

Introduzione

Struttura generale, progetto dello stadio di amplificazione vero e proprio e alimentatore sono stati illustrati nelle tre precedenti puntate. Questa, conclusiva, ha l'ambizione di fornire ulteriori dettagli su: simulazione al computer, realizzazione pratica e misure effettuate sul prototipo.

Simulazione CAE

L'acronimo CAE sta per *computer aided engineering*, parlando di simulazioni circuitali, esso è maggiormente usato di CAD (*computer aided design*). Il programma quasi universalmente utilizzato per simulare circuiti analogici a bassa frequenza si chiama SPICE (simulation program with integrated-circuit emphasis) ed è stato sviluppato all'università di Berkeley. Originariamente SPICE utilizzava una descrizione del circuito tramite netlist, ossia un testo in cui ogni linea rappresenta un elemento circuitale con: tipo di elemento, nodi ai quali è connesso, specificazioni dell'elemento stesso. Ai nostri giorni, il codice SPICE originario è pubblico ed esistono varie versioni da esso derivate (i cosiddetti "dialetti" di SPICE). Inoltre, innumerevoli programmi (commerciali o liberi) sono disponibili con "schematic-entry"¹ e grafica². Due di questi programmi sono stati utilizzati per l'analisi dei circuiti del preamplificatore: SIMETRIX³ e LTSPICE⁴; i risultati forniti sono pressoché identici e ragionevolmente vicini a quelli misurati.

La figura 1 mostra lo schema utilizzato per la simulazione dello stadio attivo con SIMETRIX. La versione con LTSPICE ha una grafica di diverso aspetto ma è del tutto equivalente. Confrontando lo schema di figura 1 con quello della figura 4 (parte seconda), si notano differenze

1. L'ultimo resistore a sinistra (R7, 20k, tra il nodo 113 e massa) non è fisicamente presente nel circuito, ma rappresenta il carico dovuto all'ingresso dell'amplificatore di potenza.
2. Condensatori in parallelo in figura 4P2, corrispondono a condensatori singoli in figura 1
3. L'alimentatore è modellato da un generatore ideale di tensione (V3, 250V). I condensatori di bypass non hanno effetto in questo caso, né servono (essendo appunto V3 ideale, a differenza dell'alimentatore vero) e sono dunque omessi.
4. Alcuni valori di resistenza possono essere differenti tra schema di simulazione e schema realizzato. In quest'ultimo è possibile che siano

¹ l'utente non deve più scrivere una netlist, ma disegna semplicemente uno schema, simile o identico al circuito da realizzare.

² SPICE originario presentava i risultati in forma di tabella.

³ Versione demo – ma sufficiente – scaricabile da <http://www.simetrix.co.uk/site/index.html>

⁴ Completamente libero, scaricabile da <http://www.linear.com/designtools/software/>

avvenuti aggiustamenti per portare le tensioni continue ai vari nodi vicine ai valori calcolati. Non si dimentichi che la valvola fisicamente presente non coincide con il modello usato per i calcoli.

5. Il generatore all'ingresso (V1) rappresenta il segnale di ingresso, e non è ovviamente presente nello schema di figura 4P2. V1 può essere una sorgente AC (analisi della risposta in frequenza per piccoli segnali) o un generatore sinusoidale (analisi della distorsione armonica). Altro ancora sarebbe possibile, ma non necessario al nostro scopo.

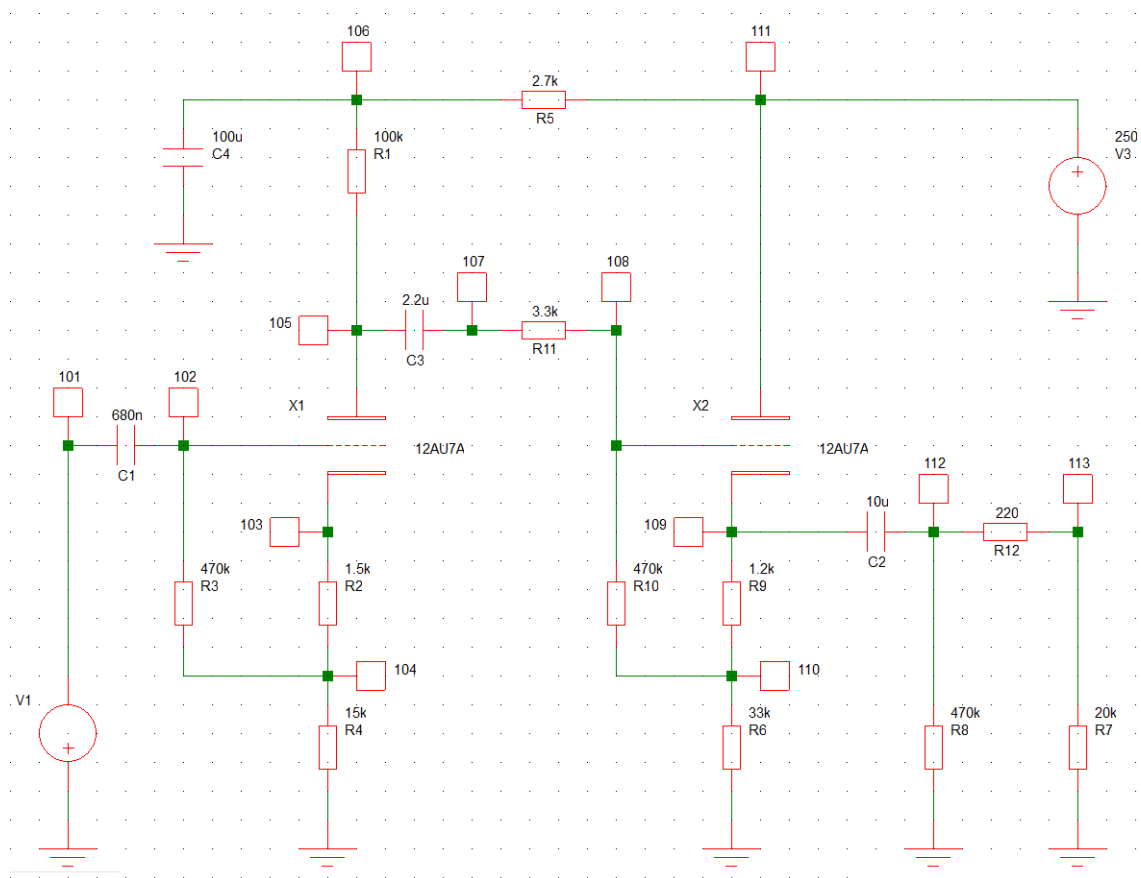


Figura 1. Schema elettrico per la simulazione SPICE (SIMETRIX)

Il testo riportato di sotto è la SPICE netlist del circuito di figura 1. Ciò che inizia per asterisco denota un commento: la riga non viene interpretata dal programma di analisi.

```

X1 105 102 103 12AU7A pinnames: OUT IN1 IN2
X2 111 108 109 12AU7A pinnames: OUT IN1 IN2
V1  0 101  AC 1 0 Sine(0 0.54 1k 0 0)
V3  111  0 250
R1  106 105 100k
R2  103 104 1.5k
R3  102 104 470k
R4  104 0  15k
R5  111 106 2.7k
R6  110  0 33k
R7  113  0 20k
R8  112  0 470k
R9  109 110 1.2k
R10 108 110 470k
R11 108 107 3.3k
R12 113 112 220
C1  102 101 680n
C2  112 109 10u
C3  107 105 2.2u
C4  106 0 100u

.TRAN 10u 20m 10m 5u
*.AC DEC 100 1 100k

*
* Connections: Plate
*                | Grid
*                | | Cathode
*                | | |
.SUBCKT 12AU7A P G K
E1  2  0  VALUE={V(P,K)+18.28*V(G,K)}
R1  2  0  1.0K
Gp  P  K  VALUE={10.88E-6*(PWR(V(2),1.5)+PWRS(V(2),1.5))/2}
Cgk G  K  1.6P
Cgp G  P  1.5P
Cpk P  K  0.5P
.ENDS 12AU7A

```

L'istruzione (commentata) **.AC DEC 100 1 100k** produce una analisi a piccoli segnali⁵ nel dominio della frequenza, con frequenza minima 1 Hz, massima 100 kHz, con 100 punti/decade. Il risultato sono le curve verdi di figura 8.

L'istruzione **.TRAN 10u 20m 10m 5u** produce una analisi nel dominio del tempo, con istante iniziale 0, finale 20 millisecondi (20 periodi del segnale a 1 kHz), con i primi 10 millisecondi del segnale in uscita eliminati (per rimuovere gli effetti del transitorio di accensione, dando tempo ai vari condensatori di caricarsi al valore di regime). La distanza temporale minima tra due successivi campioni calcolati è 5 microsecondi (un periodo del segnale a 1 kHz ha dunque almeno 200 campioni calcolati). Il risultato è la tensione in funzione del tempo sui vari nodi del circuito. Su quella di uscita (nodo 113) viene effettuata una FFT (*fast Fourier transform*) che produce lo spettro di figura 9, curva verde. La prestazione sembra buona, con una seconda armonica a -77.6 dB, la terza a -109 dB, la quarta inapprezzabile. Si noti come l'ampiezza della fondamentale sia 1.4 V_{RMS}, 3 dB superiore al livello di ingresso per la potenza massima della gran parte degli amplificatori finali (1V_{RMS}). Con 1V_{RMS}, la distorsione prodotta sarebbe ancora minore.

La parte non-lineare del modello del triodo (il resto sono capacità inter-elettrodo) sta nelle linee

```
E1  2  0  VALUE={V(P,K)+18.28*V(G,K)}
Gp  P  K  VALUE={10.88E-6*(PWR(V(2),1.5)+PWRS(V(2),1.5))/2}
```

Il modello implementato corrisponde alle equazioni

$$E_1 = V_{Plate-Kathode} + 18.28 \cdot V_{Grid-Kathode}$$

$$I_{Plate-Cathode}(V_{Plate-Kathode}, V_{Grid-Kathode}) = 10.88 \times 10^{-6} \cdot \begin{cases} E_1^{1.5} & (E_1 > 0) \\ 0 & (E_1 \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

Le curve del modello in questione sono riportate in figura 2 (blu). Per confronto le curve prese dal foglio tecnico della ECC82 sono quelle nere, sempre in figura 2.

Maggiore accuratezza è certamente possibile, complicando opportunamente il modello, non l'ho ritenuto necessario.

⁵ Significa che tutti i circuiti sono considerati lineari. Se non lo sono, la risposta ne viene sostituita da una sua approssimazione lineare nell'intorno del punto di lavoro.

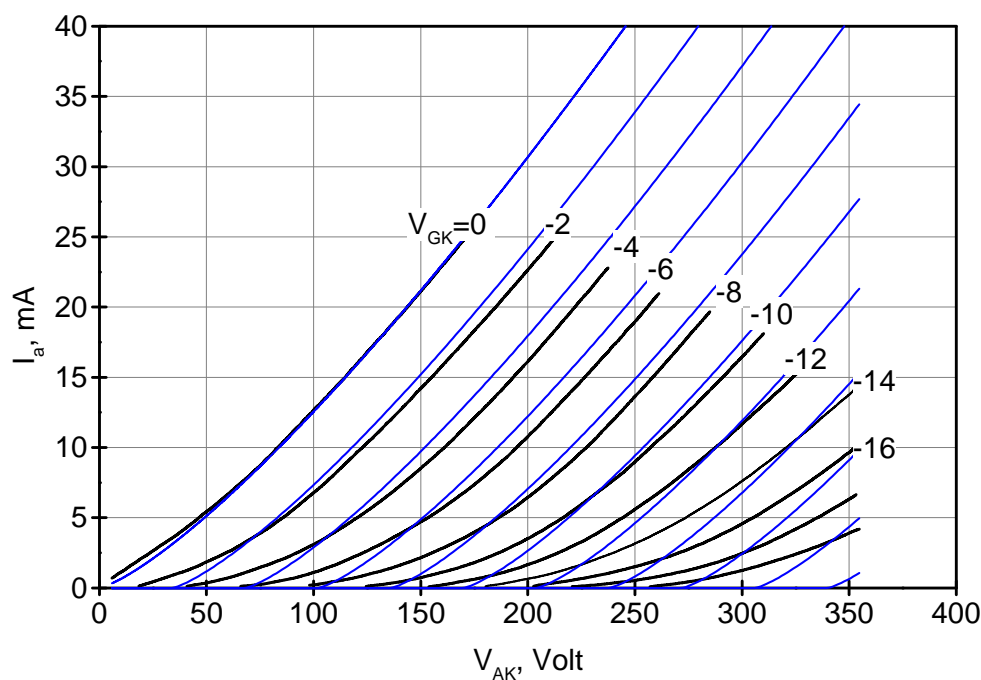


Figura 2. Curve caratteristiche del triodo ECC82: ricavate dal foglio tecnico Philips del 1968 (curve nere), ottenute dal modello SPICE (curve blu).

Realizzazione

Questa parte contiene solo brevi descrizioni, richiedendo le fotografie poche ulteriori spiegazioni.

In figura 3 si vede l'intero preamplificatore con il coperchio superiore rimosso. Due inquadrature sono presenti: dal pannello posteriore (connettori, foto in alto) e anteriore (controlli, foto in basso).

Da sinistra verso destra, nella foto superiore (in direzione opposta per quella anteriore) si vedono: lo stadio attivo, realizzato su basetta millefori, l'alimentatore e il trasformatore. Quest'ultimo è posto alla massima distanza possibile dallo stadio attivo.

Sul pannello anteriore, da sinistra verso destra (foto in basso), abbiamo: l'interruttore di accensione, il controllo di volume e il selettore degli ingressi.

Sul pannello posteriore, a destra (foto in alto), si vedono 9+9 connettori coassiali RCA audio, corrispondenti a 6 ingressi di linea, 1 ingresso + 1 uscita registratore e 1 uscita. Sulla stessa foto, ma a sinistra si vede il connettore di alimentazione a 220V, di tipo VDE, al di sopra del quale è posto il portafusibile da pannello.

Tutti i segnali audio viaggiano su cavi schermati, di colore differente, per quanto possibile.

Il contenitore utilizzato ha 5 pareti di ferro, mentre il pannello anteriore è in alluminio. Quanto alle dimensioni, sono 3 unità rack (430×300×130 mm circa). Soluzioni diverse sono possibili, purché il trasformatore possa essere abbastanza distante dal resto e la schermatura elettrica da e verso l'esterno sia completa⁶.

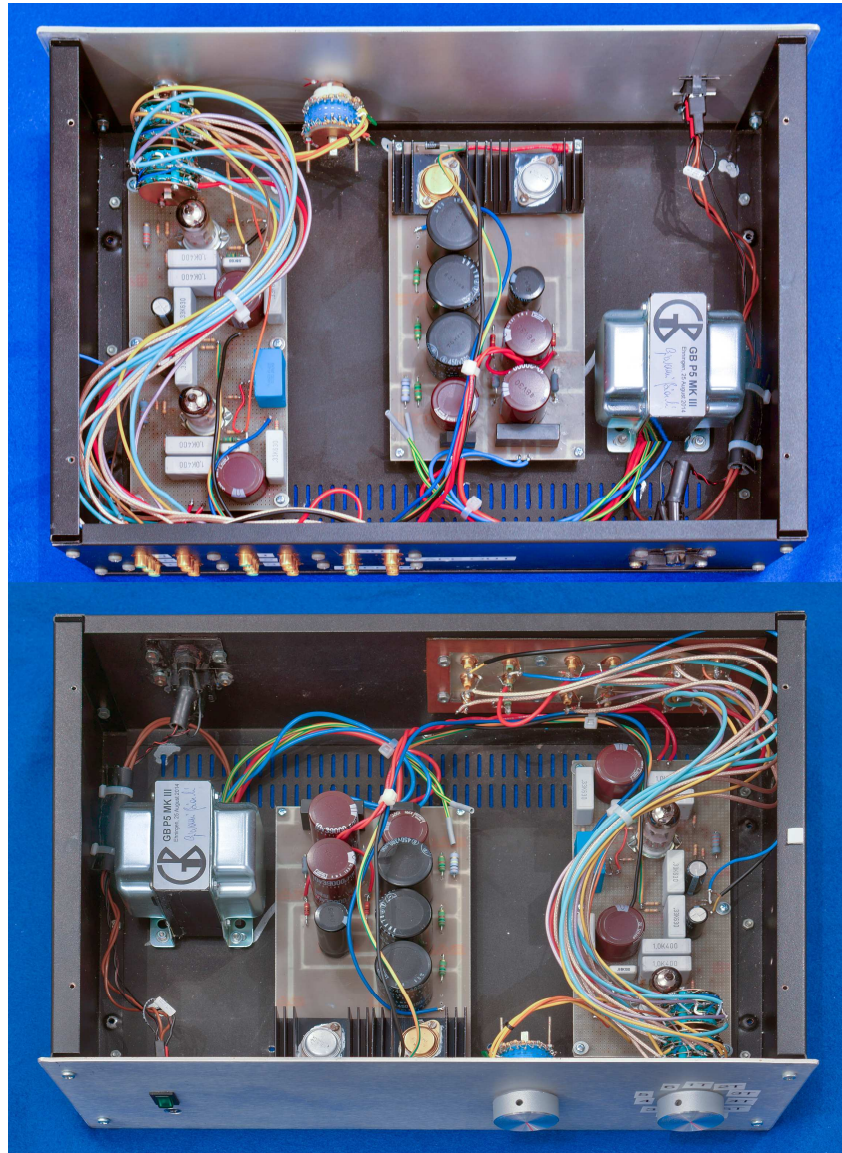


Figura 3. Vista del preamplificatore. Lato connettori (sopra), lato controlli (sotto)

⁶ Pareti di legno possono essere messe in aggiunta, non in sostituzione a quelle di metallo.

Seguendo lo stesso criterio usato per la figura 3, la figura 4 si compone di due fotografie sovrapposte. Quella superiore mostra lo stadio attivo visto dal lato componenti, quella inferiore dal lato collegamenti.

Da notare l'assenza di accavallamenti sui collegamenti stessi: lo stesso tipo di layout si potrebbe dunque realizzare con un circuito stampato a singola faccia. Volendo usare quest'ultima tecnica di costruzione, sarebbe tuttavia opportuno mantenere almeno un principio qui adottato: i terminali degli zoccoli per le valvole non devono essere saldati direttamente al circuito stampato, ma a questo connessi tramite fili. Le valvole sono infatti fredde da spente e calde in funzione. L'escursione termica provoca dilatazioni e movimenti reciproci tra zoccolo e circuito stampato, che alla lunga portano a rotture nelle piste e/o nelle giunzioni di saldatura. I fili sono invece l'elemento cedevole che assorbe gli effetti delle dilatazioni termiche evitando guasti.

La tensione dei filamenti è condotta tramite due fili rossi di adeguata tensione e intrecciati.

Come per le figure 3 e 4, anche la 5 è formata da due fotografie sovrapposte: lato componenti (foto superiore) e lato piste (foto inferiore) dell'alimentatore. Il circuito stampato è alquanto rudimentale: l'incisione è eseguita con un "cutter". Di meglio è possibile, consigliabile, ma non essenziale. Di un minimo rilievo sono i diodi zener, montati su radiatore, a sua volta fissato al circuito stampato.

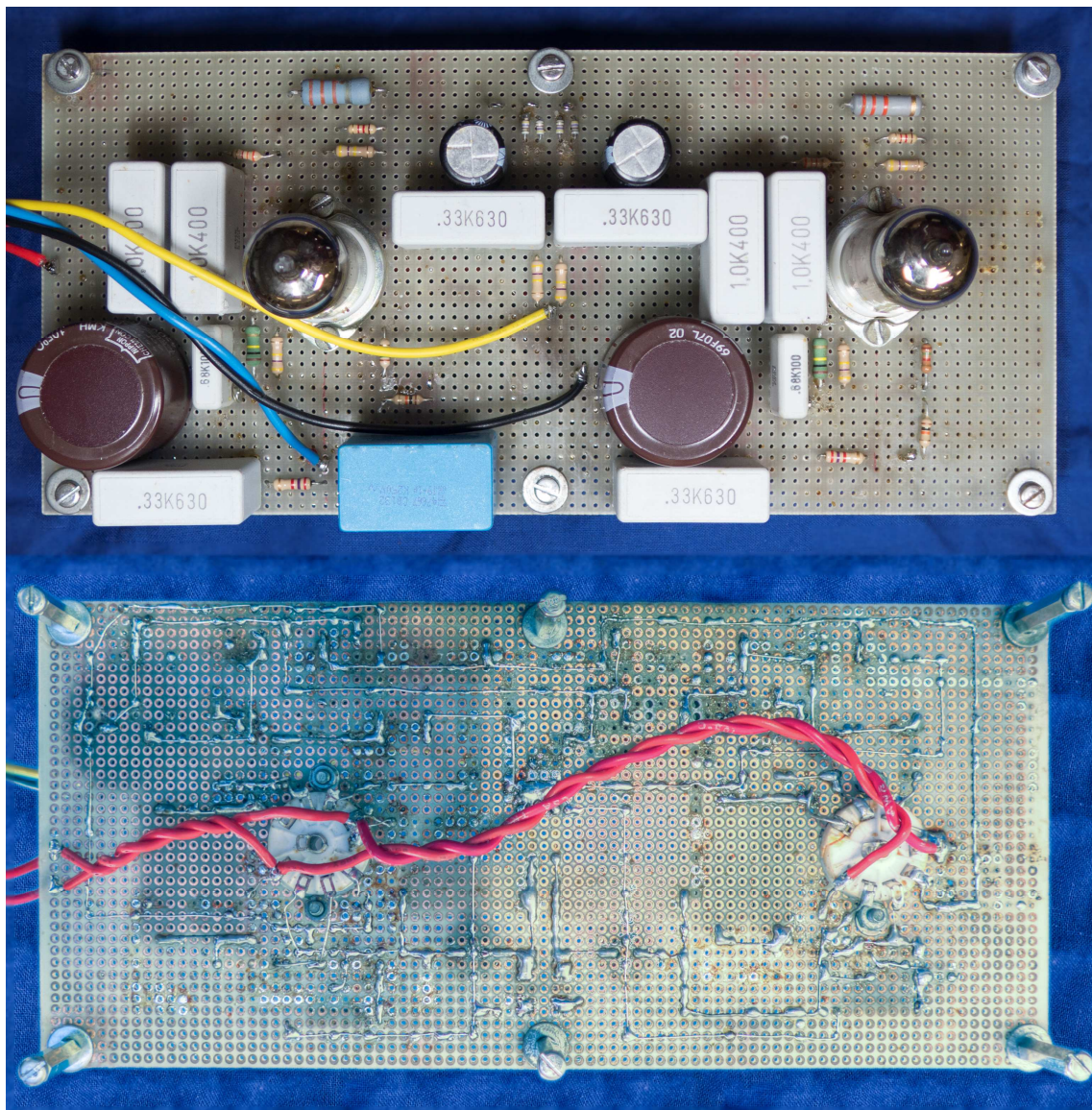


Figura 4. Stadio attivo, realizzato su basetta millefori. Lato componenti (sopra), lato collegamenti (sotto).



Figura 5. Alimentatore. Lato componenti (sopra), lato piste (sotto)

Risultati delle misure

Tutto quello che serve per effettuare le misure presentate è un PC con scheda sonora e un opportuno programma di elaborazione. La scheda sonora (SC, *sound card*) è sostanzialmente la combinazione di un convertitore digitale-analogico (DAC, *digital to analog converter*), un convertitore analogico-digitale (ADC, *analog to digital converter*) e di un circuito di interfaccia con il PC stesso. Comandata opportunamente, SC può generare segnali sinusoidali tramite il DAC, la cui uscita è poi collegata all'uscita audio della scheda stessa. Tali segnali si usano come stimolo per il dispositivo da misurare (DUT, *device under test*). Analogamente, ma all'inverso, segnali audio presenti all'ingresso della SC vengono convertiti in sequenze di numeri digitali: tale operazione si ottiene dalla combinazione di campionamento e quantizzazione. La sequenza di

parole digitali così ottenuta, viene utilizzata da un apposito programma per visualizzare la forma d'onda che ha generato la frequenza stessa. In molti casi, dalla forma d'onda si può anche ottenere lo spettro, tramite FFT. Come noto, le schede sonore per PC hanno una frequenza di campionamento di, o più di una selezionabile tra, 44.1, 48, 96, 192,... kHz. La massima frequenza dei segnali generati e/o visualizzabili è di poco inferiore alla metà della frequenza di campionamento (che nel caso presentato è 192 KHz).

Quanto al programma per utilizzare il PC con SA come strumento di misura, quello qui usato è audio tester (<http://www.audiotester.de/>): ragionevolmente economico, potente, affidabile e di facile uso. Esistono numerose alternative commerciali o freeware, tra queste ultime consigliabilissima è Visual Analyser (<http://www.sillanumsoft.org/>), effettuando possibilmente una donazione al sito. Scelto e installato un programma, una verifica preliminare risulta necessaria:

1. Collegare l'ingresso della SC direttamente con l'uscita
2. Mettere il programma in modalità oscilloscopio, o ancor meglio, analizzatore di spettro. Nessun segnale apprezzabile deve essere visualizzato. Altrimenti, significherebbe che la scheda audio stessa stia generando segnali spuri e non sarebbe utilizzabile.
3. Sempre tramite programma, generare un segnale sinusoidale a varie frequenze, per esempio 1, 2,.. 10 KHz. Visualizzare lo spettro. Giocare con i controlli di volume di uscita (o riproduzione) e ingresso (o registrazione) della SC, fino a visualizzare uno spettro di buona qualità. Per porre dei valori, si deve avere fondamentale ben visibile, livello delle armoniche almeno 60 dB al di sotto della fondamentale, livello delle componenti non armoniche (frequenza non multiplo intero di quella del segnale generato) del tutto assenti o almeno 80 dB al di sotto della fondamentale. Se una tale regolazione dei livelli non si trova, vuol dire che la SC stessa distorce (armoniche alte) o genera segnali spuri (alto livello delle componenti non armoniche).

Superati i controlli detti, PC + SC + programma sono da considerare alla stregua di un generatore + oscilloscopio + analizzatore di spettro + analizzatore di reti. Inoltre, essendo la scheda sonora stereofonica, abbiamo due canali tanto per l'oscilloscopio che per l'analizzatore di spettro.

La misura più semplice è quella dell'attenuazione del potenziometro, il cui risultato è mostrato in figura 6. Il segnale di uscita da un canale SC va contemporaneamente applicato a uno dei canali dell'ingresso selezionato del preamplificatore (DUT) e a un canale di ingresso SC (diciamo il destro, D, per fissare le idee). L'altro ingresso (sinistro, S, nell'opzione qui utilizzata) va collegato con il canale del DUT corrispondente a quello sul cui ingresso è applicato il segnale. Porre il volume al massimo, generare un segnale a 1 kHz, misurarne l'ampiezza su i due canali D, S della SC. Assicurarsi che non ci sia saturazione, in tal caso ridurre il livello di uscita della SC. Il rapporto $\text{ampiezza_canale_S} / \text{ampiezza_canale_D}$ è proporzionale al guadagno del DUT

per la data posizione del controllo di volume. Registrare questo rapporto, insieme al numero della posizione stessa. Il resto è normalizzare tutti i rapporti rispetto al massimo ed eseguire la conversione in dB [$20 \times \log_{10}()$] sul risultato. L'operazione va poi ripetuta – ovviamente – sull'altro canale del DUT.

Come anticipato, i risultati di questa misura sono graficati in figura 6, con le curve misurate su i due canali in rosso e blu. Sulla stessa figura sono inoltre rappresentati: lo sbilanciamento tra il guadagno dei due canali (che va da un massimo di +0.1 dB a un minimo di -0.2dB, pallini grigi, asse-y destro), le curve ideale (verde) e perfetta (nera) di attenuazione del potenziometro logaritmico. La curva ideale corrisponde alla legge del potenziometro definita nella prima parte, con l'equazione (2) e il grafico di figura 3. La curva perfetta è leggermente degradata rispetto a questa, in quanto le resistenze usate non coincidono con quelle calcolate, ma con la loro approssimazione al valore standard più prossimo. Nella misura ci sono ulteriori alterazioni, dovute alla tolleranza delle resistenze.

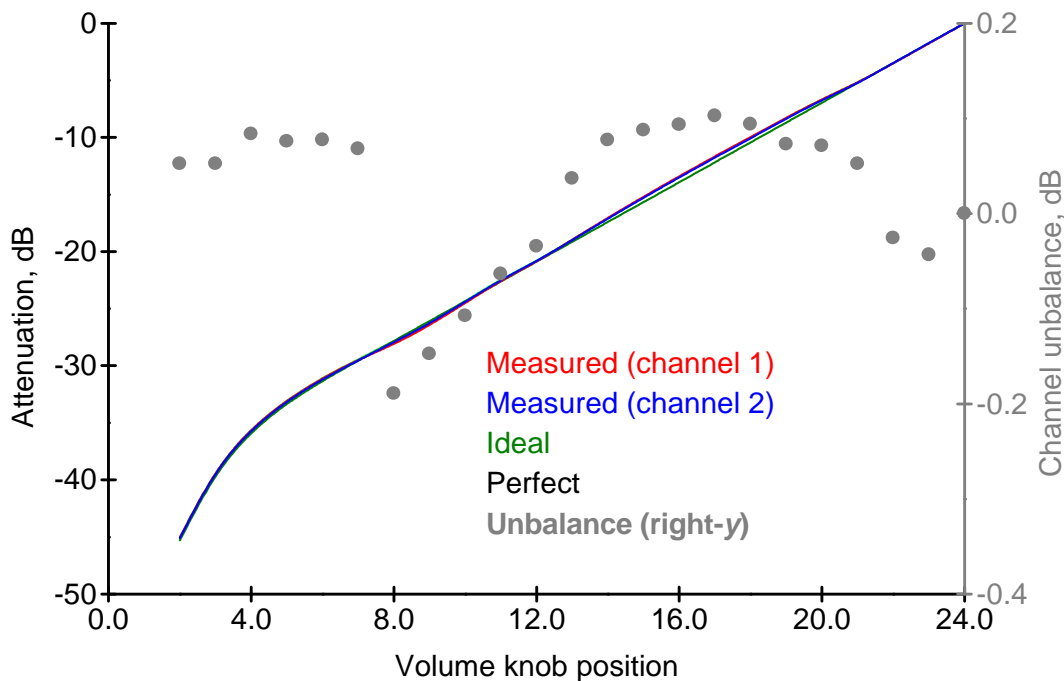


Figura 6. Attenuazione in funzione della posizione della manopola del volume (0 corrisponde al minimo, ossia volume a zero, infiniti dB). Misurata sul canale 1 e 2 (curve rossa e blu, rispettivamente), casi ideale e perfetto (verde e nera, rispettivamente); differenza tra le due curve misurate (pallini grigi, asse y destro)

Per misurare la risposta in frequenza (figura 7) si potrebbe concettualmente ripetere la procedura usata per l'attenuazione del controllo di volume. In questo caso, la posizione del volume dovrebbe rimanere fissa e a variare dovrebbe essere la frequenza generata. Tuttavia, i programmi detti all'inizio di questo paragrafo permettono di effettuare automaticamente la misura. SC va collegata al DUT come per la misura del controllo di volume, la frequenza generata spazzola (sweep) automaticamente con le modalità e i limiti definiti in un apposito pannello di controllo. Si ottiene direttamente la curva di risposta cercata. In figura 7 sono riportate: le misure dei due canali del preamplificatore (curve rossa e blu), i valori ottenuti con la simulazione (verde chiaro e scuro, praticamente indistinguibili) e lo sbilanciamento tra i due canali misurati (curva grigia, più spessa, asse-y destro).

Globalmente abbiamo:

- a) Piattezza del guadagno 20 Hz e 20 kHz: tra 0 e -0.7 dB (canale peggiore).
Dunque, il requisito di progetto a), enunciato nella seconda parte è rispettato.
- b) Sbilanciamento tra i canali tra 20 Hz e 20 kHz: tra +0.01 e -0.05 dB
- c) Guadagno⁷ a 1 kHz: 10.9 dB (3.52V/V, canale 1) e 11.1 dB (3.59V/V, canale 2), con una differenza tra i due canali di 0.2 dB.

Mettendo insieme: lo sbilanciamento del controllo del volume (+0.1÷-0.2 dB), quello della risposta in frequenza normalizzata (+0.01÷-0.05 dB) e quello del guadagno a centro banda (0.2 dB), abbiamo che, per ogni frequenza della banda audio e per ogni posizione del controllo di volume lo sbilanciamento tra i due canali resta entro $+0.1+0.01\div-0.2-0.05-0.2$, ossia $+0.11\div-0.45$ dB.

⁷ Le curve di figura 7 sono normalizzate rispetto al guadagno massimo, che è pressoché coincidente con quello a 1 KHz.

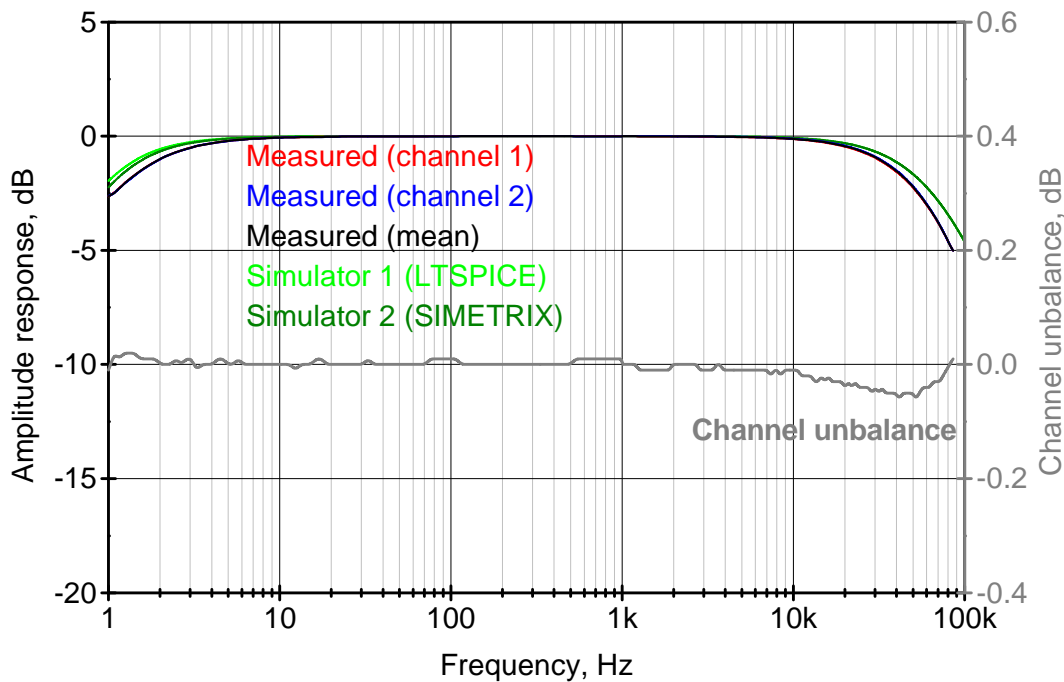


Figura 7. Risposta in frequenza dello stadio attivo. Misurata sul canale 1 e 2 (curve rossa e blu, rispettivamente), media tra le due precedenti misure (nera), simulate con due simulatori SPICE, LTSPICE e SIMETRIX (verde chiaro e scuro, rispettivamente); differenza tra le due curve misurate (curva grigia, più spessa, asse y destro).

La misura dello spettro (figura 8) richiede un ulteriore strumento, oltre a PC+SC+programma. Soltanto con questi ultimi risulta infatti impossibile determinare con sicurezza il valore di ampiezza assoluta dei segnali visualizzati. Le precedenti misure, essendo relative, non sono affette da questa limitazione. Per esse basta assicurare che l'ampiezza dei segnali in gioco sia ben al di sotto (sopra) del livello di saturazione (rumore): ciò si ottiene con i controlli di volume del PC. Volendo misurare lo spettro, occorre sapere a quale ampiezza lo si faccia. Per questo serve almeno un voltmetro AC la cui banda di frequenza copra il valore della frequenza di prova (1 kHz nel caso in oggetto). La misura di spettro si può effettuare sui due canali del DUT contemporaneamente, inviando l'uscita della SC contemporaneamente ai due ingressi del DUT e le uscite di questo, ciascuna a uno degli ingressi della SC. Occorre poi regolare il livello di uscita (sul PC) eventualmente in combinazione con il controllo di volume, sino a che l'ampiezza dell'uscita (misurata con un voltmetro AC) raggiunga il valore desiderato (4Vpp pari a 1.41VRMS nel caso in esame). A questo punto il voltmetro può essere scollegato e lo spettro visualizzato è quello che interessa. In figura 8 sono riportati gli spettri misurati sui due canali (curve

rossa e blu) e quello ottenuto dalla simulazione (verde). Le tre curve dette sono normalizzate rispetto al valore massimo. Sono poi presenti i massimi locali, con il caso peggiore tra i due canali, per le curve misurate. La situazione è riassunta nella seguente tabella

armonica	2a	3a	4a	THD.
misura	-72.2 dB	-83.8 dB	-95 dB	0.025%
simulazione	-75.6	-109 dB	-	0.017%

La terza e quarta armonica sono rispettivamente, nel caso peggiore misurato, oltre 10 e 20 dB al di sotto della fondamentale. Si può dunque ben dire che il requisito di progetto d), enunciato nella seconda parte sia stato rispettato. Anche il valore di distorsione armonica totale (THD, *total harmonic distortion*) di 0.025% è piuttosto buono, in rispetto del requisito c), sempre enunciato nella seconda parte.

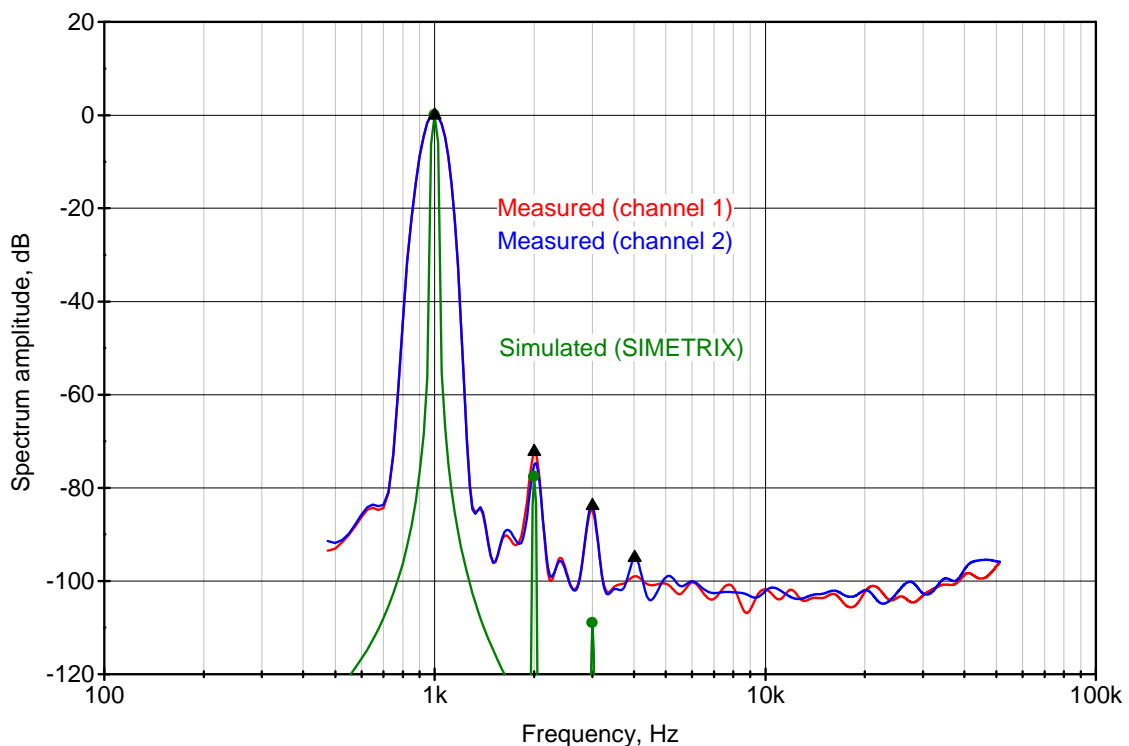


Figura 8. Spettro a 1 KHz, con una ampiezza del segnale di uscita di 2V di picco, pari a circa 1.4V efficaci. Misure sul canale 1 e 2 (curve rossa e blu, rispettivamente), simulata con SIMETRIX (verde).

Prova d'ascolto

La prova di ascolto è intrinsecamente poco controllabile. Il risultato dipende non solo dal componente in esame ma anche: dal resto della catena (sorgente, amplificatore di potenza, diffusori in questo caso), dalla musica scelta, dalla condizione psicologica degli ascoltatori e così via. Un mio articolo, pubblicato su Audio Review 350, aprile 2014, inizia con „*Wovon man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen.*“ (Di ciò di cui non si può parlare, si deve tacere.), Ludwig Wittgenstein, Tractatus logico-philosophicus, propositione 7. Potrei anche qui usare lo stesso criterio e chiudere la discussione. Non andrò molto oltre. Il mio udito non è il migliore possibile, d'altra parte sono però assiduo frequentatore di concerti sinfonici e rappresentazioni di opere liriche. Conosco molto bene il suono degli strumenti veri. Mai l'ho sentito riprodotto senza pecche da congegni elettronici di qualsivoglia tipo: il preamplificatore proposto non fa eccezione. Il suono che se ne ottiene è cionondimeno piuttosto gradevole, “valvolare”, appunto e tutto sommato accettabilmente realistico. Di questo stesso parere sono tutti i miei amici che l'hanno ascoltato: meno di dieci persone in tutto.

Come dicono a Berlino: „*Jeder Käfer ist schön für seine Mutter*“ (Ogni scarrafone è bello a mamma soja). Precisato e rimarcato questo, l'apparecchio funziona bene, per certo non peggio di equivalenti commerciali il cui prezzo in euro ha non meno di quattro cifre.