



EBOOK

Davide Scullino

COSTRUIRE LE CASSE ACUSTICHE

Davide Scullino

COSTRUIRE LE CASSE ACUSTICHE



© Copyright 2006-2014

Sandit s.r.l.

Viale Libertà, 3

24021 Albino (BG)

Tel. 035/752755

Fax 035/755892

casella postale N. 72

Tutti i diritti sono riservati.

E-mail: info@sanditlibri.it

www.sanditlibri.it

Tutti i contenuti sono di proprietà di Sandit s.r.l.

È vietata la riproduzione di testi e di disegni raccolti in questa opera.

I^a Edizione Ebook: Luglio 2014

ISBN 978-88-6928-060-3

© Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta o distribuita in ogni forma o supporto senza l'autorizzazione scritta dell'editore.

Libro disponibile anche in formato cartaceo:

www.sanditlibri.it/costruire-le-casse-acustiche.html

Prefazione

Nonostante la massiccia diffusione di prodotti orientali offra impianti hi-fi e diffusori a basso costo, l'autocostruzione delle casse acustiche ha ancor oggi un suo significato. Una ventina d'anni fa a realizzare da sé l'impianto stereo e le casse era un fatto, oltre che di passione, di necessità, visto l'alto costo delle elettroniche (in arrivo prevalentemente dall'estero); chi si dedicava all'autocostruzione era un pubblico assai più numeroso di quello di oggi, motivato dall'esigenza di risparmiare. Oggi quelli che preferiscono realizzare da sé le casse acustiche sono molti meno, sia perché sono rimasti in pochi a resistere alle lusinghe di un mondo tutto divertimento e passatempi che non costano fatica, sia perché i costi si sono drasticamente ridotti, tanto che una coppia di casse pronta può costare meno di una costruita artigianalmente.

Ma allora, cosa spinge l'appassionato a costruirsi in casa le proprie casse? Beh, il piacere di curare ogni dettaglio, di lasciare la propria impronta, la soddisfazione di esporre in bella mostra il frutto della propria fatica e la consapevolezza di avere, collegate all'hi-fi, casse che suonano proprio come si desidera. Non ultimo, il fatto che, rispetto a prima dell'invasione dei prodotti "made in China", quando si trovavano diffusori di qualità discreta per tutte le tasche, oggi c'è un divario tra il prodotto orientale di basso costo (e cattiva qualità) e quello ormai riservato agli intenditori, agli audiofili, costruito in quantità limitate e quindi molto costoso.

Questo volume è rivolto a chi intraprende la via dell'autocostruzione; passo dopo passo, spiega i concetti fondamentali del suono, la teoria degli altoparlanti, lo scopo e il funzionamento delle casse acustiche, dando le nozioni e le formule indispensabili per abbinare più altoparlanti e dimensionare la cassa affinché funzionino nella maniera ottimale. Particolare risalto viene dato ai filtri cross-over e al loro utilizzo, senza trascurare un cenno ai filtri elettronici usati nei sistemi con subwoofer.

Davide Scullino

INDICE

CAPITOLO 1 - CENNI SUL SUONO

Prerogative dell'orecchio	2
La riproduzione del suono	5

CAPITOLO 2 - L'ALTOPARLANTE

Famiglie di altoparlanti	8
L'altoparlante magnetodinamico	9
La membrana	9
La bobina	11
Il magnete	12
L'altoparlante a nastro	13
L'altoparlante piezoelettrico	14
Parametri distintivi degli altoparlanti	15
Tipi di altoparlante	16
Generico	17
Larga banda	17
Woofer	18
Mid-range	20
Tweeter	22
L'altoparlante nell'hi-fi	24

CAPITOLO 3 - L'ALTOPARLANTE E LA CASSA ACUSTICA

Cassa acustica chiusa	27
Cassa a sospensione pneumatica	30
Cassa acustica bass-reflex	33
Bass-reflex speciali	34
Ridurre la distorsione	34
Bassi centrati	36

Il labirinto acustico.....	37
Dimensionare la cassa bass-reflex	38
Il volume interno	39
Il condotto di accordo	42
Esempi di dimensionamento	44
Accordare con gli strumenti	47

CAPITOLO 4 - COSTRUIRE LE CASSE

Il materiale della cassa	50
Truciolare	50
MDF.....	50
Legno massello	51
Compensato	51
Dimensionare il box.....	51
Curare l'isolamento	54
Smorzare le vibrazioni.....	56
Il pannello frontale.....	59
L'accoppiamento con il woofer	59
Assorbire le riflessioni	60
Disposizione degli altoparlanti.....	61
Allineare le origini dei suoni	62
All'interno e all'esterno	63
Tweeter angolare	64
Tipi di assemblaggio	65
Le griglie parapolvere	66
Costruire le griglie	67
La connessione elettrica	69

CAPITOLO 5 - I FILTRI CROSS-OVER

Che cos'è un filtro	72
Misurare le attenuazioni: il dB	74
Risposta in frequenza: ottava e decade	77
I componenti dei filtri	77

Resistenza.....	77
Condensatore	78
Induttanza	80
I filtri più semplici.....	81
La cella CR	82
La cella LR	85
Filtri del secondo ordine	88
Filtro LC.....	88
Filtro CL.....	90
Filtri del terzo ordine	91
Filtro LCL.....	92
Filtro CLC	93
Comporre i cross-over.....	95
Avvertenze per i filtri passa-banda	97
Abbinare gli altoparlanti.....	98

CAPITOLO 6 - FILTRI E ALTOPARLANTI

Scegliere i condensatori	100
Scegliere le bobine	102
Induttanze su nucleo ferromagnetico	104
Verificare le induttanze	106
Usare le resistenze	108
Resistenze variabili	110
Attenuazione e rotazione di fase	110
La fase degli altoparlanti	111
Frequenza d'incrocio	112

CAPITOLO 7 - SISTEMI DI CASSE

Sistemi con subwoofer	116
Sistemi passivi.....	116
Sistemi attivi	118
Filtri elettronici	119
Calcolo dei filtri elettronici	122

Cenni sul suono

Suoni e rumori dell'ambiente che ci circondano, siano essi naturali o prodotti dall'uomo o da sue costruzioni, sono vibrazioni dell'aria circostante; ognuno è caratterizzato da un'intensità e una frequenza, almeno in teoria. Nella realtà, solitamente i suoni sono l'insieme di più frequenze riprodotte insieme, ognuna con una sua intensità. Anzi, ciò che distingue un suono o rumore dagli altri è proprio la distribuzione temporale delle varie frequenze e l'andamento nel tempo delle rispettive intensità.

Noi, come la gran parte degli animali, possiamo udire suoni e rumori perché l'aria spostata dalle vibrazioni corrispondenti va ad esercitare una certa pressione sul timpano del nostro orecchio; il timpano è a sua volta collegato ad un sistema di ossicini che premono su una struttura innervata composta da migliaia di sottilissime corde (dette *fibrille*) posta nell'orecchio interno. Quando il timpano vibra sotto la pressione delle onde sonore, una o più fibrille (in base alle frequenze delle onde sonore) vibrano e trasmettono al nervo uditivo impulsi elettrici proporzionali all'intensità delle rispettive frequenze; gli impulsi raggiungono il cervello, che ricava così la sensazione uditiva.

Dunque, suoni e rumori esistono dove esiste l'aria; sulla luna o nel vuoto non potrebbero propagarsi. Si spostano bene, invece, nei liquidi e nei solidi, meglio di quanto facciano nell'aria.

Ai fini dello studio dei mezzi di riproduzione del suono, quindi dell'altoparlante e della cassa acustica, ci interessa solo la propagazione nell'aria, che

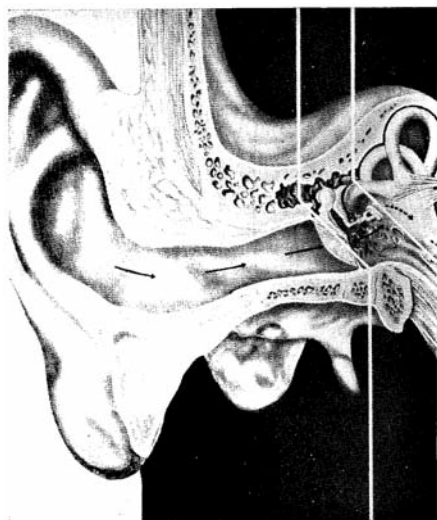


Figura 1.1

Vista in sezione dell'orecchio umano: le vibrazioni prodotte dall'aria che suoni e rumori spostano, entrano dal padiglione e si propagano attraverso il condotto uditivo, fino a premere sul timpano; quest'ultimo è una membrana che, oltre a separare l'orecchio medio da quello interno, aziona un meccanismo composto da ossicini, i quali a loro volta trasmettono le vibrazioni sonore alla coclea. Questa è una sorta di conchiglia all'interno della quale minuscole fibre nervose, che vibrano ciascuna a una certa frequenza, trasformano la vibrazione in impulsi elettrici diretti al cervello.

avviene normalmente alla velocità di 330 m/s (nell'aria secca alla temperatura di 0°C). Suoni e rumori raggiungono distanze che dipendono da molti fattori: primi fra tutti, consistenza e umidità dell'aria. Ma a parte questi, una cosa è certa: più forte è la pressione esercitata sull'aria circostante dalla fonte che li produce, maggiore è la distanza raggiunta, dato che a parità di intensità possono spostare masse d'aria di maggiore consistenza e comunque ripetere le vibrazioni molte volte. Basti pensare all'esplosione di una bomba: si sente più distante della sirena di un antifurto, sebbene abbia una frequenza bassa e meno "percepita" dal nostro orecchio.

Prerogative dell'orecchio

Realizzare un diffusore acustico richiede un minimo di conoscenza della fisiologia del nostro orecchio, utente finale dei sistemi di riproduzione del suono; senza voler fare un trattato di audiometria, dobbiamo dire che acusticamente l'uomo adulto sente frequenze che vanno da circa 20 Hz fino a 20 kHz.

Il bambino sente frequenze un po' più acute, perché i suoi organi uditivi sono più piccoli e quindi possono vibrare a frequenze più alte; l'anziano perde man mano la sensibilità sulle frequenze più acute (oltre i 14 kHz) perché le fibrille nervose più corte (corrispondenti alle frequenze più alte) si atrofizzano per prime, perdendo elasticità, il che impedisce loro di vibrare in corrispondenza di deboli pressioni sonore. La sensazione che abbiamo

ascoltando un suono o un rumore dipende da diversi fattori, i principali dei quali sono:

- ❑ la pressione esercitata sul timpano dall'aria spostata dalla fonte sonora;
- ❑ la frequenza delle vibrazioni originate dallo spostamento d'aria.

La prima si esprime, secondo la fisica, in Pascal (Pa) o in Bar (ovvero kg/cm^2) ma per l'intensità dei suoni è stato coniato un termine apposta: il decibel (dB). La scala corrispondente alla sensazione uditiva ha come riferimento 0 dB, che corrisponde al suono più debole che il nostro orecchio può sentire; al disotto degli 0 dB non vi è suono, almeno per noi. La massima intensità sonora percettibile corrisponde a 127 dB, che gli studiosi definiscono *soglia del dolore* perché pressioni sonore oltre tale valore determinano dolore, in quanto la pressione sul sistema meccanico dell'orecchio induce nel sistema nervoso non più una sensazione uditiva ma vero e proprio dolore fisico. Insomma, il discorso è analogo a quello della sensibilità al tatto: una leggera carezza si sente e dà piacere, come un massaggio intenso si avverte di più ma è tollerabile; uno schiaffo, che sollecita eccessivamente la pelle e le sue terminazioni nervose, si sente sotto forma di dolore.

Dunque, il nostro orecchio ha un'estensione (detta *gamma dinamica*) di circa 127 dB, sebbene nella pratica l'escursione tra il suono più intenso e quello più flebile che possiamo udire sia limitata dal rumore di fondo. Quest'ultimo corrisponde alla pressione sonora esercitata da suoni e rumori dell'ambiente in cui ci si trova.

Per fare un esempio, sebbene la gamma dinamica della riproduzione di un brano d'orchestra classica effettuata con un lettore Compact Disc e un ottimo amplificatore sia teoricamente di 100 dB e più, ascoltando il disco di giorno in una camera che affaccia su una strada trafficata, l'escursione si riduce drasticamente, perché il rumore di fondo può arrivare anche a 40 dB, coprendo così la zona bassa della dinamica dell'orchestra, che può spingersi fino al limite inferiore di 10 dB.

A proposito di pressione sonora, va evidenziata la relazione esistente tra il valore espresso in dB e la distanza di ascolto: ogni volta che ci si porta a una distanza doppia, il suono viene percepito con un'intensità sonora diminuita di 6 dB. In pratica, se ad un metro di distanza un suono o rumore ha l'intensità di 80 dB, a due metri scende a 74 dB. Andando a tre metri l'intensità sonora cala fino a 68 dB, a quattro vale 62 dB e via di seguito.

Particolare interesse desta il discorso riguardante la frequenza, ovvero la

diversa sensibilità che, a parità di pressione sonora, il nostro orecchio presenta in rapporto con la frequenza. Nello spettro tra 20 e 20.000 Hz, i suoni li percepiamo diversamente a seconda della loro frequenza; in altre parole, una nota a 300 Hz dà una sensazione uditiva diversa da una, che esercita sull'aria la stessa pressione, di 8.000 Hz. Ciò dipende dal fatto che il sistema “meccanico” composto dal timpano e dai vari ossicini collegatigli risponde meglio in un campo di frequenze che si trova fra 300÷400 Hz e 4÷5 kHz (Figura 1.2).

Ne deriva che percepiamo taluni suoni o rumori più forte di altri che in realtà esercitano sul nostro orecchio una maggiore pressione sonora; ad esempio, se consideriamo un pianoforte notiamo come le note corrispondenti ai tasti di destra ci sembrano più forti di quelle dei tasti di sinistra. Ancora, la voce di un bambino è più penetrante di quella di un uomo.

Questo è un dettaglio da considerare con la dovuta attenzione, perché spiega come, per avere una riproduzione sonora di vera alta fedeltà, non basti curarsi della buona linearità degli elementi utilizzati.

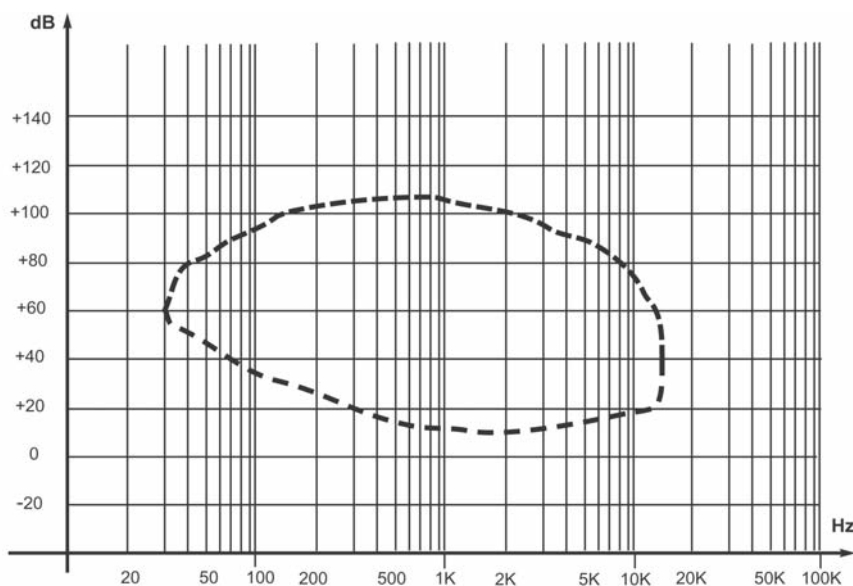


Figura 1.2

Audiogramma dell'orecchio umano: come si vede, la zona di massima sensibilità è pressappoco nella gamma intermedia; le frequenze sotto i 300 Hz e quelle sopra i 5 kHz sono meno percepite delle altre.

La riproduzione del suono

Possiamo comprendere meglio la cosa considerando come avviene la riproduzione di un brano musicale preventivamente registrato su un supporto ottico o magnetico, oppure eseguito dal vivo. In tutti i casi si parte da un trasduttore acustico/elettrico, ossia da un elemento in grado di convertire in una differenza di potenziale (variabile) le onde sonore che giungono dalla fonte audio, sia essa la voce di un cantante o il suono di uno strumento; la tecnica ha scelto la conversione in elettricità perché è quella che permette nella maniera più semplice la riproduzione, anche a distanza, o la registrazione su supporti magnetici, ottici o “meccanici” (i vecchi dischi di vinile).

Il trasduttore che trasforma il suono in segnale elettrico è detto microfono; la componente che genera può essere, come anzidetto, memorizzata (per venire riprodotta in un secondo tempo) o riprodotta subito: è questo, il caso dell'amplificazione nelle esecuzioni dal vivo.

In tutti i casi si tratta di ritrasformare la componente elettrica nel suono originario; l'elemento che provvede a ciò è detto altoparlante ed è un trasduttore capace di convertire in energia meccanica quella elettrica corrispondente al segnale audio originato nel microfono o in altra fonte di bassa frequenza.

Per ora vi basti questo; dell'altoparlante e delle sue caratteristiche si parlerà diffusamente nel Capitolo 2.

Siccome deve muovere masse d'aria talvolta considerevoli, l'altoparlante è chiamato a sviluppare una forza anche abbastanza intensa; ecco perché deve ricevere una potenza elettrica almeno pari a quella meccanica sviluppata dal suo equipaggio mobile. Il microfono e tutti i sistemi di registrazione e riproduzione del suono generano segnali molto deboli, ragion per cui è gioco-forza interporre un dispositivo detto *amplificatore di potenza*, la cui funzione è fornire all'altoparlante l'energia elettrica che esso richiede.

Nel realizzare una catena di registrazione/riproduzione del suono o un impianto di amplificazione dal vivo, i progettisti prendono tutti gli accorgimenti affinché microfono, registratori, riproduttori e amplificatori siano lineari quanto più possibile, intendendo con lineari che rispondano, entro la gamma delle audiofrequenze (20÷20.000 Hz) più o meno uniformemente. In altre parole, i dispositivi devono restituire con la stessa intensità (o al massimo con uno scostamento entro ± 3 dB) i segnali corrispondenti a tutte le frequenze comprese nello spettro udibile.

Ci si aspetta, quindi, che collegando l'uscita dell'amplificatore di potenza all'altoparlante quest'ultimo riproduca il suono come era in origine. In realtà non è così, e non lo è per almeno due motivi:

-
- ❑ un solo altoparlante non può riprodurre con la stessa intensità tutte le audiofrequenze;
 - ❑ se anche l'altoparlante emettesse tutte le audiofrequenze con la stessa intensità, la sensazione uditiva che ne avremmo non sarebbe comunque uguale all'originale, proprio perché il nostro orecchio, sia pure entro lo spettro audio, sente più forte un certo campo di frequenze.

Ma allora, qual è la soluzione? La risposta sta in quello che vediamo tutti i giorni guardando il nostro impianto hi-fi: casse acustiche.

Basta costruire dei diffusori acustici, che sono dei sistemi di due o più altoparlanti collegati e comandati in modo da ripristinare l'equilibrio sonoro corrispondente al suono originario. Un buon diffusore usa due o più altoparlanti, ciascuno dei quali si occupa di riprodurre alcune frequenze dello spettro audio; un particolare circuito elettronico passivo posto al suo interno provvede a ripartire le frequenze e a far sì che ogni altoparlante le riproduca con l'ampiezza che serve a dare all'orecchio una corretta sensazione uditiva, considerando proprio la curva di sensibilità dell'orecchio.

Nei prossimi capitoli scoprirete come si costruisce un sistema di altoparlanti a più vie; capirete, ad esempio, perché l'altoparlante cui sono assegnati i toni medi e quello che riproduce i toni medio-alti lavorano normalmente con una potenza molto bassa rispetto agli altri.

L'altoparlante

Se per trasformare un qualsiasi suono in segnale elettrico occorre un trasduttore chiamato microfono, per riprodurre la componente audio bisogna ricorrere ad un trasduttore elettroacustico, ossia a qualcosa che faccia il lavoro opposto: riconvertire in vibrazioni dell'aria e quindi nel suono originario, il segnale elettrico in riproduzione. Il componente in questione prende il nome di altoparlante.

Dunque, l'altoparlante è genericamente quell'elemento che, sottoposto ad una tensione variabile ad audiofrequenza, restituisce, nei limiti delle sue proprietà, il suono che corrisponde alla tensione stessa.

Come avviene è presto detto: l'altoparlante ha un elemento che vibra sotto l'effetto della corrente elettrica; questo elemento, che può essere di varia natura a seconda del tipo di altoparlante, trasforma in energia meccanica (movimento) il segnale elettrico ed è rigidamente collegato ad una membrana che vibra insieme ad esso. Le vibrazioni producono nell'aria le onde acustiche, esattamente come farebbero le fonti originarie di suoni e rumori: un po' come la pelle di un tamburo, le nostre corde vocali quando parliamo, le canne dell'organo ecc.

Dunque, la membrana fatta vibrare dall'azione dell'elemento trasduttore spinge l'aria circostante e ricostruisce le vibrazioni corrispondenti al suono rappresentato dal segnale elettrico cui è sottoposto l'altoparlante. Le vibrazioni raggiungono l'orecchio, che fa poi tutto il resto.

Famiglie di altoparlanti

L'evoluzione tecnica, le esigenze dei progettisti, hanno portato alla realizzazione di molti tipi di altoparlante; quelli di maggiore interesse sono:

- ❑ **elettrodinamico**; si tratta di un altoparlante nel quale la membrana che riproduce il suono viene mossa da una bobina percorsa da corrente elettrica, che si muove per interazione con il campo generato da un elettromagnete alimentato da una corrente ottenuta dalla rete elettrica, da un apposito alimentatore, oppure (è il caso di una raffinata versione usata dalla Dynaudio) ottenuta raddrizzando la componente audio inviata anche alla bobina mobile; l'altoparlante elettrodinamico è il più datato per concezione ed oggi, eccezion fatta per alcune versioni rivisitate da produttori di casse per hi-fi di grande qualità, non si usa più;
- ❑ **magnetodinamico**; differisce dall'elettrodinamico perché il magnete con il quale interagisce la bobina mobile che fa muovere la membrana è di tipo permanente: non richiede alcuna alimentazione, quindi può essere usato anche in dispositivi di piccole dimensioni alimentati a pile;
- ❑ **piezoelettrico**; in esso la membrana che vibrando produce i suoni è azionata da materiale ceramico nel quale si manifesta l'effetto piezoelettrico: in pratica una sorta di lamina che, sottoposta ad una tensione variabile, cambia di spessore vibrando; rispetto ai tipi precedenti, praticamente non assorbe corrente ed è leggerissimo;
- ❑ **a nastro**; la membrana che vibrando produce il suono è un nastro metallico posto tra le espansioni polari di un magnete permanente; è, in un sol corpo, membrana e bobina; l'altoparlante a nastro è in grado di dare un suono di grande qualità e definizione, ma, per il costo di produzione decisamente alto, è riservato a costruzioni di un certo livello;
- ❑ **elettrostatico**; si tratta di uno speciale altoparlante riservato più alla sperimentazione che all'uso pratico: in esso si trova un condensatore elettrico formato da due piastre metalliche, una fissa e l'altra mobile collegata alla membrana; le due placche sono sottoposte a un campo elettrico la cui intensità viene modulata dal segnale musicale, cosicché la placca fissa tende a muoversi analogamente all'andamento del segnale modulante e vibrando produce il suono; tale altoparlante è però riservato alla riproduzione dei toni alti.

In questo volume si parlerà degli altoparlanti magnetodinamici, a nastro e piezoelettrici, perché sono quelli normalmente utilizzati per realizzare casse acustiche sia autocostruite che di produzione commerciale. Quello elettrostatico è un tipo più sperimentale che per uso comune.

L'altoparlante magnetodinamico

Il tipo più diffuso, reperibile in ogni forma e dimensioni e utilizzato in ogni genere di apparato, dalla cuffia al telefonino, dalla radio portatile alle potenti casse per esibizioni dal vivo, è quello in cui la membrana che riproduce il suono vibra mossa da una bobina immersa nel campo magnetico di un magnete permanente. Ne esistono numerose varianti caratterizzate dalla sagoma e dal materiale del magnete, della bobina, della membrana, nonché da accorgimenti costruttivi adottati dalle varie case produttrici per i loro prodotti. L'altoparlante magnetodinamico è formato da un equipaggio mobile e da una parte fissa; il primo è composto dalla membrana e dalla bobina (protetta, verso l'esterno, con un cerchio o una cupola parapolvere) con essa solidale, che si muovono per generare suoni e rumori. La parte fissa è invece una sorta di cestello che contiene inferiormente (o, se preferite, posteriormente) cono e bobina, sul fondo del quale si trova il magnete permanente (figura 2.1).

La membrana

In origine, la membrana era realizzata in carta lavorata a forma di cono: al vertice si trovava la bobina (cilindrica) ed alla base un anello corrugato, di carta anch'esso, fissato poi alla struttura (cestello) che conteneva l'intero altoparlante; sempre al vertice, attorno alla bobina cilindrica, si trovava un secondo anello corrugato (anche detto *spider* e realizzato in tela) fissato

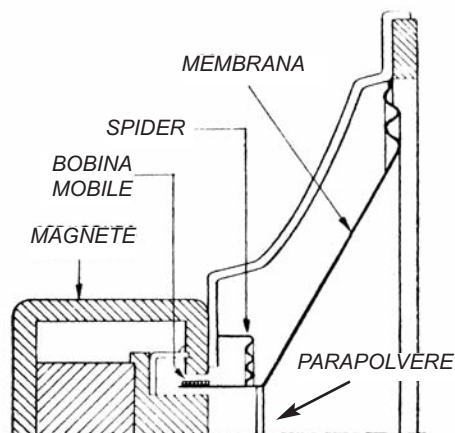


Figura 2.1

Vista in sezione di un generico altoparlante magnetodinamico: il corpo chiamato magnete comprende il magnete permanente, la sua espansione polare centrale e il traferro. Lo spider è la sospensione interna, composta da un anello corrugato che centra la bobina e ne limita l'escursione. La membrana è, in questo caso, conica; esternamente viene trattenuta e centrata dalla seconda sospensione, ottenuta corrugando il bordo.

alla base del cestello. I due anelli corrugati costituivano e costituiscono tutt'oggi le sospensioni, ossia gli elementi meccanici necessari a centrare la bobina rispetto al magnete, guidare e contenere il movimento dell'equipaggio mobile, allo scopo di evitarne la fuoriuscita dal cestello (se nulla lo trattenesse, il cono, sotto l'effetto di forti segnali audio, si muoverebbe tanto intensamente da sfuggire al resto dell'altoparlante).

Con l'evolversi della tecnologia dei materiali plastici, alcuni costruttori hanno iniziato a modificare la struttura originaria, adottando per le membrane prodotti sintetici come il polietilene, il polipropilene e simili, ma anche fibra di vetro e di carbonio; rispetto alla carta, tali materiali presentano maggiore robustezza, insensibilità all'umidità dell'ambiente (che può modificare la rigidità, la massa e quindi la risposta in frequenza) e maggiore durata. Sono poi cambiate le forme delle membrane, che oggi si trovano ellittiche, ma anche piatte; in quest'ultimo caso, l'intento dei costruttori è rendere equidistanti i punti di irradiazione del suono, che con le membrane coniche sono sparsi nello spazio tra il vertice e la base, quindi linearizzare la risposta del trasduttore. Inoltre, la struttura piana ha il vantaggio di spingere l'aria uniformemente, a differenza di quella conica nella quale, sia pure minimamente, l'aria viene spinta obliquamente dalle pareti del cono.

Tra i precursori delle membrane piatte possiamo citare Sony, che oltre vent'anni fa brevettò il suo APM (Accurate Pistonic Motion) consistente nel dotare gli altoparlanti di una membrana quadrata piatta rinforzata da una struttura interna a nido d'ape, mossa da una bobina centrale o da quattro bobine dislocate lungo le diagonali. Il rinforzo (non necessario nei coni perché la loro struttura li rende già rigidi per conto loro...) nelle membrane piatte serve ad evitare la deformazione cui andrebbero inevitabilmente incontro per effetto della pressione esercitata dalla bobina mobile; ciò rende l'equipaggio mobile più pesante e quindi richiede l'adozione di materiali leggeri, quali l'alluminio.

Per quel riguarda le sospensioni, mentre quella inferiore è sempre un anello di tela corrugato, quella superiore, quella esterna (per intendersi) è stata oggetto di molte revisioni improntate a concedere più o meno libertà di movimento all'equipaggio mobile, ma anche ad assicurare più stabilità all'altoparlante. Al tradizionale bordo di carta troviamo affiancati anelli di schiuma (foam) sintetica e di gomma (materiale decisamente più duraturo delle schiume e meno sensibile alle condizioni climatiche) tipicamente sagomati ad "U" dritta o rovesciata (vedere la Figura 2.2).

Le sospensioni giocano un ruolo determinante nel comportamento dell'altoparlante: se sono troppo rigide frenano eccessivamente il movimento della membrana e non consentono una buona risposta alle basse frequenze, ma

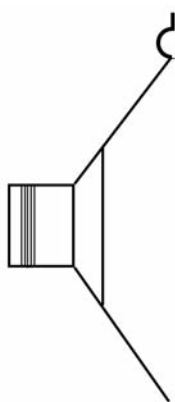
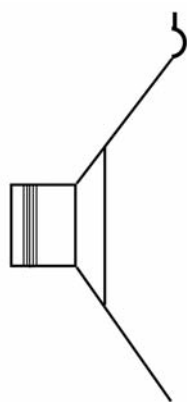


Figura 2.2
*Nei moderni
altoparlanti la
sospensione esterna
della membrana è
sagomata ad "U"
sporgente verso
l'esterno (dritta) o
l'interno (rovesciata).
Viene costruita in
materiale resistente
alla flessione: gomma
o schiuma sintetica.*



garantiscono stabilità e precisione nella risposta ai segnali che variano bruscamente di ampiezza. Ad esempio, dovendo riprodurre il suono di una percussione danno colpi nitidi e definiti, senza rimbombo. Al contrario, sospensioni molto morbide estendono molto la risposta alle basse frequenze ma non garantiscono un buon contenimento della corsa della membrana, che può quindi vibrare eccessivamente e, sia pure riproducendo bassi profondi, sovrapporre un certo rimbombo.

La bobina

L'evoluzione tecnologica non poteva non occuparsi della bobina dell'altoparlante, elemento di grande importanza perché, specie nei trasduttori di grande potenza e in quelli non ventilati (chiusi in casse acustiche senza aperture) deve affrontare eventi termici di rilievo. Nella sua realizzazione canonica è formata da un certo numero di spire di filo in rame smaltato avvolte sull'esterno di un tubetto a sezione cilindrica di cartoncino, trattato con vernice epossidica allo scopo di bloccare l'avvolgimento e conferire maggiore rigidità all'insieme.

Per consentire all'altoparlante di sopportare potenze considerevoli, anche molto superiori a quella nominale, più d'un costruttore ha deciso di avvolgere le bobine su materiali capaci di smaltire alla svelta il calore prodotto: ad esempio l'alluminio; nessun problema per l'isolamento delle spire, il cui filo è isolato dalla smaltatura. Sempre allo scopo di migliorare il raffreddamento della bobina, alcune case forano in più punti il cilindro sul quale è avvolta, oppure praticano alla base della membrana e posteriormente al magnete due fori che consentono il passaggio di aria attraverso il traferro del

magnete stesso e quindi nella bobina. Come si vedrà, tale soluzione è utilizzabile nei soli trasduttori destinati alla realizzazione di casse acustiche aperte o bass-reflex, perché in quelle chiuse (a sospensione pneumatica) farebbe venire meno la richiesta ermeticità della costruzione.

Il magnete

Nella sua forma primitiva, il magnete permanente si presenta come un cilindro magnetizzato in fabbrica mediante esposizione a un forte campo magnetico, che lascia in esso una certa induzione residua, necessaria a far reagire e quindi muovere la bobina quando è attraversata da corrente elettrica. I moderni altoparlanti hanno magneti toroidali, chiusi superiormente da un anello di ferro dolce entro il quale si muove la bobina e inferiormente da un disco (fatto sempre di ferro dolce) al centro del quale si trova un cilindro centrato rispetto sia al toroide, sia all'anello superiore e attorno al quale scorre la bobina. Insomma, visti in sezione, i magneti appaiono a forma di "E" (vedere Figura 2.3).

I materiali con cui vengono realizzati sono leghe metalliche caratterizzate da curve di prima magnetizzazione definite da alta induzione residua e forte coercitività magnetica: ad esempio l'*AlNiCo* (Alluminio, Nichel, Cobalto) o *TiCoNiAl* (Titanio, Cobalto, Nichel, Alluminio). Oggigiorno vanno molto i materiali ceramici quali la ferrite di bario o la lega stronzio-cobalto (*SrCo*) che permettono, in dimensioni relativamente ridotte, di mantenere campi magnetici di forte intensità; tale prerogativa è molto importante, perché non va scordato che tanto più è intenso il campo magnetico nel quale si trova la bobina, quanto più elevata sarà la forza che farà muovere la bobina stessa quando essa verrà percorsa dalla corrente elettrica. Insomma, avere un buon magnete capace di sviluppare un campo magnetico intenso permette

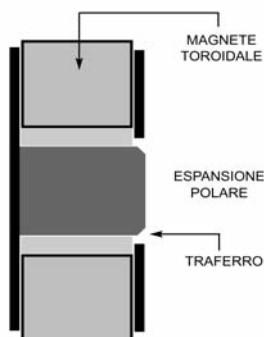


Figura 2.3

Vista in sezione del magnete di un moderno altoparlante: si tratta di un toroide in materiale ceramico sul cui fondo è incollato un coperchio circolare al centro del quale spunta l'espansione polare. Quest'ultima è un cilindro sul quale scorre la bobina mobile.



Figura 2.4

Un classico altoparlante magnetodinamico generico con cono realizzato in carta e sospensione esterna in gomma sagomata ad "U" rovesciata.

ad un altoparlante di avere un'elevata efficienza, ossia un'alta resa acustica già con segnali audio di bassa potenza.

L'altoparlante a nastro

Pregiato e riservato alle realizzazioni hi-end per casa, è costituito da una sottile membrana metallica che viene fatta attraversare dalla corrente corrispondente al segnale audio; il nastro è sospeso tra le espansioni polari di un magnete, perciò vibra in analogia con le variazioni della componente elettrica audio. Per la sua costituzione, risponde bene alle sole frequenze medio-alte e acute, quindi sopra i 4 kHz; ecco perché l'uso di tale trasduttore è limitato alla riproduzione dei toni medio-alti e alti nelle casse acustiche a due e tre vie. Il nastro è normalmente realizzato in alluminio ed è molto delicato, ragion per cui viene normalmente protetto da una griglia frontale, sagomata in svariate maniere. La membrana (il nastro, se preferite...) è posta perpendicolarmente all'ascoltatore ed il suono viene convogliato da una sorta di tromba acustica, il che rende l'altoparlante abbastanza direttivo. Il magnete è solitamente in materiale ceramico.

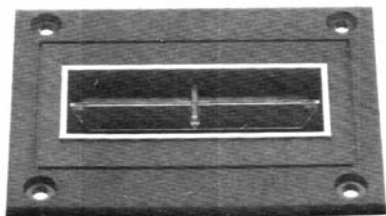


Figura 2.5

Un esempio di altoparlante a nastro: si tratta di un tweeter.

L'altoparlante piezoelettrico

Funzionalmente e strutturalmente questo trasduttore somiglia a quello magnetodinamico, dal quale differisce, però, per l'origine delle vibrazioni riproducenti il suono: infatti a muovere la membrana (solitamente realizzata in carta) non è una bobina, ma un elemento piezoelettrico (tipo il tradizionale buzzer o cicalino piezo usato in elettronica). L'altoparlante sfrutta l'effetto piezoelettrico, che è la caratteristica di taluni materiali naturali (il quarzo) o sintetici (composti ceramici, più apprezzati per il basso costo di produzione e la resistenza all'umidità e alle variazioni di temperatura) di deformarsi se sottoposti a una differenza di potenziale applicata tra due facce contrapposte.

Nell'altoparlante in questione la membrana piezoelettrica, cui sono applicate superiormente e inferiormente due placchette collegate ciascuna ad un elettrodo portato all'esterno, è solidamente fissata al vertice del cono, al quale imprime il movimento. Visto che la base del materiale piezo è fissata alla base alla struttura portante dell'altoparlante (cestello) e superiormente alla membrana, l'altoparlante non richiede alcuna sospensione inferiore; quella esterna non è altro che la base (eventualmente corrugata) del cono). Mancando il magnete, il componente risulta leggerissimo, anche perché la sua struttura, non dovendo reggere peso, può essere in plastica leggerissima. Causa la rigidità dei materiali piezoelettrici, le vibrazioni, sia pure intense, determinano minime escursioni e praticamente solo nel campo delle frequenze alte e medio alte: dunque, anche l'altoparlante piezoelettrico è adatto alla riproduzione delle sole frequenze sopra i 4÷5 kHz in casse acustiche a due e tre vie. Il suono ottenuto dai materiali ceramici è molto freddo, metallico, il che rende il nostro trasduttore adatto a diffusori da pubbliche esibizioni, a monitor per strumenti musicali o alla riproduzione di musica

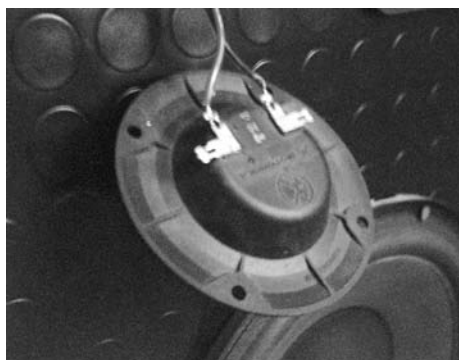


Figura 2.6

Tweeter piezoelettrico: l'elemento trasduttore è in materiale ceramico, mentre cono e sospensione esterna (che poi è l'unica) sono in carta.

rock e moderna (è sconsigliato l'uso con la classica) e/o proveniente da fonti di riproduzione digitali (Compact Disc).

Parametri distintivi degli altoparlanti

L'uso di un altoparlante, da solo o in combinazione con altri, esige da parte nostra che conosciamo la sua natura e le sue caratteristiche, elementi fondamentali per poterlo impiegare come esso prevede e per ottenere i migliori risultati. È infatti impensabile pretendere di adoperare, per ascoltare il suono di un contrabbasso, un trasduttore destinato alla riproduzione delle sole alte frequenze! I parametri fondamentali di un altoparlante sono:

- ❑ *risposta in frequenza (Bw)*; indica come l'altoparlante si comporta entro lo spettro di frequenze audio (20÷20.000 Hz); solitamente è espressa con un diagramma di Bode (l'ascissa è logaritmica) che permette di valutare la pressione sonora alla potenza di riferimento (tipicamente 1 watt) misurata a 1 metro o a 50 cm di distanza dalla membrana; si esprime in Hz (Hertz);
- ❑ *frequenza di risonanza (fs)*; è la frequenza in corrispondenza della quale l'impedenza elettrica raggiunge il massimo valore (la parte induttiva eguaglia quella capacitiva); dipende dalle dimensioni e dal peso della membrana, e dalla rigidità delle sospensioni; si esprime in Hz;
- ❑ *impedenza elettrica (Ze)*; è l'impedenza misurata ai capi della bobina alla frequenza di 1 kHz e non va confusa con la resistenza dell'avvolgimento (sempre minore) in quanto deriva dalla somma vettoriale della resistenza e della reattanza induttiva della bobina stessa; si esprime in ohm; gli altoparlanti da hi-fi hanno impedenza di 4, 8 o 6,4 ohm;
- ❑ *efficienza*: è la pressione sonora specifica del trasduttore; più esattamente, è la pressione sonora esercitata ad una distanza convenzionale di riferimento quando l'altoparlante viene pilotato da un segnale elettrico variabile (di frequenza ben definita) che gli fa dissipare 1 watt di potenza; l'efficienza dipende da numerosi fattori, tra i quali struttura del magnete e induzione residua, materiale delle sospensioni, peso dell'equipaggio mobile; salvo diversa convenzione, si esprime in dB/w/m;
- ❑ *volume acustico equivalente (Vas)*; volume d'aria corrispondente alla cedevolezza meccanica delle sospensioni: è tanto maggiore quanto più morbide sono le sospensioni della membrana e tipicamente è elevato per gli altoparlanti destinati alle casse acustiche a sospensione pneumatica, mentre risulta contenuto per quelli da adoperare in bass-reflex o in pianali per hi-fi car; si esprime in litri (l) o in decimetri cubi (dm³) che sono poi unità di misura tra loro equivalenti (1 dm cubo = 1 l);

❑ *fattore di merito totale (Qts)*; è un parametro fondamentale per determinare il comportamento dell'altoparlante in corrispondenza ed in prossimità della frequenza di risonanza; gli altoparlanti caratterizzati da un elevato Qts hanno forti oscillazioni ed è preferibile utilizzarli in casse chiuse, mentre quelli a basso Qts sono più stabili ed hanno meno oscillazione, quindi sono adatti all'uso in aria libera (casse bass-reflex e piane per auto); il Qts è un valore adimensionale;

❑ *angolo di irradiazione*; ogni altoparlante emette il suono entro un angolo, misurato in riferimento al suo asse perpendicolarmente all'ascoltatore, che dipende strettamente dalla forma e dal materiale della membrana; l'angolo è anche funzione della frequenza di lavoro, in quanto le alte frequenze sono più direzionali delle basse; una membrana piatta ha un angolo di irraggiamento maggiore di quello ottenibile da un cono, ma una a cupola consente di inviare il suono entro un angolo più vasto ancora; non a caso è quella preferita per le unità medie e medio-alte, proprio per contrastare la tendenza delle note alte a propagarsi solo frontalmente rispetto alla superficie della membrana.

Bene, ora che avete conosciuto i parametri degli altoparlanti potete capire quanto sia importante disporre delle tabelle fornite dal costruttore; niente tabelle, niente cassa... a meno di non voler andare a caso!

Tipi di altoparlante

Basandoci sulla risposta in frequenza, possiamo fare una prima, fondamentale distinzione tra gli altoparlanti reperibili in commercio; riprendiamo un po' il discorso fatto riguardo la struttura meccanica, per dire che tanto più la membrana è grande e pesante, tanto più lento e inerziale sarà il suo movimento. Ne deriva che un cono grande è adatto a riprodurre le basse frequenze e le medie, ma dà scarsi risultati con quelle alte; quindi, per riprodurre queste ultime bisogna usare equipaggi mobili piccoli e leggeri, ma in tal caso non si sentono più le note gravi. Ecco perché un solo altoparlante non potrà mai dare una buona risposta entro l'intera banda delle audiofrequenze. A seconda della loro attitudine a lavorare in un determinato campo di frequenze, gli altoparlanti possono essere distinti in:

- ❑ *generici*; lavorano bene tipicamente tra 300 e 8.000 Hz, ossia nella banda riguardante la voce e gli strumenti musicali a tastiera;
- ❑ *full-range*; sono gli altoparlanti a banda larga, cosiddetti perché rispondono sufficientemente bene in buona parte della gamma delle

audiofrequenze: tipicamente tra 100 e 12.000 o anche 13.000 Hz; vengono impiegati tipicamente nei monitor per strumenti musicali;

❑ *woofer*; sono dedicati alle basse frequenze e di solito lavorano bene tra poche decine di Hz e circa 2 kHz; trovano impiego negli impianti hi-fi e in quelli per pubbliche esecuzioni;

❑ *mid-range*; destinati alla riproduzione delle medie frequenze, rispondono bene fra 300 e 5 kHz, quindi sono destinati essenzialmente al campo della voce e a qualche strumento musicale a fiato ed a tastiera; trovano impiego negli impianti hi-fi e in quelli per pubbliche esecuzioni;

❑ *tweeter*; è l'altoparlante che risponde bene solamente sopra il campo delle medie frequenze; tipicamente lo si impiega sopra i 4 kHz e fino alla zona alta della gamma audio (16÷20 kHz); trovano impiego negli impianti hi-fi e in quelli per pubbliche esecuzioni.

Oltre a questi, che sono i tipi base, vi sono numerose varianti che, in realtà, non sono vere e proprie categorie di altoparlanti: nomi come mid-woofer, mid-tweeter, sub-woofer non sono altro che modi di spiegare la maggiore attitudine di alcuni trasduttori a operare anche nelle bande di frequenza di altri tipi. Per esempio, il mid-woofer è un'unità destinata ai toni bassi che riesce, superiormente, a coprire anche la porzione bassa della gamma delle medie frequenze audio. Qui di seguito verranno esposte le caratteristiche di massima dei vari tipi di altoparlante.

Generico

Si tratta di un trasduttore solitamente di piccole dimensioni, impiegato dove serva sentire il suono o la voce, senza curarsi troppo della qualità sonora; trova posto in radioricevitori, registratori e riproduttori, portatili e da tavolo, nei quali rappresenta la soluzione più economica. Ha il magnete in lega ferromagnetica (AlNiCo ecc.) e la membrana, conica, in carta o plastica.

Larga banda

È un altoparlante di dimensioni medie o medio-grandi, normalmente di forma tonda e del diametro di 10÷40 cm. Per garantire un'estesa risposta in frequenza, spesso è dotato di due coni concentrici, ossia la membrana principale, che è quella più grande e viene mossa direttamente dalla bobina ed è destinata alla riproduzione delle note medie e basse; una seconda membrana, orientata come il cono principale e incollata nel suo vertice, destinata a riprodurre le frequenze medio-alte e alte. Il sistema a doppio

cono (Figura 2.7) consente di sfruttare la buona risposta alle basse frequenze tipica delle membrane di grandi dimensioni, compensando la perdita sulle note acute con una seconda membrana che, sebbene vibri solidariamente con quella principale, essendo di piccole dimensioni, alle alte frequenze riesce a riprodurre le note con intensità sufficiente a renderle ben udibili nella riproduzione cosa che la membrana principale da sola non potrebbe fare.

Woofers

È per eccellenza l'altoparlante che riproduce le note gravi; per espletare la sua funzione, dallo studio del suono sappiamo che deve spostare grandi masse d'aria, cosa che può essere ottenuta con grandi escursioni della membrana o, a parità di escursione, con membrane di grande superficie. Ecco perché il woofer misura almeno 15÷16 centimetri nelle versioni destinate a partire dai 60÷70 Hz e oltre 20 cm nelle unità destinate ai bassi più profondi; ecco anche perché la membrana del woofer ha solitamente sospensioni che le permettono ampi spostamenti.

La necessità di far compiere alla membrana spostamenti lineari relativamente grandi, implica tutta una serie di caratteristiche costruttive, tra le quali una certa lunghezza del traferro (lo spazio che si trova tra l'anello esterno e il cilindro centrale (quello sul quale scorre la bobina) del magnete; tale necessità nasce dall'esigenza di garantire la stessa intensità del campo magnetico per tutta l'escursione della bobina. Un campo di intensità differente dal punto più interno a quello più esterno della corsa determinerebbe una variazione di efficienza nell'ambito dell'escursione della membrana e quindi una non linearità (distorzione, se preferite...) dell'altoparlante. Il magnete deve quindi essere di dimensioni abbastanza grandi, il che implica un certo peso ed ingombro del woofer, decisamente maggiore di



Figura 2.7

Altoparlante a larga banda con struttura bicono: il cono grande è la membrana principale e riproduce le note basse e medio-basse; nel suo vertice, è incollato un secondo cono molto più piccolo, che vibra insieme ad esso e riproduce le note medio-acute.

quello di un midrange o di un tweeter. La membrana e le sospensioni che la centrano e contengono nel cestello giocano un ruolo fondamentale nel determinare la risposta alle basse frequenze: un equipaggio mobile pesante e trattenuto da sospensioni morbide determina una notevole estensione verso la zona bassa (frequenze di risonanza anche dell'ordine di $10\div 15$ Hz) ma comporta una minor precisione dell'altoparlante nella riproduzione dei bassi più profondi, dato che la massa consistente non viene adeguatamente frenata dalle sospensioni. Ne deriva che i toni bassi sono riprodotti con meno nitidezza e, specie in prossimità della F_s , sono affetti da un certo rimbombo perché l'equipaggio mobile tende a entrare in risonanza. Una sospensione un po' più rigida conferisce maggiore nitidezza del suono, perché rende più preciso il movimento della membrana, tuttavia tende a ridurre l'estensione delle basse frequenze, in quanto frena l'equipaggio mobile. Il giusto compromesso tra profondità dei bassi e precisione della riproduzione viene cercato in laboratorio, analizzando la risposta in camera anecoica. Notate come il fattore di merito definisca in un certo qual senso quanto appena detto: altoparlanti con membrana pesante e sospensioni morbide hanno elevati Qts, mentre trasduttori con membrane leggere e sospensioni rigide sono caratterizzati da bassi valori del Qts.

Talvolta si preferisce, per privilegiare la profondità dei bassi, costruire woofer con sospensioni morbide; in questo caso, soprattutto se la membrana pesa abbastanza, a piena potenza è facile che non riescano a contenere correttamente l'escursione della membrana stessa, la quale arriva a fine corsa e distorce. Il problema si risolve designando tali altoparlanti per il montaggio in casse acustiche ermetiche (a sospensione pneumatica) come descritto nel Capitolo 3. Dovendo essere sottoposta a forze relativamente intense, la membrana del woofer è solitamente di cartone robusto, a volte spesso anche un paio di millimetri (sono d'esempio alcuni altoparlanti pro-



Figura 2.8
*Un altoparlante woofer (di
produzione Peerless) con cono
in polipropilene e sospensione
esterna in gomma.*

dotti da Bose) o di materiali sintetici, quali polipropilene, polietilene, kapton, ma c'è anche qualche costruttore che opta per composti un po' più rigidi quali la fibra di vetro. La forma della membrana è solitamente a cono, con, alla base, una piccola cupola o un cerchio che hanno la funzione di sigillare l'altoparlante, ossia di isolare la parte anteriore da quella posteriore; l'isolamento serve sia per evitare l'introdursi di polvere tra bobina e magneti, sia, per gli altoparlanti destinati al montaggio in cassa ermetica, a impedire il passaggio dell'aria dall'interno all'esterno, ovvero a garantire la perfetta tenuta d'aria. In particolari realizzazioni la membrana è piatta: in tal caso ha una struttura a nido d'ape, che le conferisce la necessaria rigidità. La sospensione esterna è sovente di schiuma poliuretanica o gomma, quest'ultima più rigida ma di maggior durata: infatti la schiuma con gli anni si secca e si rompe.

Il supporto della bobina, tradizionalmente in cartone trattato con resina epossidica, è sempre più spesso in alluminio e riporta fori per l'aerazione; infatti non dobbiamo dimenticare che il woofer è, tra tutti gli altoparlanti usati nell'hi-fi, quello che deve dissipare la maggiore potenza.

Mid-range

È, nei sistemi a più vie, l'unità destinata a riprodurre i toni medi. Per questo motivo ha una struttura meno "rigida" di quella del woofer, nel senso che può essere costruito in varie maniere. Il magnete è decisamente più piccolo ed anche la bobina lo è, in quanto il mid-range, per il suono che deve emettere, dissipa pochissima potenza elettrica; ciò perché il nostro orecchio è molto sensibile alle note medie della gamma audio, quindi l'altoparlante, in una cassa acustica, può farsi sentire con la stessa presenza di un woofer, ma lavorando con potenze nettamente minori.

Strutturalmente è fatto come il woofer, solo che è più piccolo e solitamente, prevedendo di inserirlo in una cassa acustica, è chiuso posteriormente; insomma, il vano della membrana e della bobina è ermetico e comunica solo con la parte frontale, ossia con l'esterno. Tale accorgimento serve ad evitare che, in una cassa, l'aria spostata dal woofer faccia vibrare impropriamente la membrana del mid-range.

La membrana del "medio" può essere a cono, ma anche piatta (in questo caso ha la solita struttura in cartoncino rinforzato a nido d'ape) oppure a cupola, con vertice verso l'esterno; per i coni si utilizzano carta, polietilene, polipropilene e simili, mentre per le cupole si usa, oltre ai predetti materiali, anche la tela, semplice o trattata con resine sintetiche. La sospensione esterna può essere in carta corrugata (il proseguimento del cono...) in gomma o schiuma di poliuretano, ma anche in tela. Alcuni mid-range, per

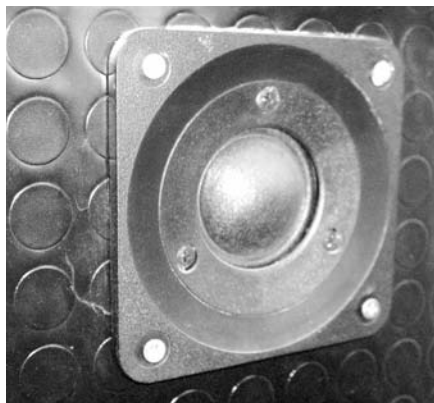


Figura 2.9

Unità mid-range con membrana a cupola (Philips AD02110/SQ) realizzata in tela; posteriormente è chiuso da un cestello in plastica che ne delimita il volume di lavoro.

raggiungere un'efficienza più elevata ($103\div105$ dB/w/m) vengono "caricati" acusticamente mediante trombe lineari o esponenziali; in tal caso la membrana è posta nella gola e il suono esce dalla parte più larga (bocca). Il medio a tromba ha una resa acustica nettamente maggiore di quella dell'altoparlante comune, tuttavia irradia il proprio suono entro un angolo ristretto, che non supera i $80\div90$ gradi; per questo è destinato a diffusori progettati per stare lontano dall'ascoltatore, quindi da usare non in casa ma all'aperto. È inoltre molto più profondo di un altoparlante tradizionale, in quando la tromba deve avere una lunghezza pari all'incirca alla lunghezza d'onda della più bassa frequenza da riprodurre; per limitare le dimensioni si usa dare alla tromba la forma esponenziale o ripiegata: in quest'ultimo caso il suono percorre una sorta di doppia curva a tornante (Figura 2.12).

La bobina, normalmente avvolta su cartone trattato con resina epossidica, talvolta viene costruita su supporto in alluminio e riporta fori per l'aerazione; ma ciò vale per alcuni altoparlanti professionali destinati all'amplificazio-



Figura 2.10

Mid-range con membrana a cono realizzata in carta e sospensione in schiuma sintetica; posteriormente, il cestello è completamente chiuso e delimita il volume di lavoro dell'altoparlante.

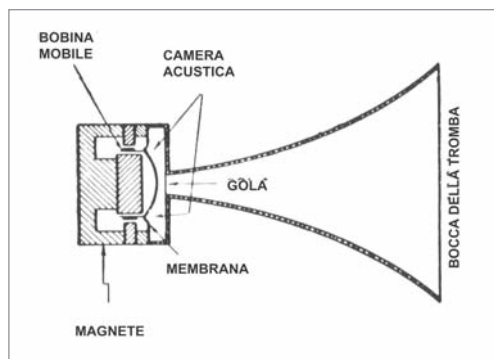


Figura 2.11

Struttura di un altoparlante caricato con una tromba a profilo esponenziale (cosiddetto perché le pareti curvano come la curva matematica di crescita esponenziale).

ne per concerti e riproduzione di suono in grandi ambienti. Il magnete è tipicamente ceramico come nel woofer, ma più basso, visto che la bobina deve compiere escursioni limitate a pochi millimetri.

Tweeter

Si tratta del più piccolo tra gli altoparlanti usati nell'hi-fi: molto leggero, viene realizzato con diverse tecniche, ossia magnetico e piezoelettrico. In tutti i casi ha una membrana di piccole dimensioni, che mai supera i 4÷5 centimetri di diametro, a forma di cono o cupola; i coni sono solitamente in carta, mentre per le cupole si utilizzano i materiali più disparati, quali tela, plastiche rigide, titanio, alluminio. Ogni materiale risponde a precise esigenze funzionali e alla filosofia "sposata" dal costruttore; in particolare:

- la tela dà un suono morbido e viene usata nella gran parte dei tweeter destinati alla riproduzione domestica; è poco rigida e quindi può

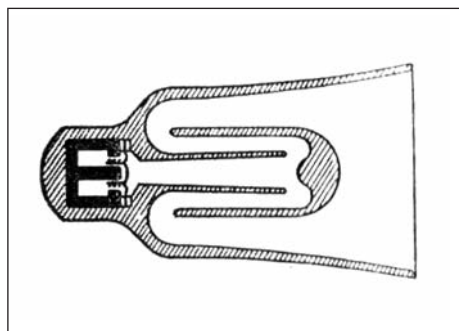


Figura 2.12

Altoparlante con struttura a tromba ripiegata: le onde acustiche prodotte dalla membrana a cupola (a sinistra) caricata dalla camera di compressione percorrono la tromba, seguendo le curve.

prestarsi poco a seguire suoni che variano bruscamente, quindi in taluni casi dà una distorsione maggiore di quella degli altri materiali, in quanto la cupola non vibra uniformemente;

❑ le plastiche rigide (ad esempio il polycarbonato) danno un suono più metallico e graffiante, anche se la loro risposta è un po' meno regolare di quella delle cupole in tessuto;

❑ i metalli (alluminio e titanio) sono impiegati nei trasduttori di maggiore qualità, perché la loro rigidità garantisce la più bassa distorsione e la risposta più pronta anche ai transienti; danno un suono meno soffice delle tele ma più definito e cristallino, migliore di quello delle plastiche.

La sospensione esterna (spesso l'unica) del tweeter è il bordo esterno della membrana, qualche volta corrugato e qualche altra no: ciò perché l'escursione da compiere è ridottissima (non arriva al millimetro). La bobina può essere avvolta su carta trattata o su alluminio; nei tipi professionali, destinati a funzionare continuativamente alla massima potenza, è provvista di fori per la ventilazione; a volte è anche immersa in una sorta di liquido detto "ferrofluido", che viene contenuto tra la sospensione inferiore (interna) e il traferro e che serve a disperdere il calore prodotto dallo scorrimento della corrente nel filo costituente la bobina.

Il ferrofluido è un particolare olio contenente parti metalliche, capace di elevare del 300÷400 % la conducibilità termica tra bobina mobile e ambiente circostante; permette, dunque, di far smaltire alla bobina il calore che produce, molto più rapidamente di quanto avviene in aria. Ne deriva che l'altoparlante può sopportare più facilmente sovraccarichi ripetitivi, senza rischiare che il filo surriscaldi tanto da far sciogliere lo smalto isolante e da rendere inservibile il trasduttore. Il magnete del tweeter è solitamente basso ma, allo scopo di conferire al trasduttore un'elevata sensibilità, può avere grande diametro, allo scopo consentire un intenso campo magnetico nel



Figura 2.13

Un piccolo tweeter a cupola raffreddato a ferrofluido. Viste le ridotte dimensioni della cupola, questo trasduttore è adatto a riprodurre frequenze a partire da 4÷5 kHz.

traferro. Nel caso del tweeter piezoelettrico, cambia solo quello che c'è dietro la membrana: non bobina e magneti, ma una pastiglia piezo in materiale ceramico.

Per avere un'efficienza più elevata (fino a 106 dB/w/m) i tweeter vengono "caricati" acusticamente mediante trombe lineari o esponenziali; in tal caso la membrana è posta nella gola e il suono esce dalla parte più larga (bocca). Il medio a tromba ha una resa acustica nettamente maggiore di quella dell'altoparlante comune, tuttavia irradia il proprio suono entro un angolo ristretto, che non supera gli 80÷90 gradi; per questo è destinato a diffusori progettati per stare lontano dall'ascoltatore, quindi a quelli per la riproduzione di musica all'aperto. Sulle trombe valgono le stesse considerazioni fatte per i mid-range. Le trombe, di qualunque forma esse siano, si usano indifferentemente nei tweeter magnetici e in quelli piezoelettrici.

L'altoparlante nell'hi-fi

I limiti dei singoli altoparlanti fanno comprendere come, per ottenere una riproduzione fedele, l'unica soluzione sia ripartire il suono in più porzioni, la riproduzione di ciascuna delle quali va affidata a un trasduttore idoneo. Dunque, una cassa acustica che si rispetti non sarà mai costituita da un solo tipo di altoparlante, ma, nella sua forma più semplice, conterrà almeno un woofer ed un tweeter, mentre nelle versioni più sofisticate adotterà un'unità per ciascuna delle gamme bassa, media e alta, oppure, addirittura, unità intermedie quali mid-tweeter e subwoofer.

La cosa, semplice a parole, in pratica comporta alcune difficoltà: infatti, se è vero che ogni altoparlante può gestire da sé la propria porzione di banda audio perché risponde solo in un certo spettro, è altrettanto vero che per alimentare con un singolo amplificatore più trasduttori, le bobine di tutti dovrebbero essere tra loro in parallelo (in serie è impensabile, perché ogni altoparlante taglierebbe una porzione della banda audio); ma così facendo si ottiene un'impedenza complessiva troppo bassa. Ad esempio, due altoparlanti da 8 ohm fanno un carico di 4 ohm. L'amplificatore si troverebbe a dover erogare più corrente di quella prevista, e si danneggerebbe il suo stadio finale; se provvisto di protezione in corrente, darebbe un suono fortemente distorto.

Ma allora, come si realizza, dal punto di vista elettrico, un diffusore acustico? Semplice: bisogna far sì che ogni altoparlante partecipi solo in un certo campo di frequenza nel quale gli altri sono esclusi o abbiano effetto trascurabile, riguardo alla presenza del suono che emettono e alla corrente assorbita. Il compito di far partecipare ogni unità solamente nella banda ad essa assegnata è svolto da un circuito: un filtro, detto cross-over.

3

L'altoparlante e la cassa acustica

Nel precedente capitolo è stato spiegato cos'è e come funziona l'altoparlante, descrivendo la struttura e le caratteristiche dei vari tipi; in particolare modo, di quelli che verranno presi in considerazione nella costruzione dei diffusori acustici. Sappiamo che l'altoparlante riproduce il suono facendo vibrare la propria membrana, quindi spostando l'aria in modo da determinare nell'ambiente onde sonore simili a quelle che hanno prodotto il suono originario (quello da riprodurre).

Ma, per come funziona, l'altoparlante non può essere usato tale e quale: ciò perché la vibrazione della membrana produce due onde acustiche, derivanti una dall'aria spostata dalla parte frontale e l'altra da quella mossa dal retro della membrana stessa. E il problema sta nel fatto che l'onda frontale è in opposizione di fase rispetto a quella posteriore. Lasciato libero, l'altoparlante darebbe un suono debole e falsato dall'onda acustica prodotta dalla parte posteriore della membrana, la quale, rimbalzando nell'ambiente, andrebbe in tutto o in parte ad annullare l'emissione frontale.

Per annullare l'onda posteriore e con essa l'interferenza sul suono diretto, occorre montare l'altoparlante su un pannello che ne chiuda la parte posteriore; il pannello deve avere dimensioni pari almeno alla lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza riprodotta dall'altoparlante: ad esempio, se il

trasduttore deve riprodurre una nota a 30 Hz il pannello deve misurare almeno 10x10 m. Siccome nella pratica è un po' difficile montare altoparlanti su pareti di tali dimensioni, si usa dotarli di un box decisamente meno ingombrante: un contenitore che prende il nome di cassa acustica; in pratica, una scatola che racchiude la parte posteriore, rivestita di materiale fonoassorbente (ovatta, lana di vetro, lana di roccia) il cui scopo è smorzare ed annullare le onde acustiche dovute all'emissione posteriore, in modo da non farle interagire con quelle anteriori e da consentire all'altoparlante di esprimere liberamente e senza interferenze il proprio suono. Dunque, scopo della cassa acustica è evitare l'interazione tra l'emissione posteriore e quella anteriore.

Estinguere le onde posteriori non è comunque l'unico modo per consentire all'altoparlante di emettere il suono che deve emettere: una seconda scuola di pensiero vuole che l'emissione posteriore venga sfruttata convenientemente, ossia che le onde posteriori, invece di essere smorzate, siano convogliate frontalmente, dopo essere state riportate in fase con l'emissione diretta. È il principio della cassa bass-reflex.

Prima di scendere nei dettagli e vedere i tipi realizzabili di cassa acustica, bisogna fare una precisazione: riprendendo un po' di concetti visti nel *Capitolo 2*, bisogna dire che ogni altoparlante richiede, per il suo corretto funzionamento, un certo volume d'aria; quindi, prima di chiuderlo in una cassa, ermetica o meno, bisogna accertarsi di quale sia il suo Vas, ossia il volume acustico equivalente alla cedevolezza delle sospensioni.

Bisogna altresì conoscere frequenza di risonanza in aria libera (f_s) fattore di merito totale (Qts). Noti questi parametri, che il costruttore deve fornire nelle specifiche tecniche dell'altoparlante, scelta la frequenza di risonanza dell'altoparlante e stabilito il tipo di risposta sulle basse frequenze, mediante alcune formule che esporremo nei prossimi paragrafi sarà possibile determinare il volume della cassa.

In buona sostanza, non è pensabile chiudere l'altoparlante in un contenitore a caso ed aspettarsi che funzioni bene comunque: ogni cassa va dimensionata a seconda delle esigenze dell'altoparlante che vi va montato. Il discorso riguarda essenzialmente i woofer (unità per i toni bassi) e gli altoparlanti a larga banda di grandi dimensioni; mid-range e tweeter sono di solito già chiusi posteriormente e, oltre a non generare onde sonore secondarie (posteriori) richiedono volumi di lavoro trascurabili. I tipi di cassa acustica descritti in questo volume sono i seguenti:

- ☐ cassa chiusa;
- ☐ cassa a sospensione pneumatica;
- ☐ cassa bass-reflex.

Prima di andare ad esaminare i singoli tipi e le loro prerogative, riteniamo utile una precisazione: non tutti gli altoparlanti possono essere montati a piacimento; infatti la scelta del tipo di cassa va condotta sulla base dei parametri caratteristici del trasduttore, o meglio, in base al valore del Q_{ts} (fattore di merito totale in aria libera). Più esattamente, gli altoparlanti con Q_{ts} minore o uguale a 0,5 possono essere sistemati indifferentemente in casse chiuse o aperte, quindi trovano impiego in tutti i tipi di cassa qui trattati; quelli il cui Q_{ts} sia maggiore di 0,5 necessitano invece il montaggio in cassa chiusa, possibilmente a sospensione pneumatica.

Cassa acustica chiusa

Passiamo subito a vedere il tipo di cassa acustica più semplice da costruire e dimensionare: quello chiuso. Come accennato poc'anzi, si tratta di un qualcosa che simula il montaggio dell'altoparlante su un pannello di dimensioni infinite; già, lo scopo della cassa chiusa è annullare l'emissione posteriore dell'altoparlante. Per questo motivo, allo scopo di smorzare le onde sonore "intrappolate", l'interno della cassa va rivestito con del materiale fonoassorbente: ad esempio lana di vetro, lana di roccia, ovatta, spugna, pezze. Altrimenti le onde sonore prodotte dal retro dell'altoparlante, non avendo altro sfogo, tenderebbero a far vibrare le pareti del box e quindi a disturbare comunque l'ascolto.

Per dimensionare la cassa, ovvero scegliere il volume (espresso in litri o decimetri cubi) nel quale l'altoparlante dovrà lavorare, bisogna applicare la seguente formula:

$$V_b = \frac{V_{as}}{(Q_{tc}/Q_{ts}^2) - 1}$$

dove il parametro Q_{tc} corrisponde al fattore di merito totale dell'altoparlante in cassa chiusa.

Prima di procedere, è il caso di spendere qualche parola a riguardo: iniziamo col dire che il fattore di merito o fattore di bontà definisce il comportamento dell'altoparlante in prossimità della frequenza di risonanza. In elettrotecnica il Q (fattore di merito) di un componente reattivo (induttanza o capacità che sia) definisce il rapporto tra la reattanza e la resistenza; nel caso dell'altoparlante, possiamo definire due fattori di merito, ossia uno elettrico (detto Q_{es}) e l'altro meccanico (chiamato Q_{ms}). Il primo è, appunto, ottenuto dal rapporto tra la reattanza induttiva della bobina mobile e la sua resistenza elettrica; il secondo, un po' più complesso da definire, con-

siste nel rapporto tra la reattanza meccanica delle sospensioni e la loro resistenza o durezza. Il fattore di merito totale in aria libera è dato dal prodotto dei due diviso la loro somma:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \times Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Dallo studio dell'elettrotecnica sappiamo che tanto più è alto il fattore di merito di un circuito risonante (comprendente, cioè, componenti reattive capacitive e induttive) tanto più marcata è la differenza tra il comportamento in corrispondenza della frequenza di risonanza e quello al di fuori di detta frequenza; in altre parole, maggiore è il fattore di bontà, più il circuito, in condizione di risonanza, differenzia il proprio comportamento rispetto a quando non è in risonanza.

Applicando il concetto all'altoparlante, possiamo dire che valori di Q_{ts} relativamente alti determinano, in corrispondenza della frequenza di risonanza, ampi spostamenti della membrana, ossia consistenti oscillazioni; trasduttori caratterizzati da bassi fattori del Q_{ts} hanno invece, in corrispondenza della propria F_s (la frequenza di risonanza...) un comportamento più composto, ossia la loro membrana oscilla in maniera meno marcata.

Quando si va a chiudere l'altoparlante in una cassa acustica, a meno che essa non abbia internamente un volume d'aria pari a quello acustico equivalente (V_{as}) il fattore di merito totale si alza e si alza in proporzione alla riduzione del volume; per questa ragione, nello scegliere le dimensioni del box occorre considerare il tipo di risposta che ci si aspetta.

A riguardo, considerate che più si alza il fattore di merito, più cresce la frequenza di risonanza dell'altoparlante chiuso in cassa rispetto a quella in aria libera (F_s); inoltre, cresce anche la pressione sonora in corrispondenza della predetta frequenza. Ciò a causa del fatto che, alzandosi il fattore di bontà, il trasduttore accentua l'oscillazione della propria membrana, esattamente come detto qualche paragrafo indietro.

Alla luce dei concetti esposti, nel dimensionare una cassa chiusa è raccomandabile mantenere valori di Q_{tc} compresi tra 0,6 e 1,1; valori inferiori determinano lo smorzamento delle basse frequenze in prossimità di quella di risonanza della cassa, mentre, al contrario, valori più alti del massimo consigliato danno una risposta irregolare (l'altoparlante tende a vibrare eccessivamente e risponde in ritardo alle variazioni del segnale inviatogli dall'amplificatore) e alzano la frequenza di risonanza della cassa. Per farvi un'idea dell'influenza del fattore di merito dell'altoparlante in cassa chiusa,

riportiamo la relazione di proporzionalità (sufficientemente approssimata) tra F_c , F_s , Q_{tc} e Q_{ts} :

$$F_c/F_s = Q_{tc}/Q_{ts}.$$

Come appare evidente, la frequenza di risonanza dell'altoparlante montato in cassa chiusa cresce proporzionalmente al Q_{tc} , almeno, con buona approssimazione.

Notate che nel definire la risposta in corrispondenza della frequenza di risonanza della cassa si usano le curve caratteristiche dei filtri elettronici: ad esempio, in corrispondenza del valore di Q_{tc} 0,707 si ha il cosiddetto comportamento del filtro di Butterworth (miglior compromesso tra abbassamento della frequenza di risonanza e linearità di risposta) mentre per $Q_{tc}=1$ si delinea il comportamento del filtro di Chebychev, caratterizzato da minore stabilità, sovraelongazioni in corrispondenza della frequenza di risonanza) e lungo tempo necessario all'appiattimento della curva di risposta.

Per concludere il discorso sulla cassa chiusa, facciamo un esempio pratico; immaginiamo di voler utilizzare un altoparlante woofer EL80 prodotto dalla Peerless. Dalla scheda tecnica possiamo estrarre i parametri caratteristici che ci interessano:

$F_s = 34 \text{ Hz};$
 $Q_{ts} = 0,5;$
 $V_{as} = 75 \text{ l.}$

Imponiamo ora che la nostra cassa debba avere un comportamento lineare il più possibile; dall'apposito diagramma scegliamo una curva di risposta

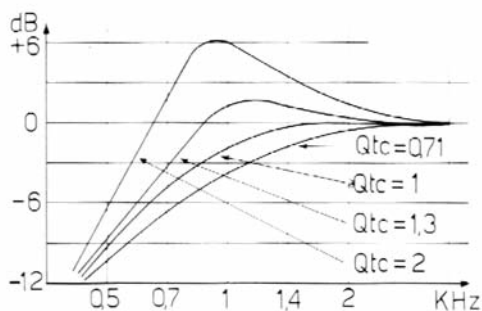


Figura 3.1

Risposta dell'altoparlante in prossimità della frequenza di risonanza, in funzione del fattore di merito in cassa chiusa.

del tipo corrispondente ad un Q_{tc} di 0,707. Esplicitiamo adesso la formula:

$$F_c/F_s = Q_{tc}/Q_{ts}$$

in modo da ottenere il valore della frequenza di risonanza che avrà l'altoparlante chiuso nella cassa acustica:

$$F_c = F_s(Q_{tc}/Q_{ts}).$$

Sostituendo i valori vediamo che la F_c vale:

$$F_c = 34 \text{ Hz} (0,707/0,5) = 48,06 \text{ Hz}$$

Insomma, il valore scelto per il Q_{tc} determina un accettabile innalzamento della frequenza di risonanza della cassa.

Appurato ciò, passiamo adesso a calcolare il volume interno del diffusore, usando la solita relazione:

$$V_b = \frac{V_{as}}{(Q_{tc}/Q_{ts}^2) - 1}$$

e inserendo in essa i valori a noi noti:

$$V_b = \frac{75 \text{ l}}{(0,707/0,5^2) - 1} = \frac{75 \text{ l}}{(0,707/0,25) - 1} = \frac{75 \text{ l}}{1,828} = 41 \text{ l}$$

Dunque, la cassa che dobbiamo costruire dovrà riservare al woofer un volume di 41 litri; considerato che il volume dovuto alla sporgenza del cestello e del magnete all'interno della cassa è circa mezzo litro, quindi trascurabile, possiamo pure dimensionare la cassa perché abbia al proprio interno 41 litri d'aria.

Cassa a sospensione pneumatica

Vista la cassa chiusa possiamo studiare quella che può essere considerata una sua variante: il tipo a sospensione pneumatica, cosiddetta perché concorre a formare la sospensione dell'altoparlante che vi viene montato. Comprendete meglio il concetto considerando che si tratta di una cassa chiusa ermeticamente, nella quale l'aria non può entrare o uscire (entro

certi limiti, s'intende...) e la sua consistenza e la sua elasticità sono tali da contenere, in una certa misura, il movimento della membrana dell'altoparlante. Insomma, la membrana dell'altoparlante diviene una parte delle pareti esterne del box e quindi il suo movimento è limitato dal fatto che l'aria la frena: il movimento verso l'interno provoca una compressione dell'aria, mentre uno verso l'esterno tende ad aumentare il volume.

La cassa a sospensione pneumatica è destinata a woofer caratterizzati da elevati valori del fattore di merito Q_{ts} , che hanno sospensioni troppo cedevoli, troppo morbide da non riuscire da sole a contenere correttamente il movimento della membrana, specie ad alte potenze e in corrispondenza della parte bassa della risposta in frequenza. Insomma, l'elasticità dell'aria contenuta nella cassa è il naturale completamento della sospensione meccanica propria dell'altoparlante.

Alla luce di quanto detto nel Capitolo 2 circa le caratteristiche dei woofer, a qualcuno verrà da chiedersi perché vengono costruiti altoparlanti con sospensioni tanto cedevoli da non bastare loro sole. Ebbene, ecco la spiegazione: per dare al progettista la possibilità di scegliere il tipo di risposta dimensionando opportunamente la cassa. Non a caso, gli altoparlanti troppo morbidi ($Q_{ts} > 0,5$) sono esplicitamente destinati al montaggio in cassa chiusa ed a sospensione pneumatica.

Già, gli altoparlanti più rigidi sono costruiti per funzionare da soli con determinate caratteristiche sempre e comunque, tanto che possono essere montati anche in casse aperte o su un pannello di grandi dimensioni; quelli con sospensioni morbide sono invece progettati per lasciare al progettista la scelta di quanto contenerne o lasciarne libero il movimento, ovviamente a discapito della profondità dei bassi o della precisione della riproduzione.

Essendo la cassa a sospensione pneumatica sostanzialmente una cassa chiusa, per dimensionarla valgono le stesse formule e le stesse considerazioni fatte per la cassa chiusa.

Anche l'interno della cassa a sospensione pneumatica va rivestito con materiale fonoassorbente, sempre nell'intento di smorzare le vibrazioni prodotte dalla parte posteriore della membrana dell'altoparlante.

Per fare un esempio pratico di cassa a sospensione pneumatica, ipotizziamo di usare il woofer AD10202/W8 prodotto dalla Philips, un componente pensato per l'uso in cassa chiusa. I parametri caratteristici che ci interessano sono:

$F_s = 26 \text{ Hz}$;

$Q_{ts} = 0,82$;

$V_{as} = 95 \text{ l.}$

Come fattore di merito imponiamo $Q_{tc}=1,1$; dall'apposito diagramma vediamo che tale valore corrisponde ad una risposta leggermente accentuata in prossimità della frequenza di risonanza, ma comunque accettabile e adatta ad enfatizzare le note basse. Dalla formula:

$$F_c = F_s(Q_{tc}/Q_{ts}).$$

sostituendo i valori vediamo che la F_c sale da 26 Hz a:

$$F_c = 26 \text{ Hz} (1,1/0,82) = 34,8 \text{ Hz}$$

Insomma, in questo caso il valore scelto per il Q_{tc} eleva la frequenza di risonanza, ma la rende comunque più che accettabile per un'ottima riproduzione dei toni bassi, grazie al fatto che l'AD10202/W8 ha una frequenza di risonanza molto bassa.

Appurato ciò, passiamo adesso a calcolare il volume interno del diffusore, usando la solita relazione:

$$V_b = \frac{V_s}{(Q_{tc}/Q_{ts}^2) - 1}$$

e inserendo in essa i valori a noi noti:

$$V_b = \frac{95 \text{ l}}{(1,1/0,82^2) - 1} = \frac{95 \text{ l}}{(1,1/0,67) - 1} = \frac{95 \text{ l}}{0,64} = 148 \text{ l}$$

In questo caso, come ci si aspetta da un altoparlante molto morbido e caratterizzato da un elevato fattore di merito totale, la cassa ha un volume ragguardevole; come dimensioni interne potrebbe misurare all'incirca 40x30x120 cm. Il volume occupato internamente dal retro del woofer è, lo potete immaginare, trascurabile (non raggiunge il litro e mezzo) quindi non è il caso di aumentare la capienza della cassa per compensare quello che va a sottrarre.

Cassa acustica bass-reflex

Il tipo forse più antico di cassa acustica è quella a riflessione, anche detta bass-reflex: in essa l'emissione posteriore dell'altoparlante non viene spen-

ta, ma è sfruttata a vantaggio della resa acustica; in pratica, mediante un tubo accordato alla frequenza di risonanza della cassa, il suono emesso all'interno del box e riflesso sulla parete posteriore viene fatto uscire dal pannello frontale della cassa, quello dove si trova l'altoparlante. In tal modo il suono riflesso dall'interno torna in fase ed esce dalla stessa direzione dalla quale irradia la parte anteriore della membrana. Ma non è detto che debba sempre essere così: infatti il suono emesso dalla parte posteriore dell'altoparlante può essere fatto uscire anche dal retro; in tal caso torna verso l'ascoltatore dopo essere rimbalzato sulle pareti o i mobili che si trovano nell'ambiente. Il tipo di bass-reflex così realizzato è ovviamente adatto a luoghi chiusi e di dimensioni relativamente ridotti, quali le abitazioni; non viene usato nelle esibizioni all'aperto o nelle discoteche perché nel primo caso l'emissione posteriore difficilmente avrebbe qualcosa su cui rimbalzare (quindi si perderebbe) mentre nel secondo verrebbe quasi sicuramente assorbita dalle persone o dai materiali fonoassorbenti di cui sono rivestite le pareti.

In altre varianti di bass-reflex il suono interno viene fatto uscire dai lati della cassa, sia pure con una certa inclinazione.

Per ragioni costruttive e a causa del materiale fonoassorbente del quale devono comunque essere rivestite le pareti interne della cassa, il suono uscente dal tubo è solo una parte di quello emesso posteriormente dall'altoparlante; tuttavia il poterlo utilizzare conferisce al diffusore una resa migliore di quella di una cassa chiusa o a sospensione pneumatica.

La cassa bass-reflex è quella migliore sotto tutti gli aspetti, ma è anche la più critica: progettartela richiede diversi calcoli; accordare il tubo reflex dal quale esce il suono perché risuoni in corrispondenza della frequenza di risonanza voluta, oltre al calcolo può richiedere parecchie prove pratiche, almeno se si desidera la perfezione. Inoltre, determinate geometrie del tubo di accordo portano a distorsioni nel suono riflesso, causate dalla turbolenza dovuta all'aria che si muove ad alta velocità nel tubo stesso.

Accordare perfettamente una cassa bass-reflex, oltre ai calcoli del caso, può richiedere l'uso di particolare strumentazione elettronica e, talvolta, qualche prova in camera anecoica; quest'ultima è una stanza le cui pareti sono rivestite da materiale assorbente, ovvero da lamine perpendicolari che hanno lo scopo di spezzare le onde sonore che altrimenti verrebbero riflesse e disturberebbero l'emissione principale degli altoparlanti.

Bene, chiarito il concetto di bass-reflex, prima di passare alla teoria riguardante il dimensionamento e la costruzione, diamo uno sguardo alle principali varianti di tale tipo di cassa, varianti messe a punto da alcuni costruttori nel corso degli anni, sulla base dell'esperienza maturata "in campo".

Bass-reflex speciali

Come già accennato, la cassa bass-reflex è quella più antica e, perciò, il tipo che negli anni ha subito più aggiornamenti e che ha visto sviluppare, da parte dei progettisti, più varianti. Gli interventi sono stati tutti rivolti al recupero dell'emissione posteriore e la sua riproposizione in fase con l'emissione frontale dell'altoparlante; vediamo dunque alcune varianti che hanno dettato le linee guida per le realizzazioni amatoriali e professionali, ciascuna delle quali è stata spinta dall'intento di migliorare una precisa caratteristica.

Ridurre la distorsione

Uno dei principali inconvenienti della cassa bass-reflex è la turbolenza che si crea nel condotto usato per portare all'esterno del diffusore il suono riflesso; tale turbolenza è dovuta essenzialmente alla velocità che l'aria assume quando l'altoparlante è sollecitato da alte potenze e la sua membrana si muove intensamente. Succede, in pratica, che l'aria non prende la stessa direzione in tutto il tubo reflex, ma crea dei vortici che vanno a disturbare le onde sonore; questo determina, appunto, l'uscita di un suono riflesso alterato, quindi distorsione. Il fenomeno diventa estremamente rilevante in prossimità della frequenza di accordo della cassa.

Da studi condotti parecchi anni fa, la Cemark ha brevettato il sistema Irrotax, consistente nello spezzettare il tubo di accordo in tanti piccoli tubi; si è infatti scoperto che in tubi al disotto di determinate dimensioni non si crea turbolenza e l'aria si sposta solo longitudinalmente, ossia parallelamente all'asse. In pratica, si passa dal movimento caotico, rotazionale dell'aria nel condotto, a quello irrotazionale (o lamellare). Inoltre, scomponen-

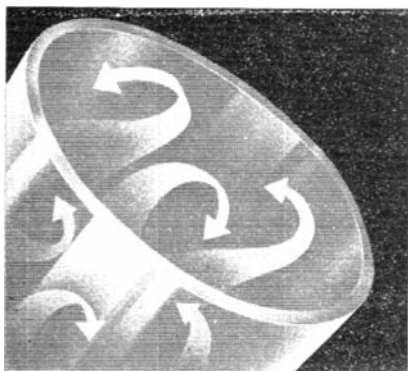


Figura 3.2

Nel tubo di accordo della cassa bass-reflex, l'aria spinta dall'interno verso l'esterno innesca dei vortici che alterano l'emissione secondaria riflessa; ne deriva un ascolto distorto, causato dalla sovrapposizione di onde acustiche fuori fase.

do il tubo in tanti piccoli tubi del diametro inferiore ai 10 millimetri, l'aria esce tutta nella stessa direzione.

Ma non è tutto qui: l'aria spinta dalle onde sonore uscenti dalla cassa incontra una resistenza maggiore rispetto a quella che incontrerebbe con un tubo convenzionale, in quanto la superficie d'attrito è decisamente maggiore. Ciò determina una certa azione frenante, apprezzabile in special modo fuori della frequenza di accordo della cassa acustica, quando l'altoparlante non è più caricato ed il movimento della membrana è libero e limitato dalle sole sospensioni. Insomma, la scomposizione del tubo di accordo aumenta lo smorzamento dell'altoparlante anche al disotto della frequenza di accordo, quindi migliora il controllo del movimento della membrana e quindi la distorsione armonica dell'intera cassa.

Riepilogando, i vantaggi dello spezzettamento del tubo di accordo rispetto a un condotto tradizionale sono:

- ❑ riduzione della distorsione armonica;
- ❑ riduzione dei fenomeni da intermodulazione;
- ❑ miglioramento dello smorzamento e della stabilità dell'altoparlante;
- ❑ maggiore precisione e fedeltà del suono.

I tubi frammentati secondo il sistema Irrotax si possono acquistare già pronti presso i più attrezzati rivenditori di materiale elettronico o audio, ma nulla vieta di costruirsene uno casalingo; allo scopo basta procedere così:

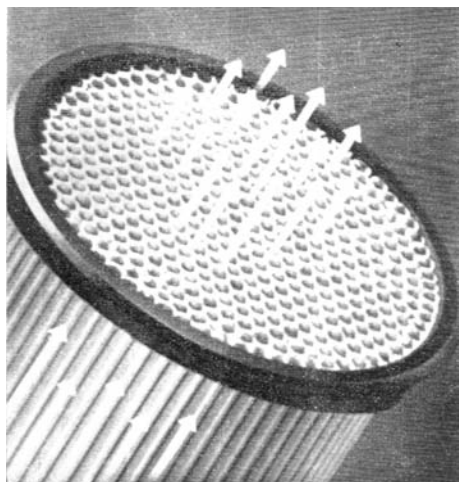


Figura 3.3

Il tubo di accordo reflex del sistema Irrotax è scomposto in tanti piccoli tubi accostati l'uno all'altro fino a riempire la sezione. La suddivisione in condotti di piccolo diametro impedisce all'aria spinta dall'interno della cassa di creare vortici e quindi le dannose onde acustiche che andrebbero a sovrapporsi a quelle emesse dal retro dell'altoparlante e riportate in fase dal sistema reflex.

- 1 procurarsi il tubo di accordo delle dimensioni calcolate per la cassa;
- 2 procurarsi una busta di cannucce per liquidi alimentari, di qualsiasi misura;
- 3 mettere in verticale su un piano il tubo di accordo e infilarvi ordinatamente le cannucce, senza schiacciarle, badando di riempire l'intera sezione;
- 4 estrarre tutte le cannucce;
- 5 con un paio di forbici tagliare le cannucce alla lunghezza del tubo, quindi controllare che nessuna sia rimasta schiacciata;
- 6 con un pennello, spalmare un po' di colla vinilica sull'esterno di ogni cannuccia;
- 7 reintrodurre le cannucce nel tubo in modo ed attendere un paio d'ore che asciughi la colla.

Svolti tutti i passaggi suindicati, il tubo Irrotax è pronto: non bisogna fare altro che introdurlo nel foro della cassa ad esso riservato.

Bassi centrati

Sappiamo che lo scopo del sistema bass-reflex è sommare al suono emesso frontalmente dall'altoparlante quello proveniente dal retro opportunamente invertito di fase; per questa ragione, l'ideale sarebbe far sì che il suono riflesso venisse emesso insieme a quello diretto. Il tradizionale bass-reflex si limita a portare fuori le onde sonore posteriori, ma in una posizione che non è in asse con la membrana del trasduttore; sebbene dia un risultato accettabile, ad un ascoltatore attento e vicino al diffusore ciò dà l'impressione che i bassi arrivino da due punti diversi dell'altoparlante.

Un noto costruttore di diffusori acustici professionali, la Jamo, una ventina d'anni fa brevettò il sistema CBR (acronimo di Center Bass Reflex) consi-

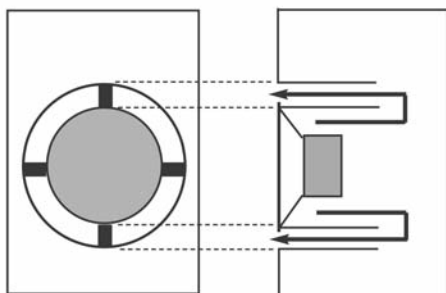


Figura 3.4

Il sistema CBR Jamo: il cestello dell'altoparlante si trova sospeso in mezzo al tubo di accordo reflex e viene fissato al pannello frontale mediante tasselli opportunamente rivestiti di gomma per non trasmettere le vibrazioni.

stente in una originale soluzione costruttiva finalizzata a far uscire lungo la circonferenza del woofer il suono riflesso dall'interno della cassa. Come ciò avvenga è presto detto: il cestello dell'altoparlante è fissato, mediante un certo numero di staffe di piccole dimensioni, al centro di un foro più grande della sua massima circonferenza, che mette in comunicazione l'interno della cassa con l'esterno.

Posteriormente, l'altoparlante comunica con un cilindro del diametro del cestello, lungo qualche centimetro meno della profondità interna della cassa; un secondo cilindro, di diametro circa 3÷4 centimetri più grande, è posto coassialmente al primo e fissato posteriormente al pannello frontale della cassa: questo secondo cilindro funziona da tubo reflex, perché porta all'esterno il suono riflesso dal fondo del box.

Riepilogando, nel sistema CBR l'altoparlante si trova all'interno del tubo reflex; o meglio, altoparlante e tubo d'accordo sono coassiali tra loro. Ciò permette di dare all'ascoltatore la sensazione che suono diretto e suono riflesso giungano dalla stessa fonte, anche perché, a tutti gli effetti, il suono emesso dalla parte frontale della membrana è centrato rispetto a quello, riflesso, portato fuori dal tubo di accordo.

Costruire da sé il sistema CBR non è molto semplice, perché bisogna innanzitutto trovare delle staffe sufficientemente rigide da fissare con bulloncini nei fori del cestello dell'altoparlante destinati alle viti di montaggio; poi, per limitare le vibrazioni trasmesse occorre interporre tra il punto d'appoggio dei tasselli sul pannello frontale e il pannello stesso, dei foglietti di gomma abbastanza dura, quindi fissare il tutto con viti autofilettanti da legno.

Naturalmente, essendo a vista il foro dell'altoparlante deve essere rifinito con cura, oppure corredato di un bordo di dimensioni adeguate.

Il labirinto acustico

Finora si è detto che nella cassa bass-reflex il suono viene portato fuori da un tubo d'accordo di sezione tonda, quadrata o rettangolare; ma non è detto che il tubo debba obbligatoriamente essere dritto. In alcune realizzazioni il condotto reflex che porta fuori il suono riflesso è piegato più volte e realizza quello che viene chiamato *labirinto acustico*.

Una tale realizzazione prende il nome di *labirinto acustico* e, rispetto al canonico tubo reflex, presenta il vantaggio di ridurre le dimensioni della cassa: infatti, ripiegando il condotto di aspirazione lo si rende più corto di un corrispondente dritto.

Normalmente il labirinto acustico viene riservato a diffusori di grandi dimensioni, per esibizioni dal vivo o diffusione sonora in grandi ambienti.

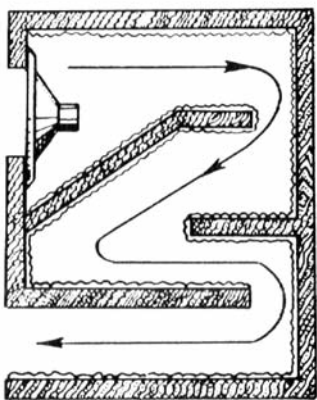


Figura 3.5

Il labirinto acustico consiste nel far passare il suono riflesso attraverso un condotto acustico ricavato all'interno del diffusore e opportunamente rivestito di materiale fonoassorbente. Rappresenta un modo per accorciare il tubo di accordo reflex.

Dimensionare la cassa bass-reflex

Bene, è giunto il momento di vedere come si costruisce un diffusore reflex, ossia di conoscere le formule che, date le caratteristiche dell'altoparlante, consentono di decidere che dimensioni devono avere il box in cui inserirlo e il tubo di accordo, per ottenere la frequenza di risonanza voluta.

Prima di andare ad esaminare le singole formule, va ricordato che non tutti gli altoparlanti possono essere montati in una cassa bass-reflex; più esattamente, in essa si possono montare gli altoparlanti con Q_{ts} minore o uguale a 0,5, mentre quelli il cui Q_{ts} sia maggiore di 0,5 necessitano invece il montaggio in cassa chiusa, possibilmente a sospensione pneumatica. Il motivo è già stato esposto nei precedenti paragrafi quando si è parlato delle casse acustiche chiuse: gli altoparlanti con Q_{ts} maggiore di 0,5 hanno solitamente alto fattore di merito totale perché è alto il loro fattore di merito meccanico, quindi, in corrispondenza della frequenza di risonanza, la loro membrana compie oscillazioni molto ampie. Controllare l'escursione delle sospensioni è abbastanza facile se la cassa è ermetica o comunque chiusa, mentre adottando una cassa aperta (la bass-reflex lo è...) diverrebbe alquanto difficile; quindi in una cassa reflex gli altoparlanti con elevato Q_{ts} non solo suonerebbero male, ma ad alte potenze di lavoro rischierebbero di danneggiarsi.

Oltre al Q_{ts} , di un altoparlante bisogna valutare anche la frequenza di risonanza in aria libera (f_s); ciò perché, come già visto nel dimensionamento delle casse acustiche chiuse, inserire un altoparlante in un box ne eleva la frequenza di risonanza e con essa il limite inferiore della risposta in fre-

quenza. Insomma, se si desidera che il proprio diffusore risponda bene già a 50 Hz, è impensabile scegliere un altoparlante che risuoni a tale frequenza o a frequenze superiori; ne va scelto uno la cui frequenza di risonanza sia minore.

Altro parametro fondamentale per la scelta è il volume acustico equivalente alla cedevolezza delle sospensioni: il V_{as} ; come già visto nel dimensionamento delle casse acustiche chiuse, anche in questo caso influisce decisamente sulle dimensioni, ovvero sul volume interno del box. In altre parole, più il volume della cassa si avvicina al V_{as} , più la frequenza di risonanza dell'altoparlante in cassa si approssima a quella in aria libera; viceversa, se il box ha un volume molto minore di quello acustico equivalente (V_{as}) si determinerà inevitabilmente un incremento della frequenza di risonanza della cassa e con esso un aumento della più bassa frequenza riproducibile dal diffusore.

Detto ciò, si può passare alle nozioni inerenti al dimensionamento della cassa, che, per la bass-reflex, sono due:

- ❑ il volume interno del diffusore;
- ❑ le dimensioni del tubo o condotto di accordo.

Il volume interno

Per calcolare il volume del box bisogna conoscere o imporre alcuni parametri, due dei quali sono caratteristici dell'altoparlante, mentre il terzo si sceglie in base al tipo di risposta che si desidera ottenere in corrispondenza della frequenza di risonanza (un po' come si fa per il calcolo della cassa chiusa). I parametri sono:

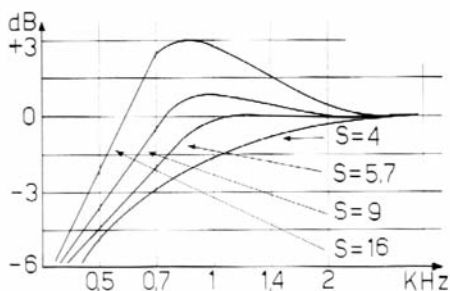


Figura 3.6
Curve di risposta in frequenza in prossimità della risonanza, per un altoparlante in cassa bass-reflex, in funzione del fattore di accordo (S).

-
- ☐ Vas; è il volume acustico equivalente tipico dell'altoparlante da montare nella cassa;
 - ☐ Qts; è il solito fattore di merito totale in aria libera dell'altoparlante;
 - ☐ S ; è il fattore corrispondente alla risposta dell'altoparlante in corrispondenza della frequenza di risonanza e può essere scelto, solitamente, tra 2 e 16.

Quest'ultimo riveste una certa importanza perché determina il comportamento del sistema risonante formato dall'altoparlante e dalla cassa reflex; può essere considerato come l'inverso del fattore di smorzamento: tanto più è alto, tanto più la membrana dell'altoparlante oscilla in prossimità della frequenza di risonanza del diffusore e viceversa. Bassi valori del parametro S danno una risposta morbida, con bassi meno accentuati ma comunque molto precisi e nitidi, senza rimbombo; per contro, alzano leggermente la frequenza limite inferiore della cassa. Alti valori determinano bassi più marcati ed abbassano la frequenza limite inferiore, ma l'altoparlante, specie quando deve riprodurre suoni che variano molto rapidamente (è il caso dei colpi di batteria...) tende a spegnere le proprie oscillazioni con un certo ritardo, quindi a sovrapporre al suono onde sonore che dovrebbero non esistere. In breve, in tal caso la cassa risponde male ai transienti, ossia ai suoni che cambiano molto repentinamente, dando la sensazione di una riproduzione dei bassi poco nitida e confusa. Il consiglio generale è di restringere l'arco dei valori di S tra 2,8 e 10. Certo, poi ci sono altoparlanti che permettono di uscire da tale intervallo e optare per valori minori o maggiori, ma, in sede di progetto ciò è difficilmente quantificabile; di solito certe sperimentazioni vanno fatte una volta costruita la cassa, ascoltando come "suona". La formula per dimensionare il box, ovvero quella che permette di stabilirne il volume interno (espresso in litri o decimetri cubi a patto che Vas sia in litri o decimetri cubi) è la seguente:

$$V_b = V_{as} \times Q_{ts}^2 \times S.$$

Come per la cassa chiusa, anche per la bass-reflex è consigliabile mantenere la forma a parallelepipedo e determinate proporzioni tra base, altezza e profondità; tali proporzioni sono 1/1,6/0,625. Se si intende adottare forme particolari (ad esempio quella piramidale) bisogna rispettare alcune regole:

- ☐ la parte più grande deve ottemperare alla proporzione 1/1,6/0,625;
- ☐ il tubo di accordo deve essere posizionato nella zona più grande, ossia in quella definita dalla suddetta proporzione.

Partendo dalla formula che dà il volume interno della cassa acustica si possono fare alcune semplici considerazioni, la prima delle quali è che il fattore di merito totale in aria libera influenza considerevolmente il calcolo: infatti il volume del box risulta dipendere da esso in maniera quadratica. Ma rispetto alla cassa chiusa o a sospensione pneumatica, a parità di volume acustico equivalente e di risposta nell'intorno della frequenza di risonanza, la bass-reflex è meno voluminosa: questo perché vi si montano altoparlanti il cui fattore di merito è sempre minore di 1 e l'elevazione al quadrato di un numero positivo minore di 1 dà sempre valori più piccoli del numero stesso. Per esempio, 0,5 elevato al quadrato dà 0,25.

La formula evidenzia una relazione di proporzionalità diretta tra il tipo di accordo scelto (ossia la risposta della cassa in corrispondenza della frequenza di risonanza) e il volume interno del box: ciò significa che volendo una risposta più accentuata sui bassi, condizione che abbassa la frequenza minima riproducibile dal sistema acustico ma determina sovraelongazioni e instabilità in corrispondenza della frequenza di risonanza, bisogna aumentare il volume. Viceversa, riducendo il volume la frequenza di risonanza si alza, e con essa la minima frequenza riproducibile dal diffusore; però, così facendo si ottiene una curva di risposta più piatta, con meno sovraelongazioni e una migliore stabilità della membrana dell'altoparlante, condizione che garantisce un suono meglio definito di quello ottenibile con alti valori del parametro S .

Insomma, nella cassa bass-reflex si assiste a un comportamento opposto a quello studiato per la sospensione pneumatica, nella quale è la riduzione del volume d'aria a disposizione dell'altoparlante a determinare l'instabilità e le oscillazioni spurie, seppure porti all'elevamento della frequenza di risonanza, mentre incrementando il volume interno del box si ottiene un allineamento più piatto e stabile, oltre all'abbassamento della frequenza di risonanza e del limite inferiore della banda passante.

Volendo riassumere, si può dire che l'incremento del volume del diffusore bass-reflex:

- ❑ abbassa la frequenza di risonanza e il limite inferiore della curva di risposta in frequenza;
- ❑ accentua l'intensità dei toni bassi nell'intorno della frequenza di risonanza;
- ❑ determina, in corrispondenza della frequenza di risonanza, una risposta irregolare e caratterizzata da oscillazioni residue, udibili soprattutto nella riproduzione di suoni che variano bruscamente di intensità, ed avvertibili come strascichi di tali suoni.

Al contrario, la riduzione del volume della cassa acustica:

- ❑ eleva la frequenza di risonanza e limita inferiormente la risposta in frequenza;
- ❑ smorza l'intensità dei toni bassi in corrispondenza della frequenza di risonanza;
- ❑ determina, in corrispondenza della frequenza di risonanza, una risposta regolare e caratterizzata dall'assenza o dalla quasi assenza di oscillazioni residue.

Il condotto di accordo

Bene, visto come si calcola il volume interno di un diffusore bass-reflex e le implicazioni che l'aumento o la riduzione del volume producono, si può passare a studiare il dimensionamento del tubo di accordo, ossia del condotto che porta all'esterno della cassa le onde sonore provenienti dall'interno (dal retro dell'altoparlante).

Il primo passo da compiere per dimensionare il tubo è stabilire la frequenza di risonanza dell'intero diffusore, frequenza che, come già accennato, non può essere inferiore a quella di risonanza in aria libera dell'altoparlante (F_s); quindi, bisogna scegliere un altoparlante la cui F_s sia minore di quella di risonanza voluta per la cassa.

Nota la frequenza di risonanza in aria libera dell'altoparlante, è possibile calcolare la frequenza di risonanza (F_b) del tubo reflex; la formula per il calcolo è la seguente:

$$F_b = 0,383 \times \frac{F_s}{Q_{ts}}$$

In essa F_b risulta in Hz se F_s è espressa in Hz. Come si vede dalla relazione, la frequenza di risonanza del condotto di accordo è direttamente proporzionale a quella di risonanza dell'altoparlante da solo e inversamente proporzionale al Q_{ts} ; ne deriva che per accordare la cassa bass-reflex ad una frequenza bassa bisogna scegliere un altoparlante che abbia già una sua F_s bassa. Ma, e questo va a confermare il discorso fatto sulla cedevolezza delle sospensioni, bisogna dire che, a parità di frequenza di risonanza, il fattore di merito totale in aria libera deve essere relativamente alto.

Ciò è abbastanza realistico, in quanto gli altoparlanti che hanno una bassa frequenza di risonanza intrinseca solitamente sono abbastanza morbidi e comunque hanno fattori di merito totali non molto contenuti.

Sulla forma del tubo di accordo non c'è molto da dire: si può scegliere quella che si desidera, nel senso che va bene la sezione tonda, quadrata o rettangolare. Quel che non si può lasciare né al caso, né, tantomeno, alla fantasia, è la lunghezza o profondità, che deve essere determinata sulla base della frequenza di accordo calcolata con la formula vista in precedenza, della sezione del passaggio dell'aria e del volume della cassa.

Allora, si può subito dire che la sezione, ossia la superficie del passaggio dell'aria del tubo di accordo si calcola dalla formula:

$$S_b = (3,14 \times d^2) / 4$$

nella quale S_b è la sezione, d è il diametro del tubo e 3,1415926 è la costante nota come π -greca; la sezione risulta in centimetri quadrati se il diametro è espresso in cm. Se si preferisce partire dal raggio (metà diametro), la formula diventa:

$$S_b = 3,14 \times r^2.$$

Le due formule suddette valgono a condizione che il tubo abbia sezione circolare, perché se si adotta la forma rettangolare o quadrata bisogna adottare la più semplice:

$$S_b = \text{lato} \times \text{lato}.$$

Se la forma è quadrata, la sezione vale:

$$S_b = \text{lato}^2.$$

Qualunque sia la forma scelta, per evitare eccessive turbolenze è bene che il tubo di accordo misuri non meno di 5 centimetri di diametro se tondo o 5 cm di lato se quadrato (5 centimetri sul lato più corto, se è rettangolare). La regola è comunque da prendere come generale e non specifica per tutti i tubi, in quanto la misura reale è poi correlata con la lunghezza: un tubo lungo ha meno possibilità di sviluppare turbolenza, in quanto presenta più attrito.

Ad ogni modo, si legga quanto spiegato riguardo al sistema Irrotax, che permette di minimizzare la turbolenza e con essa la distorsione e l'instabilità dell'altoparlante nell'intorno della frequenza di risonanza.

Bene, chiarito anche questo dettaglio si può definire la formula che permette il calcolo della lunghezza del tubo di accordo:

$$Lb = \frac{Sb \times 29 \times 10^3}{Vb \times Fb^2} - 0,9 \times \sqrt{Sb}$$

La lunghezza risulta in centimetri se Sb viene espressa in cm², Vb (volume interno della cassa) in litri o dm³ ed Fb in Hz. Notate che nell'applicare la formula tutti i parametri vanno considerati per il solo modulo (valore numerico) senza introdurre le unità di misura.

Esempi di dimensionamento

Detto questo, si può passare ad effettuare qualche calcolo d'esempio, così da prendere dimestichezza con le formule. Si supponga di voler realizzare una cassa bass-reflex per il woofer RS80 prodotto dalla Peerless; dalle caratteristiche di questo altoparlante estraiano quelle che ci servono per dimensionare la cassa acustica:

$$Fs = 22,4 \text{ Hz};$$

$$Qts = 0,22;$$

$$Vas = 145 \text{ l.}$$

Si parte determinando il volume interno della cassa, ricavato dalla formula che già conosciamo; per farlo, bisogna imporre un valore del parametro S, ossia un tipo di accordo. Dal grafico che mostra l'andamento della risposta in frequenza in funzione dei vari valori di S, si opta per 4, che è il valore con il quale si ottiene la risposta più uniforme possibile, ossia il miglior compromesso tra riduzione della frequenza di risonanza dell'altoparlante in cassa e contenimento delle oscillazioni in corrispondenza della stessa frequenza di risonanza. Il grafico mostra come per S=4 non vi siano praticamente sovraelongazioni: la curva di risposta in frequenza mostra una crescita di livello che si assesta, senza crescere e diminuire più volte come avviene, ad esempio, per S=2 o S=8.

Dunque, imponendo S=4 si può determinare il volume interno del diffusore:

$$Vb = Vas \times Qts^2 \times F = 145 \text{ dm}^3 \times 0,22^2 \times 4 = 145 \text{ dm}^3 \times 0,0484 \times 4 = 28 \text{ litri.}$$

Notate come il volume della cassa, seppure il Vas sia decisamente elevato, si limiti a soli 28 dm³.

Bene, calcolato il volume del box si deve determinare la frequenza di accordo del tubo reflex, che poi è la frequenza di risonanza dell'altoparlante chiuso nella cassa:

$$F_b = 0,383 \times \frac{F_s}{Q_{ts}} = 0,383 \times \frac{22,4 \text{ Hz}}{0,22} = 39 \text{ Hz}$$

Come si nota, la frequenza di accordo risultante (39 Hz) è accettabile, perché risulta maggiore di quella dell'altoparlante funzionante in aria libera ($F_s=22,4$ Hz).

Una volta in possesso della frequenza di accordo, si può passare all'ultimo calcolo, quello che riguarda la lunghezza del tubo reflex; per questo esempio di calcolo si decide che il condotto sia a sezione tonda del diametro di 6 cm. Avendo tutti i parametri occorrenti, si può procedere a determinare la lunghezza del tubo di accordo; per prima cosa occorre calcolare la superficie della sezione del condotto:

$$S_b = (3,14 \times d^2)/4 = (3,14 \times 6^2)/4 = 28,26 \text{ cm}^2.$$

Nota la sezione, dalla formula che già conosciamo possiamo ricavare la lunghezza:

$$L_b = \frac{S_b \times 29 \times 10^3}{V_b \times F_b^2} - 0,9 \times \sqrt{S_b} = \frac{28,26 \times 29.000}{28 \times 39^2} - 0,9 \times \sqrt{28,26} =$$

$$= \frac{819,54 \times 10^3}{42,588 \times 10^3} - 0,9 \times 5,32 = 19,24 - 4,788 = 14,45 \text{ cm}.$$

Dunque, riepilogando, il diffusore acustico deve riservare al woofer RS80 un volume di 28 litri, deve avere un tubo di accordo tondo lungo 14,45 cm e del diametro di 6 cm. La frequenza di accordo è 39 Hz.

Ora passiamo a vedere un altro esempio di dimensionamento: si supponga di voler utilizzare il woofer Peerless RS100, le cui caratteristiche sono le seguenti:

$$\begin{aligned} F_s &= 19 \text{ Hz;} \\ Q_{ts} &= 0,36; \\ V_{as} &= 200 \text{ l.} \end{aligned}$$

Si parte, al solito, scegliendo il tipo di risposta che ci si aspetta dall'altoparlante; diversamente dall'esempio precedente, stavolta si preferisce una

maggior accentuazione dei bassi in corrispondenza della frequenza di risonanza e si accetta la conseguenza, ossia una leggera oscillazione nell'intorno della frequenza di risonanza stessa.

Si imponga al parametro S il valore 8 e si determini così il volume interno della cassa:

$$V_b = V_a \times Q_{ts}^2 \times F = 200 \text{ dm}^3 \times 0,36^2 \times 8 = 200 \text{ dm}^3 \times 0,13 \times 8 = 208 \text{ litri.}$$

Il box appare subito decisamente voluminoso; si potrebbe ridurlo abbassando il valore del parametro S . Ciò porta, però, ad ottenere dal diffusore una risposta alle basse frequenze un po' più smorzata di quella desiderata.

Ora si può passare al calcolo della frequenza di accordo del tubo reflex:

$$F_b = 0,383 \times \frac{F_s}{Q_{ts}} = 20,2 \text{ Hz}$$

Fatto questo, si sceglie il tubo di accordo: per quel che riguarda la geometria, stavolta si opta per un condotto di sezione rettangolare, delle dimensioni (lati) di 5x8 centimetri; ne deriva una superficie della sezione d'uscita dell'aria pari a:

$$S_b = 5 \times 8 \text{ cm} = 40 \text{ cm}^2.$$

Noto anche questo valore, si può procedere al calcolo della lunghezza del condotto di accordo:

$$\begin{aligned} L_b &= \frac{S_b \times 29 \times 10^3}{V_b \times F_b^2} - 0,9 \times \sqrt{S_b} = \frac{40 \times 29.000}{208 \times 20,2^2} - 0,9 \times \sqrt{40} = \\ &= \frac{1.160 \times 10^3}{84,87 \times 10^3} - 0,9 \times 6,32 = 13,67 - 5,69 = 7,98 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Dunque, per questo secondo esempio di diffusore bass-reflex si adotta un tubo di accordo a sezione rettangolare avente area di 40 cm² e lunghezza pari a 7,98 cm.

Con questo, si può ritenere di aver esposto tutti i concetti inerenti il dimensionamento delle casse e di aver mostrato come applicarli in pratica.

Accordare con gli strumenti

Oltre che con le formule esposte, la cassa acustica bass-reflex può essere accordata "in campo", con l'ausilio di alcuni strumenti atti a verificare il punto in cui avviene la risonanza dell'altoparlante. La stessa procedura può essere sfruttata per verificare se i calcoli del diffusore sono stati condotti correttamente. Per eseguire l'accordatura strumentale bisogna disporre di:

- ❑ un generatore di segnale sinusoidale che dia da pochi Hz a 1.000 Hz e una tensione di uscita dell'ordine di 50÷500 mV;
- ❑ un amplificatore di potenza da qualche watt, la cui uscita abbia impedenza compatibile con quella della cassa;
- ❑ un voltmetro in alternata ad alta impedenza (almeno 1.000 ohm/volt) o un oscilloscopio;
- ❑ una resistenza da 100÷150 ohm, 1 watt.

L'uscita del generatore va collegata all'ingresso dell'amplificatore e l'uscita di quest'ultimo deve andare alla cassa acustica; per condurre la prova conviene scollegare l'altoparlante montato nella cassa in prova dall'eventuale filtro cross-over e connetterlo direttamente all'amplificatore. Anzi, non direttamente ma interponendo in serie a uno dei cavi la resistenza da 1 watt, scopo della quale è consentire all'altoparlante di manifestare il picco di tensione in corrispondenza della risonanza.

Il voltmetro ac o l'oscilloscopio vanno collegati praticamente in parallelo alla bobina dell'altoparlante, non sull'uscita dell'amplificatore; in pratica, a valle della resistenza di limitazione. Ciò perché bisogna verificare come si comporta il trasduttore, non l'amplificatore. Fatti i collegamenti, si alimentino

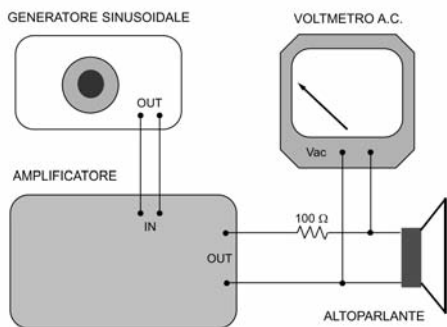


Figura 4.6
Schema di collegamento di altoparlante, amplificatore audio, oscillatore BF e voltmetro in alternata, per effettuare le verifiche di accordo della cassa bass-reflex.

amplificatore e oscillatore. A seconda del livello di amplificazione dell'amplificatore, è probabile che si senta una nota acustica provenire dall'altoparlante; se dà fastidio, coprire l'altoparlante con un cuscino o abbassare il volume. Regolare l'ampiezza al fine di ottenere dal voltmetro o oscilloscopio una lettura di circa un paio di volt, alla frequenza di 500 Hz.

Adesso si regoli l'oscillatore fino a farlo scendere alla minima frequenza; gradualmente si aumenti la frequenza, a passi di 5 o 10 Hz, registrando i livelli di tensione letti dagli strumenti. Nell'elevare la frequenza si proceda fino a circa 400+500 Hz, quindi si tracci, su un foglio di carta millimetrato opportunamente graduato o su della carta logaritmica, un grafico con i valori letti. Ne risulteranno due picchi, che potranno non essere necessariamente di uguale valore; in altre parole, il grafico mostrerà due diversi massimi. La cassa sarà perfettamente accordata quando i due picchi avranno uguale ampiezza.

Se si sta tentando l'accordo senza avere effettuato calcoli, nell'apertura (circolare o quadrata, non più stretta di 5 cm) bisogna introdurre il tubo di accordo, provando con uno provvisorio di cartone e tagliandolo a diverse misure fino a che, ripetendo le prove, si otterranno i due picchi uguali in ampiezza. In alternativa, lasciando inalterata la lunghezza si potrà aumentare o diminuire la sezione del condotto, liberandone o coprendone parte dell'imbocco esterno. I picchi del grafico di risposta della cassa rappresentano la risonanza dell'altoparlante e quella del tubo di accordo.

Lo stesso metodo qui descritto può essere utilizzato per scoprire la frequenza di risonanza di un altoparlante del quale non la si conosce: basta farlo funzionare fuori dalla cassa e bassa potenza; tracciando il grafico apparirà un picco in corrispondenza, proprio della frequenza di risonanza.

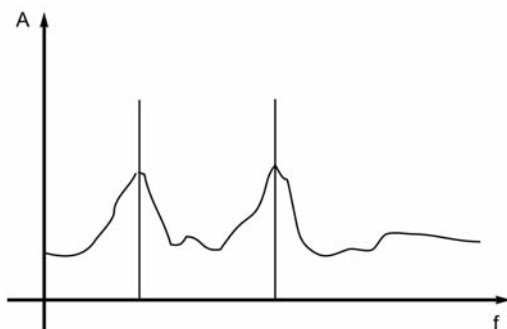


Figura 4.7
Quando la cassa bass-reflex è accordata, il grafico risultante dalla lettura delle tensioni ai capi dell'altoparlante mostra due picchi di uguale ampiezza.

4

Costruire le casse

Nel precedente capitolo si è parlato diffusamente del metodo per estinguere o usare a proprio vantaggio l'emissione posteriore della membrana dell'altoparlante e si è spiegato lo scopo della cassa acustica; appresi i tipi di cassa in cui convenzionalmente si montano gli altoparlanti, si può passare a vedere in pratica come costruire ognuno di essi. Scopo di questo capitolo è insegnare a realizzare una cassa acustica, partendo dal progetto, che è poi la prima fase; infatti, valutare con attenzione cosa ci si aspetta da un diffusore è fondamentale per poi passare alla realizzazione pratica. Il primo passo consiste nella scelta degli altoparlanti determinante non solo per il suono ma anche per quelle che sarà l'ingombro della cassa: scegliere un woofer che richieda un volume d'aria di 100 litri per poi accorgersi di avere solo un po' di spazio tra un ripiano e l'altro dello scaffale della sala, beh, può risultare alquanto deludente. Dunque, la scelta degli altoparlanti va fatta anche in base allo spazio disponibile, sia pure con una certa elasticità; infatti, dal Capitolo 3 sappiamo che si può giocare abbastanza con le dimensioni delle casse, e che ridurle un po' comporta sacrifici (in termini di risposta alle basse frequenze) il più delle volte sopportabili. In definitiva, visto il tipo di altoparlante e valutati i parametri caratteristici (frequenza di risonanza in aria libera, volume acustico equivalente ecc.) con le formule del Capitolo 3 si può già mettere giù qualche calcolo di massima e provare con diversi valori di frequenza di risonanza della cassa e Q_{tc} per vedere che dimensioni

risultano. Una volta trovato il miglior compromesso, non resta che disegnare il diffusore e procurarsi il materiale.

Il materiale della cassa

Per realizzare le casse acustiche, considerando le sollecitazioni cui verranno sottoposte durante il funzionamento dalla pressione sonora esercitata dall'altoparlante dei toni bassi, occorre impiegare materiale stabile, di media pesantezza e consistenza. L'ideale è il legno, massiccio o truciolare, o, meglio ancora, l'impasto di legno pressato noto come MDF; nulla vieta di ricorrere anche a legno compensato di pioppo o a multistrato pesante. Sono da evitare legni teneri o giovani, quali l'abete. Qualunque sia il legno usato, per incollare i pannelli bisogna usare colla vinilica: ad esempio Vinavil 59, Pattex Legno o altro prodotto simile. Alla temperatura di 20÷25 °C la presa si ottiene in 2÷3 ore e la completa asciugatura in otto ore.

Truciolare

È il legno più a buon mercato: viene realizzato impastando trucioli, schegge di scarto della lavorazione del legno, con colla vinilica, quindi pressando le lastre ottenute e lasciandole essiccare. Per costruire le casse acustiche occorre del truciolare di media densità: tipicamente 650÷750 kg di peso al metro cubo. Sebbene sia un impasto, è molto stabile e robusto, ma teme l'umidità, quindi va adeguatamente rivestito e normalmente riservato a realizzazioni per interno. Gli spessori dei pannelli da usare per la costruzione delle casse acustiche sono 12 mm per quelle più piccole, 15 e 18 mm per quelle medie e 22 mm per i diffusori di grandi dimensioni.

MDF

Si tratta di un impasto (Medium Density Faesite) che, un tempo realizzato solo in fogli sottili (3÷8 mm di spessore) oggi si trova facilmente in spessori fino a 30÷40 mm; è sostanzialmente cartone pressato ad alta pressione, operazione che gli conferisce una notevole densità e rigidità, superiori a quelle del truciolare. Viene usato anche per la realizzazione di mobili economici, nei quali la superficie viene poi impiallacciata per proteggere il materiale dall'umidità. L'MDF si acquista a buon prezzo (costa poco più del truciolare) ed ha ottime consistenza e lavorabilità; non è un caso che sia sempre più impiegato per la realizzazione di casse acustiche di buona qualità. Ha però un punto debole: soffre ed assorbe molto l'umidità, ben più del truciolare; quindi una cassa costruita in MDF deve essere sistemata e usata lontano da fonti di umidità e nei luoghi come seminterrati o locali al piano

terra, va preferibilmente tenuta sollevata da terra e distanziata dalle pareti esterne. Diversamente, l'esterno si gonfia e si deforma, un po' come il cartone inumidito; e poi non riprende più la forma originaria. Gli spessori dei pannelli da usare per la costruzione delle casse acustiche sono 15 mm per quelle più piccole, 15 e 18 mm per quelle medie e 22 mm per i diffusori di grandi dimensioni.

Legno massello

Per chi ha qualche soldo da spendere e qualche buon attrezzo da falegname, il miglior materiale da usare nella costruzione delle casse acustiche è il legno massiccio: ad esempio il noce, prestigioso, affascinante, lussuoso, non va neppure rivestito; una volta completata la cassa, basta carteggiarla con tela smeriglio e passare uno strato di vernice impregnante. Ma oltre al noce si può adottare il rovere, anch'esso resistente e consistente, il cui colore non sfigura con alcun arredamento. A seconda della consistenza del materiale scelto, si possono usare pannelli da 15+18 mm.

Compensato

Il legno stratificato rappresenta un ottimo compromesso tra i legni di scarto (truciolare ed MDF) e i pregiati masselli: il suo prezzo è una via di mezzo, quindi è molto tollerabile. È facile da lavorare, più degli altri legni, ma conserva un'ottima rigidità, almeno, a patto di scegliere uno spessore adatto (almeno 15 mm).

Dimensionare il box

Finora si è detto che nel realizzare una cassa acustica il parametro fondamentale da rispettare è il suo volume interno, calcolato con le formule viste nel Capitolo 3. Non bisogna, però, fraintendere: sebbene la forma possa essere scelta a piacimento (vi sono progettisti che studiano casse a piramide o a cubo) per tutta una serie di ragioni bisognerebbe, per quanto possibile, mantenere un rapporto base/altezza/profondità di 1/1,6/0,625. Almeno, se non si ha l'esperienza necessaria per comprendere gli effetti dei movimenti d'aria all'interno della cassa.

Il rapporto indicato non deve comunque essere inteso rigidamente; ad esempio, assegnando all'altezza il valore 1, base e profondità possono essere, rispettivamente, da 0,5 a 0,8 e da 0,4 a 0,6. Casse troppo profonde possono dar luogo a rimbombi e irregolarità nel funzionamento del woofer; lo stesso dicasi per quelle troppo larghe. Ciò vale se si deve progettare una cassa in cui il grosso del volume, dalla base al vertice, è riservato all'al-

toparlante dei toni bassi e comunque a un solo altoparlante; se, invece, nella cassa il volume deve essere ripartito equamente tra due trasduttori (ad esempio nelle casse a doppio woofer o con subwoofer e mid-woofer) i rapporti possono saltare, nel senso che le due “camere” possono essere disposte verticalmente o orizzontalmente, quindi il rapporto base/altezza può anche diventare $1/0,5+1/0,3$, ma anche $2/1+3/1$, a seconda delle esigenze estetiche.

Se si desidera lasciarsi andare a forme particolari, quali la piramidale, bisogna cercare di mantenere la parte più grossa nella predetta proporzione: ad esempio si può immaginare di chiudere il woofer nella zona bassa e di considerare sia questa la sua cassa; il volume interno può essere ottenuto dimensionando base, altezza e profondità secondo la solita proporzione, sia pure in linea di massima. In breve, si assume che se la larghezza vale 1 la profondità sia grosso modo 0,63; l'altezza può essere maggiorata, visto che la piramide si stringe salendo. La maggiorazione può essere condotta con sufficiente approssimazione, elevando il rapporto altezza/larghezza di base a 2 se l'altezza del volume interno viene considerata al livello in cui la larghezza della piramide raggiunge metà della base. Nella forma piramidale, oltre il livello considerato come altezza la cassa deve essere chiusa, nel senso che il volume del woofer deve essere delimitato dal vertice, nel quale potranno prendere posto gli altri altoparlanti.

Dunque, una volta ottenuto, dai calcoli, il volume interno della cassa, supposto che essa abbia forma di parallelepipedo, la geometria ci insegna come ricavare le lunghezze dei tre lati; imposti i rapporti tra altezza,

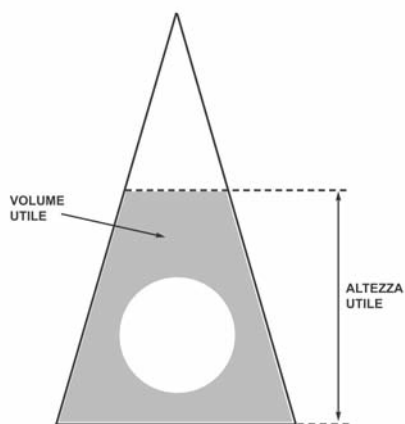


Figura 4.1

Se la cassa ha una forma decisamente diversa dal canonico parallelepipedo, il rapporto tra base, altezza e profondità va determinato immaginando di ricavare un parallelepipedo all'interno del box. Nel caso della piramide, conviene considerare parte del volume, limitandolo superiormente a un'altezza in cui la sezione abbia i lati grandi almeno $2/3$ di quelli della base.

larghezza, profondità, tali per cui il prodotto dell'altezza per la profondità dia il valore della larghezza o base, si ottiene la misura esatta di ciascun lato dalla seguente formula:

$$L = \sqrt[3]{V \times Q}$$

dove L è la misura del lato voluto, V il volume interno e Q è il rapporto tra il lato assunto a riferimento e quello voluto. Ad esempio, se si vuole ricavare la base, assegnata ad essa la misura unitaria, la formula diviene:

$$\text{base} = \sqrt[3]{V \times 1}.$$

La formula restituisce la misura in centimetri se il volume è espresso in centimetri cubi, oppure in decimetri se il volume è in dm³.

Si noti, inoltre, che non è necessario applicarla per ricavare tutti e tre i lati: basta ricavarne uno e poi gli altri derivano dal rapporto imposto.

Si può fare un esempio, avendo calcolato un volume interno di 50 litri (dm³); la larghezza interna della cassa misura:

$$\text{base} = \sqrt[3]{50} = 3,684 \text{ dm}$$

La base del box misura dunque 3,684 dm, ossia 36,84 centimetri. Per ricavare gli altri lati, ossia altezza e profondità, stabilito che l'altezza vale 1,6 volte la larghezza, si ottiene:

$$\text{altezza} = \text{base} \times 1,6 = 36,84 \text{ cm} \times 1,6 = 58,94 \text{ cm}$$

Poi, dato che la profondità si vuole sia 0,5 volte l'altezza, anche per essa il calcolo è semplice:

$$\text{profondità} = \text{base} \times 0,625 = 36,84 \times 0,625 = 23 \text{ cm}$$

Per continuare ad usare la formula suaccennata anche variando i rapporti fra i tre lati, bisogna fare in modo che il prodotto dell'altezza per la profondità dia sempre la misura della base, ovvero che la misura della profondità sia pari al rapporto tra base e altezza. Ciò perché dalla formula si ottiene il lato di un generico cubo che ha per volume quello della cassa e, dunque, per non alterare il volume rispetto a quello calcolato bisogna assumere che uno abbia misura unitaria e valga il prodotto degli altri due; quindi, se un lato misura 1 e un altro 0,5, vuol dire che il terzo deve misurare 2.

Resta inteso che, laddove si intenda costruire un diffusore a forma di cubo, visto che i tre lati sono uguali non serve che un calcolo; quindi, se si vuol costruire una cassa (ad esempio per un subwoofer) il cui volume interno sia 70 litri, la misura del lato si ottiene dalla relazione:

$$\text{lato} = \sqrt[3]{70} = 4,12 \text{ dm (41,2 cm)}$$

Nel determinare il volume interno della cassa, bisogna considerare l'ingombro di quanto, di rigido, va dentro: trascurando il volume dell'assorbente acustico, bisogna invece tenere da conto il volume sottratto dai filtri e dalle parti posteriori (quelle che sporgono all'interno della cassa) di ciascun altoparlante. Inoltre, se per mid-range e tweeter si decide di realizzare un vano apposta, lo spazio da esso occupato rientra nel computo di quello da aggiungere.

Ciò può essere chiarito con un esempio: se la cassa, per l'altoparlante dei toni bassi, richiede 50 litri ed il volume occupato al suo interno dal filtro e dai cestelli degli altoparlanti ammonta a 3 litri, la cassa va progettata per 53 litri, non per gli iniziali 50. Se poi è previsto un vano addizionale per racchiudere il retro del mid-range (perché è del tipo aperto...) o mid-range e tweeter ed il vano misura 5 litri, bisogna fare il dimensionamento per 55 litri più il volume occupato dal filtro. Tutto chiaro?!

Resta inteso che il volume sottratto dagli altoparlanti e dal filtro cross-over ha senso e va preso in considerazione in special modo per il dimensionamento delle casse piccole, quelle, cioè, la cui volumetria non supera i 35÷40 litri; per quelle più grandi è, di fatto, abbastanza irrilevante.

Curare l'isolamento

Le casse acustiche chiuse devono essere rivestite internamente con materiale fonoassorbente non molto denso (altrimenti toglie volume) il cui scopo è smorzare le onde acustiche prodotte dal retro dell'altoparlante ed impedire, quindi, che raggiungano le pareti e le facciano vibrare. Il rivestimento va fissato con della colla tipo mastice o della colla vinilica (ad esempio Vinavil): sono da evitare graffette, puntine e chiodi, perché possono staccarsi e finire negli altoparlanti, oppure possono determinare vibrazioni e quindi rumori udibili, seppur sommessamente, all'esterno. E di certo, i rumori non giovano alla fedeltà di una riproduzione...

Il materiale isolante può essere, a scelta:

- ❑ lana di vetro, spessa almeno 25 mm;

-
- ❑ lana di roccia, spessa 20÷25 mm;
 - ❑ ovatta da sartoria;
 - ❑ spugna sintetica, spessa almeno 25 mm;
 - ❑ panno poroso, spesso 10÷15 mm.

Oltre a quelli elencati, possono essere impiegati altri materiali, purché porosi e non rigidi: per esempio, non bisogna adoperare il polistirolo, né il polistirolo espanso, né la schiuma di poliuretano, che ruberebbero stabilmente volume all'interno della cassa.

Una nota importante riguarda il posizionamento: l'isolante va applicato a tutte le pareti (posteriore, laterali, superiore ed inferiore) ad eccezione di quella frontale, perché lì non serve. Da notare che l'isolamento delle pareti va fatto tanto nelle casse chiuse, quanto in quelle bass-reflex.

Oltre all'isolamento acustico, particolari realizzazioni richiedono anche quello tra esterno ed interno: sono le casse chiuse a sospensione pneumatica, ossia quelle progettate per ospitare altoparlanti molto morbidi, caratterizzati da elevato fattore di merito totale (Qts). Pur senza esagerare, le giunture dei pannelli componenti la cassa vanno sigillate con abbondante colla, oppure con silicone o mastice acrilico da edilizia, peraltro normalmente meno costoso del silicone. Tra la flangia di ogni altoparlante e la superficie di appoggio sul pannello frontale bisogna interporre una guarnizione in spugna (si può ricavare da un panno-spugna da cucina) gomma morbida o schiuma sintetica; la guarnizione può anche essere composta facendo aderire sul retro della flangia di montaggio, per tutta la misura della circonferenza, una di quelle strisce adesive usate come paraspifferi per porte e finestre.

Una volta chiusa la cassa, è possibile verificare che non ci siano grosse perdite, semplicemente premendo a fondo, con i due pollici e senza esage-



Figura 4.2

L'interno della cassa acustica va rivestito con lana di vetro o materiale fonoassorbente similare; dal rivestimento va escluso il solo pannello frontale.

rare (altrimenti si rischia di fare danno) la membrana del woofer, quindi togliendo le mani e verificando che risalga non bruscamente ma rallentata. La ricerca di perdite può essere condotta anche ascoltando se, quando si preme la membrana del woofer un po' rapidamente si sente uscire dell'aria da qualche giuntura.

Smorzare le vibrazioni

Il rivestimento isolante interno della cassa, normalmente riesce ad attenuare sufficientemente le onde sonore emesse dalla parte posteriore dell'altoparlante e ad evitare che esse raggiungano i pannelli; lo smorzamento non è però totale, e le pareti della cassa sono comunque sottoposte a un certo sforzo. Ecco perché, a seconda delle dimensioni degli altoparlanti usati, della frequenza di risonanza e della potenza dell'altoparlante dei bassi, occorre scegliere materiali di spessore adatto.

Lo spessore dipende anche e soprattutto dalla lunghezza dei lati dei pannelli: infatti, maggiore è la distanza tra le giunture, più rigido deve essere un pannello. Un po' come avviene per i ponti e per le travi, che, a parità di peso da reggere, più sono lunghi e più robusti (spessi) devono risultare.

Questo paragone con l'edilizia non è casuale, perché, analogamente a quanto viene fatto nei materiali da costruzione, anche nelle casse acustiche si adottano accorgimenti per ridurre lo spessore senza pregiudicare la rigidità e quindi, nel caso specifico, senza rischiare che i pannelli vibrino tanto da produrre suoni tali da disturbare l'ascolto del suono prodotto dagli altoparlanti.

Chi è un attento osservatore, avrà notato che i prefabbricati con cui vengono costruiti capannoni, ponti e coperture in cemento armato sono sagomati a forma di "T", ossia hanno una sorta di trave perpendicolare al piano orizzontale, che è più sottile del prefabbricato ma si sviluppa in altezza. Si tratta, in altre parole, di un rinforzo, che sfrutta la resistenza alla flessione sul lato lungo, e beneficia di una forte riduzione di peso, perché è stretto e profondo.



Figura 4.3

Incollare un listello su una parete della cassa acustica irrigidisce la struttura, mantenendola leggera.

Tornando alle casse acustiche, quando i pannelli sono piuttosto grandi in rapporto allo spessore del materiale da cui sono composti, per irrigidirne la struttura esistono due sole possibilità:

- ❑ ricorrere a legno di maggior spessore;
- ❑ irrigidire la struttura con listelli di rinforzo.

La prima opzione è certamente la più immediata, tuttavia aumentare lo spessore dei pannelli significa non solo spendere molti più soldi (se il legno è massello pregiato, la spesa incrementa in maniera consistente) ma anche e soprattutto aumentare dimensioni e peso delle casse. Rinforzare le pareti è invece meno costoso ed evita di appesantire troppo la realizzazione.

Per rinforzare i pannelli bisogna incollare e fissare al loro interno dei listelli di legno; i listelli vanno posizionati parallelamente al lato più lungo e possono essere, a seconda delle esigenze, uno o più. La posizione esatta dipende anche da dove si trovano gli altoparlanti; ad esempio, se il woofer è al centro della larghezza conviene incollare due listelli tangenziali ad esso.

Non esistono precise linee guida o formule per determinare quando servono i listelli di rinforzo e quando i pannelli resistono da soli alle vibrazioni; si possono comunque fare delle valutazioni di massima, senza stare a scomodare potenza della cassa, frequenza di risonanza ecc. In pratica, si può dire che per un determinato spessore del legno esistono delle misure

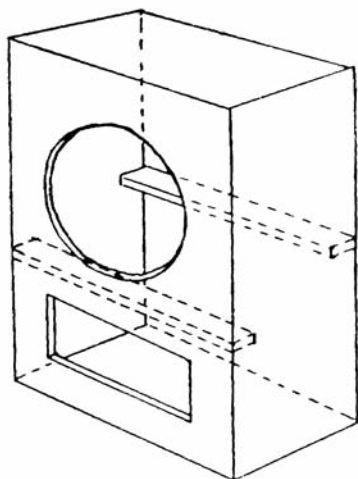


Figura 4.4

Incollandosi dei listelli di legno all'interno dei pannelli si riesce ad irrigidirli, anche se sono composti da legno che, per la superficie, è relativamente sottile. Il rinforzo è consigliato almeno sui pannelli frontale e posteriore.

critiche, superate le quali occorre provvedere al rinforzo o all'adozione di legno di maggior spessore. La misura, intesa come lato più lungo di ciascun pannello, oltre la quale il pannello stesso va rinforzato, è, spessore per spessore:

- ❑ 50 cm per pannelli spessi fino a 12 mm;
- ❑ 70 cm per pannelli spessi fino a 15 mm;
- ❑ 100 cm per pannelli spessi fino a 18 mm;
- ❑ 120 cm per pannelli spessi fino a 22 mm.

Il rinforzo va disposto parallelamente al lato che, in rapporto allo spessore, supera la misura limite; se entrambi i lati eccedono le misure consigliate, occorre applicare listelli perpendicolari tra loro, ma senza sovrapporli (in pratica uno andrà tagliato e riprenderà dopo l'altro).

I listelli longitudinali di rinforzo devono essere di abete piallato, rovere, noce o altro legno con un minimo di consistenza; il loro spessore, inteso come misura del lato perpendicolare a quello del pannello cui vengono applicati, deve essere almeno 5 mm più grande di quello del pannello stesso. Per il fissaggio si prediliga la colla vinilica (ad esempio Vinavil, Vinavil 59 o il Pattex Legno).

Resta inteso che, al di là delle considerazioni suddette, se la cassa tende a vibrare tanto che le vibrazioni si sentono insieme alla musica, i rinforzi vanno comunque adottati, indipendentemente dalle misure qui consigliate. Infatti, è stato precisato che tali misure sono indicative; nella realtà le condizioni che possono portare alle vibrazioni sono molte e, oltre che dalle caratteristiche elettrico-acustiche della cassa, dipendono da qualità e consistenza del legno usato per l'assemblaggio. Sempre allo scopo di irrigidire la struttura della cassa acustica, oltre che fissare dei listelli nel centro dei

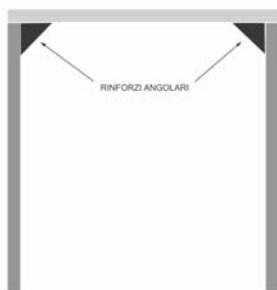


Figura 4.5

Per irrigidire la struttura della cassa può essere utile incollare dei profili a sezione triangolare (aventi un angolo retto) in corrispondenza degli spigoli interni.

pannelli è possibile ricorrere a dei rinforzi nelle giunture, ovvero negli spigoli interni; si tratta ancora di listelli, a sezione quadrata o triangolare (purché con un angolo di 90 gradi) da incollare dopo averli premuti contro almeno due dei pannelli costituenti uno spigolo interno. Il lato di ogni listello, visto in sezione, deve essere normalmente un centimetro più grande dello spessore dei pannelli usati per costruire la cassa; per i listelli angolari a sezione triangolare, quando si parla di lato si intende uno dei due più corti (il profilo è quello di un quadrato tagliato a metà lungo la diagonale, quindi c'è un lato più lungo degli altri due, che sono uguali tra loro).

Il pannello frontale

La parte della cassa acustica che merita più attenzione è certamente il pannello frontale, cioè quello sul quale sono fissati gli altoparlanti; se la cassa è di quelle particolari ed ha altoparlanti su più lati, il discorso si applica ai rispettivi pannelli.

La rilevanza è da attribuire all'interazione tra il suono emesso e il pannello, innanzitutto perché l'unità delle note basse vibra molto e le vibrazioni dal cestello possono trasmettersi al frontale della cassa; poi, perché il tweeter può arrivare a irradiare il proprio suono entro un angolo tanto vasto che le onde sonore possono rimbalzare sul frontale determinando riflessioni fuori fase che alterano l'ascolto. Per queste ed altre ragioni, il pannello che ospita gli altoparlanti deve essere curato al fine di:

- ☐ limitare la trasmissione delle vibrazioni che arrivano dal cestello del woofer;
- ☐ assorbire la riflessione delle note acute.

L'accoppiamento con il woofer

Per limitare la trasmissione delle vibrazioni in bassa frequenza dal woofer al pannello frontale, possono essere adottate diverse soluzioni, ognuna lasciata alle conoscenze ed all'iniziativa del progettista. La più semplice consiste nell'interporre tra la flangia del cestello e la superficie del pannello frontale una sorta di guarnizione di gomma ad anello (composta, ad esempio, dalle strisce in spugna o gomma per sigillare gli infissi) ovviamente di dimensioni adeguate e spessore non inferiore ad 1,5 mm; la guarnizione serve anche, nelle casse chiuse, a curare la tenuta d'aria.

Le viti di fissaggio possono essere isolate interponendo tra la loro testa e la parte frontale della flangia del woofer delle rondelle di gomma o plastica

morbida. Esistono poi altre soluzioni, una delle quali è stata analizzata nello studio del sistema bass-reflex CBR (Capitolo 3). Un'altra consiste nel rivestire l'intero pannello frontale, ovviamente anche la parte su cui appoggia la flangia del woofer, di gomma tipo neoprene o comunque di gomma sintetica di media densità: ciò permette di assorbire le vibrazioni propagate dal cestello dell'altoparlante, dall'intero pannello.

L'isolamento meccanico basta sia fatto per il woofer: mid-range e tweeter non ne hanno bisogno, perché vibrano pochissimo.

Assorbire le riflessioni

Le unità per le note acute (tweeter) soprattutto quelle ad elevato angolo di irradiazione del suono (tipicamente le cupole) tendono a propagare le onde sonore contro la superficie adiacente del pannello su cui sono montate; il legno tende a riflettere il suono verso l'ascoltatore, che viene così raggiunto dalla somma del suono vero e proprio emesso dal trasduttore (primario) e di quello riflesso. Dato che quest'ultimo non è in fase con le onde sonore primarie, l'ascolto viene "sporcato" e la qualità sonora risulta degradata.

Per ovviare all'inconveniente, che si verifica tipicamente quando il pannello è molto più largo del tweeter, bisogna rivestire il pannello frontale (il tweeter si trova sempre sul pannello rivolto all'ascoltatore) con del materiale, spesso almeno 1,5 mm, capace di assorbire il suono: moquette, gomma sintetica, sughero, sono i materiali prediletti. Comunque, si può utilizzare dell'altro, a patto di scegliere materiale poroso (ad esempio il feltro).

Sono quindi da evitare le plastiche, l'impiallacciatura di formica e il legno nudo; a meno di non essere certi (lo si vede dal diagramma polare che, nelle specifiche del tweeter, indica l'angolo di irradiazione del suono) che il tweeter irradi solo frontalmente. Ad esempio, se si adotta un altoparlante a



Figura 4.6

Per garantire una discreta tenuta d'aria, nelle casse a sospensione pneumatica si usa interporre tra la flangia dell'altoparlante e il pannello frontale una guarnizione.

tromba il problema non si pone, perché la tromba ha un angolo di emissione relativamente stretto, tanto che il suono non andrà mai a riflettersi sul pannello frontale.

Disposizione degli altoparlanti

Quando si realizza una cassa acustica, non vi sono particolari preferenze per quel che riguarda la disposizione dei trasduttori; spesso si segue più il gusto, l'estetica, che la funzionalità, anche perché la disposizione ottimale non è universale ma deve tenere conto della forma e delle dimensioni delle casse.

La disposizione più neutrale ed usuale è quella che vede i due, tre o più altoparlanti in linea, uno sopra l'altro, distanziati tra loro il meno possibile allo scopo di avvicinare l'origine del suono di ciascuno.

Se si sta costruendo una cassa da disporre a terra, il woofer va tenuto il più lontano possibile dal pavimento: altrimenti i bassi rimbalzano in terra e l'ascolto che ne deriva viene alterato. Quindi conviene realizzare il foro per il woofer il più in alto possibile, compatibilmente con le dimensioni degli altri altoparlanti.

Per i diffusori destinati ad essere inseriti su uno scaffale, il problema del posizionamento del woofer non si pone, perché non c'è riflessione.

Il tweeter deve stare normalmente lontano dai bordi della cassa, altrimenti le note acute possono venire riflesse dall'intelaiatura delle griglie parapolvere, ma anche dagli oggetti vicini posti sullo stesso mobile o dalle pareti; anche in questo caso ne deriva un ascolto affetto da un suono secondario fuori fase rispetto all'originale.

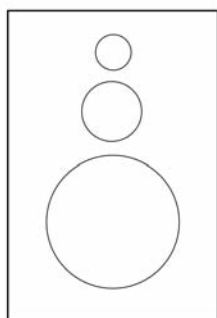
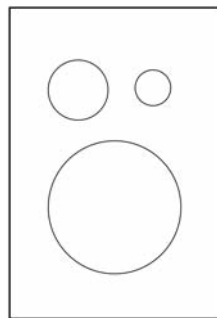


Figura 4.7
Disposizioni degli altoparlanti sul pannello frontale: a sinistra quella in linea verticale e a destra quella a triangolo.



Il discorso sul tweeter trova ragion d'essere in special modo quando si sceglie di disporre gli altoparlanti disassati, non in linea. Quest'ultima soluzione (adatta ovviamente per diffusori a tre vie) viene scelta da alcuni progettisti più per ragioni estetiche che per altro; un esempio è collocare gli altoparlanti a triangolo rovesciato, con in basso, sul vertice, il woofer, e sopra, agli angoli opposti, mid-range e tweeter. Se tweeter e midrange sono molto vicini tra loro e al woofer, tale disposizione permette di concentrare le origini dei suoni in una zona più ristretta di quella ottenibile con la canonica disposizione verticale in linea.

Nelle casse bass-reflex a due vie, al posto del mid-range si usa collocare l'uscita del suono riflesso dall'interno, ovvero la bocca del tubo d'accordo.

Allineare le origini dei suoni

Una particolare disposizione degli altoparlanti fu messa a punto dalla Sony parecchi anni fa: riguardava la disposizione non sulla disposizione in altezza e in larghezza, ma quella in profondità. In pratica consisteva nell'allineare i punti più interni dei singoli altoparlanti, così da porre in linea l'origine del suono di ciascun trasduttore con quelle degli altri (Figura 4.8).

Il punto più interno di un altoparlante può essere:

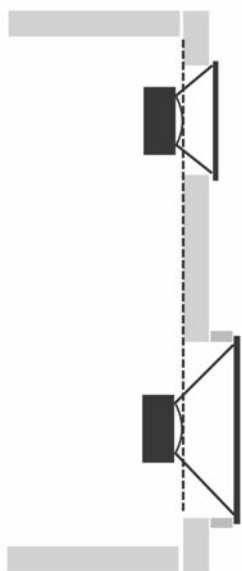


Figura 4.8

La disposizione in linea dei vertici dei singoli altoparlanti fu introdotta oltre vent'anni fa dalla Sony; permette di ottenere una più uniforme ricostruzione del suono riprodotto. Consiste nel disporre gli altoparlanti in modo che il punto più profondo di ciascuno sia in linea con quello degli altri.

- ❑ il cerchio o la cupolina parapolvere, nel caso di altoparlanti a cono;
- ❑ il vertice della cupola, nel caso di trasduttori a cupola.
- ❑ la stessa membrana, se l'altoparlante è del tipo piatto.

Per allineare i punti di origine del suono dei singoli altoparlanti bisogna far avanzare quelli più grandi; ciò può essere realizzato interponendo degli anelli da tra le flange di quelli più grandi e la superficie del pannello frontale. Gli anelli distanziali vanno scelti dello spessore adatto a portare la parte più interna della membrana di ciascun altoparlante in linea con quella degli altri. Resta inteso che da entrambi i lati della cassa conviene interporre le solite guarnizioni per la tenuta d'aria (se la cassa è a sospensione pneumatica) e per ridurre la trasmissione delle vibrazioni dal cestello al pannello frontale.

All'interno e all'esterno

A seconda del proprio gusto e degli utensili a disposizione, chi vuole costruire una cassa acustica può montare gli altoparlanti con la flangia all'esterno o all'interno: nel primo caso l'altoparlante si introduce dall'esterno, appoggiando al frontale la parte posteriore della flangia di fissaggio. Nel secondo si appoggia la flangia all'interno del pannello frontale, in corrispondenza del foro riservato all'altoparlante, quindi si fissa il cestello con viti avvitate dall'interno.

Solitamente si preferisce il montaggio dall'esterno perché presenta numerosi vantaggi: innanzitutto risparmia il lavoro di finitura del foro, che,

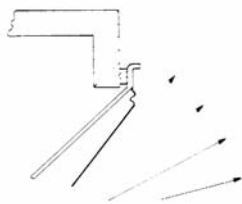
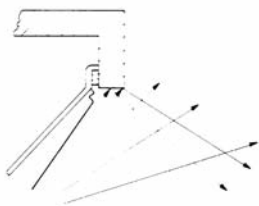


Figura 4.9

Se si monta l'altoparlante con la flangia fissata dall'interno del pannello frontale (figura in alto) accade che il suono emesso dal bordo della membrana viene parzialmente riflesso dal bordo del foro; ciò sovrappone al suono onde sonore fuori fase, alterando l'ascolto. Per questo è preferibile montare gli altoparlanti con la flangia appoggiata all'esterno del pannello frontale (illustrazione in basso).

essendo coperto dalla flangia dell'altoparlante, non è visibile; poi, il suono emesso dalla parte frontale della membrana esce liberamente e senza riflettere su alcuna parte della cassa. Montando l'altoparlante all'interno, innanzitutto si è costretti a rifinire con cura (magari adottando appositi anelli di bordatura, plastici o metallici) il foro di montaggio, dato che resta a vista; poi, le onde sonore emesse dal bordo della membrana dell'altoparlante urtano contro il bordo del foro e da esso vengono riflesse, andando ad alterare, seppure in piccola parte, il suono e quindi l'ascolto della musica.

Tweeter angolare

Qualche costruttore, in particolar modo Bose, ha sperimentato una particolare disposizione del tweeter, pensata considerando che spesso (per ingombrare il meno possibile) le casse acustiche si collocano in prossimità degli angoli delle stanze dove le si ascolta: si tratta di porre il solo tweeter su uno spigolo, ossia su quello che, nel normale montaggio della cassa, andrà rivolto a una parete del locale. Chiaramente per un montaggio del genere la cassa deve avere uno spigolo smussato, nel quale infilare il tweeter. Inoltre, in una coppia i diffusori devono essere speculari, nel senso che uno deve avere il tweeter a sinistra e l'altro lo deve avere a destra. L'accorgimento introdotto da Bose nelle leggendarie 301 (casse da scaffale o a piedistallo) permette di dirigere il tweeter verso la parete a lato della cassa, così da avere una disposizione spaziale degli acuti, giacché essi vengono riflessi dalle pareti e sembrano arrivare da una parte diversa da quella dalla quale provengono le altre note. Insomma, un modo per avvicinarsi a una riproduzione dal vivo, oggi emulabile con i sistemi Dolby Surround.



Figura 4.10

Il tweeter può essere montato su uno spigolo, opportunamente smussato, della cassa acustica. La foto mostra la soluzione adottata dalla Bose nei suoi storici diffusori 301.

Tipi di assemblaggio

Le casse acustiche, come tutte le strutture solide, sono assemblate mettendo insieme almeno sei pannelli. Ognuno può scegliere il tipo di incastro che preferisce, a seconda delle attrezzature di cui dispone, delle proprie abitudini, del tipo di rivestimento da dare all'esterno, della robustezza alle sollecitazioni che si attende. Almeno per le casse di forma cubica o parallelepipedica, gli incastri possono essere:

- ☐ con giunture tagliate a 45°;
- ☐ con giunture dritte accostate;
- ☐ con giunture a scalino.

Nel primo caso bisogna tagliare a 45°, lungo lo spessore, le pareti della cassa; in tal modo l'assemblaggio risulterà pulito e non presenterà alcun lato grezzo. In altre parole, le giunture saranno praticamente invisibili. Questo tipo di assemblaggio è l'ideale quando si debbano realizzare casse in legno massello, che non vanno rivestite ma semplicemente verniciate con impregnante, flatting o vetrificatore da parquet; insomma, quelle con legno e giunti a vista.

Il consiglio è tagliare a 45° le giunture dei soli lati della cassa; frontale e fondo possono essere lasciati con i bordi a 90°, normali, perché lì si può infilare a filo dei lati una volta assemblato il resto della cassa. L'incastro a 45° si può realizzare se si dispone di un seghetto da legno con base orientabile,

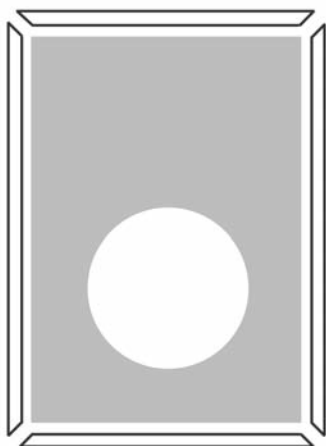


Figura 4.11

L'incastro con giunture a 45 gradi prevede che i pannelli siano tagliati a 45° lungo lo spessore; in tal modo, accostandoli si ottengono angoli perfettamente retti e la giuntura diviene praticamente invisibile.

che permetta di fissare il pannello di legno e ruotare la sola lama, appunto di 45°. Per l'assemblaggio dei lati bisogna avere dei morsetti da falegname, con i quali stringere (curandosi, con una squadra, di aver formato angoli perfettamente retti...) i pannelli dopo aver spalmato sulle giunture della colla vinilica o equivalente.

Un piccolo trucco che permette di garantire un assemblaggio in squadra consiste nell'introdurre il frontale e il fondo, anche senza incollarli subito, tra i lati; in tal modo i lati seguono la forma di frontale e fondo.

Trascorse tre o quattro ore si possono rimuovere i morsetti e si può pensare a incollare frontale e fondo; questi ultimi possono essere meglio posizionati fissando all'interno dei lati dei listelli in funzione di guide.

Quanto all'incastro a giuntura dritta accostata, è il più semplice: si realizza appoggiando e incollando i pannelli accostando il bordo di uno alla superficie laterale dell'altro. Non è adatto a casse di legno massello e comunque quando non si prevede alcun rivestimento, perché le giunture sono vistose e brutte da vedere.

L'ultimo tipo di incastro è quello con bordo a scalino (Figura 4.12); per realizzarlo occorre lavorare le estremità dei pannelli con una fresa da legno, in modo da ridurre lo spessore per circa un centimetro, così da ottenere, in sezione, uno scalino. In tal modo l'incastro si realizza inserendo un pannello nell'altro, dopo aver spalmato la colla vinilica nelle giunte. La struttura che si ottiene è sufficientemente robusta, e all'occhio appare accettabile, sebbene le giunture si vedano, eccome.

Le griglie parapolvere

Normalmente per proteggere gli altoparlanti dall'accumulo di polvere si usa porre davanti al pannello frontale delle griglie, fisse o, più frequentemente, removibili. Le griglie sono quasi sempre costituite da un telaio di legno, una cornice come quella di un quadro, sopra la quale, come in un quadro, si

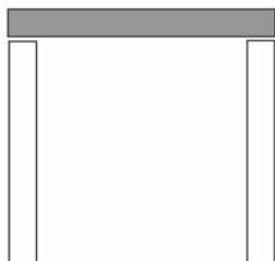


Figura 4.12
*Incastro semplice a
giuntura dritta (a
sinistra) e con bordo a
scalino (a destra).*



fissa una speciale tela elastica per diffusori acustici. Le griglie possono essere facilmente autocostruite, grazie alla reperibilità, nei negozi specializzati, sia della tela che degli appositi agganci ad incastro. Questi ultimi sono dei tasselli in materiale plastico da introdurre in boccole ad essi adatti. I tasselli sono progettati in modo da non produrre rumore anche quando le casse funzionano a pieno regime e, inevitabilmente, il pannello frontale un po' vibra. Per questo motivo è raccomandabile fissare le griglie parapolvere con tali agganci o con altri che, però devono essere fatti di materiale plastico, possibilmente non troppo rigido. Vanno evitate soluzioni che prevedono calamite e fissaggi metallici.

Costruire le griglie

Il telaio della griglia parapolvere può essere costruito incollando in squadra quattro listelli in legno, a sezione quadrata di 10x10 o 15x15 mm, utilizzando la giuntura più semplice: quella accostata. In corrispondenza di ciascun angolo bisogna incollare un triangolo o un quadrato, di legno anch'esso, il quale servirà sia da rinforzo, sia, opportunamente forato, da supporto per i tasselli di fissaggio alla cassa. Più esattamente, in corrispondenza di ogni rinforzo si dovrà infilare la coda di un tassello, da incollare con mastice (Bostik, Pattex e simili). Completato il telaio, bisogna appoggiarlo su una pezza di tela per casse acustiche e tagliare la tela in modo che ciascun lato sia almeno tre centimetri più lungo del corrispondente della tela. Fatto ciò, si piega, tendendola giusto quel che serve a farla aderire bene agli spigoli, la tela, fissandola poi con una graffatrice al retro del telaio. Così facendo, una volta montata la griglia i punti non saranno visibili dall'esterno. La tela esiste solitamente in tre

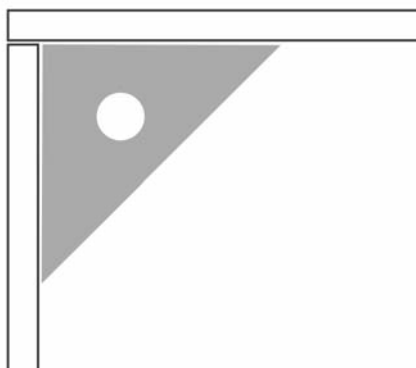


Figura 4.13

Il telaio della griglia parapolvere può essere costruito incollando in squadra quattro listelli in legno, collocando poi un triangolo di legno anch'esso, in corrispondenza di ciascuno degli angoli. Oltre che da rinforzo, ogni triangolo, opportunamente forato, farà da supporto per i tasselli di fissaggio alla cassa.

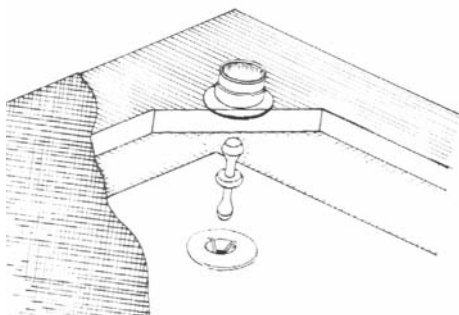


Figura 4.14

Le griglie parapolvere possono essere fissate mediante appositi tasselli ancorati sul rinforzo di ciascun angolo.

colori: grigio, marrone e nero; ognuno può scegliere quello che meglio si intona con il rivestimento dei lati della cassa.

Per agganciare la griglia alla cassa bisogna effettuare sul pannello frontale tanti fori quanti sono i tasselli: ogni foro andrà fatto con una punta di diametro pari a quello delle boccole e di profondità uguale alla loro lunghezza o di un millimetro inferiore; forato il frontale, sarà sufficiente incastrare le boccole, eventualmente spalmando della colla al loro esterno per migliorare il fissaggio. Nel caso si renda necessaria la colla, prima di inserire le griglie sarà necessario attendere il tempo richiesto per la completa presa della colla usata. I fori devono essere posizionati esattamente in corrispondenza dei tasselli; per non sbagliare, conviene prendere la misura quando si forano i rinforzi angolari dei telai delle griglie: in pratica, prima si realizzano i fori in cui disporre i tasselli, quindi, sovrapposta la griglia alla rispettiva cassa, con una punta si realizzano i fori guida che serviranno a realizzare quelli in cui inserire le boccole. Fatto ciò si procede con la lavorazione dei telai ed il rivestimento con l'apposita tela.

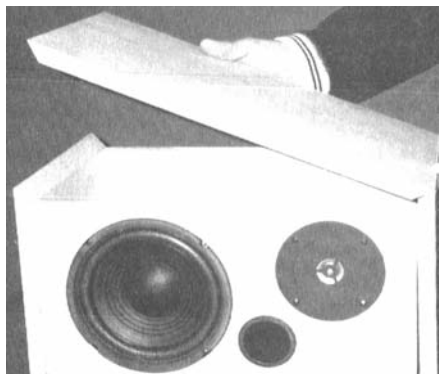


Figura 4.15

Una cassa acustica realizzata incastrando i pannelli con le giunture tagliate a 45°: il frontale ha gli spigoli a 90° e viene fissato all'interno dei quattro lati. Lo stesso vale per il fondo.

La connessione elettrica

Gli altoparlanti contenuti in una cassa acustica devono essere collegati elettricamente con l'esterno, mediante un connettore che permetta di rendere agevole la connessione all'uscita dell'amplificatore di potenza. Non è conveniente far uscire direttamente un cavetto perché non si sa mai quale lunghezza debba avere; e poi non sarebbe che d'intralcio, specie dovendo spostare la cassa.

I fili in arrivo dall'interno bisogna saldarli ciascuno su un morsetto del connettore previsto. A riguardo va detto che in commercio si trovano diverse soluzioni:

- ☐ connettori XLR, usati però soprattutto nei diffusori professionali e per pubbliche esecuzioni;
- ☐ attacchi a pressione;
- ☐ attacchi con boccole a vite.

I più economici sono certamente gli attacchi a pressione, reperibili in diverse esecuzioni, sia esterni che a vaschetta; questi ultimi vanno inseriti nel retro della cassa, dopo averla opportunamente forata e sono molto pratici perché non fanno spessore. A vaschetta sono spesso realizzati anche gli attacchi con boccole a vite, più pregiati perché le boccole sono quasi sempre placcate con oro 24 k, per evitarne l'ossidazione e ottenere una migliore conducibilità. Se si sta lavorando su una cassa chiusa o a sospensione pneumatica, qualunque sia il tipo di attacco scelto, bisogna ricordare che i fori realizzati per portare i fili sul retro del diffusore o per fissare l'attacco stesso devono essere sigillati; basta del silicone oppure, se il connettore ha una flangia abbastanza grande, un'apposita guarnizione da interporre tra il pannello posteriore della cassa e la flangia stessa.

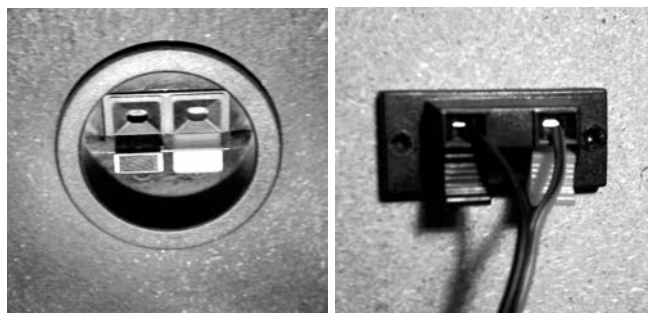


Figura 4.16
Connessioni per casse acustiche, del tipo a vaschetta per incasso (sinistra) ed esterno (destra).

I filtri cross-over

È giunto il momento di passare alle problematiche elettriche riguardanti la realizzazione delle casse acustiche a due o più vie. Sappiamo già che non conviene collegare l'uscita dell'amplificatore direttamente agli altoparlanti, innanzitutto perché è preferibile che ciascuno riceva solo i suoni compresi nello spettro di audiofrequenze che è capace di riprodurre correttamente, e poi perché pilotare più altoparlanti con una sola uscita significherebbe collegarli tutti in parallelo su di essa, con il risultato di sovraccaricare l'amplificatore di potenza.

Ecco perché nelle casse acustiche viene inserito un particolare filtro, detto cross-over, composto da tante sezioni quanti sono gli altoparlanti del diffusore; ciascuna sezione del filtro è composta da celle passive (ossia realizzate solo con componenti passivi) che, a seconda delle necessità progettuali e del "budget", possono essere del primo, del secondo o del terzo ordine. Il cross-over è un circuito che determina dove avviene l'incrocio tra le curve di risposta degli altoparlanti componenti una cassa acustica; per fare un esempio, se un cross-over di un diffusore a due vie ha come frequenza di incrocio (l'unica, in questo caso) 4.000 Hz, significa che la curva di risposta dell'altoparlante dei toni bassi incrocia quella dell'unità dei toni alti a 4.000 Hz. La frequenza di incrocio non va confusa con quella di taglio dei singoli elementi, perché potrebbe coincidere solamente nei filtri ideali, nei modelli teorici; nella pratica, come scoprirete leggendo i prossimi paragrafi,

i singoli filtri componenti un cross-over non hanno un comportamento particolarmente deciso ed il passaggio dalle frequenze da lasciare inalterate a quelle da attenuare è tutt'altro che netto e definito.

Che cos'è un filtro

Prima di arrivare a comprendere il funzionamento di un filtro cross-over è opportuno richiamare alcuni concetti dell'elettronica riguardanti la teoria dei filtri passivi; diciamo subito che si chiama filtro un quadripolo (ossia una rete elettrica avente due morsetti di entrata e due di uscita) la cui funzione di trasferimento (relazione esistente tra la grandezza in entrata e quella in uscita) dipende dalla frequenza.

Sostanzialmente, un filtro è un circuito la cui tensione di uscita è pari a quella di ingresso soltanto in un certo intervallo di frequenze, al di fuori del quale diminuisce secondo una costante. In teoria, il filtro presenta un rapporto, fra le tensioni d'ingresso e d'uscita, pari ad 1 fino ad un valore di frequenza detto *frequenza di taglio* (ft) e attenua costantemente oltre tale valore. In base a come si comporta nei riguardi delle variazioni di frequenza, il filtro può essere:

- passa basso, se presenta attenuazione nulla da zero Hz fino alla frequenza di taglio ed attenua per valori maggiori di essa;
- passa alto, se presenta attenuazione decrescente da zero Hz fino alla frequenza di taglio ed al di sopra di essa lascia il segnale uscire con la stessa ampiezza che presenta all'ingresso;

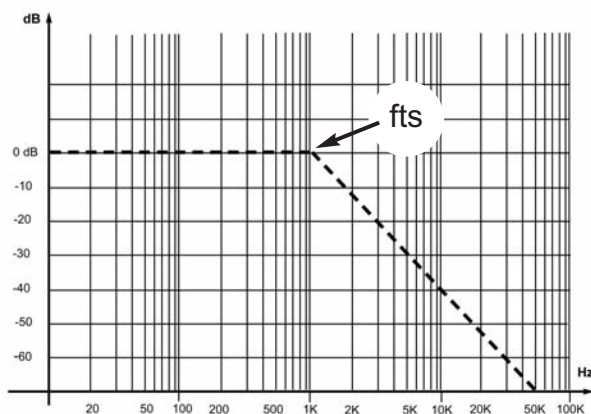


Figura 5.1
Tipica curva di risposta in frequenza di un filtro passa-basso; il punto fts corrisponde alla frequenza oltre la quale il circuito attenua il segnale.

❑ passa banda, se lascia inalterato il segnale solo entro un certo intervallo di frequenze, mentre lo attenua al disotto e al disopra di determinate frequenze.

Per il filtro passa basso la frequenza di taglio è detta *frequenza di taglio superiore*, mentre per il passa-alto è detta *frequenza di taglio inferiore*. Il filtro passa-banda è, invece, un po' particolare, perché ha entrambe le frequenze di taglio; lascia inalterato il segnale solo se ha frequenza maggiore di quella di taglio inferiore e minore di quella di taglio superiore.

Si può tranquillamente dire che il filtro passa banda è l'insieme di un passa basso e di un passa alto, collegati in cascata (uno dopo l'altro).

Comportamento nei riguardi della frequenza a parte, i filtri non sono tutti uguali, nel senso che si possono realizzare numerose configurazioni, ciascuna delle quali verrà descritta più in là, in questo stesso capitolo.

E (delusione...) non funzionano esattamente come in teoria: nella pratica la curva di risposta non è caratterizzata da una porzione di frequenze non attenuate e da una attenuata costantemente. Un filtro passa basso non attenua solo la tensione continua (frequenza di 0 Hz) mentre in prossimità della frequenza di taglio superiore attenua sempre più, fino ad arrivare a -3 dB (tensione uscente dal filtro pari a 0,707 volte quella entrante) proprio in corrispondenza della stessa frequenza di taglio; le frequenze superiori le attenua, poi, progressivamente, di 6 dB per ottava, ossia 20 dB/decade. Per il filtro passa alto il discorso è il contrario: partendo dalla corrente continua e salendo di frequenza, fino in prossimità della frequenza di taglio inferiore

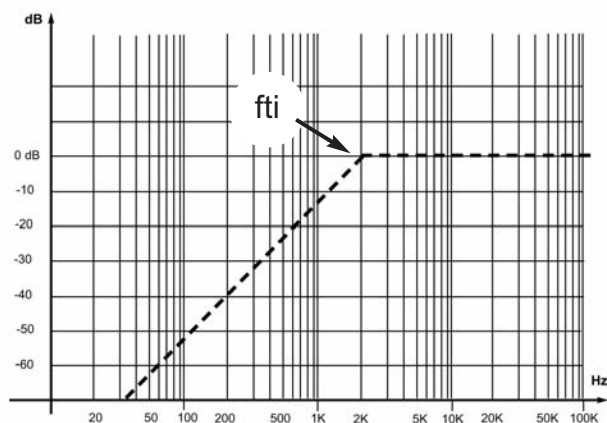


Figura 5.2
Tipica curva di risposta in frequenza di un filtro alto; il punto fti corrisponde alla frequenza sotto la quale il circuito attenua il segnale.

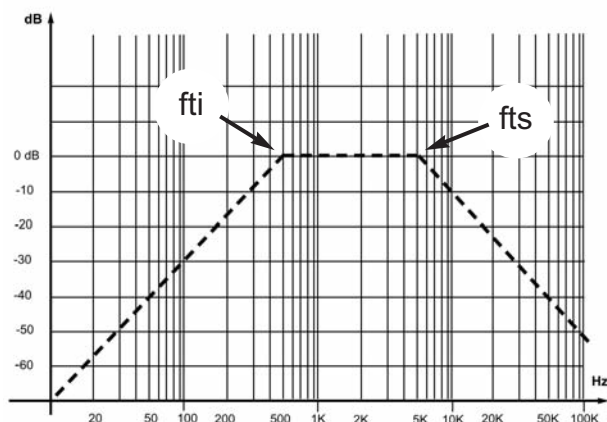


Figura 5.3
Curva di risposta in funzione della frequenza di un filtro passa-banda: il circuito attenua progressivamente tutti i segnali aventi frequenza minore della fti e maggiore della fts.

il segnale di uscita cresce da nulla a -3 dB, ossia 0,707 volte quello di ingresso; in corrispondenza della predetta frequenza di taglio l'attenuazione è esattamente 3 dB. Oltre la frequenza di taglio, il livello del segnale di uscita si approssima a quello di ingresso.

Misurare le attenuazioni: il dB

Bene, visto che abbiamo introdotto concetti nuovi e nuovi termini, bisogna spiegare il significato di dB, ottava, decade. dB è il simbolo del decibel, l'unità di misura con la quale vengono convenzionalmente espressi i livelli dei segnali elettrici, delle attenuazioni o amplificazioni, ma anche la pressione sonora esercitata da una vibrazione dell'aria. Il decibel è un'unità di misura logaritmica, nel senso che dipende dal logaritmo decimale della grandezza che si vuole esprimere. Più precisamente, una grandezza in dB è pari a:

$$G \text{ (dB)} = 20 \text{ Log } G.$$

Solitamente in dB vengono espressi i rapporti tra due grandezze: ad esempio le funzioni di trasferimento dei quadripoli, definite come rapporto V_u/V_i (tensione d'uscita diviso tensione di ingresso). Ecco quindi che la relazione suesposta diviene, genericamente:

$$G \text{ (dB)} = 20 \text{ Log } V_u/V_i.$$

È questa la formula che interessa maggiormente lo studio degli amplificatori e, nel nostro caso, dei filtri cross-over. Per fare un esempio, si può vede-

re come esprimere in dB il guadagno di un amplificatore audio che eleva di 100 volte il segnale ricevuto in ingresso; la sua funzione di trasferimento vale:

$$f_{dt} = 100/1 = 100.$$

Il logaritmo in base 10 di tale rapporto vale esattamente 2, poiché, lo ricorda la matematica, il logaritmo è l'esponente dell'elevamento a potenza da dare al numero detto *base* per ottenere l'*argomento*, ossia il valore finale. Per esempio, 10 elevato alla 3^a dà 1.000; 10 è la base (numero da elevare a potenza) 3 è l'esponente (ossia quante volte bisogna moltiplicare la base per se stessa al fine di ottenere il valore dell'elevamento) e 1.000 è l'argomento, ossia il valore ottenuto dall'elevamento a potenza.

Si ricorda che in matematica vengono usati due logaritmi, che si distinguono solo per il valore della base:

naturale (la base è il cosiddetto *numero di Nepero*, che vale 2,712723); si esprime con **ln**;

decimale (la base è 10); si esprime con **Log**.

Per il calcolo in decibel si usa la sola base 10.

Torniamo dunque alla nostra f_{dt} ed esprimiamola in dB:

$$f_{dt} \text{ (dB)} = 20 \text{ Log } f_{dt} = 20 \text{ Log } 100 = 20 \times 2 = 40 \text{ dB}.$$

Volendo fare un altro calcolo, si può ipotizzare di esprimere in dB un rapporto pari a 10; essendo 1 il logaritmo decimale di 10 (10 elevato alla 1 dà esattamente 10...) si può scrivere:

$$f_{dt} \text{ (dB)} = 20 \text{ Log } 10 = 20 \times 1 = 20 \text{ dB}.$$

Senza scomodare troppi calcoli ed evitando di cercare dimostrazioni nella matematica, si può affermare che esiste una precisa relazione tra dB e potenze di dieci, sia positive che negative: più esattamente, moltiplicare per 10 (10^1) corrisponde a sommare 20 dB, mentre dividere per dieci (10^{-1}) equivale a sottrarre 20 dB. Per esempio, se ad un amplificatore che guadagna 10 volte (20 dB) se ne collega in cascata uno che guadagna 100 (40 dB) il segnale viene l'amplificazione complessiva del segnale è $20+40=60$ dB. Analogamente, se un filtro attenua di 10 volte (-20 dB) un segnale amplificato di 40 dB, il risultato è pari a $40-20=20$ dB; la catena amplifica di 10 volte soltanto.

Per quel che riguarda le tensioni, è stato assunto come convenzione che il livello di 0 dB corrisponde alla differenza di potenziale che, applicata agli estremi di una resistenza elettrica da 600 ohm, determina lo sviluppo di una potenza di 1 mW. Vale la relazione $0\text{ dB}=1\text{mW}/600\text{ ohm}$.

Siccome per far dissipare 1 mW a un carico di 600 ohm occorrono 0,775 V, la convenzione assume che 0 dB corrispondono a 0,775 V. Dunque, per esprimere una tensione in dB occorre fare riferimento allo 0 dB. Ad esempio, una tensione di 20 dB corrisponde a 10 volte il riferimento di 0 dB, quindi a 7,75 V; 40 dB equivalgono a 100 volte il riferimento, ossia 77,5 V. Analogamente si può dire per le attenuazioni: -20 dB significano una tensione pari a 1/10 di quella corrispondente allo 0dB, ossia 77,5 millivolt.

Per conoscere il valore esatto di una grandezza espressa in dB, occorre utilizzare la solita formula, ma sviluppata per estrarre l'argomento:

$$f_{\text{dB}} = 10^{\text{dB}/20}$$

In altre parole, si divide il valore in dB per 20 e lo si dà come esponente a 10; se preferite, si eleva 10 alla potenza risultante dal rapporto tra la grandezza in dB e 20. Si può subito fare un esempio chiarificatore, immaginando di voler conoscere a cosa corrisponde un'amplificazione di 80 dB:

$$f_{\text{dB}} = 10^{80/20} = 10^4 = 10.000$$

Dunque, un amplificatore che guadagna 80 dB amplifica di 10.000 volte il segnale di ingresso.

Ancora un esempio: si calcoli a quanto corrisponde un'amplificazione di 25 dB; dalla solita formula si ricava:

$$f_{\text{dB}} = 10^{25/20} = 10^{1,25} = 17,78$$

Quanto alle tensioni espresse in dB, il procedimento è analogo: si tratta semplicemente di ricavare il valore partendo dai decibel e moltiplicarlo per quello che corrisponde allo 0 dB. Per esempio, vediamo a cosa corrisponde una tensione di 30 dB:

$$V = 10^{V(\text{dB})/20} = 10^{30/20} = 10^{1,5} = 31,62$$

Siccome 30 dB sono 31,62 volte lo 0 dB, la relativa tensione ammonta a:

$$V = 0,775\text{ V} \times 31,62 = 24,5\text{ V}.$$

Risposta in frequenza: ottava e decade

Per convenzione, i diagrammi che esprimono il comportamento di un quadripolo e, dunque, di un filtro, al variare della frequenza della tensione inviata, hanno l'asse orizzontale logaritmico; tale rappresentazione prende il nome di *diagramma di Bode*.

Indipendentemente dalla forma scelta, lineare o logaritmica che sia, per rappresentare l'attenuazione di un filtro, supposto che sia lineare nei riguardi della frequenza, si usano due parametri:

- ☐ l'ottava, cioè la distanza tra un valore di frequenza e il suo doppio;
- ☐ la decade, ossia la distanza tra un valore di frequenza ed uno pari a dieci volte tanto.

Appurato che le attenuazioni sono definite in dB, la pendenza di un filtro, intendendo con pendenza la crescita o la riduzione dell'ampiezza del segnale di uscita per valori crescenti o decrescenti della frequenza, si definisce in dB/ottava o in dB/decade. Usualmente, nelle caratteristiche dei filtri cross-over si trova l'attenuazione fuori banda espressa in dB/ottava (dB/oct).

Appurato che una decade contiene cinque ottave, senza scomodare calcoli logaritmici si può dire che per passare da pendenza espressa in dB/decade ad una in dB/ottava bisogna dividere per 3,33 periodico; all'inverso, per convertire un'attenuazione espressa in dB/ottava in una in dB/decade occorre moltiplicare per il predetto fattore 3,33 periodico.

In altre parole, 20 dB/decade sono 6 dB/ottava, 40 dB/decade corrispondono a 12 dB/ottava ecc. Se preferite, ogni incremento di 20 dB a decade corrisponde a sommare 6 dB/ottava.

I componenti dei filtri

Le celle filtranti passive sono realizzate secondo diverse strutture, ma sono tutte accomunate da una caratteristica: impiegano esclusivamente elementi passivi, ossia resistenze, condensatori e induttanze; questi componenti hanno ciascuno determinate proprietà, che vengono descritte, in linea di massima, nei prossimi paragrafi.

Resistenza

Come dice la parola, oppone resistenza al passaggio della corrente elettrica; si misura in ohm (è di 1 ohm la resistenza che percorsa da 1 A di cor-

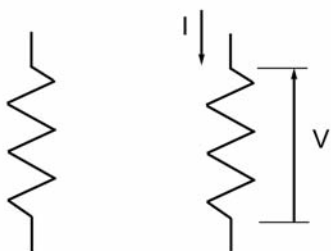


Figura 5.4

Simbolo grafico (a sinistra) della resistenza. Il componente (destra) si oppone al passaggio della corrente elettrica I , determinando ai propri capi una caduta di tensione pari al prodotto $I \times R$ (R è il valore della resistenza elettrica).

rente fa cadere tra i propri estremi 1 volt di tensione) e nei cross-over serve quando occorre limitare la potenza di un altoparlante indipendentemente dalla frequenza del segnale. L'interposizione di una resistenza può servire, ad esempio, quando un altoparlante si "sente troppo" e deve perciò lavorare a potenza ridotta, ma anche per alterare la curva di risposta di un filtro: per esempio quando l'attenuazione di una cella passa basso non deve spingersi fino ad annullare il segnale o quella di un passa alto non deve mai scendere fino a zero. Comprimerete meglio questo concetto vedendo, più avanti, alcuni esempi pratici.

La resistenza si comporta nella stessa maniera sia in corrente continua che in alternata; almeno in teoria, perché in pratica è affetta da componenti parassite (capacità e induttanza) che, specie alle alte frequenze, si fanno sentire. Tuttavia nei cross-over difficilmente sorgono problemi dovuti alle componenti parassite, visto che si lavora nel campo audio e le frequenze in gioco sono relativamente basse. Al limite, il consiglio è di evitare le resistenze a filo per il filtro del tweeter: meglio preferire quelle a strato metallico o a strato di carbone, che hanno una minor componente induttiva parassita.

Condensatore

È un componente detto reattivo perché in corrente alternata immagazzina energia elettrica per poi restituirla; in meccanica è paragonabile alla molla, che dopo essere stata premuta (caricata) si estende e vibra fino a tornare normale. Il condensatore è formato da due piastre di materiale elettricamente conduttore, parallele tra loro (o arrotolate, una sull'altra, ma sempre equidistanti) dette armature; fra di esse si trova l'elemento dielettrico, ossia un isolante, che può essere aria, carta, plastica, ossido metallico o altro ancora. Ogni armatura è collegata a un elettrodo (o capo) del condensatore. Applicando una pila ai capi del condensatore, l'armatura cui è collegato il polo positivo attrae gli elettroni (le piccole particelle costituenti l'elettricità)

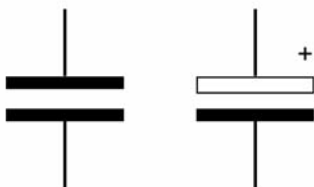


Figura 5.5

Simbolo grafico del condensatore: a sinistra quello non polarizzato e a destra l'elettrolitico.

e si carica elettricamente; togliendo tensione, il condensatore resta carico come una batteria e presenta, tra le armature, una differenza di potenziale pari alla tensione della pila che l'ha caricato. Per scaricarlo bisogna collegare tra i capi qualcosa che dissipi l'energia accumulata: una resistenza. Alimentando un condensatore inizialmente scarico, ovvero dando alle armature una tensione di polarità contraria a quella alla quale il componente si trova attualmente carico, il condensatore assorbe corrente: ciò accade perché la carica elettrica deve spostarsi da un'armatura all'altra, attraversando il dielettrico.

Per questa ragione, si usa dire che il condensatore ha carattere inerziale nei riguardi della tensione, nel senso che, fin quando non si carica, la differenza di potenziale ai suoi capi cresce da zero al valore della fonte di tensione che sta caricandolo. Il tempo impiegato da un condensatore a raggiungere la piena carica, dipende strettamente dalla resistenza che gli si trova in serie, composta dalla somma della resistenza interna del generatore di tensione che sta caricando, della resistenza dei conduttori e delle giunture e di eventuali resistori posti lungo il cammino della corrente.

Ciò si comprende pensando che il condensatore è come un serbatoio: il tempo che impiega a riempirsi dipende dalla resistenza che il liquido incontra nelle tubature che lo portano e dalla sua capacità. Immaginate l'acqua che scorre come la corrente che va a caricare il condensatore e la capacità come la quantità totale di acqua che può contenere. La quantità di carica immagazzinabile (Q , espressa in Coulomb, ossia *ampere per secondo*) dipende da due fattori: l'intensità della corrente (il flusso dell'acqua, se preferite...) e il tempo per il quale scorre nel condensatore.

Vale la relazione: $Q=I \times t$.

Il condensatore è definito dalla capacità di immagazzinare una certa quantità di carica elettrica sottoposto a una determinata tensione: $C=Q/V$.

Nel Sistema Internazionale di misura, la capacità è espressa in Farad. Più frequentemente, per i condensatori reperibili in commercio è espressa in sottomultipli quali il microfarad (μF , ossia 1 milionesimo di farad, quindi

10^{-6} F) il nanofarad (nF, ossia 1 miliardesimo di farad, quindi 10^{-9} F) e il picofarad, che vale 1 milionesimo di milionesimo di farad (10^{-12} F).

Sebbene un po' tedioso, il discorso appena fatto serve a far comprendere come si comportano i condensatori nei circuiti elettrici ed in particolare nei filtri. Infatti, la natura inerziale del condensatore nei riguardi della tensione fa sì che preceduto da una resistenza, in un circuito alimentato da tensione variabile (quale il segnale audio):

- ❑ riduca l'ampiezza della differenza di potenziale ai suoi capi, in maniera direttamente proporzionale sia alla frequenza, sia alla propria capacità ed alla resistenza;
- ❑ porti in ritardo (fino a 90°) la tensione rispetto alla corrente, determinando uno sfasamento del segnale ai propri capi.

Comprenderete meglio quest'ultimo concetto quando verranno esaminati i filtri più semplici, ossia quelli ad R/C e C/R.

Induttanza

Altrimenti e comunemente detta bobina, è composta da un filo avvolto più volte su un supporto diamagnetico (che non interferisce con i campi elettromagnetici) ferromagnetico (che, nei riguardi dei campi magnetici, si comporta come il ferro) o paramagnetico (che interferisce, ma poco, con i campi magnetici) che, percorso da corrente elettrica, vede manifestarsi il fenomeno della mutua induzione. Senza scomodare l'elettrotecnica, si può dire che una bobina percorsa da corrente elettrica determina un campo elettromagnetico le cui linee di forza sono concentriche con la sezione del filo.

L'induttore ha carattere inerziale nei confronti della corrente, perché, alimentato in continua, inizialmente non assorbe nulla, ma si oppone ad essere attraversato dalla corrente; poco dopo comincia a condurre e, abituatosi ad un certo regime, tenta di mantenerlo anche se il circuito viene interrotto. Volendo fare un'analogia con la meccanica, l'induttanza è come una massa: se le si applica una forza, inizialmente si fatica a muoverla, ma poi prende velocità e, in mancanza di attrito, tende a scorrere senza mai fermarsi e senza richiedere ulteriore spinta.

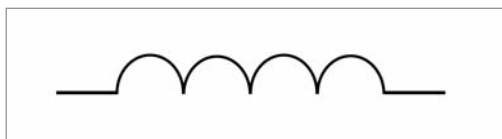


Figura 5.6
Simbolo grafico dell'induttanza.

Tale comportamento si spiega con la legge di Lenz, secondo la quale un avvolgimento elettrico sottoposto a una certa tensione, nell'istante in cui viene alimentato sviluppa una tensione indotta uguale in valore ma contraria nel verso a quella che l'ha generata, secondo la relazione:

$$V_i = L \frac{di}{dt}$$

La tensione, direttamente proporzionale al valore della corrente e a quello dell'induttanza, è inversamente proporzionale al tempo in cui la si considera; in "soldi spicci", significa che è inizialmente massima, però decresce, fino ad annullarsi, man mano che trascorre tempo dal momento in cui la bobina riceve l'alimentazione.

In regime continuo, l'induttanza permette lo scorrimento della corrente di regime (quella che dipende dalla somma della resistenza interna del generatore di tensione e di quelle dei conduttori e delle giunte...) solo trascorso un certo intervallo di tempo, che dipende dalla resistenza complessivamente posta in serie e dal valore dell'induttanza stessa.

Il comportamento inerziale nei riguardi della corrente fa sì che alimentando l'induttanza in regime alternato la corrente venga ritardata rispetto alla tensione; infatti, ad ogni variazione l'induttore si adegua lentamente e si lascia attraversare dalla corrente di pieno regime solo dopo un certo tempo. In un filtro composto da una resistenza e una bobina:

- l'ampiezza della differenza di potenziale ai capi della bobina diminuisce in maniera inversamente proporzionale sia alla frequenza, sia alla propria induttanza ed alla resistenza;
- la tensione si porta in anticipo (fino a 90°) rispetto alla corrente, determinando uno sfasamento del segnale ai propri capi.

Anche questo discorso apparirà più chiaro esaminando i filtri elementari. Nel Sistema Internazionale di misura, l'induttanza viene espressa in Henry (1H=1 ohmx1 s.).

I filtri più semplici

Visti le caratteristiche ed il comportamento dei componenti base, si può andare a vedere come si compongono i filtri elementari, cioè quelli costituiti da una resistenza ed un componente reattivo a scelta, tra condensatore

e induttanza. Per prima cosa conviene analizzare i filtri con condensatore e resistenza, che sono poi quelli destinati alle unità per note alte (tweeter) dato che si comportano da passa-alto: attenuano le frequenze minori di quella di taglio e lasciano passare quasi inalterate quelle maggiori. Il filtro passa-alto è usato anche per il mid-range, dove limita inferiormente la risposta in frequenza, evitando che l'unità si sovrapponga a quella dei bassi.

La cella CR

Collegando un condensatore in serie alla linea di segnale ed una resistenza come carico, si ottiene il quadripolo chiamato filtro CR; in esso viene sfruttata la caratteristica delle capacità di lasciarsi attraversare meglio dalle tensioni variabili, tanto più quanto più alta è la frequenza delle variazioni. Studiando il condensatore si è visto che non lascia passare la corrente continua, però, nel momento in cui la tensione ai suoi capi cambia di verso o di valore, diventa sede di quella corrente che serve a trasferire da un'armatura all'altra la quantità di carica che il componente deve accumulare. Dunque, più si verificano variazioni in un certo intervallo di tempo, maggiore è la corrente che attraversa il condensatore.

Quando è sottoposto a una tensione alternata, quale quella del segnale audio riprodotto da un amplificatore, si può dire che il condensatore presenta un'impedenza costituita esclusivamente da una parte reattiva, definita reattanza capacitiva ed espressa dalla relazione:

$$X_c = \frac{1}{2 \pi \times f \times C}$$

dove f è la frequenza espressa in Hz, C la capacità espressa in farad e X_c è il modulo della reattanza, in ohm. Il simbolo π è la pi-greca, costante che vale 3,1415926 (approssimata a 3,14) e che in geometria è il rapporto tra la circonferenza di un generico cerchio e il suo diametro; notate che nelle formule si adotta tale costante perché sono riferite al funzionamento con grandezze periodiche ad andamento sinusoidale.

Nelle formule si parla di modulo perché le impedenze sono normalmente grandezze vettoriali, espresse cioè con un valore assoluto (modulo) ed una fase (componente immaginaria).

Come appare chiaro dalla formula, l'impedenza che il condensatore oppone al passaggio della corrente variabile è tanto minore quanto più cresce la frequenza, e viceversa.

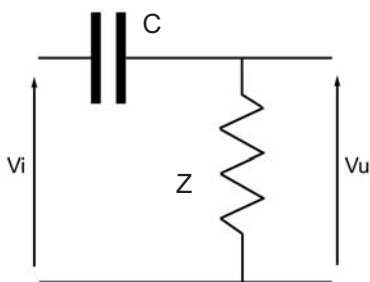


Figura 5.7

Schema elettrico del filtro CR; si tratta di un circuito passa-alto usato tipicamente nei cross-over più semplici, per filtrare il tweeter. Per il dimensionamento, si immagini che al posto della resistenza vi sia l'impedenza dell'altoparlante.

Nel filtro elementare che vede il condensatore in serie al carico, il diagramma che definisce la risposta in frequenza è quello rappresentato nella Figura 5.8. La frequenza di taglio del circuito si può approssimativamente esprimere con la formula:

$$f_{ti} = \frac{1}{2 \pi \times Z \times C}$$

Diciamo approssimativamente perché in effetti nella formula si considera Z (l'impedenza dell'altoparlante) come una resistenza, mentre in realtà, lo sappiamo dal Capitolo 2, la bobina mobile è un'impedenza, composta cioè da una parte resistiva e da un'induttanza. Nel filtro CR (passa-alto) il condensatore si calcola, nota l'impedenza (espressa in ohm) dell'altoparlante e definita la frequenza di taglio voluta, con la formula:

$$C = \frac{1}{2 \pi \times Z \times f_{ti}}$$

In essa C risulta in farad se f_{ti} è in hertz e Z in ohm; siccome usualmente si preferisce esprimere la capacità dei condensatori in sottomultipli del farad, quali il microfarad (1/1.000.000 di farad) conviene rivedere la predetta formula. Ad esempio, con la seguente:

$$C = \frac{1.000.000}{2 \pi \times Z \times f_{ti}}$$

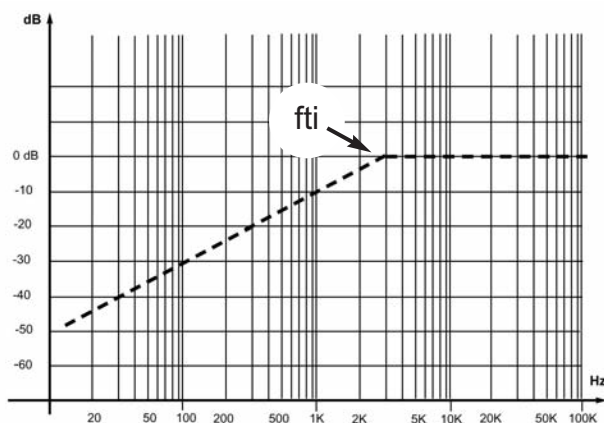


Figura 5.8
Curva di attenuazione del filtro CR ideale: l'andamento è quello del passa-alto. Al disotto della frequenza di taglio, il circuito attenua con pendenza di 20 dB a decade. In realtà, in prossimità della fti il segnale è già attenuato di 3 dB.

il condensatore risulterà in microfarad. Per prendere un po' di dimestichezza con i calcoli, si supponga di voler dimensionare una cella CR composta da un condensatore ed un altoparlante; l'impedenza di quest'ultimo è 8 ohm. Si impone una frequenza di taglio, ossia il valore di frequenza al quale si verifica l'attenuazione di 3 dB, pari a 4 kHz. Nel caso in oggetto, visto che il filtro è un passa-alto, l'altoparlante riceverà essenzialmente le frequenze al disopra di quella di taglio (fti).

$$C = \frac{1.000.000}{2 \pi \times Z \times f_{ti}} = \frac{1.000.000}{2 \pi \times 8 \times 4.000} = 4,97 \mu F$$

Prima di passare ad esaminare l'altra cella elementare usata nei filtri cross-over, è il caso di soffermarsi sul concetto di fase: gli elementi reattivi determinano una differenza di fase tra il segnale entrante nel filtro e quello che giunge ai morsetti dell'altoparlante. La differenza dipende dal fatto che condensatori e induttanze determinano un certo ritardo di tensione o corrente, che va a ripercuotersi sul segnale portato all'altoparlante.

Nel caso della cella CR va detto che la tensione applicata all'altoparlante dipende dalla corrente che attraversa il condensatore, la quale è in anticipo rispetto alla tensione che cade tra le armature del condensatore stesso; dunque, la tensione applicata alla resistenza (altoparlante) è in anticipo sulla caduta ai capi del condensatore. In pratica, accade che il condensatore si carica tanto più lentamente quanto maggiore è la frequenza, perché la resistenza ne rallenta la carica indipendentemente dalla frequenza. Ne consegue che la tensione ai suoi capi ritarda rispetto alla corrente al cre-

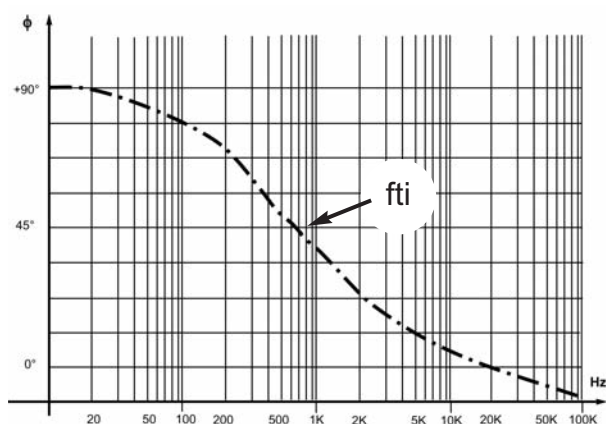


Figura 5.9
Andamento dello sfasamento del segnale di uscita del filtro CR rispetto al segnale entrante. Si noti che in corrispondenza della frequenza di taglio il segnale di uscita è in anticipo di 45° su quello d'entrata.

scere della frequenza, mentre quella ai capi dell'altoparlante, che poi è la differenza tra quella d'ingresso e la caduta sul condensatore, è in anticipo di quasi 90° a bassissime frequenze, mentre va in fase all'infinito, quando l'effetto del condensatore diviene trascurabile. In corrispondenza della frequenza di taglio la tensione ai capi dell'altoparlante, ovvero quella di uscita del filtro, è in ritardo di 45° rispetto a quella di ingresso (Figura 5.9).

La cella LR

Collegando un induttore in serie alla linea di segnale ed una resistenza come carico, si ottiene il quadripolo chiamato filtro LR; in esso viene sfruttata la caratteristica delle induttanze di lasciarsi attraversare meglio dalle tensioni variabili, tanto più quanto più bassa è la frequenza delle variazioni. La cella LR è del tipo passa-basso, quindi si adotta essenzialmente nei filtri per gli altoparlanti woofer, oppure in quelli dei mid-range, per limitare superiormente la risposta in frequenza ed evitare che si sovrapponga a

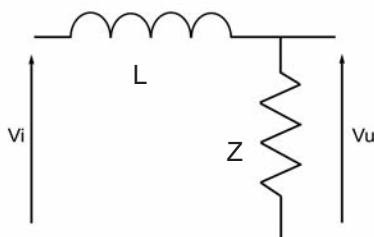


Figura 5.10
Schema elettrico della cella LR: si tratta di un circuito passa-basso usato solitamente per filtrare il woofer nei cross-over più semplici. La resistenza rappresenta l'impedenza dell'altoparlante.

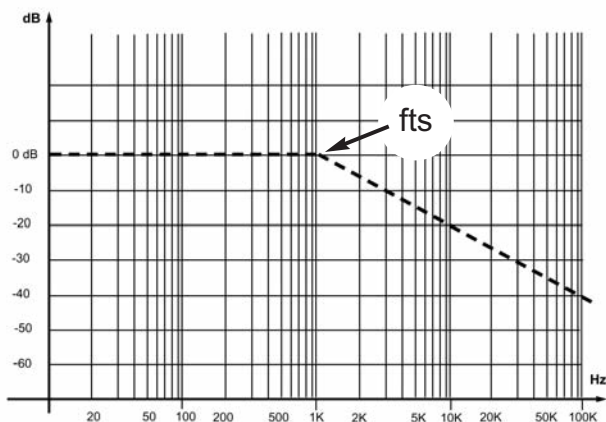


Figura 5.11
Curva di risposta in frequenza della cella LR: essendo una passa-basso, attenua, al disopra della frequenza di taglio, di 20 dB ogni decade. Nel circuito reale, in prossimità della f_{ts} il segnale è già attenuato di 3 dB.

quella del tweeter. Quando è sottoposta ad una tensione alternata, quale quella del segnale audio riprodotto da un amplificatore, si può dire che la bobina presenta un'impedenza costituita esclusivamente da una parte reattiva, definita reattanza induttiva ed espressa dalla relazione:

$$X_L = 2 \pi \times f \times L$$

In essa la reattanza risulta in ohm se la frequenza (f) e l'induttanza sono espresse rispettivamente in ohm e henry. La formula mostra come l'induttore tenda ad opporre al passaggio della corrente elettrica una resistenza che cresce con l'aumentare della frequenza. Posta in serie ad un altoparlante, l'induttanza attenua le basse frequenze e lascia transitare meglio quelle basse, fino a non opporre resistenza alcuna in corrente continua. La relazione tra la frequenza di taglio (detta frequenza di taglio superiore o f_{ts}) del filtro e i valori di induttanza e impedenza dell'altoparlante è:

$$f_{ts} = \frac{Z}{2 \pi \times L}$$

È sufficientemente approssimata, in quanto viene considerata come resistenza l'impedenza dell'altoparlante, la quale, in realtà, ha una componente resistiva ed una induttiva.

Per dimensionare la bobina del filtro LR si può utilizzare la seguente formula, approssimata anch'essa e ricavata dalla precedente:

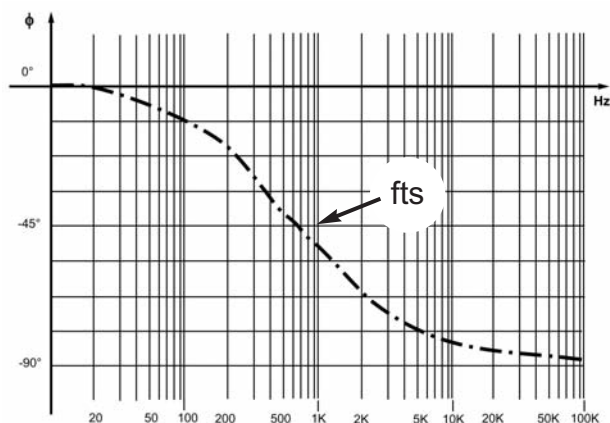


Figura 5.12
Andamento dello sfasamento del segnale di uscita del filtro LR rispetto al segnale entrante. Si noti come in corrispondenza della frequenza di taglio il segnale uscente sia 45 gradi in ritardo su quello entrante.

$$L = \frac{Z}{2 \pi \times f_{ts}}$$

dato che la cella RL è passa-basso, il suo comportamento al variare della frequenza corrisponde al grafico della Figura 5.11.

Per quel che riguarda la fase, anche la cella LR determina uno sfasamento tra il segnale di uscita (quello applicato alla bobina dell'altoparlante) e quello di ingresso; è, però, uno sfasamento diverso da quello visto per il filtro CR, in quanto qui l'induttanza fa sentire la sua inerzia nei riguardi della corrente. Per l'esattezza, l'induttore determina un certo ritardo della corrente che l'attraversa rispetto alla tensione che cade su di esso; considerato che la corrente nell'induttanza è la stessa che scorre nell'impedenza Z (la bobina dell'altoparlante) e che la tensione di uscita del filtro è determinata dal prodotto di tale corrente per l'impedenza stessa, l'uscita è in ritardo rispetto all'ingresso. Lo sfasamento vale zero gradi in corrente continua e si manifesta in presenza di segnale variabile: più esattamente, vale -45° in corrispondenza della frequenza di taglio del filtro e -90° a frequenza infinita (Figura 5.12).

Tale comportamento deriva dal fatto che al crescere della frequenza il comportamento inerziale dell'induttanza nei riguardi della corrente si manifesta sempre più intensamente, fino ad arrivare (a frequenza infinita) a quello della sola componente induttiva; quindi la tensione di uscita, che dipende dalla corrente nell'altoparlante, si presenta sempre più in ritardo rispetto a quella di ingresso.

Prima di procedere con lo studio dei filtri più complessi, conviene fare un esempio di calcolo di filtro passa-basso LR: si ipotizzi di dover progettare la sezione di un cross-over dedicata ad un altoparlante woofer da 4 ohm, che abbia come frequenza di taglio 800 Hz; dalla formula esplicitata nei paragrafi precedenti si ricava il valore dell'induttore.

$$L = \frac{Z}{2 \pi \times f_{ts}} = \frac{4}{2 \pi \times 800} = 0,00079 \text{ henry}$$

La bobina del filtro dovrà avere induttanza pari a 0,79 millihenry (mH).

Filtri del secondo ordine

Quelli analizzati finora sono i filtri più semplici, ossia quelli detti del prim'ordine. A volte, però, cross-over realizzati con essi non sono sufficienti a dare alla cassa acustica la risposta voluta: essenzialmente perché hanno una bassa pendenza di attenuazione e permettono agli altoparlanti di sovrapporre la propria emissione in maniera a volte eccessiva o per un campo di frequenze tanto esteso da non permettere una riproduzione ottimale. Quando è richiesta una più netta divisione del campo di frequenze tra i vari altoparlanti e nei casi in cui è necessario proteggere un tweeter delicato, che assolutamente deve evitare di lavorare con le frequenze medio basse, siano pure attenuate, bisogna ricorrere a filtri più complessi, composti da induttanze e condensatori, ossia entrambi gli elementi reattivi.

Si tratta di filtri del second'ordine, che hanno, fuori banda, una pendenza di attenuazione pari a 40 dB/decade (12 dB/ottava) e che, in corrispondenza della frequenza di taglio, presentano un segnale a -6 dB.

Filtro LC

Si tratta di una cella passa-basso, nella quale il condensatore è posto in parallelo all'altoparlante, mentre l'induttore sta in serie al segnale. L'effetto passa-basso appare evidente, perché la bobina ostacola il passaggio delle correnti man mano che la frequenza si alza, mentre il condensatore tende a cortocircuitare le alte frequenze, lasciando "sopravvivere" quelle basse, che si presentano tali e quali ai capi dell'altoparlante.

Il filtro ad LC presenta una pendenza di attenuazione doppia rispetto a quello composto dalla sola induttanza: ben 40 dB/decade. Però, in corrispondenza della frequenza di taglio determina un'attenuazione di 6 dB. Per dimensionare il filtro occorrono nuove formule, che sono le seguenti:

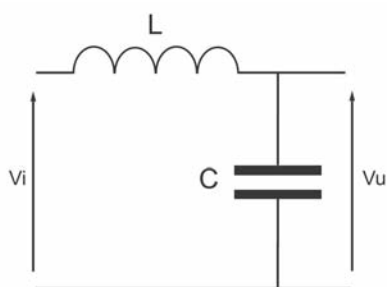


Figura 5.13

Schema elettrico del filtro passa-basso di tipo LC; dai punti Vu si preleva la tensione di uscita e ad essi si collega l'altoparlante destinatario del segnale filtrato: solitamente il woofer.

$$L = \frac{Z}{0,707 \times 2 \pi \times f_{ts}}$$

che dà il valore dell'induttanza, e:

$$C = \frac{0,707}{2 \pi \times Z \times f_{ts}}$$

che esplicita il valore del condensatore. In entrambe, f_{ts} è il valore della frequenza di taglio desiderata; se la frequenza è espressa in hertz l'induttanza risulta in henry e il condensatore in farad. Visto che normalmente i con-

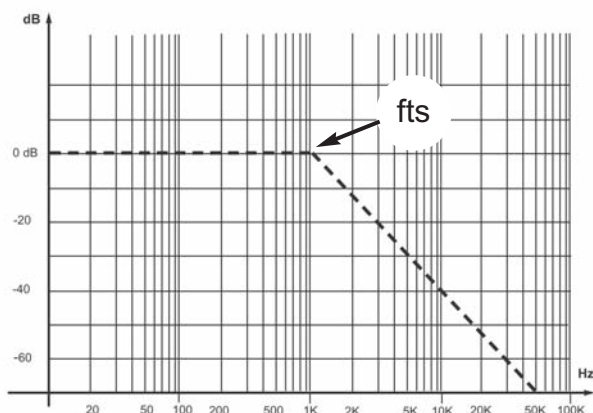


Figura 5.14

Curva di risposta in frequenza della cella LC: attenua, al disopra della frequenza di taglio, di 40 dB per decade. Nel circuito reale, in prossimità della f_{ts} il segnale è già attenuato di 6 dB.

densatori usati nei filtri cross-over sono dell'ordine di qualche microfarad, può essere più comodo adattare l'ultima formula:

$$C = \frac{707.000}{2 \pi \times Z \times f_{ts}}$$

Quanto alla fase del segnale, il filtro LC parte da uno sfasamento nullo in corrente continua, e a frequenza infinita determina un ritardo della tensione di uscita fino a 180 a gradi rispetto a quella d'ingresso.

Filtro CL

La cella in questione è, al contrario della LC, una passa-alto: infatti sfrutta la tendenza dei condensatori ad agevolare il passaggio delle correnti ad alta frequenza, che quindi possono raggiungere l'altoparlante con maggiore intensità di quelle a bassa frequenza; inoltre si avvale della caratteristica delle induttanze di opporsi sempre più al passaggio della corrente man mano che cresce la frequenza, così da cortocircuitare le note basse ai capi dell'altoparlante, che solitamente è un tweeter o un mid-range. Per il dimensionamento valgono le medesime regole e le formule sono le stesse di quelle viste per la cella LC, dato che si tratta sostanzialmente di un quadripolo nel quale i componenti reattivi si trovano soltanto scambiati di posto. Dunque, il condensatore si calcola con la formula:

$$C = \frac{0,707}{2 \pi \times Z \times f_{ti}}$$

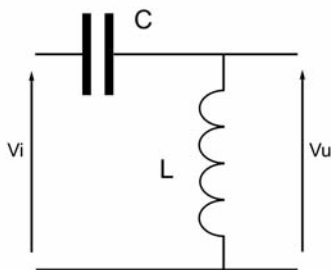


Figura 5.15

Una cella filtrante CL; è del tipo passa-alto e viene solitamente usata per filtrare il segnale diretto al tweeter. Si usa anche, posta in cascata ad una passa-basso, nella realizzazione di un filtro passa-banda per mid-range.

Mentre per il calcolo dell'induttanza bisogna riferirsi alla formula seguente:

$$L = \frac{Z}{0,707 \times 2 \pi \times f_{ti}}$$

In entrambe, f_{ti} è il valore della frequenza di taglio desiderata; se la frequenza è espressa in hertz l'induttanza risulta in henry e il condensatore in farad. Visto che normalmente i condensatori usati nei filtri cross-over sono dell'ordine di qualche microfarad, per calcolare la capacità può essere più comodo adottare questa formula:

$$C = \frac{707.000}{2 \pi \times Z \times f_{ti}}$$

che dà il valore espresso in milionesimi di farad (microfarad). Quanto alla fase, la cella CL può determinare uno sfasamento in anticipo tra tensione uscente ed entrante, di 180° , che si riduce a zero a frequenza infinita.

Filtri del terzo ordine

Quando le esigenze progettuali impongono pendenze di taglio estremamente ripide, si ricorre a particolari celle filtranti dette del terz'ordine, perché impiegano tre elementi reattivi ciascuna. Dei tre elementi, due sono

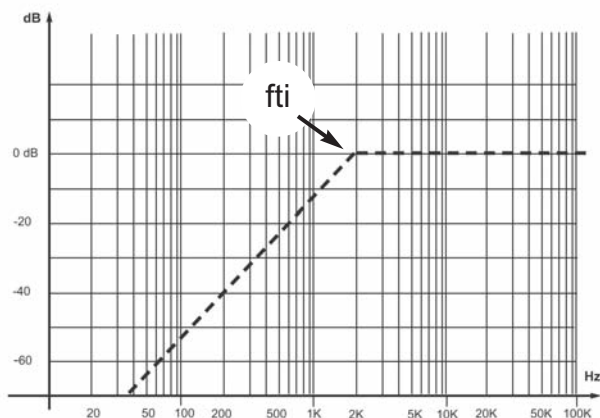


Figura 5.16

Curva di risposta in frequenza della cella CL: attenua, al disotto della frequenza di taglio, di 40 dB per decade. Nel circuito reale, in prossimità della f_{ti} il segnale viene già attenuato di 6 dB.

uguali tra loro: ad esempio, vi sono celle formate da due condensatori e una bobina, ed altri composti da due bobine e un condensatore. La configurazione può essere a T o a pi-greca. Solitamente, è la prima quella usata nei cross-over per casse acustiche.

Il filtro del terz'ordine attenua le frequenze fuori banda di ben 18 dB/ottava, ovvero di 60 dB/decade: si può ben comprendere come permetta di definire assai precisamente l'assegnazione delle singole bande di frequenza ai rispettivi altoparlanti. Per comprendere ciò si immagini di dover adottare un filtro passa-basso per limitare superiormente la risposta in frequenza di un woofer, a 500 Hz; dopo un'ottava, ossia a 1 kHz, il segnale viene attenuato di circa 10 volte, mentre a 5.000 Hz è quasi inesistente, dato che riceve ben 60 dB di attenuazione e arriva al woofer con un'ampiezza pari ad un millesimo di quella all'ingresso del filtro.

All'ottima attenuazione fuori banda, si contrappongono però due piccoli difetti:

- ❑ in corrispondenza della frequenza di taglio, sia essa superiore o inferiore, le celle del terzo ordine presentano un'attenuazione di 9 dB;
- ❑ la presenza di molti componenti reattivi determina una rotazione di fase da considerare attentamente.

Filtro LCL

Si tratta di una cella passa-basso, nella quale il condensatore è posto in parallelo alla linea del segnale, mentre gli induttori L1 ed L2 stanno in serie al segnale. L'effetto passa-basso appare evidente, perché la bobina ostacola il passaggio delle correnti man mano che la frequenza si alza, mentre il condensatore tende a cortocircuitare le alte frequenze, lasciando "sopravvivere" quelle basse, che si presentano tali e quali ai capi dell'altoparlante. Per dimensionare il filtro occorrono nuove formule, che sono le seguenti:

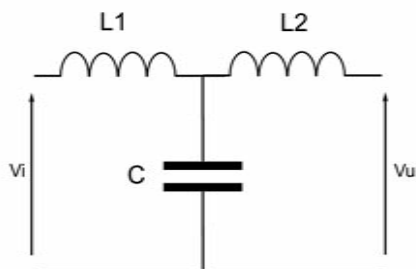


Figura 5.17

Filtro del terz'ordine con struttura a T: è un passa-basso e lo si riconosce perché le induttanze (componenti che attenuano le alte frequenze) sono in serie alla linea del segnale.

L'altoparlante si connette ai punti Vu.

$$L1 = \frac{0,75 \times Z}{\pi \times fts}$$

che dà il valore dell'induttanza d'ingresso. La seconda bobina (quella in serie all'altoparlante) si calcola con la formula:

$$L2 = \frac{0,25 \times Z}{\pi \times fts}$$

Quanto al condensatore, la formula è la seguente:

$$C = \frac{0,667}{\pi \times Z \times fts}$$

In tutte, fts è il valore della frequenza di taglio desiderata; se la frequenza è espressa in hertz l'induttanza risulta in henry e il condensatore in farad. Visto che normalmente i condensatori usati nei filtri cross-over sono dell'ordine di qualche microfarad, può essere più comodo adottare la formula:

$$C = \frac{667.000}{\pi \times Z \times fts}$$

Il filtro CLC

La cella in questione è una passa-alto: infatti sfrutta la tendenza dei condensatori ad agevolare il passaggio delle correnti ad alta frequenza, che quindi possono raggiungere l'altoparlante con maggiore intensità di quelle a bassa frequenza; inoltre si avvale della caratteristica delle induttanze di opporsi sempre più al passaggio della corrente man mano che cresce la frequenza, così da cortocircuitare le note basse sulla linea compresa tra i due condensatori. Il filtro CLC si usa con i tweeter per limitarne inferiormente la banda passante, o con i mid-range (forma la sezione passa-alto del filtro). Per il dimensionamento, le formule sono leggermente diverse da quelle viste a proposito della cella LCL; il valore del primo condensatore (quello d'ingresso) si calcola con la formula seguente:

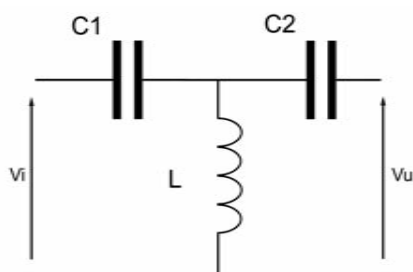


Figura 5.18

Filtro del terz'ordine con struttura a T: è un passa-alto e lo si riconosce perché i condensatori (componenti che attenuano le basse frequenze) sono in serie alla linea del segnale. L'altoparlante si connette ai punti Vu.

$$C1 = \frac{1}{3 \times \pi \times Z \times f_{ti}}$$

Il secondo condensatore si calcola, invece, così:

$$C2 = \frac{1}{\pi \times Z \times f_{ti}}$$

Per il dimensionamento dell'unica induttanza vale la relazione:

$$L = \frac{3 \times Z}{8 \times \pi \times f_{ti}}$$

In tutte, f_{ti} è il valore della frequenza di taglio desiderata; se la frequenza è espressa in hertz l'induttanza risulta in henry e il condensatore in farad. Visto che normalmente i condensatori usati nei filtri cross-over sono dell'ordine di qualche microfarad, per calcolare la capacità $C1$ può essere più comodo adottare questa formula:

$$C1 = \frac{1.000.000}{3 \times \pi \times Z \times f_{ti}}$$

Con lo stesso criterio, il secondo condensatore si calcola invece così:

$$C2 = \frac{1.000.000}{\pi \times Z \times f_{ti}}$$

Le due nuove formule permettono di ottenere i valori dei condensatori in milionesimi di farad (microfarad).

Bene, detto questo si può ritenere concluso il discorso sul tipo di celle filtranti: infatti oltre il terzo ordine non conviene andare, perché nella pratica nessun diffusore ha bisogno di filtri più selettivi. Anzi, già l'uso di celle del terz'ordine impegna e non poco l'amplificatore della catena sonora, mettendone a dura prova la stabilità; perciò non è il caso di spingersi oltre.

Comporre i cross-over

Dopo aver spiegato le celle che si possono usare per i singoli altoparlanti di un cross-over, è il caso di vedere qualche esempio pratico da utilizzare in diffusori a due e tre vie. Prima, però, è opportuna una premessa: i cross-over possono essere realizzati sia collegando con dei fili i singoli componenti, che vanno poi fissati su una basetta di materiale isolante, sia, su circuito stampato, facilmente realizzabile se solo si ha un minimo di attrezzatura (penna ad inchiostro indelebile e soluzione di percloruro ferrico).

Detto ciò, vediamo il primo esempio (Figura 5.19): è per casse a due vie (woofer e tweeter) con pendenza, per entrambi, a 6 dB/ottava. È composto

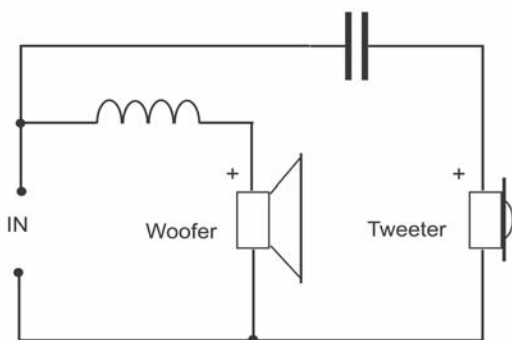


Figura 5.19

da una cella passa-basso dedicata al woofer e di una passa-alto riservata al tweeter. Per il calcolo dei componenti delle due celle bisogna utilizzare le formule relative ai filtri più semplice (LR e CR) sostituendo alla resistenza

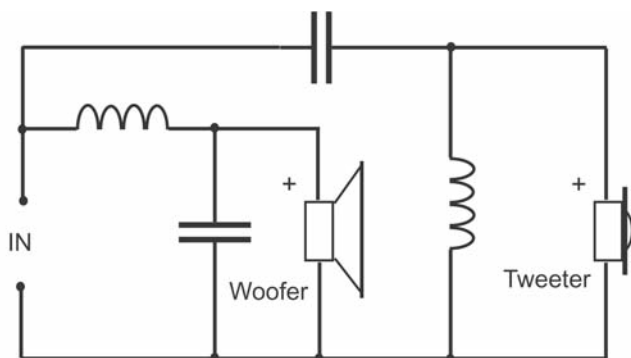


Figura 5.20

l'impedenza nominale dei rispettivi altoparlanti. Woofer e tweeter possono avere impedenza differente: ad esempio, visto che molti tweeter si fanno sentire di più dei woofer, può convenire montare un woofer da 6,4 ohm ed un'unità per gli acuti da 8 ohm. Il secondo schema esemplificativo è quello di un cross-over, sempre a due vie (woofer e tweeter) composto da filtri a 12 dB/ottava (Figura 5.20). Per il dimensionamento si vedano le formule delle celle di secondo ordine. Anche in questo caso è possibile usare altoparlanti aventi impedenza differente.

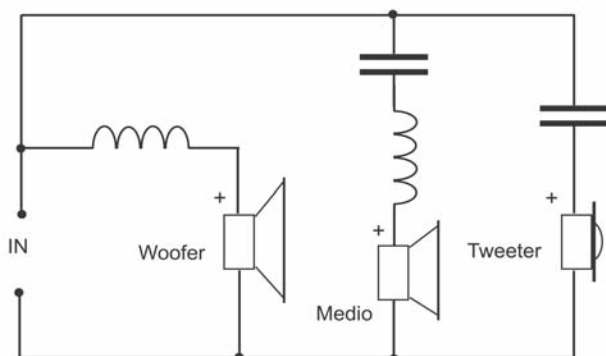
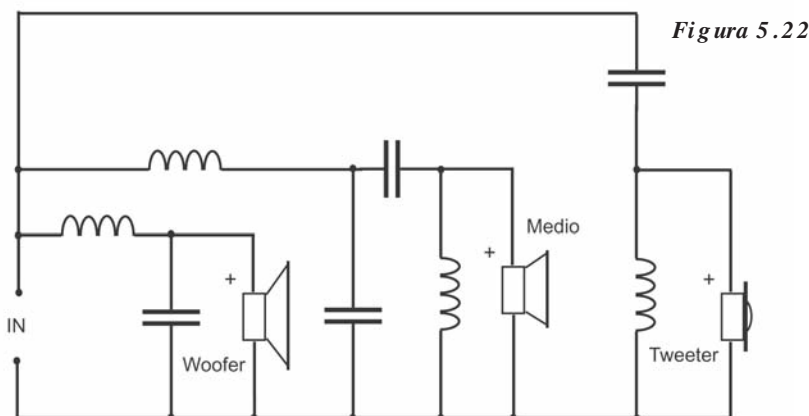


Figura 5.21

Il terzo esempio (Figura 5.21) riguarda un cross-over per casse a tre vie ed è composto da celle di prim'ordine (6 dB/ottava) per woofer, midrange (o medio, che dir si voglia) e tweeter. Valgono le considerazioni già fatte per la versione a due vie. Il cross-over a tre vie può essere realizzato anche con l'architettura a celle del secondo ordine: lo schema di Figura 5.22 mostra un



sistema di altoparlanti a tre vie, tutti filtrati da celle con pendenza di attenuazione di 12 dB/decade.

Le combinazioni viste finora sono tutte omogenee, nel senso che gli altoparlanti hanno tutti filtri dello stesso ordine; nella pratica si può scegliere la combinazione che si vuole, ossia, ad esempio, adottare per il woofer una cella del primo ordine e filtrare il tweeter con una del secondo ordine. Questa soluzione è molto utilizzata, perché il woofer è molto robusto e ben gestisce le frequenze al disopra di quella di taglio del cross-over (che attenua decisamente sopra il proprio limite di risposta in frequenza) mentre il tweeter, più delicato, è meglio sia filtrato con una cella la cui pendenza di attenuazione verso le frequenze medie e basse sia più decisa.

Avvertenze per i filtri passa-banda

Nel dimensionare i circuiti passa-banda, solitamente impiegati per i mid-range, occorre fare attenzione a un piccolo dettaglio: la cella passa-basso deve avere una frequenza di taglio maggiore di quella di taglio inferiore della cella passa-alto. Questo perché, altrimenti, il filtro si comporta non da passa-banda, ma da elimina-banda (notch-filter). Il passa-banda va dimensionato in modo che il passa-basso attenui al disopra della frequenza massima da inviare al mid-range e il passa-alto attenui sotto la minima frequenza desiderata. Quindi, dovendo dimensionare un filtro passa-banda, prima si decidono le frequenze limite e poi si calcola la cella passa-basso per quella maggiore e la passa-alto per la frequenza più bassa.



Figura 5.23

Esempio di filtro cross-over a due vie a 12 dB/ottava: ognuno dei due stadi è del secondo ordine, dato che la sezione passa-basso è del tipo LC e quella passa-alto è una cella CL. Il cross-over è montato su circuito stampato in vetronite.

Abbinare gli altoparlanti

In questo capitolo si è visto in che modo dimensionare i filtri cross-over e, per quel che riguarda i più semplici, quelli a 6 dB/ottava, come calcolare condensatori e induttanze in base all'impedenza degli altoparlanti che devono prevedere. Va però fatta una precisazione che vale per la progettazione della parte elettrica delle casse acustiche: normalmente gli altoparlanti usati devono avere la stessa impedenza; quindi tutti 4 ohm, 8 ohm, 6,4 ohm e via di seguito.

Vi sono però eccezioni, motivate dalla differenza di efficienza; per esempio, se in un sistema a due vie il tweeter rende già 4÷5 dB più del woofer si può sceglierlo con impedenza doppia. Oppure, se rende 3 dB in più, si può abbinare un tweeter da 6,4 ohm ad un woofer da 4 ohm. In questi casi, dato che elevando l'impedenza cala la potenza dissipata dall'altoparlante, diminuisce anche la corrispondente pressione sonora, che si avvicina a quella dell'altoparlante meno efficiente.

Nell'abbinare gli altoparlanti conviene partire dal woofer, che solitamente è quello meno efficiente; poi si scelgono tweeter ed eventualmente mid-range, valutando la loro efficienza. Se il tipo voluto (per estensione di banda o caratteristiche costruttive) ha un'efficienza più alta di quella degli altri altoparlanti si sceglie con impedenza più alta; se ciò non è possibile (ad esempio il woofer è da 8 ohm e il tweeter esiste solo da 8 ohm) si ricorre all'uso di resistenze per attenuare l'emissione. Quest'ultimo accorgimento sarà esposto nel Capitolo 6.

6

Filtri e altoparlanti

Come abbiamo già avuto modo di spiegare, per funzionare correttamente, ogni trasduttore deve essere preceduto da un filtro specifico; poco importa la pendenza di attenuazione o la struttura. Tra amplificatore e woofer deve esserci un filtro passa-basso, che attenua le frequenze medie ed alte, mal riprodotte da tale tipo di altoparlante; fra amplificatore e tweeter ci vuole un filtro passa-alto, che impedisca all'altoparlante di ricevere le note basse, che non può riprodurre e che lo porterebbero a dissipare potenza inutilmente e a farne surriscaldare la bobina. Infine, il mid-range o eventuali altri altoparlanti cui sono affidate gamme intermedie (ad esempio i mid-woofer nei sistemi con subwoofer) deve essere preceduto da un filtro passa-banda, scopo del quale è lasciar passare la sola gamma che non va né al woofer, né al tweeter. Nel Capitolo 5 è stato spiegato come viene composto ciascuno dei filtri elencati; le rispettive formule permettono di dimensionare i singoli componenti, ma non sono sufficienti. Infatti, per esempio, non basta sapere il valore di un'induttanza, ma occorre anche valutare le condizioni in cui si troverà a lavorare, condizioni che dipendono dall'altoparlante cui dovrà essere abbinata. Nei prossimi paragrafi si esamineranno i criteri di dimensionamento degli induttori usati nei cross-over in funzione della potenza della cassa, ma anche quelli per la scelta dei condensatori e di eventuali resistenze. Scopo di questo capitolo è anche spiegare come affiancare le celle filtranti per ottenere una riproduzione sonora equilibrata.

Scegliere i condensatori

Innanzitutto bisogna dire che i condensatori utilizzati nei cross-over sono, elettivamente, quelli in poliestere; tuttavia, per ridurre le dimensioni dei filtri, quando le capacità sono relativamente elevate, si può ricorrere a quelli elettrolitici, preferibilmente non polarizzati. Questi ultimi sono meno reperibili di quelli comuni, però si possono costruire unendo due comuni elettrolitici di ugual valore per lo stesso polo: ad esempio, unendo i due negativi e tenendo i positivi come estremi o unendo i positivi e lasciando che gli estremi liberi siano i negativi.

Attenzione che il collegamento in serie di due condensatori uguali dà una capacità pari a metà di quella di uno solo di essi; in pratica, un elettrolitico non polarizzato formato da due condensatori da 10 μF polarizzati ne dà uno da 5 μF .

Gli elementi in poliestere sono migliori perché hanno minor corrente di perdita e componenti parassite (specie induttive) minori, quindi rispondono meglio sulle alte frequenze della gamma audio; insomma, per almeno per i tweeter è raccomandabile adottare condensatori in poliestere, mylar o polipropilene. Per i filtri di mid-range e woofer si possono anche impiegare gli elettrolitici, anche in considerazione del fatto che, essendo le frequenze di taglio più basse, le capacità risultanti dai calcoli sono decisamente grandi. I condensatori, di qualsiasi tipo essi siano, sono caratterizzati da una tensione di lavoro: vanno scelti in base alla potenza ed all'impedenza della cassa in cui andranno, ovvero in funzione della massima tensione d'uscita dell'amplificatore. Quest'ultima, in caso di guasto dello stadio finale, potrebbe ammontare a metà della tensione d'alimentazione complessiva, ovvero, nel caso di amplificatori a singola alimentazione, all'intera tensione.

Se si conosce il valore della tensione d'alimentazione si dimensionino i condensatori per un 20 % in più: ad esempio, se l'amplificatore lavora ad alimentazione duale di $\pm 40\text{ V}$, i condensatori vanno scelti da 50 V.

Senza conoscere l'alimentazione, si può partire dalla potenza che l'amplificatore può erogare sull'impedenza più alta; da essa si ricava la massima tensione erogabile in funzionamento continuato. Ottenuto questo dato, al solito si impone che i condensatori tengano una tensione maggiore; stavolta, però del 40 %.

Si può chiarire il discorso con qualche calcolo esemplificativo: si supponga di avere un amplificatore di potenza da 100 watt su 8 ohm; siccome la potenza erogata è pari al rapporto tra il quadrato della tensione e la resistenza, si può dire che la tensione è ottenuta dalla radice quadrata del prodotto potenza x resistenza. Nel caso di segnali musicali, la tensione è variabile e quindi si considera il suo valore efficace, almeno se la poten-

za dichiarata per l'amplificatore è quella efficace (altrimenti detta R.M.S.); la resistenza è in realtà l'impedenza del carico. L'amplificatore da 100 watt su 8 ohm eroga quindi una tensione efficace di 28,28 volt.

La tensione dei condensatori del cross-over conviene sia almeno il 40 % superiore, perché la si deve considerare relativamente al valore di cresta, che, per grandezze sinusoidali (la potenza degli amplificatori si calcola con un segnale sinusoidale all'ingresso) ammonta a 1,4142 volte quello efficace. Dunque, i condensatori del cross-over per una cassa 100 W da 8 ohm devono essere da almeno 40 V.

Detto ciò, bisogna spendere qualche parola sul valore di capacità: non sempre si trova un condensatore del valore risultante dai calcoli; quindi la scelta deve ricadere su un componente della serie standard che si avvicini il più possibile. Laddove lo scostamento tra il valore calcolato e quello reperibile sia eccedente il 10 %, conviene rivedere i calcoli; nei filtri di secondo e terzo ordine basta giocare sulle induttanze, adattandone i valori.

In alternativa bisogna costruire il condensatore, mettendone in parallelo o in serie, tenendo conto delle seguenti semplici regole:

- ❑ due condensatori collegati in serie ne formano uno la cui capacità è data dal prodotto delle loro capacità, diviso per la somma, ossia $C1 \times C2 / (C1 + C2)$; comunque, la capacità risultante è sempre minore di quella del condensatore più piccolo;
- ❑ due condensatori posti in parallelo tra loro ne danno uno la cui capacità è pari alla somma delle capacità di ciascuno, ossia $C1 + C2$.

Ad esempio, per ottenere un condensatore da 4 microfarad bisogna porre in parallelo uno da 3,3 μF ed uno da 0,68 μF , il che dà 3,98 μF ; certo non sono 4, ma ci si avvicina moltissimo perché lo scarto è di appena -0,5 %.

Per il collegamento in serie, bisogna scegliere il condensatore più piccolo, in modo che sia di valore leggermente maggiore di quello risultante dai calcoli di dimensionamento del cross-over; definito il valore del condensatore più piccolo, con la seguente formula si ricava l'altro:

$$C2 = \frac{C1 \times Cc}{C1 - Cc}$$

nella quale $C1$ è il condensatore del quale si è imposto il valore e Cc il valore che bisogna ottenere, ossia quello risultante dai calcoli del filtro. Per fare un esempio, si supponga di dover ottenere il solito valore di 4 microfarad;

si sceglie come condensatore di base un 4,7 μF e si procede al calcolo:

$$C2 = \frac{C1 \times Cc}{C1 - Cc} = \frac{(4,7 \times 4) \mu\text{F}^2}{(4,7 - 4) \mu\text{F}} = \frac{18,8 \mu\text{F}^2}{0,7 \mu\text{F}} = 26,8 \mu\text{F}$$

L'esempio mostra come, nella pratica, sebbene si possa ottenere un condensatore di qualsiasi valore anche con il collegamento in serie, sia preferibile il parallelo: infatti nella serie i condensatori usati sono sempre più grandi di quello di cui si deve ottenere la capacità. È molto più economico ricorrere al parallelo, perché in esso i condensatori che formano la capacità risultante dai calcoli del filtro da realizzare sono sempre più piccoli di essa, quindi costano meno e occupano minor spazio.

I valori standardizzati per i condensatori sono: 1/2, 2/2, 7/3, 3/3, 9/4, 7/5, 6/6, 8/8, 2 e multipli o sottomultipli; almeno, per quelli in poliestere, mylar e polipropilene. Per gli elettrolitici la scelta è ben più limitata: 1/2, 2/3, 3/4, 7/6, 8 e multipli o sottomultipli. Insomma, se è possibile trovare un condensatore in poliestere da 6,8 μF o 0,68 μF , il valore dell'elettrolitico più prossimo è 4,7 μF o 0,47 μF .

Scegliere le bobine

I condensatori sono, in fondo-in fondo, gli elementi meno critici, perché si trovano in commercio già pronti. Con le induttanze, le cose sono un tantino più complesse, perché non sempre le si trova già pronte; spesso è più semplice costruirle, utilizzando delle tabelle standard che adottano supporti di diametro fisso e fili di rame smaltato di sezione prestabilita.

Inoltre, se nei condensatori bisogna guardare la tensione di lavoro, nello scegliere le induttanze è determinante valutare quanta corrente esse possano sopportare; la corrente dipende dalla sezione del filo. Con sufficiente approssimazione, si può ritenere che ogni mm^2 di sezione del filo in rame smaltato usato in una bobina per filtro cross-over possa reggere 5 A. Oltre si può anche andare, tuttavia la resistenza elettrica del conduttore inizia a farsi sentire e determina una certa attenuazione del segnale audio, tanto maggiore quanto più alta è la corrente che l'attraversa. Chi vuol farsene un'idea, sappia che il filo di rame ha una resistenza specifica di 16 miliohm/ mm^2 ogni metro di lunghezza e che una bobina da 1 mH può arrivare ad essere composta da 15÷20 metri di filo; considerato che ogni metro di filo in rame della sezione di 1 mm^2 ha una resistenza di 0,016 ohm, venti metri, attraversati da 5 A di corrente, determinano una caduta di tensione pari a 1,6 volt! Un valore inaccettabile, soprattutto lavorando con altoparlanti.

ti da 4 ohm, per i quali la potenza si sviluppa con tensioni più basse di quelle usate con i trasduttori da 8 ohm.

Per valutare la corrente che deve attraversare una bobina occorre tornare su un discorso già fatto in precedenza: bisogna conoscere la potenza della cassa acustica e la sua impedenza; la corrente che deve andare in un altoparlante viene determinata sapendo che la potenza è data dal prodotto $I^2 \times R$. La corrente è quindi ricavabile dalla radice quadrata del rapporto P/R . Volendo fare un esempio, una cassa da 100 W e 4 ohm assorbe una corrente pari a:

$$I = \sqrt{P/R} = \sqrt{100/4} = 5 \text{ A.}$$

Dunque, per una cassa di potenza pari a 100 W, composta con altoparlanti da 4 ohm, bisogna scegliere bobine da 5 A, ovvero realizzate con filo di rame smaltato da almeno 1 mmq di sezione.

Bisogna ricordare che la sezione non è il diametro; infatti è l'area della sezione trasversale del conduttore, ricavata dalla relazione:

$$s = \pi \times d^2/4$$

Da essa si può estrarre quella che dà il diametro partendo dalla sezione:

$$d = \sqrt{(4 \times s) / 3,14}.$$

Riprendendo l'esempio della cassa da 100 W su 4 ohm, considerato che le bobine del cross-over saranno soggette a ad una corrente di 5 A e che il limite di corrente ammesso è 5 A/mm², il filo da usare dovrà avere sezione di 1 mm². Dalla formula appena descritta, si può ricavare il diametro del filo:

$$d = \sqrt{(4 \times 1 \text{ mm}^2) / 3,14} = \sqrt{(4 \text{ mm}^2) / 3,14} = \sqrt{1,27 \text{ mm}^2} = 1,127 \text{ mm}.$$

Il diametro più adatto è 1,2 mm, dato che è facilmente reperibile e dà una sezione leggermente maggiore della minima accettabile.

Senza scomodare troppe formule, si possono costruire le induttanze usando dei supporti e delle tabelle standard; il supporto consigliato è un rocchetto di plastica (può essere di qualsiasi altro materiale, purché non metallico) del diametro di 25 mm e di altezza o lunghezza uguale.

Usando il predetto supporto, si può ricavare il numero di spire da avvolgere in base al diametro del filo in rame usato ed al valore voluto dell'induttanza. Più esattamente, il grafico di Figura 6.2 mostra il numero di spire corre-

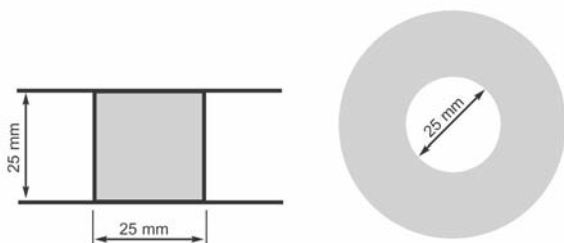


Figura 6.1
Misure del
rocchetto
campione su cui
avvolgere le
induttanze in aria
o con nucleo
ferromagnetico.

lato con l'induttanza, supponendo di usare filo da 0,6 mm. Per conoscere il numero di spire occorrente a realizzare una certa bobina basta tracciare una linea verticale in corrispondenza del valore di induttanza desiderato. Il grafico di Figura 6.3 mostra, invece, come dimensionare le bobine usando il medesimo supporto, ma filo di rame smaltato da 1,2 mm di diametro.

Induttanze su nucleo ferromagnetico

Come si è visto, il numero di spire può diventare un problema, in quanto può allungare eccessivamente l'induttore ed aumentarne così la resistenza elettrica e la perdita di potenza durante l'esercizio. Per ridurre la resistenza occorre diminuire la lunghezza della bobina, ossia il numero di spire; ciò può essere ottenuto solamente elevando l'induzione nel rocchetto, cosa realizzabile avvolgendo il filo non in aria ma su un nucleo ferromagnetico.



Figura 6.2
Il grafico per calcolare
le spire occorrenti in
base al valore di
induttanza della
bobina; la curva è
riferita all'uso di filo
del diametro di 0,6 mm
e rocchetto in aria.

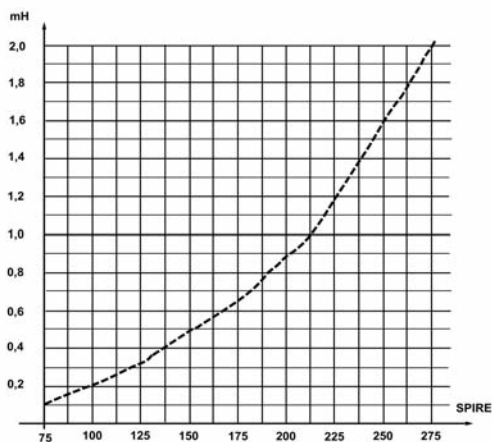


Figura 6.3

Grafico per calcolare le spire occorrenti in base al valore di induttanza della bobina; la curva è riferita all'uso di filo del diametro di 1,2 mm. Il supporto è il solito rocchetto vuoto.

Esistono, allo scopo, nuclei cilindrici in ferrite o in ferro laminato, da inserire perpendicolarmente alle spire di filo.

Usando un nucleo in lamierino di ferro al silicio (quello usato per i trasformatori) che riempia il più possibile la sezione interna dell'avvolgimento, si può applicare il grafico di Figura 6., che si riferisce a bobine realizzate con filo in rame smaltato del diametro di 0,6 mm. La curva è riferita al funzionamento con correnti tali da determinare, nel nucleo, un'induzione magnetica la cui intensità non superi quella di saturazione. Oltre, il valore di induttanza cala. Infatti, mentre le bobine avvolte in aria presentano la stessa induttanza per qualsiasi valore di corrente, quelle avvolte su un nucleo ferroma-

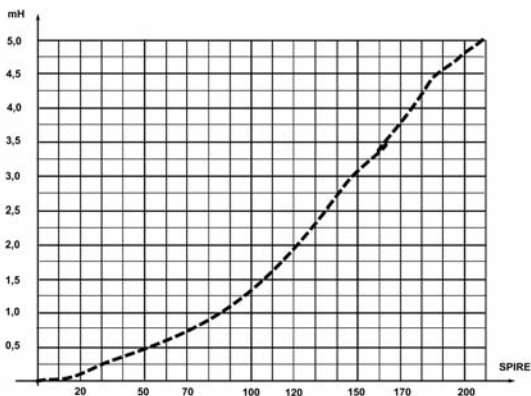


Figura 6.4

Grafico per il calcolo delle spire occorrenti, in funzione dell'induttanza voluta, usando un rocchetto con nucleo ferromagnetico. Si vede come, a parità di spire, l'induttanza sia molto maggiore di quella ottenibile con l'avvolgimento in aria.

gnetico hanno valore costante solo entro il margine di corrente che mantiene l'intensità dell'induzione magnetica nel tratto lineare della curva di magnetizzazione. Dato che è un complesso calcolare i valori di induzione in una bobina per cross-over e che i costruttori difficilmente danno le caratteristiche del nucleo, il consiglio è impiegare le induttanze con altoparlanti che richiedano correnti non superiori a quella dichiarata dal costruttore. Quindi, se una bobina è progettata per 5 A, può essere montata in filtri cross-over per casse da non oltre 100 W su 4 ohm o 200 W su 8 ohm. Per quelli che vogliono proprio sapere tutto, riportiamo la formula che permette di determinare il valore di induttanza di una bobina:

$$L = \frac{\mu \times n^2 \times s}{l}$$

nella quale n è il numero delle spire costituenti l'avvolgimento, s la sezione interna dell'avvolgimento (espressa in m^2) ed l la lunghezza complessiva della bobina (in metri) intesa non come lunghezza del filo che la compone ma come lunghezza lineare dell'insieme. La lettera μ è la permeabilità magnetica del nucleo, che vale: $\mu = \mu_0 \times \mu_r$; la prima è la permeabilità del vuoto e vale $1,256 \times 10^{-6}$ henry/metro, mentre la seconda è detta permeabilità relativa (è adimensionale...) e dipende dal materiale utilizzato. Se l'avvolgimento è in aria, μ_r vale poco più di 1 (1,000004) e perciò la permeabilità si identifica con μ_0 ; se, invece la bobina si avvolge su un nucleo di ferrite o lamierino di ferro al silicio, μ_r può raggiungere valori molto elevati: rispettivamente 1.000 o 1.500. La formula è sufficientemente approssimata ed è tanto più precisa quanto più la lunghezza della bobina è grande rispetto al diametro interno dell'avvolgimento. Naturalmente, se si avvolgono più strati composti da spire affiancate, l'induttanza complessiva è la somma delle induttanze dei singoli strati, ovvero delle bobine elementari formate ciascuna da uno strato.

Verificare le induttanze

Una volta costruita, una bobina può essere misurata per verificare che abbia, nei limiti del 10 % di tolleranza, il valore voluto; la misura può essere condotta con un multimetro, un ponte RLC o, in maniera molto più semplice, disponendo di un piccolo trasformatore avente primario da rete e secondario a 15÷30 V, che eroghi almeno 300 mA. Con il secondario si deve alimentare l'induttanza, interponendo una resistenza dell'ordine di 500÷600 ohm; con un tester, disposto alla misura di tensioni alternate con

fondo-scala di 30 V, si legge la tensione caduta sulla bobina (V_L) e quella sulla resistenza (V_R). Noto che la caduta di tensione è data dal prodotto:

$$V_R = Z \times I$$

e che Z per la resistenza è il valore resistivo, si ricava la corrente che attraversa il circuito:

$$I = V_R/R \text{ o } I = V_R/Z$$

Nota la corrente, che è la stessa per resistenza e induttanza (i due elementi sono in serie tra loro...) si determina l'impedenza della bobina, ovvero, con sufficiente approssimazione, la sua reattanza induttiva:

$$X_L = V_L/I$$

Noto che la reattanza induttiva è data dalla formula:

$$X_L = 2 \pi \times f \times L$$

conoscendo il suo valore e la frequenza (quella della rete elettrica vale 50 Hz) si può determinare il valore di induttanza:

$$L = X_L/2 \pi \times f$$

Il metodo può essere utilizzato anche per ricavare l'induttanza di bobine delle quali non si conosce il valore. Può capitare che elementi di bassa

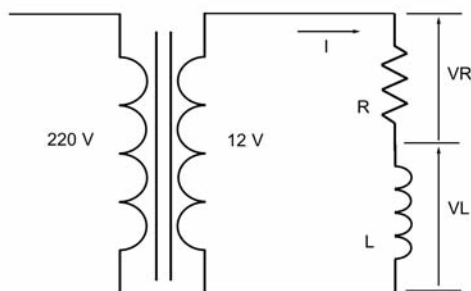


Figura 6.5

Circuito di test per la misura delle induttanze. La resistenza serie va scelta di valore tale da non sovraccaricare il secondario del trasformatore.

induttanza diano tensioni molto ridotte; in tal caso conviene ridurre la resistenza serie usata per la misura o il fondo-scala del multimetro. Riguardo alla resistenza, il suo valore si può calcolarlo dividendo la tensione del secondario per la corrente da esso erogabile. Deve dissipare una potenza pari a quella del secondario.

Usare le resistenze

Nel progettare un cross-over o nel perfezionarlo durante le prove di ascolto della cassa nella quale viene montato, può rendersi necessario porre resistenze in serie ad uno o più altoparlanti: spesso capita con il mid-range, perché tende a farsi sentire troppo, ma non è infrequente che si faccia con un tweeter la cui efficienza è decisamente maggiore di quella del woofer con cui lavora. Attenzione: se si introduce una resistenza in serie ad un altoparlante il corrispondente filtro va calcolato considerando come impedenza la somma di quella propria dell'altoparlante e del valore della resistenza. Quindi usando un resistore da 1 ohm con un altoparlante da 8 ohm l'impedenza da considerare è 9 ohm.

Le resistenze vanno scelte della potenza adatta, altrimenti possono surriscaldarsi e bruciarsi; questo perché, diversamente da bobina e condensatore, la resistenza non si limita a impegnare la potenza elettrica e poi a restituirla, ma la dissipa, sotto forma di calore. Per il dimensionamento va considerata la potenza alla quale lavora l'altoparlante cui viene posta in serie e non quella della cassa; tale potenza si ricava dalla tensione che giunge all'altoparlante (ovviamente entro la banda passante del rispettivo filtro) secondo la formula del partitore resistivo:

$$V_a = \frac{V_i \times Z}{R + Z}$$

Nella formula Z è l'impedenza dell'altoparlante, mentre R è la resistenza che gli si porrà in serie; V_i è la tensione d'ingresso della cassa. Si noti che teoricamente prima si dovrebbe definire la tensione di lavoro dell'altoparlante, quindi calcolare la resistenza con la precedente formula modificata per ottenere, appunto, R ; tuttavia difficilmente si procede così, sia perché non sempre si ha a disposizione la curva di emissione (pressione sonora) degli altoparlanti rapportata alla tensione di alimentazione, sia perché è più semplice aggiustare l'emissione durante delle prove pratiche (ascolto).

Comunque sia, nota la tensione che raggiunge l'altoparlante, si ricava la corrente con la formula: $I_a = V_a/Z$.

Siccome la corrente che attraversa l'altoparlante è la stessa della resistenza che gli sta in serie, la si usa per il calcolo della potenza del resistore:

$$Pr = I^2 \times R$$

Ecco subito un esempio pratico di calcolo: in una cassa da 100 watt su 8 ohm si supponga di aver trovato, dopo alcune prove, che un altoparlante mid-range da 8 ohm lavori al meglio con in serie una resistenza limitatrice da 2 ohm; la potenza della resistenza si calcola con la solita formula.

$$Pr = I^2 \times 8 \text{ ohm}$$

Per trovare la corrente, si parte dalla tensione che raggiunge l'altoparlante:

$$V_a = \frac{V_i \times Z}{R + Z}$$

Dato che la cassa è da 100 W/8 ohm, la tensione d'ingresso V_i vale:

$$V_i = \sqrt{P \times Z} = \sqrt{100 \times 8} = \sqrt{800} = 28,28 \text{ V}$$

Si noti che in questo calcolo Z è l'impedenza della cassa acustica. La tensione sull'altoparlante vale:

$$V_a = \frac{V_i \times Z}{R + Z} = \frac{28,28 \times 8}{2 + 8} = \frac{226,24}{10} = 22,624 \text{ V}$$

La corrente che attraversa l'altoparlante e il resistore di limitazione vale:

$$I = 22,624/8 = 2,828 \text{ A}$$

Quindi, la potenza che il resistore dovrà dissipare varrà:

$$Pr = I^2 \times R = (2,828)^2 \times 2 = 15,99 \text{ W}$$

La resistenza andrà scelta da almeno 15 watt; l'ideale sarà porre in serie due elementi da 1 ohm, 9 W. In questo caso sarà inevitabile adoperare resistenze a filo, visto che sono le uniche in grado di dissipare certe potenze.

Resistenze variabili

Talvolta, piuttosto che mettersi a fare prove con svariati valori di resistenze, per limitare la corrente e quindi la presenza di un altoparlante tweeter o (più raramente) mid-range, può essere conveniente utilizzare resistenze variabili. Insomma, potenziometri a filo capaci di reggere potenze di alcuni watt e che quindi possono essere collegati in serie agli altoparlanti, in funzione di reostato. In commercio si trovano diversi tipi di tali potenziometri, solitamente a perno; esternamente sono provvisti di una manopola con la quale si può agevolmente variare la resistenza inserita e con essa il volume sonoro dell'altoparlante (Figura 6.6).

I potenziometri per tweeter sono già predisposti per il montaggio ad incasso perché hanno la forma “a vaschetta”; quindi bisogna fare un foro sul pannello frontale (o su quello posteriore) di diametro adatto ed introdurli a fondo, poi fissarli con le viti del caso e, possibilmente, sigillare il foro con del silicone o una guarnizione applicata dietro la flangia di fissaggio.

Attenuazione e rotazione di fase

Dallo studio dei cross-over è divenuto evidente un loro aspetto: se è vero che un filtro a maggiore pendenza di attenuazione determina una più precisa ripartizione delle frequenze, è vero altresì che comporta una maggiore rotazione di fase. Come già spiegato a proposito dei singoli componenti reattivi (condensatore e induttanza) ogni cella elementare determina uno sfasamento tra il segnale entrante e quello diretto al rispettivo altoparlante proporzionale alla frequenza; lo sfasamento è nullo:

- ☐ in corrente continua per i filtri passa-basso;
- ☐ a frequenza infinita per i filtri passa-alto.

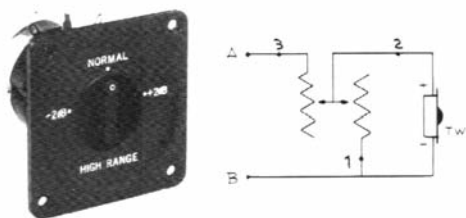


Figura 6.6

Per regolare a piacimento la presenza di un tweeter, esistono potenziometri di potenza che si collegano in serie ad uno dei fili che dal cross-over vanno all'altoparlante (connessione a reostato).

Il massimo sfasamento che può esservi tra il segnale di ingresso e quello di uscita dipende dalla complessità del filtro e può valere 90 gradi (in anticipo o in ritardo dipende dal tipo di filtro, ossia dal fatto che sia passa-alto o passa-basso) per ogni cella elementare; più esattamente:

- ❑ 90 ° per le celle del prim'ordine (6 dB/ottava);
- ❑ 180 ° per le celle del second'ordine (12 dB/ottava);
- ❑ 270 ° per le celle del terz'ordine (18 dB/ottava).

Lo sfasamento del cross-over ha un'importanza notevole perché in banda può invertire la fase del segnale; in conseguenza di ciò, in taluni casi può rendersi necessario collegare al contrario (con il + sulla massa comune) l'altoparlante posto all'uscita di un filtro. Altrimenti l'altoparlante emette un suono in opposizione di fase e l'ascolto è temporalmente incoerente, in quanto le sue frequenze giungono diversamente da quelle degli altri. Tale accorgimento è utile usando filtri LC o CL, che danno normalmente uno sfasamento di 90° in corrispondenza della frequenza di taglio e di quasi 180° verso il limite della loro banda. Inoltre va considerato attentamente perché può determinare instabilità dell'amplificatore di potenza collegato alla cassa: infatti la presenza di molte componenti reattive può determinare oscillazioni, causa lo sfasamento introdotto nel segnale retroazionato, sfasamento tanto maggiore quanto più alta è l'impedenza di uscita dello stadio finale. In altre parole, casse con filtri di terz'ordine possono far autooscillare l'amplificatore. Per questo è raccomandabile usare filtri del genere solo con amplificatori caratterizzati da elevato fattore di smorzamento.

La fase degli altoparlanti

Normalmente gli altoparlanti vanno collegati al cross-over facendo in modo che il loro negativo vada sulla linea comune che confluisce sul morsetto “-“ dell'ingresso della cassa. Per identificare i poli di ciascun trasduttore basta guardare i contatti: solitamente viene evidenziato almeno il polo positivo, segnandolo con un “+” o con un punto rosso.

Se i contatti dell'altoparlante non sono contrassegnati, bisogna identificare positivo e negativo con questa semplice prova: con due fili si porta la tensione di una pila da 9 volt ai contatti e si verifica come si sposta la membrana; se lo spostamento è in avanti, il morsetto positivo dell'altoparlante è quello collegato al polo positivo della pila e, ovviamente, il negativo è quello che fa capo al polo negativo della solita pila. Se, invece, lo spostamento è all'indietro, il polo “+” della pila sta sul morsetto negativo e il polo “-“ tocca il negativo dell'altoparlante.

Frequenza d'incrocio

Ora che avete visto come funzionano i filtri potete comprendere cosa sono le frequenze di incrocio specificate nei dati tecnici dei cross-over: si tratta, in buona sostanza, delle frequenze alle quali le curve di risposta si incontrano. Quindi se un cross-over ha una frequenza di incrocio di 4.000 Hz significa che la curva di risposta del filtro passa-basso incontra quella del passa-alto a 4 kHz; non significa affatto che i filtri hanno entrambi una frequenza di taglio di 4 kHz! Anzi, hanno sicuramente frequenze di taglio differenti e tanto distanti quanto minore è la pendenza di attenuazione.

Le frequenze di incrocio dei cross-over sono molto importanti perché determinano in che modo e per quale spettro delle audiofrequenze un altoparlante emette insieme ad un altro: la sovrapposizione determina infatti un'emissione, in corrispondenza di ciascuna frequenza, pari alla somma delle emissioni dei singoli trasduttori.

Il discorso riveste una notevole importanza perché spiega come mai, malgrado i calcoli teorici delle celle filtranti componenti un cross-over, determinate note prevalgano sulle altre. Ad esempio, se un woofer ed un tweeter filtrati ciascuno da una cella a 6 dB/ottava si incrociano quando hanno ciascuno un livello di tensione pari alla metà, in corrispondenza della frequenza di incrocio la resa corrispondente è pari all'intero, ovvero alle frequenze non attenuate. Questo, s'intende, se entrambi gli altoparlanti hanno la medesima efficienza, perché se uno prevale le sue note si sentiranno di più. C'è poi il discorso riguardante la sensibilità dell'orecchio: se la sovrapposizione cade nella gamma di maggiore sensibilità (vedere l'audiogramma nel Capitolo 1, Figura 1.2) occorre attenuare gli altoparlanti che emettono in tale banda, ovvero distanziare le frequenze di taglio, allo scopo di far arri-

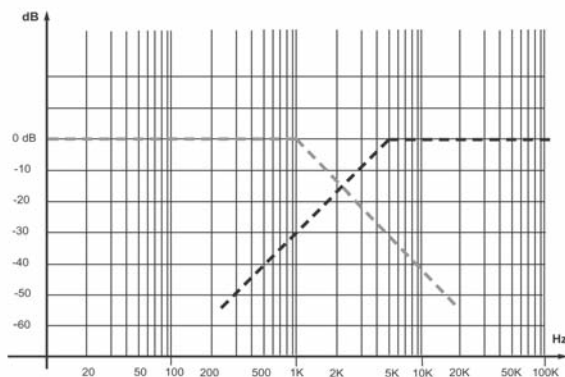


Figura 6.7
La frequenza di incrocio di un filtro cross-over a due vie è quella alla quale le curve dei singoli filtri si incontrano. Se il cross-over è composto da tre filtri le frequenze di incrocio sono due.

vare alla sovrapposizione quando l'ampiezza di ciascun elemento è minore. Insomma, bisogna creare una sorta di buco nella curva di risposta.

Questa introduzione serve a far comprendere come i calcoli delle frequenze di taglio delle singole celle componenti un cross-over vadano finalizzati a far incrociare le curve di risposta nel punto che consenta la riproduzione ottimale, ovvero quella che il progettista preferisce.

Prima di calcolare e costruire ogni singolo filtro conviene dotarsi di carta quadrettata o, meglio ancora, logaritmica, quindi tracciare su di essa l'andamento della risposta in frequenza. Decisa la frequenza di taglio e ipotizzata quella che può essere la pendenza di attenuazione, si prova a tracciare la curva ideale del filtro; quest'ultima è una retta, quindi è molto semplice disegnarla su qualsiasi foglio. Fatto ciò si ripete la cosa per le altre celle filtranti, avendo l'accortezza di utilizzare penne o matite di colori differenti, così da poter distinguere le singole risposte. Alla fine del disegno, se le scale di frequenza e attenuazione sono state graduate correttamente, è assai semplice vedere quali sono i punti di incrocio. Per determinare la risposta teorica complessiva della cassa acustica, basta sommare le ampiezze dovute alle singole curve, punto per punto: ad esempio, se nel grafico di una cassa a due vie si va a vedere in corrispondenza dei 1.500 Hz e si vede che il woofer dà -6 dB rispetto alla sua banda e il tweeter è anch'esso a -6 dB, se ne deduce che la risposta è a 0 dB. Si parla di risposta teorica perché in pratica bisogna vedere qual è l'efficienza dei singoli trasduttori: infatti se il woofer rende 88 dB/w/m e il tweeter 91 dB/w/m è ovvio che in ascolto la sensazione che si otterrà sarà ben diversa, perché la curva tenderà ad impennarsi man mano che il tweeter comincerà a farsi sentire. Inoltre c'è da considerare l'attenuazione fuori banda dei singoli alto-

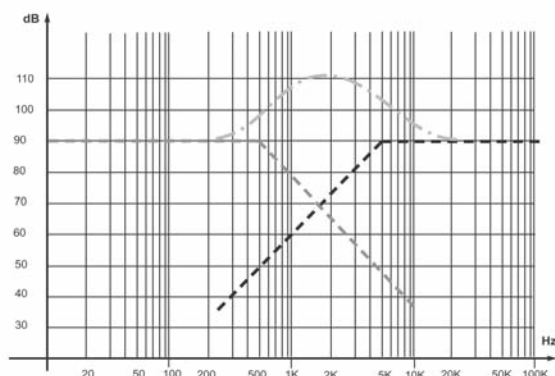


Figura 6.8

Per vedere graficamente la risposta in frequenza di una cassa acustica, bisogna tracciare su carta millimetrata o quadrettata le curve dei filtri usati nel cross-over e sommare i valori punto per punto.

parlanti, che va sommata a quella del filtro. Già, perché gli altoparlanti, fuori della propria banda, danno una resa acustica che cala di $18\div24$ dB/ottava ($60\div80$ dB/decade). Quindi, se il filtro attenua di 20 dB/decade fuori dalla propria banda, la risposta dell'altoparlante cui è collegato risente di tale calo di resa, almeno fin quando non si raggiunge il limite della curva di risposta propria dell'altoparlante; raggiunta questa, l'attenuazione si somma, quindi ai 20 dB/decade si aggiungono da 60 a 80 dB/decade.

Facciamo un esempio considerando un woofer che ha come risposta in frequenza $50\div2.000$ Hz e che fuori banda attenua di 60 dB/decade; colleghiamolo all'uscita di un filtro passa-basso a 20 dB/decade la cui frequenza di taglio è 1 kHz. Trascurando i 3 dB di attenuazione in corrispondenza della frequenza di taglio, vediamo che il suono emesso è attenuato di 60 dB/decade sotto i 50 Hz, mentre sopra i 1.000 Hz cala inizialmente di 20 dB/decade, per poi arrivare a 80 dB/decade oltre i 2 kHz.

Concludendo questo capitolo, diciamo che in linea di massima, a meno di non prediligere l'effetto presenza (ossia la predominanza dei toni medi) conviene distanziare opportunamente le frequenze di taglio dei filtri in modo da far sì che, almeno sulla carta, la risposta teorica presenti un'attenuazione di qualche dB tra 1 e 4 kHz. Per quanto ciò possa apparire errato, in realtà permette un ascolto più equilibrato, perché l'orecchio è molto più sensibile ai toni medi che agli altri, quindi li sente bene anche se nella pratica gli altoparlanti li emettono con minore intensità.

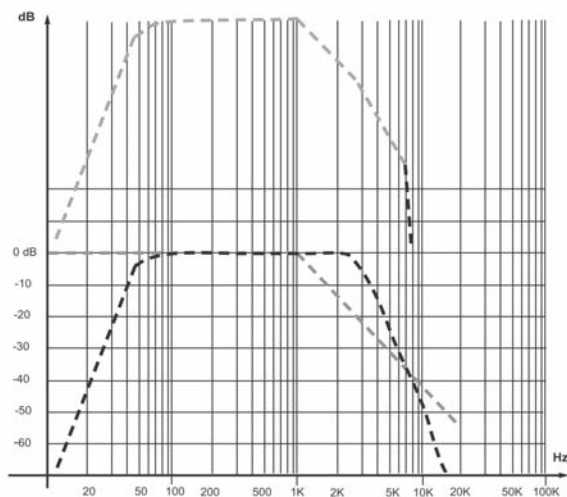


Figura 6.9

In alto, la curva risultante dalla somma di quella del filtro (tratto grigio in basso) e dell'altoparlante (tratto nero in basso).

Sistemi di casse

Il canonico impianto per la riproduzione del suono è composto da due diffusori, ciascuno dei quali si occupa di riprodurre la parte di note corrispondenti ad un canale della stereofonia e quindi a una delle due porzioni in cui una registrazione diffusa radiofonicamente o su supporto magnetico, ottico o inciso è divisa. Così è stato fino a circa quindici anni fa. Oggigiorno non ci si accontenta più della riproduzione stereofonica e sempre più persone apprezzano i sistemi Home-Theatre e comunque quelli composti da almeno tre diffusori. Ciò perché una rappresentazione musicale si sente meglio se viene riprodotta da più casse, opportunamente disposte nello spazio circostante e, magari, pilotate con segnali che, opportunamente elaborati, danno un ascolto più realistico, grazie al fatto che l'ascoltatore è investito da suoni provenienti da diverse direzioni: esattamente come avviene quando si ascolta un concerto dal vivo.

I sistemi di casse acustiche prevedono diffusori ausiliari, che possono essere da uno a tre a seconda di ciò che si vuole realizzare. Per quelli più sofisticati, la ripartizione delle frequenze viene affidata ad apparati elettronici esterni alle casse; anzi, sovente è svolta all'interno dell'amplificatore da filtri cross-over attivi. Scopo di questo capitolo è spiegare come sono realizzati i sistemi di casse acustiche con cross-over passivi ed attivi.

Sistemi con subwoofer

Le note basse si propagano essenzialmente in maniera uniforme nello spazio circostante l'altoparlante che le emette; ecco perché alle volte conviene separare l'unità che produce le note gravi, specialmente quelle più profonde, e collocarla in prossimità di un angolo della stanza o dietro al divano. Risultato: i bassi si sentono sempre e comunque, forse anche meglio.

Della riproduzione dei bassi più profondi si occupano particolari altoparlanti detti subwoofer: si tratta di unità capaci di riprodurre frequenze anche inferiori all'udibile, ossia sotto i 20 Hz. Siccome i subwoofer sono solitamente di grandi dimensioni, si costruisce per loro una cassa a parte. La cassa è una sola perché l'altoparlante per i superbassi è unico; non ne servono due, come i diffusori della stereofonia, per il motivo appena esposto: le note gravi si propagano nello spazio e non direzionalmente, quindi, anche separando i bassi di ciascun canale e assegnandoli ciascuno ad un altoparlante, l'ascolto non sarebbe differente, perché difficilmente ci si accorgerebbe di quali bassi giungono da sinistra e di quali arrivano, invece, da destra. Nei sistemi con subwoofer le due casse della stereofonia prendono il nome di "satelliti" e possono essere più piccole di quelle tradizionali, il che permette all'ascoltatore di collocarle con maggiore facilità anche su piccoli mobili o su eleganti piedistalli ai lati della stanza di ascolto.

Prevedendo di usare una sola cassa, i costruttori di subwoofer realizzano solitamente i loro altoparlanti con doppia bobina mobile: si tratta di trasduttori che hanno avvolte sullo stesso supporto due bobine mobili, ciascuna delle quali ha propri terminali ed è galvanicamente separata dall'altra. Ogni bobina verrà pilotata dal segnale di un canale dell'amplificatore, mediante un cross-over o senza. Esistono, tuttavia, subwoofer a singola bobina: si tratta di altoparlanti destinati ad equipaggiare particolari diffusori acustici ai quali si chiede una risposta molto estesa sulle note basse. I subwoofer a singola bobina vengono comunque usati per realizzare l'unità dei superbassi: in tal caso sono pilotati da un apposito amplificatore che dà loro la banda che gli compete, oppure mediante un cross-over che, oltre a tagliare le frequenze basse, medie e alte, miscela i segnali dei due canali.

Sistemi passivi

I più semplici sistemi stereo con subwoofer si realizzano preparando due casse acustiche satellite simili a quelle della stereofonia ed una per il

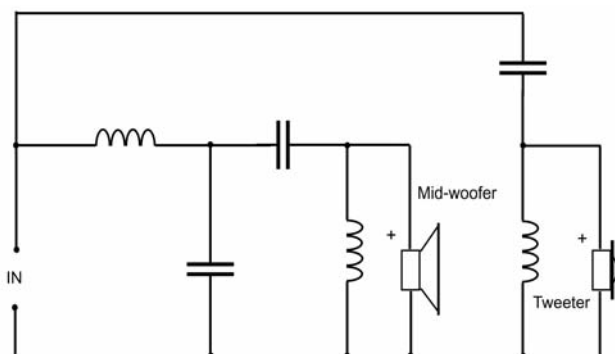


Figura 7.1
Schema di un
satellite per sistemi
con subwoofer
e del relativo filtro
cross-over.

subwoofer; non sono proprio uguali perché differiscono nel cross-over. Infatti, visto che i bassi li tratta il subwoofer, i woofer delle casse possono avere una risposta in frequenza poco estesa verso il basso e che parta, ad esempio da $70 \div 100$ Hz; più che un woofer, quello di ciascun satellite è un mid-woofer.

Essendoci un'unità che si occupa delle frequenze inferiori della gamma audio, il filtro del mid-woofer è come quello di un mid-range, ossia un passa-banda (Figura 7.1).

Quanto al subwoofer, il suo filtro è, in versione stereofonica, come mostrato dalla Figura 7.2: si tratta di un passa-basso a due vie, del secondo ordine. La pendenza di 12 dB/ottava è auspicabile per evitare la sovrapposizione con i mid-woofer dei satelliti. Per il dimensionamento valgono le formule già viste nel Capitolo 5, e vanno applicate a ciascuno dei filtri:

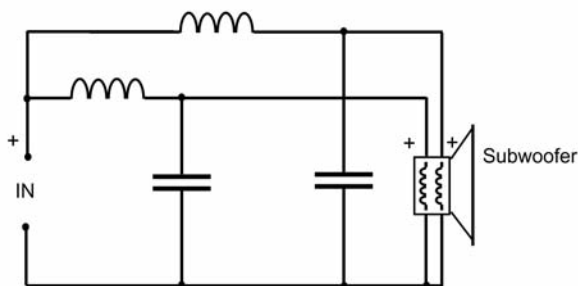


Figura 7.2
Schema del cross-over
utilizzato nei subwoofer
a doppia bobina; l'uscita
di ciascun filtro LC deve
essere collegata agli
elettrodi di una delle
bobine dell'altoparlante,
rispettando la polarità
indicata.

$$L = \frac{Z}{0,707 \times 2 \pi \times fts}$$

che dà il valore delle induttanze (sono entrambe dello stesso valore) e:

$$C = \frac{0,707}{2 \pi \times Z \times fts}$$

che permette di ottenere i valori dei condensatori, uguali anch'essi.

Sistemi attivi

Molti impianti a tre canali prevedono che il subwoofer e i satelliti ricevano segnali già separati da un filtro attivo inserito nell'amplificatore: quest'ultimo ha, perciò, tre sezioni ed altrettante uscite: una (monofonica) per il sub e due (stereofoniche) per i satelliti. In sistemi del genere il subwoofer non richiede alcun cross-over: si connette direttamente all'uscita ad esso riservata dall'amplificatore.

Il filtro interno è solitamente attivo, ma può anche essere passivo; normalmente viene collocato all'uscita del preamplificatore e prima degli amplificatori di potenza. La Figura 7.3 mostra lo schema a blocchi di un amplificatore a tre canali provvisto di filtro per separare i segnali dei satelliti da quello del subwoofer. Il filtro è un passa-basso con pendenza di 40 dB/decade e filtra il segnale diretto al finale di potenza che piloterà il subwoofer; quest'ultimo può tranquillamente essere del tipo a singola bobina, dato che il se-

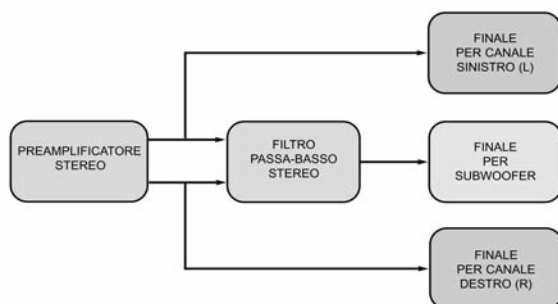


Figura 7.3

Sistema con subwoofer attivo: l'amplificatore incorpora un filtro posto tra l'uscita del preamplificatore e i finali, che sono tre e servono due per i satelliti (canali L ed R) e il terzo esclusivamente per il subwoofer.

gnale mono lo riceve dal suo amplificatore. Ai satelliti provvedono i soli amplificatori dei canali sinistro e destro, che possono amplificare l'intero spettro audio oppure, in alcuni casi, essere a loro volta filtrati con filtri passa-alto posti prima dei loro ingressi, in modo da non riprodurre la gamma assegnata al subwoofer. Nel caso del sistema attivo non è determinante filtrare i segnali diretti agli amplificatori dei satelliti, né usare, nei satelliti stessi, filtri cross-over che abbiano il passa-banda sul woofer (Figura 7.1); ciò, essenzialmente per due ragioni: innanzitutto subwoofer e satelliti sono pilotati da amplificatori di potenza distinti, quindi se anche lavorano con la stessa frequenza non c'è il rischio di sovraccarico tipico dell'amplificatore unico. Insomma, gli altoparlanti possono sovrapporsi quanto alle note emesse, ma non elettricamente. Il secondo motivo è che tipicamente i satelliti sono casse con mid-woofer, la cui frequenza di risonanza è superiore a 60-70 Hz, quindi anche senza tagliare inferiormente la banda passante è difficile che arrivino a sovrapporsi al subwoofer, il cui filtro non taglia mai sopra i 100 Hz; e comunque la sovrapposizione non può che far bene, tanto i bassi hanno poca presenza.

Filtri elettronici

Spiegato come si realizza il sistema audio con subwoofer e satelliti, si può dare uno sguardo ai circuiti elettronici che filtrano il segnale prima dell'amplificatore. Nel caso dei filtri passivi, gli schemi sono grosso-modo quelli già visti per i cross-over da montare nelle casse: solitamente si usano celle a resistenza e condensatore (le induttanze non servono) di tipo passa-basso e passa-alto, oppure passa-banda. Di seguito verranno esaminati i primi due tipi (Figura 7.4).

Siccome le celle ad RC hanno pendenza di attenuazione limitata a 6 dB/ottava (20 dB/decade) si usa metterne in cascata almeno due: ciò per ottenere l'attenuazione di almeno 40 dB/decade, indispensabile per tagliare ade-

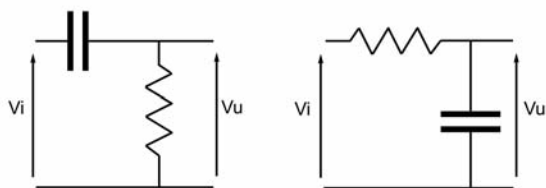


Figura 7.4
Filtri ad RC: a sinistra
il passa-alto e a destra
il passa-basso.

guatamente la banda passante di un subwoofer. Per quel riguarda le celle passive, nota la frequenza di taglio desiderata e imposto il valore della resistenza, si può determinare il valore del condensatore con la formula:

$$C = \frac{1}{2 \pi \times R \times f_{ti}}$$

In essa C risulta in farad se f_{ti} è in hertz e R (la resistenza) in ohm; siccome usualmente si preferisce esprimere la capacità dei condensatori in sottomultipli del farad, quali il microfarad (1/1.000.000 di farad) conviene rivedere la predetta formula. Ad esempio, con la seguente:

$$C = \frac{1.000.000}{2 \pi \times R \times f_{ti}}$$

Volendo si può procedere al contrario, cioè decidere il valore del condensatore e ricavare quello della resistenza con la formula:

$$R = \frac{1}{2 \pi \times C \times f_{ti}}$$

Conviene comunque imporre il valore della resistenza e poi calcolare quello del condensatore, in quanto la resistenza è molto importante: va scelta in modo che sia molto minore dell'impedenza di ingresso dello stadio (l'amplificatore di potenza per il subwoofer o per uno dei satelliti) che segue il filtro; ciò per evitare eccessiva attenuazione del segnale; in linea di massima va bene almeno cinque volte minore. Quindi, se il finale ha 50 kohm di impedenza d'ingresso, la resistenza deve essere minore di 10 kohm.

Da notare che le formule sono le stesse per entrambe le celle passa-basso (R/C e passa-alto (C/R).

Vi sono anche i filtri attivi, tipicamente basati su amplificatori operazionali, che sono facili da realizzare e risentono meno dell'impedenza d'ingresso dello stadio (finale di potenza) che li segue; inoltre hanno il pregio di non determinare perdite di segnale, neppure quando se ne collega più di una in serie, difetto, questo, tipico delle celle passive ad RC. I filtri attivi sono con-

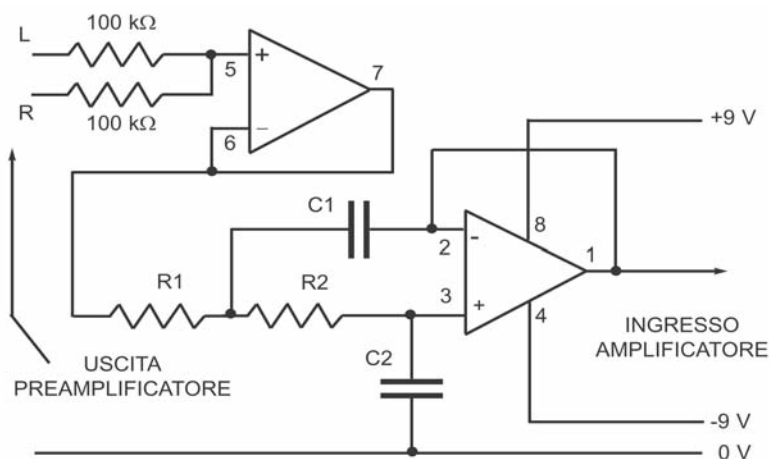


Figura 7.5

Schema elettrico di un filtro attivo del secondo ordine, passa-basso, preceduto da un miscelatore; trasforma il segnale dell'uscita stereo del preamplificatore in uno mono, che poi viene filtrato per essere inviato all'ingresso del finale di potenza dedicato al subwoofer. Il doppio operativo è un TL072/082 o un LS4558.

figuratei come mostrano la Figura 7.5 e la 7.6, almeno per quel che riguarda le celle di secondo ordine, che sono le più usate. Per il dimensionamento dei componenti vale la relazione (le resistenze R1 ed R2 sono uguali ad R):

$$f_{ts} = \frac{1}{2\pi \times R \sqrt{C1 \times C2}}$$

Per ottenere un comportamento stabile e una risposta la più simile possibile a quella del filtro ideale, bisogna che il filtro risponda alle caratteristiche del cosiddetto "allineamento di Butterworth"; per fare ciò, deve esistere la seguente relazione tra C1 e C2:

$$C2 = 0,707^2 \times C1.$$

Se preferite, si può dire che, imposto il valore del condensatore C2, C1 può essere così calcolato: $C1 = C2/0,707^2$.

Le formule valgono indifferentemente per il filtro passa-basso e per quello passa-alto. Lo schema della Figura 7.5 è realizzato con un doppio operazionale di tipo TL072, TL082, LS4558, LM358, LM1458 e simili; tutte le resistenze sono da 1/4 di watt con tolleranza al 5 %. I condensatori possono essere ceramici o in poliestere. Il circuito della Figura 7.6 è realizzato con un amplificatore operazionali di uso comune: TL081 o TL071. Visto che, solitamente, si realizzano amplificatori stereo, conviene realizzare un esemplare doppio con doppi operazionali di tipo TL072, TL082, LS4558, LM358, LM1458 e simili. Per quel che riguarda l'operazionale singolo, le linee di alimentazione positiva e negativa fanno capo, rispettivamente, al piedino 7 ed al 4; l'ingresso non-invertente (+) è il 3 e l'invertente (-) il 2, mentre l'uscita è localizzata al piedino 6.

Calcolo dei filtri elettronici

Bene, prima di concludere è il caso di fare qualche esempio di calcolo di filtro attivo, riferito allo schema di Figura 7.5; si ipotizza di tover tagliare un subwoofer a 100 Hz usando, come resistenze R1 ed R2, due elementi di ugual valore, da 22 kohm. Si parte calcolando il valore del C1:

$$C1 = \frac{1}{2 \pi \times f_{ts} \times R \times 0,707} = \frac{1}{2 \pi \times 100 \times 22.000 \times 0,707} = 0,1 \mu F$$

Ora si può determinare anche il valore del condensatore C2:

$$C2 = 0,707^2 \times C1 = 0,5 \times 0,1 \mu F = 0,05 \mu F.$$

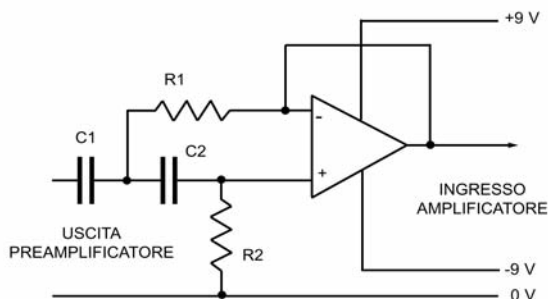
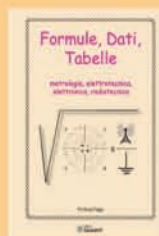


Figura 7.6
Schema elettrico di un filtro attivo del secondo ordine, passa-alto: si può usare, prima dei finali dedicati ai satelliti, per tagliare le frequenze riservate al subwoofer.

SAPERE E SAPER FARE CON I LIBRI SANDIT!

**SPECIALE
WORKS
BOOK**



Cod. 5361 - pag. 110 - € 11,00

Formule, Dati, Tabelle



Cod. 5313 - pag. 128 - € 12,90

La Meccanica Classica



Cod. 5384 - pag. 102 - € 12,90

La Televisione Digitale Terrestre



Cod. 5101 - pag. 256 - € 22,00

Programmare? Impariamo con LabVIEW



Cod. 5402 - pag. 236 - € 22,50

Consigli Pratici per il Fermodellista



Cod. 5405 - pag. 206 - € 14,90

Il Manuale del Carrozziere Autoriparatore



Cod. 5408 - pag. 348 - € 14,90

Dizionario Enciclopedico



Cod. 53197 - pag. 128 - € 13,90

Elettronica? Facile!



Cod. 5382 - pag. 192 - € 19,90

Radioastronomia



Cod. 5125 - pag. 112 - € 9,90

Introdurre MySQL in C#



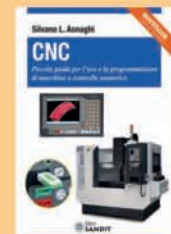
Cod. 5396 - pag. 380 - € 23,50

Microcontroller



Cod. 5290 - pag. 144 - € 12,90

Arduino



Cod. 5365 - pag. 96 - € 11,00

CNC



Cod. 5409 - pag. 64 - € 6,95

Primi passi con Intel Galileo



Cod. 5381 - pag. 114 - € 12,50

Lavorare con Raspberry Pi

OLTRE 300 LIBRI DEDICATI A...

ASTRONOMIA - RADIOASTRONOMIA - AUDIO HI-FI - AUTOMAZIONE - DIVULGATIVI SCIENTIFICI - DOMOTICA - ELETTROMAGNETISMO - ELETTROMEDICALI - ELETTRONICA - ELETTROTECNICA - ENERGIE ALTERNATIVE E RINNOVABILI - EQUIVALENZE - ESPERIMENTI SCIENTIFICI - FAI DA TE - FISICA - FREQUENZE - SEGNALI RADIOAMATORIALI - GUGLIELMO MARCONI - ILLUMINOTECNICA - IMPIANTISTICA - INFORMATICA - ITINERARI TURISTICI CULTURALI - MAKERS - MECCANICA - MECCANICA AUTO - MICROSCOPIA - MODELLISMO - NAUTICA - RADIO D'EPOCA, SURPLUS - RADIOAMATORE, ANTENNE - RADIOAMATORI - RADIOAMATORIALI STORICI - RADIOASCOLTO - RADIORIPARAZIONI - RADIOTECNICA - ROBOTICA - SCIENZA - SCIENZIATI, INVENTORI E INVENZIONI - STORIA RADIO, TV, ELETTRONICA - STRUMENTI DI MISURA - TELECOMUNICAZIONI - TESLA

www.sanditlibri.it

Questo volume è rivolto a chi vuole costruirsi in casa le proprie casse acustiche; passo dopo passo, spiega i concetti fondamentali del suono, la teoria degli altoparlanti, lo scopo e il funzionamento delle casse acustiche, dando le nozioni e le formule indispensabili per abbinare più altoparlanti e dimensionare la cassa affinché funzionino nella maniera ottimale. Particolare risalto viene dato ai filtri cross-over e al loro utilizzo, senza trascurare un cenno ai filtri elettronici usati nei sistemi con subwoofer.

Nel costruire le vostre casse potrete scoprire il piacere di curare ogni dettaglio, la soddisfazione di esporre in bella mostra il frutto della propria fatica e la consapevolezza di avere, collegate all'hi-fi, casse che suonano proprio come si desidera.

€ 7,49



www.sanditlibri.it