

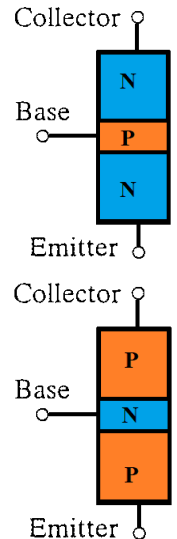
**TRANSISTOR BJT:** Bipolar Junction Transistor (baipola giokcion transistor), Transistor a giunzione bipolare

Il BJT è un chip (CI) di silicio con una struttura contenete tre zone drogate in modo diverso:

- NPN si hanno due zone di tipo N separate da una di tipo P;
- PNP si hanno due zone di tipo P separate da una di tipo N;

la zona intermedia si chiama **base (B)** mentre quelle esterne vengono chiamate rispettivamente **collettore (C)** ed **emettitore (E)**.

Le due zone esterne presentano una forte percentuale di drogaggio (per questo si dice **bipolare**), mentre la base ha spessore inferiore alle altre ed è debolmente drogata.



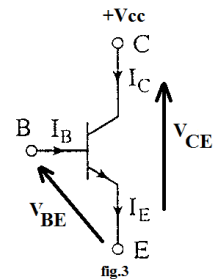
Il BJT può essere impiegato come:

- Amplificatore di segnali;
- Interruttore elettronico.

Amplificazione, si intende la manipolazione di un segnale ai fini di aumentarne il valore (potenza). A questo punto si parla di quadripolo attivo.

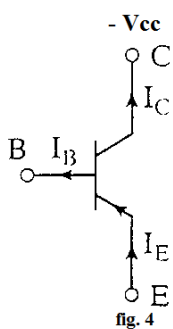
Un quadripolo si dice attivo, quando il rapporto fra il segnale di uscita e il segnale d'ingresso è strettamente maggiore di uno (1).

bipoli attivi: generatore di tensione, generatore di corrente, la differenza è che i passivi da soli non fanno niente, gli attivi invece già da soli producono qualcosa.



**SIMBOLO**

NPN: in questa struttura il BJT è alimentato positivamente, per comprenderne il funzionamento si faccia riferimento a questo modello (fig 3).



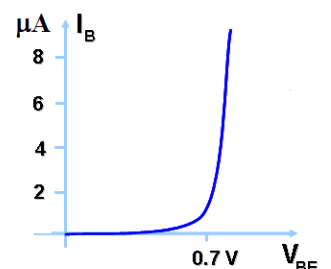
PNP : è alimentato negativamente (fig 4), in cui la circolazione di correnti avviene con verso opposto alla NPN.

- Emettitore (E): perché emette elettroni verso la zona centrale
- Base (B): nella fabbricazione del BJT è il punto di partenza per la realizzazione del componente;
- Collettore (C): perché raccoglie gli elettroni dopo che si sono diffuse attraverso la regione di base.

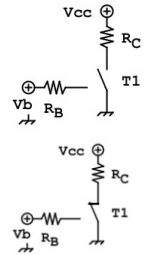
**CURVE CARATTERISTICHE DEI BJT**

Le caratteristiche sono divise in due famiglie:

Caratteristiche di ingresso: riportano l'andamento esponenziale della corrente di base ( $I_B$ ) e la tensione d'ingresso ( $V_{BE}$ ), per valori costanti di ( $V_{CE}$ ). In esse si può notare che la giunzione base-emettitore si comporta come un diodo ( tensione di soglia 0,7 V ) e  $I_B$  piccola dell'ordine di qualche  $\mu A$ . Il BJT come il diodo è un **dispositivo non lineare**.



**Caratteristiche di uscita:** Mette in relazione la tensione di uscita  $V_{CE}$  e la corrente  $I_C$ . Notiamo che vi sono diverse caratteristiche di uscita, ognuna ottenuta per un valore prefissato della corrente di base  $I_B$ , in cui è possibile individuare le tre regioni di funzionamento del transistor (interdizione, saturazione e la zona attiva):

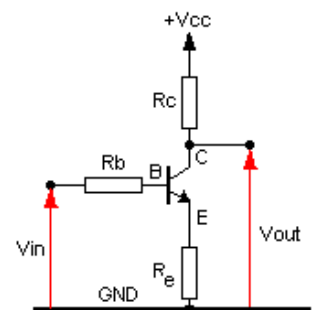
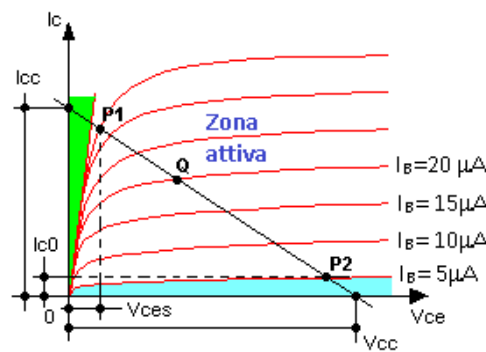


a. La **regione di interdizione (OFF)**, in cui il BJT si comporta da circuito aperto e la corrente di collettore ( $I_{C0} \approx 0$ ), corrispondente ad una corrente di base nulla ( $I_B \approx 0$ ), invece la  $V_{CE} = V_{CC}$ .

b. La **regione di saturazione (ON)**, per il silicio questa regione si ha per valori di  $V_{CEsat} = 0,2$  V. questa tensione dipende dalle correnti in gioco, sia di base che di collettore. Il BJT in questa regione si comporta da cortocircuito; per cui, al variare di  $I_B$  non si hanno variazioni di  $I_C$ .

c. La **regione attiva o lineare**, è la regione in cui il BJT lavora come amplificatore di corrente, però per rendere il comportamento lineare del BJT, occorre regolare i valori di polarizzazione ( $R_c$ ,  $R_b$  e  $R_e$ ) in modo che:

i. La corrente  $I_C$  direttamente proporzionale alla corrente  $I_B$  tramite la relazione  $I_C = h_{FE} \cdot I_B$  ( $h_{FE} = \beta$ , guadagno statico di corrente dell'ordine di 100);

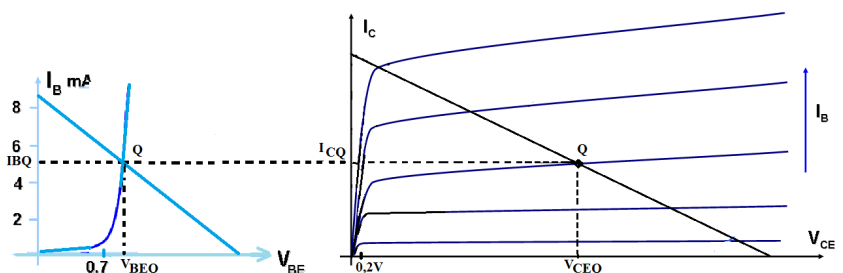


ii. La tensione  $V_{CE}$  direttamente proporzionale alla corrente  $I_B$  in base alla relazione:  $V_{CE} = V_{CC} - R_c I_C = V_{CC} - R_c h_{FE} \cdot I_B$

**LA POLARIZZAZIONE DEL BJT E IL PUNTO DI LAVORO**

La **polarizzazione** consiste nel **collegare** al transistor, alimentato in continua, un **insieme di resistenze**. È una operazione necessaria per portare il componente ad operare nelle condizioni che ne permettono l'uso; regolando opportunamente i valori di corrente e di tensione, attraverso il dimensionamento delle resistenze della maglia di ingresso e di uscita, e possibile fissarli in zone specifiche delle caratteristiche per poter determinare il **punto di lavoro**, in particolare, nella zona **attiva o lineare**, per farsi che il BJT lavora come **amplificatore**.

Il **punto di lavoro**, è un punto (Q) di cui sono note tensione e corrente a riposo, cioè in assenza di segnale; si ottiene dall'intersezione tra la **retta di carico** e le curve caratteristiche di uscita, attraverso la polarizzazione del BJT.



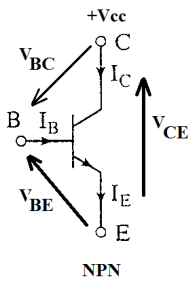
La **retta di carico** è la rappresentazione grafica del legame tra tensioni e correnti calcolati attraverso il secondo principio di Kirchhoff sia della maglia di ingresso che di uscita.

**RELAZIONI – EQUAZIONI**

**GUADAGNI STATICI**

$\beta = h_{FE}$  = Common-emitter current gain: guadagno di corrente emettitore comune ( $\beta \sim 10 \div 100$ )

$\alpha$  = Common-base current gain: guadagno di corrente base comune ( $\alpha \sim 0,98 \div 0,998$ )



$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Nota:  $\alpha$  e  $\beta$  chiamati guadagni statici perché, il BJT è alimentato in corrente continua (DC)

BJT come un nodo:  $I_E = I_B + I_C$

BJT come maglia:  $V_{CE} = -V_{BC} + V_{BE}$

**BJT AMPLIFICATORE DI CORRENTE:**  $I_C = h_{FE} \cdot I_B + (1 + h_{FE}) \cdot I_{CBO}$

$I_{CBO}$ : corrente di polarizzazione Inverse (collettore-base), dell'ordine del nA. Idealmente, nel caso di un BJT per piccoli segnali, con potenza minore di 1 [W], si considera  $I_{CBO} = 0$  e di conseguenza si può scrivere:  $I_C \approx h_{FE} \cdot I_B$  ;  $I_C \approx \alpha \cdot I_E$

### LA POTENZA DISSIPATA DAL COMPONENTE

In un BJT polarizzato, sono in gioco due potenze:

- quella dissipata dalla maglia d'ingresso:  $P_i = I_B \cdot V_{BE}$  ;
- quella dissipata dalla maglia d'uscita:  $P_u = I_C \cdot V_{CE}$ ;

$P_i$  ha valori molto bassi, in quanto  $I_B$  è dell'ordine dei  $\mu A$  e  $V_{BE} = 0,7V$ , mentre  $P_u$  è centinaia di volte maggiore, si trascura pertanto  $P_i$ , facendo coincidere la potenza dissipata  $P_D$  con quella della solo maglia d'uscita:  $P_D = I_C \cdot V_{CE}$

Il legame tra la potenza dissipata e la temperatura è dato dalla relazione:

$$P_D = 1/K_{ja}(T_j - T_a)$$

$T_j$  : temperatura della giunzione CE; il valore massimo per il Si è  $\approx 160^\circ C$

$T_a$ : temperatura ambiente; viene normalmente assunta pari a  $25^\circ C$ ;

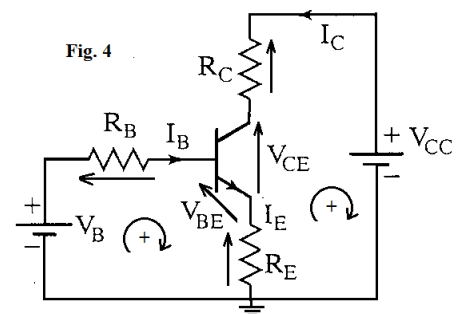
$K_{ja}$ : resistenza termica giunzione – ambiente, varia nel campo  $0,2 \div 1000 \text{ }^\circ C/W$

Conoscendo la potenza dissipabile, è possibile scegliere il componente più indicato nella realizzazione di un amplificatore dal quale si richiede una specifica potenza per il segnale d'uscita, attraverso la **figura di merito**  $F = P_D/P_u$ ; Affinché la potenza dissipata dell'amplificatore risulta minima, il parametro **F deve essere molto piccolo** possibile.

### CIRCUITO DI POLARIZZAZIONE E STABILIZZAZIONE DI UN BJT AD EMTTITORE COMUNE

Viene detta ad emettitore comune (CE: Common Emitter) la configurazione del BJT nella quale l'emettitore è comune sia all'ingresso che all'uscita.

**Circuito di polarizzazione:** è la prima fase per il funzionamento del BJT come amplificatore, questo ci permette di calcolare il punto di lavoro (Q) definendo i valori delle resistenze, quando il BJT è alimentato con una tensione continua. Per rendere stabile (fisso) il punto di lavoro occorre inserire la resistenza  $R_E$  sull'emettitore, che rappresenta una reazione negativa tra la maglia di uscita e quella d'ingresso.



Il **punto di lavoro** si ottiene, applicando il **2° principio di Kirchhoff** sulla maglia (la somma algebrica delle tensioni è uguale a zero).

**Maglia d'ingresso:**  $V_B = V_{BE} + R_B \cdot I_B + R_E \cdot (I_B + I_C)$  viene trovato il punto d'intersezione con la caratteristica d'ingresso.

**Maglia di uscita:**  $V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot (I_B + I_C)$  questa relazione con i valori di  $I_B$  trovati in precedenza determinano il punto di lavoro.

Per una **sufficiente stabilizzazione** del punto di lavoro, occorre:

- imporre  **$R_E \cdot I_C = 1,5 \div 3 V$** , ( $R_E \cdot I_C \gg \Delta V_{BE}$ ): ridurre la dipendenza del punto di lavoro dalle variazioni di  $V_{BE}$  con l'aumento della temperatura, si ottiene ( $V_B \gg V_{BE}$ ).

- imporre  $R_B \ll h_{FE} \cdot R_E$ : ridurre la dipendenza del punto di lavoro dal guadagno statico di corrente  $h_{FE}$ , si ottiene  $I_C \approx (V_B - V_{BE}) / R_E$ .

**ALTRI CIRCUITI DI POLARIZZAZIONE**

Da ricordare che, la polarizzazione del BJT, ha la finalità di farlo funzionare da **amplificatore**, cioè e di portarlo a funzionare nella zona attiva lineare delle sue curve caratteristiche di uscita.

Per trovare il punto di lavoro occorre trasformare il circuito come nella fig. 4, e calcolare  $E_B, E_C, R_B, R_E$  e  $R_C$ .

a - La semplificazione del circuito fig. 5, avviene attraverso la separazione della maglia d'ingresso da quella di uscita, come nella fig. 7.

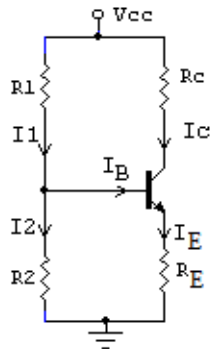


fig. 5

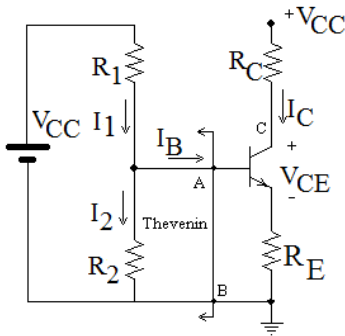


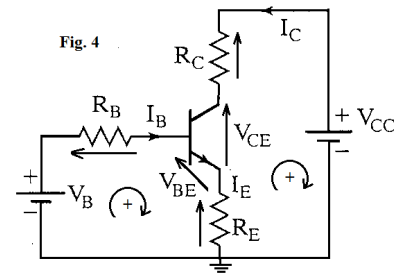
fig. 7

La maglia d'ingresso, si semplifica con Thevenin tra la sezione A-

B.

$R_B = R_{eq} = R_1 // R_2$ : parallelo tra  $R_1$  e  $R_2$  ponendo  $V_{CC} = 0$  (cortocircuito)

$V_B = E_{eq} = V_{AB}$  (a vuoto) =  $R_2 / (R_1 + R_2) \cdot V_{CC}$  (regola partitore di tensione)



b- Per rendere il punto di lavoro stabile, insensibile alla variazione della temperatura, occorre:

$I_1 \approx I_2 \gg I_B \rightarrow I = I_1 \approx I_2 > 10 \cdot I_B \approx 10 \cdot (I_C / h_{FEmin})$

$I_B \approx (I_C / h_{FEmin})$

c- resistenza emettitore  $R_E$ , si calcola ponendo:

$V_{RE} = V_{CC} / 10$

d- resistenza sul collettore  $R_C$ , si calcola ponendo:

$V_{RC} = 9V_{CC} / 20$

e- partitore di polarizzazione  $R_1$  e  $R_2$ :

$R_1 = (V_{CC} - V_B) / I = (V_{CC} \cdot R_B) / V_B$

$R_2 = R_1 \cdot R_B / (R_1 - R_B)$

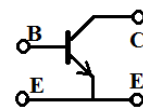
$R_E \cdot I_C = 1,5 \div 3 V$

$R_B \ll h_{FE} \cdot R_E$

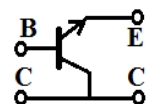
**LE CONFIGURAZIONI**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Common-Base Biasing (CB) : input = <math>V_{EB}</math> &amp; <math>I_E</math></li> <li>• Polarizzazione base comune: output = <math>V_{CB}</math> &amp; <math>I_C</math></li> </ul>	
--	--

- Common-Emitter Biasing (CE): input =  $V_{BE}$  &  $I_B$
- Polarizzazione emettitore comune output =  $V_{CE}$  &  $I_C$



- Common-Collector Biasing (CC): input =  $V_{BC}$  &  $I_B$
- Polarizzazione collettore comune: output =  $V_{EC}$  &  $I_E$



## CIRCUITI AMPLIFICATORI A TRANSISTOR

Quando i transistor sono polarizzati in zona attiva, un piccolo segnale sul circuito di ingresso (base) impone grandi variazioni della corrente sul circuito di uscita (collettore). Sfruttando questa caratteristica si ottengono circuiti in grado di amplificare piccoli segnali di tensione.

L'amplificatore è un quadripolo attivo, in grado di aumentare la potenza (aumentando la tensione, la corrente o entrambi) che un segnale può trasferire ad un carico.

Il guadagno è un rapporto tra il segnale di uscita e il segnale d'ingresso, nel caso di un amplificatore, ha un valore maggiore di uno ( $>1$ ).

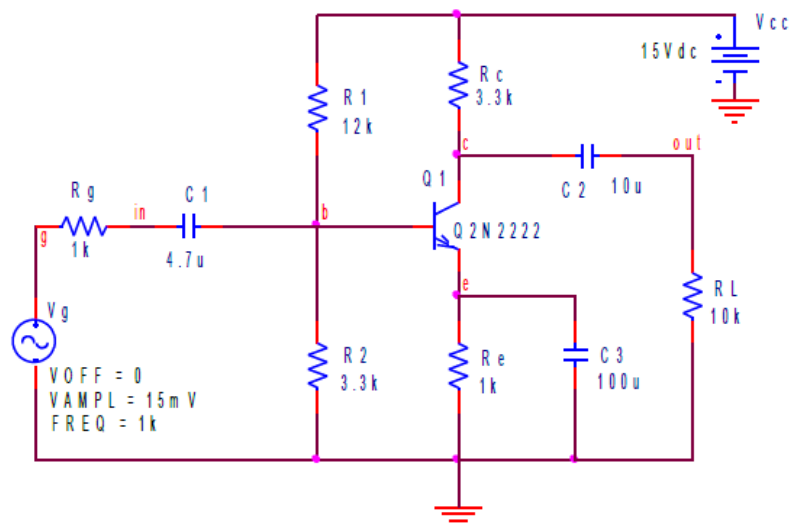
Si è anche rilevato che definendo i guadagni di tensione e di potenza degli amplificatori, si fa riferimento a valori assunti **nella banda passante**, in cui i condensatori sono ammissibili a cortocircuiti e gli induttori a circuiti aperti.

**In generale gli amplificatori possono essere di tensione o di potenza.**

### AMPLIFICATORE BJT A EMETTITORE COMUNE

Affinché, l'analisi dell'amplificatore risulta completa, occorre studiarlo in due momenti:

- 1- **in regime statico**: quando il circuito è alimentato solo con la tensione in corrente continua  $V_{CC}$ . In questo caso si ottiene il circuito di polarizzazione, perché i condensatori alimentati in continua si comportano da circuiti aperti.
- 2- **In regime dinamico**: il comportamento del circuito rispetto all'ingresso sinusoidale,  $V_{CC}$  va annullato (corto circuito)



**I condensatori C1, C3**: vengono chiamati di accoppiamento, e dunque di impedire che il circuito di polarizzazione sia alterato dal collegamento con il generatore di segnali e con eventuale carichi sui circuiti d'uscita; e di separare la componente continua da quella del segnale

**C2 di by-pass**, ha il compito di separare la componente continua (costante) da quella del segnale.

$$(1/\omega C_2) \leq R_E/10$$

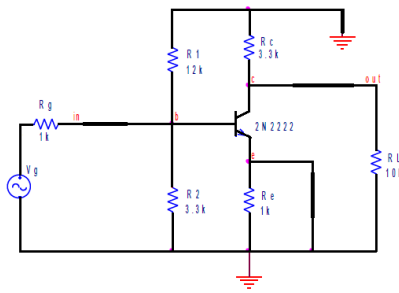
Alle frequenze intermedie di centro banda le reattanze capacitive di C1, C2 e C3 si possono considerare nulle (corto circuito).

### STUDIO DINAMICO IN CENTRO BANDA ( $V_g \neq 0$ e $V_{CC} = 0$ )

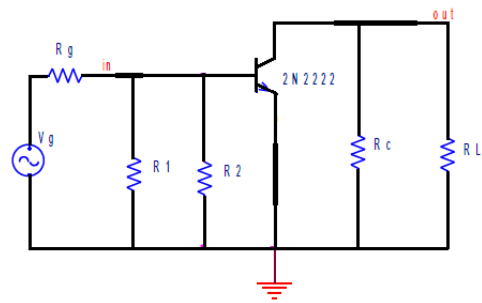
Il circuito da analizzare si ottiene:

- 1- ponendo l'alimentazione a corto circuito  $V_{CC} = 0$

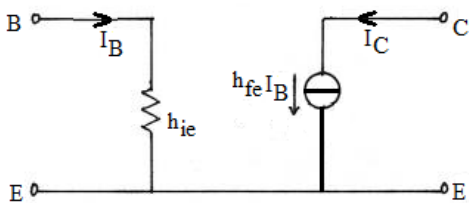
2- nell'analisi in centro banda: condensatori in corto circuito e induttori in circuito aperto



ulteriore semplificazione



Il circuito equivalente semplificato del BJT



$h_{ie}$ : è la resistenza dinamica d'ingresso del BJT, varia nel campo  $500\Omega \div 20\text{ k}\Omega$

$h_{fe}$  guadagno dinamico di corrente a emettitore comune per deboli segnali, varia nel campo  $40 \div 300$

### MODELLO DINAMICO A PARAMETRI IBRIDI

Si ottiene, sostituendo al BJT il proprio circuito equivalente

#### Guadagno di tensione:

$$G_V = V_U / V_i = - (h_{fe} / h_{ie}) * R_p ; \quad R_p = R_c // R_L$$

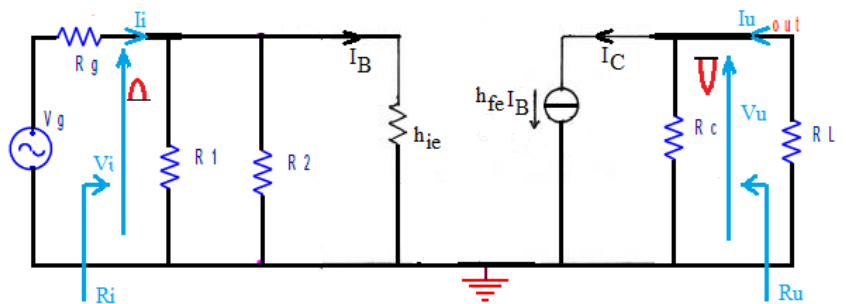
il segno negativo indica che  $V_U$  è sfasato di  $180^\circ$  rispetto a  $V_i$

#### Guadagno di corrente: $G_i = I_U / I_i =$

$$(R_i * h_{fe} / h_{ie}) * R_p / R_L$$

**la resistenza d'ingresso:**  $R_i = V_i / I_i = (R_B * h_{ie}) / (R_B + h_{ie}) ; \quad R_B = R_1 // R_2$

**la resistenza d'uscita:**  $R_U = V_U / I_U = R_c$



### COLLETORE COMUNE O INSEGUITORE DI EMITTER

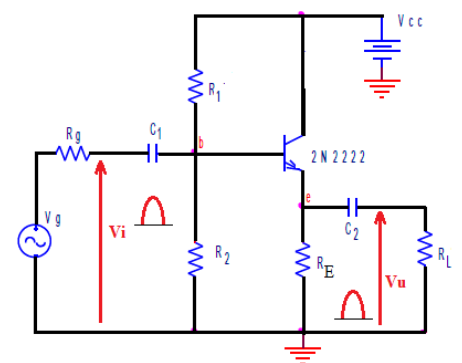
In questo schema, il collettore è collegato direttamente a  $V_{cc}$  ( $R_c = 0$ ), il segnale d'ingresso viene introdotto nella base e l'uscita viene prelevata dall'emettitore.

Caratteristiche:

- 1- il guadagno di tensione è minore o al più uguale a 1, questo circuito non amplifica;
- 2- la fase della tensione di uscita è uguale a quella d'ingresso;
- 3- la resistenza d'ingresso è molto elevata (decine di  $\text{k}\Omega$ );
- 4- la resistenza d'uscita è molto bassa (decine di  $\Omega$ );

Principali impieghi:

- 1- è impiegato come inseguitore di tensione  $V_i = V_u$



- adattatore di impedenza (buffer) fra quadripoli, questo grazie alla resistenza d'ingresso elevata e alla resistenza d'uscita bassa.

### BASE COMUNE

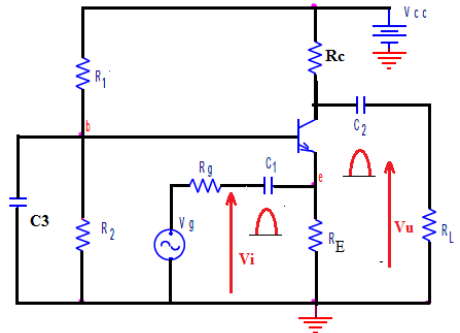
In questa configurazione, il segnale d'ingresso viene introdotto nell'emettitore e prelevato dal collettore.

Caratteristiche:

- guadagno di tensione abbastanza elevato;
- la fase della tensione d'uscita è uguale a quella d'ingresso;
- il guadagno di corrente è minore o al più uguale a 1;
- resistenza d'ingresso è molto bassa (poche decine di  $\Omega$ ), impone l'utilizzo di sorgenti di segnale a bassa impedenza, che si ottiene facilmente con antenne (75 o 150  $\Omega$ )
- resistenza d'uscita coincide con quella del carico.

Principali impieghi:

la connessione con base comune ha efficace utilizzo negli amplificatori selettivi per alte frequenze, nei quali il carico è costituito da un circuito risonante parallelo. Questa configurazione è utilizzata nei circuiti di selezione nei ricevitori radio-televisivi.



### IL BJT IN FUNZIONAMENTO ON-OFF

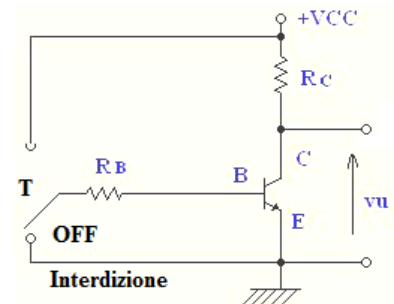
**Scopo della prova:** In questa prova ci occuperemo di verificare in laboratorio come un transistor BJT si possa comportare da porta NOT.

#### PARTE TEORICA:

Titolo argomento: **IL TRANSISTOR COME INTERRUOTORE.**

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

1- T = OFF: l'interruttore si trova verso il basso la tensione  $V_{BE} = 0$ ;  $I_B = 0$ ;  $I_C = 0$ . Il transistor è **interdetto**, non conduce, e si comporta da circuito aperto. La tensione di uscita sul collettore, raggiunge il valore massimo  $V_u = V_{CC} = V_{CE}$ ;  $I_C = I_{CB0}$  idealmente  $I_C = 0$



2- T = ON: l'interruttore verso l'alto, la base del transistor è polarizzata direttamente, e il transistor va in **saturazione**, la  $I_C$  raggiunge il massimo valore, il transistor si comporta da circuito chiuso, e la tensione di uscita assume il valore  $v_u = 0$ .

Per mandare il transistor in saturazione è necessario iniettare una elevata corrente in base  $I_B \geq I_C / h_{FE}$  con

$$V_{BE(sat)} = 0,7V \text{ e } V_{CE(sat)} = 0,2V$$

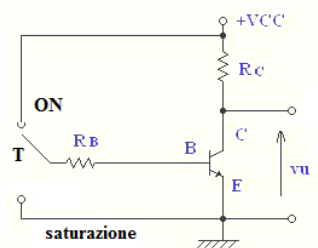
- In un circuito reale, a causa delle cadute di tensione interne al transistor ( $V_{cesat}$ ) e di tolleranze dei componenti, la saturazione potrebbe discostarsi dal valore calcolato, perciò per essere sicuri che si utilizza il valore minimo di  $h_{FE}$ .
- Per ottenere una saturazione sicura si aumenta la  $I_B$  di un 20% (chiamata  $I_{Bsat}$ ):

$$I_b \geq 1.2 \frac{I_{cMAX}}{h_{FE_{MIN}}}$$

$$V_{CE} = V_{CEsat} \rightarrow V_{CEsat} = V_{CC} - R_C I_{Csat} \rightarrow I_{Csat} = V_{CC} / R_C$$

$$I_{Bsat} = 1,2(I_{Csat} / h_{FE_{min}}) ; R_C = (V_{CC} - V_{CEsat}) / I_{Csat}$$

Dalla maglia d'ingresso si ricava che la tensione d'ingresso necessaria a portare il BJT in saturazione, vale:  $V_{isat} = V_{BEsat} + R_B I_{Bsat}$  ;  $R_B = (V_{CC} - V_{BEsat}) / I_{Bsat}$



Idealmente:  $V_{CE} = 0$ ;  $R_C = V_{CC} / I_{Csat}$ ;  $R_B = (V_{CC} - V_{BEsat}) / I_{Bsat}$ ;  $I_{Csat} = V_{CC} / R_C$

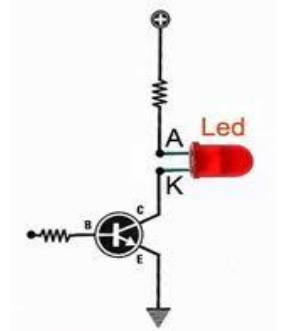
Questa è la tabella di verità teorica:

A (T)	Y (Vu)
0	0
1	1

**PARTE PRATICA:**

Gli strumenti che ci sono serviti per lo svolgimento della prova sono stati:

- 1- Una basetta;
- 2- Due resistori ( $R_C = 2,2K\Omega$  e  $R_B = 1K\Omega$ );
- 3- Un LED;
- 4- Fili di collegamento;
- 5- Un transistor BJT (2N2222);



Per facilitarci il lavoro abbiamo inserito nel circuito un diodo LED in modo da capire dal suo stato (cioè se fosse spento o acceso) se effettivamente il BJT si comportava da porta NOT.

Una volta aver montato tutto il circuito, e controllato che fosse montato bene, abbiamo applicato una tensione pari a 5V. Quindi, dopo aver dato tensione al circuito, ci siamo accorti che quando il morsetto A si trovava posizionato a VCC non conduceva (ovvero si comportava da circuito aperto) e il LED non illuminava; mentre quando il morsetto A si trovava a massa conduceva (ovvero si comportava da circuito chiuso) e il LED illuminava.

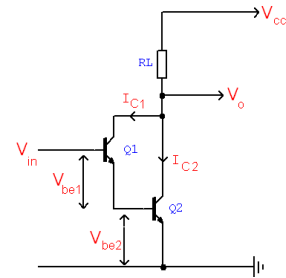
**CONNESSIONE DARLINGTON**

Se si collegano due transistor, un driver a bassa potenza e un finale di potenza, si ottiene un dispositivo a tre terminali che funziona come un transistor singolo, ma con un guadagno di corrente complessivo uguale al prodotto dei singoli guadagni.

$$h_{FE} = h_{FE1} * h_{FE2}$$

- la corrente di collettore risulta:  $I_C \approx I_{C2}$
- la corrente di emettitore risulta:  $I_E = I_{E2}$
- la corrente di base invece, è:  $I_B = I_{B1}$

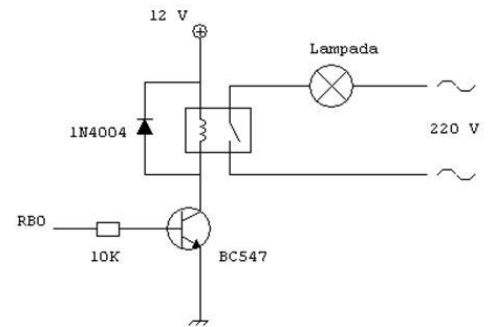
Il darlington può essere utilizzato nel pilotaggio dei motori a piccola potenza.



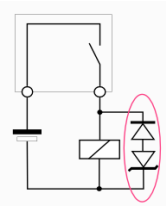
**Protezione di transistor da carichi induttivi**

**carichi induttivi:** avvolgimenti di filo conduttore intorno a nuclei metallici.

Frequentemente carichi induttivi quali Relay, motori DC, vengono pilotati da transistor, siano essi BJT o MOS; perché richiedono elevata corrente di eccitazione o di avviamento. La soluzione più semplice, è quella di utilizzare un transistor di piccola o media potenza, che deve essere in grado di erogare una corrente  $\geq 100mA$ .



In ambedue i casi, è bene sapere che disattivare un carico induttivo determina nei transistori extratensione in senso inverso, ovvero degli **spike** (innalzamento) che possono causare la rottura del transistor pilota (driver). Al fine di proteggere il transistor pilota è possibile utilizzare un diodo (chiamato **diodo di "ricircolo"** o di "libera **circolazione**"



(free wheeling) in parallelo al carico, come riportato in Figura. Così la carica dell'energia immagazzinata nell'induttanza scorre attraverso il diodo e viene dissipata sotto forma di calore. Questo tipo di protezione provoca un leggero tempo di ritardo dell'attuatore, quindi in alcuni casi non è consigliabile

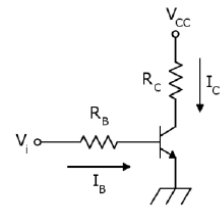
Utilizzare un diodo con tensione inversa almeno dieci volte la tensione di alimentazione del circuito. Si consiglia 1N4007 (7A), 1N4148.

Utilizzando un diodo zener, il rilascio dell'attuatore è molto più rapido. Il diodo zener deve avere una tensione di taglio uguale alla alimentazione del carico.



## Polarizzazione del transistor: esercizi risolti

Si consideri il circuito di Figura. Supponendo  $V_{CC}=5\text{ V}$ ,  $R_B=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=220\ \Omega$ ,  $h_{FE(\min)}=110$ , si verifichi lo stato di saturazione del transistor.



Poichè si tratta di verificare la relazione  $I_B > h_{FE} \cdot I_C$ , calcoliamo preliminarmente  $I_C$  e  $I_B$ . Applicando il Principio di Kirchoff delle Tensioni alla maglia di ingresso (composta da

$V_{CC}$ ,  $R_B$ ,  $V_{BE(\text{sat})}$ ) si trova:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE(\text{sat})}}{R_B} = \frac{5 - 0,8}{10 \cdot 10^3} = 0,42\text{ mA} \quad I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(\text{sat})}}{R_C} = \frac{5 - 0,2}{220} = 21,82\text{ mA}$$

Il rapporto  $I_C/h_{FE}$  vale  $0,1983\text{ mA}$ , quindi la relazione (2) è verificata. Possiamo perciò concludere che il BJT si trova effettivamente in stato di saturazione

Es.2 Si consideri nuovamente il circuito di Figura 9. Supponendo che  $V_{CC}$  valga  $5\text{ V}$  e che  $V_i$  possa assumere i valori  $0$  oppure  $5\text{ V}$ , dimensionare i resistori affinché la corrente di collettore sia nulla quando  $V_i=0\text{ V}$  e valga  $25\text{ mA}$  quando  $V_i=5\text{ V}$ . Si usi un transistor BC 107 ( $V_{CE(\text{sat})}=0,2\text{ V}$ ,  $h_{FE(\min)}=110$ ,  $V_{BE(\text{sat})}=0,8\text{ V}$ ,  $I_C(\text{max})=100\text{ mA}$ ).

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(\text{sat})}}{I_C} = \frac{5 - 0,2}{25 \cdot 10^{-3}} = 192\ \Omega$$

Il valore commerciale è  $R_C=180\ \Omega$  altrimenti si deve utilizzare un trimmer, In questo caso la corrente reale sul collettore (a meno delle tolleranze sui valori dei componenti) vale  $26,67\text{ mA}$ . Questo è il valore cui sarà necessario riferirsi nel prosieguo del dimensionamento.

Affinchè il transistor vada in saturazione, è necessario che sia verificata la solita relazione (2); nel nostro caso vale:

$$I_B > \frac{I_C}{h_{FE(\min)}} = \frac{26,67 \cdot 10^{-3}}{110} = 242,4\ \mu\text{A}$$

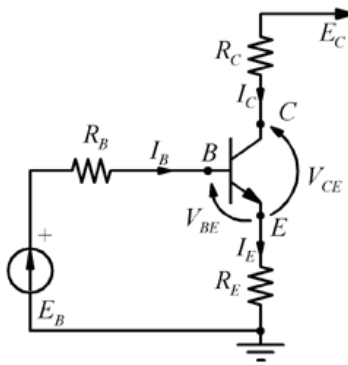
A questo punto si ha un ampio margine di libertà nella scelta di  $I_B$ . Possiamo sceglierla, per esempio,  $1,5$  volte o  $2$  o  $3$  o addirittura  $5$  volte più grande di tale valore limite.

La scelta dipenderà, in particolare, dalle caratteristiche del sistema nel quale il circuito andrà ad essere utilizzato; per esempio può essere importante conoscere la corrente che il segnale di comando  $V_i$  è in grado di erogare. Nel presente esempio scegliamo  $I_B=0,5\text{ mA}$ .

**Passiamo quindi alla determinazione di  $R_B$ :**

$$R_B = \frac{V_i - V_{BE(\text{sat})}}{I_B} = 8,4\text{ k}\Omega$$

Anche in questo caso è necessario scegliere un valore normalizzato; la scelta non è critica, purchè continui ad essere verificata la relazione  $I_B > h_{FE} \cdot I_C$ . Scegliamo  $R_B=8,2\text{ k}\Omega$ ; notiamo che in tal modo la corrente di base sarà maggiore dei previsti  $0,5\text{ mA}$ : tanto meglio, il transistor sarà a maggior ragione in saturazione.



**Esercizio no.1**

Dato il circuito di figura determinare il punto di lavoro del transistor

$E_C=20V$

$E_B=10V$

$R_C=300\Omega$

$R_E=200\Omega$

$R_B=20K\Omega$

$V_{BE}=0,7V$

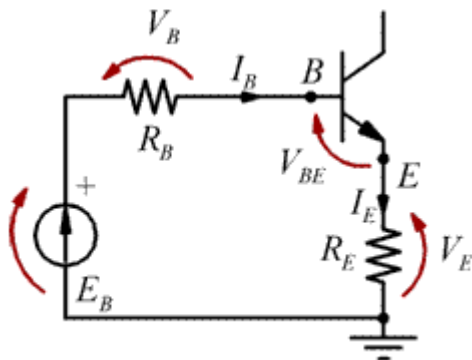
$\beta=100$

[Risp.:  $V_{CE}=8,4V$ ,  $I_C=5A$  ]

**Esercizio no.1 soluzione:**

La prassi della soluzione per questo tipo di circuito è sempre la stessa: prima si imposta la legge di Kirchoff alla maglia di ingresso al fine di ricavare  $I_B$  e la  $I_C$  tramite la relazione  $I_C=\beta \cdot I_B$ . Poi si esegue la legge di Kirchoff sulla maglia di uscita al fine di ricavare la  $V_{CE}$ .

Eq. alla maglia di ingresso



considerando che  $I_C = \beta I_B$  avremo

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta \cdot I_B = I_B(1 + \beta)$$

L'equazione alla maglia è:

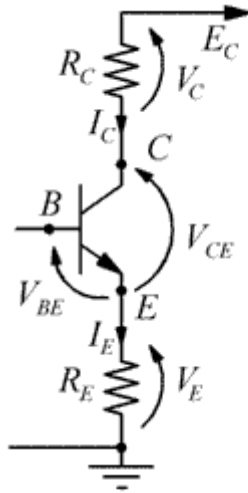
$$E_B = R_B I_B + V_{BE} + R_E(\beta + 1) I_B$$

Ricavo  $I_B$

$$I_B = \frac{E_B - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta + 1)} = \frac{10 - 0,7}{20 + 0,2(101)} = 0,231 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 23,1 \text{ mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = 23,1 + 0,231 = 23,331 \text{ mA}$$



dalla maglia di uscita ricavo

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

$$E_C = R_C I_C + V_{CE} + R_E (I_B + I_C)$$

$$V_{CE} = E_C - R_C I_C - R_E (I_B + I_C) = 20 - (0,3 \cdot 23,1) - (0,2 \cdot 23,331) = 20 - 6,93 - 4,66 = 8,4V$$

La tensione  $V_{CE}$  trovata è compresa fra 0 ed  $E_C$  e pertanto l'ipotesi fatta  $I_C = \beta I_B$  è valida (transistor in zona attiva lineare).

### Esercizio no.2

Dato lo schema di figura, calcolare la polarizzazione del transistor

$$E_C = 12V;$$

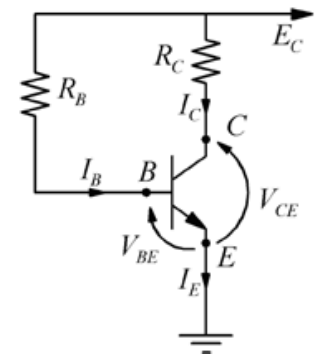
$$R_C = 200\Omega$$

$$R_B = 50K\Omega$$

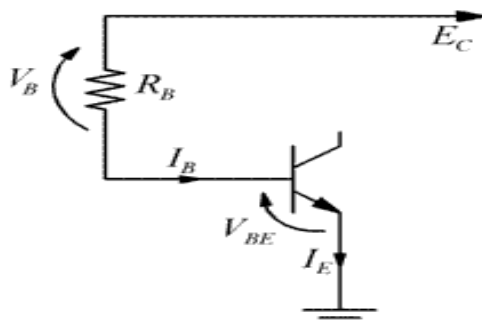
$$\beta = 100;$$

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$[\text{Risp.: } I_C = 22,4mA, V_{CE} = 7,48V]$$



### Esercizio no.2: soluzione

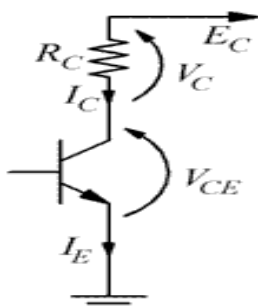


Facendo la KVL alla maglia di ingresso si ottiene

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

$$\text{da cui } I_B = \frac{E_C - V_{BE}}{R_B} = 0,226mA$$

Facendo la KVL alla maglia esterna dall'altra parte (ricordando che  $I_C = \beta I_B$  avremo quindi  $I_C = 22,6mA$ )



Si ottiene

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

$$V_{CE} = E_C - R_C I_C = 7,48V$$

Anche in questo caso i conti sono corretti e il transistor è in zona Attiva lineare.