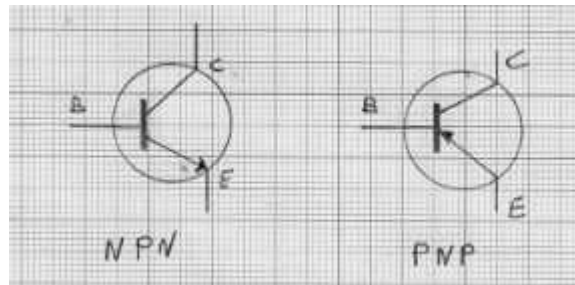


IL BJT

Il transistor **BJT** è un componente che viene utilizzato come amplificatore. Si dice **amplificatore di tensione** un circuito che dà in uscita una tensione più grande di quella di ingresso. Si dice amplificatore di corrente un circuito che dà in uscita una corrente maggiore di quella di ingresso.

Il simbolo elettrico del transistor è il seguente:



Nello schema vediamo che il transistor ha tre morsetti; un morsetto di ingresso, detto **base**; un morsetto di uscita, detto **collettore**; un morsetto comune sia all'ingresso che all'uscita, detto **emettitore**.

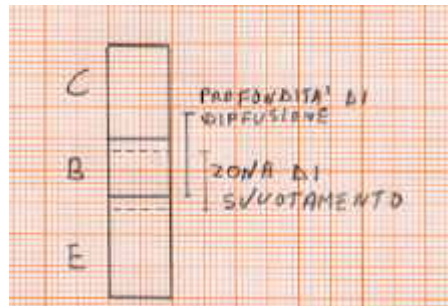
Vi sono due tipi di transistor: transistor **NPN**, rappresentato nella schema a sinistra; e transistor **PNP**, rappresentato nello schema a destra, la freccia indica il percorso della corrente. NPN vuol dire che l'emettitore è drogato di tipo N, la base di tipo P, il collettore di tipo N. PNP vuol dire che l'emettitore è drogato di tipo P, la base di tipo N, il collettore di tipo P.

Nella seguente foto, possiamo vedere l'esterno di alcuni transistor:



Ai tre morsetti esterni corrispondono tre parti interne del BJT, cioè base, emettitore, collettore.

Consideriamo ora un transistor **NPN** e guardiamo il seguente schema:



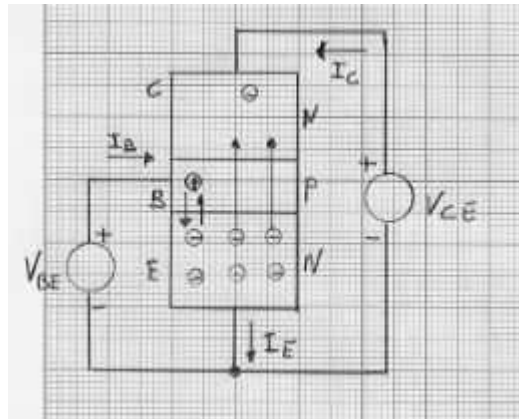
La parte superiore, chiamata **collettore**, simbolo **C**, è drogata di tipo N, cioè possiede elettroni liberi. La parte centrale, detta **base**, simbolo **B**, è drogata di tipo P, cioè possiede lacune, che possiamo considerare come cariche elettriche positive, però la base è drogata più fortemente del collettore, infatti si ha un drogaggio crescente dall'alto verso il basso; inoltre la dimensione della base è molto piccola, cioè la base è sottile. Ricordiamo che si dice **zona di svuotamento** di una giunzione PN la zona della giunzione PN in cui non sono presenti cariche libere, cioè non vi sono né elettroni né lacune, ma solo cariche fisse, che sono negative nella zona di tipo P e positive nella zona di Tipo N.

Ricordiamo, inoltre, che si dice **profondità di diffusione** di una giunzione la distanza alla quale tutti gli elettroni si sono ricombinati. Adesso vediamo come deve essere la dimensione della base; la base deve essere più piccola della profondità di diffusione, perché in questo modo siamo sicuri che un notevole numero di elettroni liberi, che partono dall'emettitore, non si ricombinino con le lacune presenti nella base, ma devono rimanere liberi nella base, in modo da poter essere attirati dalla tensione positiva applicata sul collettore. Però non la possiamo fare molto sottile, cioè la dobbiamo fare più grande della zona di svuotamento, altrimenti sparisce la giunzione PN.

In definitiva la **larghezza della base**, che sarebbe meglio dire, lo spessore della base, deve essere più grande della zona di svuotamento, e più piccola della profondità di diffusione.

Infine, nella parte inferiore, abbiamo l'**emettitore**, simbolo **E**, che è fortemente drogato di tipo N, e lo indichiamo con **N⁻**, per dire che è fortemente drogato di tipo N. Lo scopo è quello di consentire che un notevole numero di elettroni possano partire dall'emettitore.

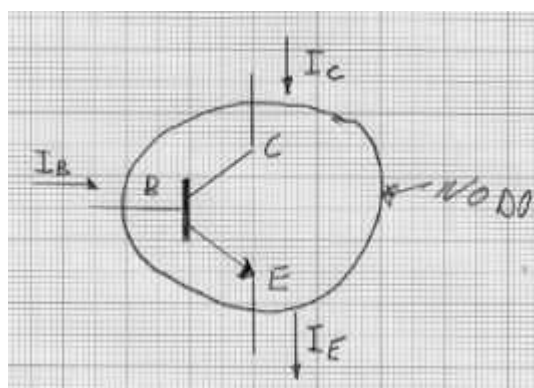
Per capire il funzionamento del BJT vediamo il seguente schema elettrico:



Vediamo dallo schema che la tensione applicata dall'esterno tra collettore ed emettitore è maggiore della tensione tra base ed emettitore. Vediamo che la giunzione base-emettitore è polarizzata direttamente, e quindi gli elettroni, presenti in elevato numero nella zona N dell'emettitore vengono attirati verso la base dal polo positivo della batteria, cioè dalla tensione V_{BE} . Di questi elettroni emessi dall'emettitore, non tutti si ricombinano con le lacune presenti nella base, infatti, la base l'abbiamo fatta più piccola della profondità di diffusione, per cui un notevole numero di elettroni viene attirato dal polo positivo della V_{CE} , che è la tensione tra collettore e base. Si vede ora l'importanza che la tensione tra collettore e base sia più grande di quella tra base ed emettitore, in quanto essendo la potenza il prodotto tra tensione e corrente gli elettroni che arrivano sul collettore danno luogo ad una maggiore potenza rispetto alla potenza prelevata tra base ed emettitore. Chiariamo ora la simbologia.

Indichiamo con V_{BE} la tensione presente tra base ed emettitore; indichiamo con V_{CE} la tensione tra collettore ed emettitore, indichiamo con V_{CB} la tensione tra collettore e base.

Indichiamo con I_B la corrente che entra nella base, indichiamo con I_C la corrente che entra nel collettore; indichiamo con I_E la corrente che esce dall'emettitore. Se consideriamo il transistor come un grosso nodo:

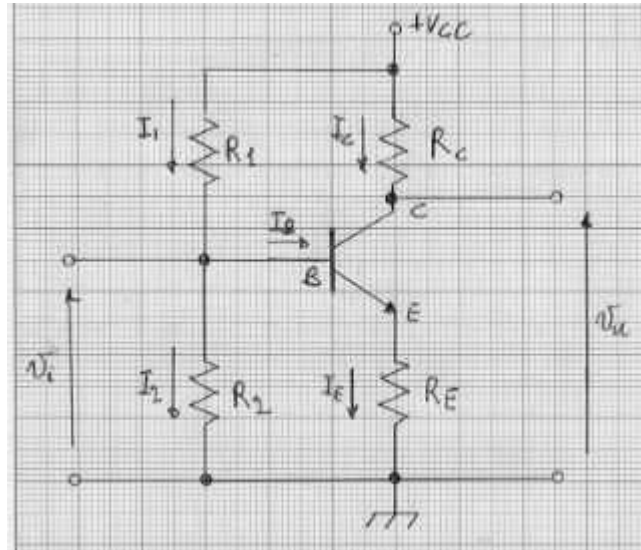


applicando il principio di Kirchhoff delle correnti, abbiamo che la somma delle correnti entranti deve essere uguale alla somma delle correnti uscenti e quindi

$$I_E = I_B + I_C$$

POLARIZZAZIONE DEL BJT

Polarizzare il BJT vuol dire fare in modo che su ogni morsetto del BJT arrivi la giusta tensione e circoli la giusta corrente. Per ottenere ciò si utilizzano un insieme di resistori come si vede nel seguente schema:



L'insieme di tutti i resistori che polarizzano il BJT si dice **rete di polarizzazione**.

Indichiamo con R_C il resistore che si trova collegato sul collettore, con R_E il resistore di emettitore; con R_1 ed R_2 i due resistori del partitore.

Cominciamo dal resistore R_C , detto resistore di collettore; lo scopo di questo resistore è quello di dare la giusta tensione al collettore e unitamente al BJT e ad R_E far circolare la giusta corrente di collettore I_C . Se consideriamo la maglia di uscita, costituita da R_C , il BJT ed R_E , applicando il principio di Kirchhoff delle tensioni possiamo scrivere la seguente equazione:

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

Cioè tutta la tensione fornita dal generatore di tensione si suddivide nella somma delle tre cadute di tensione, quella ai capi di R_C , cioè $R_C I_C$, quella tra collettore ed emettitore, cioè V_{CE} , e quella ai capi di R_E , cioè $R_E I_E$. Ora vediamo come il transistor si comporta da amplificatore. La tensione di uscita la preleviamo ai capi del collettore; tale tensione è sempre positiva, tuttavia può aumentare o diminuire a secondo della caduta di tensione ai capi di R_C , cioè, maggiore è la caduta di tensione ai capi di R_C , minore sarà la tensione di uscita V_u , prelevata tra collettore e massa; infatti $V_u = V_{CC} - R_C I_C$; da tale formula vediamo che non possiamo togliere il resistore R_C , altrimenti la V_u sarebbe sempre uguale a V_{CC} , e non vi sarebbe amplificazione di tensione; in pratica R_C assume il valore di alcuni $k\Omega$;

Per capire il funzionamento di R_E occorre studiare anche la maglia di ingresso; infatti R_E appartiene sia alla maglia di uscita che alla maglia di ingresso. La maglia di ingresso è quella che dà la giusta tensione sulla base del BJT e sfrutta il partitore di

tensione, con i resistori R_1 ed R_2 . Se il partitore fosse staccato dalla base, nel partitore circolerebbe la corrente $I_P = V_{CC}/(R_1 + R_2)$, cioè la corrente del partitore; poiché però nella parte centrale del partitore è collegata la base, e la corrente di base I_B è entrante nella base, tale corrente proviene dal partitore e quindi in R_1 circola non solo la corrente del partitore I_P ma anche la corrente di base I_B . Se trascuriamo la corrente inversa di saturazione, cioè la I_{CBO} , cioè la corrente che circola tra collettore e base, possiamo dire che in R_1 circola solo la corrente del partitore I_P . In realtà le maglie di ingresso sono tre. Una prima maglia è costituita dal generatore V_{CC} , dal resistore R_1 e dal resistore R_2 ; l'equazione di tale maglia è:

$$V_{CC} = R_1 I_1 + R_2 I_2$$

Dove I_1 è la corrente di R_1 , e I_2 è la corrente di R_2 . Inoltre $I_1 = I_P + I_B$; invece $I_2 = I_P$.

La seconda maglia di ingresso è costituita dal generatore V_{CC} , dalla tensione V_{BE} tra base e collettore e da R_E ; l'equazione di tale maglia è

$$V_{CC} = R_1 I_1 + V_{BE} + R_E I_E$$

Dove $I_E = I_B + I_C$

Vi è infine una terza maglia senza generatori, costituita da R_2 , V_{BE} ed R_E ; l'equazione è la seguente:

$$R_2 I_2 = V_{BE} + R_E I_E$$

Da tale ultima equazione si vede come la tensione sulla base V_{BE} è influenzata dalla tensione presente sui capi del resistore R_E , cioè V_E ; infatti

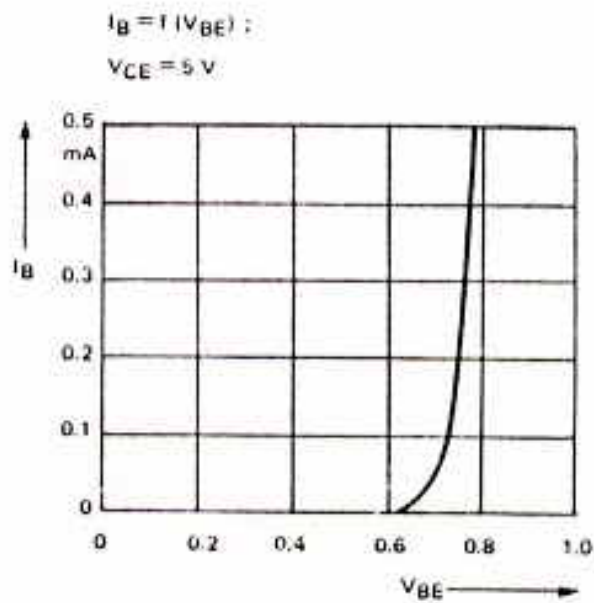
$$V_{BE} = R_2 I_2 - R_E I_E$$

Cioè all'aumentare della tensione di emettitore diminuisce la tensione sulla base e quindi anche la corrente di base I_B ; si dice che R_E stabilizza il circuito, cioè R_E fa in modo che qualora si dovesse verificare per cause esterne un aumento della corrente di base, con conseguente aumento di corrente di collettore, aumenta la caduta di tensione ai capi di R_E , quindi diminuisce la V_{BE} e quindi la I_B ; in definitiva R_E stabilizza il circuito sia nei confronti delle variazioni di temperatura sia nei confronti della dispersione delle caratteristiche; infatti non tutti i transistor con la stessa sigla sono uguali; quindi si potrebbe verificare che alcuni transistor amplificano di più e altri di meno.

CARATTERISTICHE DEL BJT

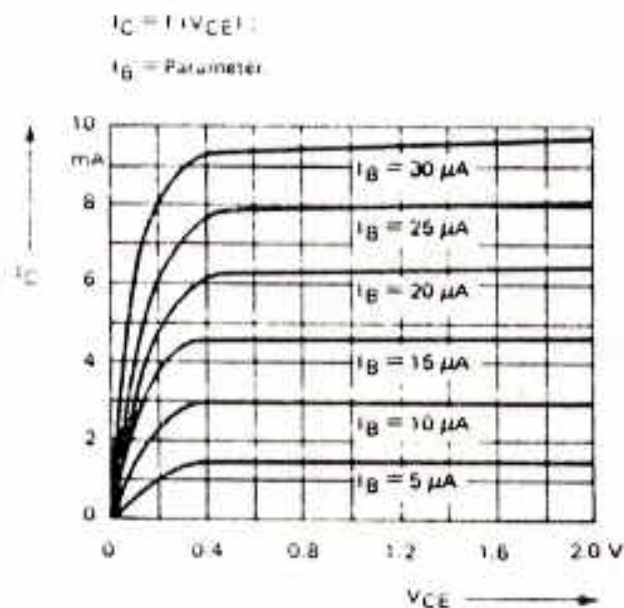
Si dicono **caratteristiche del BJT** le curve tensione corrente dei vari terminali del BJT.

Si dice **caratteristica di ingresso** la curva che esprime l'andamento della corrente di base I_B in funzione della tensione di base V_{BE} , come la seguente, che si riferisce al transistor NPN **BCW82**.



Vediamo come la caratteristica di ingresso corrisponde a quella di un diodo, infatti tra base ed emettitore il transistor si comporta come un diodo; vediamo, infatti che la corrente di base è nulla, quando la V_{BE} è minore della tensione di soglia, che nel nostro caso coincide all'incirca con 0,6 V, superata la tensione di soglia la corrente di base aumenta rapidamente.

Si dicono **caratteristiche di uscita** quelle che esprimono la corrente di collettore I_C in funzione della tensione V_{CE} , mantenendo costante la I_B ; come le seguenti, che si riferiscono sempre al BCW82



Notiamo che vi sono diverse caratteristiche di uscita, ognuna ottenuta per un valore prefissato della corrente di base I_B ; infatti la prima caratteristica, partendo dal basso è stata ottenuta per una $I_B = 5 \mu A$; cioè mantenendo costante la I_B all'aumentare della V_{CE} , inizialmente la I_C è zero; poi aumenta linearmente e rapidamente fino al ginocchio; superato il ginocchio, la I_C resta praticamente costante, anche se aumenta la V_{CE} .

Le caratteristiche sono importanti per la determinazione del punto di lavoro; si dice **punto di lavoro** un punto di cui sono note tensione e corrente a riposo, cioè in assenza di segnale; esempio se prendo il punto **P**, come nel seguente diagramma:

possiamo notare che essendo situato sulla caratteristica per $I_B = 15 \mu A$ la corrente di base sarà $I_B = 15 \mu A$; la tensione V_{CE} sarà 1,0 V; la corrente di collettore sarà circa $I_C = 4,6 mA$.

RETTA DI CARICO

Si dice retta di carico la retta che ha come equazione l'equazione della maglia di uscita, cioè $V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$. Per rappresentarla sulle caratteristiche di uscita, occorre prendere due punti. Supponiamo che $V_{CC} = 2,0 V$; quando $I_B = 0$ e $I_C = 0$ dalla equazione della retta di carico si ottiene che $V_{CE} = V_{CC}$; quindi un punto sarà quello sull'asse orizzontale, avente coordinate (2,0 ; 0).

Supponendo invece che la V_{CE} sia nulla dalla equazione della retta di carico otteniamo $V_{CC} = R_C I_C + R_E I_E$; e trascurando I_B rispetto a I_C otteniamo il secondo punto $I_{C_{MAX}} = V_{CC} / (R_C + R_E)$;

quindi il secondo punto ha coordinate (0; $V_{CC} / (R_C + R_E)$); unendo i due punti otteniamo la retta di carico.

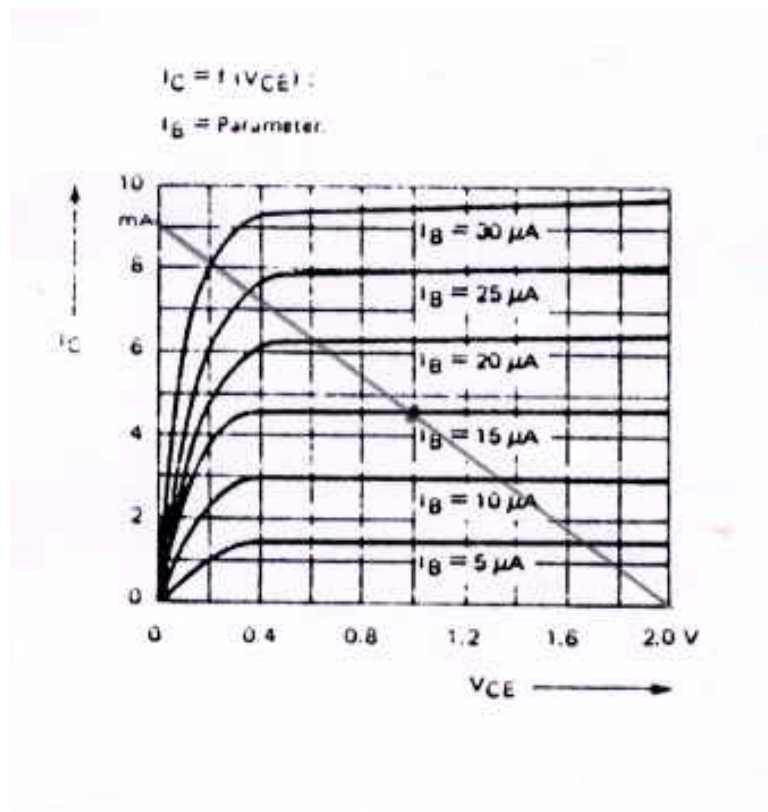
IL CIRCUITO DI POLARIZZAZIONE

In sede di progetto del circuito di polarizzazione si usano i seguenti criteri pratici. Per la V_{CE} si fissa un valore all'incirca uguale a $V_{CC}/2$;

per la caduta di tensione ai capi di R_E , cioè V_E , si fissa un valore uguale a $V_{CC}/10$; per la corrente del partitore I_P si fissa una corrente uguale a $I_C/10$. Con l'aiuto delle caratteristiche e delle equazioni della maglia di uscita e della maglia di ingresso si calcolano i valori di tutti i resistori.

Esempio

Dato il BJT BCW82, in base alle caratteristiche di uscita fissiamo una $V_{CC} = 2,0 V$; fissiamo una $V_{CE} = V_{CC}/2 = 2/2 = 1 V$; fissiamo $V_E = V_{CC}/10 = 2/10 = 0,2 V$;



Dalle caratteristiche di uscita scegliamo una caratteristica che sia centrale, per esempio quella di $I_B = 15 \mu A$; dalla lettura della caratteristica leggiamo $I_C = 4,6 mA$; quindi

$$I_E = I_C + I_B = 4,6 mA + 15 \mu A = 4,615 mA$$

Quindi $R_E = V_E / I_E = 0,2 / 0,004615 = 43 \Omega$

Dall'equazione della retta di carico ci calcoliamo R_C ;

$$R_C = (V_{CC} - V_{CE} - V_E) / I_C = (2 - 1 - 0,2) / 0,0046 = 0,8 / 0,0046 = 173 \Omega$$

Controlliamo $I_{C_{MAX}} = V_{CC} / (R_C + R_E) = 2 / (173 + 43) = 9,25 mA$; mentre sul diagramma delle caratteristiche di uscita leggiamo $9 mA$; i due valori, a parte gli errori grafici, sono attendibili.

Per calcolare il partitore, dalla caratteristica di ingresso ci ricaviamo una $V_{BE} = 0,8 V$; quindi: $R_2 I_2 = V_{BE} + V_E = 0,8 + 0,2 = 1 V$

Essendo $I_2 = I_P = I_C / 10 = 4,6 / 10 mA = 0,46 mA$, otteniamo:

$$R_2 = 1 / 0,00046 = 2174 \Omega$$

Per R_1 essendo

$$R_1 I_1 = V_{CC} - R_2 I_2 = 2 - 1 = 1 V$$

Ed essendo

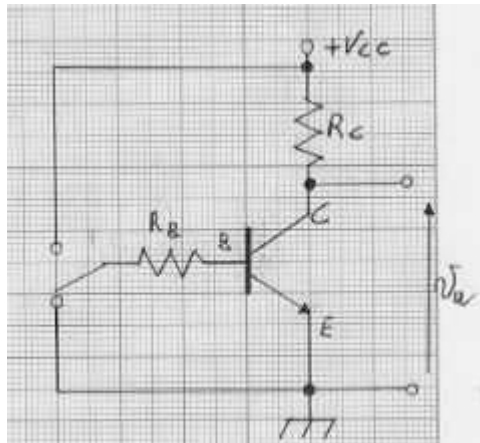
$$I_1 = I_P + I_B = 0,46 \text{ mA} + 15 \mu \text{ A} = 0,475 \text{ mA}$$

Otteniamo: $R_1 = 1 / 0,000475 = 2105 \Omega$

Naturalmente si sceglieranno i valori commerciali vicini a quelli teorici.

IL TRANSISTOR COME INTERRUTTORE

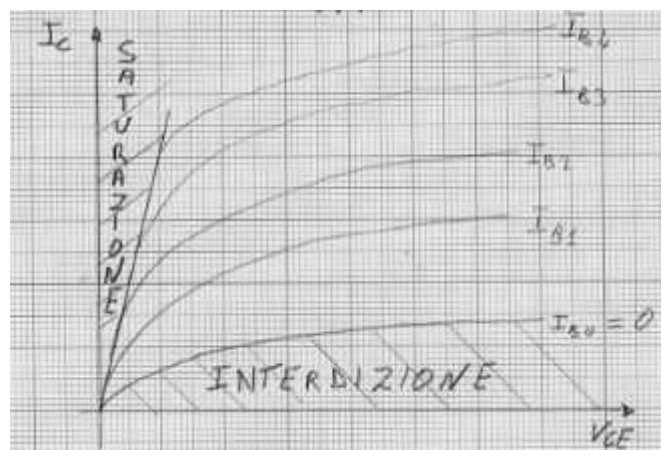
Il transistor, opportunamente polarizzato, può essere utilizzato come un interruttore che può essere aperto o chiuso, regolando la corrente di base. Consideriamo il seguente circuito:



Quando l'interruttore si trova verso il basso, la tensione $V_{BE} = 0$; la corrente di base $I_B = 0$; la $I_C = 0$; il transistor è interdetto, non conduce e si comporta come un circuito aperto. La tensione di uscita sul collettore assume il massimo valore $V_u = V_{CC}$.

Quando, invece, spostiamo verso l'alto l'interruttore, la base del transistor è polarizzata direttamente, il transistor va in saturazione, la I_C assume il massimo valore, il transistor si comporta da circuito chiuso. La tensione di uscita assume il valore $V_u = 0$.

Se consideriamo le caratteristiche di uscita del BJT:



Possiamo considerare tre zone:

1. **Zona di saturazione:** è la zona in cui il transistor conduce, I_C raggiunge il massimo valore, V_{CE} assume valori molto bassi.
2. **Zona attiva:** è la zona centrale delle caratteristiche, in tale zona viene utilizzato come amplificatore, avendo un comportamento abbastanza lineare.
3. **Zona di interdizione:** è la zona in cui il transistor si comporta da circuito aperto, I_C assume valori molto bassi, V_{CE} valori molto alti.