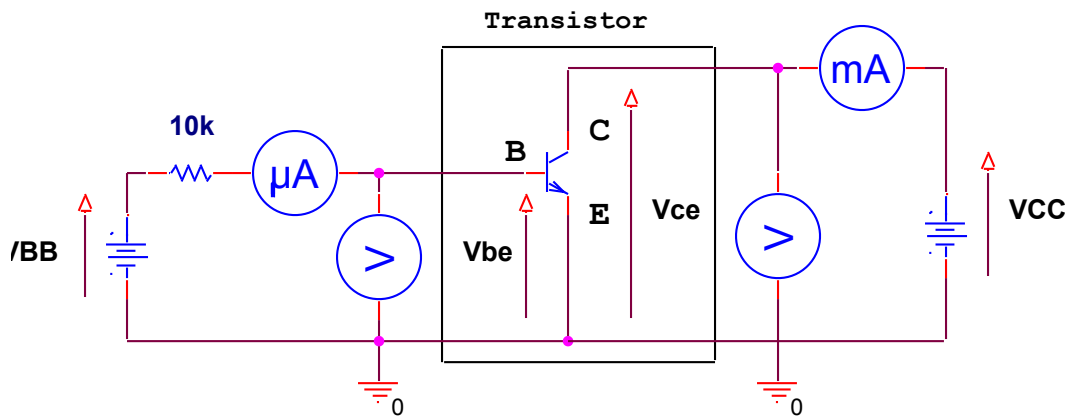


## Transistor BJT

### I. Caratteristiche del transistor BJT

Lo scopo di questa prima parte dell'esperienza è quello di ricavare la caratteristica in uscita e in ingresso del transistor BJT. Lo schema elettrico consigliato è presentato in fig. 1 dove il transistor BJT del tipo npn è collegato a emettitore comune.



**Fig. 1** Schema elettrico del circuito per ricavare le curve caratteristiche di un transistor

Il comportamento del transistor collegato in questo modo è il seguente: facendo passare una piccola corrente  $I_b$  dentro la base si ottiene un grande passaggio di corrente  $I_c$  sul collettore. Il rapporto di amplificazione è definito come:

$$\beta_f = h_{FE} = I_c / I_b$$

Questa amplificazione è generalmente compresa fra 10 e qualche centinaia e dipende oltre che dalla sua costruzione, anche dalla temperatura del transistor; infatti l'espressione della corrente in una giunzione, ricavata nell'esperimento del diodo:

$$I = I_s (e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$$

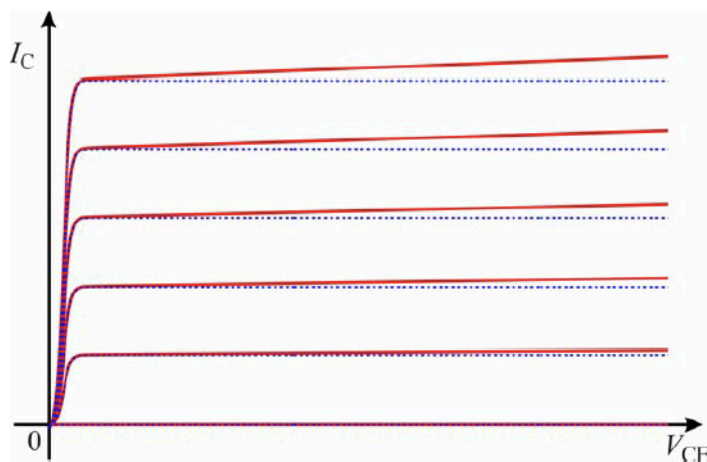
dipende dalla temperatura assoluta sia nella corrente  $I_s$  che nel valore dell'esponente. A parità di tensione applicata ai capi della giunzione, aumentando la temperatura aumenta la corrente nella giunzione. Per evitare che le caratteristiche che si stanno ricavando siano compromesse dal forte aumento della temperatura del transistor è necessario **limitare la potenza dissipata** soprattutto nel circuito di collettore. A tal fine è **necessario disegnare, prima di iniziare le misure, la curva di massima potenza**:

$$P_{max} = V_{ce} I_c$$

che nel piano  $I_c = f(V_{ce})$  è rappresentata da un'iperbole. Il transistor disponibile in laboratorio è del tipo **NPN** con sigla **TIP31** e può dissipare al massimo **1W**, pertanto se la tensione  $V_{ce}$  è 2 V si può far passare 0.5 A, mentre con  $V_{ce} = 6$  V la  $I_c$  massima che si può far passare è 0.17 A, e così via.

Si richiede di ricavare la famiglia di curve  $I_c = f(V_{ce})$  per  $I_b = \text{costante}$  (caratteristica in uscita) come presentato per esempio in fig. 2, costruendo la tabella 1, variando la corrente  $I_b$  da **100  $\mu\text{A}$**  a **350  $\mu\text{A}$**  a intervalli di **50  $\mu\text{A}$** . Dagli stessi dati è poi possibile ricavare la caratteristica in ingresso, semplicemente profilando la tabella 1 in modo opportuno.

Eventualmente, tra una variazione di  $I_b$  e l'altra, lasciare raffreddare il transistor, prima di riprendere le misure con la nuova  $I_b$ .



**Fig. 2** Caratteristica  $I_c = f(V_{ce})$  per  $I_b = \text{costante}$

### Procedimento:

1. Realizzare il circuito di fig. 1 utilizzando due tester digitali e due analogici.
2. Variando  $V_{be}$ , impostare una **corrente di base di 100  $\mu\text{A}$** , leggendola sull'amperometro digitale.
3. Leggere la tensione  $V_{be}$  sul tester digitale.
4. Variando la  $V_{ce}$ , variare la tensione  $V_{ce}$  (misurarla con il voltmetro digitale) e leggere la corrente  $I_c$  sull'amperometro digitale.
5. Per sicurezza, annotare la corrente  $I_b$  e la tensione  $V_{be}$  per ogni variazione di  $V_{ce}$ .
6. Impostare una corrente di base a **150  $\mu\text{A}$**  e rifare le misure cambiando  $V_{ce}$ .
7. Ripetere le misure fino alla corrente  $I_b = 350 \mu\text{A}$ , procedendo per incrementi di **50  $\mu\text{A}$**  (vedi tabella)

### Analisi dati:

1. Ricavare la famiglia di curve  $I_c = f(V_{ce})$  per  $I_b = \text{costante}$ .
2. Ricostruire la famiglia di curve per  $I_b = f(V_{be})$  per  $V_{ce} = \text{costante}$ , per un valore di  $V_{ce}$
3. Graficare  $\beta_f = f(I_c)$  per  $V_{ce} = \text{costante}$

| $I_b$<br>[ $\mu A$ ] | $V_{ce}$ [V] | $V_{be}$ [V] | $I_c$ [mA] |
|----------------------|--------------|--------------|------------|
| 100                  | 0            | -----        | -----      |
| 100                  | 0.1          | -----        | -----      |
| 100                  | 0.2          | -----        | -----      |
| 100                  | -----        | -----        | -----      |
| 100                  | 0,5          | -----        | -----      |
| 100                  | 1            | -----        | -----      |
| 100                  | 2            | -----        | -----      |
| 100                  | —            | -----        | -----      |
| 100                  | 10           | -----        | -----      |
| 150                  | 0            | -----        | -----      |
| 150                  | 0,1          | -----        | -----      |
| 150                  | —            | -----        | -----      |

## II. Modi di funzionamento del transistor BJT: attivo (amplificatore), interdizione e saturazione (stati logici)

### Amplificatore:

Il più semplice amplificatore a un transistor a emettitore comune è presentato in **fig. 1**

**Attenzione:** utilizzare come **Rc** una resistenza ad alta potenza in metallo dorato del valore di circa 46 Ohm o 100 Ohm.

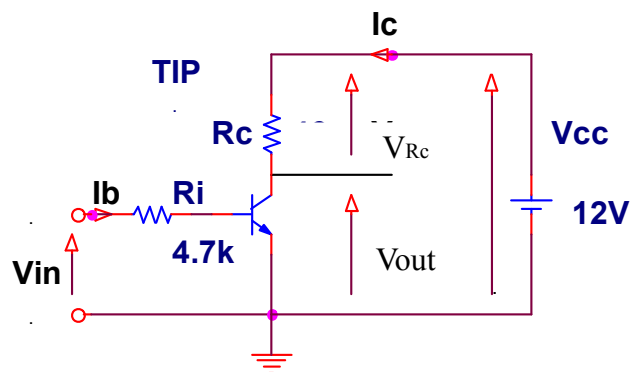


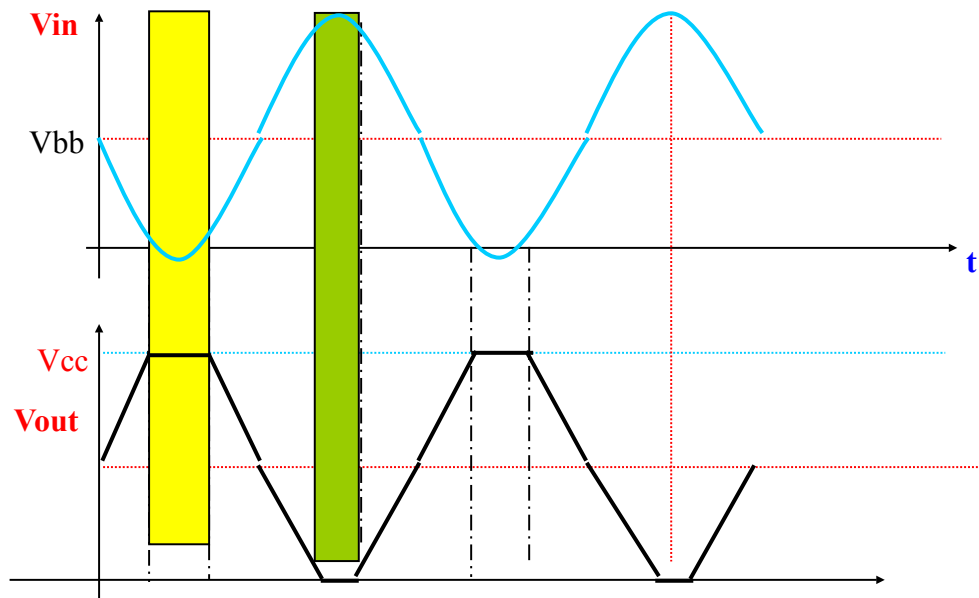
Fig. 1 Amplificatore a un transistor npn a emettitore comune

Una tensione superiore alla tensione di soglia applicata all'ingresso genera una corrente  $I_b$ . Sul collettore passa una corrente  $I_c = I_b \beta_f$  (avendo definito  $\beta_f$  il rapporto fra la corrente di collettore e quella di base).

La tensione  $V_{CE}$  che è chiamata anche  $V_{out}$  diventa:

$$V_{out} = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - I_c R_c = V_{CC} - I_b \beta_F R_c$$

Una tensione inferiore a quella di soglia applicata all'ingresso non genera alcuna corrente dentro la base (giunzione polarizzata inversamente) quindi  $I_c = 0$  e  $V_{out} = V_{CC}$ .



**Fig.3** Forme d'onda della tensione di ingresso  $V_{in}$  e tensione di uscita  $V_{out}$

Per amplificare sia la parte positiva che negativa di una tensione sinusoidale è necessario sovrapporre una componente continua in modo che il transistor sia sempre in conduzione.

La **fig.3** in alto rappresenta una tensione  $V_{in}$  composta da una tensione continua  $V_{bb}$  sommata a una tensione sinusoidale. Nella parte in giallo si può notare che la tensione diventa negativa e la corrente  $I_b$  diventa zero, il transistor non può condurre e la tensione  $V_{out}$  è uguale a  $V_{CC}$  (figura 3 in basso); il transistor si dice **interdetto** e si comporta come un **interruttore aperto**.

Nelle zona verde, la tensione  $V_{in}$  è molto elevata, passa molta corrente dentro la base, quindi molta corrente sul collettore, superiore alla corrente massima alla saturazione, che è  $V_{CC}/R_c$ ; la  $V_{CE}$  è **nulla** e il transistor si dice **saturo**. Il transistor si comporta come un **interruttore chiuso**.

Gli stati di transistor saturo e interdetto sono usati nei circuiti logici (circuiti dei calcolatori) per ottenere i livelli logici 0 oppure 1.

Per amplificare una sinusoide senza deformarla, si deve mandare all'ingresso dell'amplificatore una tensione  $v_i$  composta anche da una parte continua:

$$v_i = V_{bb} + V_s \sin \omega t \quad \text{con } V_{bb} > V_\sigma$$

usando il modello del diodo, si ottiene:

$$i_b = \frac{V_{bb} - V_\sigma + V_s \sin \omega t}{R_i}$$

che a sua volta moltiplicata per  $\beta_f$  fornisce la corrente di collettore.

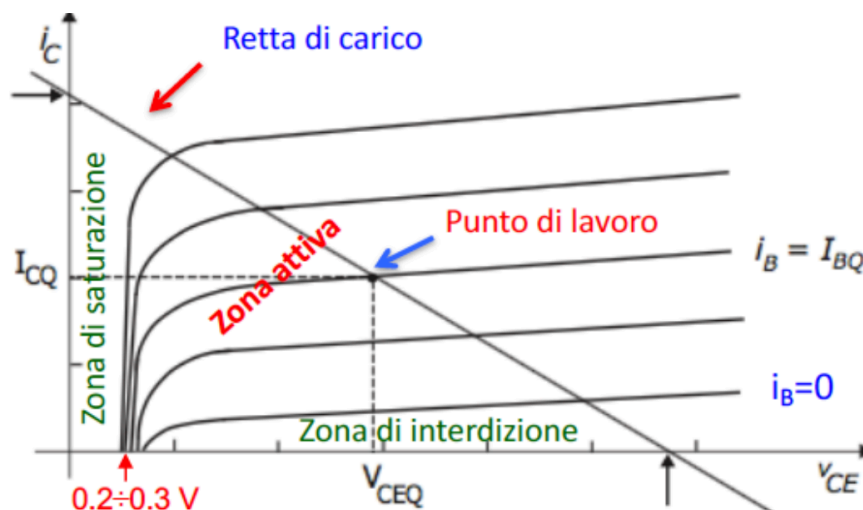
La tensione  $V_{ce} = V_{out}$  diventa:

$$V_{out} = V_{cc} - i_b \beta_f R_c$$

Dunque, sostituendo  $i_b$ :

$$V_{out} = V_{cc} - \left[ V_{bb} - V_\sigma + V_s \sin \omega t \right] \frac{R_c}{R_i} \beta_f$$

La tensione, che rappresenta il nostro segnale,  $V_s \sin \omega t$  risulta essere amplificata di una quantità  $R_c \beta_f / R_i$ . Se  $R_c$  ed  $R_i$  fossero circa uguali l'amplificazione sarebbe circa  $\beta_f$ .



Sovrapponendo alla tensione di offset  $V_{bb}$ , una funzione d'onda quadra o sinusoidale di ampiezza piccola, si può ricavare il fattore di amplificazione del transistor per piccoli segnali:

$$h_{fe} = \beta_0 = \left| \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right|_{V_{CE} = \cos t}$$

La **fig.3** rappresenta la famiglia di caratteristiche  $I_c = f(V_{ce})$  per il transistor **TIP 31**. La retta che unisce i punti  $V_{cc}$  ed  $I_{cc}$  è chiamata **retta di carico** e si ricava scrivendo l'equazione della maglia di collettore:

$$V_{cc} = V_{ce} + R_c I_c \quad (1)$$

I punti  $V_{cc}$  e  $I_{cc}$  ( $I_{cc} = V_{cc} / R_c$ ) rappresentano rispettivamente il transistor interdetto e il transistor saturo. Se il transistor conduce deve essere soddisfatta la (1) quindi il punto di funzionamento del transistor deve stare sulla retta di carico.

In **fig. 3** è presentato il meccanismo di amplificazione dell'amplificatore di **fig. 1**:

Il segnale di corrente con sovrapposta una corrente continua viene mandato dentro alla base del transistor: si genera una corrente di collettore che diventa una tensione ai capi della resistenza;  $V_{ce}$  risulta sfasata di  $180^\circ$  rispetto alla corrente di base.

### Procedimento:

#### 1. Impostare il punto di lavoro del transistor a 6V

**1.1** Dopo aver montato il circuito sull'apposita basetta, collegare all'ingresso dell'amplificatore il generatore di funzione impostato in modo da generare un'onda quadra di frequenza di qualche KHz e di ampiezza di qualche centinaia di mV sovrapposta a un offset  $V_{bb}$  (componente in continua della funzione d'onda). **Per questo scopo si deve usare la manopola di "offset" del generatore di funzioni.** Regolare l'offset del generatore di funzioni in ingresso in modo tale da **ottenere la componente in continua del segnale di uscita  $V_{out}$ , letto sull'oscilloscopio accoppiato in DC, pari a 6V.** Questo è il **punto di funzionamento, o di lavoro, scelto per il transistor.**

#### 2. Misurare il fattore di amplificazione del transistor

**2.1** Sovrapporre alla tensione di offset un'onda quadra molto piccola equivale a dare degli incrementi a  $I_b$ .

Ricavare con misure eseguite con l'oscilloscopio gli incrementi di  $I_b$  e  $I_c$  ( $\Delta V$  è la tensione picco-picco):

$$\Delta I_b = \frac{\Delta V_i}{R_i} \qquad \Delta I_c = \frac{\Delta V_{ce}}{R_c}$$

Dal rapporto fra queste due quantità si ottiene  $\beta_0$

$$\beta_0 = \left| \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right|_{V_{ce}=6V}$$

**2.2** Applicare un segnale sinusoidale e dal rapporto fra  $V_{in}$  e  $V_{out}$  letti sull'oscilloscopio calcolare l'amplificazione in tensione del segnale:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

e verificare se l'amplificazione ottenuta è compatibile con:

$$A_v = \frac{R_c}{R_i} \beta_0$$

#### 3. Amplificazione di un'onda sonora

Collegare in parallelo alla resistenza  $R_c$  un altoparlante e, mandando segnali di frequenza di circa 1kHz, sentire l'onda sonora che si genera. Si può aumentare la frequenza fino alla frequenza di taglio dell'orecchio umano. Modulare il segnale in frequenza con lo sweep del generatore di funzioni e ascoltare l'onda sonora modulata.

#### **4. Transistor in saturazione e interdizione**

Osservare l'aumento della distorsione della tensione sinusoidale aumentando la tensione del segnale di ingresso fino a raggiungere la situazione della fig. 3 (transistor in saturazione e interdizione).