

# La polarizzazione di un BJT: motivi, modalità, criteri di progetto

Ing. Alessandro Santucci

## 0 - Premessa

Nel presente tutorial, saranno discussi i seguenti argomenti:

1. Polarizzazione di una transistor BJT, requisiti per le due giunzioni B-E e B-C;
2. Polarizzazione di un BJT in pratica, curve caratteristiche di uscita e punto di lavoro statico;
3. Polarizzazione con presenza di  $R_E$  per la stabilizzazione del punto di lavoro;
4. Rete di polarizzazione con partitore d'ingresso e metodo pratico di progetto di una rete di polarizzazione statica di un BJT.

## 1 - Polarizzazione di un transistor

**Polarizzare** una giunzione P-N, come può essere un diodo, ovvero la giunzione B-E o la giunzione C-B di un transistor, significa collegare un generatore di f.e.m. (**forza elettromotrice**) in modo da indurre lo spostamento di portatori di corrente elettrica (elettroni), nel caso di **polarizzazione diretta**, oppure non provocare alcuno spostamento di portatori, nel caso di **polarizzazione inversa**.

Nella realtà anche in caso di polarizzazione inversa, una seppur minima corrente elettrica scorre attraverso la giunzione in esame: si tratta della cosiddetta **corrente inversa di saturazione**. La corrente inversa dipende poco dalla tensione di polarizzazione. In pratica, applicando una tensione negativa di pochi decimi di Volt si raggiunge il valore limite di corrente inversa che rimane costante a meno di rottura della giunzione stessa (**breakdown**) che si ottiene superando un limite ben preciso (fornito dal costruttore) detto appunto **tensione di breakdown** (spesso denominata come  $V_B$ ).

### 1.1 - Applicazioni in analogica

Tornando al transistor, per polarizzazione dello stesso, con la finalità di farlo funzionare da **amplificatore**, si intende l'insieme di situazioni elettriche che consente di polarizzare direttamente la giunzione B-E ed inversamente la giunzione C-B, in modo da far funzionare il dispositivo nella cosiddetta zona attiva delle sue curve caratteristiche di uscita.

La zona attiva è una zona delle tre possibili, individuate nel grafico delle curve caratteristiche di uscita del BJT; tale grafico è suddiviso in **zona di saturazione** (con VCE pressoché nulla), **di interdizione** (con IC pressoché nulla) e **zona attiva** (funzionamento ottimale come amplificatore, cioè funzionamento lineare).

### 1.2 - Applicazioni in digitale

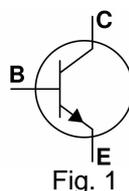
Il transistor può essere utilizzato anche come interruttore (**switching transistor**) adatto per attivare o disattivare circuiti, trasduttori, ecc.. In questo tipo di applicazioni il funzionamento è legato ai due particolari stati: quello di **saturazione** (ON) e quello di **interdizione** (OFF).

### 1.3 - La polarizzazione

Vediamo ora cosa si intende per polarizzazione, dal punto di vista elettrico e circuitale.

Cominciamo dal vedere i due tipi diversi di transistor o BJT che si possono avere.

Il primo si chiama **transistor di tipo NPN**, per il fatto che sia il Collettore che l'Emettitore sono drogati in modo da avere un eccesso di portatori di tipo N (elettroni), mentre la Base è drogata in modo da avere un eccesso di portatori di tipo P (lacune); di qui la dicitura N-P-N, il simbolo è quello mostrato in figura:



Il secondo tipo di BJT si chiama **transistor di tipo PNP**, per il fatto che sia il Collettore che l'Emettitore sono drogati in modo da avere un eccesso di portatori di tipo P (lacune), mentre la Base è drogata in modo da avere un eccesso di portatori di tipo N (lacune); il simbolo è mostrato in figura:

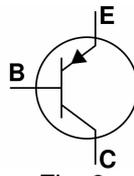
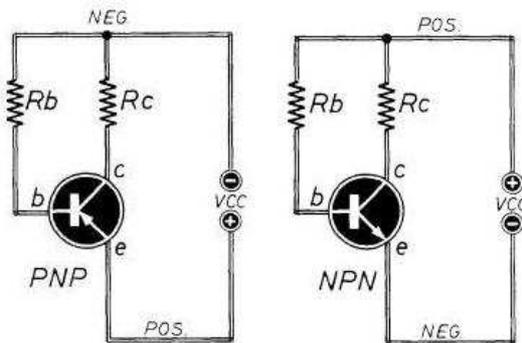


Fig. 2

Premesso questo, diciamo che nella maggior parte dei casi avremo a che fare con transistor di tipo NPN, avendo prestazioni migliori in termini di dinamica e di correnti, e che useremo quindi, il primo dei due mostrati.

I transistor PNP ed NPN si differenziano tra loro, oltre che per la composizione fisica interna, per il diverso sistema di alimentazione che, nei modelli PNP, applica la tensione negativa al collettore e alla base e quella positiva all'emettitore, mentre negli NPN collettore e base sono collegati al morsetto positivo dell'alimentatore e l'emettitore con quello negativo.



Nel caso del transistor PNP i discorsi fatti sono del tutto analoghi.

Ricordiamo che per polarizzare il transistor in modo che possa funzionare in zona attiva, dobbiamo far sì che avvengano due cose:

- la giunzione B-E sia polarizzata direttamente;
- la giunzione C-B sia polarizzata inversamente.

Per ottenere questo dovremo far sì che il potenziale che c'è sul collettore  $V_C$  (quindi fra collettore e massa), sia superiore, in valore, a quello della base  $V_B$  (quindi fra base e massa), in modo che fra collettore e base, sia il primo ad essere a potenziale maggiore ed avere quindi la relativa giunzione polarizzata in modo inverso.

Per la base, invece, basta che il potenziale  $V_B$ , sia maggiore dei 0,7 V, che rappresenta la tensione di soglia di una qualunque giunzione P-N al silicio, necessaria per portare la giunzione stessa alla conduzione. La giunzione base-emettitore, infatti, si comporta come un diodo al silicio polarizzato direttamente che, pur lasciandosi attraversare dalla corrente, provoca la caduta di tensione di 0,7 V, se la corrente è debole e di 0,8 V se è più forte, mentre lo stato elettrico del collettore, in tale fenomeno, non introduce alcuna influenza.

Ci si riferisce alla seguente figura:

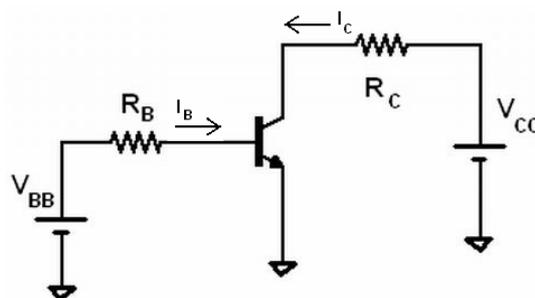


Fig.3

$V_{BB}$  è il generatore di f.e.m. che alimenta la giunzione di base e pertanto, nella dicitura, viene raddoppiata la lettera relativa (BB);  $V_{CC}$  è il generatore di f.e.m. che alimenta la giunzione di collettore e pertanto, nella dicitura, viene raddoppiata la lettera relativa (CC).

Le due resistenze, rispettivamente  $R_C$  ed  $R_B$ , con il loro valore, regolano il flusso di corrente nel collettore ( $I_C$ ) e nella base ( $I_B$ ) e pertanto vengono indicate con le lettere corrispondenti.

Si nota come entrambi i generatori hanno un capo a massa (il polo negativo) e, pertanto, si può pensare di sostituirli con uno soltanto, adeguando – nel caso – i valori delle due resistenze, a seconda del valore di corrente voluto, sia per  $I_C$  che per  $I_B$ .

Si passa così allo schema elettrico che segue:

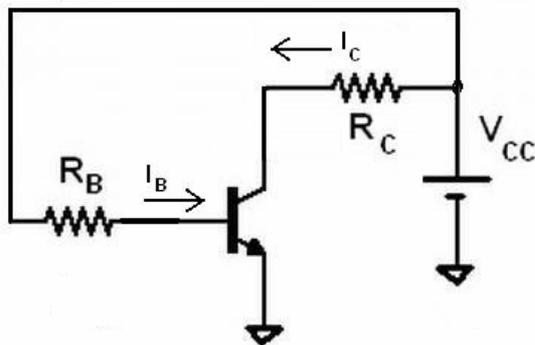


Fig. 4

Il generatore  $V_{CC}$  svolge le stesse funzioni che prima aveva anche il generatore  $V_{BB}$ , solo che ora il valore di  $R_B$  sarà variato per soddisfare la nuova situazione.

Si vede che il generatore ha il lato negativo a massa ed in questo modo le alimentazioni di un eventuale dispositivo con molti transistor, hanno tutte i negativi a massa, cioè il contenitore del dispositivo può essere collegato alla terra.

Si osserva inoltre anche il verso delle correnti sia di base ( $I_B$ ) sia di collettore ( $I_C$ ) che vanno dal generatore verso i rispettivi terminali del BJT.

Riferendoci alla figura seguente:

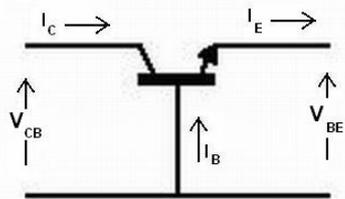


Fig. 5

si possono individuare: la differenza di potenziale Base-Emettitore ( $V_{BE}$ ), la differenza di potenziale Collettore- Base ( $V_{CB}$ ), e le tre correnti  $I_B$ ,  $I_C$  ed  $I_E$ , fra cui esiste la seguente relazione matematica (legge di Kirkhoff per le correnti):

$$I_E = I_B + I_C \quad [1]$$

Tornando a quanto già detto in precedenza, sul funzionamento in zone di saturazione ed interdizione, si può dire quanto segue.

Nella saturazione le due giunzioni sono polarizzate entrambe direttamente. Per bassi valori  $V_{CE}$  la corrente di base  $I_B$  perde il controllo sulla corrente di collettore  $I_C$  e manca la proporzionalità che si ha in zona attiva, espressa dalla seguente relazione:

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B \quad [2]$$

(dove  $h_{FE}$ , o  $\beta_F$  o  $\beta$ , viene definito **guadagno di corrente ad emettitore comune** e spesso ha valore attorno a 100).

I valori convenzionali delle tensioni di saturazione sono  $V_{CE} = 0,2V$  e  $V_{BE} = 0,7V$ .

Nello stato di interdizione il transistor non conduce (OFF) e questa condizione si verifica se entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente. Un transistor NPN può essere considerato interdetto se la tensione  $V_{BE}$  è minore o uguale a zero (mentre un transistor PNP può considerarsi interdetto se  $V_{BE}$  è maggiore o uguale a zero).

Nel caso ideale il transistor passa nello stato OFF e in quello ON e viceversa, in modo istantaneo. Questa ipotesi è plausibile nelle applicazioni di elettronica digitale.

## 2 - Polarizzazione di un BJT in pratica

Da quanto detto in precedenza si vede come per polarizzare un transistor BJT ci vuole almeno una sorgente di f.e.m. ( $V_{CC}$ ) e due resistenze. La resistenza di base ( $R_B$ ) serve a regolare la corrente di base  $I_B$ , la quale indirettamente determina la corrente di collettore  $I_C$ , tramite la relazione matematica semplificata [2], che può essere riscritta come:

$$I_C = \beta I_B \quad [3]$$

La seconda resistenza che si usa è quella di collettore  $R_C$ , che serve a determinare il valore di  $V_{CE}$  voluto. Il circuito di base per la polarizzazione, allora è il seguente:

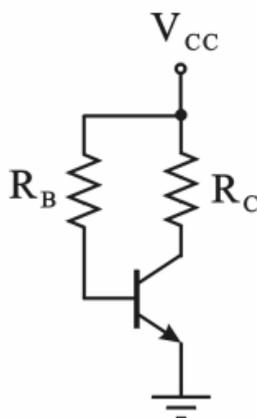


Fig. 6

Relativamente a detto circuito, si possono scrivere – a regime – le due equazioni che seguono:

$$V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE} \quad [4]$$

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} \quad [5]$$

La prima delle due equazioni, riferendosi all'ingresso del circuito, si dice **equazione della maglia di ingresso** (o semplicemente di ingresso); la seconda, che si riferisce all'uscita, si chiama **equazione della maglia di uscita** (o semplicemente di uscita).

Si è detto che la resistenza  $R_C$ , con il suo valore, determina la tensione  $V_{CE}$  applicata al collettore e, quindi, il secondo valore elettrico necessario ad individuare il punto di lavoro del transistor.

Il **punto di lavoro Q** (statico) del transistor si può definire come quel punto sul grafico rappresentativo delle rette di uscita del transistor stesso, che rappresenta le condizioni elettriche di funzionamento del dispositivo; il punto Q, cioè, ha per coordinate la tensione  $V_{CEQ}$  e la corrente  $I_{CQ}$  tipiche del transistor, appunto polarizzato col circuito di figura 6.

In realtà la tensione, essendo tensione Collettore-Emettore, si denomina come  $V_{CE}$ : la lettera Q viene aggiunta, in quanto si tratta della tensione relativa al punto Q (in inglese **quiescent**, riposo); lo stesso vale per la corrente di collettore  $I_C$ .

Come si vede, la **retta di carico** incrocia gli assi in due punti caratteristici: sull'asse verticale (della corrente  $I_C$ ) nel punto di coordinata  $V_{CC}/R_C$  il quale rappresenta la massima corrente di collettore che può scorrere (in queste condizioni elettriche, cioè con questi componenti, BJT, resistenza  $R_C$  e con questi valori elettrici,  $V_{CC}$ ). Sull'asse orizzontale (della tensione  $V_{CE}$ ), nel punto di coordinata  $V_{CC}$ , il quale rappresenta la massima tensione fra collettore ed emettitore che può essere applicata al BJT, in queste condizioni elettriche.

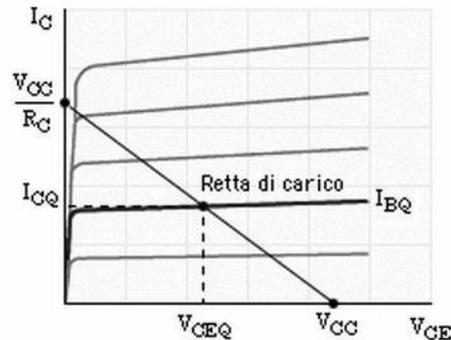


Fig. 7

La polarizzazione elettrica del dispositivo (BJT) consiste nel fare scorrere una corrente  $I_C$  intermedia fra il minimo ed il massimo valore, ed applicare una tensione  $V_{CE}$  intermedia fra il minimo ed il massimo valore possibile, nel dato circuito.

Quando verrà applicato un segnale alla base del BJT di tipo alternato, il punto di lavoro si sposterà in conseguenza della variazione di corrente di base  $I_B$ , che a sua volta farà variare la corrente di collettore  $I_C$ , e scorrerà (geometricamente parlando), sulla retta di carico, percorrendola verso l'alto e verso il basso, con frequenza pari a quella del segnale in ingresso. Se il punto di lavoro (che ora sarà un punto di lavoro dinamico), non arriverà a toccare i due assi e quindi a dover limitare il proprio percorso, il segnale di uscita non subirà distorsioni e verrà amplificato in modo fedele, sarà, cioè, una fedele riproduzione (con valori minimi e massimi amplificati) di quello d'ingresso, che è ciò che si cerca di ottenere.

Altrimenti ci sarà distorsione con le conseguenze che ne derivano, sia che si tratti di segnale di BF, sia che si tratti di segnale a RF.

### Esercizio 1

Si supponga di avere una sorgente  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ , un BJT con  $\beta = 80$  e di voler polarizzare con una  $I_{CQ} = 4 \text{ mA}$  ed una  $V_{CEQ} = 5 \text{ V}$ .

Dalla relazione [3] ricaviamo la  $I_{BQ}$  necessaria, e si avrà:

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{80} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 50 \mu\text{A}$$

Quindi il valore di  $R_B$  va progettato per ottenere tale  $I_B$ .

A tal fine si utilizza la equazione d'ingresso [4] in cui il valore di  $V_{BE}$  è fissato a  $0,7 \text{ V}$ , tipici per una giunzione P-N come quella del diodo o, appunto, fra base ed emettitore di un transistor.

Sostituendo nell'equazione i valori numerici si ha:

$$10 = R_B \cdot 50 \cdot 10^{-6} + 0,7$$

Da cui si ottiene:

$$R_B = \frac{10 - 0,7}{50 \cdot 10^{-6}} = 186 \text{ k}\Omega$$

Fatto ciò si passa all'equazione di uscita [5] per il calcolo di  $R_C$ .

Procedendo in modo analogo, si sostituiscono nell'equazione [5] i valori numerici noti, ottenendo:

$$10 = R_C \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 5.$$

Da cui si ottiene:

$$R_C = \frac{10 - 5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1250 \, \Omega = 1,25 \, k\Omega$$

Concludendo, il circuito, con i valori elettrici dati, che sarà in grado di polarizzare nel modo voluto il transistor di caratteristiche assegnate (valore di  $\beta$ ), dovrà prevedere un valore di  $R_C = 1,25 \, k\Omega$  ed uno per  $R_B = 186 \, k\Omega$ , che verranno rispettivamente sostituiti dai valori commerciali di  $R_C = 1,2 \, k\Omega$  ed  $R_B = 180 \, k\Omega$ . Il punto di lavoro Q del transistor, ha coordinate Q ( $V_{CE} = 5V$ ,  $I_C = 4mA$ ).

### 3 - Polarizzazione con presenza di $R_E$ , stabilizzazione del punto di lavoro con polarizzazione automatica

Il tipo di polarizzazione appena visto è il più semplice ed immediato, ma non quello che fornisce le migliori prestazioni.

Infatti, il transistor sotto l'effetto essenzialmente della corrente di collettore  $I_C$ , tende a dissipare anche **potenza**  $P_D$ , sotto forma di calore, per calcolare la quale basta applicare la formula:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C \quad [6]$$

In questa formula si trascura l'effetto della  $I_B$  sulla dissipazione sotto forma di calore nel BJT.

Il calore porta ad un aumento della conducibilità all'interno del BJT stesso e, di conseguenza, un aumento della corrente  $I_C$ ; questo meccanismo innesca un processo per cui il calore tende a fare aumentare  $I_C$ , la quale tende a fare aumentare il calore, e via via: così, si innesca un processo distruttivo che fa aumentare calore ed  $I_C$  e porta il transistor a surriscaldarsi fino alla sua distruzione. Tale processo prende il nome di fuga termica e come è ovvio è da evitarsi.

Per questo la polarizzazione del BJT, nella maggioranza dei casi, viene fatta modificando leggermente lo schema già visto, ed aggiungendo semplicemente una resistenza fra emettitore e massa, come da schema in figura.

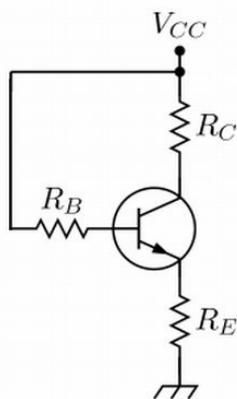


Fig. 8

Le equazioni caratteristiche [4] e [5], vengono a modificarsi come segue:

$$V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E, \quad [7]$$

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E. \quad [8]$$

A questo punto dobbiamo fare osservare che dall'equazione [1] e dalla [3], possiamo ricavare che:

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = I_B (1 + \beta) . \quad [8]$$

Ma, poiché il valore di  $\beta$  è in genere assai alto (oltre 50 e spesso pari a 100 o più) a sua volta, possiamo scrivere anche che:

$$I_B(1+\beta) \cong \beta I_B. \quad [9]$$

Da cui ne deriva che:

$$I_E = (1 + \beta) I_B \cong \beta I_B = I_C. \quad [10]$$

Cioè, la corrente di emettitore  $I_E$  è pressoché pari al valore di quella di collettore  $I_C$ , cioè:

$$I_E \cong I_C. \quad [11]$$

D'ora in avanti nel testo adotteremo tale approssimazione che non porterà gravi inesattezze, bensì porterà semplificazioni nei ragionamenti e nei calcoli che seguiranno.

Tornando alle equazioni caratteristiche del transistor, [7] ed [8], le possiamo riscrivere alla luce di quanto ora detto, come:

$$V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_C , \quad [12]$$

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_C . \quad [13]$$

Dalla prima delle due ([12]) ricaviamo la relazione che fornisce  $I_B$ , e si ha:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E \cdot I_C}{R_B} . \quad [14]$$

Da questa relazione matematica è evidente che nel caso si verificasse quanto ipotizzato all'inizio di questo paragrafo, e cioè un innalzamento della  $I_C$  dovuto al riscaldamento del transistor, con conseguente pericolo di fuga termica, si ha che la presenza della resistenza  $R_E$  sull'emettitore, rende la corrente di base  $I_B$ , dipendente inversamente anche dalla stessa corrente di collettore  $I_C$ . Ciò significa che ad un innalzamento della corrente di collettore, segue come conseguenza la tendenza ad un abbassamento della corrente di base, tramite il termine  $R_E I_B$  nell'espressione [14], che si sottrae a  $V_{CC}$  e  $V_{BE}$ , che sono costanti e non dipendenti da  $I_C$ .

In sintesi la corrente di collettore è come se si **auto-stabilizza** agganciandosi ad un valore costante di equilibrio ed impedendo il suo stesso aumento, evitando quindi, il pericolo di fuga termica. In pratica, il valore di  $I_C$  si aggiusta automaticamente intorno al valore prefissato e di qui il nome di questo tipo di polarizzazione. Si implementa, quindi, in maniera intrinseca un meccanismo di controllo con retroazione.

Ecco perché, allora, nella polarizzazione del BJT, è normale vedere sempre una resistenza fra emettitore e massa.

## Esercizio 2

Si suppone di voler polarizzare un BJT usando il circuito di fig. 8 con i seguenti dati assegnati:

$$V_{CC} = 12V; I_{CQ} = 10mA; \beta = 80, V_{BE} = 0,7V; V_{CEQ} = 6V; V_{RE} = V_{CC}/10.$$

Si ricava innanzitutto il valore di  $I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$ :

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{80} = 0.125 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 125 \mu\text{A}.$$

Dalla condizione su  $V_{RE} = V_{CC}/10$ , ricaviamo che :

$$V_{RE} = \frac{V_{CC}}{10} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ V}.$$

Consideriamo che  $I_E = I_C = 10\text{mA}$ , (formula [11]), per cui si può ricavare il valore di  $R_E$ :

$$V_{RE} = R_E \cdot I_E = 1,2 \text{ V}.$$

Dalla quale:

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1,2}{10 \cdot 10^{-3}} = 120 \Omega.$$

Si passa ora alla formula [12] che viene utilizzata per il calcolo del valore di  $R_B$ . Si riscrive la formula con i valori numerici noti:

$$12 = R_B \cdot 125 \cdot 10^{-3} + 0,7 + 1,2.$$

Si ricava, così, il valore dell'incognita  $R_B$ :

$$R_B = \frac{12 - 0,7 - 1,2}{125 \cdot 10^{-3}} = 80,8 \cdot 10^3 \Omega = 80,8 \text{ k}\Omega.$$

Si passa, infine, al calcolo del valore di  $R_C$ , seguendo il medesimo ragionamento usato per  $R_E$ .

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C = V_{CC} - V_{CE} - V_{RE} = 12 - 6 - 1,2 = 4,8 \text{ V},$$

ottenendo

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{4,8}{10 \cdot 10^{-3}} = 480 \Omega.$$

Si sceglie di usare per le resistenze i valori commerciali che più si avvicinano a quelli calcolati:

$R_C = 470\text{ohm}$ ;  $R_B = 82 \text{ kohm}$ ;  $R_E = 120\text{ohm}$ .

A questo punto, poiché i valori resistivi sono in parte differenti da quelli calcolati, come esercizio di verifica, si richiede di ricavare il punto di lavoro Q (quindi i valori di  $I_C$ ,  $I_B$  e  $V_{CE}$ ) che è relativo ai valori che effettivamente si useranno nel circuito, per controllare di quanto esso si discosta dal punto di lavoro desiderato in specifiche.

Si esamina, quindi un problema di analisi e non più di sintesi.

Sempre riferendosi allo schema di fig. 8, si devono trovare i valori delle grandezze elettriche  $V_{CEQ}$ ,  $I_{CQ}$  ed  $I_{BQ}$ , partendo dai valori resistivi  $R_C = 470\text{ohm}$ ;  $R_B = 82 \text{ kohm}$ ;  $R_E = 120\text{ohm}$  e dalle condizioni di alimentazione:  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ , sapendo che  $\beta = 80$ .

Le equazioni di partenza sono sempre le due equazioni caratteristiche del transistor [12] e [13] che vengono riscritte inserendo i valori numerici noti.

Si inizia a valutare l'espressione [12]:

$$V_{CC} = R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_C,$$

che diventa:

$$12 = 82 \cdot 10^3 \times I_B + 0,7 + 120 \times I_C .$$

In cui al posto di  $I_C$  sostituiamo il suo equivalente  $\beta I_B$ :

$$12 = 82 \cdot 10^3 \times I_B + 0,7 + 120 \times \beta \times I_B .$$

Ricordando che  $\beta = 80$ :

$$12 = 82 \cdot 10^3 \times I_B + 0,7 + 120 \times 80 \times I_B .$$

Da cui ancora, sostituendo via via:

$$12 = I_B \times (82 \cdot 10^3 + 120 \times 80) + 0,7 = I_B \times 91600 + 0,7 ,$$

che per la corrente di base fornisce il valore:

$$I_B = \frac{12 - 0,7}{91600} = \frac{11,3}{91600} = 123 \cdot 10^{-6} A = 123 \mu A .$$

E per quella di collettore:

$$I_C = \beta I_B = 80 \times 123 \cdot 10^{-6} = 0,00984 A = 9,84 mA .$$

Poiché abbiamo fatto l'ipotesi che corrente di emettitore e di collettore sono in pratica le stesse, si ha:

$$V_{RE} = R_E \cdot I_C = 120 \times 9,84 \cdot 10^{-3} = 1,18 V ,$$

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C = 470 \times 9,84 \cdot 10^{-3} = 4,62 V .$$

Da cui si ricava per  $V_{CE}$ :

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} - V_{RE} ,$$

che fornisce il valore:

$$V_{CE} = 12 - 4,62 - 1,18 = 6,2 V .$$

Il punto di lavoro Q del transistor, ha coordinate ( $V_{CE} = 6,2V$ ,  $I_C = 9,84mA$ ).

Si è verificato, quindi, che il transistor ha un punto di lavoro, anche con resistenze commerciali, molto vicino a quello espresso nelle specifiche e quindi i valori resistivi calcolati e quelli commerciali, scelti da montare, sono in buon accordo con quanto richiesto nelle specifiche del progetto esaminato.

#### 4 - Polarizzazione con partitore resistivo in ingresso

La rete di polarizzazione visto in figura 8 presenta il vantaggio di stabilizzare il punto di lavoro Q, ma quello mostrato nella seguente figura 9 presenta un "grado di libertà" in più, cioè permette di agire su un parametro in più (due resistenze sulla base del BJT anziché una sola), e pertanto viene utilizzato nella stragrande maggioranza dei casi, essendo del tutto equivalente a quello precedentemente illustrato.

Per mostrare questo concetto si consideri di applicare il **teorema di Thevenin** fra i punti A e B, e di semplificare la rete resistiva composta da  $R_1$  ed  $R_2$ .

Per il suddetto teorema va calcolata la tensione del **generatore equivalente** fra i punti A e B,  $V_{AB}$ , cioè la tensione ai capi di  $R_2$ , una volta staccato il carico, che è costituito dal transistor.

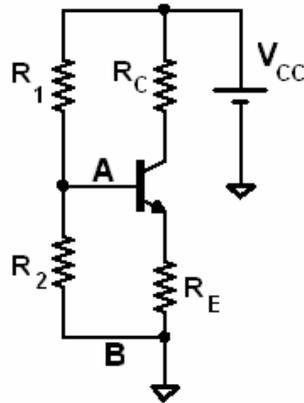


Fig. 9

Per fare questo ci si riferisce alla figura 10 che segue: il transistor è staccato e si vede solo l'azione del generatore  $V_{CC}$ . Vista dai punti A e B, la tensione  $V_{AB}$  è anche la tensione ai capi di  $R_2$ , cioè  $V_{R2}$ , che si ricava con la legge del partitore di tensione:

$$V_{AB} \equiv V_{R2} = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = V_{BB} . \quad [15]$$

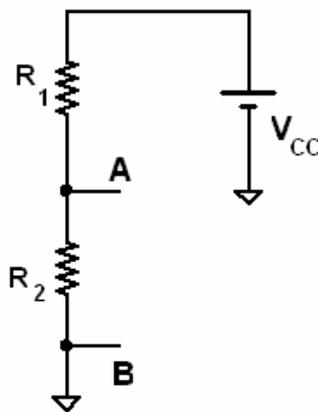


Fig. 10

Per ciò che riguarda la **resistenza equivalente**, sempre secondo l'applicazione del teorema di Thevenin, essa coincide con la resistenza "vista" dai morsetti A e B, quindi  $R_{AB}$ , a carico staccato e con il generatore di f.em.  $V_{CC}$  annullato, cioè cortocircuitato.

Si ottiene, cioè, il circuito equivalente di figura 11 per il calcolo di  $R_{AB}$ .

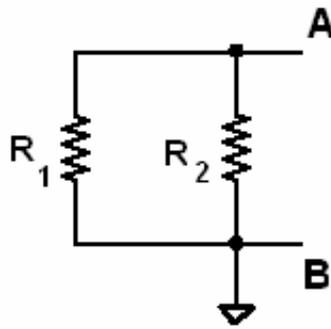


Fig. 11

Come è evidente, fra i morsetti A e B le due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$ , vengono a trovarsi in parallelo proprio a motivo del generatore  $V_{CC}$  che per annullarsi, viene sostituito da un cortocircuito (essendo generatore di tensione). Perciò la resistenza equivalente sarà ricavata dalla seguente:

$$R_{AB} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_B. \quad [16]$$

Come si può vedere dall'espressione [15], la tensione equivalente viene denominata  $V_{BB}$ , e la resistenza equivalente (espressione [16]) viene denominata  $R_B$ , proprio per evidenziare che la configurazione equivalente del circuito è la medesima di quella in figura 8 in cui, però, la base viene alimentata da un generatore autonomo (come in figura 3) denominato appunto  $V_{BB}$ .  
Lo schema quindi equivale al seguente:

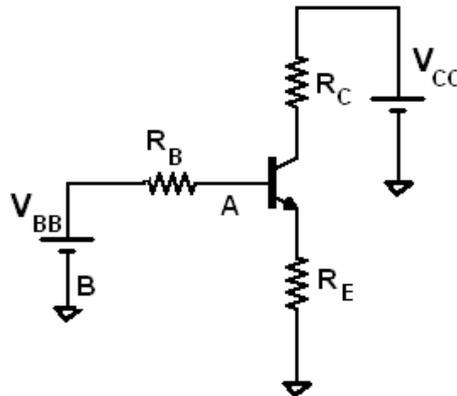


Fig. 12

E su questo si fanno poi i ragionamenti, sia in caso di progetto (determinazione del valore delle resistenze, dato un certo punto di lavoro Q desiderato), sia nel caso di analisi (determinazione del punto di lavoro Q, dati i valori delle resistenze).

A tale fine si procede come segue.

### Esercizio 3

Si desidera polarizzare un transistor con  $\beta = 100$ , data  $V_{CC} = 14V$ ,  $I_C = 6mA$ .

Non essendo specificati gli altri parametri, si procede con dei criteri di massima che vanno bene per un progetto generico, i dati da imporre sono i seguenti:

$$V_{RE} = V_{CC}/10, \quad [17]$$

$$R_B = 4-9 \text{ volte } R_E, \quad [18]$$

$$V_{CE} = V_{CC}/2. \quad [19]$$

Quest'ultima condizione serve a mantenere il punto di lavoro del transistor lontano sia dalla zona di saturazione sia da quella di interdizione quando verrà applicato un segnale sinusoidale, o più in generale variabile nel tempo, all'ingresso dello stadio amplificatore stesso.

Per cui, visto che non viene richiesto altrimenti, si pone:  $V_{RE} = 1,4V$ ,  $V_{CE} = 7V$  e  $R_B = 9R_E$  il cui valore verrà calcolato nel prosieguo. Come sempre  $V_{BE} = 0,7 V$ .

Dall'espressione della maglia di uscita [8] si ricava il valore necessario di  $V_{RC}$  :

$$V_{RC} = V_{CC} - V_{CE} - V_{RE} = 14 - 7 - 1,4 = 5,6 V ,$$

dalla quale si ricava il valore necessario per  $R_C$ :

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{5,6}{6 \cdot 10^{-3}} = 933 \Omega .$$

Ricordando che essendo il valore di  $\beta$ , piuttosto grande ( $\beta \gg 10$ ), si può ipotizzare con ottima approssimazione che  $I_E = I_C$ .

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_C} = \frac{1,4}{6 \cdot 10^{-3}} = 233 \Omega .$$

Per quanto ipotizzato sul valore da imporre ad  $R_B$ , si ha che deve essere:

$$R_B = 9 \cdot R_E = 9 \times 233 = 2097 \Omega .$$

Il valore di  $I_C$  imposto, condiziona, anche quello di  $I_B$ , dalla seguente relazione matematica:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,06 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^{-6} A = 60 \mu A .$$

Dall'equazione [12] che viene adattata cambiando  $V_{CC}$  in  $V_{BB}$ , (poiché si è applicato il teorema di Thevenin), si ottiene, sostituendo:

$$V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_C ,$$

dalla quale, sostituendo i valori numerici noti, si ricava:

$$V_{BB} = 2097 \times 60 \cdot 10^{-6} + 0,7 + 1,4 = 2,26 V .$$

Per ricavare i valori necessari di  $R_1$  ed  $R_2$ , si deve risolvere un sistema di due equazioni in due incognite (appunto  $R_1$  ed  $R_2$ ), dato da:

$$V_{BB} = V_{R2} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} = 2,26 V ,$$

$$R_B = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = 2,097 k\Omega .$$

Sostituendo il valore noto di  $V_{CC}$  nella prima espressione, il sistema diventa:

$$\frac{14 \times R_2}{R_1 + R_2} = 2,26 ,$$

$$\frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = 2,097 .$$

Attenzione: viene omessa la notazione in kohm per la seconda espressione, dando per assodato che il risultato dei valori di  $R_1$  ed  $R_2$  sarà in kohm.

Da qui, dividendo entrambi in termini della prima equazione per 14 ed entrambi quelli della seconda per  $R_1$ , si ottiene:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,26}{14} ,$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,097}{R_1} .$$

In queste due equazioni, essendo uguali i due primi termini, saranno, di conseguenza, uguali fra loro anche i "secondi termini", cioè si avrà che:

$$\frac{2,26}{14} = \frac{2,097}{R_1} .$$

Da cui si ricava:

$$R_1 = 14 \times \frac{2,097}{2,26} = 12,99 \text{ k}\Omega .$$

Per ricavare il valore di  $R_2$ , ora, basta sostituire quello trovato per  $R_1$  in una delle due equazioni; si sceglie di farlo nella prima, ottenendo (ricordando sempre che si omette la notazione per i kohm e che il risultato che si otterrà è dato in kohm):

$$\frac{14 \times R_2}{12,99 + R_2} = 2,26 ,$$

da cui si ricava che:

$$14 \times R_2 = 2,26 \times (12,99 + R_2) ,$$

ovvero anche che:

$$R_2 = \frac{2,26}{14} \times (12,99 + R_2) = 0,161 \times (12,99 + R_2) ,$$

che svolgendo i calcoli porta alla:

$$R_2 = 2,091 + 0,16 \cdot R_2,$$

cioè ancora:

$$R_2 - 0,16 \cdot R_2 = 2,091,$$

cioè :

$$R_2 (1 - 0,16) = 2,091.$$

Infine si ottiene:

$$R_2 \cdot 0,84 = 2,091,$$

che conduce per  $R_2$  al valore:

$$R_2 = \frac{2,091}{0,84} = 2,49 \text{ k}\Omega.$$

Con ciò l'esercizio di progetto è terminato, ottenendo i seguenti valori calcolati con i corrispondenti valori commerciali che saranno utilizzati:

- $R_1$  = calcolato 12,99kohm, valore commerciale 12kohm;
- $R_2$  = calcolato 2,49kohm, valore commerciale 2,2kohm;
- $R_C$  = calcolato 933ohm, valore commerciale 1kohm;
- $R_E$  = calcolato 233ohm, valore commerciale 270ohm.

In generale si è scelto di approssimare il valore di  $R_2$  al valore commerciale più basso dei due possibili (2,2 e 2,7kohm) e il valore di  $R_E$  al più alto dei due possibili (220 e 270ohm) con l'intento di limitare il valore di  $I_C$ : diciamo che è preferibile un valore di  $I_C$  più basso del desiderato, piuttosto che uno più alto, in mancanza di specifiche indicazioni di progetto.

NOTA: il criterio di dimensionamento del valore di  $R_B$  (formula [18]) non è l'unico, ma se ne può utilizzare anche un altro, che consiste nel fissare la corrente che scorre nelle due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore d'ingresso del BJT, e verificare la condizione [18] sul valore così ottenuto di  $R_B$ .

Come secondo esercizio si svolge la verifica con i valori commerciali ora elencati, per calcolare il punto di lavoro Q e verificare le differenze riscontrate rispetto ai valori desiderati in specifica. I rimanenti dati numerici rimangono invariati ( $V_{CC}$ ,  $\beta$  e  $V_{BE}$  del BJT).

Partendo dalla maglia di ingresso nelle equazioni del transistor, si ricava il valore della tensione  $V_{R2}$ , utilizzando la formula già usata, del partitore di tensione (sostanzialmente si suppone di trascurare il carico costituito su  $R_2$  dalla base del transistor):

$$V_{R2} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{14 \times 2,2}{12 + 2,2} = 2,17 \text{ V}.$$

Da notare che le resistenze sono state inserite con i loro valori direttamente espressi in  $k\Omega$ , portando il risultato per  $V_{R2}$ , direttamente in Volt.

Poiché la tensione  $V_{BE}$  ha un valore noto, che per il silicio è pari a 0,7 V, conoscendo il valore di  $V_{R2}$  e quello di  $V_{BE}$ , ci si può ricavare quello di  $V_{RE}$ , cioè della tensione ai capi della resistenza di emettitore, ovvero fra emettitore e la massa:

$$V_{RE} = V_{R2} - V_{BE} = 2,17 - 0,7 = 1,47 \text{ V}$$

Ottenuto tale dato, poiché  $I_E$  è pari ad  $I_C$ , si ottiene il valore di  $I_C$ :

$$V_{RE} = I_C \cdot R_E \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{1,47}{270} = 5,4 \text{ mA} .$$

Si ricava ora il valore della corrente di base  $I_B$ :

$$I_C = \beta I_B \Rightarrow I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} ,$$

per cui:

$$I_{BQ} = \frac{5,4 \cdot 10^{-3}}{100} = 54 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 54 \mu\text{A} .$$

Noto il valore di  $I_C$ , si può ricavare quello di  $V_{RC}$ :

$$V_{RC} = I_{CQ} \cdot R_C = 5,4 \cdot 10^{-3} \times 1 \cdot 10^3 = 5,4 \text{ V} .$$

Da questi dati, tramite l'equazione [13] è possibile ricavare il valore di  $V_{CE}$ ; si ha:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} - V_{RE} \Rightarrow V_{CEQ} = 14 - 5,4 - 1,46 = 7,14 \text{ V} .$$

Si ottengono quindi i seguenti valori per il punto di lavoro Q:  $I_{CQ} = 5,4\text{mA}$ , (il valore di  $I_B$  è una diretta conseguenza di quello di  $I_C$ ),  $V_{CEQ} = 7,14\text{V}$ .

Dalle specifiche iniziali si aveva la richiesta di  $I_C = 6\text{mA}$ ,  $V_{RE} = 1,4\text{V}$ ,  $V_{CE} = 7\text{V}$ .

Come si osserva i valori ottenuti con le resistenze di tipo commerciale differiscono di poco da quanto richiesto e pertanto il progetto fornisce un buon risultato.