

# *L'altoparlante ideale*

“La felicità è una menzogna, la cui ricerca è causa di tutti i malanni della vita.  
Ma ci sono calme serene che l’imitano e forse la superano.”  
Gustave Flaubert

*In questo capitolo verrà presentata la struttura e la fisica che governa il funzionamento dell'altoparlante magnetodinamico. In particolare verrà preso in esame il trasduttore ideale, esente da limitazioni e non linearità che affliggono i sistemi reali, in questo modo sarà possibile trattare i circuiti equivalenti, una modellizzazione che ha permesso grandi sviluppi nella progettazione e ricerca elettroacustica.*

## **2.1 LA TRASDUZIONE ELETTROACUSTICA**

Nella catena di riproduzione sonora il passaggio da segnale elettrico proveniente dal sistema di amplificazione a stimolo acustico percepibile dall'ascoltatore è affidato ad un sistema di trasduzione chiamato sistema di altoparlanti o diffusore acustico.

Allo stato attuale della tecnologia questa trasduzione non viene effettuata dall'altoparlante direttamente, ma tramite due passaggi: una trasduzione da segnale elettrico a vibrazione meccanica, e una seconda da vibrazione meccanica ad energia acustica. La prima è gestita dal motore dell'altoparlante, che tramite interazioni elettromagnetiche o elettrostatiche provvede a generare il moto della membrana radiante, la seconda trasduzione è gestita invece dal diaframma, il quale col suo movimento genera compressioni e rarefazioni nell'aria che danno origine al suono.

Inevitabilmente questo doppio passaggio di energia porta con sé inefficienza e bassa linearità, tipicamente l'efficienza (rapporto tra la potenza acustica irradiata e la potenza elettrica immessa) di un comune altoparlante è nell'ordine dello 1-5% e le distorsioni arrivano facilmente al 10%.

Come per molti sistemi anche la progettazione di questi trasduttori è frutto di compromessi, dato che le necessità di linearità, tenuta in potenza, buona risposta in frequenza e ai transitori, buone caratteristiche di dispersione, sono tutti parametri contrastanti.

Attualmente la maggior parte degli altoparlanti è di tipo magnetodinamico: in questi la membrana è solidale ad una bobina mobile immersa nel campo magnetico generato da un magnete

permanente. Come già accennato, esistono però anche molte altre tecniche di trasduzione elettroacustica, ognuna con i suoi pregi e difetti, tra queste vanno menzionate:

- Altoparlanti elettrostatici: sfruttano le forze di attrazione-repulsione tra piastre polarizzate ad alta tensione modulata dal segnale musicale; il pregio di questa soluzione è l'aver una grande e leggera superficie radiante sulla quale le forze si distribuiscono uniformemente, i difetti sono il carico prevalentemente capacitivo che offrono all'amplificatore e la limitata dinamica dovuta alle piccole escursioni permesse.
- Altoparlanti piezoelettrici: sfruttano l'effetto piezoelettrico collegando una membrana radiante al cristallo polarizzato dal segnale musicale; date le piccole escursioni permesse anche questo tipo di trasduttore è impiegato solamente per la riproduzione delle frequenze acute.

Il fatto che nel settore professionale la maggior parte dei trasduttori sia di tipo magnetodinamico testimonia che essi rappresentano il sistema a miglior rapporto prezzo / prestazioni, e forse anche il sistema nel quale i compromessi sono meglio gestibili dal progettista.

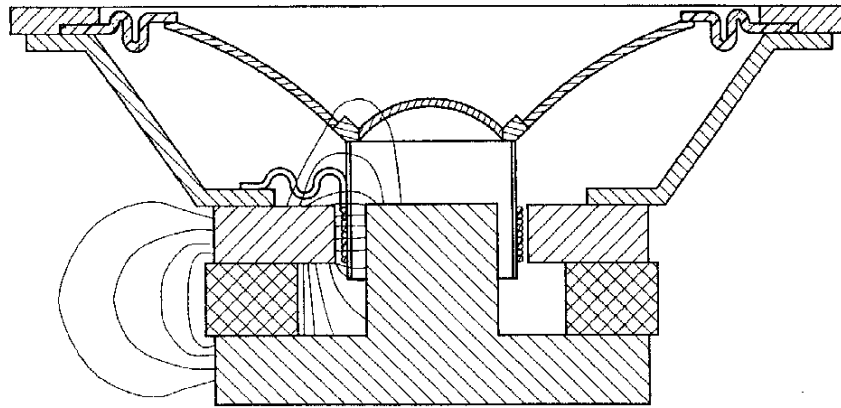
### 2.1.1 FUNZIONAMENTO DELL'ALTOPARLANTE MAGNETODINAMICO

Il motore di un altoparlante magnetodinamico, il sistema che si occupa di convertire l'energia elettrica in energia meccanica, è fondamentalmente rimasto invariato dalla sua invenzione.

Attraverso un magnete permanente e un opportuno circuito magnetico di materiale ferroso viene generato un campo magnetico uniforme di induzione  $B_0$  all'interno di una fessura denominata traferro. Una bobina di lunghezza  $l$  è posta in modo da tagliare ortogonalmente le linee di forza del campo magnetico ed è fissata in modo da poter traslare in direzione normale alle linee di forza.

Facendo scorrere una corrente  $I$  nel conduttore viene prodotta una forza vibromotrice di intensità  $B_0 \cdot l \cdot I$  che viene trasmessa dalla bobina alla membrana radiante ad essa solidale.

La figura 2.1 mostra la sezione di un altoparlante magnetodinamico a cono semplificato nella quale sono state anche rappresentate alcune linee di forza del campo magnetico. Si può notare la posizione della bobina all'interno del traferro e come essa sia solidale al supporto e quindi alla membrana radiante



*Fig. 2.1: Sezione semplificata di un altoparlante magnetodinamico*

### 2.1.2 TIPOLOGIE DI ALTOPARLANTI DINAMICI

Per riprodurre correttamente, cioè con certe caratteristiche di linearità, dispersione ed efficienza, tutto lo spettro sonoro è necessario realizzare diverse tipologie di altoparlanti. Un solo trasduttore, a causa soprattutto delle dimensioni e dalle altre proprietà della membrana vibrante, non è in grado di soddisfare le richieste sopra elencate per un range elevato di frequenze.

Una prima classificazione è quindi applicabile in base alla gamma di frequenze che il trasduttore dovrà riprodurre:

- **Woofers:** componente adatto alla riproduzione della gamma bassa (frequenze al di sotto di 1kHz), generalmente realizzato con membrana a cono.
- **Midrange:** componente dedicato alla riproduzione delle frequenze medie (indicativamente tra 250Hz e 6kHz), può essere realizzato con membrana a forma di cono o cupola.
- **Tweeter:** trasduttore destinato alla riproduzione delle alte frequenze (generalmente sopra i 2kHz).

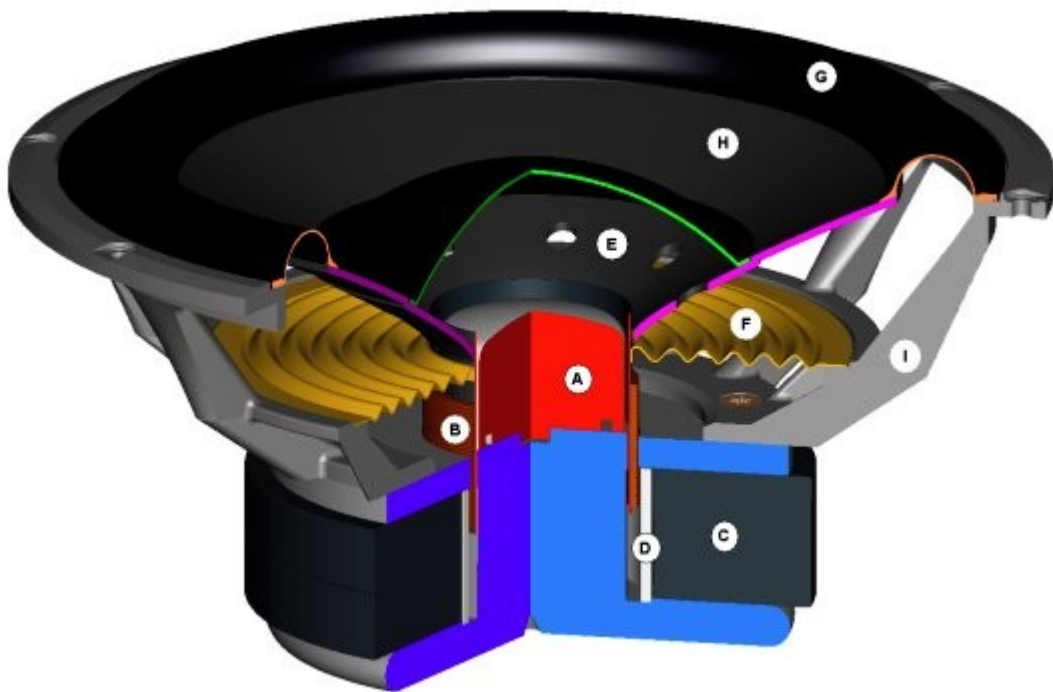
Un'altra classificazione può essere fatta in base alla struttura dell'altoparlante. Ad esempio, per la riproduzione delle altre frequenze esistono diverse tipologie di trasduttori:

- **Tweeter a cono:** scarsamente impiegati per le carenti caratteristiche di dispersione, utilizzano come diaframma un cono di materiale cartaceo o metallico.
- **Tweeter a cupola:** ampiamente utilizzati in hi-fi per le eccellenti proprietà di leggerezza e rigidità, utilizzano come diaframma una cupola di tessuto impregnato o di materiale plastico o metallico; la conformazione permette una più ampia dispersione e una migliore rigidità rispetto agli altoparlanti a cono.
- **Driver a compressione:** ampiamente utilizzati nel settore professionale per le loro doti di efficienza e di controllo della dispersione, questi trasduttori utilizzano una membrana

rigida a forma di cupola e vengono accoppiati ad una tromba che effettua l'adattamento di impedenza acustica e il controllo della direttività.

## 2.2 STRUTTURA DELL'ALTOPARLANTE MAGNETODINAMICO

A dispetto della funzione per la quale sono stati progettati, tutti i trasduttori magnetodinamici sono scomponibili nelle stesse parti funzionali; quindi, sia che si tratti di un grosso altoparlante a cono dedicato alla riproduzione delle basse frequenze che di un driver progettato per essere accoppiato ad una tromba e riprodurre le frequenze più alte, la descrizione delle parti fondamentali è unica.



*Fig. 2.2: sezione di un altoparlante magnetodinamico reale*

### 2.2.1 IL MOTORE ELETTROMAGNETICO

Il motore dell'altoparlante è composto dal magnete permanente, dal circuito magnetico e dalla bobina mobile. Nella quasi totalità dei trasduttori moderni il magnete è di forma toroidale ed è posto esternamente alla bobina mobile; se in passato veniva spesso utilizzato l'Alnico (una lega di Alluminio, Nichel e Cobalto), ora, dato anche l'alto costo della lega metallica, si è passati a magneti ceramici, più economici ma meno prestanti, oppure, per applicazioni che richiedono doti particolari di leggerezza e compattezza, a magneti in neodimio.

Il circuito magnetico è costituito fondamentalmente da due piastre e da un polo centrale di materiale metallico, il suo scopo è di incanalare le linee di forza del campo magnetico e assicurare una intensa induzione magnetica nel traferro.

La bobina mobile è avvolta su un supporto cilindrico di materiale leggero, rigido e resistente al calore; leggero perché è parte della massa mobile del trasduttore, rigido perché deve trasmettere la forza dalla bobina alla membrana senza deformarsi, resistente al calore perché è a diretto contatto con la bobina che si riscalda per effetto Joule. Per le varie applicazioni possono venire utilizzati materiali economici e poco prestanti come la carta, rigidi e conduttori di calore come l'alluminio, o più moderni e performanti come il kapton.

La bobina è composta da un conduttore isolato avvolto sul supporto e saldamente fissato ad esso per mezzo di adesivi per alte temperature, può essere realizzata in filo o piattina a seconda di che sfruttamento del volume del traferro si vuole ottenere, di rame o alluminio in funzione del peso e dalle caratteristiche richieste in sede di progetto.

La bobina, per generare la forza sostanzialmente costante al variare della sua posizione del traferro, dovrebbe avere un prodotto  $B \cdot l$  costante. Quest'obbiettivo è perseguito da due geometrie:

- Overhung: l'altezza della bobina  $h_{bm}$  è maggiore dell'altezza del traferro  $h_{pp}$ , è il sistema più utilizzato per altoparlanti dedicati alle basse frequenze perché permette buone escursioni e fattori di forza senza richiedere grandi magneti. In questo caso la massima escursione geometrica  $X_{max}$  è data da  $(h_{bm}-h_{pp})/2$ , ovviamente questo risultato dà solo un'indicazione dell'escursione limite del trasduttore. Grandi escursioni richiedono, a parità di fattore di forza, una bobina di altezza maggiore e questo va a discapito della leggerezza.
- Underhung: l'altezza del traferro  $h_{pp}$  è maggiore dell'altezza della bobina  $h_{bm}$ , è usato negli altoparlanti per alte frequenze dato che non necessitano di alte escursioni; raramente è anche impiegato in altoparlanti per medio - basse frequenze in hi-fi quando vengono richieste caratteristiche di linearità superiori. In questo caso il parametro  $X_{max}$  è dato da  $(h_{pp}-h_{bm})/2$ . Un pregio di questa realizzazione sta nel consentire un più elevato rendimento elettroacustico dato che tutte le spire sono concatenate con il flusso magnetico, lo svantaggio è la necessità di utilizzare magneti di dimensioni maggiori, e quindi il costo più elevato della realizzazione finale.



*Fig. 2.3: geometria overhung (a sinistra) e underhung (a destra).*

### 2.2.2 LE SOSPENSIONI

Le sospensioni di un altoparlante assolvono a diversi compiti: sorreggono la membrana, centrano la bobina all'interno del traferro e determinano la forza di richiamo e quindi la cedevolezza dell'equipaggio mobile. La sospensione interna, detta spider o centratore, è posta tra il cestello e il supporto della bobina mobile; realizzata di tessuto corrugato e impregnato partecipa in parte maggiore alla rigidità dell'insieme. La sospensione esterna è posta tra cestello e bordo superiore del cono; realizzata in foam, tessuto corrugato o gomma, oltre a garantire il centraggio e a offrire una certa forza di ritorno consente di smorzare i modi di vibrazione del cono.

### 2.2.3 LA MEMBRANA

Scopo del diaframma è l'accoppiamento del moto della bobina mobile all'aria antistante, è la seconda trasduzione, da energia meccanica a energia acustica.

A frequenze basse, dove la membrana si muove senza deformarsi, può essere considerata come un pistone rigido circolare di superficie pari alla sezione frontale del diaframma  $S_d$ . Operando questa semplificazione, lo studio in bassa frequenza del comportamento in direttività dell'altoparlante è noto, essendo stato analizzato e risolto analiticamente (Appendice A.1).

Per frequenze la cui lunghezza d'onda  $\lambda$  è grande rispetto al raggio dell'altoparlante l'emissione è sostanzialmente omnidirezionale; all'aumentare della frequenza l'emissione diventa sempre più direttiva. Se al diffusore completo viene richiesta una direttività uniforme nelle varie gamme di frequenza si rende necessario l'uso di diversi altoparlanti, il cui numero e la dimensione dipenderanno dalle prestazioni finali desiderate.

Si definisce numero d'onda  $k$  il rapporto tra la pulsazione e la velocità del suono  $k = \omega / c$ , fissato il raggio dell'altoparlante  $a$  si può rappresentare il diagramma di direttività di un pistone rigido montato su uno schermo di dimensioni infinite per diversi valori del prodotto  $k \cdot a$ .

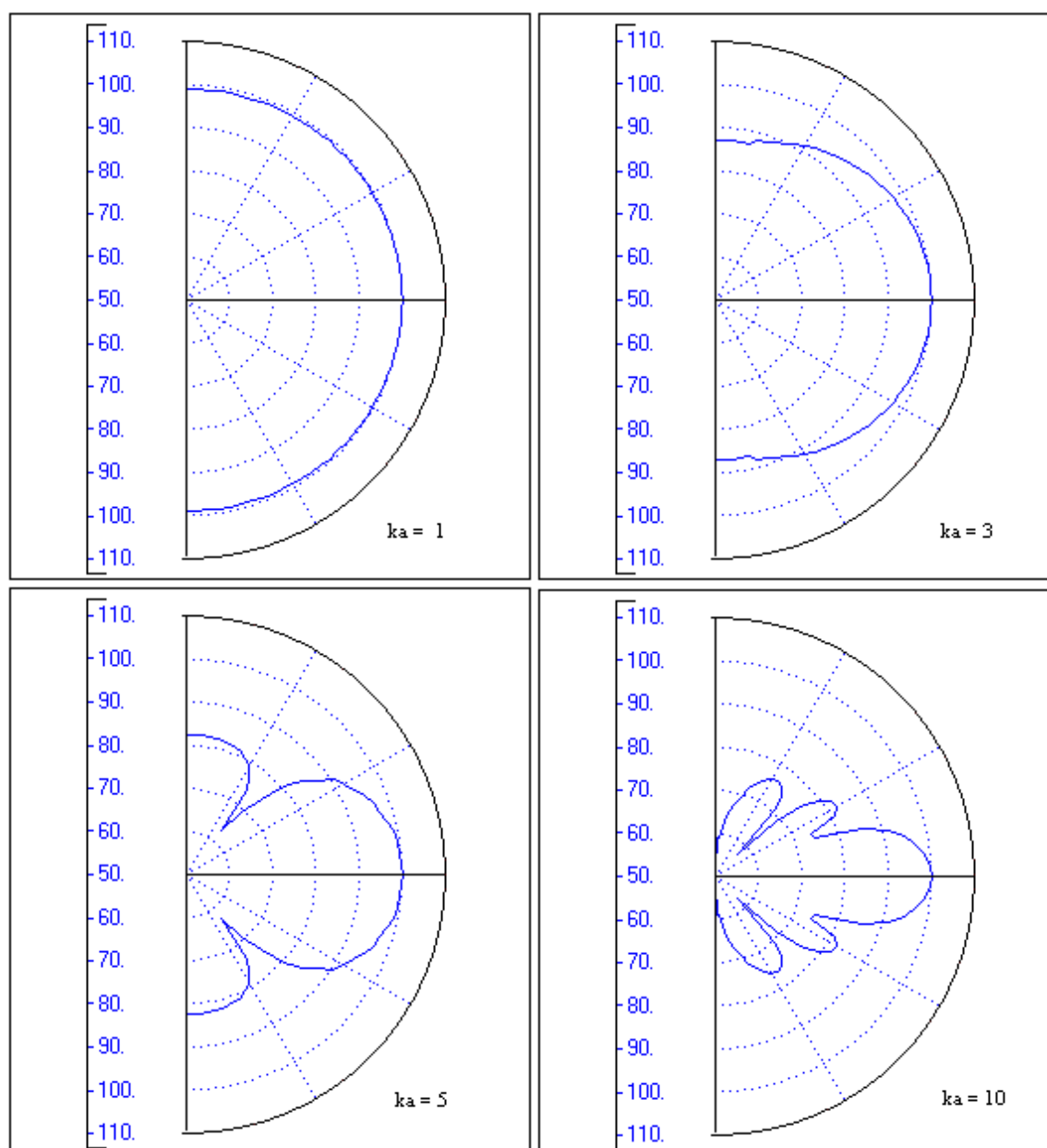


Fig. 2.4: diagrammi polari di un pistone rigido per diversi valori del prodotto  $ka$

## 2.2.4 IL CESTELLO

La funzione del cestello è di supportare il motore e la membrana tramite le due sospensioni interna ed esterna. Inoltre, è sempre attraverso il cestello che il trasduttore viene fissato al diffusore.

Esistono quindi dei requisiti ai quali questa struttura deve assolvere:

- Elevata robustezza e rigidità per offrire un buon vincolo alla vibrazione della membrana.
- Peso contenuto, soprattutto nell'ottica di limitare il peso totale del diffusore
- Assenza di risonanze proprie.

- Buone caratteristiche di trasparenza alla radiazione posteriore del cono; in particolare non deve opporre resistenza allo spostamento d'aria posteriore e non deve creare riflessioni che andrebbero ad alterare la risposta temporale del trasduttore.
- Eventuali capacità di dissipazione del calore mediante alettature nella zona adiacente al magnete e alla bobina mobile.

Il materiale più economico e frequentemente utilizzato per la realizzazione dei cestelli è la lamiera di acciaio stampata. Questo materiale pone dei compromessi tra robustezza e trasparenza alla radiazione posteriore.

L'alluminio o altre leghe metalliche migliorano notevolmente le caratteristiche finali: con un'accorta progettazione è possibile realizzare un cestello leggero, ma al tempo stesso rigido e acusticamente trasparente. Questo è il motivo per cui è il materiale più utilizzato nel settore professionale.

In tempi recenti sono stati sperimentati e vengono usati con successo anche materiali plastici, coi quali vengono realizzati cestelli dalle buone caratteristiche.

## **2.3 MODELLIZZAZIONE E CIRCUITI EQUIVALENTI**

La necessità di migliorare ed ottimizzare la resa in termini di qualità sonora degli altoparlanti è un bisogno sempre esistito. Agli albori dell'elettroacustica due tecniche furono sviluppate nel tentativo di comprendere il comportamento dei trasduttori: la prima cercava soluzioni tramite una strada prettamente empirica, la seconda nell'analisi approfondita dei parametri fisici dell'altoparlante e del suo contenitore; quest'ultima si basava su grandezze come la dimensione del cono, la sua massa, la frequenza di risonanza del contenitore, e portava effettivamente a dei risultati corretti ed utilizzabili, ma la lunghezza e la difficoltà dei calcoli non la rendevano di facile utilizzo.

Nei primi anni settanta i lavori di Neville Thiele [1]-[2] e Richard H. Small [3]-[8] riuscirono a dare una descrizione semplice e completa sia dell'altoparlante che del contenitore nel quale viene posto a lavorare.

Mediante questo modello al giorno d'oggi è facile predire il comportamento di un diffusore nella gamma bassa di funzionamento, e dati come risposta in frequenza o escursione possono essere calcolati velocemente da uno dei tanti software che si basano sulle teorie di Thiele e Small.

Essendo il modello di un sistema avente svariate non linearità rimane valido solo per piccole escursioni del cono e alle frequenze dove il diaframma si comporta come un pistone rigido, metodi per superare queste limitazioni verranno esaminati nel capitolo riguardante le non linearità.



### 2.3.1 PARAMETRI FISICI DELL'ALTOPARLANTE

I primi parametri ad essere stati considerati sono quelli relativi alle caratteristiche fisiche delle parti che compongono l'altoparlante. Di questi, sei sono indipendenti e facilmente comprensibili e identificabili:

- $S_d$  è la già menzionata superficie equivalente della membrana, ovvero l'area del cerchio risultante dalla proiezione sul piano frontale del diaframma. Viene espressa in  $[m^2]$ .
- $R_e$  è la resistenza in continua della bobina mobile. Viene espressa in  $[\Omega]$ .
- $B \cdot l$  è il fattore di forza dell'altoparlante, calcolato come prodotto della densità di flusso magnetico  $B$  nel traferro per la lunghezza  $l$  di avvolgimento immersa nel campo. Viene espresso in  $[T \cdot m]$ .
- $M_{md}$  è la massa meccanica del cono e delle altre parti in movimento come la bobina mobile e il supporto, si differenzia da  $M_{ms}$  per il fatto che non comprende la massa d'aria spostata dalla membrana. Viene espressa in  $[kg]$ .
- $C_{ms}$  è la cedevolezza meccanica delle sospensioni, comprende quindi la cedevolezza dello spider e della sospensione esterna. Viene espressa in  $[m/N]$ .
- $R_{ms}$  è la resistenza meccanica dell'equipaggio mobile, dovuta agli attriti nelle sospensioni. Viene espressa in  $[kg/s]$ .

Pur rappresentando efficacemente la fisica dell'altoparlante, questo insieme di parametri è di difficile applicazione al progetto di una cassa acustica, richiedendo diverse trasformazioni e passaggi non sempre immediati.

### 2.3.2 PARAMETRI DI THIELE SMALL

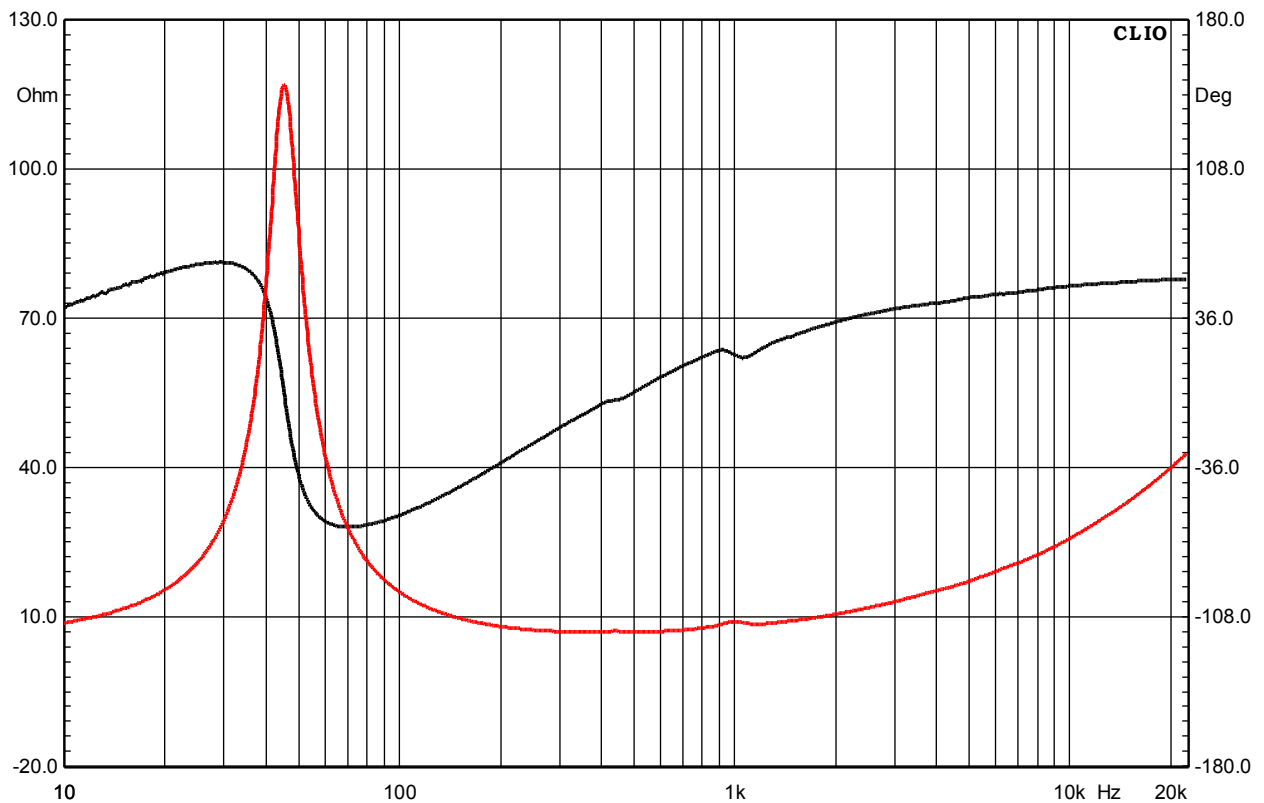
Il passaggio da parametri concreti ad altri più astratti, ma meglio utilizzabili nello sviluppo di un diffusore, è stata un'altra svolta migliorativa. Il nuovo set di parametri indipendenti divenne:

- $S_d$  superficie attiva della membrana
- $R_e$  resistenza in continua della bobina
- $F_s$  frequenza di risonanza dell'equipaggio mobile in aria libera. La massa delle parti vibranti e la cedevolezza delle sospensioni costituiscono un circuito risonante, la cui frequenza caratteristica può essere ricavata dall'espressione  $F_s = 1/2\pi \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}$ . Viene espressa in  $[Hz]$ .
- $Q_{ms}$  fattore di merito meccanico. E' il fattore di smorzamento del circuito risonante meccanico e può essere ricavato dall'espressione  $Q_{ms} = 2\pi \cdot f_s \cdot M_{ms} / R_{ms}$ . E' adimensionale.

- $Q_{es}$  fattore di merito elettrico. Rappresenta il fattore di smorzamento del circuito risonante elettrico e può essere calcolato come  $Q_{es} = 2\pi \cdot f_s \cdot \text{Re } Mms / (Bl)^2$ . E' adimensionale.
- $V_{as}$  volume d'aria avente la stessa cedevolezza delle sospensioni dell'altoparlante, viene comunemente chiamato volume equivalente. Il suo valore è ricavabile dall'espressione seguente:  $V_{as} = \rho_0 \cdot c^2 \cdot Sd^2 / [Mms \cdot (2\pi \cdot f_s)^2]$ . Viene espresso in  $[m^3]$ .

### 2.3.3 MISURA DEI PARAMETRI

Un altro pregio della rappresentazione di Thiele Small lo si ritrova nella pratica, nella misura dei parametri del trasduttore: non c'è la necessità di smontare l'altoparlante per verificare la lunghezza della bobina o la massa del cono, ma tutte le caratteristiche possono venire ricavate da due semplici misure di impedenza. Il merito di questo risultato va dato a Small.



*Fig. 2.5: modulo e angolo di fase dell'impedenza in aria libera*

La figura 2.5 rappresenta una misura di impedenza in aria libera effettuata su un woofer reale. L'espressione "aria libera" indica che il trasduttore non è montato in cassa acustica ma è misurato

su un opportuno e stabile supporto distante da pareti e pavimento; qualsiasi riflessione o carico acustico altererebbe infatti la misura.

L'andamento del modulo dell'impedenza è caratterizzato dal picco alla frequenza di risonanza (dal quale si può ricavare  $f_s$  e  $Z_{max}$ , modulo massimo) e dalla crescita semi-induttiva alle frequenze più elevate (che nel modello più semplificato è rappresentato dall'induttore  $L_e$ ).

Il valore della resistenza elettrica in continua della bobina  $R_e$  può essere effettuata con un ohmetro per bassi valori resistivi, generalmente il suo valore si pone tra i 2 e i 12  $\Omega$ .

La superficie equivalente  $S_d$  è calcolabile semplicemente come area di un cerchio avente stesso raggio della membrana radiante.

Prendendo due frequenze  $f_h$  e  $f_l$  sui due lati della campana di risonanza aventi lo stesso modulo di impedenza può essere ricavato il fattore di merito elettrico  $Q_{es}$ :

$$Q_{es} = \frac{f_s \cdot |Z_{f_h, f_l}|}{(f_h - f_l) \cdot (|Z_{max}| - R_e)}$$

e il fattore di merito meccanico  $Q_{ms}$ :

$$Q_{ms} = \frac{f_s}{f_h - f_l} \cdot \sqrt{\frac{|Z_{max}|}{R_e}}$$

La seconda misura di impedenza può essere svolta in due modi:

- Metodo della massa aggiunta: si fissa al cono una piccola massa di valore noto  $M_a$ , in questo modo, non variando la cedevolezza, si avrà un abbassamento nella frequenza di risonanza  $f_{sa}$ . Mediante questo valore si risale a  $M_{md} = M_a / [(f_s / f_{sa})^2 - 1]$ .
- Metodo della cedevolezza: se il metodo precedente mira a diminuire la frequenza di risonanza e risulta quindi scomodo per la misura di altoparlanti a bassa  $f_s$ , il metodo della cedevolezza può essere quindi in certi casi utile. La misura di impedenza viene eseguita montando il trasduttore in un box chiuso di volume noto, diminuendo quindi la cedevolezza del cono, e determinando la nuova frequenza di risonanza  $f_c$ .

A questo punto è possibile ricavare l'ultimo parametro indipendente, il volume acustico equivalente, tramite l'equazione  $V_{as} = \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_d^2 / [M_{ms} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_s)^2]$ .

### 2.3.4 CIRCUITI EQUIVALENTI

Per analizzare il comportamento di un sistema complesso come un trasduttore elettroacustico è comodo utilizzare dei circuiti equivalenti che ne simulino il comportamento. Dato che si tratta di un trasduttore avente caratteristiche elettriche, meccaniche ed acustiche è possibile rappresentarlo con tre circuiti equivalenti, a seconda che si preferisca lavorare nel dominio elettrico, meccanico od acustico.

Tutti i circuiti sono costituiti da resistori, induttori e condensatori e le rappresentazioni si basano sulle seguenti analogie (Appendice A.2):

- Per il circuito meccanico le masse meccaniche corrispondono a induttanze, le cedevolezza a capacità, gli attriti a resistenze, le forze a differenze di potenziali e le velocità a correnti.
- Nel circuito acustico le masse acustiche corrispondono a induttanze, le cedevolezza a capacità, le resistenze acustiche a resistenze, le pressioni acustiche a differenze di potenziale e le velocità di volume a correnti.

E' possibile rappresentare inoltre il circuito equivalente completo di ogni grandezza nel proprio dominio di appartenenza, introducendo un giratore che effettui la trasformazione  $F = Bl \cdot i$  tra circuito elettrico e meccanico, e un trasformatore per il passaggio da circuito meccanico ad acustico di rapporto di trasformazione  $S_d$  (in questo caso la velocità di volume  $U$  è ricavata mediante  $U = S_d \cdot u$ , dove  $u$  è la velocità lineare del diaframma).

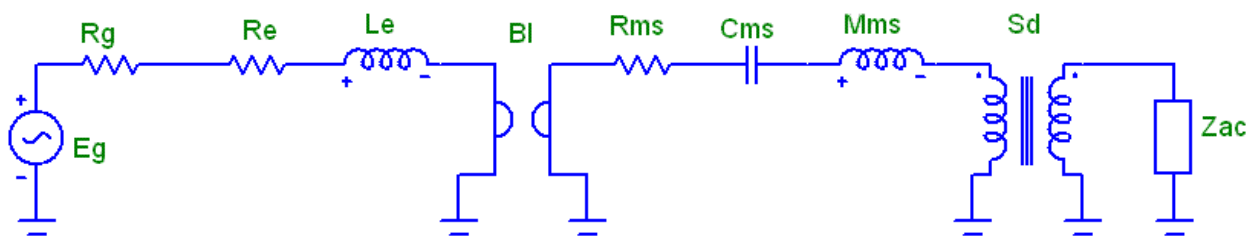


Fig. 2.6: circuito equivalente completo

Nello schema compaiono nuovi elementi:

- La schematizzazione Thévenin dell'amplificatore, costituita dal generatore di tensione ideale  $E_g$  e dalla resistenza interna  $R_g$ .
- La resistenza meccanica delle sospensioni interna ed esterna  $R_{ms}$ , ricavabile dall'espressione  $R_{ms} = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot M_{ms} / Q_{ms}$ .

- La cedevolezza delle sospensioni  $C_{ms} = 1/[M_{ms} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_s)^2]$ .
- L'impedenza acustica di radiazione  $Z_{ac}$ .

## 2.4 OSSERVAZIONI

Nel circuito equivalente è stata introdotta la resistenza interna dell'amplificatore, ma in un caso più generale e reale  $R_g$  rappresenta anche tutte le altre resistenze in serie comprese tra l'amplificatore e l'altoparlante. Queste possono essere le resistenze dei cavi di collegamento (che in campo professionale possono raggiungere lunghezze e quindi impedenze notevoli), resistenze del crossover, resistenze di contatto di connettori. Sommandosi tutte ad  $R_e$  modificano il fattore di smorzamento elettrico dell'altoparlante e di conseguenza anche la sua risposta in frequenza; il nuovo fattore di merito elettrico diventa  $Q_e = Q_{es} \cdot (R_g + R_e) / R_e$ , si perde quindi smorzamento.

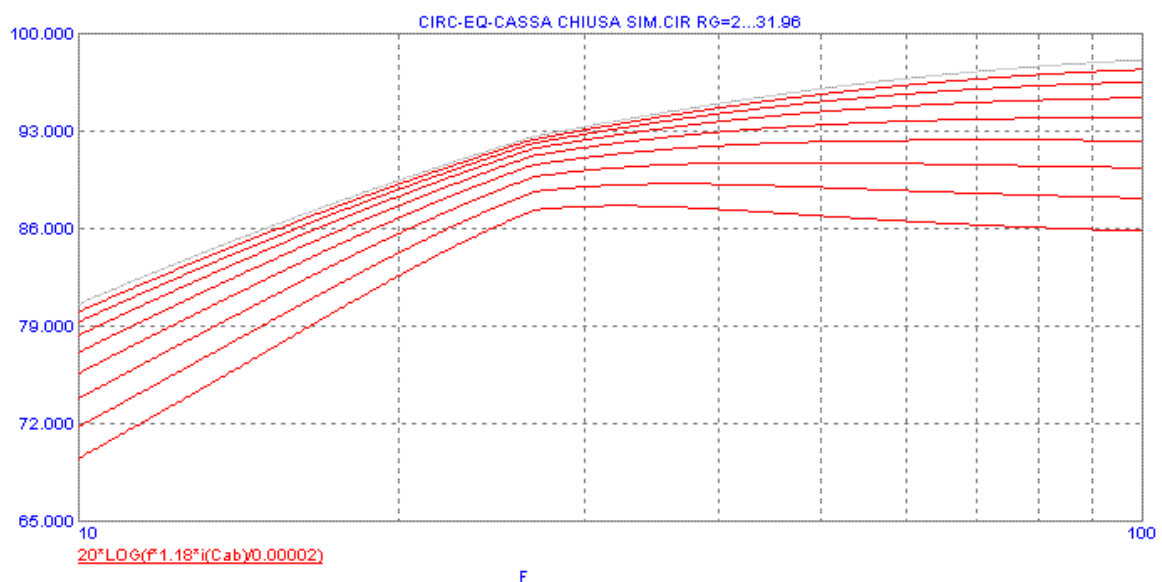


Fig. 2.7: Variazione di smorzamento nella risposta acustica dovuto a  $R_g$