

## HER MAJESTY L'AMPLIFICAZIONE

a cura di Enrico Rossi (\*)

**Innanzitutto, una premessa: cosa vuol dire amplificare? Bisogna tenere ben presente che ciò che vogliamo ascoltare (il segnale audio) è contenuto tutto nella variazione nel tempo della ampiezza (tensione) di un segnale elettrico. Tale segnale proviene come origine (nella nostra casa) dalla sorgente utilizzata (lettori CD, giradischi, sintonizzatore, eccetera) e presenta una ampiezza istantanea che può variare dal 0 al suo massimo (ad esempio per i lettori CD il massimo è di circa 2 volt). Una testina analogica ha una ampiezza molto più basso dall'ordine di alcune frazioni di mV nei casi più critici. Amplificare un segnale, in senso generale, vuol dire quindi rendere comparabile tale livello di origine con il livello di pressione sonora che desideriamo giunga alle vostre orecchie tramite i diffusori.**

**Q**uesto implica:  
1) Potere innalzare quella tensione a valori ben maggiori di quella di partenza.  
2) Potere erogare al diffusore tutta la potenza (corrente) che esso richiede in virtù del segnale audio applicato.

Nel primo caso parliamo di *amplificazione in tensione*, il cui valore può andare da 80/100 dB, nel caso di un giradischi analogico, a valori di 20/40 dB nel caso di un lettore di cd. Nel secondo caso parliamo di *amplificazione in corrente*. È fondamentale però comprendere un concetto molto importante: mentre ha senso parlare di amplificazione in tensione, nel senso che il segnale in tensione ai capi dei diffusori dovrebbe essere il più possibile una replica fedele (in scala) del segnale di uscita dalla sorgente, per quello che riguarda la corrente richiesta dal diffusore, essa è estremamente variabile e non a priori prevedibile. Dipende dal tipo di diffusore, dagli elementi reattivi contenuti al suo interno (condensatori ed induttanze di filtro) e dalle entità elettromeccaniche (trasduttori) in gioco, anch'esse in grado di assorbire o generare corrente elettrica per effetto del loro movimento. **Quindi l'amplificazione ideale dovrebbe poter erogare (o assorbire) istantaneamente tutta quella corrente che il diffusore richiedere senza alterare la sua forma d'onda in tensione** (naturalmente questo vale per i diffusori convenzionali pilotati in tensione, ovvero il 99, 99% di quelli esistenti). Questo è un punto cruciale di un amplificatore, forse il più importante, ma spesso anche il meno considerato nella sua reale portata come meccanismo d'influenza. Infatti, qualunque differenza fra la corrente teorica richiesta dai diffusori per quella tensione e quella effettivamente erogata dall'amplificatore si tradurrà inevitabilmente in una alterazione della forma d'onda in tensione e, quindi, in una differenza di percezione sonora fra ciò che "era" (o avrebbe dovuto essere) e ciò che viene effettivamente riprodotto dai diffusori. Da qui, ad esempio, alcuni fenomeni tipici quali: il basso lungo e sporco, la dinamica lenta, gli attacchi e i rilasci confusi e poco precisi. L'amplificatore ideale dovrebbe essere una figura di grande autorevolezza che, con la massima

premura e benevolenza, offra ai diffusori ciò di cui necessitano, ma anche pronta al controllo quando questi ultimi si alzano sopra le righe.

### Differenze fra stato solido e tubi a vuoto

Ciò detto, vediamo di entrare in dettaglio nell'aspetto tecnico, osservando brevemente le maggiori differenze fra una elettronica a stato solido ed una a valvole. Innanzitutto, la natura dei dispositivi (di cui trattiamo in un box a parte) consente di disporre di semiconduttori di popolarità duale, ovvero P e N. Ciò rende possibile di colpo di superare alcune limitazioni di topologia circuitale delle valvole, nelle quali i dispositivi sono tutti di analogia polarità. Ciò ha storicamente comportato che le elettroniche a valvole avessero circuitazioni molto particolari, vere e proprie acrobazie tecniche dovute al fatto di avere solo un tipo di polarità disponibile. Poi il fatto che i dispositivi a stato solido di potenza consentono di gestire con maggiore facilità correnti e potenze anche molto elevate. Ciò rende possibile l'eliminazione dei trasformatori d'uscita e la realizzazione dell'accoppiamento diretto del diffusore, con grande beneficio (potenziale) sul controllo del carico rappresentato da un diffusore reale. Non chiedetemi una spiegazione razionale del motivo per cui alcune amplificazioni a transistor utilizzino ancora trasformatori di uscita; per me è un mistero e se qualcuno trovasse questa risposta, mi piacerebbe esserne informato. Essendo poi i dispositivi a stato solido più piccoli e più facilmente utilizzabili, consentono di ottenere topologie circuitali più sofisticate, dotate di maggiore banda passante, generalmente più veloci, potenzialmente senza necessità di condensatori di accoppiamenti fra i vari stadi. Un vantaggio che possiede invece la valvola è l'attitudine ad elaborare un *range* di tensione più alto, attitudine questa che negli stadi di guadagno di tensione negli amplificatori di potenza elevata, può essere interessante. Tutte le medaglie hanno però il loro rovescio; in questo caso ciò è rappresentato proprio dalla natura fisica dei dispositivi semiconduttori. Quando il segnale audio (elettrico) transita attraverso di essi subisce delle degradazioni dovute a varie cause, fra cui i potenziali

elettrici di soglia, le non linearità intrinseche, gli effetti di conduzione "granulosa" delle cariche elettriche, il rumore intrinseco etc. etc. Credo sia esperienza di tutti il fatto che spontaneamente un amplificatore a semiconduttori male congegnato tende a suonare duro, fastidioso e con molta grana. Il modo di affrontare queste inevitabili caratteristiche ha una grande influenza sui risultati finali, in tema di fatica di ascolto, pseudo-bilanciamento timbrico, presenza di grana ed in generale di trasparenza. Relativamente ai prodotti presenti sul mercato, riguardo a queste problematiche, ho individuato tre linee di tendenza.

**1 - C'è chi, specialmente nei prodotti più convenzionali, non se ne preoccupa affatto, con l'effetto finale che il risultato d'ascolto è dovuto ad una combinazione casuale dei vari fattori.**

**2 - Chi cerca di gestire e distribuire in modo voluto questi effetti parassiti, al fine di dare l'impostazione sonora che ricerca.**

**3 - Chi cerca di limitarne il più possibile in senso generale l'influenza, per andare verso una maggiore trasparenza e neutralità.**

È una questione di scelte, ed una volta che se ne è compresa sia l'esistenza, che il modo attraverso cui questi effetti parassiti modificano il suono, sarà più facile cogliere e comprendere la personalità sonora della riproduzione.

### Evoluzione storica

Dal punto di vista dell'evoluzione storica, i primi esemplari di amplificatore a transistor (anni 60) utilizzavano i transistor al **germanio semiconduttore** che furono i primi tipi disponibili per il mercato civile. Le soluzioni circuitali erano molto primitive e rappresentavano il frutto dell'abitudine a ragionare con le valvole. Era come se si cambiasse solo il tipo di dispositivo ma la circuizione rimanesse in sostanza la stessa. Stadi di preamplificazione con un solo transistor e relativa rete di polarizzazione, condensatori di accoppiamento fra i vari stadi ed alimentazione non simmetrica erano pressoché ovunque presenti. La situazione migliorò con l'avvento dei semiconduttori basati sul **silicio**, con la presenza conseguente di dispositivi complementari (canale PNP) e soprattutto dopo che

(\*) L'ing. Enrico Rossi è il titolare e progettista in capo della Norma - Opal Electronics, casa cremonese specialista produttrice di amplificazioni audio di alto livello. La tecnologia impiegata sugli apparecchi Norma attualmente in catalogo è quella a semiconduttori.

furono disponibili **finali di potenza dalle due polarità**. Ciò avviò l'inizio dall'era di topologie circuitali con alimentazioni simmetriche a massa e consentì la riduzione di condensatori di accoppiamento fra i vari stadi di guadagno, ma soprattutto l'eliminazione del condensatore d'uscita in serie al carico (diffusore). Esso infatti aveva preso il posto del trasformatore di uscita presente nelle circuitazioni valvolari. La sua influenza era meno critica che questo ultimo, ma non si era ancora giunti completamente all'accoppiamento diretto del carico all'amplificatore. Probabilmente negli **anni '70 e '80** si ebbe il massimo della ricerca e della originalità quanto a soluzioni circuitali proposte. Forse a causa del tempo che passa fa piacere ricordare la gioventù, forse il contesto sociale e culturale in quegli anni era diverso, forse l'alta fedeltà era un argomento di moda, forse chissà cos'altro, ma ricordo come in quel periodo ci fossero tecnici che si scervellavano per trovare soluzioni circuitali originali che risolvesero questo o quel problema tecnico. **Mathi Otala e Nelson Pass**, giusto per fare due nomi, ma anche molti altri hanno portato un contributo importante. E numerosi apparecchi videro la luce con circuitazioni anche molto originali e non convenzionali. Certo, non che tutte le ciambelle fossero riuscite col buco neppure allora, tant'è che di quei prodotti rimane traccia più che altro nella memoria storica, più che nella consistenza dei prodotti odierni. Dalla crisi della fine degli anni '80 in poi l'attenzione è stata posta su altri aspetti più "ludici", quali il contenimento dei costi, la razionalizzazione produttiva, gli interventi sul marketing. Tant'è che oggi, con pochissime eccezioni, le circuitazioni utilizzate si possono contare sulle dita di una mano (con alcune dita quasi atrofizzate).

**Le circuitazioni**

Nelle circuitazioni odierne, a farla da padrone è la suddivisione nei seguenti 4 blocchi funzionali:

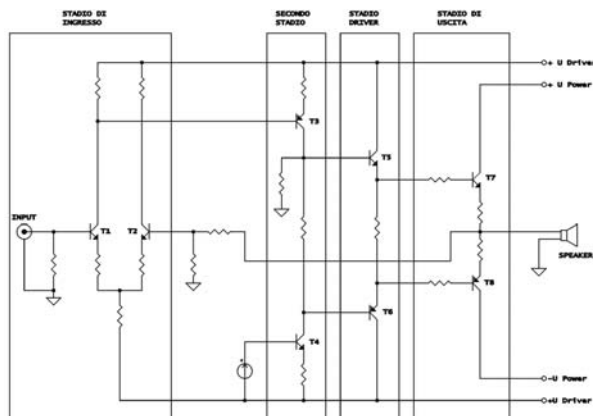


Figura 1A - Esempio di principio di una classica circuitazione non simmetrica con evidenziati i vari blocchi funzionali. Lo stadio di ingresso ed il secondo stadio di guadagno non sono simmetrici. L'amplificazione della semionda positiva e negativa sono ottenute con variazioni rispetto alla polarizzazione di riposo.

- 1 - stadio d'ingresso;
- 2 - secondo stadio di guadagno in tensione;
- 3 - stadio driver;
- 4 - stadi d'uscita e/o di potenza.

Articolati su due grandi fronti: da un lato abbiamo la topologia a **simmetria complementare** (Figura 1B), dall'altro la **circuitazione asimmetrica** (Figura 1A). Negli stadi di ingresso è pressoché universalmente utilizzata la soluzione differenziale che in effetti compie in modo più che onorevole il suo compito, che alla fine è quello di attuare una modesta amplificazione in tensione del segnale, ma soprattutto quella di trasferire questo segnale verso il secondo stadio di guadagno. Quest'ultimo infatti è collocato in una zona del circuito molto più in alto (come tensione) rispetto agli stadi d'ingresso dove è applicato il segnale. Sarebbe pressoché impossibile applicare direttamente il segnale a questi stadi, a porte poi il fatto che esiste il problema della stabilità dei punti di lavoro e del controllo dell'offset di uscita. Problematiche alle quali un ingresso differenziale risponde invece più che bene. Gli stadi d'ingresso solitamente lavorano con corrente di polarizzazione piuttosto bassa (1-10 mA) e una particolare attenzione deve essere posta alla stabilità termica (*offset in uscita*) e al loro rumore. In genere il secondo stadio gode di minore popolarità di quello di ingresso, ma ha un compito forse più difficile. Esso deve infatti realizzare quasi tutta l'amplificazione in tensione ed originare l'ampiezza della tensione d'uscita (*swing di uscita*), generalmente dell'ordine di decine di volt. Solitamente lavorano con corrente di media entità (5-100 mA) avendo in alcuni casi anche il compito di pilotare direttamente gli stadi uscita. Gli stadi driver hanno il compito di adattare il segnale in tensione originato dallo stadio precedente, con le richieste di pilotaggio dei dispositivi finali di uscita. Per capire questo, prendiamo ad esempio un amplificatore dalla potenza di uscita di 100 watt su un carico di 8 ohm. La massima corren-

te di uscita sarà di 5 ampere e dovrà essere erogata dal transistor finale. Considerando che questo ultimo può presentare un guadagno in corrente di circa 50 volte (valore questo che si può già considerare un caso fortunato) se ne deduce che per un corretto pilotaggio la sua base richiederà una corrente di circa 100 mA. Se questa corrente fosse prelevata direttamente dal secondo stadio, ne sposterebbe troppo il punto di lavoro creando molta distorsione. Da qui la necessità di uno stadio che adatti le impedenze e generi la corrente di pilotaggio per i transistor finali. Nel caso di un amplificatore a **mos-fet**, lo stadio potrebbero risultare superfluo dato che il mos-fet non richiede altre correnti che non siano quelle di carica e scarica della capacità d'ingresso del suo *gate*. E infatti nella stragrande maggioranza di questi amplificatori gli stadi driver non sono presenti. Nel caso di uno stadio di preamplificazione in tensione, come può essere ad esempio lo stadio linea di un preamplificatore, la situazione non è concettualmente molto diversa. A livello di topologia circuitali le uniche differenze significative sono date dalla mancanza degli stadi di potenza, dato che l'uscita è prelevata direttamente da stadi simili agli stadi driver dei finali. Nella seconda parte di questo articolo, entreremo più in dettaglio sulle circuitazioni, facendo degli esempi pratici che aiutano a comprendere come esse funzionino o, come sia gestita la controeazione.

**La classe di funzionamento**

La questione delle classi di funzionamento (**A, AB, B**) trae origine dal fatto che le correnti alternate fornite dall'amplificatore al carico, vengono erogate a seconda della polarità da due dispositivi diversi (transistor di uscita). Anche se sui cavi di connessione è indicata una freccia ed anche se sul retro degli amplificatori spesso sono riportati i simboli +/-, non bisogna dimenticare che la tensione ai capi del diffusore, segue l'andamento della forma d'onda della pressione

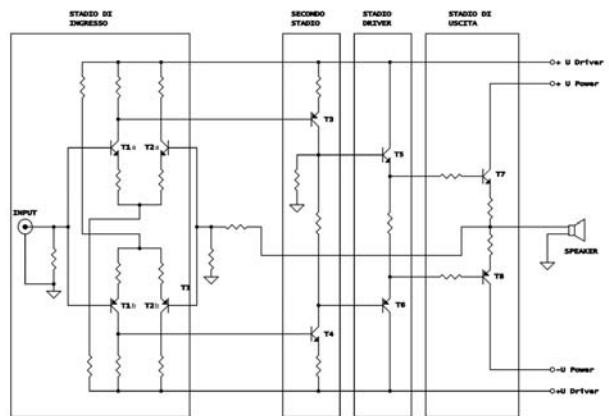


Figura 1B - Esempio di principio di una circuitazione a simmetria complementare. A livello di principio lo schema è simmetrico. Il segnale positivo e negativo subiscono lo stesso trattamento. In pratica i dispositivi NPN e PNP hanno sempre però caratteristiche intrinseche abbastanza diverse, ciò riduce la effettiva simmetria.

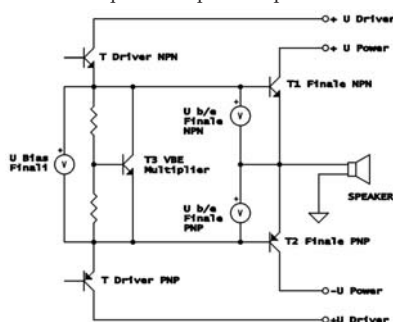
sonora catturata dai microfoni. Essa è alternata nel senso che passa da valori positivi a valori negativi, è sicuramente asimmetrica riguardo alle due polarità, ma certamente ha valore medio nullo. Se così non fosse, il woofer del diffusore, dopo qualche tempo di ascolto, si avvicinerebbe pericolosamente all'ascoltatore (valore medio positivo) o si ritrarrebbe verso il diffusore (valore medio negativo). Dato che ciò fortunatamente non accade, vuol dire che la tensione (corrente) assorbita varia certamente fra valori positivi e valori negativi, con valore medio nullo. La *Figura 2* mostra la classica circuitazione con una coppia complementare di uscita. Il transistor NPN eroga la corrente positiva, mentre quello PNP eroga quella negativa. Dato però che questi dispositivi sono dispositivi reali, presentano tempi di commutazione finiti; esiste quindi il problema di raccordare fra di loro la fine dell'erogazione di corrente da parte di un transistor con l'inizio dell'erogazione da parte dell'altro. Nella soluzione concettualmente più semplice, quella in classe A, l'idea di base è quella di far sì che mai un transistor sia nelle condizioni di spegnersi. Per fare questo, viene introdotta una *corrente di polarizzazione* (o *corrente di riposo*, o *bias*) che scorre dal transistor NPN e viene assorbita dal transistor PNP. Quando la tensione d'uscita aumenta (ad esempio verso una tensione positiva) una parte della corrente di riposo erogata dal transistor NPN viene inevitabilmente assorbita dal diffusore e si riduce quindi quella assorbita dal transistor complementare (PNP). È importante capire perché quest'ultima corrente si riduce; ciò è dovuto al fatto che la tensione di polarizzazione fra le basi dei due transistor è solitamente un valore fisso (circa 1,4 volt) ma il transistor T1 (NPN) per erogare la corrente assorbita dal diffusore più quella che il transistor T2 assorbe, necessita di una tensione di base/emettitore superiore a quella della condizione di riposo (ad esempio 0,75 volt). Ne consegue che al transistor T2 rimane come tensione base/emettitore una tensione di soli 0,65 volt e quindi la corrente da lui assorbita dal collettore si tradurrà o si annullerà addirittura. Tutto ciò accade in modo speculare se la tensione d'uscita è negativa e la corrente erogata pure. In assenza di una soluzione che possa modulare la tensione di polarizzazione fra le due basi, questo meccanismo di variazione della corrente di bias in relazione a ciò che il diffusore assorbe, non è eliminabile. Nella classe A, per evitare lo spegnimento di un dispositivo (ovvero il fatto che ad un certo punto non conduce più alcuna corrente), il valore della corrente di polarizzazione è regolato verso un valore così alto che anche con le massime correnti erogate al carico non si arriva mai alla interdizione. Tornando al nostro esempio di amplificatore da 100 watt su 8 ohm, esso necessita di una tensione di alimentazione di +/-40 volt. La corrente massima erogata al diffusore (se di 8 ohm) è di 5 ampere di picco. In prima approssimazione possiamo ritenere che la corrente di polarizzazione,

per avere una classe A fino a 100 watt su 8 ohm, sia di 2,5 ampere a vuoto. Questo comporta una dissipazione di energia di  $2 \times 40 \text{ V} \times 2,5 \text{ A} = 200 \text{ watt}$  per poterne erogare 100 watt al carico. Se il diffusore avesse invece un'impedenza di 4 ohm, la corrente massima disponibile in classe A rimarrebbe sempre di circa 5 ampere, con un valore quindi di potenza erogata pari alla metà, 50 watt; **il rendimento della classe A non è certo il massimo desiderabile**. Se l'energia elettrica sul pianeta fosse disponibile senza riserve e senza effetti collaterali, e se si ascoltasse la musica solo in inverno, l'effetto di stufa elettrica che un amplificatore così congegnato produce, sarebbe un effetto collaterale non dispregiabile. Battute a parte, gli amplificatori in classe A di elevata potenza, pongono non pochi problemi pratici all'utilizzatore, nonché alcuni effetti indesiderati anche sotto l'aspetto tecnico. Uno fra tutti ad esempio è la necessità di un grande dimensionamento dell'alimentazione dovuto all'elevato assorbimento di corrente a riposo, nonché del pericolo d'intermodulazione del segnale audio con il notevole residuo di alternata presente sull'alimentazione degli stadi finali. Ma è proprio così importante evitare lo spegnimento di un dispositivo di potenza? Essenzialmente è una questione di velocità delle transizioni fra i due stati, quello di conduzione e di interdizione. Ad esempio, nel caso della frequenza dei 20 kHz, il tempo che intercorre fra il massimo della corrente positiva e quella negativa è di circa 25 microsecondi, tempo non lungo ma neppure brevissimo. I dispositivi bipolari di potenza, specie se di vecchia generazione, presentano effettivamente problemi di velocità. Ad esempio la classica coppia 2N3055 e 2N2955 ha dei tempi di commutazione di circa 5 microsecondi, quindi del tutto comparabili con il tempo di cui sopra. Inevitabilmente un amplificatore che utilizzi questi dispositivi presenterebbe

problemi legati alla distorsione di incrocio in alta frequenza. Dispositivi più recenti o dispositivi mos-fet hanno tempi di commutazione decisamente più brevi, del ordine di alcune decine o centinaia di nanosecondi, per cui è ipotizzabile che possa avvenire la transizione fra i due stati senza che la corrente di uscita erogata al diffusore debba necessariamente presentare delle perturbazioni. Nel funzionamento in **classe AB**, si attua un compromesso fra i due estremi. Si lascia quindi una corrente di riposo tale da garantire per un piccolo intervallo di potenza d'uscita il funzionamento ancora in classe A; ad esempio con 100 mA di corrente di polarizzazione e si ottengono 0,32 watt su un carico di 8 ohm. Soprattutto però in questo modo si garantisce il raccordo fra le condizioni di accensione e di spegnimento dei due dispositivi. Nelle varie soluzioni di **classe A dinamica**, invece si agisce in modo più raffinato, modulando la tensione di polarizzazione fra le due basi, al fine di evitare lo spegnimento dei dispositivi. I vari costruttori hanno dato nomi diversi alle loro soluzioni, ma alla fine il principio non è molto diverso. Può essere invece diversa la implementazione pratica di questa soluzione. Anche a questo proposito bisogna però sempre considerare il pericolo che il rimedio non risulti alla fine peggiore del male, ovvero che... "l'operazione sia riuscita perfettamente, ma il paziente sia morto". Esiste infatti il pericolo, purtroppo non solo teorico, che per raggiungere questo importante obiettivo, si implementino delle circuitazioni che alla fine degradano il segnale audio in misura maggiore di ciò che non avrebbe prodotto il lasciare le cose come erano. Si è creato così un argomento di vendita (commerciale) ma si è mortificato quel povero segnale audio.

## Protezioni

Oggi al solo sentire citare questa parola l'audiologo entra in uno stato di preallarme. In effetti negli anni "d'oro" dell'alta fedeltà, specie nei prodotti più economici, erano presenti delle protezioni elettroniche che, appena il segnale di uscita erogato dal finale cominciava a farsi "interessante" per l'ascolto, iniziavano ad intervenire rovinando la festa. Ovvero limitando la corrente di uscita con conseguente aumento del tasso di distorsione. Dal punto di vista del costruttore l'imperativo era sopra tutto quello che il prodotto, magari utilizzato a migliaia di chilometri di distanza, in condizioni ambientali e di erogazione che erano le più disparate, non si rompesse mai. Oggi la situazione, almeno nei prodotti più seri di fascia medio alta, è molto diversa, per certi versi quasi opposta. Non è raro, infatti, imbattersi in amplificatori la cui unica forma di protezione sia rappresentata solo dal fusibile sull'alimentazione di rete. È vero che questa soluzione è quella che meno contamina il segnale, ma è anche vero che non serve praticamente ad altro se non ad evitare che l'apparecchio prenda fuoco in caso di guasto. Più efficace è la soluzione che prevede diversi fusibili sulle alimentazioni interne in corrente continua. Essendo



*Figura 2 - Schema di principio della stabilizzazione termica di finali bipolari di potenza mediante transistor di compensazione utilizzati in configurazione VBE Multiplier (T3). Esso deve essere posto a contatto termico dei dispositivi finali (T1, T2); sfrutta lo stesso principio della variazione della tensione Base/Emettitore al variare della temperatura, ma in modo complementare ai transistor finali di potenza, così da poterne compensare la tendenza all'aumento di corrente con l'aumento di temperatura.*

essi solitamente del tipo rapido, possono intervenire con maggiore velocità. È importante infatti che le protezioni non abbiano l'unico scopo di proteggere l'amplificatore stesso ma anche di salvaguardare il diffusore collegato da eventuali ripercussioni dei guasti. Leggasi woofer bruciati a causa della presenza di corrente continua in uscita. A livello di vere e proprie protezioni elettroniche, a parte soluzioni più sofisticate generalmente ormai implementate solo nei circuiti integrati o nei power pack, quella più utilizzata si riconduce al classico limitatore di corrente basato su di un transistor supplementare con il compito di limitare la polarizzazione di base del

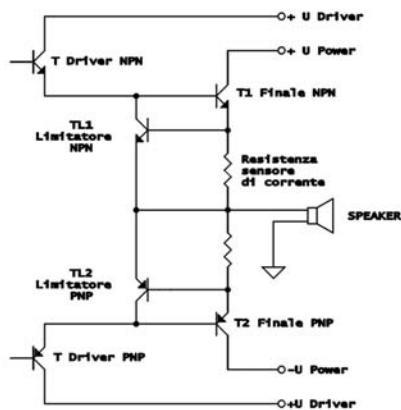


Figura 3 - Schema di principio di una classica protezione elettronica basata sulla limitazione della corrente di uscita. Ad esempio, per la polarità positiva, quando la tensione sulla resistenza di misura della corrente supera circa i 0,7 V, il transistor TL1 entra in conduzione limitando la polarizzazione di base del transistor finale T1. Dimensionando opportunamente il valore della resistenza di misura della corrente, si determina il valore massimo di corrente di uscita.

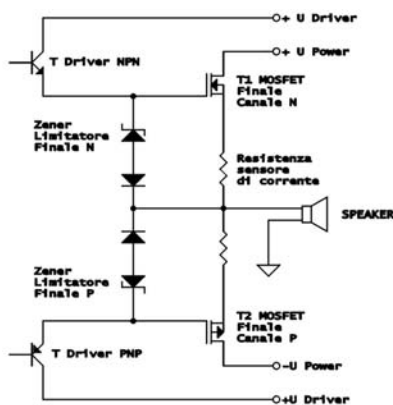


Figura 3A - Simile alla Figura 3, ma utilizzata per finali MOS-FET. La limitazione avviene limitando la tensione fra Gate e Source. Ad esempio, con una Trasconduttanza di 1A/1V, e con una tensione di soglia di 2 V, mediante uno zener di 6 V, si limita la corrente di uscita a circa 4 A (con resistenza di Source nulla).

transistor finale (Figura 3). Purtroppo questa soluzione obbliga all'utilizzo della resistenza di emettitore, la quale, se da un lato aumenta la controeazione locale, dal altro diminuisce il guadagno dello stadio di uscita. Negli amplificatori a mos-fet, essendo essi intrinsecamente più robusti dei finali bipolari ("bruciano" meno velocemente), le protezioni più diffuse sono costituite dal classico zener di limitazione della tensione di gate (Figura 3A).

Concludendo, ricordiamo che, per la salvaguardia dei diffusori è gradita una protezione che intervenga in caso di tensione continua in uscita. Meglio sarebbe che essa agisca senza l'uso dei relè di uscita, in quanto la loro presenza, non è proprio il massimo che si possa desiderare per un percorso del segnale che sia il più neutro possibile. Questo vale anche per i fusibili in serie all'uscita; essi hanno infatti una resistenza interna elevata e per di più non lineare in quanto, per effetto termico, varia molto in base alla corrente erogata causando prodotti di distorsione.

### Protezione termica

Quando sono presenti, nel 90% dei casi sono costituite da un interruttore termico (bimetallico) che agisce interrompendo l'alimentazione nel momento in cui i dissipatori di calore superano una certa temperatura. Purtroppo negli apparecchi più economici (più semplici) spesso non sono presenti, anche se sono quelli che ne avrebbero maggiore bisogno, essendo spesso dotati di dissipatori non proprio "sovradimensionati". In questi casi si confida nella buona sorte; anche perché un buon sensore di temperatura costerebbe quasi quanto un pezzo di alettatura in più.

### Stabilità termica e sua compensazione

Dato che siamo in tema di gestione della dissipazione termica, tocchiamo per un istante un altro argomento molto importante in un amplificatore a stato solido, cioè quello della stabilità termica. Questo problema trae origine dal fatto che i semiconduttori hanno dei parametri di guadagno (in corrente o in tensione) che risentono molto del variare della temperatura. Ad esempio un classico finale di potenza bipolare, all'aumentare della temperatura, se la tensione di polarizzazione base/emettitore rimane costante, tende ad aumentare la sua corrente. Ciò comporta un maggiore riscaldamento e quindi un nuovo maggior aumento di corrente. Si ha cioè un meccanismo che si autoalimenta chiamato *effetto valanga*. Se non si prendessero gli opportuni provvedimenti, sarebbe garantita la distruzione dei finali non appena si polarizzassero quel tanto (poco) che serve ad evitare la distorsione di incrocio. In Figura 2 è rappresentato uno stadio di potenza con la soluzione classica più utilizzata, chiamata *vbe multiplier*. Essa utilizza un transistor di compensazione (T3) a contratto termico dei finali (T1, T2); all'aumentare della temperatura, questo transistor di compensazione tende ad assorbire una maggiore corrente e quindi a ridurre la po-

larizzazione dei finali, compensando così la loro tendenza ad incrementare la corrente. Se ben dimensionato, il suo funzionamento è decisamente soddisfacente.

Negli amplificatori con finale a mos-fet, abbiamo due casistiche.

1) Da un lato quelli che utilizzano i mos-fet per applicazioni audio, i quali hanno l'apprezzabile caratteristica di avere il punto di stabilità termica proprio coincidente (ma non è un caso) con le condizioni operative nei quali sono spesso utilizzati. Non richiedono quindi meccanismi di compensazione, rendono la vita molto più facile al progettista, e consentono una discreta economia costruttiva. Per contro questi dispositivi, di solito, hanno un guadagno (trasconduttanza) abbastanza basso, dell'ordine di un 1 ampere/1 volt = 1 siemens.

2) Nel secondo caso abbiamo l'utilizzo di dispositivi non specificatamente designati per applicazioni audio; essi hanno un coefficiente di temperatura positivo, cioè incrementano la corrente all'aumentare della temperatura. La loro compensazione è però più problematica rispetto a quella di un transistor bipolare, poiché la loro curva di deriva termica, essendo diversa, non può essere compensata semplicemente con un transistor bipolare utilizzato come moltiplicatore VBE.

### Banda passante, velocità, stabilità, controeazione

Sono fenomeni abbastanza legati fra di loro, ma per trattarli in modo approfondito servirebbe molto più spazio; vedremo almeno di fare degli esempi nella prossima puntata. Per ora possiamo dire che un amplificatore a stato solido ha intrinsecamente la possibilità di avere un comportamento dinamico migliore di un amplificatore a tubi, non fosse altro che per il fatto di non avere i trasformatori d'uscita. Fra la teoria e la pratica, però, la differenza è grande, ad iniziare a livello di filosofia di prodotto. Primo approccio: *il segnale audio ha una larghezza di banda di 20 kHz, quindi è sufficiente che l'amplificatore abbia quella banda passante.*

Secondo approccio: *dato che bisogna riprodurre (e non generare) un segnale elettrico senza alterarlo, si ha bisogno della massima velocità possibile, per non introdurre rallentamenti.*

Chi ha ragione? Teoricamente i secondi, trattandosi di riproduzione; però bisogna fare i conti con le soluzioni reali che si possono implementare.

Se l'obiettivo fosse quello della banda passante, oggi non sarebbe difficile raggiungere bande passanti di 10 MHz (se non di più) anche in un amplificatore di potenza. Il fatto è però che le topologie che andrebbero utilizzate, ed i componenti stessi, non sono proprio il massimo quanto a prestazioni audio. Il pericolo di avere un suono molto veloce, ma duro, poco plastico e poco fluido, che induce fatica d'ascolto, è certamente in agguato; si tratta di un problema che attanaglia oggi alcuni prodotti che dal punto di vista concettuale si sono mossi in questa direzione. D'altra parte è anche

esperienza di tutti che amplificatori eccessivamente "lenti", alla lunga, stancano per la sensazione di scarsa velocità e di scarsa apertura sonora. L'importante, come sempre, è non perdere di vista l'obiettivo globale per non far sì che un solo aspetto, per quanto importante, possa compromettere il risultato finale complessivo.

### L'alimentazione

Un parallelo che illustra molto bene l'importanza dell'alimentazione all'interno di un amplificatore è costituito dal motore di una autovettura. Valvole, cilindri, pistoni, bielle etc. etc. non hanno nessuna probabilità di funzionare, ovvero di erogare potenza, se non vengono alimentati dal carburante. Ma non è sufficiente che il carburante sia del tipo e della qualità adatta, oppure che il serbatoio sia di grande capienza. Anche le tubazioni, la pompa della benzina, gli iniettori, devono essere dimensionati per fornire al motore la quantità di carburante che, a seconda delle condizioni di erogazione, esso necessita. In un amplificatore la situazione è del tutto simile, ma con una differenza molto importante. Nel 99% dei casi l'energia viene prelevata dalla rete elettrica in alternata, per mezzo di un trasformatore, il quale mediante un ponte raddrizzatore carica di energia elettrica quegli elementi di accumulo, meglio noti come condensatori. Il periodo di carica è di 10 ms (corrispondenti alla frequenza di 100 Hz) ed il tempo di carica vero e proprio è dell'ordine di qualche ms (se non meno). Ciò porta al fatto che nella maggior parte del tempo sono i condensatori che alimentano in modo passivo (come un volano) il circuito di amplificazione.

E di colpo, ogni dieci ms, arriva una botta di corrente (decine di ampere di picco) che ricarica il serbatoio.

Questo comporta effetti collaterali:

1 - la tensione di alimentazione non è mai stabile, ma affetta da ondulazioni (*ripple*) di valore molto alto (alcuni volt);

2 - i picchi di corrente di carica, per effetto elettromagnetico possono indurre disturbi all'interno dell'apparecchio;

3 - esiste la possibilità (la certezza) che si originino delle intermodulazioni fra il segnale audio utile che l'amplificatore deve erogare e l'ondulazione (*ripple*) di tensione di carica dei condensatori. Questo porta alla presenza, nel segnale d'uscita al diffusore, di intermodulazioni con la frequenza di 100 Hz e relative armoniche. Ciò all'ascolto può tendere a sporcare e colorare la regione del basso e del medio-basso. Molte delle differenze di suono fra un amplificatore e l'altro in questa porzione dello spettro sono dovute a come, in pratica, si distribuiscono questi effetti parassiti.

4 - Inoltre, nella maggior parte del tempo, l'amplificatore attinge la sua alimentazione alla batteria di condensatori, i quali inevitabilmente presentano una impedenza interna che limita la velocità di erogazione di corrente.

Per arginare tutti questi inconvenienti, non è che si faccia poi più di tanto all'atto pratico. La ricetta maggiormente usata è

quella di utilizzare trasformatori di maggiore potenza e condensatori di maggiore capacità; così l'audiofilo si sente più rassicurato.

**Soluzioni invece più raffinate possono essere costituite da: alimentazione induttiva, alimentazione a batteria, alimentazione stabilizzata, alimentazione "switching".**

**Nell'alimentazione induttiva**, si utilizzano degli induttori come elementi di accumulo di energia interposti fra il trasformatore ed il ponte rettificatore. Così facendo si estende il tempo di carica dei condensatori, col conseguente vantaggio di rendere meno "brutali" le correnti di carica e di ridurre il *ripple*. Per contro abbiamo una costruzione più costosa perché, per essere efficaci, questi induttori devono essere decisamente voluminosi, pesanti e di conseguenza costosi. Per rimanere in Italia, **Bartolomeo Aloia** è conosciuto per essere un acanito sostenitore dei suoi vantaggi.

**Nell'alimentazione a batteria**, al posto dei condensatori abbiamo delle batterie (tipo auto ma ermetiche), con una capacità equivalente enormemente superiore a quella di un condensatore (ma un condensatore è più veloce). Anche questo sistema sarebbe un buon sistema, peccato per i costi e gli ingombri, sempre notevoli. A memoria mi viene in mente solo Jeff Rowland che propone alcuni modelli di amplificatori basati su questo sistema.

**Nell'alimentazione stabilizzata** un circuito elettronico si fa carico di assorbire le ondulazioni di *ripple* e di erogare una tensione continua stabile ai circuiti utilizzatori. Il punto delicato è legato al comportamento dinamico di questi circuiti; cioè la loro velocità deve essere elevata quel tanto che basta per non fare mai mancare al motore la benzina di cui necessita. Troviamo le alimentazioni stabilizzate ormai dunque a livello di preamplificatori e di sorgenti. Negli amplificatori è invece meno frequente, questo anche negli stadi di ingresso e/o di guadagno in tensione, laddove invece le correnti sono comunque modeste. Questo perché le tensioni, al contrario, sono relativamente elevate, e ciò impedisce l'uso dei classici circuiti integrati di stabilizzazione, ormai utilizzati nel 99% dei casi. Bisognerebbe al contrario implementare delle circuitazioni a componenti discreti, che alla fine però si rivelerebbero più complesse e più costose degli stadi che dovrebbero alimentare. Più semplice e più diffuso è invece l'utilizzo di un'alimentazione separata per questo stadio, realizzata mediante avvolgimenti separati o con un trasformatore dedicato. Questo riduce l'influenza del *ripple* causato dagli stadi finali e rende più costante la tensione di alimentazione negli stadi più delicati. Rarissimo è invece trovare un amplificatore con l'alimentazione stabilizzata anche degli stadi finali. Innanzitutto per un motivo di costo dato che in pratica servirebbero due amplificatori (alimentazione positiva ed alimentazione negativa) per alimentare l'amplificatore audio principale. Inoltre esiste la difficoltà di realiz-

zare degli alimentatori così veloci da poter alimentare, senza rallentamenti, gli stadi di potenza anche quando questi assorbono correnti molto elevate.

**L'alimentazione switching** sarebbe teoricamente molto interessante, in quanto, funzionando in alta frequenza (dell'ordine di centinaia di kHz), tende ad assorbire dalla rete elettrica una potenza quasi costante ed è in grado di fornire una tensione continua molto stabile. Inoltre pesi e dimensioni si possono ridurre di molto. Presenta però due gravi controindicazioni. La prima, di ordine tecnico, è dovuta al fatto che in un uso come quello audio, è indispensabile filtrare molto bene le armoniche spurie, sia come disturbi irradiati che come disturbi condotti sulla rete elettrica e sull'alimentazione generata in corrente continua. Ma un sistema di filtri così complesso ed efficace sarebbe molto costoso e farebbe perdere parte dei vantaggi sia in termini di spazio che economici. La seconda è di origine psicologica; dipende dal fatto che gli audiofili non vedono questa soluzione di buon occhio. Sono più appagati dalla vista di un grande trasformatore toroidale e da altrettanto grandi condensatori. Dal punto di vista commerciale sarebbe una scelta azzardata. Tant'è infatti che pochissimi costruttori la utilizzano. Per concludere il discorso sull'alimentazione, ricordiamo come la rete elettrica che entra in un apparecchio audio, oltre a portare con essa l'energia che "nutre" l'apparecchio stesso, porta anche tutto quel inquinamento elettromagnetico che chilometri di cavi e di migliaia di utilizzatori prima di noi hanno messo in atto. Da qui il fiorire di accessori come: filtri di rete, condizionatori, stabilizzatori, cavi di rete speciali etc. Questo è un aspetto che ha certamente una grande importanza e che va tenuto in seria considerazione, ma con buon senso.

E buon senso non è certamente spendere per un cavo di rete, più di quello che si spende per l'oggetto che il cavo stesso deve alimentare.

Buon senso non è neppure scollegare dalla terra di sicurezza gli apparecchi, perché così "suonano meglio". Dato che siamo in tema, mi sento di dare un consiglio relativo ai condizionatori di rete che contengono al loro interno dei trasformatori. Dato che le impedenze di questi trasformatori solitamente non sono affatto trascurabili, bisogna fare attenzione quando si collega ad essi un amplificatore di potenza. Esiste il pericolo che il comportamento dinamico dell'amplificatore sia penalizzato.

*L'entità ridotta dei tempi e degli spazi (siamo su una rivista non su un libro...) ci consente solo di fare carrellate a "volo radente" sui vari argomenti. In ogni caso, per chi fosse interessato a continuare la lettura, anticipo che nella prossima puntata entreremo in altri temi, quali la controreazione, e di analizzare anche alcune topologie circuitali, per comprendere come avviene l'amplificazione del segnale, dall'ingresso fino al diffusore.* □

## NATURA DEI DISPOSITIVI A STATO SOLIDO

**Parlando di amplificazioni a stato solido, si fa riferimento in generale ad apparecchiature che utilizzano come componenti attivi (dotati di guadagno) dispositivi a semiconduttori. Il principio di funzionamento è dato dal fatto che le cariche elettriche (corrente), trovano al loro interno maggiore o minore facilità a muoversi in una certa direzione.**

Partendo da materiali semiconduttori puri (generalmente silicio) vengono introdotte delle "impurità" (droganti) che ne modificano lo stato di conduzione elettrica. Drogando, ad esempio, una parte del silicio di partenza con elementi che gli conferiscono una natura "N" e drogando il resto con elementi che gli conferiscono una natura "P", nella superficie di separazione fra queste due diverse strutture fisiche si realizza quella che viene chiamata "giunzione". Le cariche elettriche quando devono attraversare una giunzione N-P, si muovono con facilità in una direzione e con difficoltà in quella opposta. È come se si fosse creata una strada a senso unico.

Ponendo due di queste giunzioni N-P e P-N molto vicine fra di loro (a distanza di qualche micrometro o frazione di micrometro) si ottiene un dispositivo a tre terminali chiamato "transistor". Ad esempio nel transistor N-P-N i tre terminali denominati "collettore", "base", "emettitore" corrispondono alle altre regioni N-P-N del semiconduttore drogato.

L'effetto che sta alla base del funzionamento pratico è che, mediante una piccola corrente che scorre tra i terminali di Base ed Emettitore, si riesce a modulare una corrente molto maggiore che scorre fra i terminali di Collettore ed Emettitore. Il rapporto fra la variazione della corrente di Base e la variazione della corrente di Collettore si chiama, appunto, *guadagno* (*beta*, in termine tecnico). Questo parametro può variare dal valore di circa 20 (per dispositivi di grande potenza) a valori prossimi a 1.000, per più "delicati" transistor di segnale.

Rispetto alle valvole, una sostanziale differenza è data dalla possibilità di realizzare un dispositivo complementare, denominato transistor P-N-P, avvicinando 2 giunzioni P-N e N-P. È come se mediante i transistor N-P-N possiamo modulare le correnti positive, e mediante i transistor P-N-P, le correnti negative. Il concetto della modulazione della corrente che scorre fra collettore ed emettitore attraverso la corrente di base è simile alla portata di un tubo nel quale scorre del liquido. Mediante un piccolo sforzo sul rubinetto, possiamo infatti modulare la portata anche di grandi quantità di liquido.

### Transistor Bipolare BJT (Bipolar-Junction-Transistor)

È basato sul principio che abbiamo appena descritto ed è stato il primo dispositivo semiconduttore (con guadagno) che è stato utilizzato. La sua più importante caratteristica è che intrinsecamente funziona in corrente, cioè è la corrente che scorre nella base (verso l'emettitore) che modula la corrente che scorre fra il collettore (verso l'emettitore). La tensione fra base ed emettitore è pressoché costante, pari ad un valore di circa 0,7 V. La tensione fra collettore ed emettitore invece può variare in relazione al carico ed al punto di lavoro.

Realizzati secondo questo principio, troviamo una gamma enorme di dispositivi. Si va dal transistor ad alta sensibilità a basso rumore, per amplificare correnti molto basse, con tensioni massime dell'ordine di qualche volt, a dispositivi di potenza in grado di elaborare correnti molto alte (decine di ampere) a tensione anche molto elevata (dell'ordine di circa 1.000 V). È una tecnologia ormai matura e consolidata, che dall'inizio ha fatto enormi progressi, ma per la quale si può supporre che ormai abbia espresso quasi tutto ciò che poteva esprimere (salvo smentite dei fatti, dovute a nuove scoperte sui materiali).

Nel campo audio, troviamo transistor bipolari praticamente ovunque, e numerosi sono gli amplificatori che utilizzano solo questo tipo di componente, dagli stadi di ingresso a quelli di potenza. Come vantaggio abbiamo essenzialmente la grande versatilità, troviamo infatti un numero di dispositivi estremamente grande, studiati per il settore audio. Si può ritenere che il transistor bipolare sia un dispositivo onesto, affidabile e versatile. Forse non un... premio Nobel, ma "ci si può contare".

Il più grande problema che presentano i transistor bipolari, è dovuto al fatto che funzionano essenzialmente come amplificatore di corrente, mentre nelle applicazioni audio (e non solo) è la grandezza tensione elettrica quella che nella maggior parte dei casi è più idonea a descrivere un certo fenomeno.

Ad esempio, negli stadi di ingresso un transistor bipolare deve prelevare una certa quantità di corrente dal segnale in tensione di ingresso; questo può causare problemi relativi all'*offset in corrente* fra i due dispositivi differenziali.

Negli stadi di uscita, il guadagno in corrente relativamente basso dei transistor di potenza (20-80 volte) comporta di dover dimensionare con attenzione gli stadi driver.

Un altro effetto negativo, è il tipo di non linearità che presentano quando vengono fatti lavorare in tensione; all'ascolto se ne ricava un suono che può tendere al duro, alla presenza di grana ed affetto da distorsioni di ordine dispari.

### Transistor JFET (Junction Field-Effect Transistor)

Se il transistor bipolare si può paragonare ad un onesto ed instancabile lavoratore, il JFET è l'equivalente di un acuto intellettuale, ma incapace di fare consistenti sforzi materiali.

Il suo funzionamento intrinseco è basato sulla modulazione della corrente che scorre fra i terminali di "Drain" e "Source" (equivalente ai terminali di Collettore e di Emettitore di un transistor bipolare) per mezzo della tensione che esiste fra i terminali di "gate" e di "source" (corrispondenti a Base ed Emettitore). Finalmente abbiamo un dispositivo funzionante in tensione all'ingresso (come nelle valvole); anche il tipo di non linearità intrinseca è più simile a quella della valvola, dando origine a distorsioni maggiormente di ordine pari.

Purtroppo, per la sua caratteristica fisica, è disponibile solo come transistor per piccoli segnali, basse correnti (fino a 10 mA) e per tensioni relativamente basse (sino a 20/30 V). Esistono alcuni JFET per tensioni superiori, ma sono una vera rarità. Inoltre la massima potenza dissipabile è sempre dell'ordine di qualche centinaio di mW (100-300 mW), contrariamente alle centinaia di watt che un transistor bipolare di potenza può gestire. Non mi risulta che esistano oggi JFET di potenza. A memoria, solo Yamaha realizzò negli anni '70/'80 un amplificatore con transistor JFET di potenza denominati *Vertical FET*. Chissà com'era? Personalmente non ho mai avuto il piacere di poterlo provare.

Ad oggi, nel settore audio, i transistor JFET sono utilizzati solo in alcuni casi circoscritti, ad esempio come transistor di ingresso, oppure come interruttore elettrico a stato solido. In questa applicazione si utilizza la sua capacità di modulare la resistenza fra Drain e Source agendo sulla tensione di Gate; il vantaggio è che per segnali di piccola ampiezza, il JFET è in grado di gestire segnali elettrici anche in corrente alternata, senza introdurre elevate distorsioni.

Transistor MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor)

Il transistor MOS-FET è nato successivamente al FET e ne ha superato ampiamente i limiti operativi. Il principio di funzionamento è per certi versi molto simile, dato che una tensione di Gate modula la corrente che circola fra Drain e Source. Rispetto a un FET, ha una tensione di soglia di conduzione di Gate molto più alta (1-5 V) ed un guadagno inferiore (per piccoli segnali).

La maggior parte della produzione e delle applicazioni è nell'ambito delle alte potenze e/o delle alte tensioni. Nel settore audio lo troviamo utilizzato abbastanza di frequente come finale di potenza e, molto più raramente, come transistor di segnale o driver. È disponibile nelle due polarità (canale N e canale P) anche se le differenze fisiche fra i due tipi sono abbastanza grandi, soprattutto in termini di capacità parassite, di velocità e di capacità di gestione della potenza. I dispositivi a canale P sono, infatti, assai più rari di quelli a canale N e solo alcuni costruttori li hanno in catalogo. Il maggior vantaggio che presentano in genere i MOS-FET è quello della facilità di pilotaggio in quanto, essendo pilotati in tensione, richiedono solo la corrente di carica/scarica della capacità di Gate. Ciò semplificata molto lo schema elettrico e, nella maggior parte dei casi, si può fare a meno degli stati driver. Anche a livello di robustezza (tenuta in potenza ed in corrente) i MOS-FET presentano delle caratteristiche molto interessanti, comparabili con quelle dei transistor bipolari di potenza. Di contro, hanno costo più elevato, un minor numero di costruttori in grado di realizzare dispositivi complementari ed un utilizzo generalmente limitato solo nell'ambito degli stadi di potenza.

Transistor IGBT (Insulated-Gate-Bipolar-Transistor)

È per certi versi un ibrido fra un transistor bipolare ed un MOS-FET. Nel senso che la struttura di potenza è di tipo bipolare, mentre quella di ingresso e di pilotaggio è simile a quella dei MOS-FET. Presenta quindi un pilotaggio in tensione, una impedenza di ingresso molto alta abbinata a elevate capacità.

Sono stati sviluppati essenzialmente per applicazioni nel settore della elettronica "switching" e di alta potenza, ad esempio per gli *inverter* dedicati al pilotaggio di motori elettrici, anche molto potenti (trazione elettrica). Nel 99,9% dei casi è disponibile solo nella polarità N. Nel settore audio mi risulta che solo Toshiba sia l'unica a realizzare una coppia di dispositivi complementare (GT20D101/ GT20D201). Essi sono fra l'altro dotati di caratteristiche molto interessanti sia come tensione che come potenza. Questi dispositivi hanno avuto un'alta diffusione in passato, ma ora sembra diminuire il numero dei costruttori che li utilizzano, forse per motivi di difficile reperibilità.

IC - Circuiti integrati

Più che un tipo di dispositivo, è una implementazione pratica di tecnologie a semiconduttori, che racchiude in un unico involucro un elemento funzionale già completo. Limitatamente all'uso audio, i più diffusi sono gli *amplificatori operazionali* utilizzati come amplificatori in tensione. Essi sono utilizzati ormai pressoché ovunque, dagli stadi di Phono agli stadi di guadagno in tensione di un finale di potenza. Sicuramente hanno fatto notevoli progressi rispetto agli inizi in tutti i parametri: rumore, banda passante, velocità, linearità, distorsione etc.

Il fatto di integrare su un unico substrato tutta la circuizione, potenzialmente può portare effetti benefici consistenti, in termini di stabilità dei punti di lavoro, di dispersione delle caratteristiche e di accoppiamenti fra i vari dispositivi. Inoltre ciò consente di "integrare" delle soluzioni circuitali complesse che sarebbero pressoché impossibili da realizzare a componenti discreti.

Un grande limite che però presentano è quello di integrare al loro interno anche alcuni componenti passivi (resistenze e condensatori). L'influenza della qualità della componentistica passiva sul suono di una elettronica audio, è (spero) ormai un dato di fatto per tutti; l'idea che in pochi millimetri quadrati siano integrati anche questi componenti, personalmente, non mi rassicura. Ed in effetti, allo stato dell'arte, le migliori topologie a componenti discreti sono ancora superiori (come prestazioni sonore) rispetto ai circuiti integrati. È meglio però un ottimo circuito integrato che una mediocre circuizione a componenti discreti.

Nell'ambito dei dispositivi di potenza troviamo le soluzioni integrate nei famosi "Power Pack" orientali (ad esempio Sanyo o Sanken) dei quali alla fine, però, nulla è dato di sapere in dettaglio.

Rimanendo da questa parte dell'oceano, un caso interessante è rappresentato dal circuito integrato LM3886T di produzione National Semiconductor. Dopo che ha iniziato ad essere utilizzato da Jeff Rowland in alcuni dei suoi amplificatori integrati, diversi altri costruttori lo stanno utilizzando. In effetti si tratta di una delle poche proposte dell'industria di semiconduttori ad avere una buona potenza di uscita e delle caratteristiche nominali potenzialmente idonee all'uso audio.

Enrico Rossi