

1. Il transistor bipolare a giunzione (BJT)

1.1. Introduzione

Il *transistor bipolare a giunzione (BJT)* è probabilmente il dispositivo che maggiormente ha influenzato la tecnologia e quindi, in modo più o meno diretto, la storia del nostro secolo. Dalla sua invenzione, che risale al 1948 presso i laboratori *Bell*, molte sono state le versioni che si sono susseguite con modifiche e migliorie, che hanno portato ad una continua crescita delle prestazioni rispetto al primo prototipo. Il transistor aveva ed ha, rispetto ai dispositivi amplificatori a lui antecedenti (le valvole), un certo numero di vantaggi (e, ad onor del vero, qualche svantaggio) quali l'integrabilità, l'affidabilità, il costo, ecc...

I dispositivi o circuiti elettronici *amplificano* quando è possibile ottenere il controllo di una grande variazione di una grandezza di uscita per mezzo di una piccola variazione di una grandezza in ingresso. In funzione di quale grandezza venga pilotata in uscita e di quale sia quella a pilotare in ingresso, si distinguono 4 tipi fondamentali di amplificatori, secondo lo schema riportato in tab. 1-1:

grandezza in ingresso	grandezza in uscita	tipo di amplificazione
V	V	di tensione
V	I	di conduttanza
I	V	di resistenza
I	I	di corrente

tab. 1-1

BJT è l'acronimo di *Bipolar Junction Transistor* ossia transistor bipolare a giunzione. Questo dispositivo infatti nasce da due "giunzioni", essendo costituito da una regione di tipo *n* (o *p*) fra due di tipo *p* (o *n*) come schematizzato in figura 1. Per ognuna delle giunzioni va considerata una zona svuotata, in figura non riportata per semplicità, in modo analogo a quanto già visto nel caso del diodo. La figura 2 mostra la simbologia che si adotta per il BJT.

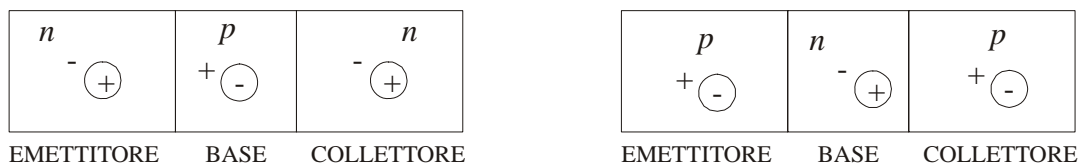


figura 1

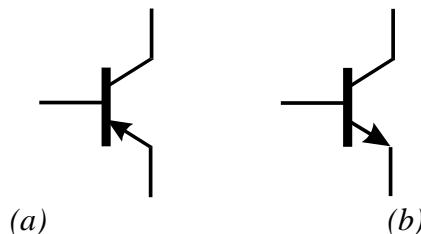


figura 2: (a) BJT di tipo pnp, (b) BJT di tipo npn

La prima regione che si incontra è detta di *emettitore*, la seconda, posta al centro della struttura, è detta di *base*, l'ultima è detta di *collettore*. Nello schema di figura 2 l'emettitore è individuato dal terminale con la freccia.

1.2. Polarizzazione delle giunzioni

Per poter amplificare si ha necessità che il BJT lavori nella sua regione attiva, e qui rimanere sia per escursioni positive che negative del segnale in ingresso. Per ottenere ciò è necessario quindi che con un segnale di ingresso nullo si sia nella parte centrale della regione attiva.

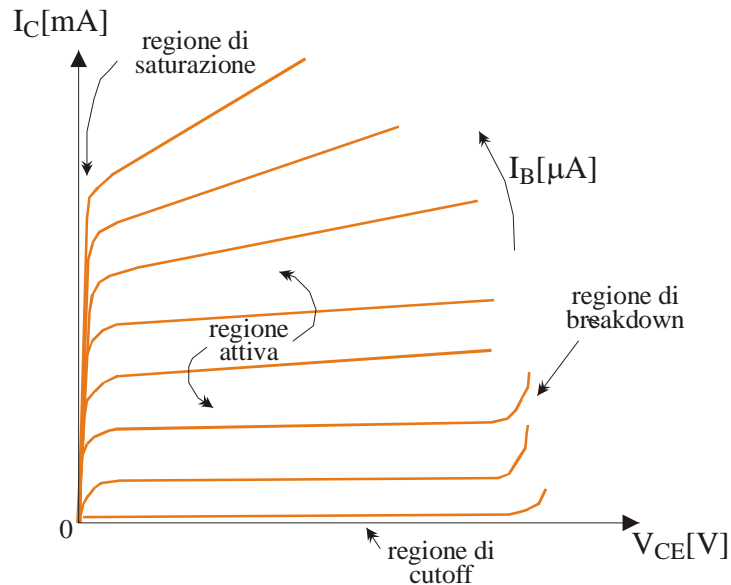


figura 3

⇒ circuito di polarizzazione

1.3. Elemento comune

Il segnale in ingresso si applica tra due punti del circuito
il segnale di uscita si preleva da due punti del circuito

⇒ essendo il BJT un dispositivo a tre terminali necessariamente uno sarà comune tra ingresso ed uscita. Questo elemento determinerà la tipologia di configurazione circuitale adottata.

In funzione delle possibili combinazioni di polarizzare delle due giunzioni di un transistor, si hanno comportamenti diversi del dispositivo, che è possibile riassumere secondo la seguente tabella:

emettitore-base	base-collettore	
pol. diretta	pol. diretta	⇒ regione saturazione
pol. diretta	pol. inversa	⇒ regione attiva
pol. inversa	pol. diretta	⇒ regione interdizione
pol. inversa	pol. inversa	⇒ regione interdizione

Esaminiamo il significato di ognuna delle regioni di funzionamento, partendo dalla più significativa, ossia la regione attiva, per cui la giunzione emettitore-base è polarizzata direttamente, mentre la giunzione base-collettore è polarizzata inversamente (è chiaro che, scelte le tensioni da applicare al dispositivo, non è possibile scambiare un BJT di tipo *nnp* con uno di tipo *pnnp*).

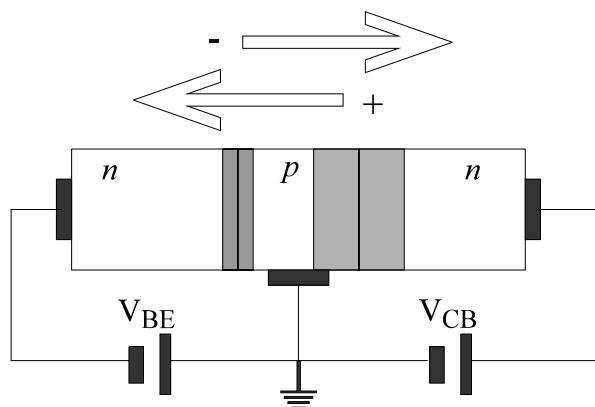


figura 4

Per illustrare ora il funzionamento del BJT consideriamone uno di tipo *nnp*; il discorso varrà analogo, ma duale, per il BJT di tipo *pnnp*. Ricordiamo che una polarizzazione diretta favorisce il passaggio di portatori maggioritari, mentre una polarizzazione inversa favorisce quello dei minoritari. Scegliendo le polarizzazioni come in figura, le regioni svuotate saranno rispettivamente: quella di emettitore-base (in polarizzazione diretta) ridotta, mentre quella di base-collettore (in polarizzazione inversa) allargata.

Per capire il funzionamento del transistor si propone ora di seguire il cammino che gli elettroni fanno per attraversarlo dall'emettitore al collettore, attraverso la regione di base. Il discorso sarà poi identico ma duale per le lacune (che attraverseranno il BJT dal collettore alla base). Quando il valore della tensione di polarizzazione diretta V_{BE} supera il valore di soglia V_{γ} , si ha un passaggio di elettroni dall'emettitore alla base, ossia da una regione dove sono portatori di maggioranza in una dove divengono portatori di minoranza, visto il drogaggio di tipo *p* della base. Mentre la regione di emettitore viene usualmente drogata pesantemente in modo da fornire più elettroni possibili per la conduzione, la regione di base è solitamente meno drogata, in modo da diminuire la possibile ricombinazione degli elettroni che arrivano dall'emettitore con le lacune presenti in base. In effetti minore sarà il numero di elettroni che giungeranno al collettore, più bassa sarà la corrente. La polarizzazione inversa favorirà ora il passaggio degli elettroni, divenuti portatori minoritari, dalla base al collettore.

La minoranza di elettroni che si ricombinano in base crea una corrente I_B al terminale. Tale corrente è dovuta a lacune che dal circuito esterno entrano in base (o dualmente da elettroni che escono dalla base e passano al circuito esterno) per sostituire le lacune ricombinate con gli elettroni provenienti dall'emettitore. La corrente I_B che nasce è solo una piccola percentuale (1-2%) della corrente di collettore I_C . Ciò è essenziale per poter utilizzare il BJT come elemento amplificatore.

È ora chiaro come il termine bi-polare nell'acronimo del BJT è indice del fatto che i portatori sono sia elettroni che lacune.

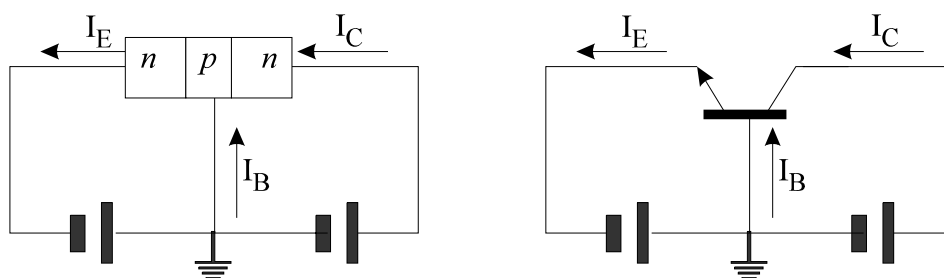


figura 5

La figura 5 mostra il verso convenzionale delle correnti che sono nella direzione delle lacune. Tenuto conto dei versi di percorrenza, quindi dei segni, la somma delle correnti dovrà essere nulla in rispetto delle leggi di Kirchoff, quindi

$$I_E = I_B + I_C \quad (\text{eq. 1-1})$$

1.4. Esempi di curve caratteristiche: configurazione a base comune (CB)

Introducendo la trattazione del BJT si è fatto riferimento alla polarizzazione di figura 5, in cui si è scelto di porre il terminale di base a massa. Così facendo le tensioni di polarizzazione delle batterie sono entrambe riferite al nodo di base, il quale risulta comune sia al circuito di emettitore (circuito di ingresso) sia al circuito di collettore (circuito di uscita). In questo modo, risultando la base comune ai due circuiti, il tipo di configurazione che ne consegue viene detta *a base comune*.

Le “caratteristiche di ingresso” sono curve che stabiliscono il legame fra tensione e corrente del circuito di ingresso, parametrizzate dalla tensione di uscita. Le “caratteristiche di uscita” invece, sono curve che stabiliscono il legame fra tensione e corrente del circuito di uscita, parametrizzate dalla corrente di ingresso.

1.4.1. Caratteristica di ingresso

Per analizzare la caratteristica di ingresso del BJT configurato a base comune, consideriamo lo schema di figura 6a, in cui è polarizzata la sola giunzione emettitore-base. In questo caso siamo nelle condizioni già ricavate per il diodo in quanto la regione di collettore è come non esistesse visto che non risulta collegata. Si ripropone quindi con la figura 6b la curva caratteristica di figura, con $I = I_B = I_E$ e $V = V_{BE}$.

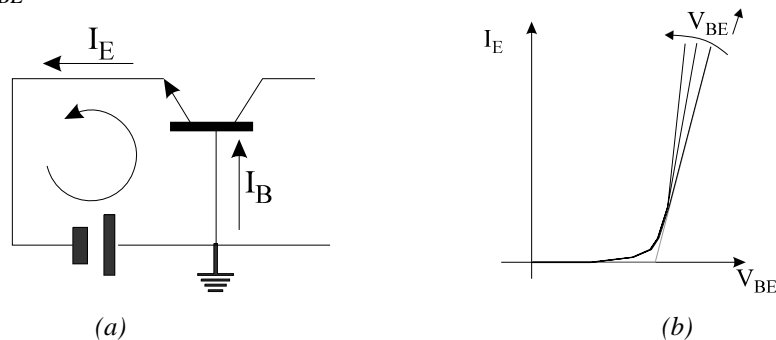
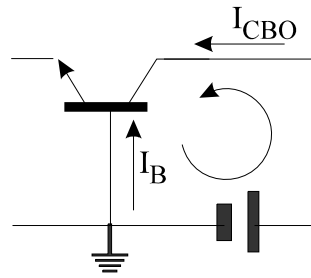


figura 6: (a) schema del circuito di ingresso di un BJT di tipo npn, (b) caratteristica di ingresso

Le curve della figura 6b sono inoltre parametrizzate dalla V_{BC} . Infatti maggiore è quest'ultima e maggiore sarà la polarizzazione inversa sulla giunzione e, di conseguenza, più facile sarà il passaggio degli elettroni (cariche minoritarie) dalla base al collettore..

1.4.2. Caratteristica di uscita

Per analizzare la caratteristica di uscita del BJT configurato a base comune, consideriamo lo schema di figura in cui è polarizzata la sola giunzione base-collettore. In questo caso, col terminale di emettitore aperto, l'unica corrente che circolerà sarà quella di saturazione inversa dovuta ai soli portatori minoritari generati termicamente. Tale corrente è detta comunemente I_{CB0} (ossia corrente fra collettore e base “*CB*” col terminale di emettitore aperto “*o=open*”).



(a)

(b)

fig. 1-1: (a) schema del circuito di uscita di un BJT di tipo npn, (b) caratteristica di uscita

In effetti, considerando lo schema completo del BJT, con entrambe le polarizzazioni come da fig., la I_C sarà data dalla somma di I_{CB0} con la corrente I_E proveniente dall'emettitore parzialmente ridotta per la ricombinazione in base di una piccola percentuale di elettroni. Per tener conto di questo fenomeno la I_E viene moltiplicata per un coefficiente α che (grazie a passaggi tecnologici in fase di realizzazione del BJT che riducono il fenomeno della ricombinazione in base), è molto prossimo all'unità (valori tipici sono compresi fra 0.9 e 0.99). La I_C sarà quindi:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad (\text{eq. 1-2})$$

Il parametro α , funzione del processo tecnologico adottato e quindi diverso a seconda del tipo di transistor che si sceglie, definisce così la parte di portatori che, iniettati dall'emettitore, riescono a superare la base senza ricombinarsi. Visto il valore di α molto prossimo all'unità, ed il valore molto basso di I_{CB0} , potremo ritenere valide, in molte circostanze, le approssimazioni:

$$I_C \cong I_E, \quad (\text{eq. 1-3})$$

$$\alpha \cong \frac{I_C}{I_E} \quad (\text{eq. 1-4})$$

Analizziamo ora la caratteristica di uscita del BJT configurato a base comune, consideriamo lo schema completo con entrambe le polarizzazioni diretta (emettitore-base) ed inversa (base-emettitore). Abbiamo già notato come le "caratteristiche di uscita", sono curve che stabiliscono il legame fra tensione e corrente del circuito di uscita, parametrizzate dalla corrente di ingresso.

NOTA: In effetti l'eq. 5-2 e le equazioni da essa derivate, valgono con il tipo di polarizzazione adottata: diretta per emettitore-base, inversa per base-emettitore. Considerando invece una polarizzazione di base-collettore generica, dovremo sostituire il termine I_{CB0} dell'eq.5-2 con

il termine visto per il diodo, ossia: $I = I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{\eta V_T} \right)} - 1 \right]$ (dall'eq. 4-1), operando le

sostituzioni: $V_{CB}=V$, $I_{CB0}=I_0$. Così facendo appare evidente come la corrente di uscita I_C sia funzione della tensione di uscita V_{CB} e della corrente di ingresso I_E : è questo il motivo della parametrizzazione di cui si è detto delle caratteristiche di uscita.

Analizziamo l'andamento della I_C in funzione di V_{CB} :

la I_C è somma dei termini αI_E ed I_{CB0} . Il termine della corrente di emettitore sarà presente solo se la giunzione base-collettore presenta una zona svuotata, quindi un campo elettrico che favorisce lo spostamento degli elettroni che sono portatori minoritari dalla base al collettore. Tale campo sarà presente con V_{CB} nullo e si incrementerà con la polarizzazione inversa, ossia con V_{CB} crescente: in entrambi i casi alla frazione α della corrente di emettitore sarà possibile quindi formare la corrente

di collettore. Tale corrente comunque avrà un valore costante all'ulteriore aumento di V_{CB} , saturando appunto al valore αI_E .

Quando invece V_{CB} avrà valori negativi, restringerà la barriera di giunzione fino a che, superato il valore di soglia V_γ , si arriverà alla polarizzazione diretta anche per questa giunzione e gli elettroni in base, portatori minoritari, non potranno più raggiungere il collettore. Il termine αI_E non potrà più dare un contributo alla I_C . Questo andamento è schematizzato in fig. __, in cui le curve sono parametrizzate con I_E : a maggior valore di essa corrisponderà un più alto valore di saturazione della I_C .

fig. 1-2

1.5. Effetto early

Le curve riportate in fig. 5-7 in effetti presentano un andamento che non satura ad un preciso valore di I_C al crescere di V_{CE} , ma hanno tendenza ad avere una pendenza via via crescente all'aumentare della I_E . Ciò è dovuto ad un fenomeno denominato *effetto EARLY*¹, dal nome di colui che per primo l'ha analizzato. In effetti ciò che accade è che al crescere di V_{CE} aumenta la polarizzazione inversa della giunzione base-collettore, che ha come conseguenza un aumento della zona svuotata, che si estende in parte nella regione di base ed in parte in quella di collettore. Ciò comporta che la regione di base che gli elettroni devono attraversare in "pericolo" di ricombinazione con le lacune diminuisce, quindi diminuisce il numero di elettroni che si ricombinano, e ne corrisponde un aumento della corrente.

Un altro parametro importante che definisce le caratteristiche peculiari di ogni BJT è β . Esso si definisce dal rapporto di due correnti (quindi adimensionale come è α):

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (\text{eq. 1-5})$$

Dalle equazioni 5.1, 5.4 e 5.5 con opportuni passaggi matematici si ricava una relazione fra i due coefficienti α e β :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{eq. 1-6})$$

Il valore numerico di β è legato, così come vale per α , ai processi di realizzazione tecnologica del BJT. Valori tipici per esso vanno da 50 a 200 (anche se non è raro trovare transistor con valori di β anche maggiori).

1.6. Studio del BJT mediante il circuito equivalente: il transistor come quadrupolo

Per lo studio del comportamento del transistor ne è spesso utile una rappresentazione in termini di circuito equivalente. Esso viene quindi visto come quadrupolo con una porta di ingresso cui competono tensione v_1 e corrente i_1 , ed una porta di uscita cui competono tensione v_2 e corrente i_2 , secondo lo schema proposto in figura.

¹ J.M. Early, *Proc. IRE*, **40**, 1401 (1952)

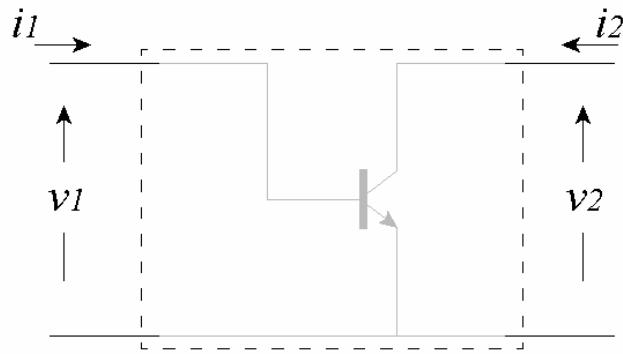


figura 7: rappresentazione schematica di un transistor come quadripolo

In funzione del tipo di legame che viene proposto tra i segnali di ingresso ed uscita, la rappresentazione può essere fatta in termini di resistenze, ammettenze, numeri puri.

Una possibilità è, ad esempio, trattare le correnti di ingresso ed uscita come variabili indipendenti, mentre le tensioni di ingresso ed uscita come variabili dipendenti. In questo caso i legami tra variabili indipendenti e variabili dipendenti avranno dimensioni di ammettenze y . Si ha quindi:

$$\begin{cases} i_1 = y_{11}v_1 + y_{12}v_2 \\ i_2 = y_{21}v_1 + y_{22}v_2 \end{cases}$$

o, in rappresentazione equivalente ma in termini matriciali:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

Altra possibilità è, ad esempio, data dallo scegliere come variabili indipendenti v_1 ed i_2 mentre come variabili dipendenti v_2 ed i_1 . In tal caso i coefficienti della matrice di legame hanno dimensioni che possono essere sia di impedenze, sia di ammettenze, sia numeri puri. Per questa ragione tali coefficienti vengono definiti ibridi (hybrid) ed indicati con la lettera "h":

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{cases}$$

o, in rappresentazione equivalente ma in termini matriciali:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

Nello studio dei transistori lo schema equivalente solitamente adottato è quello che fa ricorso all'uso dei parametri ibridi. Applicando tale schematizzazione alle tre possibili configurazioni per i circuiti a transistori, emettitore comune (CE), base comune (CB), collettore comune (CC), si hanno tre distinte possibilità di definizione del set dei parametri ibridi. Si adotta quindi la convenzione di porre due pedici di identificazione dei parametri h , il primo col significato di designare il tipo di legame:

"i" (input) ossia tra le due grandezze di ingresso

"o" (output) ossia tra le due grandezze di uscita

“f” (forward) ossia una grandezza di uscita rispetto ad una grandezza di ingresso
 “r” (reverse) ossia una grandezza di ingresso rispetto ad una grandezza di uscita

il secondo pedice con il significato di designare il tipo di configurazione circuitale:

“e” (emitter) valido per la connessione ad emettitore comune

“b” (base) valido per la connessione a base comune

“c” (collector) valido per la connessione a collettore comune

Nel caso particolare della tipologia del circuito ad emettitore comune, per la quale:

$$v_1 \rightarrow v_{be} \quad ; \quad i_1 \rightarrow i_b \quad ; \quad v_2 \rightarrow v_{ce} \quad ; \quad i_2 \rightarrow i_c$$

si ha:

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \\ i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \end{cases}$$

eq. 7

Dalla definizione stessa dei parametri ibridi può essere ricavato il circuito equivalente di un transistor. Nel caso della tipologia ad emettitore comune, ad esempio, per la quale valgono le relazioni riportate nella eq. 7, la tensione di ingresso v_{be} è pari alla somma delle tensioni $h_{ie}i_b$ ed $h_{re}v_{ce}$, che formano perciò delle tensioni poste in serie. La corrente di uscita i_c è pari invece alla somma delle due correnti $h_{fe}i_b$ ed $h_{oe}v_{ce}$, che formano perciò il parallelo di correnti.

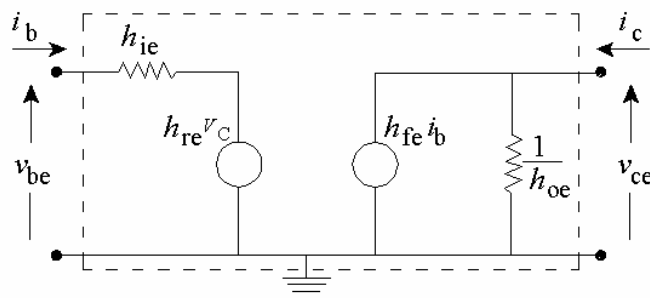


figura 8

1.6.1. Stadio amplificatore con BJT in configurazione CE

È di seguito riportato lo schema di uno stadio amplificatore con BJT in configurazione ad emettitore comune (CE)

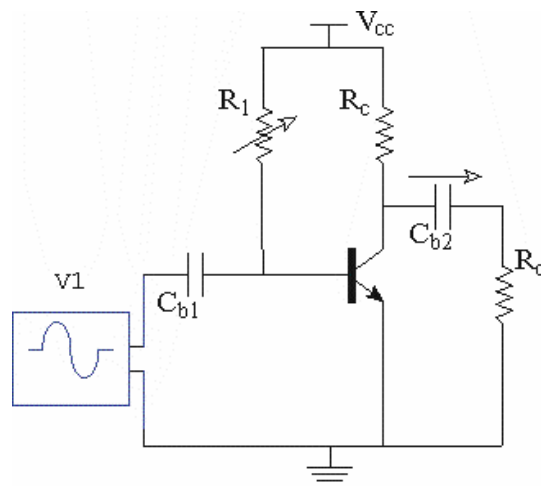


Figura 9

Dalla legge di Kirchhoff applicata alla maglia (di polarizzazione) di uscita del BJT si ha:

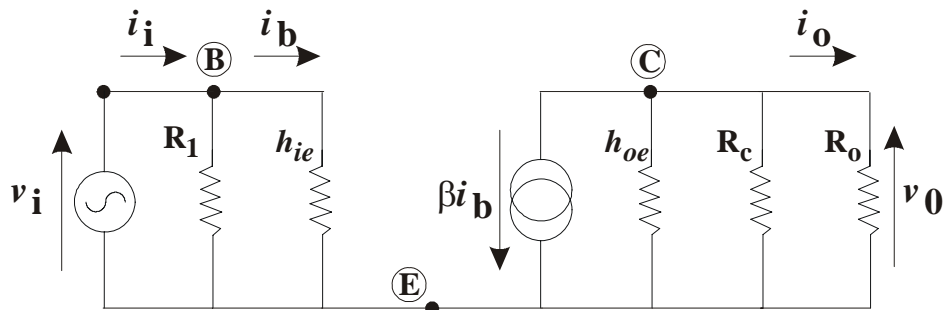
$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

equazione utile per tracciare la retta di carico sul grafico delle caratteristiche di uscita del transistor. Il punto di lavoro può essere determinato graficamente dall'intercetta di questa retta con le curve caratteristiche del transistor una volta noto il valore di corrente I_B . Quest'ultimo può essere facilmente ricavato:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1}$$

Si è posto il trimmer R_1 al posto della resistenza di polarizzazione di base per consentire di variarne il valore ed avere un riscontro sulle caratteristiche sperimentali di funzionamento del circuito.

1.6.2. Analisi tramite lo schema equivalente a parametri ibridi



A titolo di esempio, si voglia determinare il valore di amplificazione A_v dello stadio sapendo che:

per il transistor: $h_{ie}=1.5\text{k}\Omega$, $h_{fe}=70$, $h_{oe}=25\mu\text{S}$, $h_{re}=0$

$R_1=220\text{k}\Omega$, $R_u=R_C//R_o=4.7\text{k}\Omega$

Per risolvere il circuito si ipotizza che alle frequenze di lavoro i condensatori siano dei corto circuiti.

$$i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$$

$$i_o = -\frac{1}{\frac{1}{R_C} + h_{oe}} h_{fe} i_b = \frac{1}{1 + h_{oe} R_C} h_{fe} \frac{v_i}{h_{ie}}$$

$$v_o = i_o R_C$$

quindi

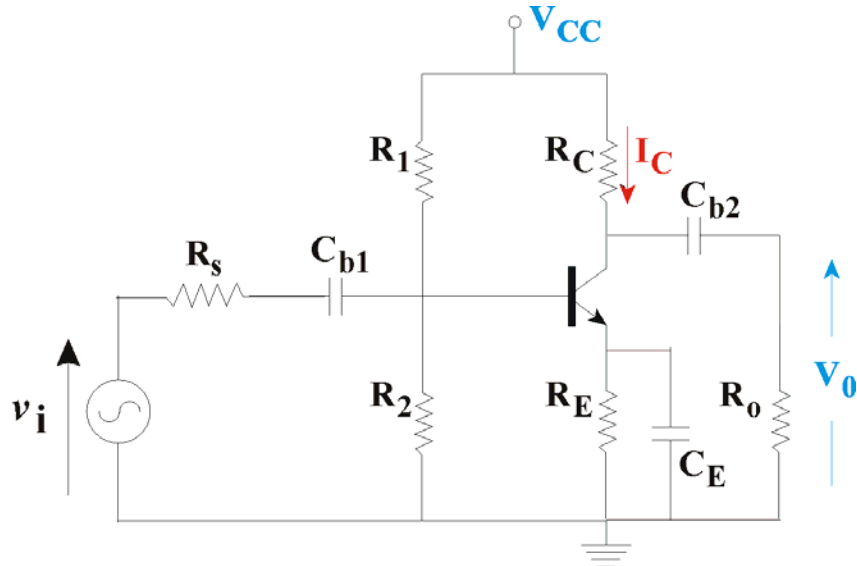
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \frac{R_C}{1 + h_{oe} R_C}$$

con i valori numerici proposti diventa:

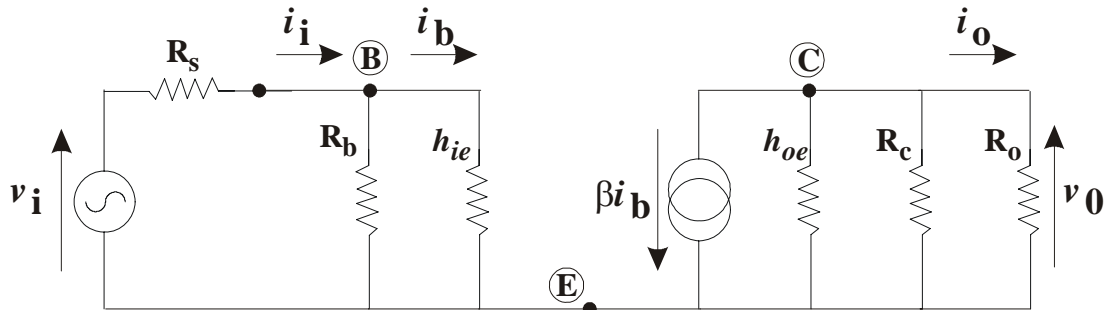
$$A_v \cong -190$$

1.1.1. Schema completo

In questa configurazione è stata aggiunta una capacità C_E in parallelo alla resistenza di emettitore R_E , in tal modo l'effetto della resistenza lo si ottiene quando lo si desidera ossia per polarizzazione statica, mentre per le frequenze di lavoro tale resistenza è opportunamente cortocircuitata dalla capacità.



Per studiare tale circuito è utile ricorrere allo schema equivalente per il transistor, per cui, alle frequenze di interesse, diventa:



A titolo di esempio, si determinino i valori di amplificazione in tensione, A_v , in corrente, A_i , la resistenza di uscita R_u dello stadio sapendo che:

per il transistor: $h_{ie}=3k\Omega$, $h_{fe}=150$, $h_{oe}=50\mu S$, $h_{re}=0$

$R_1=220k\Omega$, $R_u=R_C//R_o=4.7k\Omega$

Per risolvere il circuito si ipotizza che alle frequenze di lavoro i condensatori siano dei corto circuiti (in questo caso quindi la resistenza RE sarà by-passata da un corto).

Per le componenti incrementali R_1 ed R_2 sono in parallelo, così come lo sono R_C ed R_o .

La resistenza di ingresso R_i dello stadio è quindi

$$R_i = R_1 // R_2 // h_{ie} \cong 2.2k\Omega$$

quindi:

$$i_i = \frac{v_i}{R_s + R_i}$$

$$v_{be} = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_i \cong 0.8v_i$$

$$i_b = \frac{v_{be}}{h_{ie}}$$

la conduttanza totale collettore-emettitore G_{ce} è pari a:

$$G_{ce} = h_{oe} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_o}$$

quindi:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe}i_b}{G_{ce}} \cong -49$$

Per le correnti:

$$i_o = \frac{v_o}{R_o}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \cong -69$$

La resistenza di uscita R_u , definita come la resistenza “vista” ai capi della resistenza di carico R_o , “guardando” verso l’amplificatore:

$$R_u = R_C // h_{oe} = 3.3 \text{ k}\Omega$$