

La classe "A" e la classe "AB"

Quando le "classi" commerciali che sintetizzano l'efficienza energetica di un elettrodomestico vennero introdotte, molti audiofili rimasero sicuramente perplessi: un frigorifero in "Classe A" era la battuta di un comico oppure uno spassoso refuso inserito nei dépliant di una grande catena commerciale? Già, perché per un audiofilo la "classe" non è mai stata una categoria commerciale, bensì la modalità operativa di un amplificatore, ed arrivare alla classe "A" partendo dalla "C" e transitando per la "B" e la "AB" ha sempre significato scendere di rendimento e salire di potenza dissipata, non certo il contrario, avendo come unico vantaggio l'abbassamento della distorsione e quindi il miglioramento della qualità sonora.

Parecchi anni or sono chi scrive redasse un articolo verticale sulle classi di funzionamento degli amplificatori, centrandolo soprattutto sul confronto tra "A" ed "AB", la seconda comprendendo almeno il 98% degli amplificatori allora prodotti e la "A" molto meno della singola unità percentuale. Oggi quelle pagine appaiono sempre attuali, anche se le percentuali sono un po' cambiate, dato che le varie forme di classe "D" (quella basata sulla commutazione, talvolta descritta anche con lettere successive) totalizzano, negli amplificatori a stato solido, una percentuale non molto minore del 10%, mentre gli amplificatori in classe "A" sono diventati ancora più rari (eccezion fatta per le valvole e per i *single ended* in particolare). In compenso, si sono di molto rarefatti i classe "A" fasulli. Cerchiamo quindi di fare ancora una volta un po' di chiarezza su cosa significa far operare un amplificatore in classe "A" od in classe "AB".

Era un progettista americano, ma non ricordo quale (qualche lettore però lo ricorda di sicuro: scrivetecelo per mail e ne parleremo nella sezione posta) quello che una trentina d'anni or sono, intervistato da un giornalista specializzato sulla reale utilità della classe "A", rispose lapidario "*Class A is interesting for cooking...*" (*la classe A è interessante per cucinare*). Da allora di inchiostro dapprima liquido e poi anche elettronico ne è stato impiegato a fiumi per sostenere questa tesi od il suo esatto contrario, e cioè che solo la classe "A" è in grado di conferire allo stato solido la pastosità del suono delle valvole (ed immaginiamo quindi quale effetto possa avere se usata direttamente nei finali a tubi), ma quasi sempre basando le asserzioni sulle personali esperienze di ascolto, e non anche sulla fisica. Vediamo quindi quali sono i termini del problema.

Esiste la classe "A" ?

Sì e no. Qualunque amplificatore in classe "AB" può funzionare in classe "A" fino al massimo livello teorico, ed altresì ogni finale in "pura classe A" opererà, sotto determinate condizioni, in classe "AB". Tutto dipende esclusivamente (semplifichiamo un po' il discorso per non creare un abisso di biforcazioni...) dal valore della corrente di riposo e dal modulo dell'impedenza di carico, e la relazione che lega la minima corrente di polarizzazione necessaria al funzionamento in classe "A" alla tensione di picco richiesta sull'uscita dell'amplificatore è

$$[1] \quad I_b = V_p / (2 R)$$

ove

V_p = modulo tensione di picco sul carico

R = modulo resistenza di carico

supponendo quindi che il carico sia resistivo. Questa formula si applica agli stadi push-pull (quasi la totalità) e si spiega semplicemente considerando che in questo circuito le correnti nei sub-amplificatori sono uguali ed opposte di segno, e quindi per scongiurare l'interdizione occorrerà fissare una corrente di riposo minima pari a metà di quella massima. Decrementando il modulo,

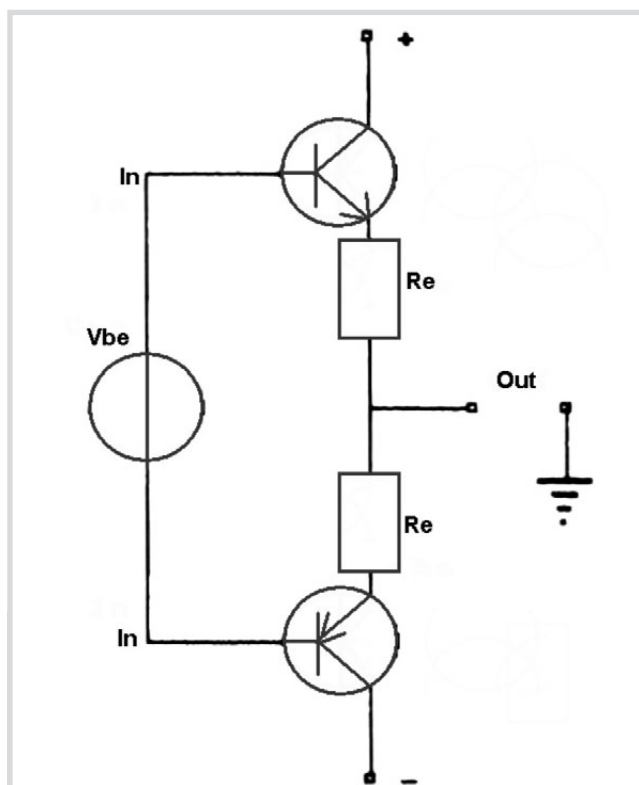


Figura 1. Schema di base di uno stadio push-pull a transistor bipolari (ma con i mosfet sarebbe molto simile), quasi sempre utilizzato negli amplificatori di potenza con eccezioni molto rare (es.: Yamaha A-S2000, finali Atma-Sphere a tubi etc.): il valore della V_{be} applicata dal generatore determina il funzionamento in classe "C" (tensione nulla), "B" (tensione pari a quella di soglia, circa 0.6 volt), "AB" (tensione di poco maggiore di quella di soglia, tale da imporre il passaggio di decine o centinaia di milliampère sulle R_e), oppure "A". Quest'ultima però non esiste in assoluto, bensì solo in relazione al carico da alimentare ed alla massima tensione (anzi, corrente) che ad esso si vuole applicare.

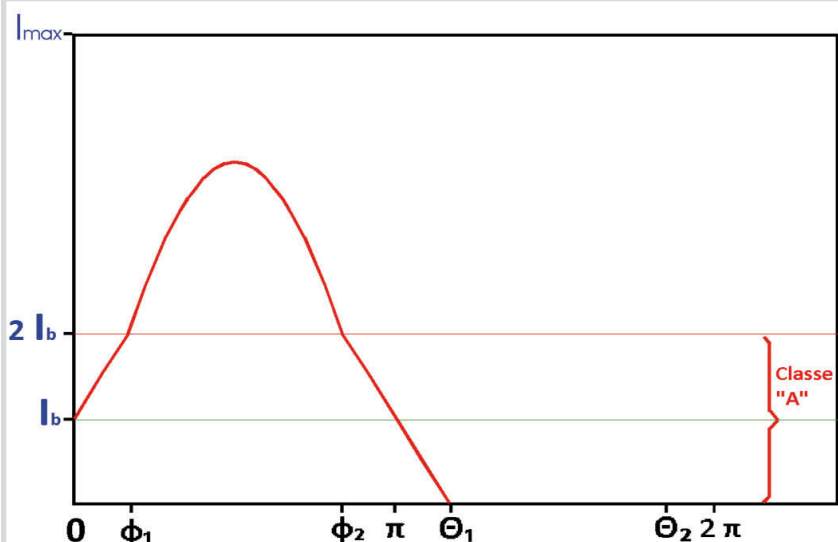


Figura 2. Andamento della corrente in un dispositivo finale polarizzato in classe AB ($I_b < 1/2 I_{max}$).

Rendimento e potenza dissipata

Un amplificatore push-pull in classe "B" è quello i cui finali si "passano la staffetta" istantaneamente, ovvero non si sovrappongono nemmeno per una porzione minima di percorso. L'espressione che fornisce la dissipazione sui finali in un ampli lavorante in classe "B" è del tipo

$$[2] \quad W_d = (2 V_p V_s) / (\pi R) - (V_p^2 \cos(\phi)) / (2 R)$$

ove

- V_s = semitensione di alimentazione
- V_p = modulo della tensione di picco
- R = modulo dell'impedenza di carico
- ϕ = fase del carico

Ma sappiamo bene che la classe "B" è una situazione limite, pressoché inutilizzata in alta fedeltà (nella storia dell'audio è esistito un solo finale di tal sorta, il Quad 405, e per di più un solo lato era in classe "B" dato che uno dei due finali contrapposti era minimamente polarizzato). Nel più generico caso in cui sia presente una polarizzazione la [2] si complica un po'

$$[3] \quad W_d = \frac{1}{\pi} (|F_1(x)|_{\phi_1}^2 + |F_2(x)|_{\phi_2}^2 + |F_1(x)|_{\phi_2}^2 + |F_2(x)|_{\phi_1}^2)$$

ove, con le precedenti notazioni

$$F_1(x) \equiv V_s I_b x - \frac{V_s V_p}{2 \cdot R} \cos(x - \phi) + I_b V_p \cos(x) - \frac{V_p^2}{4 \cdot R} \cos(\phi) [x - \sin(x) \cos(x)] - \frac{V_p^2}{4 \cdot R} \sin(\phi) \cos^2(x)$$

$$F_2(x) \equiv - \frac{V_s V_p}{R} \cos(x - \phi) - \frac{V_p^2}{2 \cdot R} \cos(\phi) [x - \sin(x) \cos(x)] - \frac{V_p^2}{2 \cdot R} \sin(\phi) \cos^2(x)$$

e

I_b = corrente di riposo

$$\phi_{1,2} = \arcsin(2 I_b R / V_p)$$

$$\Theta_{1,2} = \phi_{1,2} + \pi$$

Se il funzionamento è in classe "A" effettiva allora la quantità legata a $F_2(x)$ scompare e la [3] si riduce a

$$W_d = \frac{1}{\pi} |F_1(x)|_{\phi}^2$$

Dai grafici delle figure 3/4/5/6 notiamo come in tutti i casi il rendimento aumenti con la tensione di uscita, fino a toccare massimi teorici del 78.5% con la classe "B" e del 50% con la "A"; opposto è per-

od aumentando la tensione massima, lo stadio passerà al funzionamento in classe "AB", ovvero i finali si spegneranno alternativamente. Questo significa che, fissando per ipotesi un valore di modulo non inferiore ad 8 ohm, in un amplificatore da 100 watt la corrente di riposo dovrà valere almeno 2.5 ampère, con una dissipazione conseguente pari a 220/250 watt per ogni canale (supponendo una tensione di alimentazione tra 90 e 100 volt); sul lato opposto, se si porta la polarizzazione di questo finale a 100 milliampère (valore tipico di un normale classe AB), il minimo modulo di carico che blocca l'interdizione sarà di 200 ohm: potrebbero sembrare troppi, ma forse in pochi hanno considerato che l'ascolto in cuffia, ad esempio, avviene sempre in classe "A".

La maggior parte degli amplificatori "seri" dichiarati in "pura classe A" sono dimensionati per lavorare in assenza di interdizione su moduli che non scendano al di sotto di 8 ohm, e tutti quelli che si interessano un poco di tecnica audio sanno bene che, da un lato, gli altoparlanti reali scendono anche ben al di sotto di quel valore, dall'altro che sono carichi reattivi, ovvero a fase non nulla, e tale caratteristica fa salire anche di molto il valore di picco della corrente assorbita. Già Matti Otala, oltre trent'anni or sono, rilevò che la corrente di picco assorbita da altoparlanti reali può essere fino a 6 volte quella necessaria per pilotare una resistenza da 8 ohm. In pratica, e salvo casi relativamente particolari, la commutazione (ovvero il passaggio da "A" ad "AB") è quasi inevitabile quando l'amplificatore è spinto fino alla piena potenza. Per rendere meglio l'idea, si può affermare che per mettere al sicuro dallo

"switching" il suddetto finale da 100 watt, la potenza dissipata a riposo dovrebbe salire ben oltre il chilowatt, e non ci risulta che ciò sia mai stato fatto nemmeno per oggetti prototipali.

Sicuramente più frequente, almeno fino ad un passato non molto lontano, è invece quella forma di malcostume per cui certi finali vengono furbescamente messi in relazione alla mitica classe "A" pur presentando correnti di riposo cui corrispondono moduli di transizione dell'ordine di 20 ed anche più ohm. Abbiamo osservato finali in "pura classe A" da centinaia di watt con un singolo ampère di polarizzazione, ed altri in "extended class AB" con una corrente di riposo da 200 milliampère.

Come accorgersi dell'eventuale falsità? Se l'apparecchio è testato da noi ci vuole poco, in primis perché una simile situazione verrebbe descritta nel commento alle misure, e poi perché le stesse misure parlerebbero da sole. Un finale in classe "A" assorbe dall'alimentatore la stessa corrente media sia in assenza di segnale che erogando la piena potenza, per cui non può avere una potenza impulsiva molto diversa da quella continua (al limite questi valori potrebbero essere identici, ma solo se la potenza massima collimasse con la potenza in classe "A"). Il carico limite, per la stessa ragione, permette di evidenziare il modulo di transizione da "A" ad "AB" a piena potenza indistorta, corrispondente a quel valore per cui le curve per regime statico e dinamico iniziano a divergere (eccependo il caso di alimentatore ad impedenza interna bassissima od al limite nulla, come in quegli ormai rarissimi casi in cui l'alimentazione è stabilizzata).

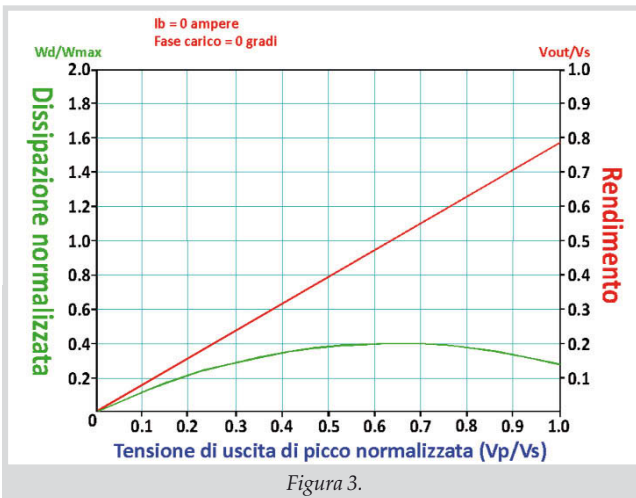


Figura 3.

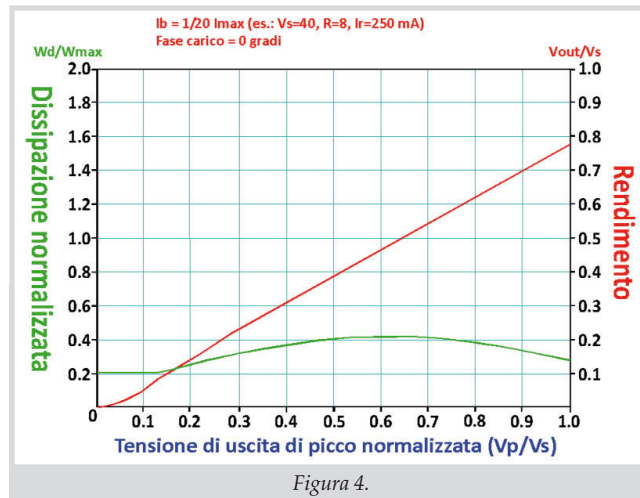


Figura 4.

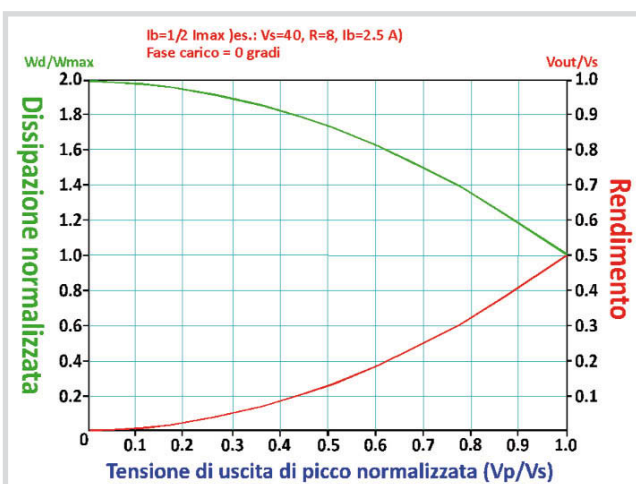


Figura 5.

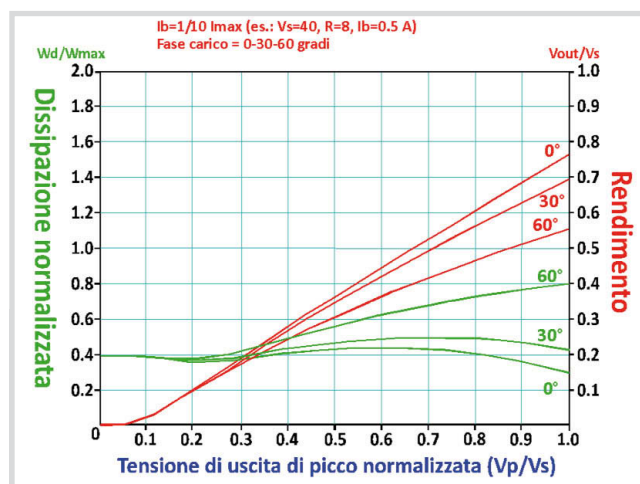


Figura 6.

In un amplificatore rendimento e potenza dissipata sono strettamente legati alla corrente di polarizzazione, determinando alcuni dei cardini di base del progetto (in primo luogo il dimensionamento delle sezioni). I grafici riportano, su scale normalizzate, l'andamento di rendimento e dissipazione per alcuni valori significativi di corrente di polarizzazione, da un ventesimo della corrente di picco (classe "AB") ad 1/2 (classe "A"), includendo il caso di un carico reattivo (per $I_b=1/10 I_{max}$ e fase pari a 30 e 60 gradi). Si può notare che il "record" del rendimento di un finale tradizionale va assegnato alla classe "B", con il 78.5% a piena modulazione teorica, mentre nelle stesse condizioni un finale in classe A trasferisce sul carico solo il 50% della potenza che assorbe dall'alimentatore. Tuttavia l'area delle ascisse maggiori di 0.9-0.95 Vs è inutilizzabile per la resistenza di chiusura mai nulla dei dispositivi finali, inoltre possono intervenire altri fattori (es.: ripple di alimentazione). Per polarizzazioni maggiori di circa 1/10 della corrente di picco si ha di norma che la potenza dissipata decresce con l'aumentare della tensione erogata in uscita.

l'andamento della potenza dissipata, che per polarizzazioni contenute aumenta con il livello fino ad un massimo collocato intorno a 0.63 Vs (63.7% di Vs per $I_b=0$; 62.7% per $I_b=300$ mA), mentre decresce monotonamente approssimando la piena classe "A". Rimanendo su carichi resistivi od in media poco reattivi (come molti diffusori effettivamente sono) notiamo che nella regione delle polarizzazioni medio-alte (es.: 500 mA per moduli da 8 ohm, che corrispondono a 4 watt in classe "A", con $V_s=45$ volt) la curva di dissipazione rimane quasi alla stessa quota in pratica fino alla massima tensione di uscita. È una condizione oggi assai poco frequentata, ma ben nota ai possessori di "vecchie glorie" come il Pioneer A-27 od

il Musical Fidelity A-1, che scaldavano a livelli tali da preoccupare tutti i loro possessori ma erano però del tutto tetragoni al variare delle condizioni di carico. Le principali conclusioni di questo paragrafo possono essere così riassunte: 1) La natura dei segnali musicali (in termini di distribuzione statistica del livello assunto dal segnale uscente da un finale) è tale che per far funzionare un amplificatore di potenza in classe "A" occorre dotarlo di dissipatori almeno 4-5 volte più efficienti rispetto ad un "AB" di pari potenza massima. Alimentatore e dispositivi finali devono essere almeno doppiamente dimensionati. Il costo di produzione sale, orientativamente, con la radice quadrata della potenza utilizzabile in classe "A", il che rende

poco convenienti le soluzioni intermedie (e spiega anche perché siano scomparsi componenti come il suddetto Pioneer A-27). 2) L'enorme inerzia termica dei dissipatori in un classe "A" integra pressoché totalmente le variazioni di temperatura, anche quelle indotte dai più intensi passaggi musicali, stabilizzandola. Ciò avviene anche in progetti che in classe "AB" sarebbero poco stabili, e determina vantaggi immediati sulla costanza e prevedibilità delle prestazioni. Per contro, finali in classe "A" dimensionati al minimo o con temperatura d'esercizio molto alta (>70 gradi) possono risultare poco affidabili, a meno di non proteggerli con limitatori molto "severi", che però avrebbero effetti deleteri sulla capacità di pilotare carichi molto reattivi.

Distorsione e simmetria della corrente nei subamplificatori

Se esaminiamo l'andamento del guadagno e della Vbe in un transistor bipolare e della transconduttanza in un mosfet in funzione della corrente di uscita noteremo come approssimando i livelli più bassi le deviazioni dalla linearità sono più marcate, e nei dintorni dell'origine le curve non sono nemmeno più continue (modalità e livelli dipendono da tecnologia e singolo dispositivo, ma quanto asserito è sempre applicabile). Ciò significa che, in uno stadio finale, se il punto di lavoro attraverso tale zona non sarà possibile impedire la generazione di distorsione, e per di più costituita da armoniche di alto ordine (le più udibili e fastidiose). Tutto questo è, per l'appunto, inevitabile in un classe "AB", anche se la polarizzazione è sufficientemente alta da minimizzare (questa è la sua funzione) l'effetto delle discontinuità site nell'origine. Al contrario, se il punto di lavoro statico si trova nella regione delle alte correnti (come nei classe "A") le non linearità sono nettamente inferiori e per di più di tipo eminentemente parabolico, il che significa (tralasciamo la dimostrazione, presente in qualsiasi testo di elettronica) che la poca distorsione prodotta è costituita soprattutto da seconda armonica (la più "eufonica" delle distorsioni).

C'è poi un altro effetto interessante, che si verifica tanto con i bipolari che con i mosfet ed anche con le valvole, pur afferendo a cause differenti, e che possiamo per semplicità descrivere con riferimento ai bipolari. Il legame tra corrente di uscita e la tensione di giunzione di base è di tipo esponenziale

$$[4] I = I_0 (e^{(V/Vt)} - 1)$$

ove

I₀ = corrente di saturazione inversa
V = tensione di polarizzazione
Vt = equivalente in tensione della temperatura (0.026 volt a 25 gradi)

La [4] ha effetto sulla distorsione, perché implica che la giunzione BE dei finali (ed eventualmente di piloti e prepiloti) si comporti come una resistenza non lineare serializzata al segnale. A parità di corrente modulata in uscita, il delta di tensione su tale giunzione è tanto più basso quanto maggiore è la corrente di riposo: ergo, un transistor bipolare (pilotato non in corrente, questa biforcazione è necessaria...) distorce meno se è polarizzato in classe "A" piuttosto che in "AB". Altro non trascurabile effetto della [4], e minoritariamente all'aumento di guada-

gno che tipicamente si verifica alle basse correnti, riguarda la simmetria dell'escursione di corrente. I polarizzatori dei finali operano a tensione fissa (salvo casi peculiari che qui non consideriamo), ma quando un bipolare è portato vicino all'interdizione la sua tensione base emettitore (Vbe) diminuisce, mentre sul lato opposto non aumenta dello stesso ammontare. Ciò determina una sorta di modulazione dinamica della corrente di riposo, il cui effetto è quello di comprimere l'altezza della semionda di corrente vicina all'interdizione. Le conseguenze sono due, una negativa l'altra positiva: un forte aumento di distorsione (in gran parte di seconda armonica) sulla corrente, quasi sempre ben compensata dalla simmetria del push-pull, e soprattutto l'innalzamento del punto di transizione da classe "A" a classe "AB" rispetto a quanto calcolabile a partire meramente dalla [1]. Questo permette, ed è da taluni costruttori sfruttato, di realizzare un classe "A" impostando una corrente di riposo minore di quella teorica, con ovvi vantaggi di dissipazione e dimensionamento. Va però anche notato che, accettando gli effetti benefici di questo effetto, qualcosa in linearità si perde. Esistono peraltro dei classe "A" a stato solido ed anche a valvole in cui la simmetria della corrente nei subamplificatori di uscita è quasi perfetta, ma per trattarne dovremmo parlare di circuiti, e non è questa la sede né tantomeno abbiamo lo spazio.

Dipendenza di alcuni parametri dalla corrente

Abbiamo visto come la classe "A" consenta di far lavorare i dispositivi di potenza in zone maggiormente lineari della loro transcaratteristica, quantomeno con lo stato solido (con le valvole le cose si complicano in relazione al fatto che la valvola è un "acceleratore" di elettroni, con un preciso vincolo legato all'effetto termoionico, mentre bipolari e mosfet sono dei "freni" con un limite superiore in prima approssimazione trascurabile). Rimanendo in tema di transistor esistono altri parametri che dipendono dal valore assoluto della corrente di emettitore. Forse il più rilevante è il legame lineare tra la suddetta corrente e la capacità di diffusione di emettitore (Ce). Stabilito il punto di lavoro (e quindi la transconduttanza nell'intorno) la relazione descrittiva di questo effetto è

$$[5] Ce = gm / (2 \cdot \pi \cdot Ft)$$

ove

Gm = transconduttanza (proporzionale alla corrente di collettore)
Ft = frequenza di amplificazione unitaria

di corrente di corto circuito ad emettitore comune

Il bipolare "rallenta" lievemente ai bassi livelli quando funziona in classe "A", ma non ad alto livello dato che in tal caso le correnti in "A" ed in "AB" tendono ad eguagliarsi.

Conclusioni

Speriamo di essere stati esaurienti rispetto ai seguenti punti:

- 1) La "vera" classe "A" è quella per cui la corrente di riposo nei finali è pari a poco più della metà della corrente di picco che può scorrere sul carico. Impedire l'interdizione dei finali con altri metodi può essere vantaggioso, ma in generale non garantisce le stesse prestazioni.
- 2) La classe "A" pura ed assoluta non esiste. Solo alcuni altoparlanti (resistivi o poco meno), ed amplificatori polarizzati per non interdirti finché il carico non scenda al di sotto del valore minimo d'impedenza di tali altoparlanti, possono garantire l'effettiva piena operatività in classe "A". In generale, tanto minore sarà la minima impedenza degli altoparlanti, tanto più frequente sarà il passaggio da "A" ad "AB". Dato che i finali dichiarati in classe "A" lo sono pressoché esclusivamente per carichi resistivi da 8 ohm, la minima impedenza degli altoparlanti non potrà essere minore di 7-8 ohm.
- 3) La linearità ottenibile con la classe "A" è nettamente superiore a quella della classe "AB", almeno nelle configurazioni convenzionali a cui abbiamo voluto riferirci (dato che includono la grande maggioranza dei casi reali). La maggiore fonte di distorsione per i finali non in classe "A" non è - come molti credono - la cosiddetta distorsione d'incrocio, che anche polarizzazioni molto modeste possono praticamente eliminare, quanto il complesso andamento della transcaratteristica di transistor e mosfet nel tratto vicino allo spegnimento.
- 4) In generale, ogni aumento della polarizzazione comporta un miglioramento della linearità.
- 5) La distorsione di un amplificatore a stato solido in classe "A" ben progettato è strutturalmente semplice, soprattutto per i motivi di cui al punto (3), ma a differenza di quel che molti audiofili credono non è di seconda armonica, bensì di terza, almeno se (come in quasi tutti i casi) il circuito d'uscita è di tipo push-pull. Per far prevalere la seconda occorre un'asimmetria, ad esempio introducibile a livello di componenti con le valvole (non esistono valvole "P"...), oppure a livello circuitale (ad esempio con l'uso del "single ended").

Fabrizio Montanucci