

TRANSISTOR

I transistor si riconducono a tre tecnologie fondamentali:

BJT (Bipolar Junction Transistor)

JFET (Junction FET Field Effect Transistor)

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

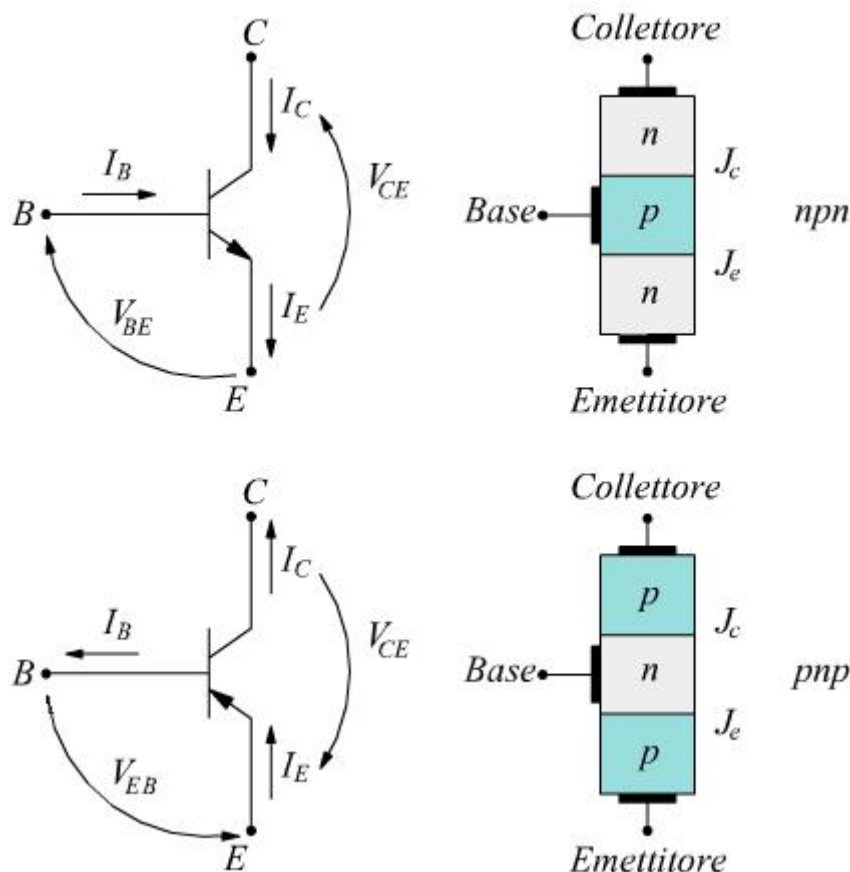
Esamineremo in questa sede unicamente i transistor BJT.

Il transistor o BJT (bipolar junction transistor) è un componente elettronico che viene prodotto in forma discreta, come componente singolo o in forma integrata, cioè all'interno di circuiti integrati utilizzando per la sua costruzione il silicio, noto come materiale semiconduttore. Viene anche chiamato transistor bipolare perchè in esso, il processo di conduzione coinvolge portatori di carica di entrambe le polarità, positiva e negativa; questo lo distingue da un altro transistor: il JFET : transistor ad effetto campo (junction field effect transistor) dove la conduzione vede coinvolti portatori di carica di un solo tipo, elettroni o lacune.

Il transistor viene usato in elettronica indifferentemente come componente analogico (amplificatore di corrente o di tensione) o logico (come interruttore) ha come caratteristica principale quella di essere pilotato in corrente, a differenza del **JFET** che è, invece, comandato in tensione.

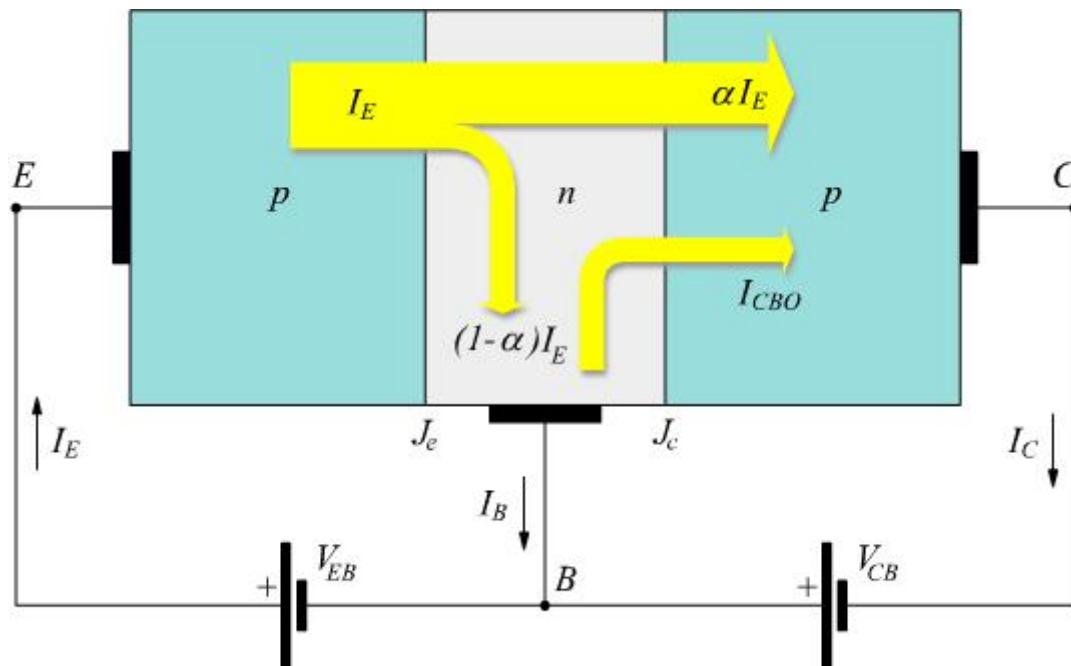
E' stato realizzato per la prima volta nei laboratori Bell nel 1948, inizialmente usando come materiale di costruzione un altro materiale semiconduttore: il germanio. Da quel momento e per i successivi decenni il suo utilizzo ha subito incrementi impressionanti giustificato anche dalla messa a punto di tecniche di miniaturizzazione applicate per la sua produzione.

La struttura di un transistor bipolare si riconosce perchè costituita da tre regioni adiacenti (contigue) di materiale semiconduttore drogate alternativamente n e p. In questo disegno sono rappresentate le due tipologie di BJT che si possono ottenere: il modello npn ed il modello pnp dove sono evidenziate le giunzioni di collettore J_c e di emettitore J_e .



Il modello npn è più diffuso ma quando si illustra il funzionamento del dispositivo lo si fa normalmente col modello pnp perchè in esso l'andamento delle correnti coincide con il flusso dei portatori di carica positiva, cioè le lacune.

Chi comanda il funzionamento è sempre la giunzione fra base-emettitore J_e che in questo caso viene polarizzata direttamente, mentre la giunzione J_c fra base e collettore viene polarizzata inversamente. Teoricamente è come avere due diodi contrapposti, uno polarizzato direttamente percorso da una corrente diretta e l'altro polarizzato inversamente e ovviamente percorso da una corrente inversa, piccola ma non trascurabile. Complessivamente la situazione è quella rappresentata nel disegno.

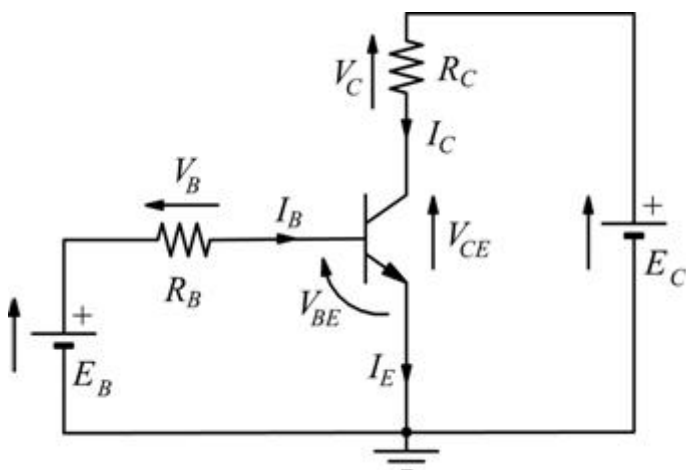


In virtù della polarizzazione diretta J_e viene attraversata da una corrente di diffusione I_E costituita prevalentemente da lacune; giunte nella base le lacune si elidono solo parzialmente con gli elettroni liberi.

La ricombinazione dà luogo alla corrente di base I_B che risulta essere molto più piccola di I_E .

Dal punto di vista geometrico lo spessore della base di tipo n è più sottile delle zone di collettore e di emettitore di tipo p; la gran parte delle lacune proseguono verso il terminale di collettore in quantità I_E ; un valore di $\approx 0,99$ è plausibile in condizioni ordinarie. Una seconda corrente I_{CBO} viene convogliata verso il terminale collettore, ma questa è la corrente inversa di saturazione della giunzione J_c polarizzata inversamente. Assieme ad I_E la I_{CBO} andrà a costituire la corrente di collettore I_C .

Per un transistor di tipo npn il comportamento sarà identico ma il verso delle correnti sarà invertito, perchè dovuto al movimento degli elettroni e dunque sarà contrario a quello descritto per il pnp.



Il collegamento per il funzionamento di un transistor npn, è quello disegnato a fianco.

Essendo in completa analogia col caso pnp suddetto possiamo quantificare:

$$\begin{cases} I_C = \alpha I_E + I_{CBO} & \longrightarrow & I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + I_{CBO} \\ I_B = (1 - \alpha) I_E \\ I_E = I_C + I_B \end{cases}$$

ricordando che $\alpha \approx 0,9 \div 0,99$ si trascura I_{CBO} e si pone:

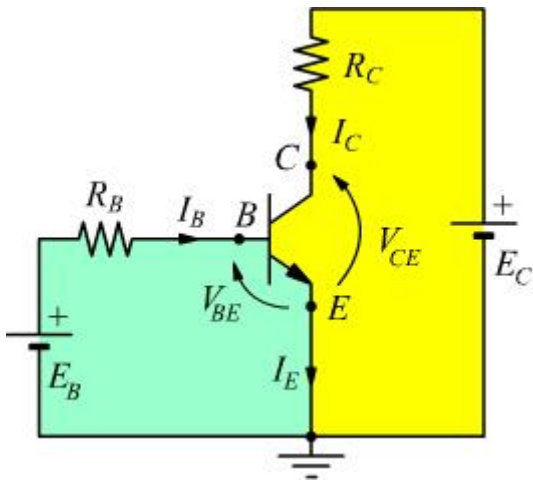
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{da cui} \quad I_C = \beta I_B \quad \text{più propriamente si approssima} \quad I_C = h_{FE} I_B$$

h_{FE} =guadagno di corrente continua (DC current gain) con $h_{FE} = 100 \div 1000$.

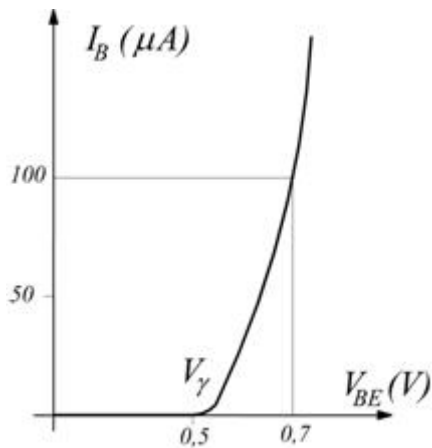
Nella pratica è considerata lecita l'approssimazione $\alpha = h_{FE}$.

Dal punto di vista circuitale, il dispositivo può essere diviso in due zone:

- la maglia di ingresso (zona verde) : caratterizzata dalle variabili V_{BE} ed I_B .
- la maglia di uscita (zona gialla): caratterizzata dalle variabili V_{CE} ed I_C .

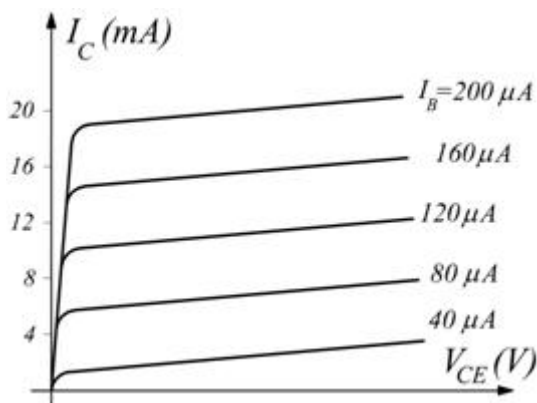


CARATTERISTICHE DI INGRESSO



Rappresentano l'andamento della corrente I_B in funzione della V_{BE} quindi ci si riferisce alla giunzione J_e fra base ed emettitore, polarizzata direttamente; la caratteristica è inevitabilmente quella di un diodo con tensione di soglia $V = 0,5V$, per un funzionamento normale si assume un valore $V_{BE}=0,7 V$

CARATTERISTICHE DI USCITA



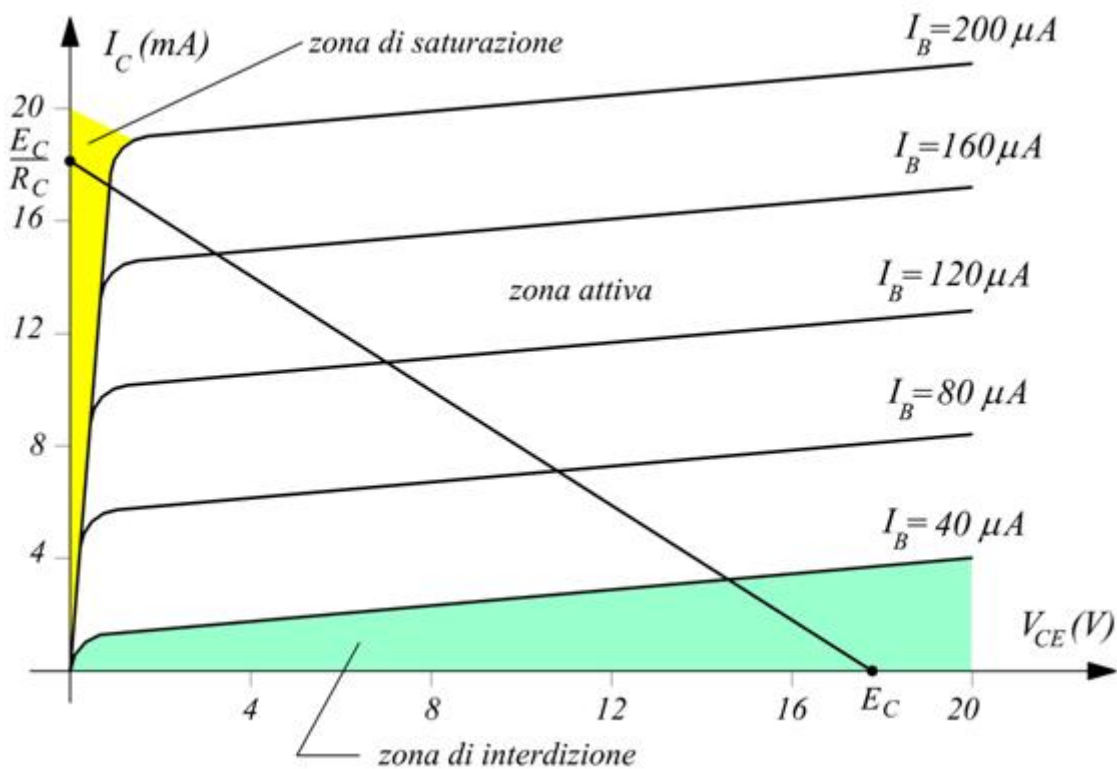
Rappresentano l'andamento della corrente I_C in funzione della V_{CE} per valori costanti di I_B . Si tratta dunque, di una famiglia di curve. L'intersezione fra la retta di carico e la caratteristica di uscita (per un assegnato valore di I_B) individua il punto di lavoro del transistor che raggiunto quello stato si dice polarizzato.

POLARIZZAZIONE

La polarizzazione del transistor, di fatto, viene ottenuta dal circuito precedente andando ad individuare sulle caratteristiche di uscita l'intersezione fra la retta di carico e la curva di uscita corrispondente allo specifico valore di V_{BE} in atto.

$$E_C = V_C + V_{CE} \longrightarrow V_C = E_C - V_{CE} \longrightarrow R_C I_C = -V_{CE} + E_C$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{E_C}{R_C} \quad \begin{cases} V_{CE} = 0 \longrightarrow I_C = \frac{E_C}{R_C} \\ I_C = 0 \longrightarrow V_{CE} = E_C \end{cases}$$

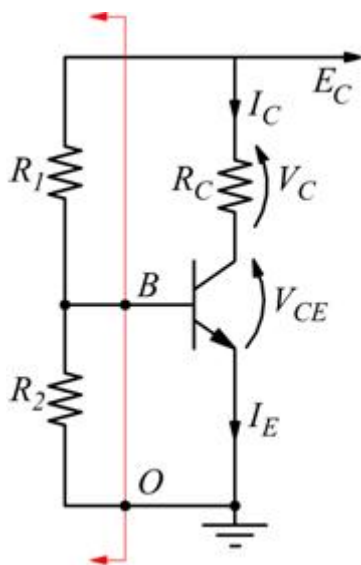


- **zona attiva**: è la zona centrale delle caratteristiche di uscita, detta anche di funzionamento lineare
- **zona di saturazione**: con bassi valori di V_{CE} in cui l'insieme delle curve di uscita tendono a confondersi in un unico tratto quasi verticale.
- **zona di interdizione**: pressochè coincidente con l'asse delle ascisse in cui sia I_B che I_C hanno valori trascurabili.

Se si vuole usare il BJT come amplificatore quindi in modo lineare, il punto di lavoro deve essere scelto opportunamente all'interno della zona attiva.

Se si vuole usare il BJT come interruttore il punto di lavoro può solo commutare fra la zona di interdizione e la zona di saturazione.

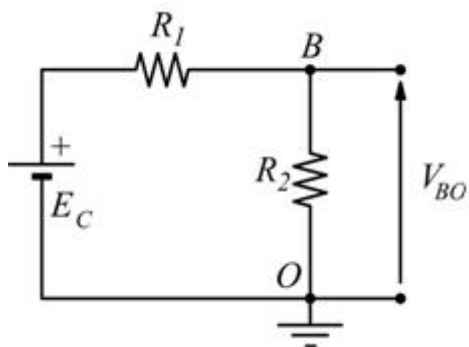
POLARIZZAZIONE CON PARTITORE DI BASE



Nel circuito di polarizzazione precedente si nota la presenza di due batterie di alimentazione (E_B, E_C).

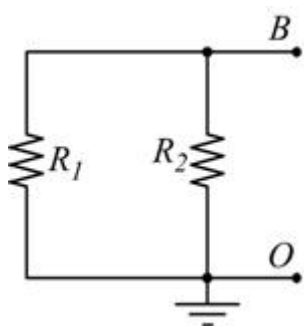
Volendo realizzare un circuito di polarizzazione con un solo terminale di alimentazione si può ricorrere allo schema di figura.

Questo schema si può analizzare facendo il circuito equivalente Thevenin ai morsetti B-O



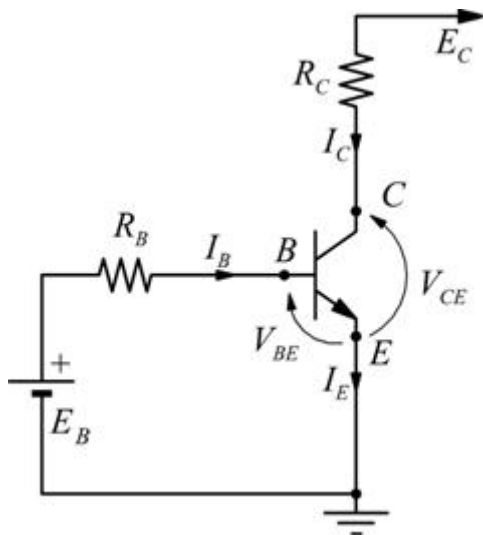
Il circuito a monte della coppia di nodi B-O può essere visto come in figura; la tensione V_{BO} calcolata a vuoto ci fornisce il valore del generatore equivalente che in questo caso chiameremo E_B .

$$V_{BO} = E_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_C$$



La resistenza equivalente deve essere ottenuta cortocircuitando il generatore di tensione nel circuito che stiamo semplificando; in tal caso la resistenza vista alla coppia di nodi B-O che chiameremo R_B è il parallelo fa R_1 ed R_2 :

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



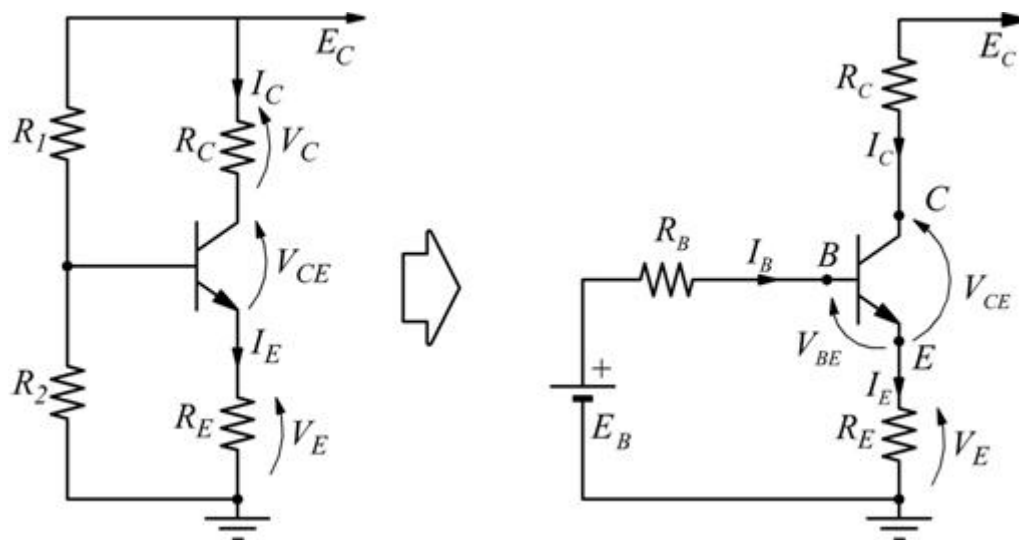
Il circuito risultante è identico a quello indicato per la prima polarizzazione che si è visto.
La maglia interna interessa il circuito B-E (giunzione J_e)

$$E_B = R_B I_B + V_{BE} \quad (\text{maglia di ingresso})$$

La maglia esterna interessa il circuito C-E (giunzione J_c)

$$E_C = R_C I_C + V_{CE} \quad (\text{maglia di uscita})$$

Nei circuiti di polarizzazione, al fine di ottenere una stabilizzazione del punto di lavoro viene introdotta una resistenza sull'emettitore.



Ricordandoci che: $I_C = \beta \cdot I_B$ e che $I_E = I_B + I_C$ sarà $I_E = I_B + \beta I_B = I_B(1 + \beta)$
sulla maglia di ingresso:

$$E_B = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

sostituendo la I_E avremo

$$E_B = R_B I_B + V_{BE} + R_E (1 + \beta) I_B$$

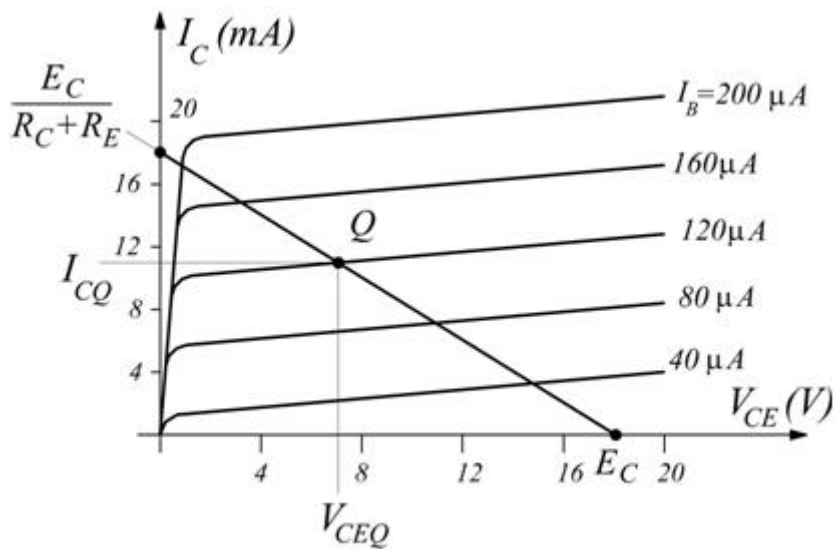
sulla maglia di uscita la legge di Kirchoff sarà:

$$E_C = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

sostituendo la I_E . Dato che

$$I_E = I_B + I_C = \frac{I_C}{\beta} + I_C = I_C \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) \cong I_C \quad \text{sapendo che } \beta \gg 1$$

$$E_C = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C$$



esprimendo la I_C in funzione della V_{CE} .

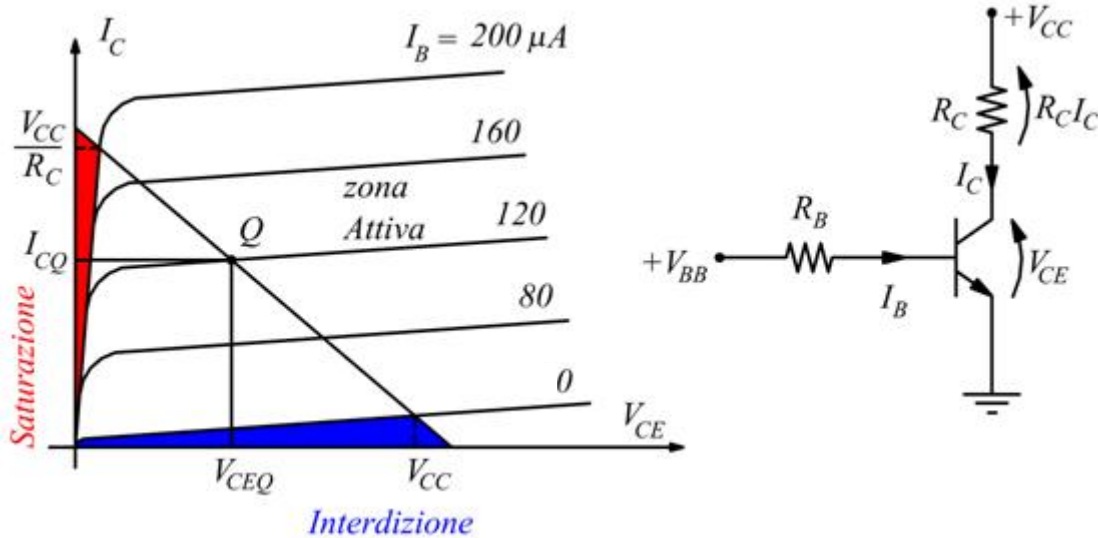
$$I_C = \frac{E_C - V_{CE}}{R_C + R_E} = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CE} + \frac{E_C}{R_C + R_E}$$

in tal caso la retta di carico avrà pendenza proporzionale a $(R_C + R_E)$.

TRANSISTOR COME INTERRUTTORE

Osservando le caratteristiche di uscita di un transistor si riconoscono, dunque, tre zone di funzionamento:

- la zona di attiva, dove il transistor viene usato come amplificatore
- la zona di saturazione dove il valore della V_{CE} è molto basso
- la zona di interdizione, prossimo all'asse delle ascisse, in cui sia I_B che I_C sono trascurabili



A seconda del tipo di applicazione che si vuole costruire possiamo portare il transistor nella zona che vogliamo, semplicemente modificando il valore di I_B .

Dallo schema di figura: si ottiene l'equazione alla maglia di uscita del transistor:

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$ da cui si ottiene

Questa relazione può essere rappresentata sul piano delle caratteristiche di uscita con una retta, avente coefficiente angolare negativo ($-1/R_C$) e che interseca l'asse delle ordinate nel punto V_{CC}/R_C . Questa è la retta di carico statica. Le intersezioni saranno dunque:

$$\begin{cases} I_C = 0 \\ V_{CE} = V_{CC} \end{cases} \quad \begin{cases} I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \\ V_{CE} = 0 \end{cases}$$

Per una data I_B i valori della V_{CE} e della I_C del punto P , ottenuto dall'intersezione fra la retta di carico e la caratteristica di uscita, definiscono il punto di funzionamento del dispositivo.

Zona attiva

In questa zona, la giunzione base-emettitore, risulta polarizzata direttamente con una tensione tipica di 0,7V, mentre la giunzione base-collettore è polarizzata inversamente.

In questo caso vale (considerando $h_{FE} \cong \beta$) la relazione fondamentale.

$$I_C = h_{FE} I_B$$

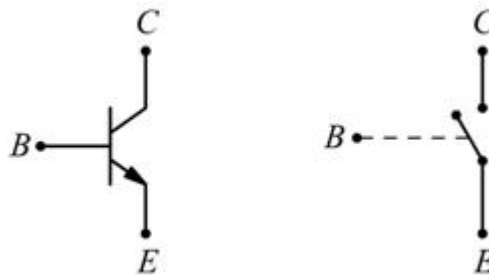
Zona di saturazione

Aumentando il valore di I_B si vede come il punto **P** si sposta verso l'alto, il valore di I_C aumenta, mentre V_{CE} diminuisce fino a raggiungere la zona di saturazione indicata.

Zona di interdizione

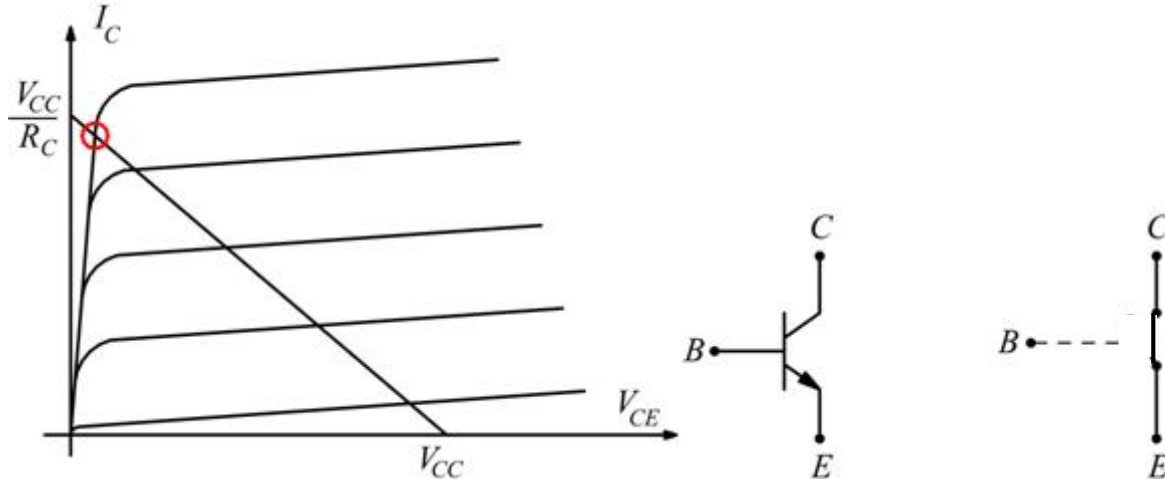
Diminuendo il valore di I_B il punto di funzionamento **P** si sposta verso valori di I_C sempre più bassi, finché non giunge nella zona di interdizione. Per ottenere ciò si deve avere $I_B \approx 0$. In pratica $V_{BE} < V$ la giunzione base-emettitore deve essere polarizzata negativamente. Quindi per interdire un transistor, si porta V_{BE} a 0 o ad un valore leggermente negativo.

Quando il transistor viene usato come interruttore, il dispositivo viene usato facendolo commutare fra la zona di saturazione e la zona di interdizione. Questo funzionamento può essere indicato dalla figura seguente:



Stato ON (Saturazione) - Interruttore chiuso

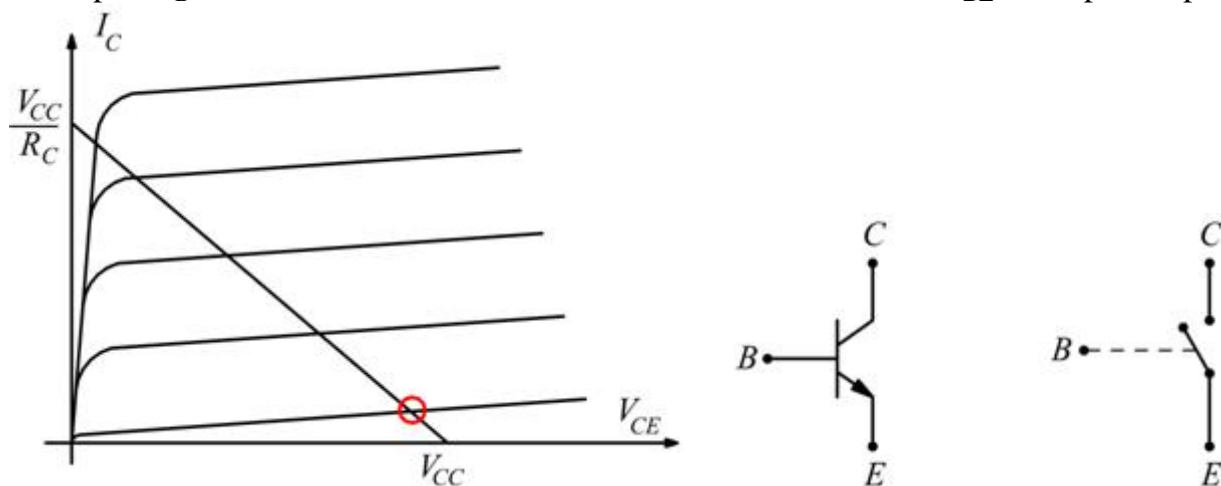
Quando viene portato in zona di saturazione, il transistor presenta una V_{CE} molto bassa: esso viene considerato un interruttore chiuso (ON).



Deve essere $I_B > \frac{I_C}{h_{FE}}$ $V_{CE(sat)} = 0,2V$ $V_{BE(sat)} = 0,8V$ quindi $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$

Stato OFF (Interdizione) - Interruttore aperto

Lo stato aperto **OFF** si ottiene portando il transistor in interdizione, in questo caso infatti I_C come pure I_B , sono considerate nulle. Per ottenere ciò è necessario $V_{BE} < V_{BE0}$ o più semplicemente:



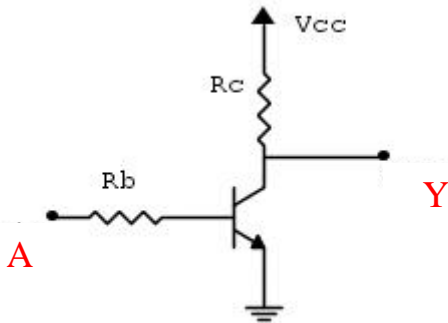
Deve essere soddisfatta la: $V_{BE} \leq 0$ In prima approssimazione si ha
$$\begin{cases} I_C \cong 0 \\ V_{CE} = V_{CC} \end{cases}$$

Applicazioni

1) Elettronica Digitale:

Tutte le porte logiche e circuiti integrati digitali vengono realizzate con i transistor.

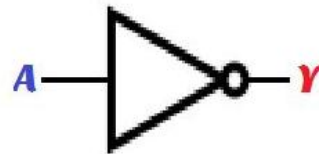
Porta NOT



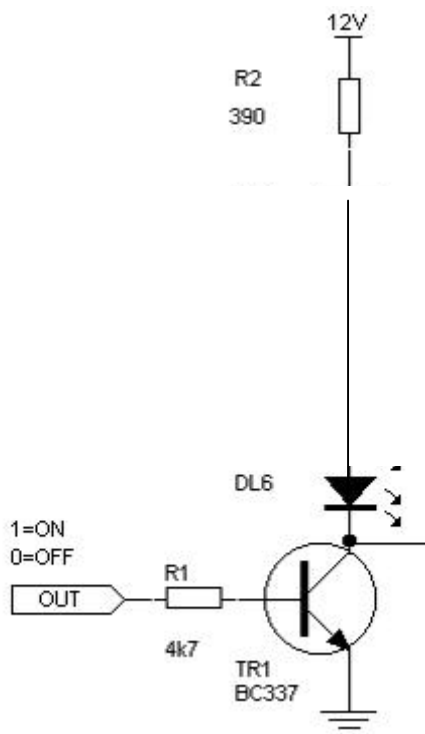
0=0V
1=5V

Porta logica NOT $Y = \bar{A}$

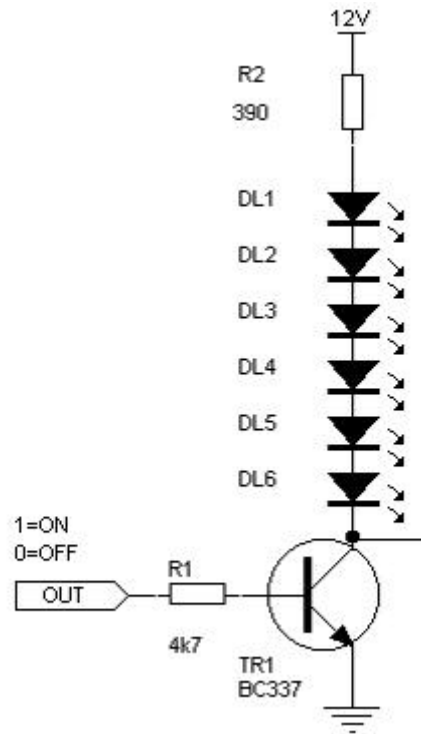
A	Y
0	1
1	0



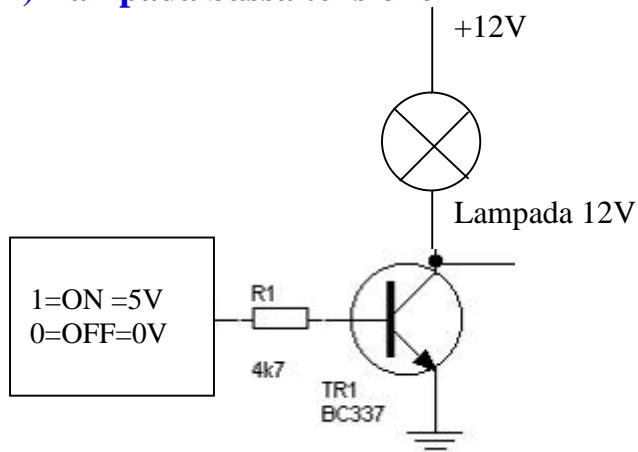
2) LED di potenza



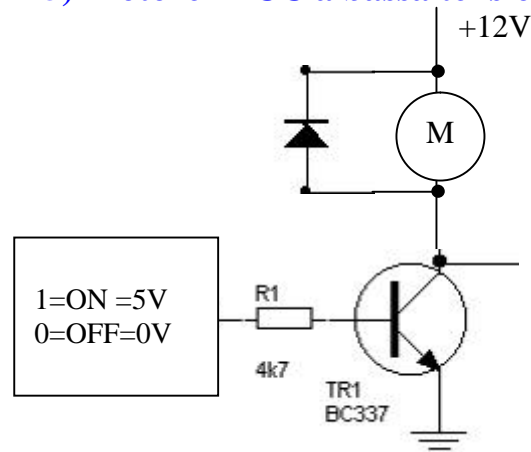
3) Gruppo di LED



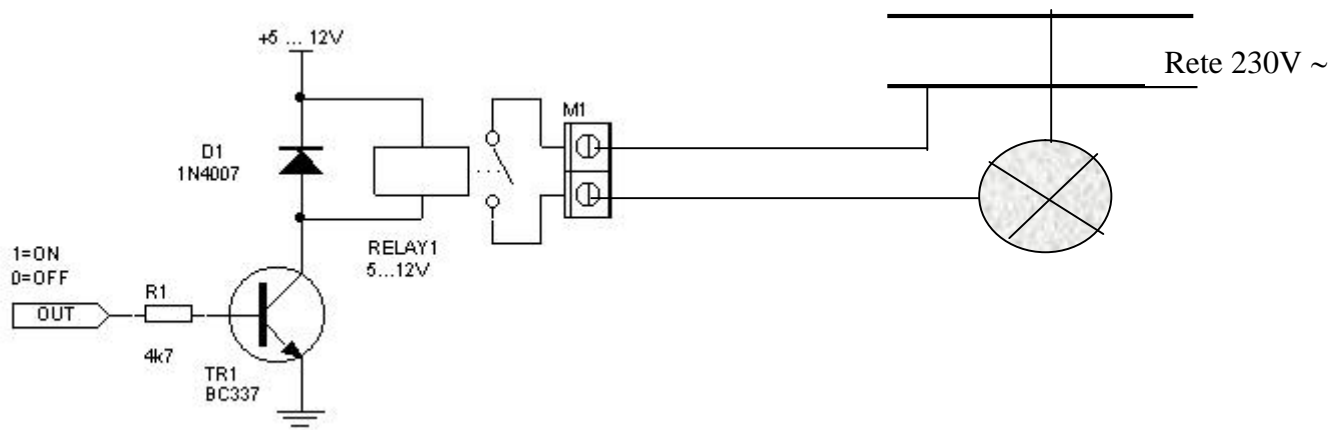
4) Lampada bassa tensione



5) Motore in CC a bassa tensione



6) Comando Relè per dispositivi di potenza

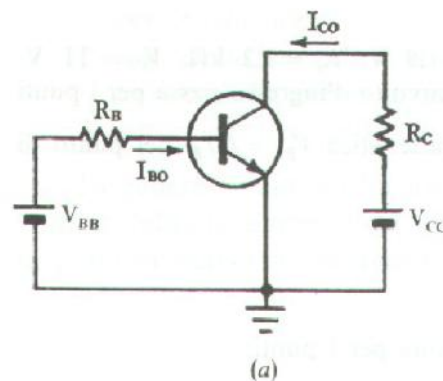


TRANSISTOR COME AMPLIFICATORE

Continuiamo nel nostro studio dei transistor dando una dimostrazione grafica della loro capacità di amplificare segnali.

Innanzitutto, visto che i legami fra tensioni e correnti nei transistor non sono univocamente determinati (essendo espressi da molteplici caratteristiche), bisogna determinare il **punto di lavoro a riposo** cioè i valori di tensione e corrente che si instaurano nel transistor quando non vi è alcun segnale di ingresso da amplificare.

Un possibile circuito per determinare questo punto di lavoro è il seguente

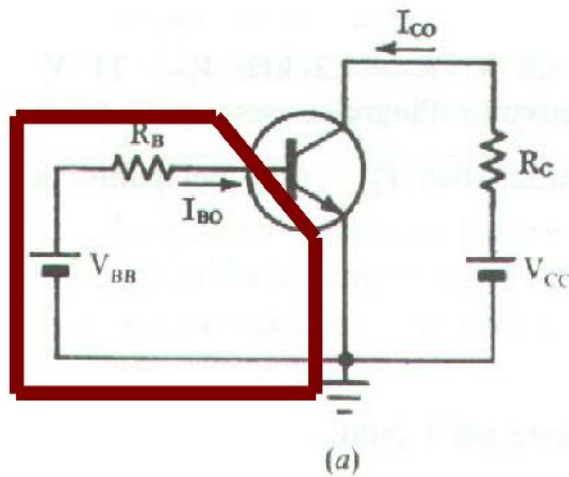


tramite questo circuito si impongono i valori di tensione e corrente nel dispositivo: si dice che abbiamo polarizzato il transistor. Poiché vogliamo usare il transistor come amplificatore vorremo che il suo punto di riposo ricada nella zona delle caratteristiche che abbiamo detto zona lineare, in modo da assicurarci che l'uscita sia proporzionale all'ingresso (come in ogni buon amplificatore di segnali). Ricordiamo infatti, che i segnali elettronici sono portatori di informazioni, le quali sono codificate in qualche modo nella forma dei segnali stessi: un buon amplificatore deva allora

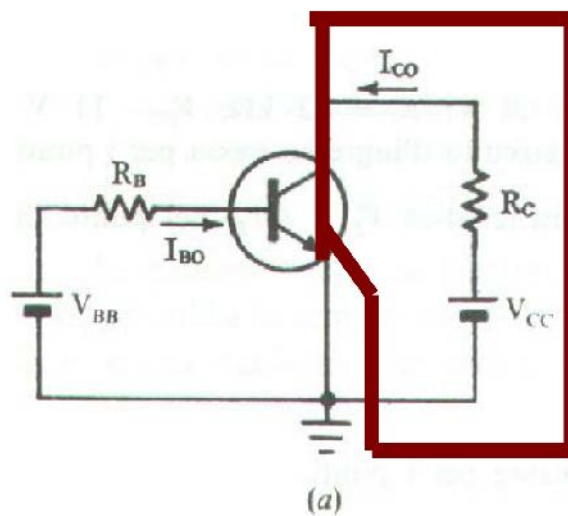
amplificare i segnali ma non cambiarne la forma in modo da non perdere l'informazione racchiusa in essi.

All'interno del circuito possiamo individuare due percorsi chiusi (due maglie):

una di ingresso



e una di uscita



I componenti presenti nella prima maglia permettono di determinare il punto di riposo nella caratteristica di ingresso, cioè il valore della corrente I_B e della tensione

V_{BE} .

Come visto per il diodo occorre trovare la soluzione confrontando un'equazione espressa graficamente (caratteristiche di ingresso del BJT) con un'equazione determinata dall'applicazione del secondo principio di Kirchhoff alla maglia di ingresso

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}$$

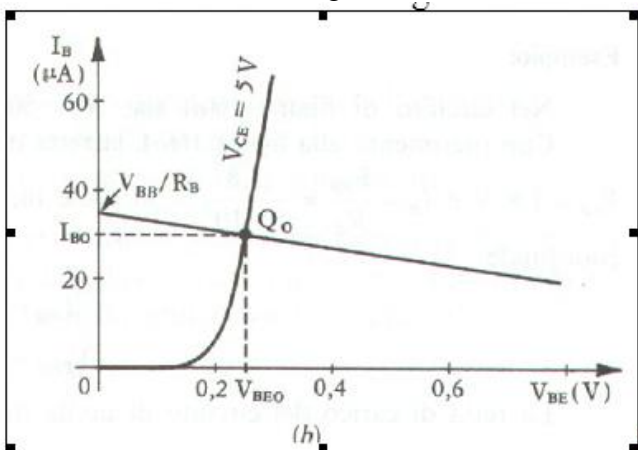
Anche in questo caso, per risolvere il problema si decide di tradurre la seconda equazione in un grafico da sovrapporre a quello delle caratteristiche. Essendo l'equazione lineare dovremo avere una retta che intersecherà l'asse delle ordinate nel punto che rappresenta la corrente che si ha quando la tensione è nulla

$$V_{BE} = 0 \rightarrow V_{BB} = R_B I_B \rightarrow I_B = V_{BB} / R_B$$

La retta intersecherà invece, l'asse delle ascisse nel punto in cui la corrente è nulla

$$I_B = 0 \rightarrow V_{BB} = V_{BE}$$

Graficamente abbiamo il seguente risultato



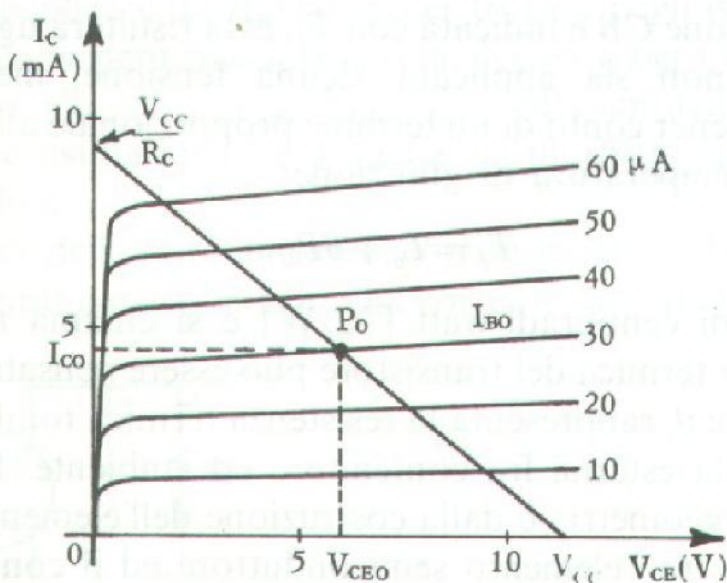
Dalla intersezione delle V_{BE} e della corrente di I_B . Ci occorre soprattutto quest'ultimo valore poiché esso ci consente di selezionare, nella famiglia di caratteristiche di uscita del BJT, quella che effettivamente rappresenta il legame fra V_{CE} e I_C nel circuito dato.

Pur avendo individuato una caratteristica fra le tante, esistono ancora infiniti valori di V_{CE} e I_C che soddisfano tale legame. La coppia di valori che effettivamente si instaurerà sarà quella che soddisferà anche l'equazione dovuta al

secondo principio di Kirchhoff applicato alla maglia di uscita

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

Anche in questo caso l'equazione darà luogo ad una retta che intersecherà l'asse delle ordinate nel punto $I_C = V_{CC} / R_C$ e l'asse delle ascisse nel punto $V_{CE} = V_{CC}$. Si avrà il seguente risultato graficamente.



Consideriamo ora il seguente circuito

In esso il generatore di tensione variabile rappresenta il segnale che vogliamo amplificare. Ora la tensione di ingresso non è più costante, non coincidendo più soltanto con la V_{BB} , ma è pari alla somma fra V_{BB} e il segnale $e(t)$.

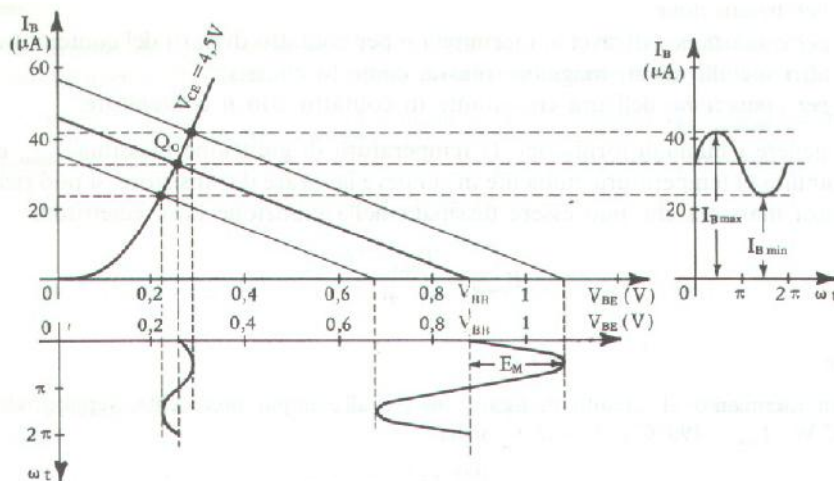
$$V_{BB} + e(t) = R_B I_B + V_{BE}$$

Abbiamo ancora un legame di tipo lineare, stavolta la retta rappresentante tale legame non è unica dipendendo dal valore che assume istante per istante $e(t)$.

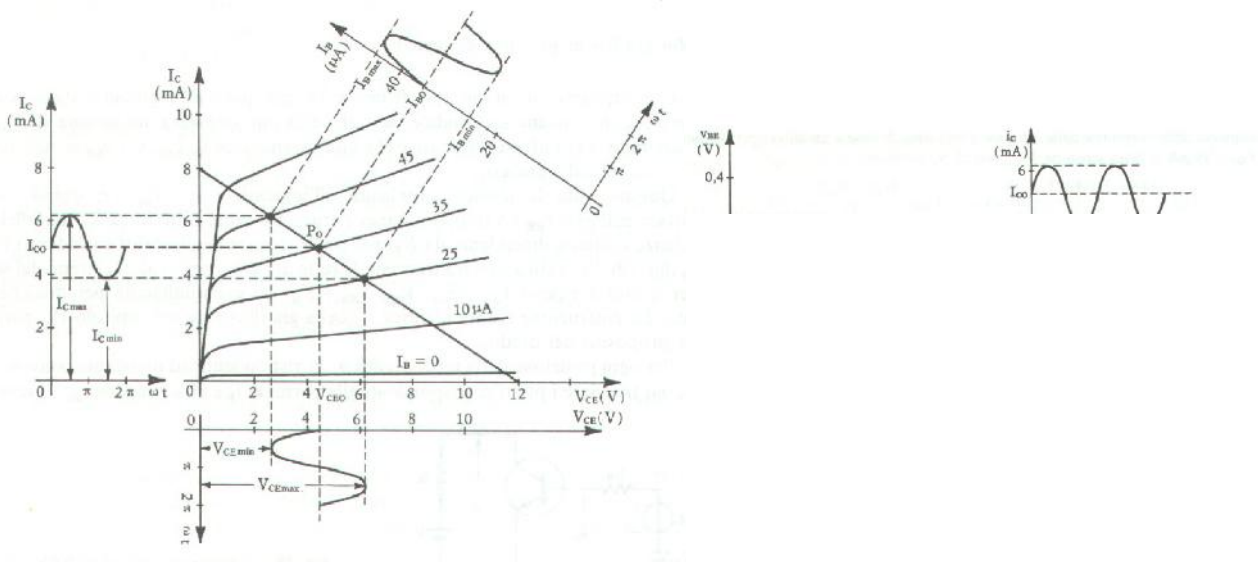
Poiché le intersezioni con l'asse delle ordinate e l'asse delle ascisse sono rispettivamente.

$$I_B = (V_{BB} + e(t))/R_B \quad V_{BE} = V_{BB} + e(t)$$

Possiamo dire che la retta di carico trasla sul diagramma parallelamente a se stessa (poiché la sua inclinazione è data dal valore della resistenza R_B che rimane costante).

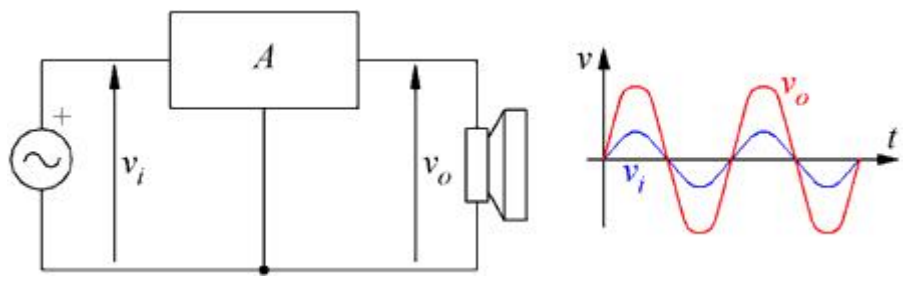


varia anche l'intersezione con la caratteristica e quindi il valore che assumeranno di volta in volta V_{BE} e I_B . In uscita la retta di carico rimane costante poiché non varia la V_{CE} del generatore. Però varia la caratteristica che di volta in volta rappresenta il legame fra V_{CE} e I_C , poiché essa dipende da I_B .

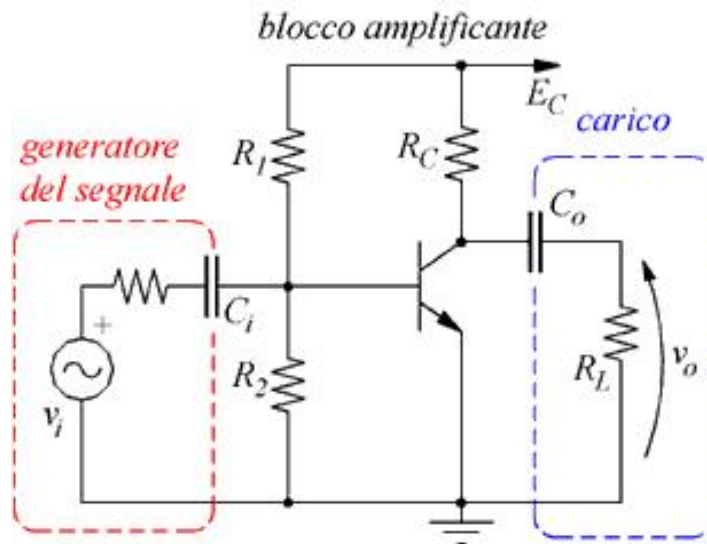


Dalla figura seguente si vede come la corrente di uscita riproduca la stessa forma del segnale di ingresso. Lo stesso avviene per la tensione di uscita anche se, in questo caso notiamo come la tensione di uscita sia invertita (Sfasata di 180°) rispetto a quella di ingresso.

Dal punto di vista pratico il transistor ci permette di manipolare un segnale dinamico in ingresso (ad esempio una forma d'onda alternata sinusoidale) e di trasferirlo in uscita opportunamente amplificato (alla stessa frequenza).



Potremmo pensare di risolvere di risolvere i circuiti amplificatori con un metodo grafico, tracciando di volta in volta sulle caratteristiche, l'andamento delle grandezze in gioco. Questo procedimento risulterebbe sicuramente faticoso ed impreciso e non si presterebbe ad un uso sistematico delle varie configurazioni. E' necessario scegliere un metodo risolutivo analitico e di tipo generale, per questo motivo si deve determinare un modello elettrico in grado di rappresentare il funzionamento del transistor in regime dinamico.



Dal punto di vista pratico, una prima strutturazione si ha connettendo il blocco amplificante, alla sorgente del segnale, accoppiando i due stadi in modo tale che la corrente continua che polarizza il blocco amplificatore non influenzi il generatore, questo avviene interponendo i due stadi con il condensatore di accoppiamento C_i .