



# Generatori di corrente e tensione costante



*Dopo aver analizzato il funzionamento di alcuni strumenti elettronici, vediamo ora alcuni circuiti importanti utilizzati nella pratica*

**a cura di Flavio Criseo**

**Q**uando ci troviamo alle prese con uno strumento di misura, la sua accuratezza è sempre legata ad alcune grandezze interne dello strumento stesso.

Nel convertitore tensione/frequenza, ad esempio, abbiamo visto che l'accuratezza della misura dipende da una tensione "E" di riferimento interna al circuito.

Anche il convertitore ad approssimazioni successive richiede una tensione interna molto stabile.

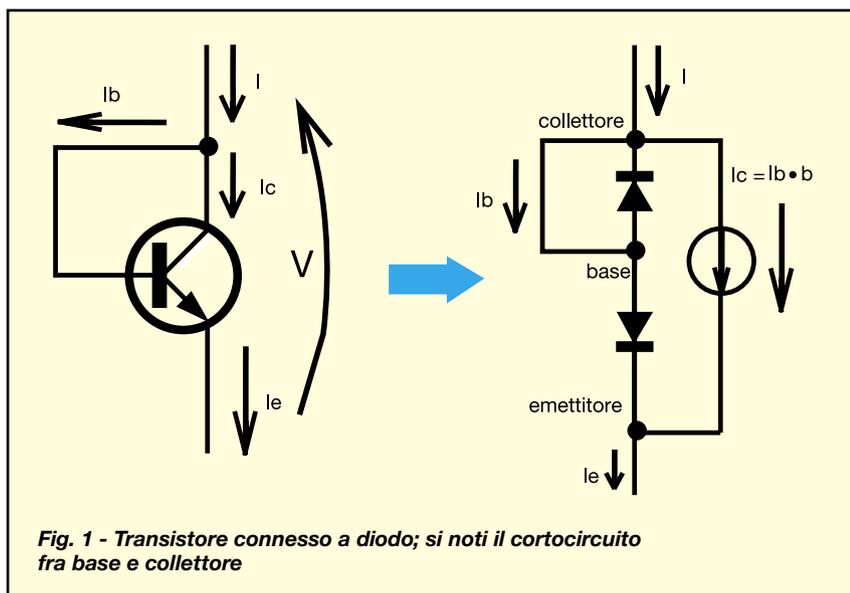
Tutti gli strumenti visti in precedenza impiegano sempre degli amplificatori operazionali e quindi, com'era intuitivo aspettarsi, presentano degli amplificatori differenziali al loro interno.

Per avere un buon funzionamento di un amplificatore differenziale, è importante che alcune grandezze siano garantite.

I circuiti dedicati per generare tensioni e correnti costanti sono chiamati "generatori di corrente e tensione costante".

Molto spesso, anche nei TVC o in altri apparati simili, possiamo incontrare dei generatori di corrente o di tensione di riferimento.

È importante quindi, sia per conoscere bene gli strumenti di misura, ma anche per studiare il funzionamento dei TVC, ecc., conoscere bene questi circuiti.



Anche se, a seconda del periodo di fabbricazione e/o dalle soluzioni adottate dai progettisti, possono esserci delle leggere differenze rispetto agli schemi che adesso vedremo, il funzionamento è sempre riconducibile ad essi.

Eventuali varianti possono essere facilmente interpretate con gli stessi ragionamenti qui di seguito esposti.

### Transistore connesso a diodo

Una connessione importante da conoscere è la configurazione a diodo.

Quando un BJT è connesso come in Fig. 1, il transistore si comporta come se fosse un vero e proprio diodo.

Come si vede in figura, uno dei due diodi è in cortocircuito mentre l'altro no, il diodo in corto è quello fra la base e il collettore.

Vediamo come funziona: ammettiamo che tutto il transistore sia sottoposto a una corrente generica I.

Si nota immediatamente che la giunzione B-C non può essere accesa in nessun caso.

Il diodo della giunzione, infatti, non sarà mai polarizzato.

La corrente I, inoltre, si ripartisce fra la I<sub>b</sub> e la I<sub>c</sub> per poi unirsi e formare la I<sub>e</sub>.

La giunzione collettore-base non è mai accesa, il transistore non potrà mai essere saturo (la condizione di saturazione è possibile solamente quando la B-C è polarizzata in diretta).

Il BJT potrà funzionare solo in due modi: Spento oppure in RND (regione normale diretta).

Se la V<sub>be</sub> è maggiore della V<sub>be<sup>on</sup></sub> allora il transistore è sicuramente acceso e funzionerà in RND.

La corrente totale I sarà data da:

$$I = \left( \frac{\beta + 1}{\beta} \right) I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

dove la tensione V, dato che il B-C è in cortocircuito, è la V<sub>be</sub> del transistore, mentre la I<sub>s</sub> è la corrente di saturazione inversa del transistore.

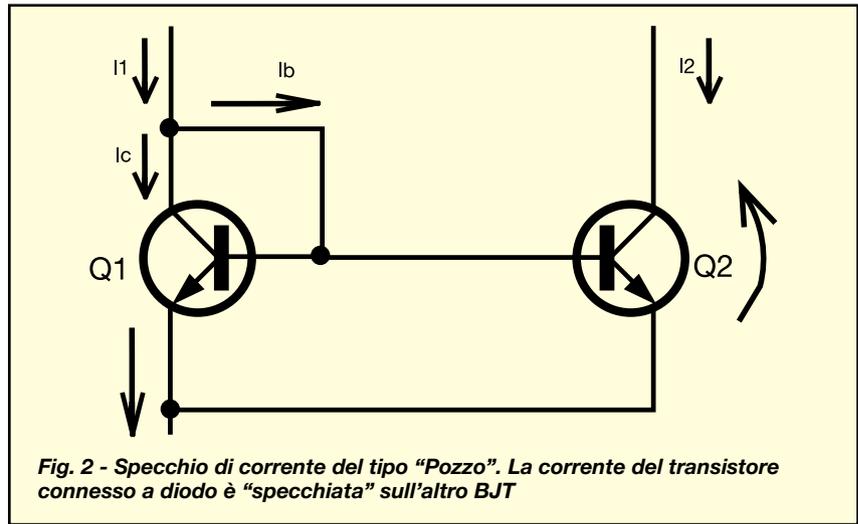


Fig. 2 - Specchio di corrente del tipo "Pozzo". La corrente del transistore connesso a diodo è "specchiata" sull'altro BJT

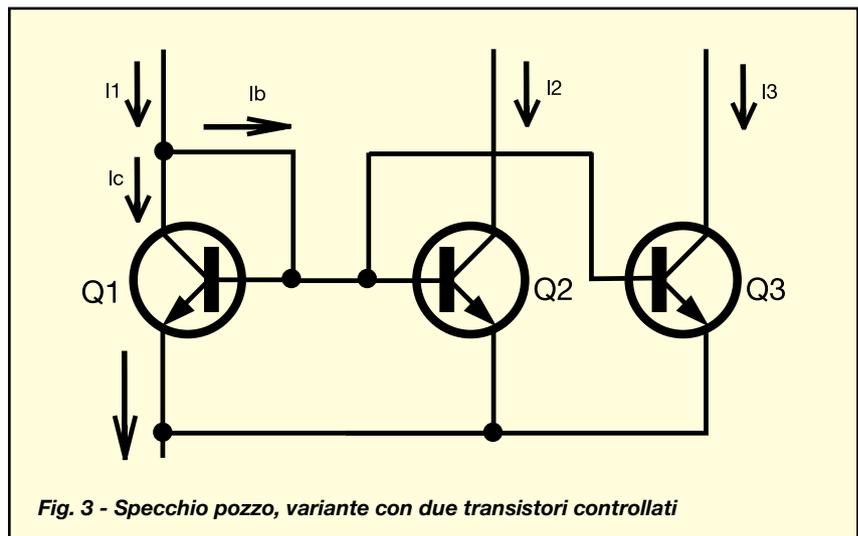


Fig. 3 - Specchio pozzo, variante con due transistori controllati

### Specchio di corrente

Collegiamo al nostro transistore connesso a diodo un altro BJT nel modo visibile in Fig. 2.

Vediamo come funziona il circuito: ammettiamo che i due transistori siano perfettamente uguali allora possiamo dire che:

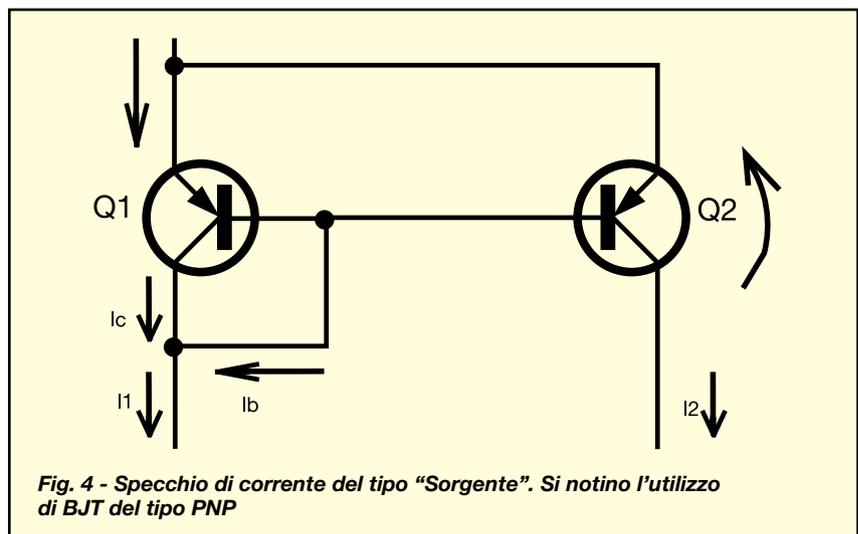


Fig. 4 - Specchio di corrente del tipo "Sorgente". Si noti l'utilizzo di BJT del tipo PNP

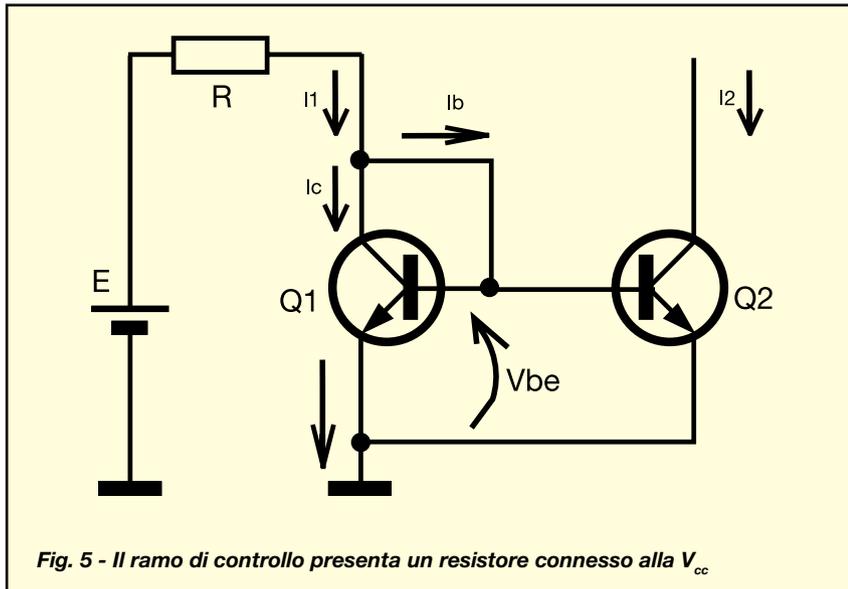


Fig. 5 - Il ramo di controllo presenta un resistore connesso alla V<sub>cc</sub>

1. le due correnti di collettore sono uguali perché le V<sub>be</sub> e il β di entrambi i BJT sono identiche;
2. se i due transistori sono posti molti vicini, le variazioni di temperatura di un BJT saranno uguali alle variazioni dell'altro BJT;
3. date le considerazioni al punto 1, allora anche le correnti di base saranno identiche per entrambi i BJT.

Da quanto appena detto, la corrente I<sub>c1</sub> è uguale alla I<sub>2</sub>, allora possiamo scrivere:

$$I_1 = I_2 + I_{b1} + I_{b2} = I_2 + \frac{I_2}{\beta} + \frac{I_2}{\beta} \Rightarrow$$

raccogliendo la I<sub>2</sub> abbiamo:

$$\Rightarrow I_1 = I_2 \left( \frac{\beta + 2}{\beta} \right)$$

la corrente I<sub>2</sub> sarà:

$$I_2 = I_1 \left( \frac{\beta}{\beta + 2} \right)$$

Se il nostro β è abbastanza grande, il termine fra parentesi è ≈ 1, quindi le due correnti saranno molto simili. Per questo possiamo dire che la corrente I<sub>1</sub> è "specchiata" nella I<sub>2</sub>.

Imponendo una certa corrente I<sub>1</sub> possiamo obbligare il transistoro Q2 a richiedere sul suo collettore una corrente I<sub>2</sub> uguale alla I<sub>1</sub> stessa.

Spesso, in alcuni circuiti integrati, sono utilizzati più transistori (ad esempio due BJT) connessi alla base del BJT Q1. In questo modo la corrente di ogni transistoro è specchiata come visto in precedenza (si veda la Fig. 3).

L'unica differenza consiste nel

fatto che il circuito alimenta tre basi anziché due. La corrente sarà quindi pari a:

$$I_3 = I_1 \left( \frac{\beta}{\beta + 3} \right)$$

Con questo circuito è possibile avere una corrente costante sui collettori del BJT, anche in quei casi in cui la corrente tenda a cambiare a causa di una variazione dello stadio posto sul collettore dei BJT Q2 e Q3.

Un altro tipo di specchio di corrente complementare a quello appena visto è ottenuto con dei transistori PNP anziché NPN.

La Fig. 4 mostra in che modo viene ottenuto lo specchio PNP; le correnti dei due BJT sono identiche per gli stessi motivi precedenti.

Idue specchi di corrente vengono tecnicamente chiamati: Specchio Pozzo e Specchio Sorgente; questo perché il primo drena la corrente verso massa, mentre quello in Fig. 4 la preleva dalla tensione V<sub>cc</sub> e lo immette nel carico sottostante.

Guardiamo adesso la Fig. 5: se dovessimo trovarci alle prese con uno specchio simile a questo, potremmo fare una stima della corrente I<sub>1</sub> e quindi conoscere la I<sub>2</sub> corrispondente.

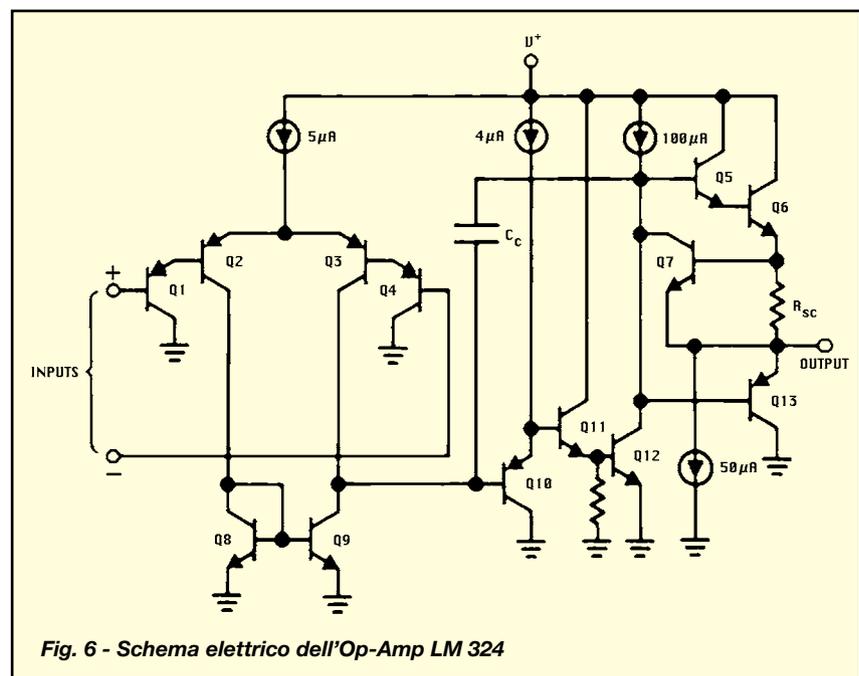


Fig. 6 - Schema elettrico dell'Op-Amp LM 324

Dalla maglia elettrica comprendente la batteria "E" abbiamo:

$$E = RI_1 + V_{be}$$

come abbiamo visto precedentemente, la corrente  $I_1$  e la  $V_{be}$  dipendono dalla caratteristica del diodo, quindi avremo:

$$V_{be} = V_T \ln \frac{I_{c1}}{I_s}$$

con opportune sostituzioni otteniamo:

$$E = RI_1 + V_T \ln \frac{\beta \cdot I_1}{I_s (\beta + 2)}$$

Se chiamiamo:

$$\left( \frac{\beta}{\beta + 2} \right) = \alpha$$

possiamo scrivere:

$$E = RI_1 + V_T \ln \left( \frac{\alpha \cdot I_1}{I_s} \right)$$

conoscendo la R e la tensione "E" possiamo calcolare in modo iterativo la corrente  $I_1$  in questo modo:

$$\frac{E - V_T \ln \left( \frac{\alpha \cdot I_1}{I_s} \right)}{R} = I_1$$

In prima analisi, si pone la corrente  $I_1$  uguale a:

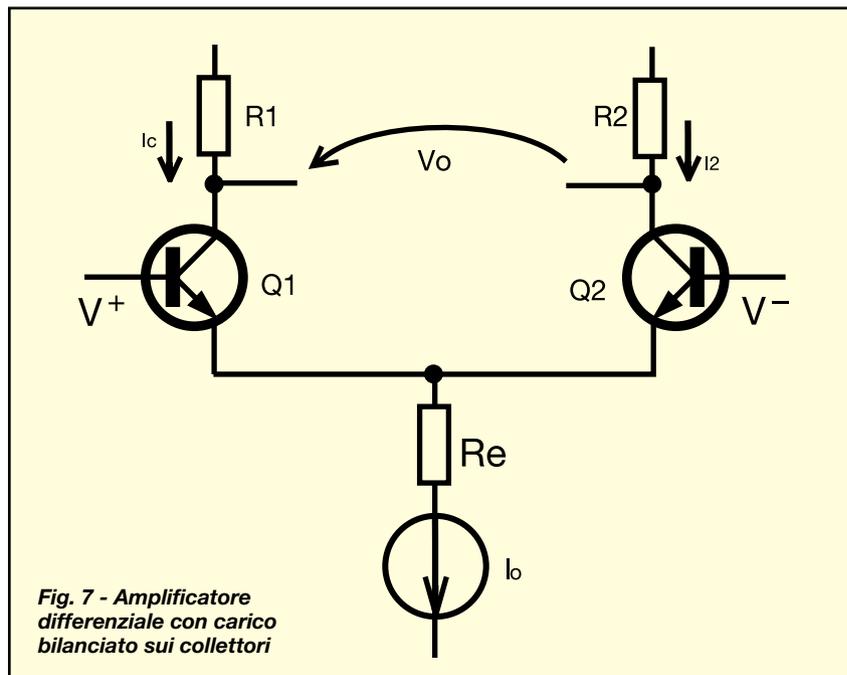
$$I_1 = \frac{E}{R}$$

e la si inserisce al posto della  $I_1$  nel numeratore. A questo punto si ottiene una nuova corrente  $I_1$  che sarà diversa dalla precedente.

La nuova corrente appena trovata si inserisce nuovamente al numeratore ottenendo così una nuova  $I_1$ .

Si continua in questo modo finché non ci si accorge che la corrente trovata è sempre la stessa.

Giunti a questo punto, sappiamo che  $I_2 = \alpha \cdot I_1$ , quindi basta multipli-



**Fig. 7 - Amplificatore differenziale con carico bilanciato sui collettori**

care la corrente trovata per il fattore  $\alpha$  per conoscere perfettamente la corrente del BJT Specchiato (Q2).

È corretto considerare il termine  $V_T$  pari a 25 mV ed è possibile considerare la  $I_s = 10$  fA.

Ricordo che 10 fA corrispondono a  $10 \cdot 10^{-15}$  A quindi, coloro che volessero provare ad analizzare uno specchio presente in qualsiasi circuito, stiano attenti alle grandezze in gioco (a seconda del BJT impiegato può essere necessario aumentare o diminuire questo valore, in genere si è soliti non superare mai i 15 fA).

Nelle equazioni è presente il termine  $\ln$ ; utilizzando una calcolatrice scientifica si faccia attenzione a utilizzare il logaritmo naturale ( $\ln$ ) e non il logaritmo in base dieci (Log) altrimenti i calcoli saranno errati.

### Esempio d'applicazione

#### A cosa serve lo specchio pozzo?

Guardiamo adesso lo schema elettrico di un amplificatore operazionale; la Fig. 6 mostra l'Op-Amp LM324 costruito da National.

Il circuito evidenziato dal cerchio blu mostra un'applicazione tipica di uno specchio pozzo.

Quasi tutti gli stadi differenziali di ingresso presentano sempre uno specchio, questo garantisce una

ottima e ben bilanciata corrente a riposo sui due rami dell'amplificatore differenziale.

Quando lo stadio differenziale è composto da transistori PNP può essere necessario impiegare uno specchio sorgente come quello visto in Fig. 4.

### Un cenno sulla coppia differenziale

In molti articoli abbiamo studiato il funzionamento di circuito composti da Op-Amp; abbiamo detto più volte che la tensione di ingresso è considerata in modo differenziale ( $V_d = V^+ - V^-$ ).

Il pin invertente e il pin non invertente di un Op-Amp fanno capo a una coppia differenziale connessa come in Fig. 7.

Le basi dei due transistori rappresentano l'ingresso invertente e non invertente: quando i transistori Q1 e Q2 ricevono il segnale di ingresso nelle loro basi, la  $V_o$  prelevata dai collettori sarà legata alla differenza della  $V^+$  con la  $V^-$ .

In linea di massima questo è quanto succede anche nella Fig. 6; se l'uscita è riportata sulla base di Q2 attraverso dei resistori, la coppia Q1 - Q2 effettua una vera e propria differenza fra le due tensioni localizzate nelle due basi.



Nella Fig. 7 è presente un generatore di corrente costante che impone una  $I_b$  di riposo stabilita.

Il funzionamento dello stadio differenziale è tanto preciso quanto è affidabile la  $I_b$ .

Se impiegassimo uno specchio pozzo tutto sarebbe più semplice e affidabile.

**Generatore di corrente a un solo BJT**

Guardiamo adesso la Fig. 8 e vediamo il funzionamento: è possibile ottenere un generatore di corrente costante anche con un solo transistor.

La corrente di collettore di Q3 è ottenuta grazie alla rete di polarizzazione di base composta da  $R_1$  e  $R_2$ . In fase di progetto, il transistor deve essere polarizzato considerando nulla la corrente di base.

Se si vuole una  $I_b$  molto piccola, (talmente piccola da poterla considerare nulla) in questo modo si rende indipendente la corrente di collettore dal  $\beta$  del transistor; in questo caso la  $I_c$  diverrebbe dipendente solamente dalla  $V_{be}$ .

Questa scelta è molto importante. Vediamone il perché: ammettiamo di dover sostituire il BJT durante una riparazione. Dato che la  $I_c$  è indipendente dal  $\beta$  del transistor, è lecito sostituirlo anche con un modello equivalente ma più facilmente reperibile in commercio (purché la sua  $V_{ce}$  sia quella corretta), senza creare sbilanciamenti nel generatore.

Per poter ottenere la corrente voluta sul collettore deve essere verificato che:

1. la  $R_2$  sia più piccola della  $R_1$ ;
2. il parallelo fra i due resistori posti sulla base deve essere confrontabile con il resistore  $R_3$  posto sull'emettitore.

**Esempio pratico**

Ammettiamo che si voglia una  $I_c$  pari a 5 mA e che il transistor sia polarizzato con una tensione pari a -20V.

Al posto del circuito a sinistra di Fig. 8, è possibile semplificare la polarizzazione di base come visibile a destra.

Si fissa la  $V_{BB}$  a un valore stabilito, ad esempio 1,5 V, e si scrivono le due equazioni relative alla  $V_B$ :

$$\begin{cases} V_B = V_{BB} - I_b \cdot R_{eq} \\ V_B = V_{be}^{on} + I_{R3} \cdot R_3 \end{cases} \quad (1)$$

a questo punto si torna al circuito raffigurato a sinistra di Fig. 8 e si scrive l'equazione di maglia sulla base del BJT:  $V_{cc} = V_{R1} + V_{R2}$  dove la tensione ai capi della  $R_1$  è uguale a:

$$V_{R1} = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

sostituendola nell'equazione di maglia precedente e risolvendola rispetto a  $V_{R2}$  otterremo:

$$V_{R2} = V_{cc} \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

a questo punto basta fissare il valore della  $R_2$  (come detto in precedenza deve essere minore della  $R_1$ ) e ci si ricava la  $R_1$  cercata.

Se ad esempio fissiamo la  $R_2 = 180 \Omega$  avremmo una  $R_1 = 2220 \Omega$ . Scegliendo una resistenza da 2,2 k $\Omega$  la polarizzazione di base sarà corretta. Come si può notare, la  $R_2$  è minore della  $R_1$  trovata (il primo vincolo è quindi verificato).

Come detto precedentemente, considerando nulla la corrente di base del BJT, dalla (1) otteniamo che la vera  $V_{BB}$  è:

$$V_{BB} = V_{cc} - V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1,51 \text{ V}$$

(valore molto vicino agli 1,5 V da noi imposti in precedenza).

Sapendo che la corrente di base è pressoché nulla, è lecito considerare la corrente di emettitore uguale alla corrente di collettore pertanto la  $R_3$  sarà pari a:

$$R_3 = \frac{V_{BB} - V_{be}^{on}}{I_c} = 172 \Omega \Rightarrow$$

$\Rightarrow$  Valore commerciale  $\Rightarrow 180 \Omega$

Il parallelo fra  $R_1 // R_2$  è uguale a 166  $\Omega$ , valore del tutto confrontabile con il valore della  $R_3$  calcolata (secondo vincolo verificato).

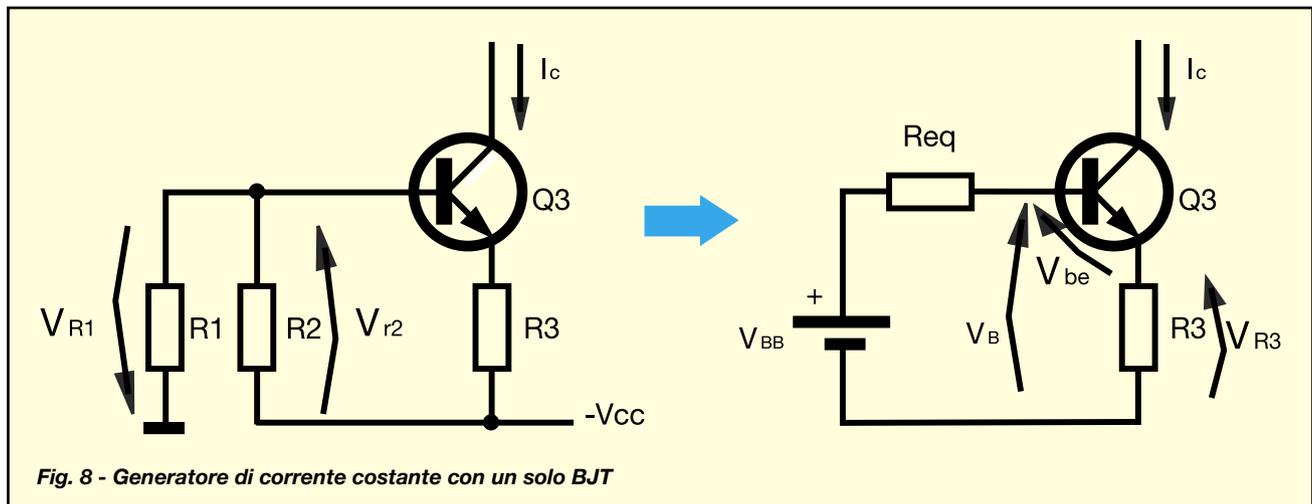


Fig. 8 - Generatore di corrente costante con un solo BJT

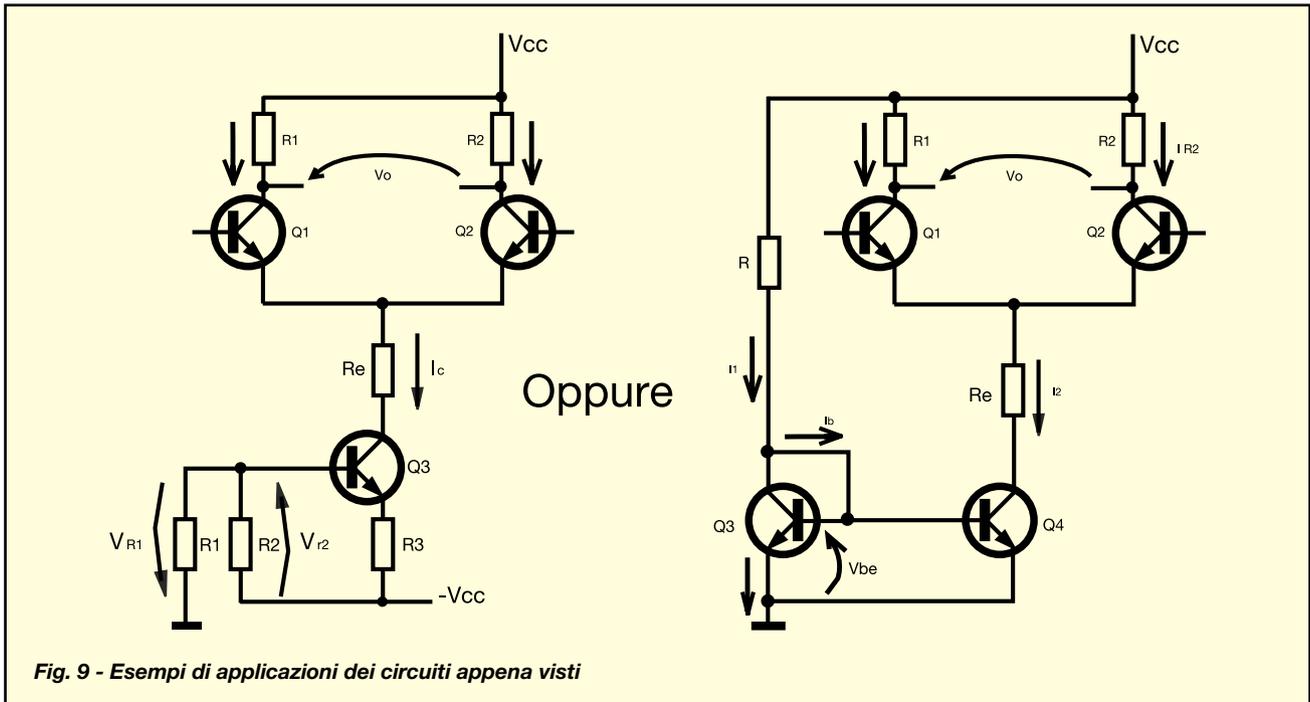


Fig. 9 - Esempi di applicazioni dei circuiti appena visti

Utilizzando le stesse formule, naturalmente risolvendole rispetto alle tensioni e alle correnti in gioco, è possibile conoscere la corrente a riposo  $I_c$  che, un qualsiasi generatore impiegato in un TVC o in uno strumento elettronico impone al suo carico.

### Applicazioni pratiche

Passiamo adesso alla Fig. 9 e vediamo come possono essere connessi insieme questi dispositivi: sono visibili due amplificatori differenziali con carico bilanciato e due generatori di corrente costante.

Il generatore formato dallo specchio di corrente viene spesso utilizzato all'interno di circuiti integrati (ciò non toglie che non possa essere realizzato con componenti discreti), mentre il secondo generatore di corrente è più facilmente riscontrabile su molti schemi elettronici.

Se dovessimo ricercare un guasto, gli elementi di nostra conoscenza saranno:

1. la tensione di alimentazione  $V_{cc}$ ;
2. il valore di tutti i componenti del circuito.

Dalle formule citate, possiamo ricavare la corrente a riposo e, quindi, stabilire se il circuito funziona correttamente oppure no.

### Semplici generatori di tensione costante

Qualsiasi circuito o dispositivo di strumentazione prevede l'impiego di tensioni di riferimento. Il più classico generatore di tensione costante è lo stabilizzatore a zener.

Polarizzare correttamente un diodo zener non è difficile, è importante però tenere in considerazione alcuni aspetti fondamentali.

Maggiore è la tensione da stabilizzare, maggiore saranno le possibili variazioni della tensione stabilizzata per cause esterne allo zener (questo è un aspetto dannoso per un buon stabilizzatore).

Maggiore sarà la corrente che dovrà fornire, più difficoltosa sarà la stabilizzazione ottenuta (a causa della temperatura da dissipare).

In linea di massima possiamo ricordare che i generatori di tensione di riferimento non servono per fornire corrente all'eventuale carico bensì a dare sempre in uscita la stessa tensione anche se la temperatura varia fortemente.

In altri termini, la stabilizzazione è tanto migliore quanto minore è la corrente da essi erogata.

Per questo motivo vengono impiegati per pilotare dispositivi capaci di dare una corrente ben più alta rispetto a quella fornita da loro stessi.

Guardiamo adesso la Fig. 10. Per fornire una forte corrente al carico (eventualmente posto sull'emettitore del BJT) non è possibile utilizzare un solo diodo zener.

Grazie allo zener, è possibile ottenere una tensione stabile e, attraverso il BJT, una forte corrente in uscita. In molti TVC si possono trovare parti di alimentatore (sempre sul ramo secondario di un eventuale Chopper) aventi la funzione suddetta.

### Facciamo un esempio

Ammettiamo di avere 15 V come tensione di ingresso e di volere in uscita una tensione di circa 12 V con una corrente massima di 1,5 A.

La resistenza da calcolare per lo zener sarà:

$$R < R^{\max} = \frac{V_{cc} - V_{dz}}{I_{z \text{ lim}} + \frac{IC}{\beta + 1}}$$



Per il transistor si potrà scegliere un Darlington (in modo da avere un  $\beta$  elevato, ad esempio 750), mentre la sua  $V_{ce0}$  dovrà essere superiore a 15 V.

La corrente massima di collettore dovrà essere maggiore rispetto alla corrente massima erogata al carico quindi:

- $V_{ce0} > 15 \text{ V}$
- $V_{be} \cong 1,3 \text{ V}$  (per un Darlington è possibile considerare una tensione circa doppia rispetto a quella di un singolo BJT)
- $I_c > 1,5 \text{ A}$
- $P_{max} > 4,5 \text{ W}$

Un transistor della serie "BD" può rispondere facilmente alle specifiche richieste.

Dalla formula appena vista è possibile trovare la massima resistenza applicabile. Nel nostro caso avremo:  $R^{max} = 486 \Omega$  si sceglierà quindi una resistenza leggermente inferiore al valore trovato, per esempio da  $470 \Omega$ .

La sua potenza dovrà essere maggiore di:

$$P = RI^2 = 470 \Omega \cdot (6,17 \cdot 10^{-3} \text{ A}) = 17,8 \text{ mW},$$

pertanto potremo scegliere un normale resistore da 1/4 W.

Nel nostro esempio abbiamo imposto allo zener una corrente di accensione pari a 4,17 mA.

Il transistor Q dissiperà una potenza pari a:

$$P = V_{ce}^{max} I_u = (15 \text{ V} - 12 \text{ V}) \cdot 1,5 \text{ A} = 4,5 \text{ W},$$

basterà mettere una piccola aletta e il transistor funzionerà correttamente al variare del carico.

Si badi bene che, nel circuito appena visto, non è presente nessuna protezione del BJT ai sovraccarichi in uscita. Spesso negli schemi possono esserci transistori dedicati a questo compito.

### Un ulteriore generatore di tensione "V<sub>ref</sub>"

Il generatore composto dallo zener è impiegato quando si devono alimentare dei circuiti a carico variabile.

In molti strumenti elettronici non è però necessario che il generatore di tensione sia anche capace di fornire corrente in uscita.

Questo è il caso di stadi ad alta impedenza di ingresso; abbiamo detto più volte in passato che un Op-Amp presenta un'altissima impedenza di ingresso.

Quando dobbiamo dare una tensione di riferimento in un certo punto del circuito, ma non dobbiamo fornire corrente, sarebbe sprecato utilizzare lo stabilizzatore appena visto.

Si rammentino il funzionamento del convertitore a doppia rampa e del convertitore V/F visti nei mesi scorsi; in una parte del circuito è

necessaria una tensione "E" oppure "-E", ogni qualvolta che abbiamo parlato di questa tensione non abbiamo mai detto che il generatore "E" dovesse fornirci anche una certa corrente I.

Questo perché la tensione "E" è posta in ingresso a un circuito ad alta impedenza e che quindi non richiede alcuna corrente.

Non abbiamo mai detto fino ad ora cosa impiegare per realizzare le tensioni di riferimento. Guardiamo adesso la Fig. 11.

Il circuito in questione, fornisce la tensione "E" (d'ora in avanti la chiameremo  $V_r$  per comodità) attraverso il collettore del transistor PNP impiegato.

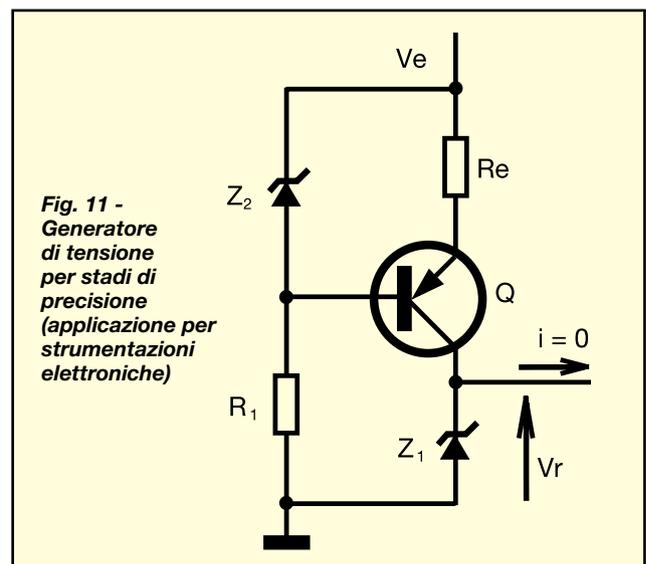
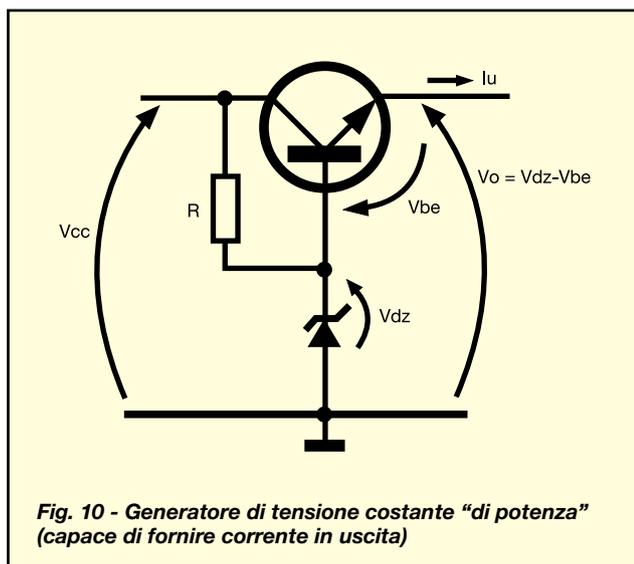
Lo stadio è un Base Comune. Non a caso il Base Comune presenta un guadagno in corrente inferiore a 1  $\rightarrow A_i < 1$ , quindi la corrente I attraverso l'emettitore e si scarica dentro lo zener  $Z_1$  mentre lo stesso non fornisce alcuna corrente in uscita ( $i = 0$ ).

Per questo motivo è possibile scrivere:

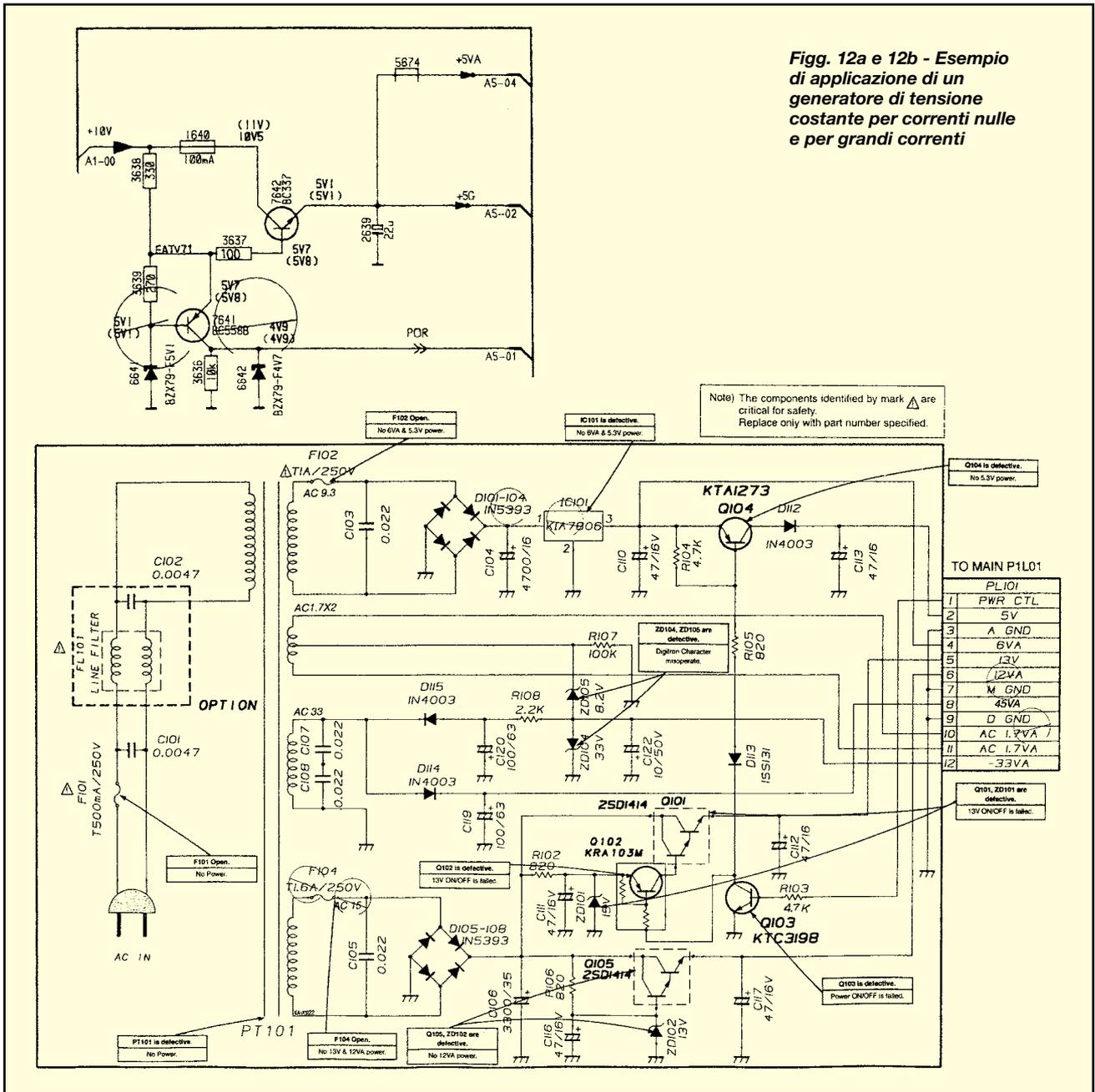
$$i_{z1} \cong i_e = \frac{V_{z2} - V_{eb}}{R_e}$$

la resistenza posta sulla base del BJT è calcolata secondo la relazione:

$$R_{1min} = \frac{V_e^{min} - V_{z2}}{I_{z2min}}$$



**Figg. 12a e 12b - Esempio di applicazione di un generatore di tensione costante per correnti nulle e per grandi correnti**



Dato che il circuito deve essere capace di rifiutarsi il più possibile alle variazioni della  $V_r$  (in modo da averla sempre stabile in qualsiasi condizione di funzionamento) dopo aver dimensionato i componenti è importante verificare il parametro  $F =$  *fattore di autoregolazione*.

Dall'entità di quest'ultimo è possibile sapere quanto varierà la  $V_r$  se la tensione di ingresso  $V_e$  dovesse variare per qualunque motivo.

Il termine  $1/F$  ovvero l'inverso del fattore di autoregolazione, è chiamato *Reiezione di alimentazione*.

Maggiore sarà la Reiezione, migliore sarà il generatore di tensione.

Il rapporto fra le variazioni ingresso/uscita è dato da:

$$\frac{\Delta V_r}{\Delta V_e} = R_{z1} \frac{\Delta i_{z1}}{\Delta V_e} = \frac{R_{z1}}{R_e} \cdot \frac{\Delta V_{z2}}{\Delta V_e} = \frac{R_{z1}}{R_e} \cdot \frac{R_{z2}}{R_{z2} + R_1}$$

Ammettiamo di volere una  $V_r$  pari a 9V, inserendo una  $R_1$  da 680  $\Omega$  e avendo inoltre una  $V_e$  di 12V e una  $R_e = 390 \Omega$  abbiamo che:

$$\frac{1}{F} \cong 1900$$

valore tipico di un generatore di tensione costante impiegato in alcuni strumenti di misura.

### Due applicazioni pratiche

Oltre a impiegare i circuiti appena visti per realizzare dispositivi elettronici di misura, il tecnico elettronico può facilmente incontrarli anche nei telai di TVC e VCR.

Si vedano le **Figg. 12a e 12b**: nei due esempi di schema (relativi a un TVC Philips e a un VCR Goldstar) sono rappresentati due generatori di tensione costante per correnti nulle e per grandi correnti.

Ogni volta che troviamo dei dispositivi del genere, la ricerca di un guasto e il controllo del loro funzionamento dovrà effettuarsi seguendo i ragionamenti descritti.  $\square$