

Cavi audio di potenza

Nuove angolazioni e nuovi risultati

C'eravamo lasciati, un anno e mezzo fa (AR 246), con alcune nuove acquisizioni e qualche dubbio in meno dei tanti che persistono da sempre in materia di cavi audio, ma anche con l'intento di tornarci per cercare elementi nuovi e capire fino a che punto è possibile instaurare un legame scientifico tra le impressioni degli "ascoltoni" - categoria in cui dovremmo riconoscerci tutti noi audiofili, se l'impianto lo accendiamo per ascoltare musica - e le analisi oggettive. Sebbene non avessimo preteso di aver raggiunto il bandolo della matassa, e sebbene avessimo cercato le parole più chiare proprio per non essere fraintesi, nel frattempo abbiamo osservato come quel lavoro abbia scatenato reazioni di varia natura, anche in apparenza irrazionali. Dalle perplessità euristiche, di chi ha fatto notare come l'accordo tra evidenze oggettive e test di ascolto fosse solo parziale, fino alla patente distorsione delle affermazioni e persino dei risultati, passando per le invettive personali di chi ritiene di poter emettere sentenze dall'alto della propria esperienza inarrivabile di critico o di commerciante in alta fedeltà.

Ma per fortuna assai numerose sono state anche le reazioni positive dei lettori, che vogliono capire se e quanto un cavo può influire sulla qualità di un impianto, se e quanto è il caso di investirci, se hanno un senso le tante trovate stravaganti che il mercato propone (esempio: i segnali per il "rodaggio" dei cavi) ed in quali condizioni le differenze possono rendersi più concrete. Avevamo già in programma di effettuare altri test comparativi allorquando, subito prima di partire per il Top Audio, abbiamo ricevuto una articolata disamina sull'argomento "cavi" a cura del dott. Mario Bon, personaggio noto da oltre vent'anni nel mondo dell'alta fedeltà ed attualmente, tra l'altro, progettista di alcuni dei maggiori sistemi di altoparlanti Opera. L'analisi di Bon è a tutto campo, parte da una visione originale e ci ha piacevolmente "costretto" a riesaminare i risultati ed a trovarne di nuovi, che per ragioni di spazio pubblicheremo nel prossimo fascicolo di AUDIOREVIEW. In questo numero pubblichiamo integralmente il contributo di Bon.

Fabrizio Montanucci

La lettera di Mario Bon

Ritengo fondamentale determinare le correlazioni tra misure di laboratorio e qualità soggettive del suono e, nel mio piccolo, vorrei dare un contributo. Recentemente, avendo avuto qualche problema con dei cavi, mi sono trovato nella necessità di approfondire l'argomento e, per farlo, sono partito proprio dall'articolo pubblicato nel numero 246 di AUDIOREVIEW - "Cavi e Qualità del suono". Questa lettera è una specie di "supplemento di indagine" su alcuni aspetti che, secondo me, vale la pena approfondire. Spero di aver fatto i conti giusti.

Confronto qualitativo e quantitativo

La Tabella 1 è una rielaborazione dei dati riportati ne "La stele di Rosetta", a pagina 45 (AR 246). Per ciascun cavo è stata calcolata l'impedenza caratteristica e la velocità di propagazione. Inoltre, è stata aggiunta una colonna con il materiale dielettrico. I cavi sono ordinati secondo la preferenza attribuita all'ascolto da Marco Benedetti alle pagine 64-65.

Ci sono tre cose da notare: il cavo Flatwire Ready FLT 18 presenta una velocità di propagazione maggiore di quella della lu-

ce nel vuoto (**): uno dei parametri è stato falsato probabilmente per un errore di stampa. La seconda è che i parametri del cavo Transparent Cable Music Wave Super sono falsati dalla presenza del filtro RF e quindi vanno considerati indeterminati (*). La terza è che non tutti i dielettrici, desunti dalle descrizioni dei cavi, sono noti e la tabella è incompleta.

Il cavo Transparent Cable Music Wave Super (che è il più corto del lotto, 2,5 metri, e l'unico con banda passante limitata da un filtro) ha ricevuto il giudizio di ascolto migliore. A ben guardare questo cavo è formato da tre sezioni: uno spezzone di cavo lungo 125 cm circa, il filtro, un secondo spezzone di cavo di 125 cm. Uno spezzone di 125 centimetri è sufficientemente corto per essere rappresentato con il modello a parametri concentrati anche oltre i 20 kHz (come vedremo oltre). Per quanto riguarda il filtro inserito in questo cavo, possiamo supporre che si tratti un quadrupolo a pi-greco o a T (per mantenere la simmetria) o costituito da una sola induttanza in serie per essere il più semplice possibile ma anche per non aumentare la capacità o peggiorare l'isolamento G. Il cavo Transparent Cable Music Wave Super equivale con buona approssimazione a tre quadrupoli in cascata: è il "meno cavo" di tutti, il che giustifica il giudizio qualitativo: il miglior cavo è il cavo che

non c'è. Se così fosse, avremmo una facile soluzione per migliorare qualsiasi cavo: inserire, a metà lunghezza, una piccola induttanza (avvolta in aria e schermata) del valore di un paio di microHenry per ogni metro di cavo.

Ora l'analisi, e credo anche le condizioni di misura, per i 18 cavi in prova sono state fatte applicando al cavo il modello semplificato a parametri concentrati. Nel seguito verificheremo in quali condizioni questa ipotesi è valida. Quindi valuteremo, oltre ai parametri elettrici, il contributo dell'effetto pelle, del dielettrico e l'effetto Maxwell-Wagner.

Modello a parametri distribuiti

I cavi sono, a tutti gli effetti, delle linee di trasmissione di lunghezza finita e, in generale, sono rappresentati con un modello a "parametri distribuiti" (Figura 1), dove appaiono:

- parametri longitudinali (in serie): resistenza R per metro e induttanza L per metro
- parametri trasversali (in parallelo): conduttanza G per metro e capacità C per metro.

Questi parametri dipendono dalla frequenza e possono essere soggetti a fenomeni non lineari (per esempio la rottura del dielettrico a tensioni eccessive). La

Tabella 1

n	Marca e Modello	R mΩ	L μH	C pF	Velocità/ Velocità luce	dielettrico	Z ₀
1	Transparent Cable Music Wave Super (*)	7.48	?	?	?	polipropilene	?
2	Transparent Cable The Wave 100	7.6	0.68	509	0.179	polipropilene	36.55069
2	Kimber Kable 8TC	7.1	0.164	336	0.449	polietilene	22.09288
2	Kimber Kable 4VS	16.2	0.28	131	0.551	polietilene	46.23207
3	Flatwire Ready FLT 18 (**)	29.8	?	?	1.396(?)	?	?
4	G&BL HPV 8008-3 (16 conduttori isolati)	7.9	0.35	428	0.272	polipropilene	28.59645
4	Monitor PC Black & Ehite LS 1000	6.6	0.3	174	0.462	polietilene	41.52274
4	Audioquest CV-6	14.2	0.403	195	0.376	pvc	45.46061
5	G&BL HSP 35	6.8	0.74	47	0.565	?	125.4778
5	Oehlbach Cable Type 1091	8.5	0.782	35	0.637	?	149.4753
5	Oehlbach Cable Type 1226	8.5	0.75	32	0.681	?	153.0931
5	Supra Ply 3.4	10.4	0.474	173	0.368	pvc	52.34391
5	Monitor PC Cobra Silver	15.2	0.906	34	0.601	?	163.2393
5	Supra Ply 2.0	17.5	0.472	186	0.356	?	50.37494
5	Monster XP-HP NW	19.1	0.758	52	0.531	pvc	120.7349
6	Audioquest Pikes Peak	10.8	0.409	235	0.340	pvc	41.71841
6	Monitor PC Gladiator C-2	14.3	0.756	43	0.585	?	132.5949
7	Flatwire Ready De PWR 12	10.4	0.096	6402	0.135	?	3.872378

conduttanza G è l'inverso di una resistenza e rappresenta l'isolamento del dielettrico (la guaina del cavo). I quattro parametri caratteristici del cavo sono definiti in modo che il loro valore totale, per un cavo di lunghezza nota, possa essere ottenuto moltiplicando il valore "per metro" del parametro per la lunghezza totale del cavo. Per esempio, se un cavo presenta una induttanza di 1 microHenry per metro, tre metri di cavo presenteranno una induttanza complessiva di 3 microHenry. Lo stesso vale anche per R, C e G. Da questi parametri si ricavano l'impedenza caratteristica (Z₀), la velocità di propagazione del segnale lungo la linea, i coefficienti di riflessione e di attenuazione che caratterizzano la linea.

Modello a parametri concentrati

Il modello a parametri concentrati non è diverso, nella forma, dal modello a parametri distribuiti ma, invece di rappresentare un tratto infinitesimo di cavo, rappresenta l'intero cavo. Nel modello a parametri concentrati R non rappresenta la resistenza per metro ma la resistenza totale e analogamente L, C e G rappresentano l'induttanza totale, la capacità totale e la conduttanza totale del cavo.

Usare il modello a parametri concentrati significa togliere la linea e sostituirla con un quadripolo: qualsiasi proprietà della linea di trasmissione (velocità di propagazione, impedenza, coefficienti di riflessione, ecc.) scompare, restano solo le proprietà del quadripolo rappresentate da R, L, C e G. In particolare, a bassa frequenza dove R e G sono dominanti, il quadripolo si riduce ad un partitore di tensione.

La condizione necessaria affinché la linea possa essere rappresentata da un quadripolo è che sia una "linea molto corta". La lunghezza deve essere molto minore della

lunghezza d'onda corrispondente alla massima frequenza da trasmettere. Per valutare la lunghezza d'onda si deve conoscere la velocità di propagazione. La velocità di propagazione del segnale lungo una linea di trasmissione è una frazione della velocità della luce nel vuoto. Per una linea coassiale da 50 ohm essa vale circa il 66% della velocità della luce nel vuoto (0.66c), diciamo 200.000 chilometri al secondo. Facciamoci quattro conti.

Nella Tabella 2 vengono confrontati due cavi, uno "veloce" ed uno "lento", a tre frequenze diverse (0.66c significa 0.66 volte la velocità della luce nel vuoto). Leggendo i valori in Tabella 2 possiamo dire che, per linee lunghe fino a 5 metri, l'errore massimo che si commette adottando il modello a parametri concentrati è inferiore a qualche grado a 20 kHz: per frequenze inferiori possiamo accettare di sostitui-

re la linea con un modello a parametri concentrati. A 200 kHz l'errore di fase commesso trascurando il tempo di propagazione lungo il cavo sale a decine di gradi e il modello a parametri concentrati appare più indicato.

Velocità di propagazione

La sesta colonna riporta il rapporto tra la velocità di propagazione e la velocità della luce. Alcuni cavi hanno velocità di propagazione nell'ordine di 0.6c, altri sono più "lenti", con un minimo di 0.135c. Per i cavi più "lenti" l'errore di fase a 20 kHz, adottando il modello a parametri concentrati, e nell'ordine di 3° per cinque metri di cavo. I cavi G&BL HPV 8008-3 e il Flatwire Ready DePWR, per esempio, sono cavi "lenti" e quindi l'errore di fase all'estremo della banda è più sensibile. In teoria i cavi

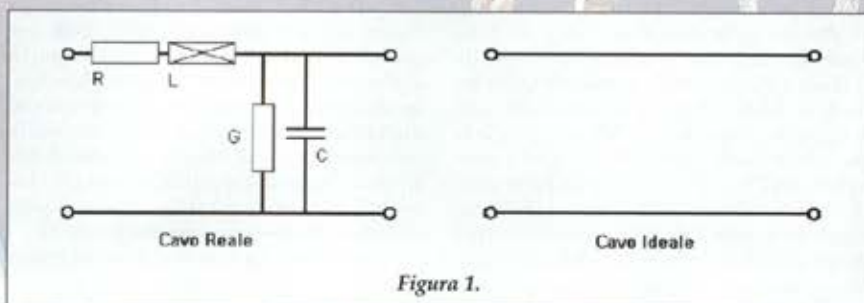


Figura 1.

Tabella 2

Frequenza in Hz	Ritardo introdotto da un cavo lungo 5 metri con velocità pari a 200.000 km/sec. (0.66c) in gradi decimali	Ritardo introdotto da un cavo lungo 5 metri con velocità pari a 60.000 km/sec.(0.2c) in gradi decimali
2.000.000	90°	297°
200.000	9°	29.7°
20.000	0.9°	2.97°

migliori dovrebbero essere quelli più "veloci".

Comunque, osservando i valori in Tabella 2, la velocità di propagazione non appare correlata al giudizio di ascolto: ai primi posti troviamo un cavo particolarmente "lento" e due mediamente "veloci", e tra i cavi meno graditi ce ne sono dei due tipi indistintamente.

Impedenza caratteristica

L'impedenza caratteristica di un cavo dipende dal rapporto tra induttanza e capacità. Il suo valore non è importante in assoluto ma lo diventa in relazione al valore dell'impedenza del carico. In alta frequenza il massimo trasferimento di energia si ottiene quando l'impedenza del carico è uguale all'impedenza della linea. Leggendo la Tabella 1 si desume che l'impedenza caratteristica dei cavi in esame assume valori compresi tra 3.8 ohm e 291 ohm. Si tratta di una variazione notevole. La cosa curiosa è che il cavo con l'impedenza caratteristica più vicina a quella di un carico reale (con il ROS più basso in assoluto) è ultimo come preferenza di ascolto. Possiamo interpretare il risultato in due modi:

- trasferire le frequenze più alte al carico è un difetto
- l'alta capacità del cavo Flatwire sovrasta qualsiasi altro effetto.

La seconda ipotesi appare la più probabile. Comunque, dato che interessa il trasferimento di potenza alle frequenze audio, il fatto che l'impedenza caratteristica non abbia correlazione con la qualità sonora va considerato un risultato atteso.

Dieletrico ed effetto piezoelettrico

L'isolamento delle guaine plastiche dovrebbe produrre valori di G nell'ordine di $10^{(-12)}$ o inferiori (più è piccolo e meglio è). Nel cavo Supra, costituito da due cavi di sezione rettangolare accostati sul lato più lungo, ci si deve aspettare un valore di G ridotto a causa della maggiore superficie di contatto. Questo può interferire con la misura della capacità. Ma quello che è più interessante notare è che tutti i cavi isolati con PVC si trovano nella parte bassa della tabella, mentre i cavi dal suono soggettivamente migliore sono isolati con polipropilene o polietilene. Qui esiste una

possibile spiegazione: il PVC è un materiale piezoelettrico, il polietilene no. È un peccato non conoscere il dielettrico di ciascun cavo.

Vediamo più in dettaglio l'effetto piezoelettrico. Un materiale è detto piezoelettrico quando cambia forma in presenza di campi elettrici. Oltre al quarzo e ad alcune ceramiche, presentano effetti piezoelettrici anche la gomma, il nylon, il PVC, la lana, la fibra di legno e la seta e anche materiali organici come le ossa ed i tendini di balena. Negli anni Ottanta è stato scoperto un polimero, il PVDF (fluoruro di polivinilidene), che è dieci volte più piezoelettrico del quarzo. Il PVDF viene usato nel campo biomedico (sostituisce il timpano negli apparecchi acustici) ma anche per realizzare le guaine dei cavi impiegati nel cablaggio negli aerei (resiste al fuoco, alla temperatura e agli agenti chimici). L'effetto piezoelettrico, negli aerei, è irrilevante rispetto al fattore sicurezza.

Le proprietà piezoelettriche del PVDF derivano dalla presenza, al suo interno, del fluoro. I gruppi $-CF_2$, fortemente polari, in presenza di un campo elettrico tendono ad allinearsi alla direzione del campo. Se il campo elettrico è variabile (un segnale audio) il PVDF "suona" (nel vero senso della parola). Il PVC è parente stretto del PVDF ed è anch'esso piezoelettrico, anche se in misura minore. In effetti il cloro ed il fluoro, nella tavola periodica degli elementi, appartengono allo stesso gruppo e hanno caratteristiche chimiche affini. Non sono particolarmente ferrati in chimica organica, tuttavia ho trovato esplicite conferme sulla piezoelettricità del PVC e all'assenza di tale effetto nel polietilene. Per quanto riguarda il polipropilene non ho trovato conferme ma, se è piezoelettrico, l'effetto dovrebbe essere marginale.

Supponiamo che un cavo sia isolato con materiale piezoelettrico come il PVC. Il campo elettrico, associato alla corrente che fluisce nel cavo, provoca la vibrazione delle molecole del PVC. Quindi una parte dell'energia erogata dall'amplificatore viene dissipata per muovere le molecole del dielettrico. Il movimento delle molecole può essere causa di ulteriori fenomeni dissipativi (isteresi, calore). L'effetto c'è, dovrebbe essere misurabile, e non si può escludere che possa avere effetti udibili.

La cosa giusta da fare è prevenire e non

usare materiali piezoelettrici come isolanti e/o dielettrici nei cavi audio: evitare quindi il PVDF, PVC, nylon e altri. L'unico vantaggio del PVC è il costo molto basso.

Effetto pelle

Quando si parla di cavi si sente nominare "l'effetto pelle". Questo non ha nulla a che vedere con "l'effetto pelle d'oca" che producono i prezzi di certi cavi, è un fenomeno fisico ben conosciuto e studiato, a suo tempo, da Nicola Tesla. Consiste in questo: quando un filo è percorso da corrente alternata, quale il segnale audio, la densità di corrente non si distribuisce uniformemente su tutta la sezione del conduttore ma, all'aumentare della frequenza, tende a concentrarsi vicino alla superficie del filo stesso. In questo modo la sezione del filo che trasporta corrente diminuisce provocando l'aumento della resistività del filo. È come se il filo diventasse sempre più cavo all'interno man mano che aumenta la frequenza. Lo spessore δ , all'interno del quale rimane confinata la corrente, è detto "skin depth" (lunghezza di penetrazione, letteralmente "profondità della pelle") e va confrontato con il raggio del filo del conduttore.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

δ = resistività (resistenza specifica) del conduttore

ω = pulsazione = $2\pi \cdot$ frequenza

ρ = permeabilità magnetica assoluta del materiale conduttore (per i metalli = $4 \cdot \pi \cdot 10^{(-7)}$).

La lunghezza di penetrazione diminuisce con l'inverso della radice della frequenza. La Tabella 6 riporta lo skin depth al crescere della frequenza.

Se la lunghezza di penetrazione è minore del raggio del conduttore, non c'è effetto pelle. Tanto più il conduttore è grosso, tanto più bassa è la frequenza al di sopra della quale si manifesta l'effetto pelle. Per cavi di diametro superiore a 20 millimetri l'effetto pelle si fa sentire già a 50 Hz. I tecnici dell'ENEL tengono in debito conto questo fenomeno e sfruttano la parte centrale dei cavi per far scorrere al loro interno un liquido di raffreddamento.

In banda audio, l'effetto pelle si manifesta

PVDF (piezoelettrico)	PVC (piezoelettrico)	Polipropilene	Polietilene (non piezo)
$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{F}}{\overset{\text{F}}{\text{C}}} \right]_n$	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$

Figura 2. Strutture molecolari di PVDF, PVC, Polipropilene e Polietilene. Il PVC contiene Cloro che giustifica le proprietà piezoelettriche. Il polietilene non è piezoelettrico.

Tabella 6

Frequenza	Stima dello Skin depth δ = spessore dello strato conduttore
50 Hz	9.5 mm
100 Hz	6.715 mm
1 kHz	2.123 mm
10 kHz	0.671 mm
20 kHz (Banda Audio)	0.475 mm
200 kHz	0.3 mm
2 MHz	47 μ m
20 MHz	30 μ m
200 MHz	9 μ m

quando il raggio del conduttore supera il mezzo millimetro (raggio = 0.475 mm, diametro = 0.95 mm, circa un millimetro). Detto in altro modo: i conduttori di diametro minore di un millimetro sono esenti dall'effetto pelle fino all'estremo della banda audio. L'impiego del filo Litz in banda audio non è giustificato: basta usare conduttori di diametro appena inferiore a un millimetro.

La Tabella 7 è la più interessante: riporta l'aumento di attenuazione del segnale, causato dall'effetto pelle, valutato su un carico da 4 ohm collegato con 10 metri di cavo (5 in andata e 5 in ritorno) alla frequenza di 20 kHz e per diversi diametri del conduttore. È stato considerato un ipotetico cavo dotato di sola resistenza di 0.0178 ohm per metro per millimetro quadro di sezione.

Come si vede, è vero che l'effetto pelle diventa sempre più sensibile all'aumentare del diametro del filo, ma è anche vero che l'attenuazione causata dall'effetto pelle NON aumenta perché compensata dalla diminuzione, in valore assoluto, della resistenza. In altre parole all'aumentare del diametro del filo la resistività aumenta in percentuale ma rimane comunque bassa in valore assoluto (che è quello che interessa).

Ad esempio per il diametro massimo di 20 millimetri la resistenza, a causa dell'effetto pelle, aumenta di 10 volte, ma il valore assoluto della resistenza rimane di

soli 610 millesimi di millesimo di ohm per metro (!).

La cosa è ulteriormente rimarcata dalla Figura 2. Qui si vede l'aumento della resistenza del conduttore in funzione del rapporto tra raggio del conduttore e lunghezza di penetrazione.

Se si parte con un filo a resistenza molto bassa (per esempio 0.01 ohm), la lunghezza di penetrazione aumenta di 5 volte per effetto pelle e la resistenza del cavo rimane comunque bassa (meno di 0.03 ohm).

E allora quando è importante l'effetto pelle? La Tabella 8 è simile alla Tabella 7, ma riguarda un cavo lungo 50 centimetri con conduttori molto più sottili e frequenze molto più alte. Le resistenze sono espresse in ohm anziché milliohm.

Con un filo sottile e a frequenza elevata

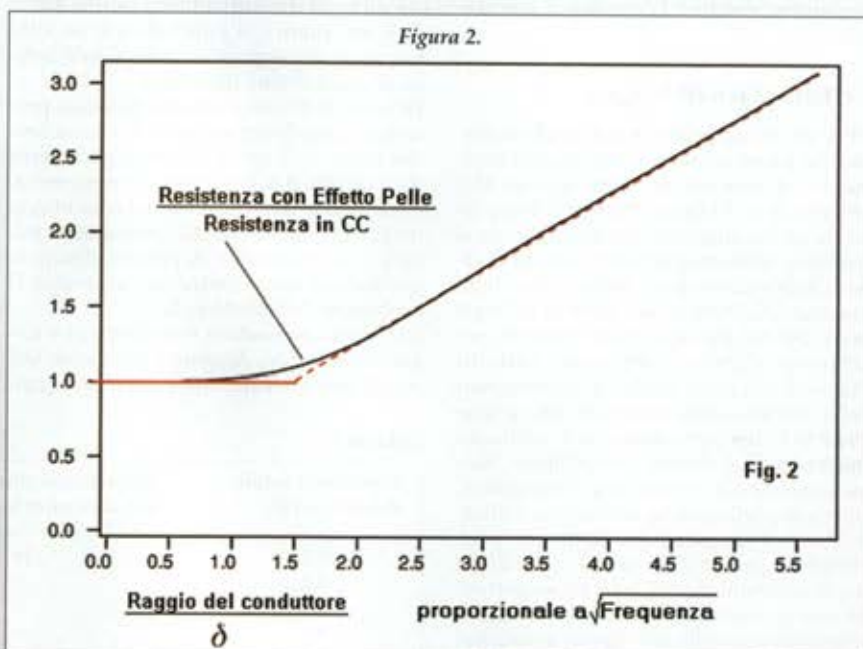


Tabella 7

Frequenza	diametro del filo in millimetri	Resistenza in CC (senza effetto pelle) in m Ω per metro	Resistenza in AC (con effetto pelle) in m Ω per metro	Aumento di resistenza per effetto pelle in m Ω	Aumento dell'attenuazione su carico resistivo di 4 Ω in dB causata dall'effetto pelle (10 metri di cavo)
20 kHz	1	22.7	22.7	0	0
20 kHz	2	5.7	7.8	2.1	0.046
20 kHz	3	2.5	4.7	2.2	0.048
20 kHz	4	1.4	3.4	2.0	0.042
20 kHz	20	0.06	0.61	0.55	0.012

Tabella 8

Frequenza	diametro del filo in millimetri	Resistenza in CC (senza effetto pelle) in Ω per metro	Resistenza in AC (con effetto pelle) in Ω per metro	Aumento di resistenza per effetto pelle in m Ω	Aumento dell'attenuazione su carico resistivo di 4 Ω in dB causata dall'effetto pelle (10 metri di cavo)
20 MHz	0.1	2.26	4.44	2.2	2.5
20 MHz	0.2	0.55	2.04	1.5	2.4

l'attenuazione per effetto pelle è importante, ma siamo assolutamente fuori dal nostro campo di interesse.

Per concludere, l'effetto pelle esiste, è prevedibile e misurabile, ma si manifesta con attenuazioni inferiori al decimo di dB a 20.000 Hz anche quando il diametro del conduttore è ragguardevole. Per quanto riguarda i cavi di potenza per diffusori acustici, l'aumento del diametro del conduttore offre vantaggi molto più significativi rispetto alle possibili limitazioni dovute all'effetto pelle. È sempre conveniente impiegare cavi di grosso diametro. I cavi in argento e in rame argentato non sono attraenti perché meno soggetti all'effetto pelle, ma perché l'argento protegge il rame dall'ossidazione. L'ossido di argento viene impiegato per produrre paste conduttive, conduce la corrente e non rettifica.

L'effetto Maxwell-Wagner

Oltre all'effetto pelle e a quello piezoelettrico ne esiste un altro, recentemente attribuito al dielettrico, dal nome quanto mai affascinante: l'effetto Maxwell-Wagner (detto anche rilassamento interfacciale o polarizzazione interfacciale). Si parla di effetto Maxwell-Wagner nell'ambito delle proprietà dielettriche dei modelli cellulari ma anche nei modelli bidimensionali per magneto-tellurica. Affinché l'effetto Maxwell-Wagner abbia luogo servono delle cellule o delle molecole con cariche libere al loro interno immerse in un fluido che contenga anch'esso cariche libere. Non mi sembrano le condizioni riscontrabili all'interno della guaina di un cavo. L'effetto Maxwell-Wagner è quindi quanto poco probabile perché mancano le condizioni che lo determinano ma, se ci fosse, potrebbe manifestarsi solo a frequenze molto basse (dove un ottimo diffusore acustico ci mette, di suo, almeno 1% di distorsione). A bassa frequenza le verifiche sono più facili: se ci fosse un effetto Maxwell-Wagner si vedrebbe.

Detto per inciso la magneto-tellurica è una scienza seria, complementare alla sismica, che permette di ricavare le mappe di resistività degli strati profondi del terreno con un sistema non invasivo (un tempo mi occupavo di ciò). Per quanto riguarda la rappresentazione delle proprietà dielettriche nei modelli cellulari, per quel poco che so, queste hanno poco a che vedere con l'Hi-Fi. Io stesso mi pongo tra i promotori della interdisciplinarietà tra le scienze.

La componente resistiva

Un cavo con una resistenza complessiva di 0,2 ohm (dieci metri di cavo da 20 milliohm per metro) può essere ritenuto buono o scadente a seconda che sia connesso ad un diffusore con impedenza nominale di 16, 8 o 4 ohm (Tabella 3).

Anche se la classificazione fatta è assolutamente arbitraria, questo esempio dimostra che lo stesso cavo è indicato in certe situazioni e meno in altre: dipende dal carico cui è collegato. Perdere potenza sul cavo ha un costo: perdere 0,45 dB di segnale significa perdere circa il 10% di potenza.

Nel caso peggiore la risposta in frequenza del diffusore risulta alterata di quasi un dB. Ciò indica chiaramente quanto siano importanti la sezione e la lunghezza del cavo in rapporto ai minimi di impedenza del diffusore acustico nei confronti della risposta del diffusore. Non è raro che i minimi di impedenza dei diffusori acustici, specie a tre vie, si trovino in gamma bassa o medio-bassa. Un cavo sotto-dimensionato, oltre ad attenuare la gamma bassa, riduce il fattore di smorzamento della risposta sui bassi con esiti udibili (Tabella 4).

Nell'uso pratico si può tollerare un'attenuazione del segnale trasmesso nell'ordine di pochi decimi di decibel.

Dato che i diffusori acustici possono presentare impedenze anche molto basse (anche meno di 2 ohm), il primo parametro da valutare è la resistenza complessiva, che dipende dalla sezione del conduttore: maggiore è la sezione del conduttore e minore è la resistenza e la potenza dissipata (persa) sul cavo. Vedremo più avanti il contributo dell'effetto pelle.

La Tabella 5 riporta la resistività dei 4 migliori conduttori. Argento e rame sono utilizzati per costruire fili, l'oro è utilizzato

per placcare i contatti e i connettori (non ossida), l'alluminio viene usato, a volte, per realizzare l'avvolgimento delle bobine mobili degli altoparlanti.

Dei quattro il rame offre il miglior rapporto resistività/prezzo ed è per questo largamente utilizzato. La resistività dell'argento è circa il 10% più bassa rispetto al rame: fissato un diametro D per un filo in argento, la stessa resistenza si ottiene con un filo di rame di diametro 1,05*D (maggiorato del 5%).

Conviene quindi aumentare un poco il diametro e usare il rame che costa meno. Anche i cavi più costosi sono fatti di rame, anche se sono venduti a peso d'oro (anzi qualche cosa in più).

Le componenti reattive

Veniamo ora all'accoppiamento amplificatore-cavo. In teoria l'impedenza di uscita di un amplificatore dovrebbe essere nulla o comunque piccola (decimi o centesimi di ohm) e puramente resistiva. Esiste una classe di amplificatori allo stato solido, con banda passante ad anello aperto limitata (1 kHz o meno) e, per questo, fortemente controreazionati, che presentano una spiccata componente induttiva nell'impedenza di uscita. Questi amplificatori hanno una impedenza di uscita che, praticamente, è composta da una resistenza con una bobina in serie. Questa induttanza, sommata a quella del cavo e con la

Tabella 3

Resistenza totale del cavo in Ω	Impedenza nominale del diffusore (carico) in Ω	Attenuazione in dB
0.2	16	-0.108 (buono)
0.2	8	-0.215
0.2	6	-0.285
0.2	4	-0.424 (scadente)
0.2	3	-0.56
0.2	2	-0.83 (disastroso)

Tabella 4

Attenuazione in dB	Tensione utile sul carico in %	Potenza persa in %
0.45	0.95	10
0.35	0.96	7.84
0.26	0.97	5.91
0.18	0.98	3.96
0.09	.99	1.99
0	1.0	0

Tabella 5

Metallo	Resistività a 20° per millimetro quadro di sezione e per metro	Coefficiente di temperatura
Argento	0.0163 ohm	0.004
Rame	0.0178 ohm	0.004
Oro	0.0230 ohm	0.0036
Alluminio	0.0280 ohm	0.004

capacità parassita del cavo stesso, forma un circuito risonante che può portare l'amplificatore vicino all'instabilità (riducendo i margini di guadagno e di fase). L'instabilità si può manifestare con un picco nella risposta in frequenza dell'amplificatore o peggio con l'innesco di oscillazioni. Queste oscillazioni non sono udibili ma "succhiano corrente" e producono distorsione per intermodulazione... e tutto ciò non aiuta. Anche nel caso si generi "soltanto" un picco nella risposta questo porterebbe un aumento della corrente nel tweeter e non è detto che il tweeter stesso la gradisca (specie se si tratta di un tweeter con la membrana in metallo). Al minimo aumenterebbe l'intermodulazione con le altre componenti del segnale. Non è detto che le reti di Zobel siano sempre sufficienti per evitare questi inconvenienti. Anzi, la presenza delle reti di Zobel potrebbe proprio indicare la necessità di compensare l'impedenza di uscita e smorzare l'effetto dei carichi reattivi.

Riassumendo: la combinazione cavo-diffusore può alterare la risposta del diffusore (a causa di R), la combinazione amplificatore-cavo-diffusore può mandare in crisi l'amplificatore (a causa di L e C) e compromettere la resa complessiva dell'impianto. La presenza della componente induttiva da sola produrrebbe un'attenuazione all'estremo alto della banda audio che potrebbe addirittura avere effetti favorevoli (per esempio se il tweeter è troppo esuberante). Ecco quindi che, sostituendo il cavo, si possono ottenere risultati udibili anche molto diversi. La colpa non va imputata al solo cavo, ma dipende anche dall'amplificatore. Un cavo a bassa capacità è, in linea di principio, sempre preferibile. Un tempo si usava misurare la risposta in frequenza e la risposta impulsiva (onda quadra) degli amplificatori su carico reattivo per valutarne la stabilità... oggi non più.

La distorsione dei cavi

Limitiamoci al modello a parametri concentrati. Se R e G sono lineari, almeno a bassa frequenza, il cavo non produce alcuna forma di distorsione. Se distorsione esiste, va attribuita al dielettrico.

Se il carico connesso al cavo, alimentato da un generatore di tensione, NON è lineare, non sarà lineare nemmeno la tensione ai capi di R e G. Se invece cavo (il quadrupolo) è alimentato da un generatore di corrente, la tensione ai capi di R non presenta distorsione, che appare invece ai capi di un "carico non lineare" (altoparlante) e anche all'ingresso del quadrupolo. Gli altoparlanti dinamici, se pilotati in corrente anziché in tensione, producono meno distorsione: la forza che muove il diaframma dell'altoparlante è $F = Bli$, e se i (corrente) è indipendente dal carico, la linearità della forza dipende solo dalla li-

nearità di B (fattore di forza), indipendentemente dalle variazioni di induttanza della bobina mobile. Con il pilotaggio in corrente c'è una fonte di distorsione in meno.

Un cavo produce distorsione? È possibile, ma deve essere veramente di scarsa qualità. Trascuriamo il dielettrico.

Il conduttore del cavo è fatto di rame, il rame contiene ossidi e a contatto con l'aria la superficie del rame si ossida. L'ossido di rame ha potere rettificante: si comporta cioè come un diodo e lascia passare la corrente prevalentemente in un verso. Quando non esistevano i diodi a giunzione pn venivano usati diodi all'ossido di rame e al selenio. Il rame ossidato produce distorsione per rettificazione. Maggiore è il numero dei trefoli (strand) che compongono il cavo, tanto più il cavo è flessibile, ma tanto più aumenta la possibilità che si formi ossido sulle superfici a contatto con l'aria. Da questo punto di vista, il cavo migliore è quello unipolare (solid core) a sezione circolare (ma non è flessibile). Per evitare gli ossidi i cavi vengono realizzati con rame purificato (internamente privo di ossigeno e altre impurità) classificato OFC o OFHC. La rettificazione può avvenire anche quando la terminazione del cavo è fortemente ossidata: praticamente deve essere verde. Per scongiurare qualsiasi effetto indesiderato è sufficiente mantenere i connettori e le superfici di rame in contatto "normalmente" pulite. Tutti questi problemi scompaiono se il cavo è in rame OFC argenteo e se i connettori sono dorati (niente ossido, niente rettificazione). Le morsettiere dorate presenti sui diffusori acustici, da questo punto di vista, trovano una giustificazione: preservano le superfici di contatto dalla corrosione e dagli ossidi. Per cavi appena "normali" la distorsione per rettificazione è probabilmente solo una lontana possibilità teorica.

I cavi hanno un verso privilegiato di percorrenza? Fisicamente no, perché il rame ha una struttura cristallina cubica altamente simmetrica, ma se il cavo rettifica il segnale sì. Un cavo molto impuro e molto ossidato rettifica il segnale, ovvero trasporta più corrente in un verso che nell'altro. Il cavo rettificante, per definizione, non è una linea di trasmissione (non è simmetrico) e "suona", o meglio "distorce", in modo diverso a seconda di come viene collegato: in un senso lascia passare solo le semionde positive, nell'altro solo le semionde negative. In tal caso, ai capi del diffusore dovrebbe essere possibile misurare una componente continua, anche se il cavo è accoppiato all'amplificatore in alternata. Tutto ciò dovrebbe essere evidente con le consuete misure di distorsione.

Geometria dei cavi

La "geometria" del cavo, il modo in cui è realizzato e i materiali impiegati determi-

nano l'entità di L, C e G. Dal punto di vista della realizzazione (geometria) del cavo, si possono distinguere tre tipologie principali:

- cavo solid-core (unico conduttore)
- cavo multi-strand (molti trefoli non isolati tra loro)

- cavo Litz (multi-strand isolati singolarmente e intrecciati in modo particolare).

Per quanto riguarda la qualità del conduttore, se non è argento puro è bene sia rame OFC (privo di ossigeno) o OFHC. I cavi "solid-core" e "multi-strand" a parità di sezione si equivalgono per resistività, e differiscono per la flessibilità e per la (teorica) diversa possibilità di ossidazione superficiale. Il cavo Litz è realizzato con un elevato numero di trefoli di piccolissimo diametro e offre una bassa induttanza (e capacità elevata). Il costo di un Litz è alto a causa della realizzazione complicata e, come visto, non presenta reali vantaggi in banda audio, dove l'effetto pelle è comunque trascurabile. Per di più i fili tipo Litz, se non sono già terminati, sono difficili da terminare.

Esistono anche dei cavi "misti", che sono dei multi-strand con un'anima solid-core al centro.

Per questi tipi di cavo se i conduttori non sono tra loro isolati l'unico vantaggio, nei confronti di un solid-core, sta in una certa flessibilità unita ad una maggiore resistenza alla trazione (di cui nessuno sente il bisogno). Se invece i conduttori sono isolati, questa realizzazione equivale ad un solid-core collegato in parallelo ad un Litz. Si potrebbe pensare ad una specie di cavo a due vie. Ma questi due cavi hanno velocità di propagazione diverse e il segnale raggiunge il carico con ritardi diversi producendo interferenza. Un cavo strutturato in questo modo realizza, alle alte frequenze, un filtro a pettine. Teoricamente non funziona e praticamente non serve a nulla. Lo stesso discorso vale, in linea di principio, per cavi formati da diversi conduttori di diametro differente: in banda audio non cambia nulla, alle frequenze più alte i conduttori si comportano come cavi diversi tra loro in parallelo con gli effetti già detti. Si tratta quindi di espedienti commerciali che servono a differenziare un prodotto dalla concorrenza. Attenzione: quando si dice che una struttura di cavo "teoricamente non funziona" non dobbiamo dimenticare che stiamo trattando fenomeni elettro-magnetici descritti dalle equazioni di Maxwell che forniscono una precisione di calcolo inferiore a qualche parte per milione. Non dobbiamo nemmeno dimenticarci che, negli esperimenti di fisica nucleare, si usano amplificatori di segnali con una risoluzione temporale nell'ordine dei picosecondi (per esempio Ortec).

Il tipico cavo rosso-nero da elettricista è un multi-strand, non è OFC e il dielettrico è probabilmente PVC. Oltre a contenere

impurità è soggetto ad ossidazione e ha un dielettrico piezoelettrico, però costa molto poco ed è flessibile. Per il futuro sarebbe interessante paragonare le prestazioni di un cavo "specializzato" con uno spezzone di pari lunghezza di cavo rosso-nero di pari sezione.

La connessione multi-wire

Alcuni modelli di diffusore acustico dispongono di una coppia di morsetti separati per ogni sezione di filtro. Ciò permette di collegare separatamente le varie sezioni con cavi diversi o ad amplificatori diversi. Consideriamo un diffusore a tre vie con frequenze di taglio a 350 e 3500 Hz tenendo conto che, se i tagli fossero a 200 e 2000 Hz, non cambierebbe assolutamente nulla.

Dopo aver detto che, in linea teorica, i cavi dovrebbero essere tutti della stessa lunghezza e dello stesso tipo, cerchiamo di definire i parametri del cavo più adatto a ciascuna sezione in funzione dei diversi filtri crossover.

Sezione Bassi: il filtro crossover del woofer, nel 99.9% dei casi, ha almeno una bobina in serie il cui valore va da qualche decimo di milliHenry fino a 10 milliHenry (come ordine di grandezza). Se la bobina non c'è rimane comunque l'induttanza della bobina mobile del woofer. Ogni bobina ha una sua resistenza interna, in serie al segnale, che può essere anche di valore consistente (da 0.1 a 1 ohm). Rispetto a tali valori i pochi microHenry aggiunti da un cavo sono trascurabili. Quindi il cavo per il woofer deve essere a bassa resistenza e bassa capacità; l'induttanza del cavo è comunque trascurabile. Se il cavo comincia ad attenuare anche a 5 kHz non farà altro che aumentare la pendenza di attenuazione del filtro passa-basso ben al di là della frequenza di taglio.

Sezione Alti: passiamo al tweeter. Al minimo in serie al tweeter troviamo un condensatore e spesso anche una resistenza (da 0.47 a qualche ohm di valore). Se il tweeter è di tipo dinamico, l'impedenza sulle frequenze alte è induttiva e quindi resistenza e induttanza del cavo possono non essere rilevanti rispetto ai valori presenti nel carico. In questo caso è sufficiente un cavo a bassa capacità. Se il tweeter è di tipo piezoelettrico, isodinamico o elettrostatico, è meglio impiegare un cavo "veloce".

Sezione Medi: il filtro del midrange prevede due sezioni in cascata. Nella sua forma più semplice è formato da un condensatore e da una bobina in serie all'altoparlante (anche qui è presente almeno la resistenza propria della bobina). L'impedenza di ingresso del filtro bassa-banda è molto elevata sia alle basse che alle alte frequenze ed è poco influenzata dall'induttanza del cavo (come per il woofer). Se poi il filtro prevede anche una resistenza in serie, co-

sa non rara, allora anche la resistenza del cavo diventa meno importante. Per la sezione medi potrebbe andar bene un cavo di "media resistenza" e bassa capacità, mentre l'induttanza del cavo è ancora poco importante.

Alla fine, vista la natura del carico, l'unico parametro per il quale si desidera sempre un basso valore è la capacità che potrebbe infastidire l'amplificatore. Nel caso del multi-wire l'amplificatore "vede" alla propria uscita la somma delle capacità di due o tre cavi, altro buon motivo per usare comunque cavi a bassa capacità.

L'induttanza del cavo, responsabile dell'attenuazione da alta frequenza, è rilevante solo per la risposta del tweeter ed in particolare se questo non è di tipo dinamico. Detto per inciso, i transistor amano i carichi induttivi e odiano i carichi capacitivi.

Quindi possiamo acquistare un cavo molto grosso per il woofer, un cavo di sezione "normale" per il medio e un cavo di qualità per il tweeter. Avremo almeno la certezza che qualsiasi eventuale forma di distorsione nel cavo del woofer non potrà raggiungere il medio o il tweeter. Prevenire è meglio che curare. Per risparmiare ulteriormente potremo usare lo stesso cavo per woofer e medio e un cavo separato per il solo tweeter.

Cavi di alimentazione

Dato che abbiamo parlato di cavi di potenza, diciamo due parole anche sui cavi di alimentazione, che sono quelli che trasportano "tutta" la potenza utilizzata dall'amplificatore. I cavi di alimentazione "suonano"? Non suonano, soffrono. A causa della "Legge di Kirchoff ai nodi", o se vogliamo a causa della conservazione della carica che è un principio ancora più forte, attraverso il cavo di alimentazione dell'amplificatore transita una corrente pari, come minimo, alla somma delle correnti che fluiscono nei diffusori acustici. Se l'amplificatore è in classe A pura la corrente di alimentazione è più che doppia di quella che attraversa ciascun diffusore acustico. Non si vede quindi perché il cavo per i diffusori deve essere grosso come l'avambraccio di Hulk, mentre il cavo di alimentazione dell'amplificatore può essere sottile come quello di un abat-jour. A rigore il diametro del cavo di alimentazione (dell'amplificatore) dovrebbe essere superiore al diametro del cavo degli altoparlanti (del 41% per amplificatori in classe AB o doppio per amplificatori in classe A pura). Comunque raramente un cavo di alimentazione è più lungo di un paio di metri, che sono niente se paragonati ai chilometri di fili elettrici che portano la corrente dalla centrale dell'ENEL fino in casa. Prima di dire che il cavo di alimentazione "suona male" si dovrebbe provare a sostituirlo con uno di diametro

adeguato, o meglio cambiare TUTTO il cavo elettrico a partire dalla centrale ENEL, che essendo molto più lungo certamente ha una "responsabilità" maggiore. Se il cavo di alimentazione "suona" la colpa non è sua ma della tensione di rete.

La tensione di rete ha un suo suono e una sua voce. I 220 volt di rete sono soggetti a variazioni di ampiezza, transitori e rumori che interferiscono con il buon funzionamento dell'impianto stereo. Gli stadi di uscita degli amplificatori non hanno, in genere, una alimentazione stabilizzata e possono soffrire le variazioni di tensione (vedere il Power Supply Rejection Ratio degli amplificatori). Ciò può accadere, in particolare, con amplificatori a basso fattore di controreazione ingresso-uscita (che sono potenzialmente i migliori come qualità ma, da questo punto di vista, più delicati). Un tempo i televisori dovevano essere collegati a stabilizzatori di tensione proprio per proteggerli dalle variazioni della rete. Oggi i televisori sono migliorati e gli stabilizzatori di tensione sono finiti in soffitta, e la rete elettrica, invece, è più disturbata di prima. Esistono però i gruppi di continuità (per esempio quelli per computer). I più completi svolgono quattro funzioni:

- continuità rispetto alle interruzioni di rete (praticamente l'impianto va a batterie)
- filtro antidisturbo
- stabilizzazione della tensione
- protezione dalle extra-tensioni tramite disgiuntore (fulmini).

Se avete problemi di rete (stabilità, disturbi, rumori, figli in bicicletta che staccano le spine, ecc.), installate un gruppo di continuità ad onda sinusoidale (magari uno per l'amplificatore e uno separato per il lettore CD....). Quanto potente? Diciamo almeno il doppio dell'amplificatore: per un amplificatore da 100 watt per canale calcolate $200^2=400$ VA (o più). Non è difficile, con un oscilloscopio, controllare la qualità della sinusoide prodotta dal gruppo di continuità.

Conclusioni

Se ci limitiamo a quanto appare nella tabella 2, dobbiamo dire che il suono dei cavi è determinato da:

- la lunghezza del cavo
- la resistività
- il tipo di dielettrico.

Ma se provassimo a rifare la prova di ascolto cambiando amplificatore, i risultati sarebbero gli stessi? Certamente qualche cosa cambierebbe. Certamente la prova di ascolto è servita per definire il miglior cavo per quel particolare impianto dimostrando, contemporaneamente, quanto segue:

- fissato amplificatore e diffusore acustico, la sostituzione del cavo comporta differenze udibili tra un cavo e l'altro
- i cavi non sono tutti uguali

- i cavi vengono progettati con criteri assolutamente diversi tra loro
- commercialmente è importante che i cavi siano uno diverso dall'altro
- il prezzo è comunque molto elevato.

Resto convinto che il cavo faccia soffrire più l'amplificatore che il diffusore acustico e che una valutazione della stabilità dell'amplificatore su carico capacitivo (anche solo in termini di risposta in frequenza tra 20 kHz e 200 kHz) possa dare indicazioni utili.

In ogni modo il comportamento del cavo è definito solo quando questo è connesso fisicamente all'amplificatore da una parte e al diffusore acustico dall'altra. Prima di quel momento si possono fare solo delle affermazioni di principio.

Per il resto la distorsione per rettificazione è quanto meno rara, l'effetto pelle esiste ma è meno importante dell'induttanza e della capacità parassita. L'effetto Maxwell-Wagner, se esiste, è sovrastato da altri effetti. Per quanto riguarda il dielettrico, solo dopo aver aggiunto alla Tabella 1 la colonna con il tipo di dielettrico (e visti i risultati) ho avuto la curiosità di capire se il PVC poteva avere qualche responsabilità: il dielettrico non deve essere un materiale piezoelettrico. Alla fine tra due cavi, di sezione paragonabile e con un dielettrico appropriato, conviene scegliere quello con la capacità parassita inferiore, e quindi usarne la lunghezza minima possibile. Per fare ciò conviene mettere amplificatore e lettore CD tra i due diffusori acustici. Per limitare qualsiasi effetto dovuto alla loro presenza disponeteli su un tavolino molto basso, a ridosso della parete di fondo, in modo che restino ben al di sotto dell'altezza del midrange e del tweeter dei vostri diffusori (che dovrebbero essere un po' avanzati rispetto alla parete di fondo). Curate la simmetria della disposizione. Il "suono" dei cavi dipende dalla combinazione amplificatore-cavo-diffusore e non è imputabile al solo cavo tranne che per esemplari veramente molto, molto scadenti. È invece molto importante conoscere l'impedenza dei propri diffusori acustici e le caratteristiche dell'amplificatore: uno sguardo alle misure proposte dalle riviste specializzate è obbligatorio. Se l'amplificatore non è stabile sui carichi capacitivi è meglio tenere il cavo e cambiare l'amplificatore. È probabile che molti problemi siano generati dalla tensione di rete, la cui stabilità è sempre peggiore di quello che si immagina (specie se abitate vicino ad un insediamento industriale).

Un ultimo consiglio, che può sembrare banale: i cavi che collegano gli altoparlanti trasportano correnti rilevanti (anche superiori a 10 A di picco) e vanno tenuti lontani tra loro, dai cavi che trasportano segnali e dai cavi di alimentazione. Se vi resta del tempo, accorciate alla minima lunghezza anche i cavi di segnale.

ARGOMENTI CORRELATI

Velocità di propagazione e impedenza caratteristica

La velocità di propagazione del segnale lungo una linea di trasmissione, in presenza di perdite, è data da:

$$\text{Velocità di propagazione} = \sqrt{\frac{1}{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}} \quad \text{m./sec.}$$

A frequenze sufficientemente alte o in assenza di perdite:

$$\text{Velocità di propagazione} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad \text{m./sec.}$$

minime. Inoltre, è opportuno che la velocità di propagazione non cambi con la frequenza, il che richiede la stabilità dei valori di R, L, C e G con la frequenza.

L'impedenza caratteristica di una linea di trasmissione è data dall'espressione:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad \text{ohm}$$

A frequenze sufficientemente alte o in assenza di perdite:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{ohm}$$

dalle espressioni qui riportate si deduce che non è possibile costruire un cavo con valori di L e C arbitrari: dovendo risultare la velocità di propagazione minore di quella della luce, deve sussistere un rapporto tra C e L: se uno aumenta, l'altro diminuisce e viceversa.

La velocità di propagazione del segnale è un indice della qualità del cavo: affinché la velocità sia elevata, sia la capacità che l'induttanza devono avere valori bassi e le perdite nel dielettrico devono essere

Il massimo trasferimento di energia si ottiene quando l'impedenza caratteristica è uguale all'impedenza del carico. L'energia che non viene trasferita al carico si "riflette" e torna a percorrere il cavo. A bassa frequenza il cavo può essere rappresentato come un quadrupolo e non ha più senso parlare di impedenza caratteristica e di riflessioni. Il massimo trasferimento di energia si ottiene, così, quando la resistenza totale del cavo è minima (teoricamente nulla).

Alcuni materiali utilizzati per realizzare l'isolamento e/o le guaine dei cavi (dal sito www.novacavi.it):

Etileneclorotetrafluoroetilene	ECTFE
Etilenetetrafluoroetilene	ETFE
Fluoroetilenepropilene (Teflon®)	FEP
Fluoruro di polivinilidene	PVDF (piezoelettrico)
Gomma etilenpropilene	EPR EPDM
Gomma silicone	SI
Gomma termoplastica Alcryn®	
Gomma termoplastica	HT SEBS
Gomma termoplastica Santoprene®	
Mescola LS0H reticolata	
Mescola LS0H termoplastica	
Metilvinileterfluoroalkoxy	MFA
Perfluoroalkoxy	PFA
Poliammide	PA
Poliestere termoplastico elastomero	PETE
Poliimmide (Kapton®)	PI
Polipropilene	PP
Politene alta densità	HDPE
Politene bassa densità	LDPE
Politene reticolato	XLPE
Politene tereftalato	PTE
Politetrafluoroetilene	PTFE
Poliuretano poliesteri	PUR
Poliuretano polietere	PUR
Polivinilcloruro 105° C	PVC 105° C (piezoelettrico)
Polivinilcloruro 70° C	PVC 70° C (piezoelettrico)
Polivinilcloruro per basse temperature	PVC BT (piezoelettrico)
Polivinilcloruro resistente agli oli	PVC OR (piezoelettrico)
Polivinilcloruro semirigido	PVC SR (piezoelettrico)
Polivinilcloruro-nitrile	PVC-NBR (piezoelettrico)
Polivinilcloruro-poliuretano	PVC-PUR (piezoelettrico)

Questa tabella contiene diversi tipi di isolanti/dielettrici, ciascuno dei quali presenta particolari caratteristiche di resistenza alla temperatura, all'acqua e agli agenti chimici ed atmosferici. Come si vede, esistono molti tipi di polietilene diversi.