



Volfango Furgani

ELETRONICA PER CLASSI IV

2 September 2002

global \$id,\$section; ?>

Premessa

[\(Dom. 1\)](#) Perché studiare elettronica in quarta se in quinta non c'è? Domanda aperta ad ogni risposta (interrogativo filosofico, non scientifico). Imparate ad assumervi la responsabilità derivante dalle vostre risposte e quindi dalle vostre scelte. Per intenderci, è ovvio che per me studiare o non studiare non è la stessa cosa. E non merita lo stesso voto anche se ci sono solo due (o forse tre, contenti?) ore per settimana (due o tre è diverso da zero o no?), è solo orale, in quinta non c'è (questa, credetemi, l'ho già sentita) e avanti così. E vai con l'analogica che per me ed anche per voi è più difficile della digitale. La maggior difficoltà sta nel pescare nel vostro bagaglio culturale equazioni di primo grado od alle maglie. Mi rendo conto che non le sapete fare, come non sapreste fare una mappa di Carneade (o di Karnaugh ?) Però, se le vedete, le equazioni, dico, a qualcuno vengono in mente. Coraggio, che Dio avrà il suo bel daffare ad aiutarvi!

Programma

La visualizzazione della temperatura (farmacie, tabaccherie) è un tipico problema misto (comprensivo di una parte digitale ed una analogica) in quanto l'uscita del sensore di temperatura è analogico. Problemi risolti per via totalmente analogica vanno diminuendo di numero (vedi la fine fatta dal trattamento del suono ed, in un prossimo futuro, dalla trasmissione di immagini).

Le principali funzioni analogiche sono le seguenti:

- 1) alimentazione (già vista in terza **come ricordate**)
- 2) amplificazione (eventualmente di potenza)
- 3) filtraggio
- 4) conversione A/D e D/A ed altre
- 5) generazione di segnali.

Tali funzioni sono realizzate mediante i seguenti componenti:

- 1) passivi (R, C ed L)
- 2) diodi o zener
- 3) transistori (BJT)

- 4) SCR e mosfet di potenza.
- 5) amplificatori operazionali

Voi dovreste acquisire **(contratto formativo)**:

- la conoscenza teorica di principio dei principali componenti
- la conoscenza teorica di principio dei relativi circuiti
- la conoscenza di semplici metodiche di progetto (esercizi).

Non riusciremo a fare tutto. Probabilmente escluderemo conversione e generazione di segnali. (non prendetela come una promessa). Fate qualcosa anche per me. Auguri! e buona fortuna che non basta mai. Andiamo a cominciare.

Concetti di base:

- **L'amplificazione**
- **La polarizzazione**
- **Stabilizzazione**
- **Il vecchio, caro, obsoleto emettitore comune**
- **Elenco e scopo dei componenti di un emettitore comune**
- **Modello a parametri h del Bjt**
- **Circuito dinamico**
- **Risposta in frequenza**
- **Frequenze di taglio**
- **Generalità sull'amplificazione**
- **Il mondo è imperfetto**
- **Cenni sui tipi di amplificatore**

Amplificazione

(Dom. 3) Vuol dire, in soldini, far diventare più grande un segnale. Se il segnale vogliamo poi ascoltarlo o vederlo ci interessa che la forma non cambi. Quando vi interrogo, talora ripetete con voce stentorea un concetto spesso errato od impreciso, giurando che l' ho detto io. Quasi mai vero. Esempio di amplificazione distorta. Non è bello, specie per il vostro stereo. Se invece quel segnale deve pilotare un motore, ci interessa che il motori giri alla velocità prescritta. Con che forma d'onda pilotiamo il motore non ci interessa più. Si chiama amplificazione non lineare, quella del motore, intendo. Stringendo, stringendo qui sopra ci stà il programma dell'anno. Io direi di cominciare dall'amplificazione lineare, quella dello stereo. Non dico che vedremo uno stereo. Non ce la faremo per via del tempo. Una buona scusa, non vi pare? Se v'interessa sul Web c'è. Chi cerca, trova di tutto. Perfino, vedi un po', roba da studiare. Oggi sapete che anche l'amplificazione si fa per via integrata, meglio e più semplicemente che per via discreta. Io non ce la faccio a spiegarvi subito l'operazionale e non mi piacerebbe neanche. Ce la fate voi a studiare, che non vi piace? **Badate che perdete la possibilità di amplificarvi.** Comincio allora con

un po' di transistor. Che a voi non piacciono. Chi mi chiede a che serve, se c'è già l'operazionale, l'uccido e mi danno la legittima difesa o, alla peggio, la seminfermità mentale.

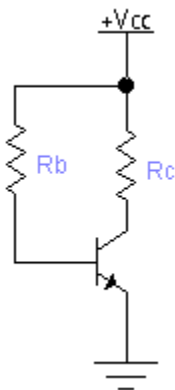
[\(Dom. 2\)](#) Ripasso.

La polarizzazione

Necessità della polarizzazione

[\(Dom. 4\)](#) Uno degli scopi fondamentali dell'elettronica analogica è l'amplificazione di un segnale. La prima difficoltà nasce dal fatto che i segnali sono, di solito, bipolari (positivi e negativi). Voi ricordate che il Bjt conduce la corrente in un solo verso, quello indicato dalla freccia sull'emettitore. Questo significa che la corrente non può cambiare verso se il segnale inverte la propria polarità. I_c scende fino a zero il Bjt si interdice e la parte negativa del segnale viene ignorata (tagliata). Il trucco è semplice. Basta conoscere l'escursione in tensione ed in corrente del segnale. Se varia fra $\pm 5V$ e $\pm 2mA$, noi non dovremo far partire il nostro segnale da zero per farci tagliare le parti negative. Noi polarizzeremo il Bjt (cioè fissiamo la tensione V_{ce} e la corrente I_c in assenza di segnale al valore desiderato) in modo opportuno. Se fissiamo la tensione V_{ce} a $+5V$ e la corrente I_c a due mA, il segnale positivo guida la tensione sopra i $5V$ fino a dieci e quello negativo sotto i $5V$, non sotto lo zero, ma fino a zero. Trascuriamo gli spiccioli come la saturazione. Idem per la corrente. Risulta necessario scegliere V_{cc} almeno pari a $10V$ per permettere l'escursione richiesta di $\pm 5V$.

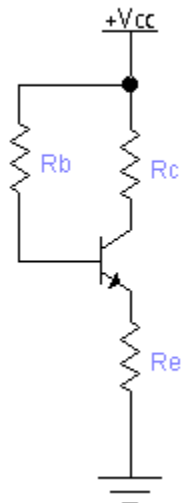
Il circuito per fare tutte queste belle cose è quello sotto.



Stabilizzazione

[\(Dom. 5\)](#) Il circuito cambia perché aggiungo R_e che introduce una reazione, in questo caso negativa. Siamo alla croce e delizia degli elettronici e non solo. Chi gioca in borsa è afflitto da quella positiva. Se uno o due vendono, a valanga, tutti a vendere e

addio soldini. Anche il gatto che, una volta seduto su un coperchio che scotta, non si siede più su alcun coperchio è affetto da un eccesso di reazione.



I valori assegnati nell'esempio precedente di 5V e 2 mA si chiamano punto di riposo o di lavoro Q del Bjt. Qui il transistor sta fermo se manca il segnale (riposo e vi trovate bene) e di qui comincia ad amplificarlo se c'è (lavoro e qui è meno grassa). Q lo abbiamo scelto con cura e non vogliamo che cambi. Voi sapete (?) che il Bjt è più sensibile alla temperatura, alla dispersione delle caratteristiche ed all'invecchiamento od alla sostituzione di quanto siate voi al fascino femminile (o maschile, son fattacci vostri). La colpa la potete dare ad h_{FE} , ma non è il solo responsabile del misfatto che vado ad illustrare. Se V_{ce} passa da 5 a 6 V per qualcuno dei motivi suddetti, il segnale ha a sua disposizione verso sinistra 6 V e verso destra 4 V, visto che V_{cc} è 10 V. Noi abbiamo ha disposizione un'escursione massima per il segnale in uscita di 4 V. In generale l'escursione permessa è la minima delle due disponibili a destra ed a sinistra.

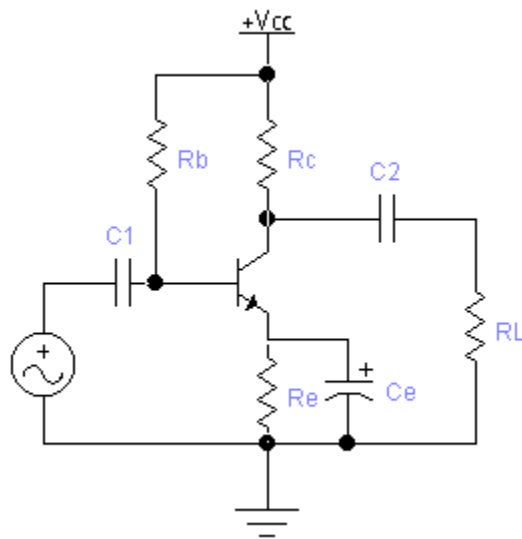
Rimedio

[\(Dom. 5\)](#) Quando gli elettronici hanno qualcosa che li disturba ricorrono alla reazione negativa. Questa è una tecnica che permette al circuito di informare l'ingresso di quanto di sgradito è avvenuto in uscita. L'ingresso è posto in grado di correggere l'uscita e riportarla al valore desiderato. In breve la reazione negativa riduce i disturbi. Se per un motivo qualsiasi funziona male, il disturbo aumenta e la reazione si chiama positiva. Non fatevi ingannare dal nome: è una peste. Tranne pochi casi quali la generazione di un segnale. Vediamo in concreto come funziona nel nostro caso. Basta aggiungere una resistenza R_e in fra emettitore e massa. Partiamo. Supponiamo , ad esempio, che un aumento di temperatura faccia aumentare I_c . Di

conseguenza aumenta $V_{re} = R_e I_c$ e questo aumento (seguì sul circuito) tende a limitare (diminuire) la corrente di base I_b . Siccome $I_c = h_{FE} I_b$, anche I_c viene trascinata verso il basso. Siamo partiti da un aumento di I_c e, a causa di R_e , si è innescato un meccanismo che tende a ridurre I_c . Idem se I_c inizialmente cala. Vediamolo brevemente in simboli: $I_c \downarrow \quad V_{re} = I_c R_e \downarrow \quad I_b \uparrow \quad I_c = h_{FE} I_b \uparrow$

Il vecchio, caro, obsoleto emettitore comune

[\(Dom. 7\)](#)



Scelto correttamente il punto di riposo, dopo averlo adeguatamente stabilizzato, non resta che da inserire il generatore di segnale in ingresso (sulla base) ed il carico in uscita sul collettore. Ci siamo tanto preoccupati di inchiodare al suo posto il punto di riposo (storiella della reazione negativa), che non siamo disposti a tollerare che l'inserzione di carico e generatore lo modifichi. Inseriamo condensatori di elevata capacità fra generatore e base e fra collettore e carico. In questo modo la corrente continua I_c non può circolare né sul carico né sul generatore neanche parzialmente perché in continua un condensatore si comporta come un circuito aperto. In alternata, se la capacità è abbastanza alta, il segnale non trova ostacoli per entrare nel Bjt ed uscirne amplificato, visto che la reattanza capacitiva può essere resa tanto piccola quanto serve.

Elenco e scopo dei componenti di un emettitore comune

C₁ disaccoppia il generatore dalla base; **C₂** disaccoppia il generatore dal carico; **V_{cc}** alimenta il circuito ed è abbastanza alta da essere maggiore od eguale alla somma dei valori assoluti delle escursioni positive e negative; **R_b** permette di fissare

l'adatto valore di I_b ; R_c permette di fissare l'adatto valore di V_{ce} ; su R_e si impernia il meccanismo a reazione negativa che permette di stabilizzare il punto di riposo; C_e , in parallelo ad R_e , assorbe le componenti alternate (il segnale) grazie alla bassissima reattanza. In tal modo la funzione di freno di R_e si esercita solo su I_c fissando il punto di riposo e non sul segnale. Se C_e fosse assente, R_e , che molto democraticamente frena tutte le variazioni sia quelle dannose della temperatura, che quelle utili del segnale, ridurrebbe di molto l'amplificazione del segnale; R_s è la resistenza interna del generatore di segnale ed R_L il carico.

Modello a parametri h del Bjt

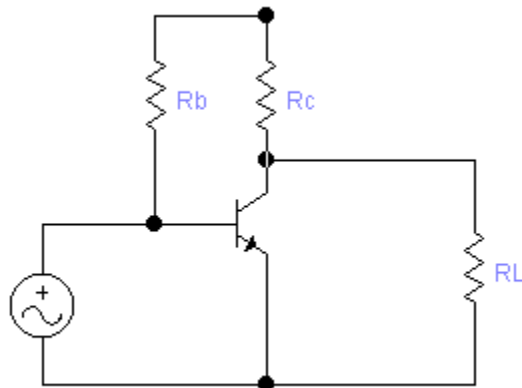
[\(Dom. 8\)](#) Abbiamo a disposizione un circuito completo per realizzare uno dei tanti possibili amplificatori. Ci manca un modello del Bjt che ci permetta di fare i calcoli delle caratteristiche dell'amplificatore con le regole dell'elettrotecnica. Forse è intuibile, od almeno accettabile che il transistor equivalga in ingresso, guardando dentro la base, ad una resistenza non propriamente di buona famiglia perché è differenziale, cioè definita come rapporto di incrementi, e non lineare, cioè di valore variabile con la corrente che la percorre. Chiameremo tale resistenza **hie**. Guardando dentro al collettore noi vediamo una corrente molto maggiore di quella di base. Possiamo simulare questo effetto con un generatore di corrente. Tale generatore eroga una corrente che dipende (abbiamo perciò un generatore di corrente dipendente) da quella di base. Esattamente la corrente di collettore è proporzionale a quella di base tramite un numero puro chiamato guadagno di corrente ed indicato con **h_{fe}**. Le minuscole sono intenzionali perché concettualmente $h_{fe} = i_c/i_b$ è diverso dal buon vecchio h_{FE} definito come rapporto di correnti continue. Il generatore di corrente è reale ed ha una conduttanza interna chiamata **hoe**.

Attenzione: i parametri h non sono numeri fissi. Essi dipendono da: 1) dispersione delle caratteristiche; 2) punto di riposo ed in particolare I_c ; 3) temperatura 4) frequenza. Le definizioni a parole ottenibili dalle equazioni che li definiscono ($v_1 = h_{ie} i_1$ e $i_2 = h_{fe} i_1 + h_{oe} v_2$) sono: $h_{ie} = v_1/i_1$ resistenza di ingresso con uscita in cortocircuito; $h_{fe} = i_2/i_1$ guadagno di corrente con uscita in cortocircuito; $h_{oe} = i_2/v_2$ conduttanza di uscita con ingresso aperto. Valori numerici consueti sono : h_{ie} da qualche $K\Omega$ a qualche decina di $K\Omega$; h_{fe} da qualche decina a qualche centinaio; h_{oe} decine di $\mu A/V$ e quindi $1/h_{oe}$ vale decine di $K\Omega$. NB: il generatore di corrente non vale h_{fe} come alcuni di voi insinuano

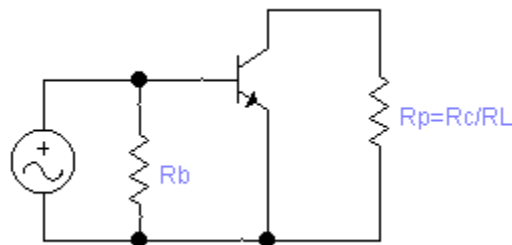
Circuito dinamico

[\(Dom. 9\)](#) Il circuito dinamico è un circuito che disegniamo per farci un'idea di che viaggio (occhio, non è che strippano) fanno le correnti alternate. Le regole da seguire sono due: 1) considerare nulle le reattanze di tutti i condensatori presenti nel circuito. Tali reattanze vanno quindi sostituite da cortocircuiti che eliminano

l'influenza di eventuali componenti in parallelo. 2) I punti a potenziale costante come la massa e V_{cc} sono a variazioni nulle. Il circuito ottenuto è questo:



Siccome in questo circuito ci interessano solo le variazioni questi punti vanno collegati insieme dopo aver annullato V_{cc} , o meglio tutti i generatori di tensione continua e allora si ha:



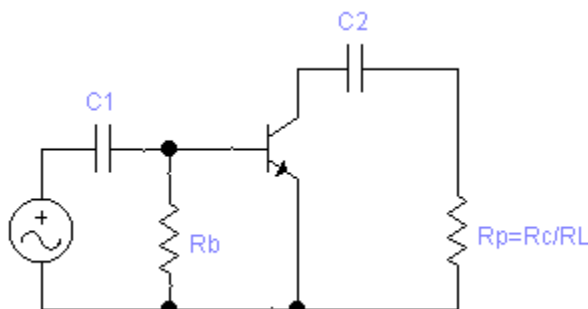
Sostituendo al transistor il suo circuito equivalente si possono calcolare il guadagno, cioè di quante volte l'uscita supera l'ingresso e tante altre belle cose un po' noiose e queste si non più tanto importanti. Vedi libro di testo.

Risposta in frequenza

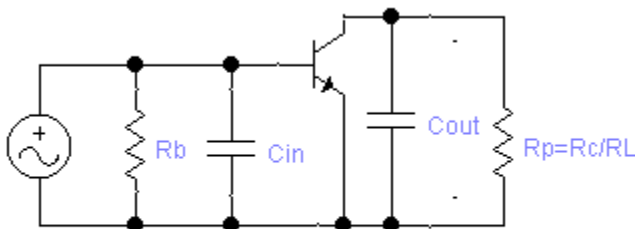
[\(Dom. 10\)](#) Il guadagno di un amplificatore varia con la frequenza e precisamente è molto basso sia alle alte che alle basse frequenze, mentre alle frequenze intermedie vale il risultato dei calcoli svolti con il circuito equivalente ad esempio, $A_v = -h_{fe} (R_p / h_{ie})$. Questo guadagno dipende dalla presenza di condensatori come C_1 e C_2 o capacità parassite dovute al montaggio di componenti metallici vicini e separati da un dielettrico (aria) e interne ai componenti associate ad ogni giunzione. Ricordo che la reattanza di un condensatore C vale in modulo $X_c = 1/(\omega C)$. Quindi X_c a basse frequenze è molto alta ed al crescere della frequenza diminuisce in modo

inversamente proporzionale. Lo stesso tipo di dipendenza si ha anche per X_c nei confronti di C .

Alle basse frequenze agiscono i condensatori come $C1$ e $C2$ in serie fra generatore e carico.



Tali condensatori bloccano il segnale per ω molto basso, ma, a causa dell'alto valore di C (decine o centinaia di μF), già ad una decina di Hz sono cortocircuitati, o meglio la loro X_c è molto minore della resistenza vista. (Dom. 11) A queste frequenze le capacità parassite o di giunzione che, siccome sono dell'ordine del pF (10^{-12} F), ovvero un milione di volte più piccole, sono ancora circuiti aperti non disturbano il circuito perché sono in parallelo



all'ingresso ed all'uscita. Siamo nella zona delle frequenze intermedie in cui il guadagno resta costante fino a quando, aumentando ω , Anche le capacità parassite e di giunzione tendono a divenire cortocircuiti che annullano il guadagno.

Frequenze di taglio

Sorge l'esigenza di definire in modo convenzionale, ma non equivoco le due frequenze di passaggio fra le basse e le medie e fra le medie e le alte frequenze. Perciò si definisce frequenza di taglio inferiore f_i (Dom. 10) quel valore di frequenza al quale il guadagno è inferiore nel rapporto $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ rispetto al guadagno massimo di centro banda. La stessa definizione vale per le pulsazioni ponendo $\omega_i = 2\pi f_i$. Si definisce, in modo analogo, (Dom. 11) frequenza di taglio superiore f_s quel valore

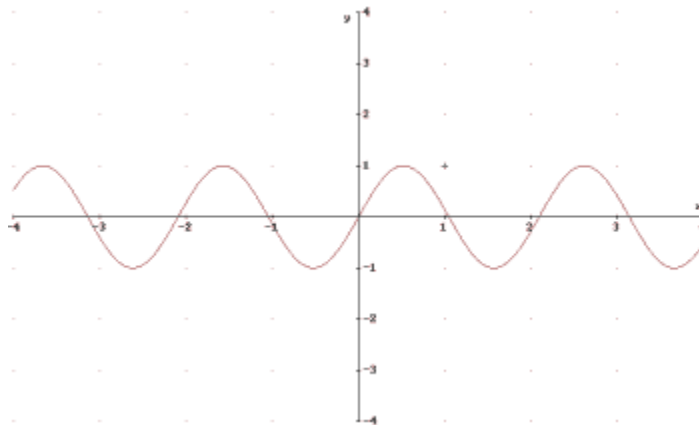
di frequenza al quale il guadagno è inferiore nel rapporto $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ rispetto al guadagno massimo di centro banda. La stessa definizione vale per le pulsazioni ponendo $\omega_s = 2\pi f_s$. In sostanza si accetta una diminuzione del guadagno di circa il 30% prima di dire

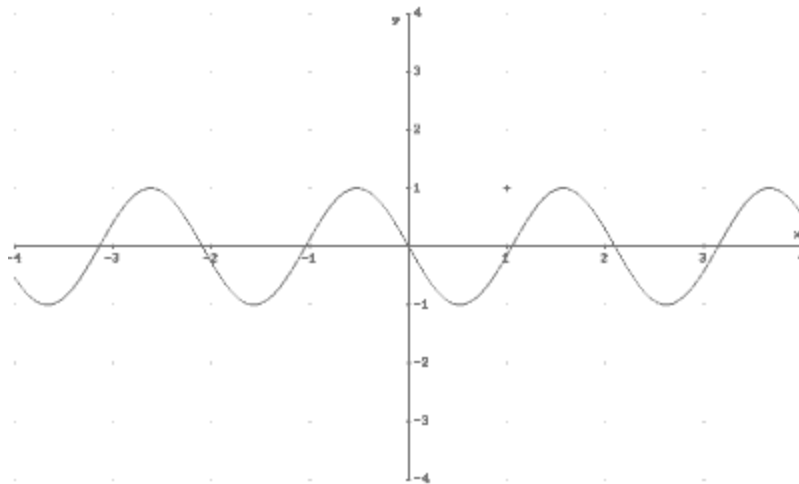
che l'amplificatore, a quelle frequenze, non amplifica come deve.

Si definisce banda passante B l'intervallo fra le due frequenze di taglio: $B = f_s - f_i$ o $B_\omega = \omega_s - \omega_i$. La prima espressione fornisce la banda passante in Hz, la seconda in rad/sec.

Generalità sull'amplificazione

(Dom. 13) In definitiva noi vogliamo o vorremmo che l'amplificatore abbia un ingresso al quale è applicato un segnale $v_i(t) = V_{Msen}(\omega t)$ ed in uscita vogliamo un segnale più grande ad esempio di dieci volte e quindi $v_u(t) = 10 V_{Msen}(\omega t + \varphi)$. In questo caso si dice che dieci è il guadagno in tensione A_v dell'amplificatore definito come rapporto fra v_u e v_i . Il guadagno è definito come v_u/v_i , ma di solito non si calcola con questa definizione. Vale la pena di sottolineare che, se l'amplificatore è lineare, non dipende né da v_i né da v_u . Non stupitevi, una resistenza $R = V/I$ dipende forse da V e da I ? Rispondete un no rapido e deciso. A_v si calcola dal circuito dinamico con gli elementi attivi (Bjt, mosfet od anche valvole per gli esteti dell' hi-fi) sostituiti dal circuito equivalente opportuno perché ce ne stanno assai assai, non solo quello a parametri h al quale abbiamo accennato. (Dom. 14) E qui vien fuori l'elettrotecnica con i suoi metodi compresi i numeri complessi. Anzi, in v_u/v_i non ho messo la variabile dipendente perché nel caso più generale e sfigato, quando cioè ci sono elementi reattivi non trascurabili, A_v è un numero complesso o vettore come v_u e v_i . A noi poveretti basterebbe ricordare che A_v può essere un numero negativo e che in tal caso le sinusoidi sono due vettori sfasati di 180° o, come si dice, in opposizione di fase. Per eliminare i restanti equivoci servono le due sinusoidi disegnate sotto:





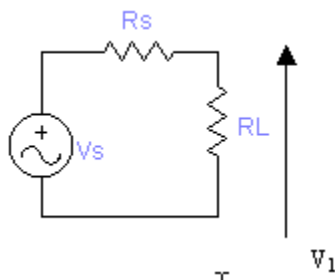
Quindi - significa sfasamento e precisamente, com'è ovvio, sfasamento di 180° . Che importanza ha per noi conoscere la fase di due tensioni? Esempio. Oggi spesso si alimenta un carico, le casse dello stereo, con due amplificatori, uno per ogni capo di R. Se le tensioni di uscita sono in fase la ddp è zero come la potenza trasferita. Se invece sono in opposizione di fase la ddp è doppia e la potenza quadrupla rispetto al caso di alimentazione con un solo amplificatore. In altri casi non serve a nulla.

La rappresentazione grafica di un quadripolo segue.



Il mondo è imperfetto

[\(Dom. 15\)](#) In realtà le cose sono molto complicate. Non mi dite che ve l'aspettavate e che non ve ne può fregar di meno perché sono suscettibile e vendicativo come un elefante. Perché come un elefante ve lo dico un'altra volta. Prima cosa: il segnale v_i è applicato da un generatore reale con resistenza interna R_s e l'amplificatore assorbe corrente e quindi presenta nel circuito di ingresso una resistenza R_i sulla quale cade una tensione minore di v_i secondo un numero puro α minore di uno.



Come si vede dalla figura il generatore v_s causa, erogando una corrente $i = v_s/(R_s + R_L)$, una tensione V_1 su R_L pari ad $R_L \cdot i$. Quindi $V_1 = V_s R_L/(R_s + R_L)$

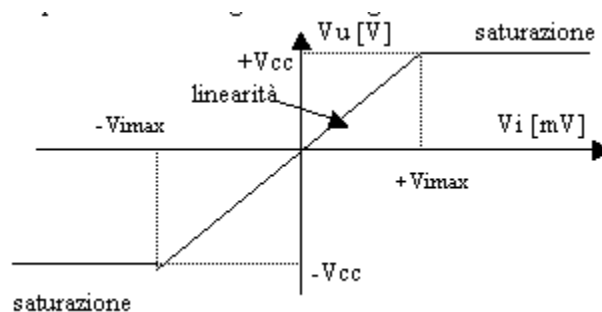
(Dom. 16) Il numero $\alpha = V_1/V_s$ vale $R_L/(R_s + R_L)$, si chiama attenuazione all'ingresso o più in generale attenuazione del generatore reale che, come sapete a vuoto eroga una tensione $V_s > V_1$

In sostanza, il guadagno dell'amplificatore dipende anche dalla resistenza interna del generatore.

(Dom. 17) Di più, il circuito di uscita di un amplificatore si può schematizzare secondo Thevenin (ricordate, il fratello di Norton? No? Cavoli vostri. Ed amari.) con un generatore reale di tensione più grande e dipendente da quella di ingresso. La resistenza di questo generatore si chiama resistenza di uscita dell'amplificatore R_o . Se chiudiamo ai morsetti di uscita dell'amplificatore un carico, v_u cala. Il problema vero è che A_v dipende anche dal carico. Se si vuole A_v indipendente da R_s e dal carico i generatori dovrebbero essere ideali con R_s ed R_o uguali a 0. Li fanno solo in Paradiso. Non ho fretta di comprarli. Tranquilli, ci vado perché ho sopportato voi! Inoltre, come il Paradiso, l'amplificatore ha una porta d'ingresso.

(Dom. 18) Se il segnale è troppo alto in ampiezza, sbatte e il diavolo-distorsione sguazza.

Si chiama caratteristica di trasferimento di un quadripolo il grafico cartesiano V_u, V_i che per un amplificatore si disegna come segue:



Cioè, se la tensione V_i supera il limite massimo ammissibile, la forma d'onda è tagliata come nella figura a destra di pagina 7.

Se la è la frequenza del segnale che pecca, ancora il diavolo fa festa. Non parliamo poi della tentazione rumore (segnale aleatorio indesiderato) che si infila da tutte le parti.

Cenni sui tipi di amplificatore

[\(Dom. 19\)](#) Molti aggettivi possono aggiungersi al quadripolo amplificatore a seconda di come lo vediamo, cioè a cosa ci serve. Per uno stereo parleremo di potenza, perché è quella che vi interessa. Se volete ricevere una stazione televisiva per volta, sarà la selettività a garantire che non entrino intrusi. Berlusconi è già entrato. Non volevo buttarla in politica. Chi ha detto che parlavo del Presidente Silvio? Se invece del guadagno ci interessa delimitare l'ingresso in frequenza con la massima precisione, parleremo di filtro. Se il segnale è molto basso useremo amplificatori a più stadi a basso rumore.