

# 4

## *Caricamenti acustici*

“Chi sa di non sapere è il più sapiente; chi invece crede di sapere ciò che non sa è il più debole di mente; chi riconosce che è malato di mente colui che crede di sapere tutto, questi è saggio.”

Lao-Tze

*In questo capitolo verrà analizzato nel dettaglio il comportamento a bassa frequenza degli altoparlanti. Per modificare la risposta in frequenza e migliorare l'efficienza dei trasduttori alle frequenze più basse questi vengono inseriti in un apposito contenitore che ne modifica fattore di merito e frequenza di risonanza. Verranno quindi analizzati diversi caricamenti acustici e il loro modello sarà integrato a quello di piccolo segnale dell'altoparlante*

### **4.1 IL CORTOCIRCUITO ACUSTICO**

Per la riproduzione delle basse frequenze la cassa acustica svolge un ruolo fondamentale nel modificare la risposta in frequenza del woofer impiegato e nell'eliminare il cortocircuito acustico. In questo spettro di frequenze vengono tipicamente impiegati altoparlanti a cono dal cestello aperto posteriormente, in questo caso, però, la faccia anteriore e posteriore della membrana si comportano come sorgenti sonore aventi stessa intensità ma fase opposta e sono separate da uno spazio confrontabile con le lunghezze d'onda dei segnali riprodotti. Per frequenze inferiori a quella la cui lunghezza d'onda è pari al doppio del diametro della membrana la radiazione frontale e quella posteriore del woofer in aria libera interagiscono producendo una cancellazione sempre più deleteria al decrescere della frequenza.

### **4.2 INTRODUZIONE AI CARICAMENTI ACUSTICI**

Sono stati sperimentati, prodotti e anche brevettati molti sistemi di caricamento per un altoparlante in gamma bassa; partendo dalla necessità primaria di controllare le due radiazioni anteriore e posteriore del woofer sono gli obiettivi che si pone il progettista a indirizzarlo verso un tipo particolare di accordo.

Se al principio dell'elettroacustica il progetto e la verifica di un sistema veniva effettuato per via empirica, a seguito del lavoro di modellizzazione svolto da Thiele e Small si è potuto analizzare il sistema altoparlante – cassa nella sua interezza. Poterono essere così analizzate diverse soluzioni, e la loro ottimizzazione si avvantaggiò della riduzione dei tempi consentita da uno studio effettuato sui modelli piuttosto che in falegnameria e camera anecoica.

Ovviamente ogni modello, essendo una semplificazione della realtà, ha i suoi limiti (e molti di questi limiti sono stati analizzati nel capitolo precedente), ma avere a disposizione una descrizione matematica, seppur semplificata, dell'oggetto in analisi permette decisivi passi in avanti nella ricerca.

Alcuni obiettivi che possono venir presi in esame dal progettista del sistema sono:

- Dimensioni: all'interno di un diffusore la parte dedicata alla gamma bassa è normalmente la più voluminosa. Il woofer deve poter muovere grandi quantità d'aria, e il suo caricamento necessita di un determinato volume, dal quale dipenderanno le caratteristiche di riproduzione delle frequenze inferiori;
- Peso: il materiale utilizzato per la cassa, il numero di camere e condotti, la quantità di rinforzi, sono tutti parametri che determinano la trasportabilità e l'utilizzabilità del sistema, soprattutto in ambito professionale;
- Estensione della gamma bassa: a seconda della destinazione del prodotto può essere richiesta o meno la riproduzione delle prime ottave;
- Tenuta in potenza: la copertura di vaste aree o la necessità di elevate pressioni sonore presuppone, a parità di efficienza, la capacità di gestire elevati stimoli elettrici;
- Efficienza: un elevato rendimento elettroacustico permette di impegnare meno energia elettrica e semplifica i problemi di dissipazione termica all'interno degli altoparlanti.

Questi, assieme all'esperienza acquisita, guidano nella scelta del sistema più adatto.

#### **4.2.1 RADIAZIONE DIRETTA E INDIRETTA**

Una suddivisione importante può essere fatta analizzando il tipo di radiazione, il modo in cui il driver si accoppia con l'ambiente.

Un sistema a radiazione diretta vede l'altoparlante direttamente affacciato all'aria circostante senza l'interposizione di alcun dispositivo. Per frequenze basse il sistema può essere assimilato ad un pistone rigido di sezione pari a quella dell'altoparlante, o del gruppo di altoparlanti, utilizzato.

In un sistema a radiazione indiretta la radiazione sonora viene effettuata da un dispositivo diverso dall'altoparlante, entrambe le facce del woofer non sono a contatto con l'ambiente. L'accoppiatore può essere costituito da un condotto, da una tromba o da un radiatore passivo, e in

questo caso è la sezione terminale del radiatore ad essere presa come riferimento per un'eventuale semplificazione a pistone rigido.

#### 4.2.2 CLASSIFICAZIONE DEI CARICAMENTI ACUSTICI

Un elenco di tutti i metodi di caricamento inventati e sviluppati sarebbe eccessivamente lungo, nominerò quelli più utilizzati e andrò successivamente ad analizzare quelli più interessanti per un utilizzo nel settore professionale.

I più comuni sono quindi:

- Il baffle aperto posteriormente, che prolungando il percorso tra le due facce dell'altoparlante modifica le frequenze alle quali avvengono le cancellazioni estendendo in tal modo verso il basso la risposta utile del diffusore.
- Il baffle infinito, il cui scopo è quello di sfruttare unicamente la radiazione frontale del woofer. Rientrano in questa categoria la cassa chiusa e la sospensione pneumatica.
- Il bass reflex, nel quale l'altoparlante è montato in una cavità risonante.
- La linea di trasmissione, lungo condotto risonante o smorzato che può essere chiuso o aperto posteriormente.
- I diffusori a tromba, che mediante un trasformatore acustico accoppiano la radiazione dell'altoparlante all'aria circostante.
- I diffusori a più camere. Possono essere a radiazione indiretta come il carico simmetrico e il doppio reflex parallelo, o a radiazione diretta come il doppio reflex serie.

#### 4.3 LA CASSA CHIUSA

Con la denominazione di baffle infinito, cassa chiusa e sospensione pneumatica ci si riferisce a diffusori con la stessa struttura fisica, contenitori chiusi ermeticamente il cui scopo è isolare la radiazione posteriore del woofer dall'ambiente. La differenza la si può trovare nel volume della camera posteriore, il quale influisce pesantemente sulle prestazioni a bassa frequenza del diffusore.

Un'analisi chiara e lineare sull'effetto che ha il montaggio dell'altoparlante in una cavità può essere svolta partendo dal modello elettroacustico, in questo modo si può affrontare il problema per gradi, aggiungendo migliorie e complessità successivamente.

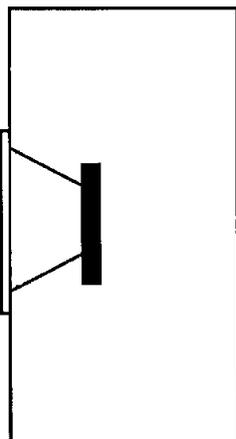


Fig. 4.1: Sezione semplificata cassa chiusa

#### 4.3.1 MODELLO DELLA CASSA CHIUSA

L'aggiunta di un volume chiuso alla faccia posteriore di un altoparlante ne modifica la cedevolezza, l'aria contenuta al suo interno reagisce alle compressioni e rarefazioni imposte dal movimento della membrana con la sua elasticità andando quindi a comportarsi come un'ulteriore sospensione.

Partendo dal modello elettroacustico definito da Thiele e Small dell'altoparlante in aria libera, per rappresentare il comportamento del volume chiuso si modifica il circuito acustico, inserendo in serie all'impedenza di radiazione la cedevolezza dell'aria, modellizzata da un condensatore di capacità dipendente dal volume del diffusore.

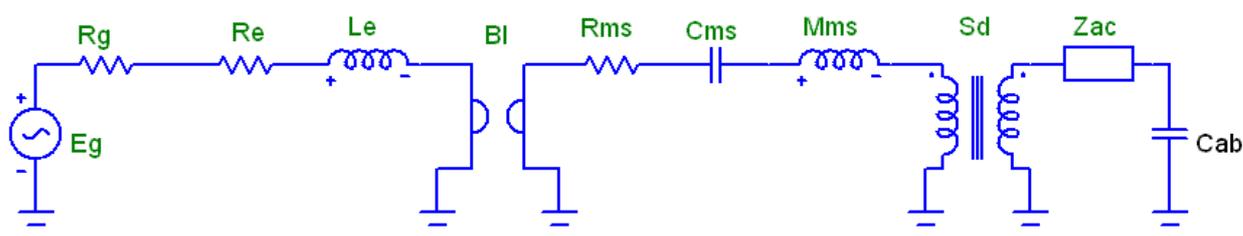


Fig. 4.2: Modello semplificato dell'altoparlante montato in cassa chiusa

Il valore di tale capacità, denominata  $C_{ab}$ , può essere ricavato dalla seguente formula:

$$C_{ab} = V_b / (\rho_0 \cdot c^2), \text{ dove con } V_b \text{ viene indicato il volume della cassa in litri.}$$

Di questa modifica ne risentono sia la risposta acustica che l'impedenza elettrica, l'andamento a bassa frequenza viene alterato nella frequenza di risonanza del sistema e nel fattore di merito totale.

Il fattore di merito in cassa chiusa viene denominato  $Q_{tc}$  e il suo valore può essere determinato attraverso la formula  $Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{1 + (V_{as}/V_b)}$ ; si nota dunque un aumento del fattore di merito, tanto più elevato quanto più piccolo è il volume della cassa rispetto al volume equivalente dell'altoparlante.

Essendo diminuita la cedevolezza totale avendo tenuto costante la massa mobile, la frequenza di risonanza in cassa  $f_c$  aumenta; il nuovo valore può essere ricavato dalla formula  $f_c = f_s \cdot Q_{tc}/Q_{ts}$ .

### 4.3.2 SIMULAZIONI

A partire dal modello possono venir effettuate delle simulazioni mostranti l'impedenza elettrica e la risposta acustica al variare del volume della cassa (simulazione effettuate mediante Microcap EV, programma di simulazione Spice della Spectrum Software); queste mostrano chiaramente gli effetti della diminuita cedevolezza sul comportamento dell'altoparlante.

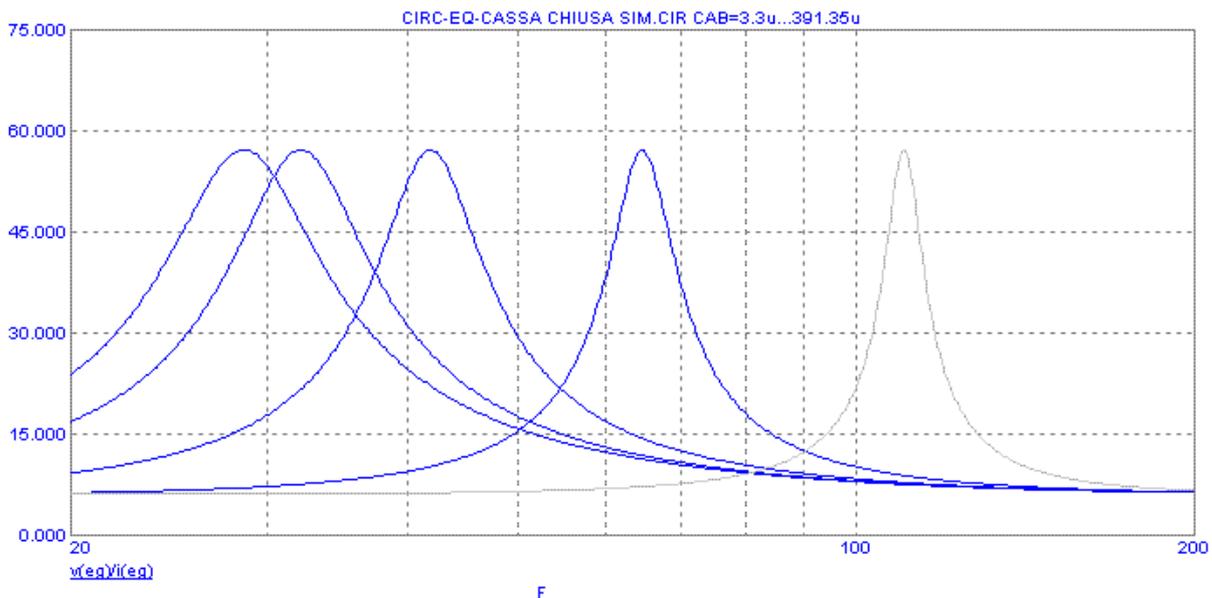


Fig. 4.3: Andamento dell' impedenza elettrica al variare del volume

La figura 4.3 mostra la variazione del picco d'impedenza dovute al cambiamento del volume interno della cassa: grandi volumi alterano poco la frequenza di risonanza e mantengono la campana larga (teoricamente, facendo tendere il volume della cassa a infinito, si dovrebbe misurare la stessa curva di impedenza dell'altoparlante in aria libera), piccoli volumi spostano molto in alto la  $f_c$  e modificano pesantemente il fattore di merito.

La variazione di  $Q_{tc}$  verso valori elevati porta ad una perdita di smorzamento e ad una minore sensibilità alle basse frequenze.

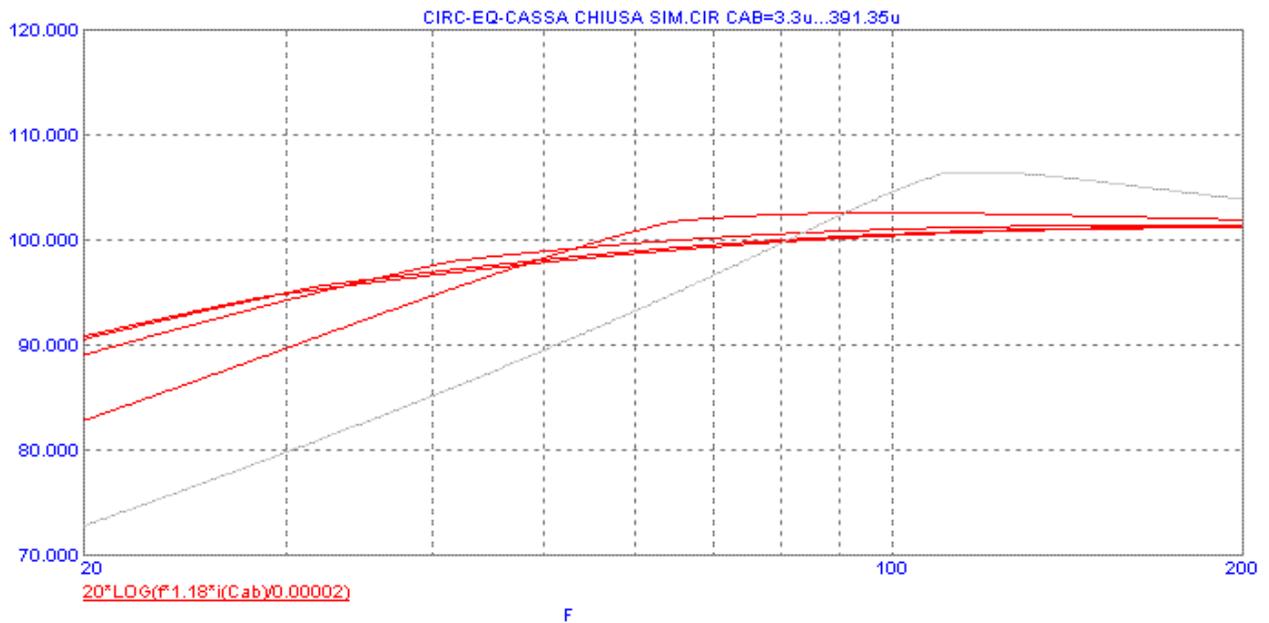


Fig. 4.4: Andamento della risposta acustica al variare del volume

La figura 4.4 mostra infatti le curve di SPL (Sound pressure level) al variare del volume; come si può vedere, la diminuzione delle dimensioni della cassa porta ad un contemporaneo innalzamento di  $f_c$  e all'aumento del fattore di merito, rendendo la risposta sempre meno smorzata e sempre più mancante verso le basse frequenze.

### 4.3.3 ACCORDI NOTEVOLI

La risposta complessiva è assimilabile ad un filtro passa alto del secondo ordine, e nonostante le configurazioni attuabili siano infinite esistono delle categorie, o “risposte notevoli”, fissate in base al fattore di merito:

- Per  $Q_{tc} = 0.5$  si ha la risposta di Bessel del secondo ordine (BL2).
- Per  $Q_{tc} = 0.707$  si ha la risposta di Butterworth del secondo ordine (B2).
- Per  $Q_{tc} > 0.707$  si hanno le risposte di Chebyshev del secondo ordine (C2)

Realizzazioni con basso fattore di merito avranno una capacità maggiore di rispondere correttamente ai transitori, ma saranno più carenti nella sensibilità alle frequenze più basse. Sistemi ad alto fattore di merito enfatizzano le basse frequenze creando un picco nella risposta in frequenza, ma soffrono di una risposta nel tempo peggiore.

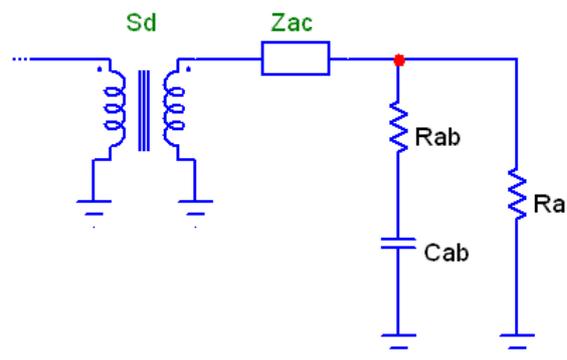
### 4.3.4 ASSORBENTE E PERDITE

Lavorando con il modello si sono tenute delle semplificazioni: si è supposta una cassa completamente vuota, infinitamente rigida e perfettamente ermetica. Queste sono servite ad una

prima analisi dell'accordo, ed hanno permesso uno studio più snello e veloce del suo funzionamento.

In realtà nei diffusori chiusi è sempre presente una certa quantità di assorbente acustico, avente due funzioni particolari: la riduzione delle riflessioni interne e delle risonanze spurie, e l'aumento virtuale del volume di carico. Infatti l'introduzione di assorbente comporta un modesto incremento del volume interno apparente, variabile tra il 5 e il 20% del volume netto  $V_b$ . Si introduce allora il nuovo parametro  $V_{ab}$ , il quale indica il volume d'aria che rappresenta la cedevolezza della cassa chiusa. Ma l'assorbente causa anche delle perdite, riscontrabili nell'abbassamento del picco di risonanza. In un modello parzialmente più complesso del precedente si possono immettere due nuovi componenti:

- $R_{ab}$  in serie a  $C_{ab}$ , tiene conto delle perdite per assorbimento.
- $R_{al}$  in parallelo alla serie di questi ultimi, modella le deformazioni del contenitore e le perdite per fessurazione.



*Fig. 4.5: Modello comprendente le perdite del circuito acustico*

La determinazione di questi parametri è spesso empirica, coinvolgendo una serie di caratteristiche dei materiali difficilmente reperibile o calcolabile, ma già questo semplice aggiornamento del modello permette simulazioni più veritiere del comportamento del sistema.

#### **4.4 IL BASS REFLEX**

A differenza della cassa chiusa, il cui scopo è intrappolare la radiazione posteriore dell'altoparlante, il bass reflex è realizzato in modo da utilizzarla favorevolmente per incrementare l'estensione del woofer in una ristretta banda di frequenze.

Il sistema è ancora costituito da una cavità di volume noto, collegata però all'ambiente anche attraverso un condotto, il quale realizza l'inversione di fase necessaria ad un apporto non distruttivo rispetto alla radiazione frontale dell'altoparlante.

Questo comportamento purtroppo è ristretto attorno ad una determinata frequenza, la frequenza di risonanza del mobile  $f_b$ .

Per l'analisi è interessante partire dal modello, da questo poi si potranno realizzare simulazioni utili allo studio del sistema.

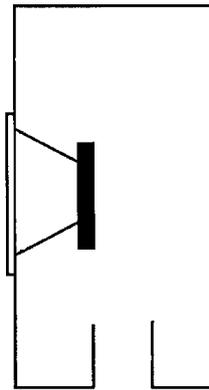


Fig. 4.6: Sezione semplificata bass reflex

#### 4.4.1 MODELLO DEL BASS REFLEX

Partendo dal modello dell'altoparlante in cassa chiusa bisogna introdurre la parte relativa al condotto. Questo è caratterizzato dalla massa d'aria contenuta al suo interno, nel circuito acustico viene quindi rappresentato da un induttore,  $M_{ap}$ , connesso in parallelo al condensatore  $C_{ab}$  rappresentante il volume della cassa.

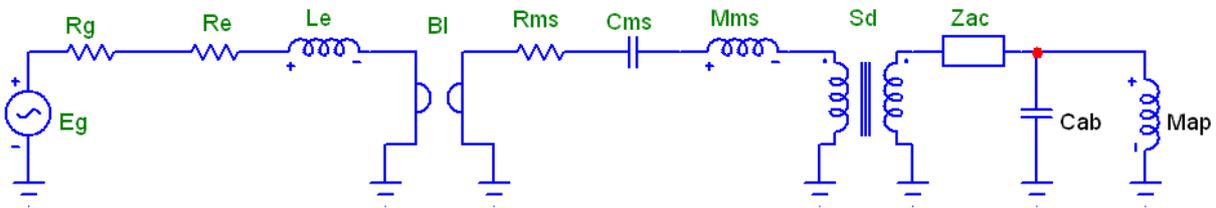


Fig. 4.7: Modello semplificato del bass reflex

Si viene così a costituire un circuito risonante parallelo, la cui frequenza di risonanza è determinata esclusivamente dal volume della cassa e dalla massa d'aria contenuta nel condotto; il

suo valore può essere calcolato tramite  $f_b = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{ap} \cdot C_{ab}})$ .

Il valore dell'inertanza  $M_{ap}$  può essere calcolata a partire dalla lunghezza  $l$  e dalla sezione  $S$  del condotto mediante la seguente formula:  $M_{ap} = (\rho_0 \cdot l)/S$ .

Dal circuito si può intuire che le velocità di volume d'aria, ovvero le correnti circolanti in  $C_{ab}$  e  $M_{ap}$  sono in fase solo alla frequenza di risonanza, la loro combinazione è costruttiva in un piccolo intorno sotto al quale l'altoparlante è controllato solo dalle proprie sospensioni, dato che attraverso il condotto avviene un cortocircuito acustico.

#### 4.4.2 SIMULAZIONI

L'interazione tra la radiazione frontale dell'altoparlante e la radiazione del condotto può essere osservata mediante delle simulazioni.

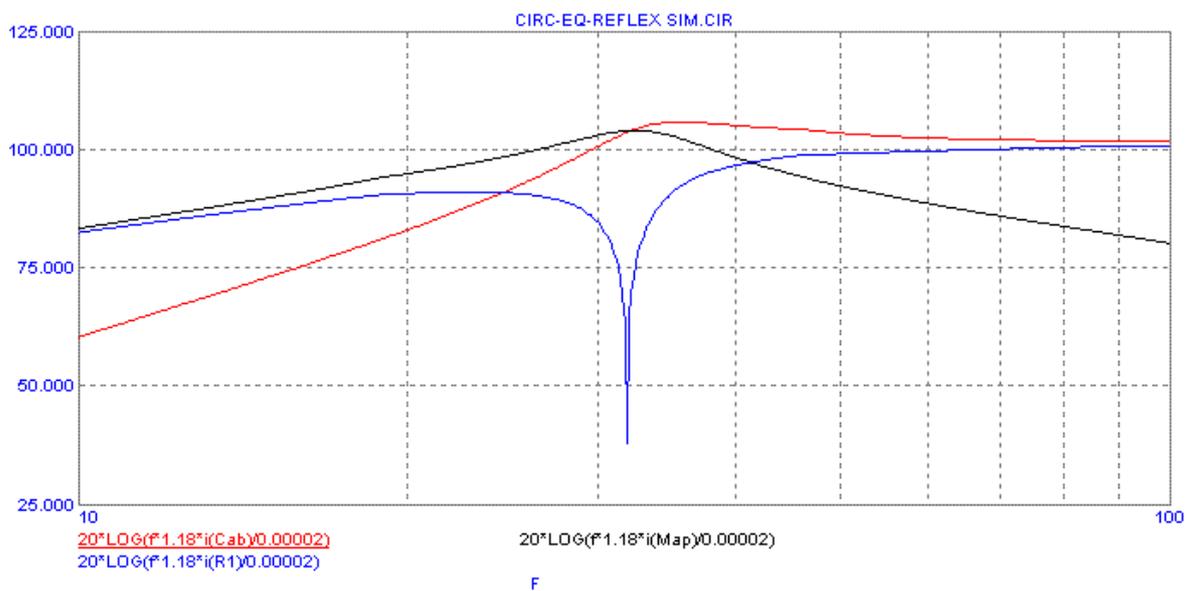


Fig. 4.8: Risposta acustica del bass reflex

La radiazione del condotto ha un andamento passa banda, limitata in alto dalla massa d'aria al suo interno e in basso dallo stimolo generato dall'altoparlante; il massimo è centrato alla frequenza di risonanza, zona in cui, se le perdite sono limitate, l'altoparlante è quasi fermo. Questa particolarità può essere osservata nella radiazione del woofer: essa presenta uno stretto buco nell'intorno della risonanza, e ad una limitata velocità di volume corrisponde una piccola escursione.

Il vantaggio teorico di questa soluzione è quindi dato dall'aumento di dinamica potenziale del sistema: supponendo che l'altoparlante sopporti un'adequata potenza e che il condotto non introduca non linearità, il bass reflex potrebbe erogare pressioni ben superiori a quelle della cassa chiusa (sempre nell'intorno della frequenza di risonanza).

L'analisi della curva di impedenza misurabile ai morsetti del diffusore mostra chiaramente il differente caricamento: ora i picchi sono due, e il minimo compreso tra le due frequenze corrisponde alla risonanza della cassa.

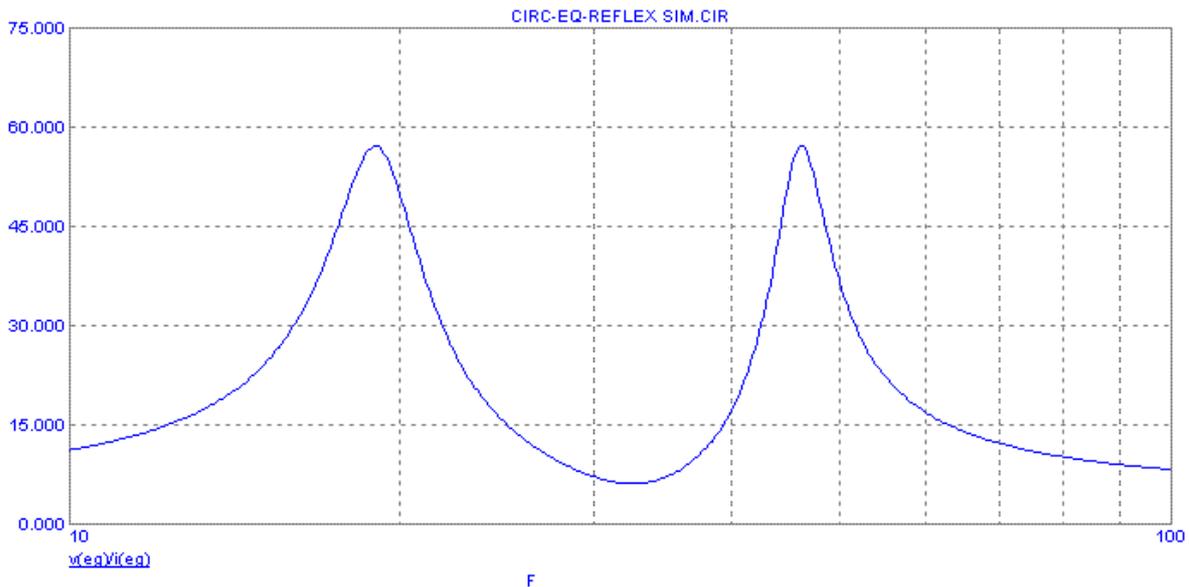


Fig. 4.9: Impedenza elettrica ai morsetti dell'altoparlante

#### 4.4.3 ALLINEAMENTI

Come per la cassa chiusa, anche per il bass reflex esistono infinite configurazioni: fissate le caratteristiche dell'altoparlante variazioni nel volume della cassa o nelle dimensioni del condotto portano a risposte acustiche differenti. L'andamento generale di una cassa caricata in bass reflex è riconducibile a quella di un filtro passa alto del quarto ordine, perché sotto la frequenza di risonanza le emissioni dell'altoparlante e del condotto sono invertite di fase e tendono ad elidersi vicendevolmente.

Esiste una serie di allineamenti le cui caratteristiche sono state analizzate da ricercatori, la prima suddivisione operabile è tra risposte piatte o non piatte; nell'ambito delle risposte piatte si ritrovano i seguenti allineamenti:

- SBB4 super boom box del quarto ordine
- SC4 sub Chebyshev del quarto ordine
- QB3 quasi Butterworth del terzo ordine, è quello maggiormente utilizzato, dato che richiede un volume più piccolo e ottiene una minore frequenza di taglio

Gli allineamenti a risposta non piatta soffrono invece di peggiori caratteristiche di risposta transitoria; tra questi compaiono:

- C4 Chebyshev a ripple uguale

- BB4 boom box del quarto ordine
- SQB3 super quasi Butterworth del terzo ordine, estensione del QB3

Un'altra categoria di allineamenti molto interessante è costituita da quelli elettronicamente assistiti. Questi sistemi sfruttano la minore escursione nell'intorno dell'accordo equalizzando un sistema disallineato, ottenuto per esempio abbassando la frequenza d'accordo o riducendo il volume della cassa. In particolare, l'allineamento B6 è costituito da una cassa bass reflex allineata in B4 nella quale la frequenza di accordo è stata abbassata di mezza ottava; per recuperare la pressione persa dallo spostamento dell'accordo si introduce a monte un filtro del secondo ordine avente fattore di merito pari a 2. La risposta finale è quella di un passa alto del sesto ordine, si guadagna estensione rispetto alla risposta originaria e si protegge il woofer dalle sovraescursioni alle frequenze inferiori a quella di accordo. Gli svantaggi sono dati dalla maggior potenza elettrica richiesta dal boost che l'amplificatore e l'altoparlante devono gestire, e da un aumentato sfasamento dovuto alla maggior pendenza della risposta.

#### 4.4.4 PERDITE E NON IDEALITÀ

Come nella chiusa, anche nel bass reflex è di norma l'uso di assorbente acustico. In questo caso, però, si tende a limitarne la quantità al minimo indispensabile ad evitare riflessioni interne dato che ogni perdita all'interno della cassa diminuisce l'efficacia del condotto.

Come può essere chiaramente osservato nella figura 4.10 l'introduzione di eccessive perdite svuota la risposta nell'intorno dell'accordo riducendo decisamente l'emissione del condotto; in questo caso si perde anche il vantaggio della limitata escursione del woofer.

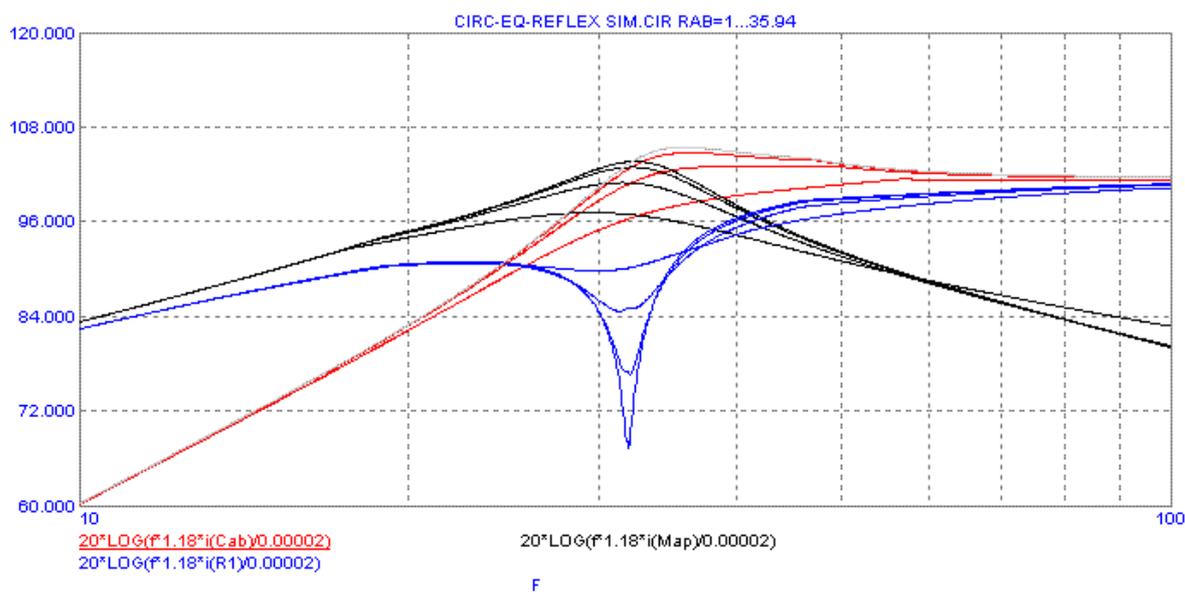
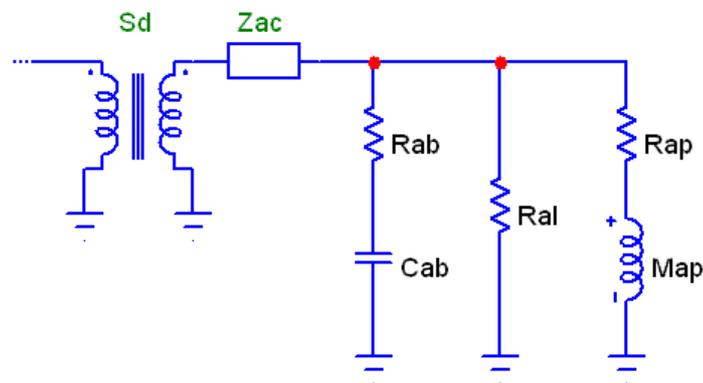


Fig. 4.10: Effetto delle perdite nella risposta del reflex

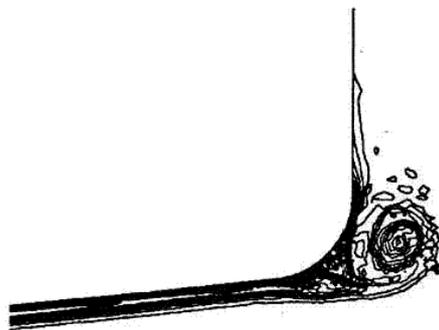
In questa simulazione il modello è stato completato di  $R_{ab}$  e  $R_{al}$  e la variazione di assorbente è stata simulata variando  $R_{ab}$ .

Purtroppo neanche il condotto di accordo può considerarsi ideale, il moto d'aria al suo interno è soggetto all'attrito con le pareti e, all'aumentare della velocità, passa da lineare a turbolento. Quindi, oltre ad essere caratterizzato da un'inertanza acustica, deve venir modellizzato anche con una resistenza in serie; questa prende il nome di  $R_{ap}$ , e, nel caso di condotti di piccolo diametro o fenditure, in letteratura esistono formule per il suo calcolo.



*Fig. 4.11: Modello comprendente le perdite del circuito acustico*

Nella realtà  $R_{ap}$  non è considerabile costante, ma andrebbe resa funzione della velocità dell'aria. Nonostante si siano studiate soluzioni per evitare l'innescio di turbolenze, soprattutto agli estremi del condotto, c'è sempre una velocità critica superata la quale il modello perde di validità.



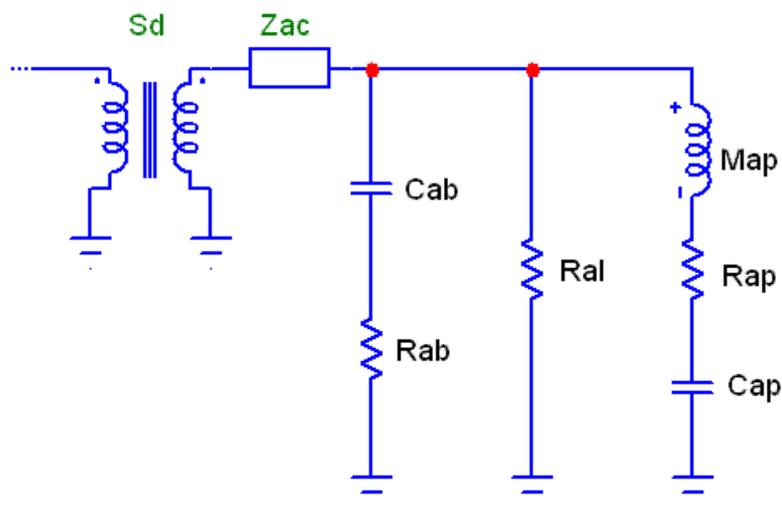
*Fig. 4.12: Turbolenza all'estremità di un condotto leggermente svasato*

Il metodo più semplice per aumentare la soglia sarebbe quello di aumentare la sezione del tubo, ma dalla formula per il calcolo di  $M_{ap}$  si può osservare che un aumento della sezione comporta un

pari aumento nella lunghezza, quindi il condotto diventa voluminoso e difficile da collocare all'interno della cassa; inoltre, un lungo tubo soffre maggiormente di risonanze interne, chiamate anche risonanze a "canna d'organo".

Una soluzione che si è andata affermando negli ultimi anni consiste nel dotare il condotto di una flangiatura che ne aumenti la sezione terminale. Dato che il moto dell'aria è bidirezionale non esiste un profilo ottimo per la flangia, il miglior compromesso sperimentalmente trovato sembra essere il profilo esponenziale, che gradualmente espande la sezione ad entrambe le estremità del condotto.

Un terzo metodo, che però rientrerebbe in una famiglia differente di caricamenti acustici, consiste nel sostituire il condotto con un radiatore passivo. Si tratta di un altoparlante senza motore, o più semplicemente di una membrana vincolata da una sospensione. Cambia il modello, perché bisogna aggiungere la cedevolezza delle sue sospensioni, ma risolve in modo interessante diversi problemi: occupa una vasta superficie del diffusore, ma un volume molto minore ad un condotto di pari sezione; non soffre di turbolenze, pur essendo limitato dalla propria escursione massima; filtra meglio le risonanze interne alla cassa, queste devono attraversare la membrana al posto dell'aria del condotto. Purtroppo però, è anche dotato di perdite ben maggiori rispetto ad un condotto ben dimensionato, e quindi sfrutta con meno efficacia la radiazione posteriore del driver attivo.



*Fig. 4.13: Modello acustico del reflex passivo*