

Chiacchierate sull'elettroacustica

5 – SPL (livello di pressione sonora)

Che cos'è l'elettroacustica?... Un elenco di woofer e tweeter? Un catalogo pieno di parametri tecnici? Uno schema di un crossover? Un software per calcolare un bass-reflex? Tutte queste cose insieme? Per capirlo, possiamo semplicemente scomporre il nome: **elettro – acustica**.

Si tratta di una tecnologia per convertire un segnale elettrico, trasformandolo in un suono.

Come per qualsiasi conversione di energia, è inevitabile che ci siano delle perdite. Lo vediamo in un motore, una caldaia, una lampada, perfino nei nostri muscoli; c'è sempre un certo rendimento percentuale, risultante dal rapporto tra potenza utile e potenza assorbita, che non arriva mai al 100%.



Nel caso dell'altoparlante, tale rapporto prende il nome di "efficienza", ma è un valore che definirei... imbarazzante. Proviamo a fare un confronto.

Da quando Edison la inventò, la lampadina a incandescenza è sempre stata considerata come il "cattivo esempio", tant'è che oggi non si usa più.

Il suo rendimento è intorno al 2%; significa che dobbiamo erogare 100 W di potenza elettrica, per averne 2 di potenza luminosa. Gli altri 98 vengono dissipati in calore.

Che terribile spreco!...

Ora che abbiamo un riferimento, provate ad indovinare l'efficienza di un altoparlante Hi-Fi. Ve lo dico io?... Tra **0.2** e **0.8%**. Circa 4-5 volte più basso, rispetto alla lampadina a filamento. Quando vi capita un valore pari a 0.9 o più, in genere sono prodotti di derivazione professionale. In altre parole, su 100 W, ben 99.5 (novantanove e mezzo!) finiscono in calore.

L'efficienza si indica con una lettera dell'alfabeto greco, la **eta** minuscola: **η** . È comunque rarissimo trovarla sui datasheet, forse perché, come dicevamo, quello "zerovirgola" può risultare imbarazzante.

Quello che vi danno sempre è l'**SPL**, o **sensibilità**, un valore espresso in **decibel (dB)**, che dell'efficienza è un parente stretto, anzi... per i professionisti è la stessa cosa (???)

- Siamo matti!... Cosa dice, questo qui?... Se è uno scherzo, non fa ridere...



Lo so... Lo so... Queste cose non si devono dire al principiante, sembra che siano diseducative...

Se provate a cercare, sulla rete, le parole "sensibilità ed efficienza", sarete sepolti da decine di blog, forum, social network, ecc., che si accaniscono con chiunque si azzardi a mescolare i due dati:

- **Guarda che sensibilità ed efficienza sono cose diverse!**
- **Non devi mai fare confusione. È un errore gravissimo.**
- **Se non capisci la differenza, prenditi un libro e studia!**

Beh... vi svelo un segreto.

Quando facevo ancora l'elettroacustico, le aziende non mi chiudevano a chiave in una camera anecoica. Anch'io avevo il telefono, anch'io partecipavo ad incontri, fiere ed eventi, anch'io parlavo con colleghi di altre zone d'Italia... e nessuno di noi ha mai usato il termine "sensibilità".

*"Abbiamo un woofer che ha solo **86 dB** di **efficienza**", "Guadagnammo in **efficienza**, quasi **2 dB**, con la membrana in carta", "Ho dovuto attenuare il tweeter, riducendo l'**efficienza** di ben **4 dB**"... Et similia.*

Sono tutte così, le frasi che ho sempre sentito nelle chiacchierate fra tecnici.

Quindi, perché tanto accanimento verso il povero dilettante, quando usa gli stessi termini? Lo capiremo più avanti...

Intanto, vediamo a colpo d'occhio che un valore viene espresso in %, l'altro in **dB**.

Talvolta ci si attacca proprio a quella differenza, con argomenti di questo tipo:

La percentuale è un rapporto tra grandezze omogenee, in matematica si chiama "numero puro".

La sensibilità non lo è, perché si esprime in dB, che è l'unità di misura della pressione acustica.

Questa è proprio una st... una stupidaggine.

Il dB non misura la pressione acustica, è fatto per esprimere **proprio i numeri puri** (adimensionali), solo che lo fa in modo logaritmico, per adattarsi a certe grandezze fisiche che lo richiedono.

Il mio capo mi disse, una volta: - *Il problema dei dilettanti di oggi è che non hanno capito il dB.*

Proviamo quindi a spiegarlo, con l'abituale metodo della chiacchierata.

Il decibel può misurare qualsiasi cosa: i lacci delle scarpe, la luce di una lampada, il peso della tastiera con cui sto scrivendo o il numero di sigarette che ho fumato oggi.

Quello che conta è stabilire un riferimento. Ovvero, mettersi d'accordo su un valore di base.

Esempio: misuriamo in dB le distanze autostradali tra le città italiane.

Come riferimento prenderemo il Lago di Garda, che pressappoco ha una lunghezza di 50 km (arrotondiamo).

- La distanza tra Milano e Napoli (770 km) contiene il lago 15.4 volte.
- La distanza tra Trieste e Bari (960 km) contiene il lago 19.2 volte.
- La distanza tra Trento e Palermo (1500 km) contiene il lago 30 volte.

Questi sono tutti **numeri puri**, perché espressi in **km/km**.

Ora la parte più complicata: dobbiamo calcolare il **logaritmo** e poi moltiplicarlo per 10. Continuando ad arrotondare, otteniamo...

*Milano-Napoli: **12 dB**. Trieste-Bari: **13 dB**. Trento-Palermo: **15 dB**.*



Ma perché il logaritmo?... E perché moltiplicare per 10?

Perché il decibel misura fenomeni fisici che vengono percepiti in modo **logaritmico** (come il suono).

Tuttavia, senza moltiplicare otterremmo il **bel**, che nell'uso pratico risulta scomodo; il decibel ne è un sottomultiplo ed è più gestibile. Per questo abbiamo la **d** minuscola e la **B** maiuscola.

Ovviamente, nessuno userebbe il dB per le distanze autostradali; queste vengono percepite in modo lineare, sia nei tempi di percorrenza che nel consumo di carburante, quindi ci teniamo il kilometro.

Piccola curiosità: fra tecnici professionisti, nessuno dice la parola "decibel"; per tutti è il **dibbì**.

So che quel logaritmo sembra una complicazione, ma il nostro cervello ragiona continuamente in modo logaritmico; lo facciamo in modo così automatico che non ce ne rendiamo conto. Non mi credete?



Supponiamo di comprare un olio d'oliva e pagarlo 5 €; poi andiamo in un altro supermercato e troviamo lo stesso olio a 7 €, nello stesso formato...

Il nostro primo pensiero è: *"Questi sono troppo cari, qui non ci vengo più!"*

Ora andiamo a cercare un televisore da 65 pollici, di una certa marca e modello; lo avevamo già visto in un sito di e-commerce, al prezzo di 684 €; in negozio lo troviamo a 686...

"Ok, visto che costa uguale, lo compro qui."



Come sarebbe "costa uguale"?

La differenza è sempre di 2 euro. Perché sull'olio conta e sul televisore no?

La risposta appare ovvia: tutti noi mettiamo quella differenza in relazione al totale; pertanto, quei 2 euro ci sembrano **significativi** sull'olio, ma del tutto **trascurabili** sul televisore.

...Esattamente come apparirebbero su una **scala logaritmica**.

Ora che il logaritmo non ci fa più paura, vediamo come funziona il nostro dB.

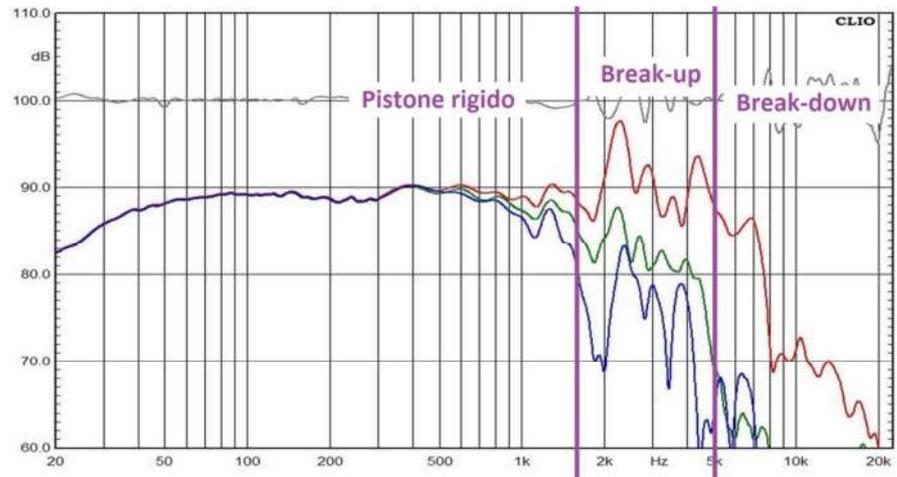
L'orecchio umano (strumento meraviglioso, uno dei capolavori della natura) percepisce i suoni in modo logaritmico, sia per la frequenza che per la potenza.

Della frequenza abbiamo già parlato in passato: abbiamo visto che gli intervalli di un'ottava, da noi percepiti come costanti, in realtà corrispondono a raddoppiamenti.

Tuttavia, per la frequenza si usa l'**hertz**, che è un'unità di misura **lineare**; pertanto, il logaritmo dobbiamo introdurlo noi, con una particolare suddivisione della scala.

Nelle chiacchierate precedenti, abbiamo già visto alcuni esempi di **scala logaritmica**, sull'asse orizzontale. Ve ne ripropongo uno qui a destra.

Ora osservate l'asse **verticale**; questa scala ci sembra lineare, ma in realtà non lo è, perché stavolta è l'unità di misura ad essere logaritmica: il dB.



Se il nostro orecchio sente un aumento di 3 dB, quel suono ha in realtà una potenza **raddoppiata**.

Per dimostrarlo, basta chiedere ad una calcolatrice il logaritmo di 2. Il risultato sarà 0.3 (espresso in bel), che diventa 3 dB quando moltiplichiamo per 10 (com'è noto, il logaritmo di 1 è zero).

Ma allora è vero!... La pressione acustica si misura in dB.

Non esattamente. La pressione acustica, come tutte le pressioni, si misura in *pascal* (Pa), ma...

Ricordate il Lago di Garda, per misurare le distanze?... Ecco, ora sì che quel giochino diventa vantaggioso.

Come valore di base, stavolta ci si riferisce alla pressione di 0.00002 Pa (2×10^{-5} , in notazione esponenziale), o se preferite, $20 \mu\text{Pa}$ (micropascal), perché è il minimo percepibile da un orecchio medio a 1000 Hz.

Tale valore andrà messo al denominatore, proprio come facevamo per la lunghezza del lago.

Nelle formule si indica con il simbolo p_0 . Basandosi su quel riferimento, qualunque pressione potrà essere espressa in dB, adattandosi alla percezione logaritmica del nostro udito.

Vi racconto una piccola curiosità, per sottolineare come il dB non sia affatto "l'unità di misura del suono", come spesso si sente dire.

In origine aveva un altro nome: si chiamava **TU** (Telecommunication Unit).

Era stato introdotto dai tecnici della *Bell Company*, la prima compagnia telefonica della Storia, e serviva a misurare **le perdite sui cavi**.

Alla morte del fondatore (Graham Bell), circa un secolo fa, decisero di derivare dal suo cognome la nuova unità di misura, che solo 30 anni dopo avrebbe trovato spazio in acustica.

Inoltre, la parola "suono" è un po' troppo generica.

- C'è la **potenza acustica**, espressa in watt acustici, che riguarda tutta l'emissione dell'altoparlante verso qualsiasi direzione, in un ideale spazio sferico intorno alla sua posizione. Non dipende dalla distanza.

- Poi abbiamo l'**intensità acustica**, espressa in W/m^2 , ovvero la potenza specifica che colpisce una certa superficie, ad esempio una vetrata. Quando ascoltate musica con la finestra aperta, il vicino del palazzo di fronte può essere più o meno infastidito... dipende dall'area della finestra.

- Infine c'è la **pressione acustica**, misurata in un singolo punto, comunemente espressa in dB contro le normative del Sistema Internazionale, che tollera la situazione ma non l'ha mai accettata.

Non tutti lo sanno, ma il dB non esiste nel loro elenco ufficiale: le pressioni si misurano in *pascal* e basta!

Nell'introduzione, vi avevo promesso che non avrei mostrato formule matematiche, perché queste sono amichevoli chiacchierate da pic-nic.

Nella puntata precedente era indispensabile, ma per rispettare la promessa ho aggiunto un'appendice fuori dalla parte discorsiva, in modo da isolare lì dentro tutte le equazioni.

Stavolta non ce la faccio, ragazzi... la **formula di Small** è troppo bella per non parlarne.

Inoltre, l'unica parte difficile è il logaritmo legato al dB, per il resto è semplicissima e addirittura intuitiva.

Basta non guardarla nella sua completezza, ma dividerla in tanti pezzetti. Lo faremo anche noi.

Per adesso, la mostro per intero:
$$SPL(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\rho_0 \cdot E_g \cdot BL \cdot S_d}{\rho_0 \cdot 2\pi \cdot R_e \cdot M_{ms}} \right)$$

Nelle aziende di elettroacustica, talvolta, arrivano telefonate di progettisti dilettanti, che chiedono consigli sulla cassa per quel woofer, sul filtro per quel tweeter... le solite cose. Generalmente, l'ufficio commerciale smista la chiamata al laboratorio, per fornire al cliente l'aiuto di un tecnico.

Ai miei tempi, avevano assegnato a me questo incarico di rispondere al telefono.

Se mi accorgevo di avere a che fare con qualcuno in gamba, gli dettavo la formula di Small e gli dicevo:

- Quando avrai familiarità con questa, avrai capito metà dell'elettroacustica.

Per arrivare a quel risultato, Richard Small partì dall'opera di un altro fuoriclasse, **Leo Beranek**, morto nel 2014 a 102 anni; lo vedete qui a destra.

Secondo alcuni, è stato il padre dell'acustica moderna. Tra i suoi innumerevoli meriti, negli anni '50 produsse uno studio sugli altoparlanti, che in seguito avrebbe portato Small ai risultati che sappiamo.



Esiste un'altra formula, sempre di Small, per calcolare l'efficienza in **percentuale**.

Cercherò di risparmiarvela, ma dovete sapere che l'ho messa in un foglio di calcolo, insieme a quella che abbiamo già visto, per mostrarvi alcuni esempi.

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	7,4 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	12 g
		R_e :	6,1 Ω
E_g :	2,83 V	d:	100 mm
α_s :	2 π sr		
		S_d :	0,00785 m ²
η :	0,21%	SPL:	86,5 dB

Prima di andare avanti, vediamo se funziona o se ci sono errori.

I valori di colore nero, nella zona di destra, vengono dal datasheet di un woofer da 130 della *SICA*, una delle poche marche che danno l'efficienza in percentuale.

Quelli a sinistra li vedremo dopo, per adesso dobbiamo fare un confronto con i dati pubblicati a catalogo.

Qui a lato vediamo il ritaglio del datasheet originale, in cui ho evidenziato i dati che ci interessano.

Mettendo i loro parametri sul mio foglio di calcolo, ottengo esattamente la stessa efficienza percentuale pubblicata dall'azienda: **0.21%**.

L'**SPL** non si vede nel nostro ritaglio, ma ve lo dico io: **86.7 dB** contro il mio **86.5**; capita quasi sempre, si tratta di piccoli arrotondamenti: un decimale qua e là che non è stato considerato.

In sostanza, possiamo dire che il mio foglio funziona.

R_e	6.1 Ω	F_s	48.5 Hz
Q_{ms}	4.15	Q_{es}	0.41
Q_{ts}	0.37	M_{ms}	12.0 g
C_{ms}	897 $\mu\text{m/N}$	B_{xl}	7.4 Tm
V_{as}	7.8 l	S_d	78.5 cm ²
$X_{max}^{(5)}$	+/-4.5 mm	$X_{var}^{(6)}$	+/-6.5 mm
η_0	0.21 %	L_e (1kHz)	0.53 mH

A questo punto, abbiamo tutti gli strumenti che ci servono: conosciamo il dB, abbiamo il foglio di calcolo, i parametri ci vengono forniti dalle aziende e soprattutto abbiamo la formula magica.

La ripropongo qui, per evitarvi di scorrere le pagine:

$$SPL(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\rho_0 \cdot E_g \cdot BL \cdot S_d}{p_0 \cdot 2\pi \cdot R_e \cdot M_{ms}} \right)$$

I più attenti avranno notato quel "20" all'inizio... *Ma non dovevamo moltiplicare per 10?*

Sì... è così, ma si tratta di una semplificazione.

In questo caso, l'argomento del logaritmo (tra le parentesi), andrebbe elevato al quadrato.

La formula originale, quindi, sarebbe questa:

$$SPL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{\rho_0 \cdot E_g \cdot BL \cdot S_d}{p_0 \cdot 2\pi \cdot R_e \cdot M_{ms}} \right)^2$$

Tuttavia, dalle proprietà dei logaritmi, sappiamo che $\log a^x = x \cdot \log a$; pertanto, quel "2" all'esponente si porta fuori, il nostro 10 diventa un 20 e ci siamo liberati di quel quadrato.

Avevamo anche detto che la formula diventa intuitiva, se guardata a pezzetti. Quindi abbandoniamo il dB ed il suo logaritmo, tanto ormai l'abbiamo capito. Concentriamoci sull'argomento e scriviamolo così:

$$\frac{\rho_0}{p_0} \cdot \frac{E_g}{2\pi} \cdot \frac{BL}{R_e} \cdot \frac{S_d}{M_{ms}}$$

Ora abbiamo quattro frazioni separate, che prese singolarmente hanno significati molto diversi.

$\left(\frac{\rho_0}{p_0}\right)$ Nella prima abbiamo la **densità dell'aria** (ρ_0) e la **pressione acustica di riferimento** (p_0).

La densità ρ_0 al numeratore sembra indicata con una "p" minuscola, ma è la lettera greca **rho**.

E' un valore in kg/m^3 , che cambia parecchio con la temperatura: si va dall'1.28 di Torino a gennaio, fino all'1.13 di Palermo a luglio. Il valore di **SPL** cambierebbe di circa 1 dB.

Convenzionalmente, si è deciso di porre il valore standard a **1.18** kg/m^3 .

Varierebbe anche con l'altitudine, ma non mi risultano laboratori di elettroacustica a Cervinia.

Del riferimento p_0 abbiamo già parlato... Ve l'avevo detto, che andava messo al denominatore.

Questa prima frazione presenta due valori naturali, su cui non abbiamo alcun controllo; non possiamo alterarli, a meno di non cambiare pianeta o considerare l'orecchio di un altro animale.

$\left(\frac{E_g}{2\pi}\right)$ La seconda ci mostra la **tensione di ingresso** (E_g), proveniente dal nostro amplificatore; dipende solo da come regolate la manopola del volume.

In base all'impedenza dell'altoparlante, la stessa tensione produce più o meno corrente, conseguentemente più o meno potenza. Lo vedremo più avanti.

Il valore convenzionale è **2.83 V** (che corrisponde a 1 W, su 8 Ω resistivi).



Quel 2π al denominatore è l'**angolo solido di radiazione**.

Un altoparlante ideale, sospeso in aria, disperde la sua emissione in tutto lo spazio circostante (4π); ma può stare al centro di un pavimento, vicino ad una parete oppure in uno spigolo della stanza; queste progressive riduzioni concentrano la potenza acustica in spazi sempre più piccoli, aumentando l'**SPL**.

Un angolo solido di 2π steradiani dovrebbe simulare l'emissione in un comune ambiente domestico.

Questa seconda frazione contiene le **condizioni di misura**; potremmo cambiarle, ma non conviene farlo.

Rispettando le convenzioni, possiamo confrontare alla pari altoparlanti differenti.

Ora fermiamoci un attimo...

Abbiamo appena visto i primi quattro valori della formula: due naturali e due convenzionali.

In altre parole, sono sempre gli stessi per qualsiasi altoparlante da misurare. Se avessi voluto, nel mio foglio di calcolo avrei potuto scrivere direttamente **26574**, il risultato finale, al posto di quelle due frazioni iniziali. Ma soprattutto, quei dati riguardano l'atmosfera, l'orecchio, l'amplificatore e la stanza; non c'è nulla che sia legato al nostro woofer o al nostro tweeter. Beh... state concentrati perché è il momento di arrivarci.

Spero che abbiate già letto la chiacchierata precedente, perché i valori che vedremo adesso sono già stati ampiamente discussi. Qui ci limiteremo ad un piccolissimo riepilogo.

$$\frac{BL}{R_e} \cdot \frac{S_d}{M_{ms}}$$

Questa è senz'altro la parte più bella della formula; ci troviamo i quattro valori che legano il nostro altoparlante al valore di **SPL**. E ci si potrebbe scrivere un libro...

$\left(\frac{BL}{R_e}\right)$ I dati della terza frazione sono di natura elettromagnetica.

Il **fattore di forza (B×L)** dipende dalla potenza del magnete e dalla porzione di filo conduttore immerso nel flusso del traferro. Ci dice quanto spinge la bobina, a parità di corrente che la attraversa.

La **resistenza (R_e)** impone il valore che quella corrente dovrà avere, in base alla tensione **E_g** che avremo impostato con la manopola del volume.

Vi ricordo che la corrente dipende solo dalla resistenza, perché nel nostro caso la tensione è **fissa**.

Qui non stiamo guardando un film; non regoliamo il volume ogni due minuti sullo stesso altoparlante, ma facciamo esattamente il contrario: cerchiamo di capire come si sentirebbe quel film **se montassimo altoparlanti diversi**. Se ogni volta cambiassimo tensione, non ci capiremmo più nulla.

$\left(\frac{S_d}{M_{ms}}\right)$ La quarta ed ultima frazione contiene dati di natura meccanica.

La **superficie radiante (S_d)** è semplicemente l'area sottesa dalla membrana, fino a metà del bordo.

Se la bobina fa vibrare una membrana più grande, muove un maggior volume di aria; è quindi ovvio che ci siano degli effetti positivi, sulla potenza acustica emessa dall'altoparlante.

La **massa mobile (M_{ms})** crea invece una riduzione di quell'emissione, perché si oppone al movimento con la sua inerzia. Provate a spingere una palla da biliardo e una da bowling, oppure a fermarle se sono già in movimento; capirete cosa prova una bobina mobile, quando controlla un wooferino da 130 rispetto ad un gigantesco 380.

Ricordate quando dicevo che era tutto intuitivo? Provate a darmi torto...

Qualche giorno fa, parlavo al telefono con un amico elettroacustico; si discuteva di un altoparlante che viene proposto in due versioni; da 8 Ω e da 4 Ω. La conversazione andò a finire sulla nostra formula magica, che io spiatteimai come la mia data di nascita: - *Accidenti... Te la sei imparata a memoria?*

Beh... ragazzi, se volete acquisire dimestichezza con l'elettroacustica, la formula di Small **dovete capirla**, non "impararla a memoria". Io ne sono la dimostrazione vivente.

Sono stato un elettroacustico fino al 1995; poi, fino all'estate 2020, non più ho toccato un condensatore.

Se avessi semplicemente **memorizzato** quella formula, come potrei ricordarla dopo 25 anni di inattività?

Abbiamo visto come le grandezze in gioco siano tutte **facilmente intuibili**. Non ci vuole un genio, per capire che l'altoparlante suona più forte in un'aria più densa, con una tensione più alta, con un magnete più potente o con una membrana più grande; vale lo stesso per i valori al denominatore.

Inoltre, a parte il logaritmo, ci sono solo moltiplicazioni e divisioni, roba da scuola elementare.

Dopo aver compreso la formula di Small, si aprono mille spunti di riflessione, tutti interessantissimi per chi si diletta a fare l'elettroacustico. Vediamone qualcuno.

Alla fine della prima pagina, avevamo lasciato un argomento in sospeso...

Come mai il dilettante viene messo alla gogna, se confonde efficienza e sensibilità, mentre i professionisti lo fanno tutti i giorni?

Mi sono fatto un'ipotesi del tutto personale, sull'argomento, basata sul famoso chitarrista qui a destra.



Se un ragazzino tenesse la mano in quel modo, in una qualsiasi scuola di musica, il maestro gli toglierebbe la chitarra e gliela darebbe in testa.

Ovviamente, nessuno si sognerebbe di muovere tali contestazioni a Jimi Hendrix.

Ho anche sentito, nelle scuole di calcio: *"il pallone non si calcia mai di punta"*.

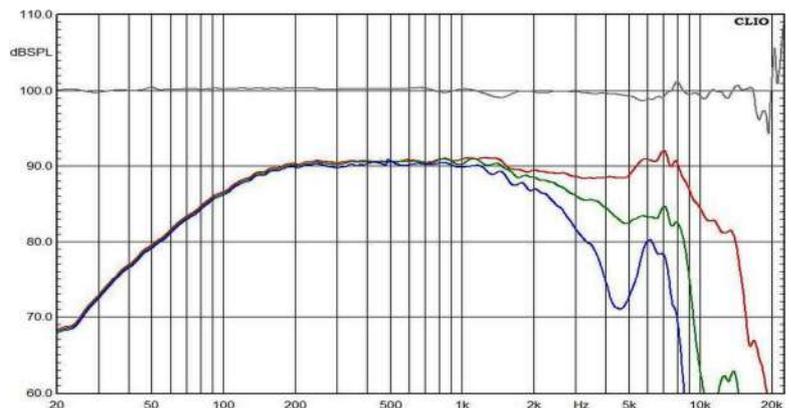
Poi vedi Ronaldo, Cuadrado e Bernardeschi che lo fanno per divertimento, mentre palleggiano tra loro...
...e non sbagliano un colpo.

Come dire... *Tu che sei un tecnico professionista, puoi parlare in modo "sportivo", tanto tra voi vi capite. Ma con il principiante devi essere intransigente, perché lui non conosce le formule di Small.*

Quindi, ragazzi, cercate di capirle così bene da poterle spiegare... Così non vi romperanno più le scatole.

Ora vi faccio un esempio, su come quel valore in dB venga interpretato in due modi diversi, dal professionista e dal principiante.

Supponiamo di avere sottomano la curva di risposta qui a destra, relativa ad un piccolo woofer da 5 pollici.



Un principiante potrebbe esclamare:

- *Wow!... 90 dB su un wooferino da 130!!
E' una bomba. Di che marca è?*

La risposta di un tecnico sarebbe deludente, per lui: - *...Ma non capisci che è da 4 Ω?*

Per arrivare a questo, la formula di Small devi padroneggiarla in scioltezza, deve entrarti nel cervello come un parassita, deve generare in te un sesto senso, che ti porta a valutare i numeri a colpo d'occhio. L'efficienza (OK... OK... l'*SPL*) si porta dietro tutto, perché quei quattro parametri ne coinvolgono altri mille.

Ad esempio, proviamo a scriverla in questo modo:

$$20 \log_{10} \left(\frac{\rho_0}{p_0 \cdot 2\pi} \cdot \frac{E_g}{R_e} \cdot \frac{BL \cdot S_d}{M_{ms}} \right)$$

I valori sono sempre gli stessi, ma ne abbiamo isolati due nella frazione in **rosso**.

Ovviamente, incidono anche loro sull'emissione acustica; se però alteriamo uno di quelli, non è l'altoparlante ad essere più efficiente. Sta semplicemente chiedendo più potenza all'amplificatore, ma così son capaci tutti...

Da qui in avanti, ci divertiremo a fare qualche esempio, usando il nostro foglio di calcolo su altoparlanti reali, presenti sul mercato, che si prestano a farci acquisire dimestichezza con l'equazione.

Proveremo a guadagnare qualche dB, alterando quei parametri uno alla volta, per poi accorgerci...
...che di solito non è possibile, senza ricorrere al solito **magnete più grosso** (sempre lì si va a finire).



Il woofer che vedete a sinistra è un 200 mm in polipropilene, ottimo prodotto a prezzo contenuto; al progettista è riuscito proprio bene.

L'azienda ne ha approfittato per derivarne una versione più piccola, rivolgendosi a chi, sacrificando un po' di bassi, vuole privilegiare la gamma media con una minore direttività, o magari chi ha una stanza di modeste dimensioni, o forse chi vuole abbinargli un tweeter da 19, oppure per chi vuole semplicemente una cassa meno ingombrante.

Ne è uscito il 165 che vediamo qui sotto; già a colpo d'occhio si capisce quanto siano imparentati.

La ferrite sembrerebbe più grande, se non conoscessimo il diametro nominale del woofer, invece è esattamente la stessa.

In realtà, tutto il gruppo motore è identico. Hanno preso quello già in produzione per il 200: stessa bobina, supporto, magneti e traferro; poi ci hanno montato un cestello da 6 pollici.

Avendo visto la curva di risposta, ho il sospetto che anche la membrana sia sempre quella, tagliata a misura per adattarsi al formato ridotto.

Ma è solo un sospetto, non ho prove certe per affermarlo.



Come faccio a sapere che l'originale è quello più grande?

Con un minimo di esperienza è piuttosto evidente: la ferrite da 120 è comunissima in un 200 mm, ma è rarissimo trovarla su un 165 in questa fascia di prezzo.

Quello che conta, per noi, è che i due woofer sembrano fatti apposta per giocherellare con il nostro foglio di calcolo, in particolare con l'ultima frazione della formula di Small (S_d/M_{ms}).

Trascurando piccolissime differenze, dovute alle tolleranze di produzione, i due woofer hanno ovviamente la stessa R_e e lo stesso BL , mentre ciò che si voleva era una riduzione della superficie radiante (S_d).

Con questa scelta, l'**SPL** si dovrebbe abbassare... ricordate dove sta S_d ?:
$$\left(\frac{\rho_0 \cdot E_g \cdot BL \cdot S_d}{p_0 \cdot 2\pi \cdot R_e \cdot M_{ms}} \right)$$

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL :	9,7 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	16 g
E_g :	2,83 V	R_e :	6,5 Ω
α_s :	2 π sr	d :	129 mm
		S_d :	0,01315 m ²
η :	0,53%	SPL:	90,2 dB

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL :	9,7 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	24,5 g
E_g :	2,83 V	R_e :	6,5 Ω
α_s :	2 π sr	d :	163 mm
		S_d :	0,02074 m ²
η :	0,56%	SPL:	90,5 dB

...E invece rimane quasi uguale: **90.5** e **90.2**.

Qui a sinistra vi mostro i risultati ottenuti, inserendo nel nostro foglio di calcolo i dati di entrambi i woofer.

In alto quello piccolo, in basso quello grande.

Riducendo il diametro di emissione (quindi S_d), da 163 a 129, **inevitabilmente** diminuisce anche la massa mobile (M_{ms}); questa non dipende solo dal peso inferiore della membrana, ma anche dalla minore quantità di aria spostata, durante l'escursione.

A conti fatti, i valori si compensano tra loro, producendo una differenza di appena 0.3 dB.

Se così non fosse, come farebbe un tweeter a cupola, con una membrana di soli 25 mm, a produrre un **SPL** di 90-92 dB?

La massa mobile di un tweeter, quando è dichiarata, la troverete sempre in "zerovirgola".

Visto che siamo qui per chiacchierare, alleggerisco con un aneddoto.

Nelle mie prime settimane in laboratorio, il mio capo mi parlò di questa correlazione tra massa e superficie, come adesso ne parlo con voi. Mi trovai in disaccordo, per le mie precedenti esperienze da dilettante:

- Stefano, c'è qualcosa che non torna... Quando vedo un woofer da 250 o 300, trovo 91-92 dB e anche 93. Con quelli piccoli, da 130 o 165, il valore scende a 86-88. Quindi la superficie conta parecchio.

La sua risposta: - Quando ti ricapita, non guardare solo le membrane; guarda anche i magneti.

E daje!... Sempre lì si va a sbattere... Come la rigiri, torni sempre su 'sto maledetto magnete.

Guardate come sembra piccolo, su questo woofer qui sotto...



In realtà, è una rispettabilissima ferrite da 120, quella che prima, sul woofer da 165, sembrava enorme...

...Solo che stavolta la vediamo su un bestione da 300 mm.

Quel magnetino sembra perdersi, in quella tinozza, ma su un woofer da 130 sarebbe più grosso del bordo.

Come si dice... l'apparenza inganna.

I woofer di grande formato, di solito, hanno magneti ben più generosi; è da lì che derivano i 92-93 dB.

A questo punto, proviamo a divertirci con l'altra frazione (BL/R_e), perché è anche più interessante.

Purtroppo, è anche più complicata...

Visto che R_e sta al denominatore, possiamo intuire che riducendola aumentiamo l'*SPL*... Ed è vero.

Tuttavia, abbiamo già visto che è un aumento soltanto apparente, perché in realtà stiamo solo chiedendo all'amplificatore una maggiore potenza. In pratica, è come alzare il volume.

In linea puramente teorica, un abbassamento di R_e dovrebbe aumentare anche l'**efficienza percentuale**, perché è presente al denominatore anche nell'altra formula...

Va bene... fin qui ho resistito, ma a questo punto ve la mostro: $\eta(\%) = 100 \cdot \frac{\rho_0}{2\pi \cdot c} \cdot \frac{BL^2}{R_e} \cdot \frac{S_d^2}{M_{ms}^2}$

Tutti i simboli sono già conosciuti, tranne c che è la velocità del suono; anche lei dipende dalla temperatura, ma convenzionalmente viene posta a 345 m/sec.

Ovviamente ρ_0 è sparito. Non usando più il dB, non ci serve un valore di riferimento.

Questa seconda formula, molto semplicemente, ci dà il rapporto η (eta) espresso in percentuale, tra **potenza acustica in uscita** e **potenza elettrica in ingresso**.

Quella R_e al denominatore parla chiaro: sembra proprio che, abbassandone il valore, l'altoparlante sia davvero più efficiente; ma allora... non si limita a chiedere più corrente dall'amplificatore.

In realtà, sarebbe così se guardassimo i valori uno alla volta, ma avrete già capito che ci sono delle correlazioni inevitabili.

Dalla seconda legge di Ohm, sappiamo che la resistenza di un conduttore è direttamente proporzionale alla lunghezza, ma inversamente proporzionale alla sezione.

Pertanto, una riduzione di R_e corrisponderebbe ad un accorciamento del filo, ma questo penalizzerebbe il BL sulla componente L .

In alternativa, potrei aumentare la sezione di quel filo, ma la bobina avrebbe più spessore; sarei quindi costretto ad allargare il traferro, penalizzando il BL sulla componente B .

Comunque la rigiriamo, per ridurre la resistenza (R_e) dobbiamo abbassare il fattore di forza (BL).

Inoltre, se vi fosse sfuggito, nella formula il BL è elevato al quadrato. Una sua diminuzione avrebbe effetto, sul risultato finale, in misura maggiore rispetto alla riduzione di R_e .

Vediamo se è vero...

Facciamo una prova, con un woofer al di sopra di ogni sospetto. Si tratta di un 165 da 110-120 euro; non è un prodotto di massa, ma un altoparlante ben curato sul quale non si bada a spese.

E' uno dei tanti che possiamo trovare in due versioni, 8 Ω e 4 Ω, ma ho deciso di scegliere questo per due motivi.

Per prima cosa, la R_e viene esattamente dimezzata: 5.4 Ω e 2.7 Ω.

Inoltre, la bobina si mantiene sulla stessa altezza, tant'è che le due versioni esibiscono la stessa X_{max} .

Applichiamo le nostre formule, con il nostro foglio di calcolo, e vediamo cosa ne esce...



ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	8,9 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	16,2 g
E_g :	2,83 V	R_e :	5,4 Ω
α_s :	2 π sr	d:	134 mm
		S_d :	0,01410 m ²
		η :	0,61%
		SPL:	91,6 dB

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	5,6 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	16,2 g
E_g :	2,83 V	R_e :	2,7 Ω
α_s :	2 π sr	d:	134 mm
		S_d :	0,01410 m ²
		η :	0,48%
		SPL:	93,6 dB

Nulla di strano sul valore di **SPL**.

Come ci aspettavamo, il 4 Ω suona più forte...

...E ci mancherebbe! Riceve una potenza doppia.

Ma ora guardate l'efficienza percentuale.

E' la versione da 8 Ω a risultare decisamente superiore: oltre il 25% in più.

Lo possiamo capire anche dal valore in dB.

Raddoppiando la potenza... ricordate?...

L'emissione doveva crescere di 3 dB.

Come mai ne abbiamo solo 2 in più?

Collegato al 4 Ω, l'amplificatore suda sette

camicie, ma la sua fatica viene in parte sprecata.

Tutta colpa del **BL**; osservate quanto è più alto,

nella versione da 8 Ω, grazie ad un filo più lungo e sottile, che produce molte più spire.

Che sia un caso particolare?

Vogliamo provarne un altro?

Nella stessa serie, c'è anche un formato da 130 mm (sui 100 euro): magnete più piccolo, riduzione della massa mobile e, ovviamente, minor superficie radiante; anche questo è disponibile da 4 e da 8 Ω.

Vi mostro la foto ed i risultati (con il 4 Ω in alto).



ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	5 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	12,8 g
E_g :	2,83 V	R_e :	2,7 Ω
α_s :	2 π sr	d:	105 mm
		S_d :	0,00866 m ²
		η :	0,23%
		SPL:	90,4 dB

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	7,8 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	12,8 g
E_g :	2,83 V	R_e :	5,4 Ω
α_s :	2 π sr	d:	105 mm
		S_d :	0,00866 m ²
		η :	0,28%
		SPL:	88,3 dB

Stessa situazione: sul 4 Ω c'è un'efficienza più bassa, nella stessa misura di prima, ma anche qui abbiamo guadagnato 2 dB sull'**SPL**... Capito il trucco?

Quella R_e incide inevitabilmente sul **BL**, non deve mai essere isolata dal contesto.

La diatriba **"8 Ω versus 4 Ω"** era già molto attiva ai miei tempi.

Io meno competenti sono abituati a valutare un impianto sotto forma di "watt"; da sempre, questo produce discussioni che possono apparire divertenti, se ascoltate da un esperto:

- *Come mai hai scelto altoparlanti da 4 Ω?*

- *Perché ho un amplificatore da 60 W, così diventa da 120 e mi aumenta la dinamica!*

Anche questa è una grossa ca... calcolata, ma sbagliata, interpretazione della potenza.

A meno di non avere un *Krell*, nessun amplificatore raddoppia la potenza al dimezzamento dell'impedenza. Se ci siamo comprati un 100 W, andando su 4 Ω possiamo arrivare a 120-130, forse 140; ma per arrivare a 150, occorre già un prodotto di buon livello, meno comune.



La potenza deriva dalla moltiplicazione tra corrente e tensione: per erogare 60 W su 4 Ω, dobbiamo generare **15.5 V** con una corrente alta, di **3.9 A**; su 8 Ω, i volt diventano **22** ma la corrente cala a **2.7 A**. Se l'amplificatore potesse parlare, vi direbbe che preferisce generare tensione. Gli ampere non gli piacciono affatto, a cominciare dalla sezione di alimentazione.

Poi ci sarebbe il **fattore di smorzamento**. Spiegato in modo superficiale, possiamo vederlo come la capacità di controllo esercitata dall'amplificatore, sul movimento della membrana.

Matematicamente, è semplicemente il rapporto tra l'impedenza dell'altoparlante e l'impedenza di uscita dello stadio finale, che per quanto piccola, non è mai uguale a zero.

Talvolta, può capitare che un piccolo amplificatore, da 40 o 50 W, produca un sorprendente impatto dinamico all'ascolto musicale. Ovviamente non succede ascoltando un flauto, ma si sente con il martelletto del pianoforte, la bacchetta del batterista, il plettro sulla chitarra... Tecnicamente, i **transienti** (o transitori).

Chi ascolta quell'effetto, quasi sempre chiede informazioni sulla potenza: - *Quanti watt abbiamo?... 150?... 200?...*

Ho visto parecchie facce stupite, quando gli rispondi **"40!"**, perché il fattore di smorzamento non lo chiede mai nessuno.



Questo valore dovrebbe essere più alto possibile, in un amplificatore ideale sarebbe infinito. Ma qualunque esso sia, è chiaro che un altoparlante da 4 Ω lo dimezzerebbe.

Infine c'è la tenuta in potenza. Con un rendimento più basso, per avere gli stessi dB, devo sollecitare maggiormente sia l'amplificatore che l'altoparlante. Questo incrementa le temperature di esercizio e la probabilità di guasti tecnici; senza dubbio, aumenterà la distorsione.

In sostanza, può darsi che il 4 Ω, in combinazione con l'amplificatore, suoni un po' più forte. Ma di sicuro suona peggio, scalda di più e dura di meno.

In origine, l'impedenza di 4 Ω aveva una concreta motivazione tecnica.

Fino agli anni '70, in campo automobilistico non c'erano gli amplificatori survoltati; si andava con la tensione di batteria a 12 V, che diventavano 14 con il motore acceso.

Su 8 Ω, la massima potenza RMS sarebbe stata di appena 3 W.

Il 4 Ω, invece, consentiva di arrivare a 6 W, che pressappoco era la potenza audio di un televisore.

A proposito di televisori... A quell'epoca, i loro altoparlanti erano addirittura da 16 Ω.

Lì non ci sono limiti di tensione, perché in casa abbiamo tutti la 220. Il problema era ottenere un audio quantomeno decente, da quelle amplificazioni imbarazzanti che ci mettevano dentro.

...Quando vai su 16 Ω è tutto facile, suona bene pure il finale di una radiolina.

Finora, abbiamo visto che la superficie (S_d) si trascina dietro la massa (M_{ms}) in modo diretto, mentre la resistenza (R_e) va ad incidere sul fattore di forza (BL), anche se in modo più complicato e con effetti diversi. Ma se provassimo a procedere al contrario?

Ad esempio, non si potrebbe intervenire sulla massa mobile, lasciando inalterata la superficie radiante? Potremmo usare materiali più leggeri...

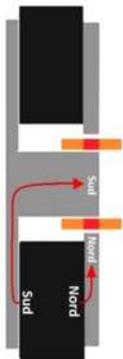
Ovviamente, dopo 100 anni di elettroacustica, quello che si poteva fare è stato già fatto.

Sulla bobina sono stati introdotti il Nomex, il Kapton, la fibra di vetro ed il filo esagonale, ma purtroppo si guadagna pochissimo rispetto alla maggiorazione dei costi.

Le membrane si sono addirittura appesantite, perché l'esigenza prioritaria, a partire dagli anni '80, è stata quella di livellare la risposta fino alle frequenze più alte possibili, anche se questo si pagava in dB.

Quando non c'è questa necessità, ad esempio sui grossi woofer, talvolta interviene il marketing; abbiamo già visto come si arrivi addirittura al Kevlar, solo per poterlo scrivere sul catalogo.

Ma se invece aumentassimo il BL ?... Sì, d'accordo, ma quale dei due fattori? La B o la L ?



Aumentare L sarebbe a costo zero; basterebbe allungare la porzione di bobina che sta immersa nel campo magnetico... E molti lo fanno, ma non fidatevi.

Per esibire quei 91-92 dB, a parità di magneti, sono costretti ad accorciare le due parti di bobina che sporgono dal traferro; questo riduce l' X_{max} aumentando la distorsione.

Per non farsi fregare, basta confrontare i due valori: X_{max} e BL .

Quindi, anche quella L fa la stessa fine di R_e , S_d ed M_{ms} ...

Non si riesce a migliorare un valore senza comprometterne un altro.

Che cosa ci rimane?... Beh, direi che non c'è più molta scelta...

Abbiamo solo il BL nella sua componente B : l'induzione magnetica o densità di flusso.

In teoria, questo valore si potrebbe aumentare con un traferro più stretto, ma è quasi sempre impossibile per via delle tolleranze di produzione: uno spazio molto piccolo, in cui la bobina entrasse per un pelo, produrrebbe un'alta percentuale di scarti, costringendo l'azienda a buttare via un sacco di altoparlanti già montati, ovvero alla fine del ciclo produttivo.

Non si sprecherebbero soltanto materie prime, semilavorati ed energia, ma anche il lavoro degli operai che hanno montato quei prodotti difettosi.



Inoltre, è possibile che l'altoparlante nuovo appaia ben funzionante al controllo qualità, ma che la bobina vada a "strisciare" dopo un po' di tempo, con l'inevitabile assestamento delle sospensioni.

Questo sarebbe il caso peggiore, perché produrrebbe l'effetto più temuto da qualsiasi azienda: il cliente arrabbiato, o quantomeno insoddisfatto del prodotto.

Oltre ad un aggravio di costi e di tempi, per la sostituzione in garanzia dei pezzi difettosi, ci sarebbe anche un danno di immagine: clienti che andrebbero in giro a lamentarsi dell'azienda, con amici e conoscenti.

Nell'era di Internet, questo problema è diventato gravissimo, perché amplificato da forum e social network.

Insomma... per non correre rischi, è preferibile lasciare il traferro così com'è.

A conti fatti, se proprio devo aumentare l'induzione, una ferrite maggiorata costerebbe di meno.

...Pertanto, giriamola come ci pare, ma alla fine si ricasca sempre su di lui: il **magnete più grosso!**

Torniamo quindi al nostro foglio di calcolo, per un'ultima volta.

Come esempio ci appoggeremo a questo woofer da 200, caratterizzato da una piccola ferrite, perché destinato all'uso in sospensione pneumatica. Qui non si trattava di andare al risparmio: serviva un Q_{ts} piuttosto alto, ma con bassa frequenza di risonanza. Non c'era altra via che ridurre il BL . Tra l'altro, per me è una vecchia conoscenza...

Stava già sul mercato ai miei tempi, credo sia dell'87 o forse dell'88.



L'efficienza non è bassissima, come si potrebbe pensare: la piccola bobina da 25, insieme alla membrana in carta trattata, mantengono la massa mobile sul valore di appena 16 g. Un dato bassissimo, per un 200.

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	5,2 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	16,5 g
E_g :	2,83 V	R_e :	5,6 Ω
α_s :	2 π sr	d:	172 mm
		S_d :	0,02310 m ²
η :	0,52%	SPL:	90,8 dB

L' SPL , sorprendentemente, arriva quasi a 91 dB. D'accordo... Vedendo quell' R_e a 5.6, possiamo capire che hanno rubato qualcosa sull'impedenza, ma anche con un più onesto 6.2, saremmo comunque arrivati a 90.

Ciò che stupisce davvero è il valore percentuale pari a 0.52, ma come dicevamo, una massa da 16 g è un vero miracolo, in questa categoria.

Ora, per fare un esperimento teorico, supponiamo di sostituire quella ferrite da 74, mettendoci un più comune formato da 102. Possiamo presumere che il BL aumenti di circa il 40%.

Per la precisione, ho inserito il valore originale moltiplicato per $\sqrt{2}$, visto che poi verrà elevato al quadrato. Così proviamo un'altra volta se il mio foglio funziona.

Eccolo qua...

Come volevasi dimostrare, η % raddoppia, mentre SPL aumenta esattamente di 3 dB.

Nessuna incongruenza, nessuna compensazione, nessuna fregatura nascosta... Per la prima volta, di quei cerchietti viola ne ho fatto soltanto uno.

In altre parole, la potenza del magnete altera solo il BL , senza provocare nessuna conseguenza sugli altri valori.

ρ_0 :	1,18 kg/m ³	BL:	7,4 Tm
p_0 :	0,00002 Pa	M_{ms} :	16,5 g
E_g :	2,83 V	R_e :	5,6 Ω
α_s :	2 π sr	d:	172 mm
		S_d :	0,02310 m ²
η :	1,04%	SPL:	93,8 dB

Sù ragazzi, non siate freddi... Mostrate qualche faccia stupita!... In elettroacustica non capita mai.

Lo abbiamo visto con la bobina, con la membrana, con il traferro... Non è solo una questione di costi; ogni volta che modifichi un pezzo, migliori una caratteristica e ne peggiori un'altra.

Il magnete è l'unico componente che non ti fa impazzire con i compromessi.

È per questo che andavamo a cascare sempre lì, durante la chiacchierata.

Come promesso, questo era l'ultimo esempio.

Spero sia chiaro a tutti, quanto ci sia da imparare dalle formule di Small, tutte e due.

Adesso, forse, è arrivato il momento di dedicarsi un po' ai tweeter, ma per questo vi dò appuntamento...

...Alla prossima!

10 febbraio 2020


(Robert Romiti)