROPRIETÀ DELLA STANZA D'ASCOLTO

Abbiamo visto che è preferibile una stanza con un diagramma spettrale dei modi di risonanza avente le linee uniformemente distribuite ad una stanza con diagramma spettrale avente tali linee raggruppate in strette bande separate da buchi. Di conseguenza la peggiore forma per una stanza d'ascolto è quella cubica; questo perché, essendo uguali le tre dimensioni, le risonanze hanno luogo alle stesse frequenze. Fortunatamente le stanze di forma cubica sono rare. Una distribuzione di risonanze pari a un minimo di 10 per ogni terzo d'ottava dà luogo a una buona caratteristica acustica. Si può calcolare che la migliore distribuzione di risonanze per stanze piccole è ottenuta con le dimensioni della lunghezza, larghezza e altezza nei rapporti $1,6 : 1,25 : 1$; per una stanza media $2,5 : 1,6 : 1$; e per una stanza grande, $3,2 : 1,25 : 1$. Confrontiamo ora le tre stanze indicate in figura 8.1. La stanza più piccola ha le proporzioni $2,6 : 1,2 : 1$, mentre le altre due hanno proporzioni di circa $2,5 : 1,4 : 1$.

Come abbiamo visto, entrambe le stanze più grandi hanno una distribuzione spettrale delle risonanze più uniforme e daranno luogo a una minore colorazione del suono. Le onde stazionarie alle frequenze principali devono essere evitate, altrimenti i toni cupi presenti all'uscita dell'altoparlante saranno considerevolmente esaltati. Una stanza con una o più dimensioni pari a 3,44 metri non è dunque ideale in quanto la frequenza di risonanza principale è a 50 Hz.

8.3. RIVERBERAZIONE ED ASSORBIMENTO

Il tempo di riverberazione di una sala d'ascolto è definito come il tempo necessario perché il suono si affievolisca fino ad un livello pari ad un milionesimo dell'intensità originale. Tale valore rappresenta il decadimento del suono da un adeguato livello di ascolto fino alla soglia di udibilità. L'ottimo valore per l'ascolto è compreso tra una piccola riverberazione (che darebbe luogo ad un suono un po' "freddo") e una lunga riverberazione, che darebbe luogo ad un suono incerto. Le ideali condizioni acustiche sono quelle che rendono un certo grado di "vivacità" al suono senza che ne venga a scapito la chiarezza, e quindi dipende anche dal tipo di suono da riprodurre. Se viene riprodotta una musica lenta di un organo, le proprietà acustiche che migliorano le caratteristiche musicali sono quelle che permettono alle canne dell'organo di "risuonare" nell'area di ascolto. Le stesse caratteristiche possono però alterare completamente il suono di una voce umana che parla velocemente. Se l'eco di una sillaba non viene assorbito sufficientemente, il suono delle successive sillabe risulta indistinto e difficile da capire per l'ascoltatore. Il tempo di riverberazione ottimale dipende dunque dal tipo di musica riprodotta e dalle dimensioni della stanza. Dove è importante solo l'intelligibilità della parola, non ci sono limiti

8.4. POSIZIONAMENTO DEI DIFFUSORI E PROVE DI CONTROLLO

Posizionare gli altoparlanti negli angoli della stanza ha tre vantaggi: 1) è la posizione che minimizza gli eventuali inconvenienti domestici; 2) può essere eccitata il maggior numero di risonanze della stanza e quindi ottenere una più omogenea distribuzione delle stesse; 3) ha il vantaggio di un aumento del responso alle basse frequenze. Quando l'altoparlante è montato vicino alla parete, l'effettiva area irradiante alle basse frequenze è teoricamente doppia a causa della riflessione della parete. L'angolo di una stanza ha tre superfici perpendicolari tra loro e quindi l'effettiva area irradiante di un altoparlante posto in un angolo è raddoppiato tre volte. Sarebbe possibile, se le superfici riflettessero il 100% del suono incidente, un guadagno pari a otto.

A causa degli assorbimenti dei tappeti, delle tende ecc. si ha in media un fattore di riflessione delle pareti pari al 50%, per cui si ottiene ugualmente un guadagno che va da 3 a 6 dB (da 2 a 4 volte) della pressione sonora prodotta. Un altro effetto che si ottiene ponendo il diffusore vicino alla parete o nell'angolo è l'aumento dell'impedenza di radiazione, particolarmente alle basse frequenze, che contribuisce ad aumentare l'efficienza in tale gamma.

In una piccola stanza la posizione relativamente isolata delle frequenze di risonanza può creare qualche difficoltà: picchi di segnale che sono presenti a queste frequenze possono infatti risultare sgradevoli. Se siamo in questo caso, occorre

trovare una posizione alternativa per collocare l'altoparlante. Possono essere provate, per esempio, posizioni vicine al centro della parete lunga della stanza; comunque la migliore posizione si può trovare solo sperimentalmente. Per una corretta riproduzione stereo è importante la corretta connessione in fase degli altoparlanti. Essa è di solito indicata chiaramente dal costruttore. Se non ci fosse tale segno di riconoscimento dei terminali, si può stabilire se la connessione in fase di due altoparlanti è corretta ponendoli fianco a fianco ed alimentandoli con lo stesso segnale; essi, se sono collegati in contro fase, esibiscono un'attenuazione della riproduzione delle note basse dovuta al corto circuito acustico. Invertendo le connessioni a uno degli altoparlanti si avvertirà un notevole aumento del suono.

8.5. POTENZA NECESSARIA ALLA SONORIZZAZIONE DI UNA STANZA D'ASCOLTO

La potenza richiesta dipende dal massimo livello acustico voluto nella sala d'ascolto. I fattori determinanti il massimo livello di segnale sono:

- la gamma dinamica di riproduzione richiesta;
- il livello del rumore di sottofondo;
- il volume della stanza d'ascolto;
- il tempo di riverberazione della stessa.

8.5.1. Gamma dinamica

La dinamica del suono di una grande orchestra in una sala da concerto può essere valutata in circa 70 dB; la dinamica della musica registrata è invece più bassa. Le registrazioni di alta qualità suonate su apparecchiature professionali hanno una gamma dinamica di circa 60 dB massimi; i registratori domestici offrono valori considerevolmente inferiori. Lo stesso discorso si può fare per le registrazioni dei dischi, dove la gamma dinamica si aggira attorno ai 55-60 dB. I segnali delle trasmissioni radio AM e FM sono soggetti a limitazione dell'ampiezza e della dinamica, cosicché è improbabile che all'ascoltatore arrivino segnali con gamma dinamica maggiore di 60 dB. Solo le moderne tecniche digitali (Philips Compact Disc, per esempio) possono dare luogo nel futuro a miglioramenti sostanziali.

8.5.2. Livello del rumore di sottofondo

Il livello di rumore di sottofondo dipende dalla locazione della stanza d'ascolto; ovviamente se essa è situata in campagna sarà più silenziosa che non se fosse in

città. In aggiunta, contribuiscono a determinare il livello del rumore, oltre ai suoni che provengono dall'esterno della stanza, i movimenti delle persone, i rumori dei passi, i respiri e così via. In tabella 8.2 sono indicati i tipici livelli di rumore per vari ambienti.

Tabella 8.2 — Livello del rumore in vari ambienti

| noise source = sorgente di rumore | phons |
|--|-------|
| soglia di riferimento a 1000 Hz | 0 |
| soglia di udibilità per soggetti con buono udito | 5 |
| tranquilla casa di campagna a notte fonda | 20 |
| tranquilla casa di campagna di sera | 25 |
| studio di registrazione | 30 |
| tranquilla stanza domestica | 30* |
| stanza domestica media | 40 |
| conversazione tranquilla | 50 |

* tanto minore è il livello del rumore ambientale, tanto più gradevole sarà la musica riprodotta, questo perché la piena gamma dinamica di 60 dB può essere ottenuta senza superare il livello massimo consigliato per l'ascolto di 90 dB.

8.5.3. Calcolo della potenza acustica necessaria

La potenza acustica necessaria per ottenere una pressione sonora SPL di 2×10^{-5} N/m² (Pa), che è la soglia di udibilità ad 1 kHz, può essere calcolata dalle equazioni date nel paragrafo 7. Dalla equazione (7.9) otteniamo:

$$\frac{p^2}{4 \rho c} = \frac{W}{R}$$

dove $p = 2 \times 10^{-5}$ N/m² (Pa) $\rho \approx 1,18$ kg/m³ $c = 344$ m/s e, generalmente, $R \approx A$. Sostituendo nell'equazione (7.7) otteniamo

$$W_{\text{soglia}} = 4 \times 10^{-14} \text{ V/T watt.} \quad (8.3)$$

L'equazione (8.3) stabilisce il livello di soglia da cui è derivata la potenza finale. Consideriamo la riproduzione musicale in una stanza d'ascolto. Se non c'è rumore ambientale, nelle pause musicali l'unico suono udibile è il rumore elettrico del sistema di riproduzione. Se tale sistema ha un soddisfacente rapporto segnale-rumore, esso non dovrebbe dare fastidio, mentre in impianti di classe inferiore, tale rumore può dare disturbo, soprattutto con il controllo di volume piuttosto alto. I segnali di rumore presenti in queste condizioni sono anche quelli provenienti dalla puntina del pick-up che scorre sul disco o il soffio del nastro magnetico. In aggiunta a questo, c'è il rumore ambientale che, generalmente, maschera il rumore elettrico, specialmente se l'impianto è di buona qualità. Il programma musicale viene riprodotto in maniera soddisfacente se è ad un livello superiore ai rumori descritti precedentemente (almeno di circa 30 dB). Il massimo livello di potenza acustica richiesta sarà quindi

$$W_{\max} = W_{\text{soglia}} + W_{\text{rumore ambientale}} + W_{\text{programma musicale}}$$

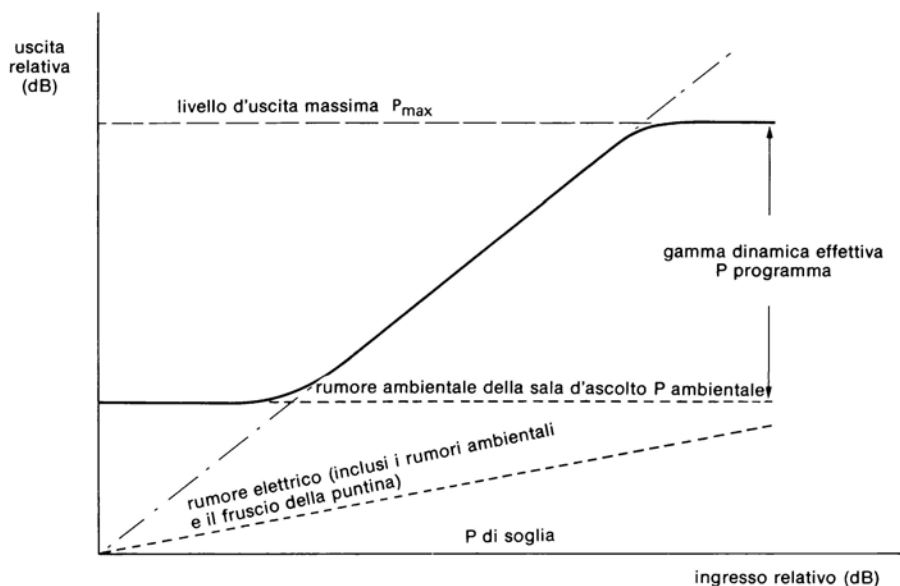


Figura 8.3 — Fattori determinanti la massima potenza acustica.

Maximum output level = livello d'uscita massima; effective dynamic range = gamma dinamica effettiva; listening room background noise = rumore ambientale della sala d'ascolto; electrical noise (incl. atmospherics, meedle scratch) = rumore elettrico (inclusi i rumori ambientali e il fruscio della puntina); Pback-ground = $P_{\text{ambientale}}$; $P_{\text{threshold}} = P_{\text{di soglia}}$.

dove $W_{\text{rumore ambientale}}$ è il rumore ambientale massimo e $W_{\text{programma musicale}}$ è la potenza richiesta per coprire la gamma dinamica completa del programma riprodotto, come mostrato in figura 8.3. Se il livello di rumore ambientale è di 30 phons e la gamma dinamica del programma musicale è di 60 dB, il livello di picco ammonta ad un totale di 90 dB sopra la soglia data dall'equazione (8.3).

La massima potenza acustica richiesta è ottenuta dall'espressione generale

$$W_{\text{max}} = 4 \frac{V}{T} \times 10^{n-14} \text{ watt acustici} \quad (8.5)$$

dove n è il livello sonoro di picco in bells (dB/10) oltre la soglia, che è dato dal livello del rumore ambientale più la gamma dinamica musicale. Consideriamo una stanza d'ascolto di 7 metri di lunghezza, 3,75 metri di larghezza e 2,7 metri di altezza, già trattata precedentemente. Il suo volume è di 70 metri cubi e, se la stanza è sufficientemente fornita di materiali acusticamente assorbenti, possiamo assumere un tempo di riverberazione di 0,4 s.

La potenza acustica richiesta per riprodurre un programma con una gamma dinamica di 60 dB sul rumore ambientale di 30 phons è di

$$W_{\text{max}} = \frac{4 \times 70 \times 10^{9-14}}{0,4} = 7 \times 10^{-3} \text{ watt acustici.}$$

8.5.4. Stima della potenza nominale

Avendo stabilito la potenza acustica richiesta, possiamo ora determinare la potenza nominale che si richiede all'altoparlante. Supponiamo che l'efficienza del sistema di altoparlanti sia dell'1%, la potenza elettrica in ingresso sarà di

$$100 \times 7 \text{ mW} = 0,7 \text{ W.}$$

La discussione seguente è basata sul desiderio di ottenere la riproduzione del suono nel modo più realistico possibile, ed è applicabile solo agli impianti ad alta fedeltà. Ci sono molte applicazioni dove le specifiche possono essere meno restrittive, ma è importante ricordare che la potenza nominale dell'altoparlante deve sempre essere adeguata alle esigenze, preferibilmente con un po' di margine in modo da accettare, senza distorsione, i picchi di potenza del segnale proveniente dall'amplificatore. In figura 8.4 (a) sono illustrate le curve di Fletcher-Munson. Le curve a 90 phon, sono sostanzialmente piatte nella zona delle frequenze basse, quindi la potenza, relativamente bassa, di 0,7 w dell'esempio precedente è adeguata a riprodurre il segnale ad un livello di 90 dB su tutta la banda. A 40 Hz, a bassi livelli di pressione sonora, la soglia è quasi 60 dB oltre la soglia che si ha a 1000 Hz, quindi, con il controllo del volume basso, la sensibilità del sistema di

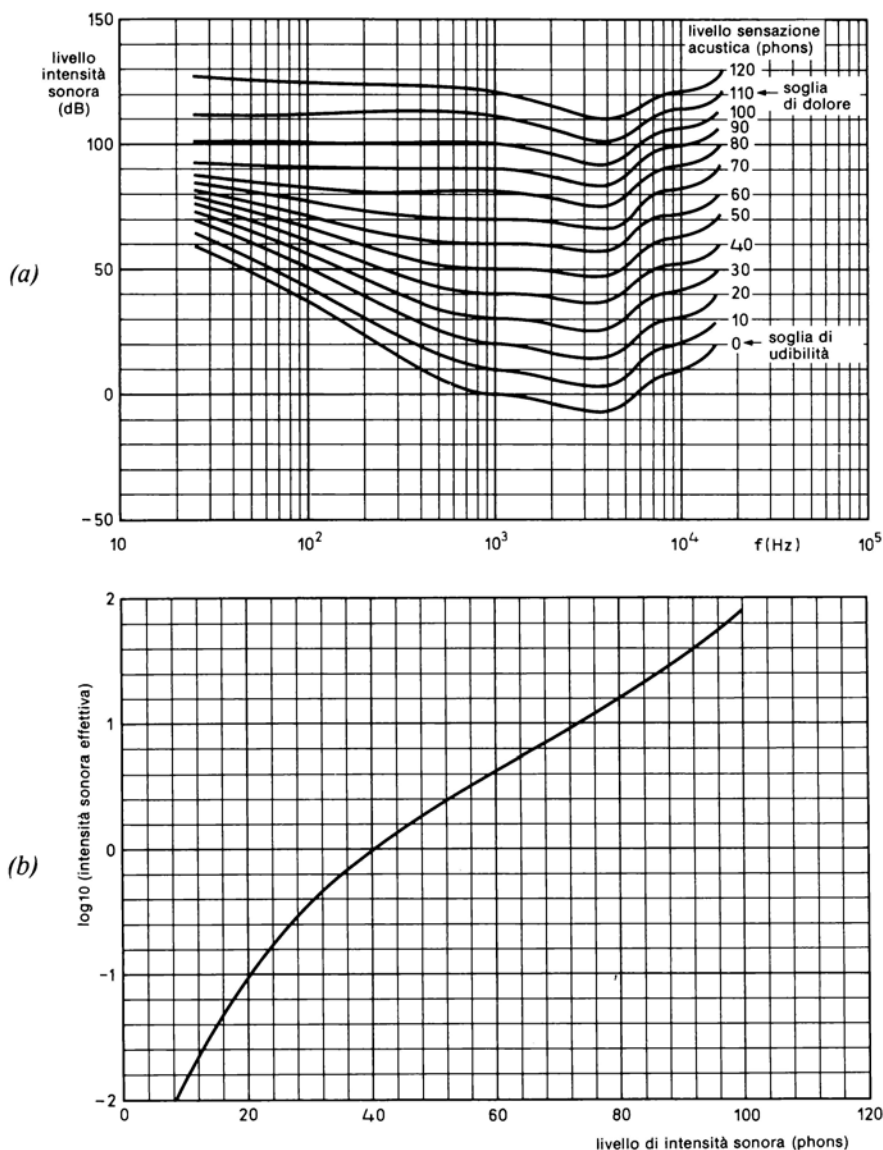
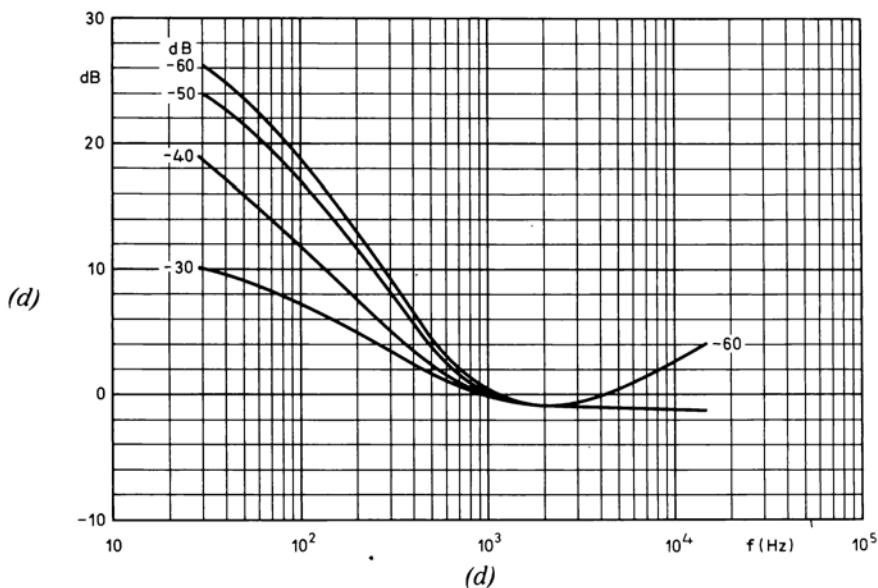
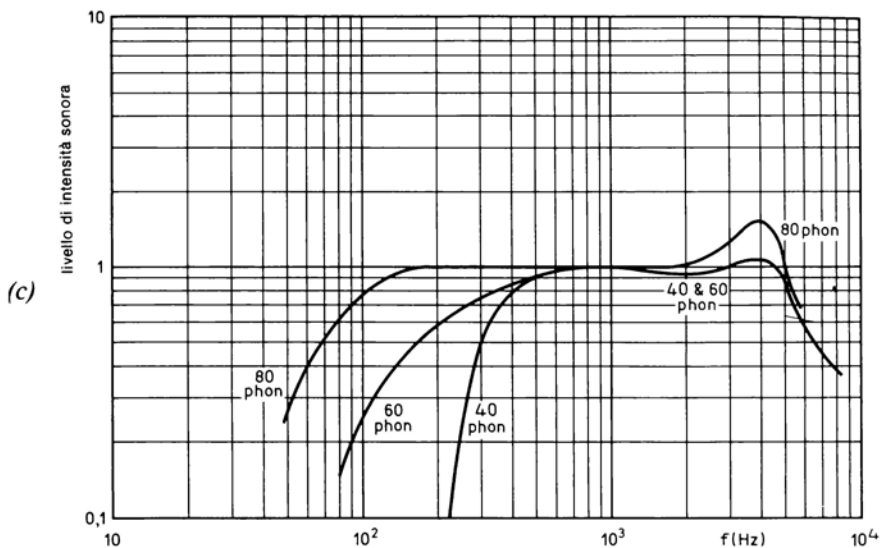


Figura 8.4 — Principio del controllo fisiologico del volume. (a) La sensazione sonora è sostanzialmente logaritmica oltre circa 40 phons. Prendendo le sensazioni sonore alle varie frequenze per una data intensità e correggendo per il responso logaritmico modificato dall'orecchio come è illustrato in figura (b), si può determinare la reazione sonora effettiva in funzione della frequenza che è mostrata in figura (c). La



curva (c) illustra chiaramente quanto la diminuzione della pressione sonora causa una perdita dei toni bassi. Per contrapporsi a questo fenomeno si usa il controllo di "loudness" presente su molti amplificatori.

Intensity level = livello di intensità sonora; loudness level = livello di sensazione acustica; threshold of audibility = soglia di udibilità; threshold of pain = soglia di dolore.

riproduzione alle frequenze basse dovrebbe essere aumentata, altrimenti il segnale, a tali frequenze, può non essere udibile; questo compito è svolto dal controllo fisiologico del volume come viene illustrato in figura 8.4. Quella descritta è una buona soluzione, ma, per vincere questa carenza, è più diffuso usare il controllo dei toni bassi. Normalmente si usa incrementare i toni bassi di circa 20 dB massimi. Però, a meno che non sia utilizzato il controllo fisiologico del volume, l'aumento di tali frequenze si ha a tutte le posizioni del controllo di volume e non solo ai bassi livelli. Per prevenire distorsioni a causa dell'aumento dei toni bassi, la potenza nominale del sistema deve essere incrementata. Nell'esempio citato, la potenza di picco richiesta diventa

$$0,7 \times 10^2 = 70 \text{ W.}$$

L'orecchio è più tollerante ai livelli sonori elevati quando si è in presenza di una riproduzione stereofonica. Se la potenza richiesta di 70 W è applicata ad entrambi i canali, la potenza nominale di ciascun sistema di altoparlanti e la potenza di uscita di ogni amplificatore, in condizioni di aumento dei toni bassi, dovrebbe quindi essere di 70 W di picco e la potenza acustica richiesta sarà correttamente soddisfatta per entrambi i canali, individualmente. Questo non significa che i 140 W saranno necessari in ogni istante, ma solo se ciò sarà utile ad ottenere la potenza acustica richiesta. La potenza calcolata prima è la potenza teoricamente necessaria; in pratica, normalmente, la potenza richiesta può essere più bassa; essa dipenderà anche dalla posizione dell'altoparlante. Se viene posto in un angolo, possiamo aspettarci un guadagno da 2 a 4 volte (da 3 a 6 dB), come abbiamo visto nel paragrafo 8.5. La potenza necessaria può allora essere ridotta da 70 W di picco (potenza musicale) a, poniamo, 35 W. In pratica il sistema dovrà fornire una potenza sinusoidale di 25 W r.m.s.; tenendo presente che, per la maggior parte del tempo, si lavorerà ad un livello molto più basso. Comunque la situazione varia da caso a caso; essa dovrà essere accuratamente valutata e, in funzione della posizione degli altoparlanti e dell'assorbimento della stanza, si determinerà la potenza necessaria ottimale. Nel caso della riproduzione monofonica la situazione è leggermente diversa. Un livello di 90 phon quando è riprodotto da un sistema monofonico "suona" in maniera piuttosto dura ed irritante che non nel caso di un impianto stereo, o quando è prodotto dal vivo da una orchestra. Questo perché se il suono è emesso da una piccola sorgente, non entra in gioco la discriminazione direzionale delle orecchie, il che porta a ridurre il livello sonoro e la gamma di frequenze riprodotte da un impianto monofonico. Sarà quindi richiesta una potenza un poco inferiore ai 35 W calcolati, in pratica, nel caso in cui l'altoparlante è situato in posizione angolare, 15 W dovrebbero essere considerati sufficienti.

8.5.5. Raccomandazioni generali

Da quanto detto precedentemente, si vede che non esiste un metodo immediato per stabilire la potenza richiesta da una determinata sala d'ascolto; può solo essere

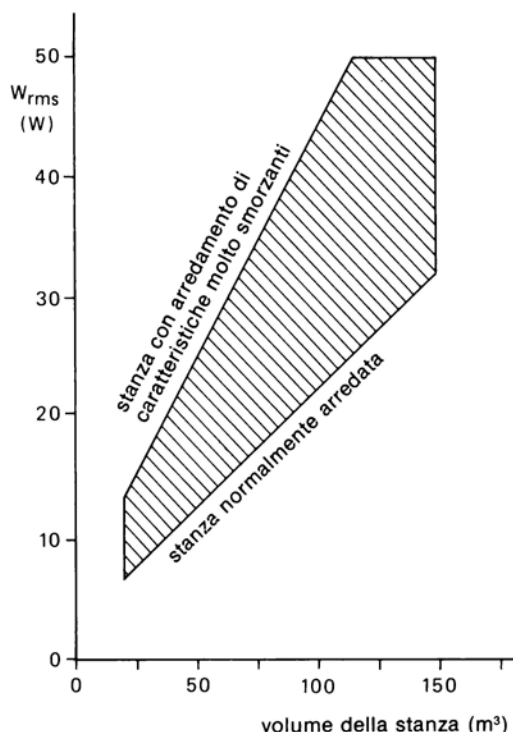


Figura 8.5 — Potenza nominale raccomandata (W_{rms}) di ciascuna cassa di un impianto stereo per differenti valori del volume della stanza. Si considerano gli altoparlanti, posti negli angoli, aventi un'efficienza dell'1%. Heavily damped over-furnished room = stanza con arredamento di caratteristiche molto smorzanti; normally furnished room = stanza normalmente arredata.

fatta una stima sufficientemente realistica. In figura 8.5 è data la potenza nominale raccomandata per entrambe le casse in un impianto stereo, assumendo che l'altoparlante sia disposto in un angolo della stanza e abbia una efficienza dell'1%. Possiamo vedere dalla figura 8.5 che vi possono essere variazioni di potenza 2 : 1. Questo è fatto per coprire le differenti condizioni ambientali e fattori di assorbimento delle stanze d'ascolto. Usando il grafico, si deve porre una attenzione particolare all'efficienza dell'altoparlante. La potenza data sarà sufficiente a riprodurre un programma musicale avente una gamma dinamica massima di 60 dB sul rumore ambientale di 30 dB con 20 dB di incremento delle note basse. Se necessario possono essere calcolati in modo più specifico casi particolari, ma ciò che raccomanda il grafico dovrebbe essere in grado di soddisfare completamente l'audiofilo, in termini di qualità di ascolto, permettendogli di ottenere le migliori prestazioni dal proprio impianto.

ACUSTICA DELLE GRANDI SALE

Così come in una piccola stanza d'ascolto, l'acustica di una grande sala da concerto o di un teatro ha un notevole effetto sul responso degli altoparlanti. Una stanza che esibisce tutti i tipi di risonanze a basse frequenze e un lungo tempo di riverberazione è l'incubo degli oratori, mentre una sala dalla risposta neutra con scarsa tendenza alle risonanze può "soffocare" una esibizione musicale. I sistemi di altoparlanti, o meglio, i sistemi di sonorizzazione pubblica possono essere costruiti per favorire una particolare sala od un particolare tipo di sale.

9.1. CARATTERISTICHE DELLA SALA

Consideriamo un sistema di altoparlanti posto in un auditorio e un microfono posto al di fuori del campo di radiazione diretta dell'altoparlante, e precisamente nel posto normalmente occupato da un oratore. Se il sistema di altoparlanti è alimentato con un segnale sinusoidale variabile linearmente in frequenza attraverso tutto lo spettro audio, il suono raccolto dal microfono avrà una caratteristica in frequenza molto tormentata, soprattutto se confrontata con l'uscita dell'altoparlante. Questo perché il segnale acustico arriva al microfono attraverso svariate vie a causa delle riflessioni del suono lungo le pareti della sala.

Tali percorsi sono gli stessi per qualsiasi frequenza in esame, ma variano fortemente sia le fasi relative che le ampiezze a causa della diversa lunghezza d'onda e dell'assorbimento subito dai segnali che raggiungono il microfono da vie diverse. Il risultato di questo è un diagramma in frequenza con dei picchi della pressione sonora di circa 14 dB oltre il livello medio. Benchè questo sia un valore tipico, cioè non assoluto, può essere un parametro utile ad evitare la reazione acustica: se la pressione sonora media è di 14 dB inferiore alla soglia oltre la quale si ha la reazione acustica, si hanno in genere sufficienti garanzie per evitare tale effetto.

9.2. INTELLIGIBILITÀ

Il punto per il quale il suono diventa inintelligibile a causa delle riverberazioni e di altre influenze disturbanti si ha quando il suono coerente, proveniente dalla

sorgente, è ad un livello, nel punto di ascolto, inferiore al livello del suono non coerente. In questo caso il suono coerente è quello che proviene direttamente dalla sorgente ed il suono riverberato con un ritardo inferiore ai 50 ms. Il suono non coerente comprende i suoni riverberati con ritardi maggiori di 50 ms più i rumori ambientali ricevuti direttamente o per riflessione provenienti da altre sorgenti. Il suono riverberante è la somma di tutti i suoni riflessi provenienti dalla sorgente. La pressione sonora misurata dopo 50 ms sarà in funzione della frequenza e della lunghezza dei percorsi fatti dal segnale. Quello che però a noi interessa nella presente discussione è il livello generale del suono, che, a causa delle molte differenze di fase in gioco, dà luogo a cancellazioni e rinforzamenti della pressione sonora. Benchè sia difficile essere precisi circa il punto per il quale il suono diventa inintelligibile (poichè questo è in parte dipendente dal tipo di suono considerato), i suoni riflessi ritardati di più di 50 ms rispetto al suono diretto sono generalmente considerati avere effetti distruttivi sul suono stesso. Il rumore ambientale che interferisce sarà in genere distribuito uniformemente in ogni punto della stanza; la sua potenza totale può essere data come un fattore, γ , della potenza trasmessa dalla sorgente. Ovviamente il rumore ambientale ha un notevole effetto sull'intelligibilità; ciò è riportato in figura 9.1, dove la distanza dalla sorgente del suono

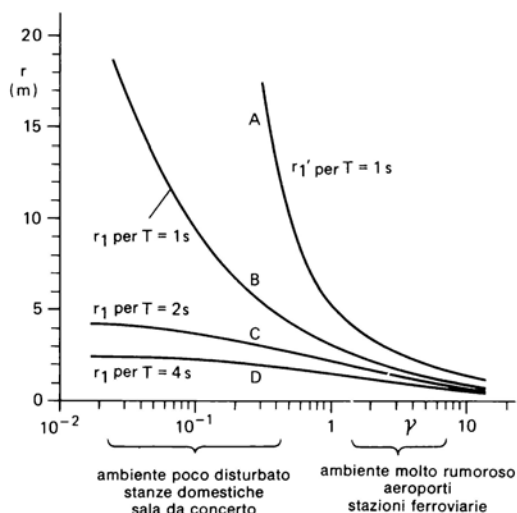


Figura 9.1 — Curve di comprensibilità in un ambiente di 4.900 m^3 . Curva A — suono coerente/suono incoerente = 0,5. Curve B, C e D — suono coerente/suono incoerente = 1.

Low ambient noise, living rooms, concert halls = ambiente poco disturbato, stanza domestica, sala da concerto; high ambient noise, airports, railway stations = ambienti molto rumorosi, aeroporti, stazioni ferroviarie.

necessaria perché esso sia intelligibile, r_1 , e quella per cui il suono non è intelligibile, r'_1 , sono riportate in funzione di γ per vari valori del tempo di riverberazione, T , in una stanza di 4900 m³. Il suono viene considerato intelligibile quando il rapporto tra la parte coerente e la parte incoerente è 1. In questo caso, il suono non intelligibile è considerato come il suono per il quale il livello della parte coerente è $\frac{1}{2}$ del livello della parte non coerente del suono stesso. Aumentando il tempo di riverberazione si ottiene, come già stabilito, una riduzione dell'intelligibilità, e in figura 9.1 si può vedere anche questo. Una buona sala da concerto con una riverberazione relativamente lunga (due secondi, per esempio) è inadatta per rappresentazioni teatrali, per le quali è più appropriato un tempo di riverberazione di 0,7 - 0,8 secondi.

9.3. TECNICHE ACUSTICHE ED ELETTROACUSTICHE

Vediamo ora una serie di importanti punti che caratterizzano le proprietà acustiche di una sala. Tali punti sono già stati discussi; in questo paragrafo riassumeremo le considerazioni più importanti.

9.3.1. Posizione della sorgente del suono

La sorgente del suono nella stanza, sia essa un'orchestra o altoparlanti per sonorizzazione pubblica, è bene sia collocata in un punto visibile da qualsiasi parte dell'uditorio. Nei punti in cui la sorgente non si vede, è probabile che il suono subisca un'attenuazione delle frequenze medie ed, in particolar modo, di quelle acute.

9.3.2. Suoni riflessi

Il tempo di riverberazione dovrebbe generalmente essere tenuto abbastanza corto, in accordo con quanto abbiamo già trattato.

La parte coerente del suono deve essere mantenuta ad un livello il più alto possibile rispetto ai rumori ambientali ed ai rumori riverberati aventi un ritardo di più di 50 ms. Posizionando gli altoparlanti negli angoli o a ridosso delle pareti si migliora, generalmente, il segnale coerente per aumento dell'impedenza di radiazione, e quindi dell'efficienza; inoltre si ha un aumento di direttività e di guadagno nella direzione della radiazione.

9.3.3. Arredamento della sala.

Se le poltrone dell'auditorio sono ben imbottite, in modo da presentare un buon grado di smorzamento acustico, l'acustica della sala non sarà molto variabile in funzione degli spettatori presenti.

9.4. L'AMPLIFICAZIONE SONORA

Se il sistema di sonorizzazione è usato per amplificare voci e/o strumenti in una sala, il microfono è, naturalmente, posto al di fuori del campo di radiazione diretta degli altoparlanti in modo da evitare la reazione acustica. Il microfono percepirà comunque alcuni suoni indiretti. Se il suono che deve essere amplificato ha una densità di energia al microfono pari ad E_o , e l'uscita dell'altoparlante dovuta a questo ingresso dà luogo a una potenza acustica pari a W_a , possiamo dire che:

$$W_a = \eta \frac{u^2}{R_L} = \eta \frac{1}{R_L} (\nu_s \alpha \sqrt{E_o})^2 = \beta E_o \quad (9.1)$$

dove:

- u = velocità del volume d'aria
- R_L = resistenza dell'altoparlante
- η = efficienza dell'altoparlante
- ν = amplificazione
- s = sensibilità del microfono
- α = fattore di conversione tra la pressione sonora p e la radice quadrata della densità di energia $\sqrt{E_o}$.

Il campo indiretto dell'altoparlante è ottenuto dall'equazione (7.4)

$$E_i = 0,072 \frac{T}{V} = 0,072 \beta E_o \frac{T}{V} .$$

Poichè la densità di energia al microfono, E_o , deve essere 14 dB maggiore di quella del campo indiretto E_i , possiamo dire che $E_i/E_o \leq 0,04$ così $0,072 \beta T/V \leq 0,04$ e $\beta \leq 0,556 V/T$. Questo diventa

$$\beta \leq 0,056 \frac{V}{T} \cdot \frac{Q_m}{Q_1} \quad (9.2)$$

per un microfono e altoparlanti con fattori di direttività di Q_m e Q_1 rispettivamente.

Il termine Q_1^* è una funzione di Q_1 che tiene conto dell'assorbimento dell'area della stanza nella quale l'altoparlante è diretto. Questo è a sua volta funzione delle dimensioni della stanza e di parecchi altri parametri; ma generalmente Q_1^* può essere uguagliato a Q_1 senza grandi perdite di precisione. Il microfono deve essere posto nel campo diretto prodotto dalla sorgente del suono, altrimenti la pressione sonora utile si riduce drasticamente ed il rapporto tra tale suono e il rumore

ambientale diminuisce. Con il microfono posto nel campo diretto l'intensità ricevuta da una sorgente omnidirezionale è definita dall'equazione (7.1)

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

La potenza acustica irradiata utile dall'altoparlante è quindi data dalle equazioni (9.1) e (9.2):

$$W_a = \beta E_s = \frac{0,556}{4 \pi r^2 c T} \frac{W V}{T} = 0,044 \frac{W}{c r^2} \cdot \frac{V}{T} \cdot \frac{Q_m}{Q_1} \quad (9.3)$$

I sistemi di sonorizzazione pubblica necessari per determinate sale possono essere specificati usando le equazioni date. I microfoni devono essere posti nel campo non interessato direttamente dalla radiazione degli altoparlanti in modo da evitare la possibilità di reazione acustica. Il volume della stanza, V , e il tempo di riverberazione, T , si possono determinare facilmente. Si deve inoltre conoscere la densità di energia della sorgente del suono al microfono, E_o , e questo implica la conoscenza dell'intensità del suono stesso e la sua distanza dal microfono. Un oratore sviluppa mediamente una potenza acustica di circa 20 mW quando parla molto forte. Tipicamente, in una sala di 5000 metri cubi con un amplificatore da 100 W che pilota un altoparlante avente un'efficienza dell'1%, un cantante dovrebbe tenere il microfono a circa 2,5 cm. dalla propria bocca in modo da ottenere il meglio dal sistema di amplificazione ed escludere la reazione acustica. La distanza può però anche variare, e possono essere necessari dei calcoli per ottenere i nuovi parametri del sistema (sensibilità del microfono, amplificazione e così via), per ottenere una maggior distanza tra microfono e utilizzatore. È preferibile usare il numero più ridotto possibile di microfoni in quanto ciascuno capterà del rumore ambientale che si aggiungerà al livello del suono non utile che verrà amplificato dal sistema. La qualità del suono totale è ovviamente dipendente dalla qualità del sistema e dalle caratteristiche della sala.

Calcoli ed esperimenti possono indicare la migliore posizione degli altoparlanti e l'adatto livello sonoro ma, chiaramente, una buona qualità non può essere ottenuta senza un adatto sistema di altoparlanti. Viceversa, altoparlanti di buona qualità possono ottenere il meglio di un cattivo ambiente.

APPENDICE

CASSE ACUSTICHE HI-FI DI POTENZA

In un impianto HI-FI, il componente più critico e pertanto il più importante è la cassa acustica, la quale deve ritrasformare in vibrazioni sonore più naturali possibili le corrispondenti variazioni di corrente fornite dall'amplificatore di potenza. Attualmente, entrare in possesso di un amplificatore capace di amplificare linearmente tutta la banda audio non è più un problema neanche dal punto di vista economico. È invece il terminale dell'impianto HI-FI, e cioè, la cassa acustica la quale se non ben dimensionata ed equipaggiata con appropriati altoparlanti, rischia di non riprodurre tutte le frequenze audio fornite dall'amplificatore.

Da pag. 49 a pag. 64 abbiamo esaminato in dettaglio le caratteristiche di alcuni altoparlanti. Diamo ora alcuni suggerimenti per la realizzazione di casse HI-FI.

Criteri di progetto

Il notevole successo incontrato dalle casse acustiche ermeticamente chiuse è dovuto al fatto che esse consentono di dare una notevole potenza di uscita sonora ed un'ottima risposta alle frequenze audio in gioco pur mantenendo dimensioni relativamente ridotte. La maggior parte dei costruttori di casse e degli amanti dell'alta fedeltà sono concordi nell'affermare che la realizzazione di questo tipo di cassa non presenta difficoltà, e di conseguenza può essere facilmente autocostruita.

La cosa più importante che deve tener presente chi intende realizzare da sé le casse descritte è la necessità di mantenere invariato, per ciascun tipo di cassa, il valore di litri indicato; mantenuto fisso questo parametro, il costruttore potrà variare le dimensioni della sua cassa rispetto a quelle proposte a seconda delle sue esigenze o alle caratteristiche del luogo dove le casse dovranno essere installate, senza correre il pericolo che vengano minimamente alterate le prestazioni specificate.

Gli altoparlanti consigliati sono stati oggetto di una particolare selezione che ha tenuto conto della struttura delle casse descritte. Se verranno adottati tutti gli accorgimenti costruttivi che l'amatore HI-FI abituato a questo tipo di costruzioni

ben conosce, sarà possibile realizzare casse acustiche capaci di dare le stesse prestazioni di quelle offerte dai rivenditori di prodotti HI-FI, e che, come tutti sanno, hanno prezzi molto elevati.

Materiali da impiegare

I pannelli delle casse devono essere di legno trucciolato compatto da 16 mm, 20 mm, oppure da 36 mm a seconda del tipo di cassa che si vuole realizzare. Le cornici di supporto interne devono essere fatte di listelli a sezione quadrata 20 mm x 20 mm di abete o di pino. All'interno della cassa va applicata lana di vetro. Per le griglie di protezione degli altoparlanti va usato tessuto a maglie larghe. Sono richiesti altri accessori come: viti, colla, strisce di gomma piuma, ecc. Le dimensioni delle casse possono anche essere cambiate purché venga mantenuta invariata la capacità in litri di ciascuna cassa.

Suggerimenti per la costruzione delle casse

Innanzitutto occorre realizzare una costruzione solida; questa è la premessa indispensabile per poter ricavare dalla cassa le prestazioni indicate; di conseguenza, tutti i punti di giunzione dei pannelli e dei listelli delle cornici interne dovranno essere rigidi e compatti. Oltre a ciò, si tenga presente che:

- 1) nulla deve esistere sia all'interno che all'esterno della cassa capace di entrare in vibrazione con i coni degli altoparlanti.
- 2) non deve esserci nessun passaggio di aria tra la parte anteriore e quella posteriore dei coni degli altoparlanti; ciò potrebbe influire sulla vibrazione degli altoparlanti stessi: in altre parole, non devono verificarsi "corti circuiti acustici" di nessuna natura.

Ogni cassa acustica dovrà pertanto essere strutturalmente rigida e compatta e a tenuta d'aria.

Fatte queste premesse di carattere generale, diamo alcuni suggerimenti per chi volesse farsele da sé.

1. Per prima cosa, costruire il pannello anteriore (baffle), quello cioè che dovrà ospitare gli altoparlanti. Produrre una svasatura adatta ad accogliere gli altoparlanti in modo che quest'ultimi risultino incassati a filo con il baffle e trovarsi nella posizione corretta quando si dovrà fissarli mediante viti.

2. Applicare sulla parte posteriore della flangia degli altoparlanti, lungo tutto il bordo, una striscetta di gomma piuma autoadesiva. Indi, fissare gli altoparlanti sul pannello mediante viti e nella posizione corretta.
3. I pannelli della cassa devono essere tenuti assieme da una incastellatura interna (riquadro) fatta di listelli di abete o di pino a sezione quadrata. Incollare abbondantemente le parti terminali dei listelli dell'incastellatura prima di fissarli definitivamente mediante viti. Ciò darà alla cassa la robustezza e la rigidità richieste.
4. Foderare l'interno della cassa con la quantità di lana di vetro indicata fissandola mediante punti metallici. (Attenzione! Maneggiare la lana di vetro con guanti per non avere problemi d'irritazione della pelle). Al posto della lana di vetro potrà essere impiegata anche ovatta di lana o materiale simile.
5. Ricoprire i lati dei listelli rispettivamente anteriore e posteriore dell'incastellatura con striscette di gomma piuma autoadesiva. Fatto ciò, fissare sui listelli così gommati il pannello rispettivamente anteriore e posteriore della cassa. Assicurarsi che i punti di unione dei pannelli siano a tenuta di aria.
6. Costruire e fissare la griglia da sistemare davanti agli altoparlanti.
7. Collocare la cassa in un punto dove la sua risposta in frequenza non possa essere disturbata. Per esempio, tenerla lontana da mobili o tende.

APPENDICE: Differenti maniere di esprimere la potenza fornita da un altoparlante.

Un altoparlante produce un suono per il fatto che nella sua bobina mobile circola una corrente alternata. Il tono del suono dipende dalla frequenza di questa corrente alternata. L'intensità del suono prodotto dipende, a sua volta, dall'intensità della corrente circolante nella bobina mobile. In termini elettrici, la potenza ($V \times I$) che un altoparlante può fornire può essere definita in tre modi. Nei dati tecnici forniti dai costruttori di altoparlanti si parla infatti di:

- potenza operativa (operating power)
- livello di potenza trattata (power handling capacity)
- potenza musicale (music power).

Ciascuna di queste tre "angolazioni" con cui è osservata la potenza di un altoparlante serve a definire una condizione operativa che non ha alcuna relazione con

le altre due. (Ciò non toglie che un esperto progettista di casse non possa quantificare due dei suddetti parametri partendo da quello noto).

Potenza operativa

Viene definita come la potenza d'ingresso capace di produrre alla distanza di 1 metro, lungo l'asse dell'altoparlante, una pressione sonora di $12 \mu\text{bar}$ (oppure $4 \mu\text{bar}$ alla distanza di 3 m). Prendendo come livello di riferimento (e cioè 0 dB) una pressione sonora di $2 \times 10^{-4} \mu\text{bar}$ (e cioè $2/10.000 \mu\text{bar}$), una pressione sonora di $2 \mu\text{bar}$ corrisponderà a 96 dB (e $4 \mu\text{bar} = 86 \text{ dB}$).

Questa definizione di potenza dell'altoparlante (e cioè la sua potenza operativa), nonostante la sua semplicità, costituisce un buon punto di partenza per tutti i calcoli inerenti al progetto di una cassa. Ovviamente è espressa in watt, e viene calcolata molto semplicemente aumentando la potenza d'ingresso dell'altoparlante sotto misura fino a quando non si sia raggiunta, alla distanza sopra specificata, la pressione sonora di $12 \mu\text{bar}$.

Si deve tener presente che la pressione sonora di 96 dB corrisponde a un suono molto intenso: poche persone desidererebbero un suono così intenso nelle loro abitazioni. Esistono però dei "patiti" i quali più che "ascoltare" vogliono "sentire" la musica, e per i quali i 96 dB rappresentano un livello d'intensità medio. In entrambi i casi, la potenza operativa come l'abbiamo descritta, è in grado di dare un'idea molto precisa circa le possibilità di cui un altoparlante sarà capace. Per esempio, se nei dati tecnici è scritto che la potenza operativa di un dato altoparlante è 1 W, ciò significa che applicando a questo altoparlante la potenza elettrica di 1 W, esso è capace di fornire alla distanza di 1 m, un livello di pressione pari a 96 dB.

Livello di potenza trattata

Il parametro "potenza operativa" non è in grado di dirci quanta potenza elettrica un dato altoparlante può "sopportare" prima di guastarsi o di danneggiarsi. Questo dato molto importante ci viene fornito, a sua volta, sotto due punti di vista.

- Come livello di potenza trattata.
- Come livello di potenza musicale.

Consideriamo il primo aspetto. Riprendiamo il nostro altoparlante con potenza operativa di 1 W, e supponiamo di ottenere da esso un livello sonoro di 100 dB. Vogliamo cioè 4 dB in più rispetto ai 96 dB di prima, il che significa che la primitiva potenza d'ingresso (e cioè 1 W) dovrà essere moltiplicata per 2,5; dovremo cioè applicare all'ingresso dell'altoparlante non 1 W ma 2,5 W. Cosa però potrebbe succedere se noi volessimo in corrispondenza dei bassi, un'esaltazione di 10 dB?

Questo significherebbe che ora, per questi bassi, occorrerebbe aumentare di 10 volte la potenza applicata dall'altoparlante, occorrerebbe cioè che l'altoparlante trattasse 25 W!

A questo punto ci rendiamo conto che la sola definizione "di potenza operativa", non basta a specificare tutte le caratteristiche di un altoparlante. Pertanto, oltre a sapere quanta potenza richiede un altoparlante per dare, ad una certa distanza, una data pressione sonora, occorrerà anche conoscere quanta potenza complessivamente l'altoparlante può trattare o tollerare senza guastarsi. Quest'ultimo dato è appunto fornito dal parametro "livello di potenza trattata" (power handling capacity). Esso indica la massima potenza che un dato altoparlante può trattare in maniera continuativa.

Potenza musicale

È un'altra maniera di determinare la massima potenza che un altoparlante può sopportare. Solitamente viene misurata in termini di picchi di carico (di musica o di parlato) che si hanno in corrispondenza delle basse frequenze della curva di risposta; a queste frequenze non è facilmente apprezzabile la distorsione. La potenza musicale rappresenta pertanto la massima potenza che può essere applicata al disotto di 250 Hz, prima di percepire fenomeni di distorsione.

Dato il gran numero di variabili di cui occorre tener conto per poter definire le prestazioni finali di un sistema di riproduzione HI-FI, converrà almeno per ciò che riguarda l'altoparlante, usare il concetto di potenza continuativa (e cioè potenza sinusoidale) per l'amplificatore, e la massima potenza trattabile per l'altoparlante. Attenendosi a questa regola, non si potrà sbagliare, almeno per ciò che riguarda le potenze in gioco, sia nella scelta dell'amplificatore sia nella scelta del relativo altoparlante.

Sempre rimanendo in tema di potenza, vediamo cosa potrebbe succedere se non si scegliesse l'altoparlante (o gli altoparlanti) adatti a lavorare con un dato amplificatore.

Quando la potenza trattata dall'altoparlante è superiore alla massima potenza continuativa (onde sinusoidali) che l'amplificatore è capace di dare, l'altoparlante non potrà subire alcun danno, quando gli verrà applicata la massima potenza fornita dall'amplificatore; al massimo si noterà una leggera distorsione.

Quando invece la potenza trattata dall'altoparlante è inferiore alla massima continuativa, sinusoidale fornita dall'amplificatore, se il regolatore del volume di quest'ultimo viene portato al massimo, certamente l'altoparlante verrà danneggiato. Fortunatamente, prima di raggiungere questo livello di rottura, l'ascoltatore percepirebbe un livello di distorsione tale da costringerlo a ridurre il volume, e di conseguenza, a fare in tempo a salvare ancora l'altoparlante.

INDICE DELLE ABBREVIAZIONI

| | |
|-----------------|---|
| A | = area effettiva del cono dell'altoparlante |
| B | = densità di flusso magnetico nel traferro |
| C | = cedevolezza |
| C _A | = cedevolezza acustica |
| C _M | = cedevolezza meccanica |
| C _{AB} | = cedevolezza acustica del box |
| C _{AS} | = cedevolezza acustica delle sospensioni |
| C _{MB} | = cedevolezza meccanica del box |
| C _{MS} | = cedevolezza meccanica delle sospensioni |
| c | = velocità del suono, = 344 m/s |
| f | = frequenza |
| f ₀ | = frequenza di risonanza, altoparlante in aria libera |
| f' ₀ | = frequenza di risonanza, altoparlante in un box chiuso |
| F | = forza |
| I | = corrente elettrica |
| k | = numero d'onda, = $2\pi/\lambda$ |
| l | = lunghezza del filo della bobina mobile |
| M | = massa |
| M _A | = massa acustica |
| M _M | = massa meccanica |
| M _{AB} | = massa acustica del box |
| M _{AR} | = massa acustica di radiazione |
| M _{MB} | = massa meccanica del box |
| M _{MR} | = massa meccanica di radiazione |
| P | = pressione |
| PWL | = livello di pressione acustica |
| Q | = fattore di merito |
| Q _E | = fattore di merito elettrico |
| Q _M | = fattore di merito meccanico |
| Q _t | = fattore di merito totale di un altoparlante in aria libera |
| Q' _t | = fattore di merito totale di un altoparlante in cassa chiusa |
| r | = raggio del cono dell'altoparlante |
| R | = resistenza |
| R _A | = resistenza acustica * |
| R _B | = resistenza della bobina mobile |
| R _M | = resistenza meccanica |
| R _{AB} | = resistenza acustica del box |
| R _{AR} | = resistenza acustica di radiazione, altoparlante montato in un box chiuso |
| R _{MA} | = resistenza meccanica di radiazione, altoparlante in aria libera |
| R _{MB} | = resistenza meccanica del box |
| R _{MR} | = resistenza meccanica di radiazione, altoparlante montato in un box chiuso |
| S | = superficie |

| | |
|-----------|--|
| S_B | = rigidezza del box ($1/C_{MB}$) |
| SPL | = livello di pressione sonora |
| U | = velocità del volume d'aria |
| V | = volume |
| V_B | = volume del box |
| W | = potenza |
| X | = reattanza |
| X_{AB} | = reattanza acustica del box |
| Z | = impedenza |
| Z_A | = impedenza acustica |
| Z_M | = impedenza meccanica |
| Z_S | = impedenza specifica |
| Z_{MA} | = impedenza meccanica di radiazione, altoparlante in aria libera |
| ω | = pulsazione |
| λ | = lunghezza d'onda |
| ρ | = densità |

FUNZIONI DERIVATE

SECANTE

$$\text{SEC}(X) = 1/\text{COS}(X)$$

COSECANTE

$$\text{CSC}(X) = 1/\text{SIN}(X)$$

COTANGENTE

$$\text{COT}(X) = 1/\text{TAN}(X)$$

ARCOSENO

$$\text{ARCSIN}(X) = \text{ATN}(X/\text{SQR}(-X*X+1))$$

ARCOCOSENO

$$\text{ARCCOS}(X) = -\text{ATN}(X/\text{SQR}(-X*X+1)) + 1.5708$$

ARCOSECANTE

$$\text{ARCSEC}(X) = \text{ATN}(\text{SQR}(X*X-1)) + (\text{SGN}(X)-1) * 1.5708$$

ARCOSECANTE

$$\text{ARCCSC}(X) = \text{ATN}(1/\text{SQR}(X*X-1)) + (\text{SGN}(X)-1) * 1.5708$$

ARCOCOTANGENTE

$$\text{ARCCOT}(X) = -\text{ATN}(X) + 1.5708$$

SENO IPERBOLICO

$$\text{SINH}(X) = (\text{EXP}(X) - \text{EXP}(-X))/2$$

COSENO IPERBOLICO

$$\text{COSH}(X) = (\text{EXP}(X) + \text{EXP}(-X))/2$$

TANGENTE IPERBOLICA

$$\text{TANH}(X) = -\text{EXP}(-X)/(\text{EXP}(X) + \text{EXP}(-X)) * 2 + 1$$

SECANTE IPERBOLICA

$$\text{SECH}(X) = 2/(\text{EXP}(X) + \text{EXP}(-X))$$

COSECANTE IPERBOLICA

$$\text{CSCH}(X) = 2/(\text{EXP}(X) - \text{EXP}(-X))$$

COTANGENTE IPERBOLICA

$$\text{COTH}(X) = \text{EXP}(-X)/(\text{EXP}(X) - \text{EXP}(-X)) * 2 + 1$$

ARCOSENO INVERSO

$$\text{ARGSINH}(X) = \text{LOG}(X + \text{SQR}(X*X+1))$$

ARCOCOSENO IPERBOLICO

$$\text{ARGCOSH}(X) = \text{LOG}(X + \text{SQR}(X*X-1))$$

ARCOTANGENTE IPERBOLICA

$$\text{ARGTANH}(X) = \text{LOG}((1+X)/(1-X))/2$$

ARCOSECANTE IPERBOLICA

$$\text{ARGSECH}(X) = \text{LOG}((\text{SQR}(-X*X+1)+1)/X)$$

ARCOCOSECANTE IPERBOLICA

$$\text{ARGCSCH}(X) = \text{LOG}(\text{SGN}(X) * \text{SQR}(X*X+1) + 1)/X$$

ARCOCOTANGENTE IPERBOLICA

$$\text{ARGCOTH}(X) = \text{LOG}((X+1)/(X-1))/2$$

MODULO

$$\text{MOD}(A) = \text{INT}((A/B - \text{INT}(A/B)) * B + .05) * \text{SGN}(A/B)$$

BIBLIOGRAFIA

M.D. HULL, C. ENG., A.M.I.E.R.E., "Building HI-FI speakers" - Philips 1980.
D. HERMANS, M.D. HULL, "Designing HI-FI speakers" - Philips 1980.
DATA BOOK PHILIPS, "Loudspeakers" january 1981.

INDICE ANALITICO — ALFABETICO

A

- abbreviazioni (indice),205
- accoppiamenti d'impedenza,111
- acustica
 - delle grandi sale 193
 - (massa),7
 - meccanica(elementi),5
 - potenza,28
 - potenza acustica nominale,187
- acustiche ed elettroacustiche(tecniche),195
- altoparlanti,10
 - a bobina mobile,19
 - area effettiva del cono,32,95
 - a tromba,32
 - caratteristiche,49
 - circuito equivalente,19
 - come convertitori di energia,21
 - coni,37
 - diagramma polare,34,40
 - direttività,39
 - full range,32
 - impedenza,22
 - non linearità e distorsione,183
 - potenza irradiata su schermo infinito,28
 - risposta in frequenza,33
 - sistemi multivia,49
 - smorzamento,35
- amplificazione sonora,196
- analisi del decadimento d'onda,169
- argomento (vedi sfasamento),22
- assorbimento e riverberazione,183
- attenuatore ad impedenza costante(cross-over),127

B

bibliografia,209

bobina

bobina(f.e.m.),25,26

come componente di filtro,130

magnete(sistema),36

mobile,20,22,25

mobile(massa),162

mobile(resistenza),159

velocità,26

bordo del cono (requisiti),39

box

cassa, dimensioni,94

costruzione e determinazione del volume,98

ermetico,68

break - up (delle frequenze),31,45

C

calcolo della funzione di trasferimento,169

calore specifico dell'aria,1

campionamento,167

capacità (filtro cross-over),133

caratteristiche e proprietà della sala d'ascolto,182

cassa (vedi box)

a chiusura ermetica,67,68

condizione di risonanza,33

elementi resistivi,76

massa e cedevolezza,70

potenza musicale,94

potenza operativa,93

risonanza interna,77

cedevolezza

acustica del box,75

acustica delle sospensioni, 9,29,32,75

condizione di velocità costante,30

controllo di cedevolezza,31

effetti della,82

meccanica delle sospensioni,75

misura della cedevolezza,162

coefficiente di assorbimento medio,85

- componente resistiva (radiazione del suono),15
- coni degli altoparlanti,37
 - bordo del cono,39
 - controllo di massa (condizione),28,31
- costante di trasduzione Bl (misura),163
- criteri di progetto HI-FI,199
- cross-over
 - elettronico,110
 - frequenza di,45
- curva di demagnetizzazione,46

D

- decadimento dell'onda (analisi),169
- densità dell'aria,2
- densità di flusso magnetico,159
- diagramma polare di altoparlanti,34,40
- diffusori
 - posizionamento in sala,183
 - prove di controllo,183
- dinamica (gamma),184
- direttività altoparlanti,39,41
- distorsione,42
 - misura della,161
 - di ampiezza,44
 - di modulazione,44
 - riduzione di,43
 - totale,44

E

- effetto
 - isteresi,38
 - tromba,41
- efficienza
 - alla risonanza,92
 - cassa,90
 - della potenza disponibile,91
 - di riferimento,91
- eliminazione del rumore casuale,169
- energia (misura in ambiente riverberante),177

- equazione
 - del moto,2,7,8
 - di continuità,3
 - d'onda,1,4,11
 - d'onda sferica libera,11
- escursione del cono,41

F

- fattore di merito
 - di smorzamento,36
 - elettrico,35
 - meccanico,35
 - totale,36,78
- fattore Q
 - aria libera,36
 - bobina,35
 - cassa,78
 - misura del,161
- filtri
 - ad impedenza costante,112
 - di cross-over
 - costruzione,133
 - progetto,109
 - risponso lineare,123
 - esempi pratici sulle casse,133
 - risponso lineare,123
 - risposta in fase,122
 - scelta componenti,130
- flusso magnetico (densità), 159
 - radiale,25,80
- frequenza
 - cross-over (scelta),110
 - di risonanza fondamentale,33
 - misura alla risonanza,157
 - misura della risposta in,133
 - risposta in,33
- funzione di trasferimento(calcolo),169
- funzioni derivate,207

G

- gamma dinamica,184

H

HI-FI

- criteri di progetto,199
- materiali da impiegare,200
- potenza, 201,202,203

I

impedenza

- acustica,5,9
- circuito equivalente,15
- costante (cross-over),127
- dell'altoparlante,22,18
- di radiazione,10
- di radiazione acustica,12
- di radiazione davanti alla cassa,69
- di radiazione meccanica,11,12,14
- di uscita,37
- elettriche e meccaniche (relazioni tra),25,26,33
- iterativa,111
- meccanica e potenza acustica,27
- misura della,157
- specificata,7

indice delle abbreviazioni,205

intelligibilità del suono,193

intensità del suono,16

intensità del suono nella direzione di propagazione,17

isteresi (effetto),38,45

L

leggi dei gas,3

linearità,43,44

livello

- di intensità,17
- di potenza,17
- di pressione,17
- di pressione sonora,151
- di rumore di sottofondo,184

di soglia (per calcolo di potenza finale),186
di sottofondo,184
in ambienti,185
massimo di potenza acustica,186
sonoro totale,176

M

magnete-bobina(sistema,36
magneti,46
massa
 acustica,7,70,71,80
 del carico d'aria,73
 della bobina mobile e del cono,162
 dinamica (determinazione della),162
 e cedevolezza,70
 massa meccanica, 80
materiali da impiegare
 HI-FI,200
 in funzione del Q_T ,81,82
misure (vedi anche determinazione)
 condizioni per,151
 costante di trasduzione Bl ,163
 della cedevolezza meccanica delle sospensioni,162
 densità di flusso magnetico,159
 digitali (teoria),165
 direttività,161
 distorsione,161
 massa della bobina mobile,162
 massa dinamica,162
 $Q_T = Q_L$
 resistenza meccanica e sospensioni,163
 standard nazionali ed internazionali,147
 sull'altoparlante montato,152
 sull'altoparlante non montato,151
mobilità,6,7
 circuiti equivalenti,15
multivia (sistemi),45

N

non linearità o distorsione,42

O

onda (equazione),1,11
sferica libera,11

P

posizione della sorgente del suono,195
potenza acustica, 28,34
 acustica (livello massimo),186
potenza cassa (acustica,calcolo),185
 irradiante,28,34,37
 musicale,94
 nominale,88
 operativa,93
 stima della potenza nominale,187,191
 valutazione di potenza,93
potenza HI-FI
 espressione della,201
 musicale,203
 nominale (stima),187
 operativa,202
 trattata (livello),202
pressione
 al cross-over,45
 del suono(sonora),6,9,34
 sonora irradiata (casse),85,151
prestazioni di un altoparlante,33
profondità interna del box, 94
propagazione del suono,1
prove di controllo dei diffusori,183

Q

Q_E fattore di merito elettrico,35
 Q_M fattore di merito meccanico,35
 Q_T Q_t fattore di merito totale
 (altoparlante in aria libera) 36,78,82,92,95
 misura del,161
 Q'_T Q'_t (f.m. altoparlante in cassa),96,97,102,105,107
 Q_{T1} , 80
 Q_{T2} ·80

R

- raccomandazioni generali,190
- radiazione
 - del suono (componente resistiva),15
 - diretta del suono,176
- reattanza di radiazione,23
- recoil line,47
- resistenza
 - acustica,10
 - acustica in ohm,69,71
 - di radiazione,22,24
 - di sorgente (effetto),37
 - elettrica,35
 - meccanica,33,35
 - meccanica delle sospensioni,163
 - meccanico - acustica,23
- responso o diagramma polaré,34,40
 - lineare di filtro di cross-over,123
- rigidezza,84
 - di distorsione,43
 - sospensione altoparlante,84
- riproduzione realistica del suono,187
- risonanza
 - interna della cassa,77
 - in sala di ascolto,179,182
- risposta in fase di filtro di cross-over,122
- risposta in frequenza di un altoparlante,33
- riverberatore ed assorbimento,182
- rumore ambientale,186,187
 - casuale (eliminazione),169
 - di sottofondo,184

S

- sala di ascolto
 - arredamento,195
 - grande sala,193
 - potenza necessaria,184
 - proprietà,182
 - tecniche acustiche ed elettroacustiche,195
- saturazione, 45,46
- schermo infinito,67

- segnale di ingresso (misura digitale),166
- sfasamento (vedi argomento),22
- sistema magnete - bobina mobile, 35,36
- sistemi multivia,45
- smorzamento
 - cassa,78
 - critico,36
 - da bobina mobile,80
 - fattore di,36
- sorgente immagine,155
- sospensioni (cedevolezza meccanica),162
- SPL, livello di pressione sonora,151
- stanza di ascolto (proprietà),182
- stima potenza nominale,187
- suono
 - coerente,194
 - diretto,173
 - intelligibilità del,193
 - intensità,16
 - riflesso, 174,195
 - riproduzione realistica,187
 - riverberato,194
 - sorgente del (posizione),195

T

- tecniche acustiche ed elettroacustiche di una sala,195
- tesla (unità di misura di flusso),25,69,80
- trasduzione (costante di),163
- trasferimento (funzione di),169

U

- uscita acustica, 33,41

V

- velocità del suono,23
- velocità di programmazione,1,4.

Questo libro tratta l'analisi teorico-pratica di una parte dei sistemi acustici Hi-Fi; in particolare si considerano i sistemi in cassa acustica ermeticamente chiusa utilizzando altoparlanti a bobina mobile a radiazione diretta. Accanto a capitoli prettamente teorici ce ne sono altri di tipo applicativo, in cui si descrivono passo-passo i calcoli e la costruzione di tre tipi di sistemi acustici Hi-Fi utilizzando altoparlanti Philips. Il testo può essere letto a più livelli: chi ha una preparazione matematica sufficiente potrà prendere conoscenza approfondita di tutte le parti del libro, dalle considerazioni di principio ai risultati finali; mentre chi non ha tali basi teoriche può ugualmente impadronirsi delle regole fondamentali che gravitano attorno ai box acustici Hi-Fi pervenendo in ogni caso a risultati corretti.

191

Progettazione di sistemi di altoparlanti

**D. Hermans
M.D. Hull**



**GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON**