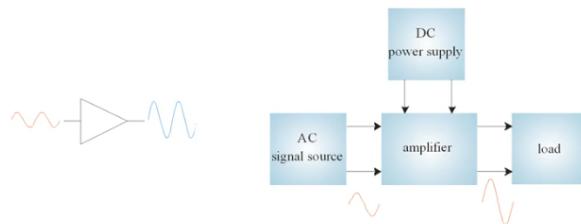


Amplificatori

martedì 1 agosto 2023 09:21

Come già detto i transistor vengono usati come **amplificatori**, ovvero dispositivi che hanno in uscita la stessa forma del segnale in ingresso, ma l'ampiezza della tensione e/o corrente viene maggiorata:



Come già detto, dell'amplificatore si considera un particolare valore : **l'amplificazione o guadagno**, il quale può avere tre valori : amplificazione > 1 , = 1 , < 1 (consideriamo il modulo), il quale rappresenta l'aumento in ampiezza prodotto sul segnale di ingresso.
Ricordiamo che le correnti costanti servono per la polarizzazione, mentre quelle alternate sono da amplificare.

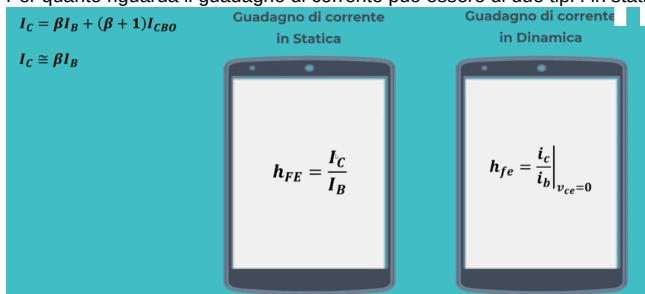
In dettaglio :

$$A_v \stackrel{\text{def}}{=} \frac{v_o}{v_s}$$

$$A_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{i_o}{i_s}$$

$$A_p \stackrel{\text{def}}{=} \frac{p_o}{p_i}$$

Per quanto riguarda il guadagno di corrente può essere di due tipi : in statica e dinamica:



Oltre al guadagno vi è un altro parametro importante : la **flatness** ovvero la piattezza o meglio il guadagno sia uguale per tutte le frequenze.

Focalizziamoci ora sulle **impedenze** : ovvero la descrizione dell'effetto combinato in AC dovuto a resistenze e reattanze:



Noi le impedenze le consideriamo Costanti.

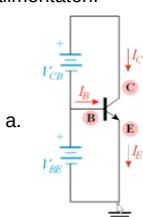
Per ultimo vediamo **l'efficienza** : ovvero il rapporto tra potenza in uscita su quella di ingresso :

$$\eta = \frac{P_o|_{AC}}{P_i|_{DC}}$$

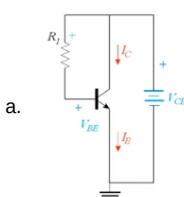
$$\eta (\%) = \frac{P_o|_{AC}}{P_i|_{DC}} * 100\%$$

Vediamo ora come ottenere un amplificatore:

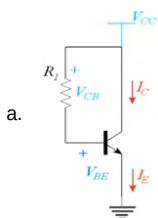
1. In questo caso si hanno due batterie che polarizzano inversamente b-c e direttamente b-e. Non è molto comodo in quanto si raddoppiano i costi, in quanto si devono usare due alimentatori.



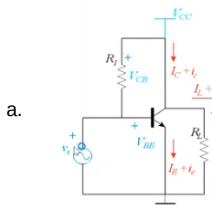
2. Dato il costo doppio delle batterie, alimento il bjt con una sola batteria, ma inserisco anche una resistenza R1 chiamata **resistenza di polarizzazione** tra la collettore e base.



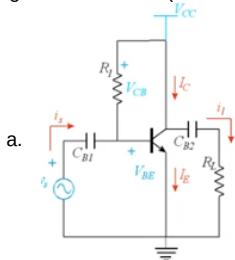
3. Dato che in elettronica non ci interessa la locazione spaziale della batteria , studiamo dove è applicata la tensione. Il V_{CC} è la tensione su collettore ma riferita a massa. **Questo è lo schema base**



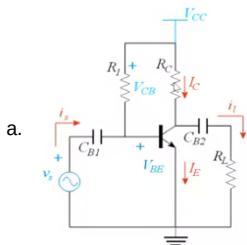
4. Considerando l'amplificatore come elemento 2 porte, ci dobbiamo inserire un generatore ed una resistenza di carico . **Notiamo che in questo circuito si hanno variabili costante e variabile. Quindi posso applicare la sovrapposizione degli effetti.** Non funziona bene in quanto sul carico ho correnti costanti , inoltre vi è segnale costante che va verso il generatore



5. Per evitare che vi sia questo trasferimento di componenti costanti si usano dei filtri: i **condensatori di blocco** : condensatori passa alto, quindi essendo in serie bloccano la continua. Unica pecca di questo circuito è che la corrente se ne va diretta a massa se V_{CC} è generatore ideale (resistenza interna 0)

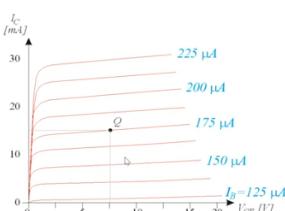


6. Inserisco quindi una resistenza su collettore tale che sia maggiore di quella sul carico . Quindi si ha lo svincolo dinamico ovvero il collettore e la batteria hanno differente potenziale . Grazie a questa resistenza la corrente andrà prevalentemente sul carico.



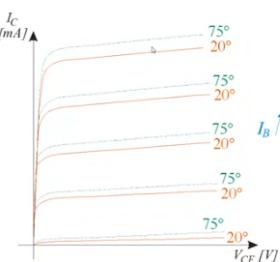
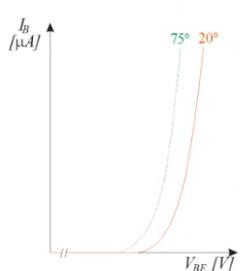
- b. **Quindi questo tipo di amplificatore amplifica entrambe, ma le sue impedenze di ingresso ed uscita sono medie, quindi non si comporta bene nel trasferimento di tensione e corrente.**

Vediamo ora la **polarizzazione** : studiamo l'uscita



Quindi studiamo il comportamento del bjt nel punto medio (componente DC) dovuto alla polarizzazione ed alle oscillazioni , ovvero il punto Q (quiescenza).

Per quanto riguarda la **stabilità** : devono continuare a lavorare anche se cambiano le temperature, quindi devono garantire un certo intervallo di oscillazione ammesso.



Andiamo ora in dettaglio :

Segnale di ingresso	Segnale di uscita	Tipo di Amplificatore
Tensione	Tensione	Tensione
Tensione	Corrente	Trans-conduttanza
Corrente	Tensione	Trans-resistenza
Corrente	Corrente	Corrente

$$A_v \stackrel{\text{def}}{=} \frac{v_o}{v_s} \quad A_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{i_o}{i_s} \quad A_p \stackrel{\text{def}}{=} \frac{p_o}{p_s}$$

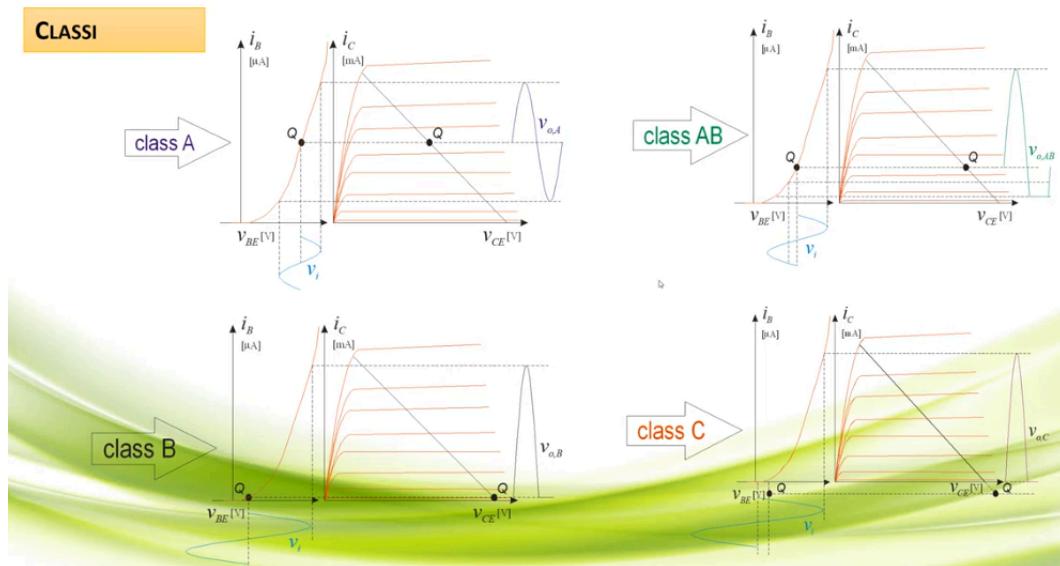
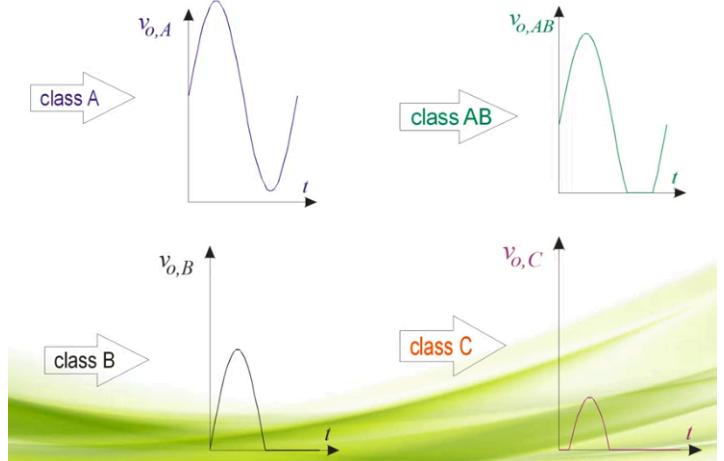
$$G_m \stackrel{\text{def}}{=} \frac{i_o}{V_s} \quad R_m \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_o}{i_s}$$

$$\eta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P_o|_{AC}}{P_i|_{DC}} \quad \eta(\%) \stackrel{\text{def}}{=} 100 \frac{P_o|_{AC}}{P_i|_{DC}}$$

Quindi in base all'efficienza di un amplificatore, si definiscono le classi di amplificatore:

1. Amplificatore in classe A: dato un segnale in ingresso propone in uscita lo stesso segnale, ma amplificato della continua : l'angolo della circolazione della corrente in uscita di 360 gradi. Ha 2 condizioni necessarie: il punto q deve stare al centro della zona attiva e deve funzionare in **regime di piccoli segnali** : ampiezza segnale di ingresso non deve essere eccessiva
2. Amplificatore Classe B: in uscita metà del segnale di ingresso : angolo di circolazione della corrente è di 180 gradi. La sua efficienza è maggiore della classe A , in quanto il punto q è a ridosso della zona di interdizione (minimo 0.7V), quindi bassa corrente.
3. Amplificatore classe AB: l'angolo di circolazione della corrente è compreso tra 180 gradi e 360 gradi. Il punto di riposo è a metà strada tra interdizione e zona attiva
4. Amplificatore in classe C: l'angolo della circolazione della corrente è minore di 180 gradi. Il punto q sta o a ridosso di asse x o sotto.

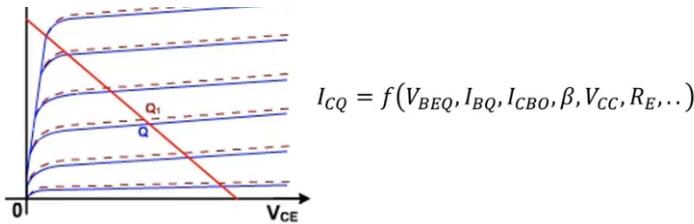
Dato una qualsiasi sorgente sinusoidale:



Torniamo alla **stabilità** :

Dato che la corrente dipende di collettore, dipende da vari fattori tra cui la temperatura, dobbiamo progettare il transistor per avere minore mobilità (tendente a zero) del punto q.





Dato che la corrente di collettore , come già detto, dipende da vari fattori, si cerca di ridurre al minimo queste variazioni, andando a vedere le variazioni di questa corrente rispetto a tutte le variabili di interesse, arrivando così ai **fattori di stabilità**:

$$S_{V_{BEQ}} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta V_{BEQ}} \right|_{I_{BQ}=\text{cost}, I_{CBO}=\text{cost}, \beta=\text{cost}, \dots}$$

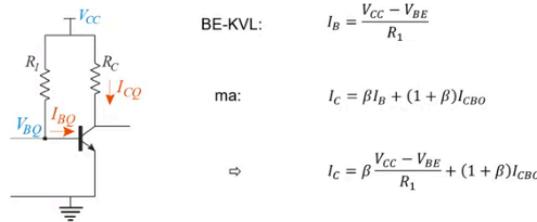
$$S_{I_{BQ}} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta I_{BQ}} \right|_{V_{BEQ}=\text{cost}, I_{BQ}=\text{cost}, I_{CBO}=\text{cost}, \beta=\text{cost}, \dots}$$

$$S_{\beta} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta \beta} \right|_{V_{BEQ}=\text{cost}, I_{BQ}=\text{cost}, I_{CBO}=\text{cost}, \beta=\text{cost}, \dots}$$

$$[A]$$

Andiamo ora a vederla per i vari "circuiti":

- i. Polarizzazione fissa :



1.

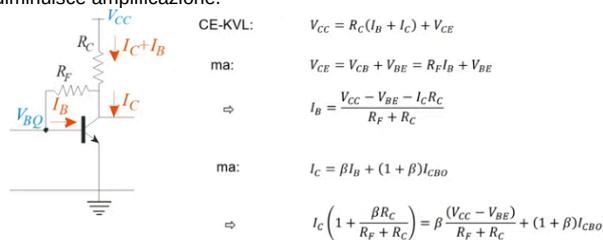
fattori di stabilità: $S_{I_{CBO}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta I_{CBO}} = 1 + \beta$

$$S_{V_{BEQ}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta V_{BEQ}} = -\frac{\beta}{R_1}$$

$$S_{\beta} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta \beta} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} + I_{CBO}$$

- ii. Retroazione di collettore (Rf è r1):

1. Aumenta la stabilità : se aumenta temperatura, aumentano correnti ma questo aumento provoca una caduta di potenziale maggiore che a sua volta fa ridurre le correnti stesse.
2. Ma diminuisce amplificazione.



3.

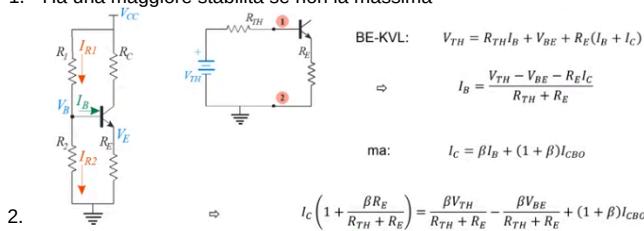
fattori di stabilità: $S_{I_{CBO}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta I_{CBO}} = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{R_C}{R_F + R_C}}$

$$S_{V_{BEQ}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta V_{BEQ}} = -\frac{\beta}{R_F + (1 + \beta) R_C}$$

$$S_{\beta} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta \beta} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_C I_C + (R_F + R_C) I_{CBO}}{R_F + (1 + \beta) R_C}$$

- iii. Polarizzazione a partitore:

1. Ha una maggiore stabilità se non la massima



2.

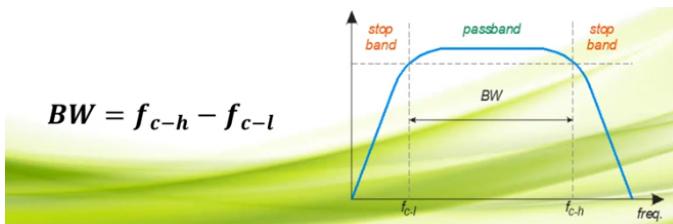
fattori di stabilità: $S_{I_{CBO}} \approx \frac{1 + \frac{R_{TH}}{R_E}}{1 + \frac{1}{\beta} \frac{R_{TH}}{R_E}} = \frac{1 + \frac{R_{TH}}{R_E}}{K_{\beta}}$

$$S_{V_{BEQ}} \approx -\frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} \frac{R_{TH}}{R_E}} R_E = -\frac{1}{K_{\beta} R_E}$$

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{I_{C1}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\left(1 + \frac{R_{TH}}{R_E} \right) \Delta \beta}{K_{\beta} \beta_1 \beta_2}$$

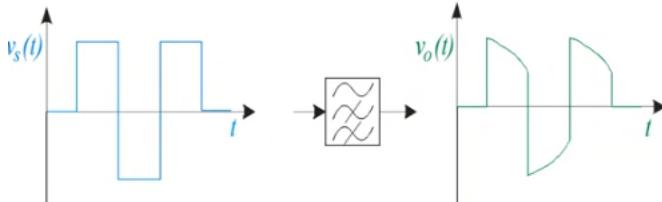
Vediamo ora la larghezza di banda :

.....

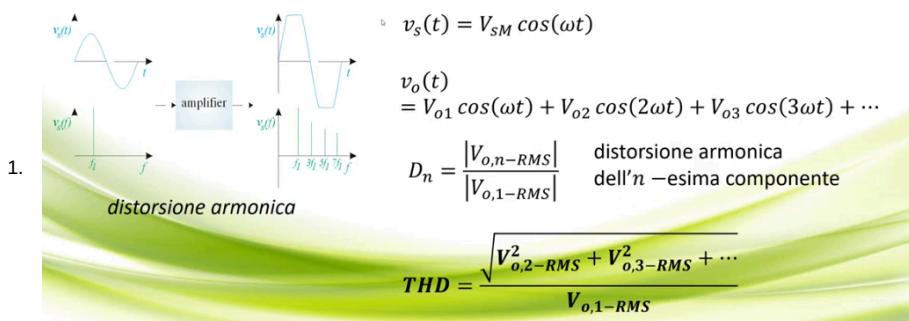


Dove la frequenza superiore data dai condensatori intrinseci del transistor, mentre quella inferiore è data dai condensatori di blocco .

Per quanto riguarda la **distorsione** : differenza tra le forme d'uscita rispetto a quelle di ingresso a meno di ampiezza:



- a. Frequenza : distorsione delle amplificazioni delle singole frequenze se segnale di ingresso multi-frequenziale.
- b. Fase : sfasamento diverso in frequenza di un segnale multi-frequenziale , dovuto agli elementi reattivi
- c. Ampiezza : non si amplificazione per intero periodo del segnale
 - i. Armonica



- ii. intermodulazione
 - 1. Si ha quando si hanno due o più sorgenti ed amplificatore non lineare
 - 2. Produzione in uscita di nuove armoniche che sono la somma e la differenza delle armoniche di ingresso

Per quanto riguarda il rumore : qualunque perturbazione del segnale, o meglio qualunque tensione e/o correnti diversi dal segnale voluto. Vari tipi:

Il rumore termico (o rumore di Johnson-Nyquist) è causato dal moto casuale dei portatori, quindi da differenze della densità di carica nel materiale, dovute ad energia termica.	RUMORE TERMICO	$i_{th-n} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}}$
---	----------------	---

Il rumore shot (o rumore granulare o rumore Schottky o rumore impulsivo) è dovuto alla natura corpuscolare della materia, ed è sempre associato al flusso DC.	RUMORE SHOT	$i_{s-n} = \sqrt{2qI_{DC}\Delta f}$
---	-------------	-------------------------------------

È denominato flicker (tremolante) a causa degli anomali strani "tremoli" osservati nella corrente dei tubi a vuoto nel 1925, e $1/f$ perché il suo spettro varia come $1/f^\alpha$.	RUMORE FLICKER	$i_{fl-n} = \sqrt{K_1 \frac{I_{DC}^\beta}{f^\alpha} \Delta f}$
--	----------------	--

Un "forte" campo elettrico crea coppie elettroni-lacune addizionali, ed i nuovi elettroni liberi forniscono energia per la creazione di altre coppie elettroni-lacune, e così via iterativamente. L'effetto complessivo è cumulativo, e crea picchi casuali di rumore.	RUMORE VALANGA
--	----------------

E viene misurato così:

il rapporto tra la potenza elettrica di un segnale, P_{signal} , e la potenza del suo rumore, P_{noise} , definisce il rapporto segnale-rumore SNR	RAPPORTO SEGNALE RUMORE (SNR)
$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$	

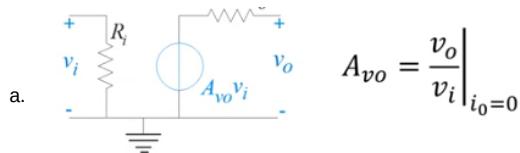
il fattore di rumore F è il rapporto tra il rapporto segnale rumore di ingresso SNR_{in} e quello di uscita SNR_{out}	FATTORE DI RUMORE (F)
$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$	

Il fattore di rumore espresso in dB è detto figura di rumore (noise figure) NF	FIGURA DI RUMORE (NF)
$NF = 10 \log(F)$	

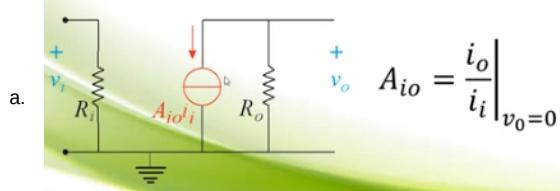
Detto ciò andiamo a vedere tutti i tipi di amplificatori che possiamo fare (ideali):

1. Tensione:

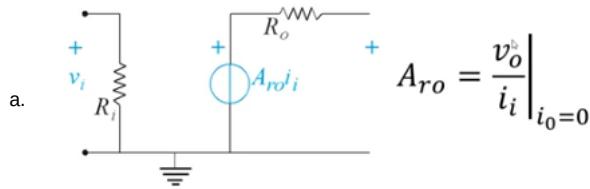
$$R_o$$



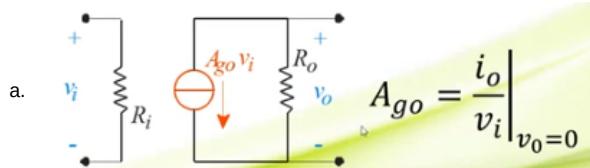
2. Corrente :



3. Trans-resistenza :

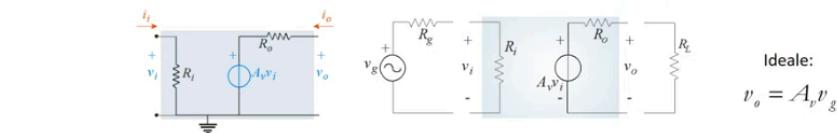


4. Trans-conduttanza



Detto ciò andiamo a vedere tutti i tipi di amplificatori che possiamo fare (Reali):

1. Tensione:



a. analisi: $v_o = \frac{R_L}{R_L + R_s} A_v v_g$ ma $v_i = \frac{R_s}{R_s + R_g} v_g$ quindi $v_o = \frac{R_L}{R_L + R_s} A_v \frac{R_s}{R_s + R_g} v_g$

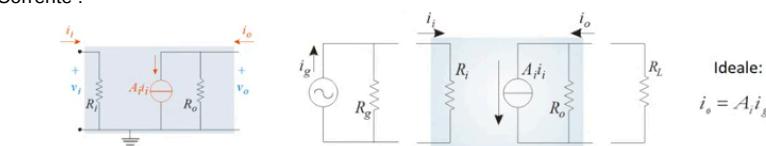
reale=ideale se: $\begin{cases} R_L \gg R_s \Leftrightarrow \frac{R_L}{R_s + R_g} \rightarrow 1 \\ R_s \gg R_g \Leftrightarrow \frac{R_s}{R_s + R_g} \rightarrow 1 \end{cases}$

Resistenza di ingresso infinita $R_i = \infty \Rightarrow$ corrente di ingresso nulla $i_i = 0 \Rightarrow$ potenza di ingresso pari a zero. Di conseguenza l'amplificatore avrebbe un guadagno infinito.

Altra ragione per definirlo *ideale*.

$i_i \rightarrow 0 \quad R_o \rightarrow 0$

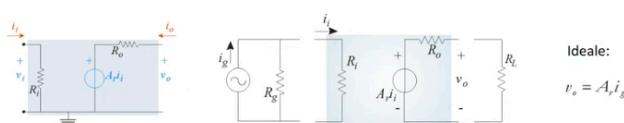
2. Corrente :



a. analisi: $i_o = \frac{R_s}{R_s + R_g} A_i i_g$ ma $i_i = \frac{R_g}{R_g + R_s} i_g$ quindi $i_o = \frac{R_s}{R_s + R_g} A_i \frac{R_g}{R_g + R_s} i_g$

reale=ideale se: $\begin{cases} R_s \gg R_L \Leftrightarrow \frac{R_s}{R_s + R_L} \rightarrow 1 \\ R_g \gg R_s \Leftrightarrow \frac{R_g}{R_g + R_s} \rightarrow 1 \end{cases}$

3. Trans-resistenza :

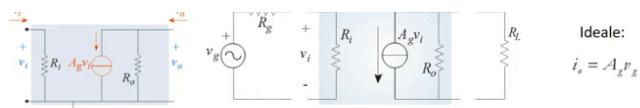


a. analisi: $v_o = \frac{R_L}{R_L + R_s} A_r i_g$ ma $i_i = \frac{R_s}{R_s + R_g} i_g$ quindi $v_o = \frac{R_L}{R_L + R_s} A_r \frac{R_s}{R_s + R_g} i_g$

reale=ideale se: $\begin{cases} R_L \gg R_s \Leftrightarrow \frac{R_L}{R_s + R_g} \rightarrow 1 \\ R_g \gg R_s \Leftrightarrow \frac{R_g}{R_s + R_g} \rightarrow 1 \end{cases}$

4. Trans-condutanza





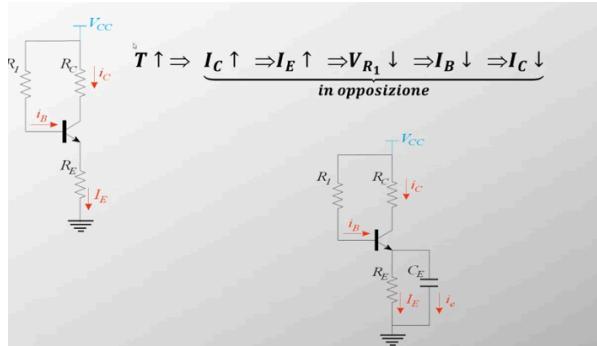
$$\text{analisi: } i_s = \frac{R_o}{R_o + R_L} A_{\delta} i_i \quad \text{ma} \quad v_i = \frac{R_o}{R_o + R_L} v_s \quad \text{quindi} \quad i_s = \frac{R_o}{R_o + R_L} A_{\delta} \frac{R_o}{R_o + R_L} v_s$$

a.

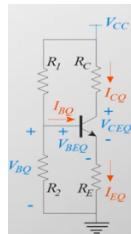
$$\begin{cases} R_o \gg R_L & \Leftrightarrow \frac{R_o}{R_o + R_L} \rightarrow 1 \\ R_i \gg R_{\delta} & \Leftrightarrow \frac{R_i}{R_i + R_{\delta}} \rightarrow 1 \end{cases}$$

$$R_i \rightarrow \infty \quad R_o \rightarrow \infty$$

Torniamo alla stabilità:



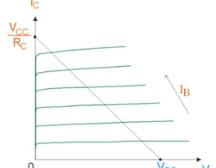
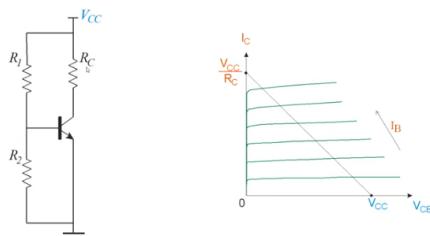
Dove R_E è la resistenza di **stabilizzazione termica**: si mette per stabilizzare se c'è una variazione di temperatura. Ovvero la R_E compensa la variazione (lente) delle correnti rispetto alla temperatura. Se metto in parallelo ad R_E un condensatore si shunt, si ha proprio l'effetto desiderato: su R_E ci vanno le correnti continue, mentre su C_E ci vanno solo le alternate. Vediamo come migliorare la stabilizzazione termica:



Aggiungendo così R_2 si aumenta la stabilità sia rispetto alla temperatura, sia rispetto agli altri parametri.

Analizziamo ora il circuito in DC (statica):

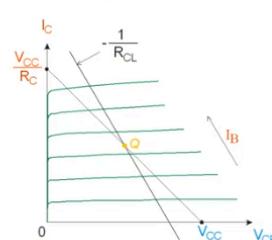
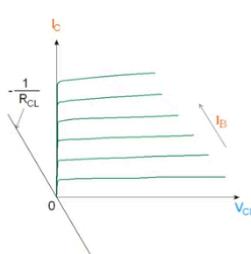
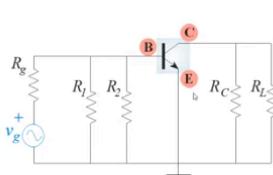
Sempre maglia uscita



Analizziamo ora il circuito in DC (dinamica):

Sempre maglia uscita

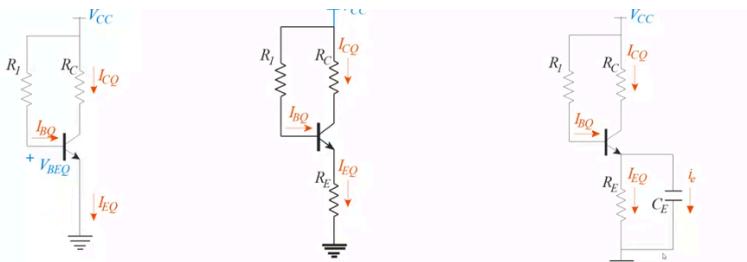
RETTA DI CARICO: DINAMICA



Attenzione alla traslazione della retta dinamica.

Riassumiamo quindi la polarizzazione:

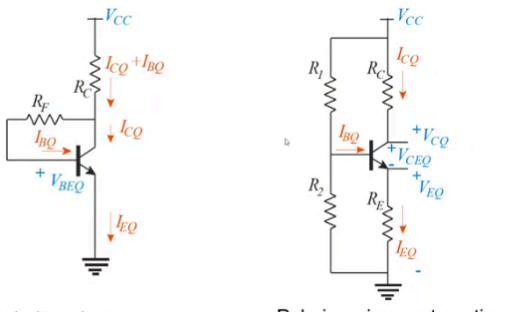
$$\dots \rightarrow V_{CE} \rightarrow \dots$$



Polarizzazione fissa

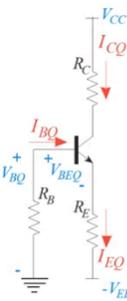
Polarizzazione fissa con stabilizzazione termica

Polarizzazione fissa con stabilizzazione termica e condensatore di shunt



Polarizzazione a Retroazione di Collettore

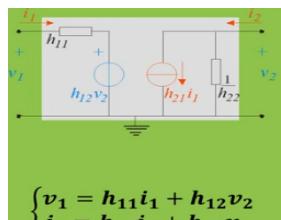
Polarizzazione automatica



Polarizzazione a doppia batteria

Studiamo ora il transistor in AC:

Usiamo i parametri ibridi

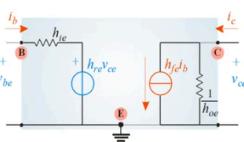


$$\begin{cases} 11 = i \text{ (input)} \\ 12 = r \text{ (reverse transfer)} \\ 21 = f \text{ (forward transfer)} \\ 22 = o \text{ (output)} \end{cases}$$

quindi in dettaglio :

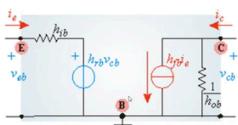
Common Emitter

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} & (\text{eq. I C.E.}) \\ i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} & (\text{eq. II C.E.}) \end{cases}$$



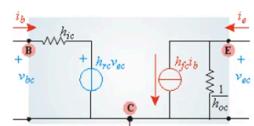
Common Base

$$\begin{cases} v_{eb} = h_{ib}i_e + h_{rb}v_{cb} & (\text{eq. I CB}) \\ i_c = h_{fb}i_e + h_{ob}v_{cb} & (\text{eq. II CB}) \end{cases}$$



Common Collector

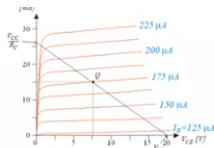
$$\begin{cases} v_{bc} = h_{ic}i_b + h_{rc}v_{ec} & (\text{eq. I CC}) \\ i_e = h_{fc}i_b + h_{oc}v_{ec} & (\text{eq. II CC}) \end{cases}$$



C.E.	C.B.	C.C.
h_{ie}	$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	$h_{ic} = h_{ie}$
h_{re}	$h_{rb} = \frac{h_{ie}h_{oe}}{1 + h_{fe}} - h_{re}$	$h_{rc} = 1 - h_{re}$
h_{fe}	$h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}}$	$h_{fc} = -(1 + h_{fe})$
h_{oe}	$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$	$h_{oc} = h_{oe}$

Usiamo i parametri ibridi, ma cosa sono ??

- Significato matematico :



- a. b. Approssimazione curva dove si trova punto q come retta , quindi usiamo lo sviluppo in serie di taylor:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = v_1(I_1, V_2) + \frac{v_1(I_1, V_2)}{i_1}(i_1 - I_1) + \frac{v_1(I_1, V_2)}{v_2}(v_2 - V_2) + \\ \quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v_1(I_1, V_2)}{i_1^2}(i_1 - I_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v_1(I_1, V_2)}{v_2^2}(v_2 - V_2)^2 + \\ \quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v_1(I_1, V_2)}{i_1 v_2}(i_1 - I_1)(v_2 - V_2) + \dots \\ i_2 = i_2(I_1, V_2) + \frac{i_2(I_1, V_2)}{i_1}(i_1 - I_1) + \frac{i_2(I_1, V_2)}{v_2}(v_2 - V_2) + \\ \quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_2(I_1, V_2)}{i_1^2}(i_1 - I_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_2(I_1, V_2)}{v_2^2}(v_2 - V_2)^2 + \\ \quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_2(I_1, V_2)}{i_1 v_2}(i_1 - I_1)(v_2 - V_2) + \dots \end{array} \right.$$

ii. Ed approssimando al primo ordine :

$$1. \quad \begin{cases} v_1 \cong \frac{v_1(I_1, V_2)}{i_1} i_1 + \frac{v_1(I_1, V_2)}{v_2} v_2 \\ i_2 \cong \frac{i_2(I_1, V_2)}{i_1} i_1 + \frac{i_2(I_1, V_2)}{v_2} v_2 \end{cases}$$

$$h_{11} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{v_1(I_1, V_2)}{i_1} \right|_{v_2=0} [\Omega]$$

$$h_{12} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{v_1(I_1, V_2)}{v_2} \right|_{i_1=0} [\#]$$

c.

$$h_{21} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{i_2(I_1, V_2)}{i_1} \right|_{v_2=0} [\#]$$

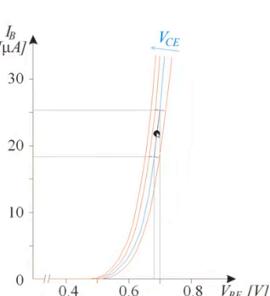
$$h_{22} \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{i_2(I_1, V_2)}{v_2} \right|_{i_1=0} [S]$$

2. Fisico :

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

$10^3 - 10^4 \Omega$

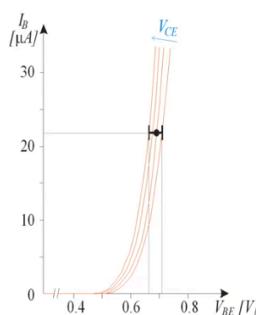
a.



$$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

10^{-4}

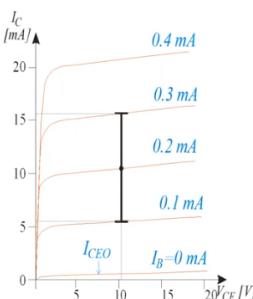
b.



$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

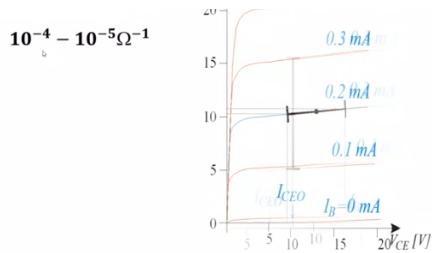
10^2

c.



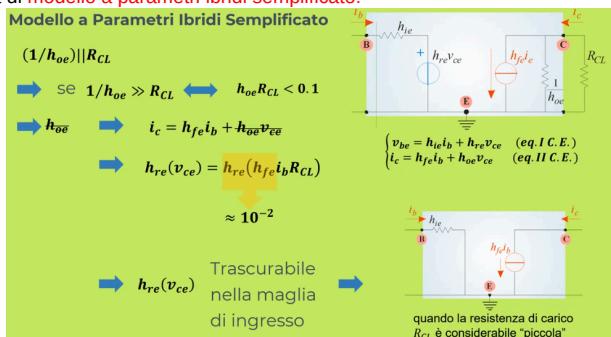
$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$



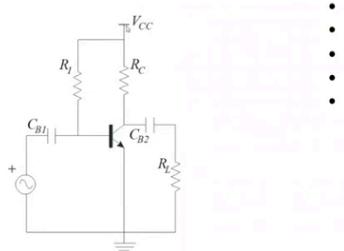


d.

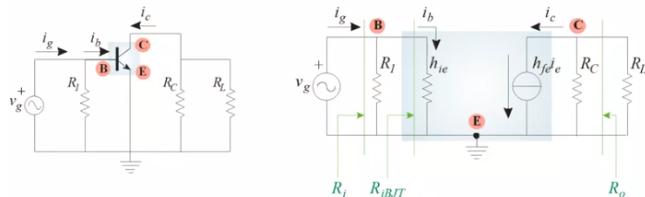
Possibile "semplificare" il circuito , ovvero ridurre e/o ignorare dei parametri : in questo caso si parla di **modello a parametri ibridi semplificato**:



Studiamo ora il circuito in alternata:



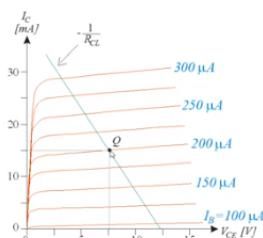
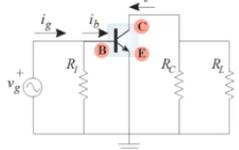
- i condensatori vengono sostituiti da un corto-circuito
 - la batteria è tolta ed al suo posto si pone la massa
 - la resistenza R_I è tra il terminale di base del BJT e massa
 - la resistenza R_C è tra il terminale di collettore del BJT e massa
 - la resistenza R_L è tra il terminale di collettore del BJT e massa, quindi in parallelo con la resistenza R_C
- il generatore di segnale è tra il terminale di base del BJT e la massa



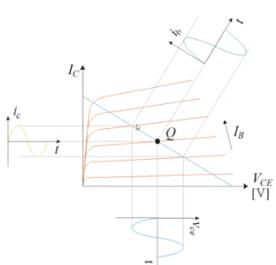
Dopo aver stabilito il punto q in continua, studiamo l'equazione dell'uscita in uscita:

RETTA DI CARICO DINAMICA

$$R_{CL}I_C + V_{CE} = 0$$



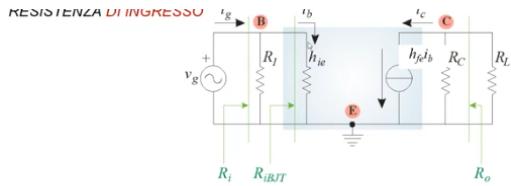
Per quanto riguarda in dettaglio il punto q, lo devo scegliere al centro ma devo lavorare anche in regime di piccolo segnale (amplificatore classe A)



Andiamo ora ad analizzare :

a. Resistenza ingresso (Ri e Rbjt):

RESISTENZA DI INGRESSO



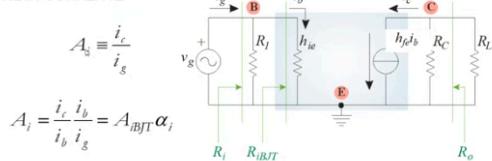
i.

$$R_{ibjt} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = b_{fe}$$

$$R_i = R_1 // R_{ibjt} = R_1 // b_{fe}$$

b. Amplificazione in corrente:

AMPLIFICAZIONE IN CORRENTE



i.

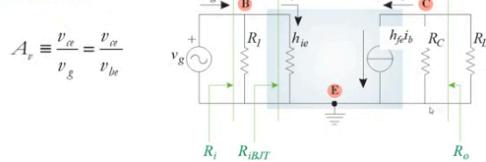
$$A_i = b_{fe} i_b \Rightarrow A_{ibjt} = b_{fe}$$

$$\text{partitore di corrente} \quad i_b = \frac{R_1}{R_1 + b_{fe}} i_g \Rightarrow \alpha_i = \frac{R_1}{R_1 + b_{fe}}$$

$$A_i = A_{ibjt} \alpha_i = b_{fe} \frac{R_1}{R_1 + b_{fe}}$$

c. Amplificazione in tensione:

AMPLIFICAZIONE IN TENSIONE



i.

$$\text{In ingresso: } i_b = \frac{v_{be}}{b_{fe}} \Rightarrow i_c = b_{fe} i_b = \frac{b_{fe}}{b_{fe}} v_{be}$$

$$\text{In uscita: } v_o = -R_{CL} i_c = -R_{CL} \frac{b_{fe}}{b_{fe}} v_{be}$$

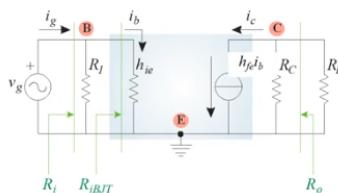
$$A_v = -R_{CL} \frac{b_{fe}}{b_{fe}}$$

d. Resistenza di uscita (uso thevenin):

RESISTENZA DI USCITA

ii.

$$R_o \equiv \frac{v_{ce}}{i_c}$$



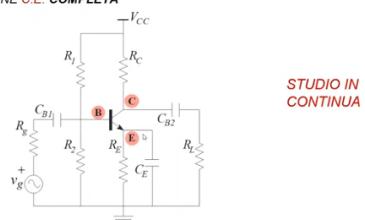
$$v_g = 0 \Leftrightarrow i_b = 0 \Rightarrow b_{fe} i_b = 0$$

iii.

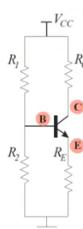
$$R_o = R_C$$

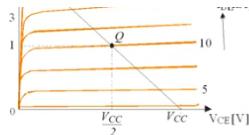
Ora vediamo l'analisi completa :

CONFIGURAZIONE C.E. COMPLETA



STUDIO IN CONTINUA





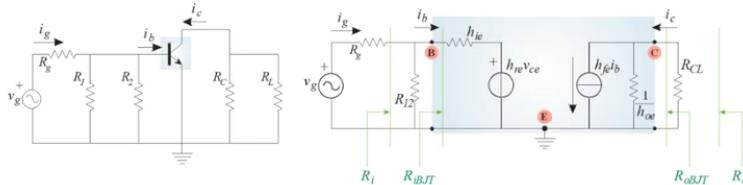
$$I_{BQ} = 10 \mu A \quad I_{CQ} = 1mA$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E \Rightarrow V_{CC} \equiv (R_C + R_E) I_C + V_{CE}$$

$V_{CEQ} \equiv \frac{V_{CC}}{2}$ La restante parte della tensione di batteria la poniamo arbitrariamente per il 20% ai capi della resistenza di emettitore e per l'80% ai capi della resistenza di collettore

$$\Rightarrow V_{RE} = 0.2 \frac{V_{CC}}{2} \quad V_{RC} = 0.8 \frac{V_{CC}}{2}$$

STUDIO IN ALTERNATA



$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + b_{re} v_{ce} & (\text{eq. I C.E.}) \\ i_c = b_{fe} i_b + b_{oe} v_{ce} & (\text{eq. II C.E.}) \end{cases}$$

i. Resistenza di ingresso :

$$1. \quad R_{iBJT} \equiv \frac{v_{be}}{i_b}$$

$$v_{ce} = -R_{CL} i_c \quad \text{nella eq. II C.E.} \Rightarrow -\frac{v_{ce}}{R_{CL}} = b_{fe} i_b + b_{oe} v_{ce}$$

$$2. \quad v_{ce} \text{ nella eq. I C.E.} \Rightarrow v_{be} = b_{re} i_b - b_{re} \frac{\frac{b_{fe}}{1+b_{re}} i_b}{R_{CL}} + b_{re} \Rightarrow$$

$$R_{iBJT} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{b_{re} b_{fe} R_{CL}}{1 + b_{re} R_{CL}} \quad = \quad R_{iBJT} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{b_{re} + (b_{re} b_{re} - b_{re} b_{fe}) R_{CL}}{1 + b_{re} R_{CL}}$$

ii. Amplificazione in corrente:

$$\mathcal{A}_i = \frac{i_c}{i_b} \frac{i_b}{i_g} = \mathcal{A}_{iBJT} \alpha_i$$

$$1. \quad v_{ce} = -R_{CL} i_c \quad \text{nella eq. II C.E.} \Rightarrow i_c = b_{fe} i_b - b_{oe} R_{CL} i_c$$

$$\Rightarrow \mathcal{A}_{iBJT} \equiv \frac{i_c}{i_b} = \frac{b_{fe}}{1 + b_{oe} R_{CL}}$$

$$2. \quad \alpha_i = \frac{i_b}{i_g} \quad \text{circuit diagram showing the input stage with resistors R_g, R_{iBJT}, R_{12}, and R_{B2}.}$$

$$\frac{i_b}{i_g} = \frac{R_{iBJT}}{R_g + R_{iBJT}}$$

iii. Amplificazione di tensione :

$$\mathcal{A}_v = \frac{v_{ce}}{v_{be}} \frac{v_{be}}{v_g} = \mathcal{A}_{vBJT} \alpha_v$$

$$\text{dalla eq. I C.E.} \quad i_b = \frac{1}{h_{ie}} (v_{be} - b_{re} v_{ce}) \quad \text{nella eq. II C.E.} \quad i_c = \frac{b_{fe}}{h_{ie}} (v_{be} - b_{re} v_{ce}) + b_{oe}$$

$$1. \quad \text{ma} \quad i_c = -\frac{v_{ce}}{R_{CL}} \Rightarrow v_{ce} (b_{re} + b_{re} b_{oe} R_{CL} - b_{fe} b_{re} R_{CL}) = -b_{fe} R_{CL} v_{be} \Rightarrow$$

$$\mathcal{A}_{vBJT} \equiv \frac{v_{ce}}{v_{be}} = -\frac{b_{fe} R_{CL}}{b_{re} + (b_{re} b_{oe} - b_{fe} b_{re}) R_{CL}} = \mathcal{A}_{vBJT} = \frac{1}{-b_{re} + \frac{b_{re} b_{oe} R_{CL}}{b_{fe} R_{CL}}}$$

$$2. \quad \alpha_v = \frac{v_{be}}{v_g} = \frac{(R_{12} // R_{iBJT})}{(R_{12} // R_{iBJT}) + R_g} = \frac{R_i}{R_i + R_g}$$

iv. Resistenza di uscita:

$$1. \quad R_{oBJT} \equiv \frac{v_{ce}}{i_c}$$

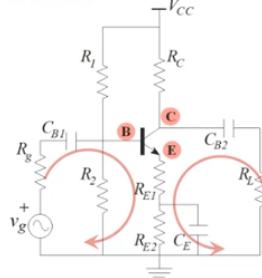
$$v_g = 0 \Rightarrow b_{re} v_{ce} = - (b_{re} + R_g // R_{12}) i_b$$

da cui ricaviamo i_b che sostituiamo nella eq. II C.E.
 \Rightarrow

$$i_c = -b_{fe} \frac{h_{re}}{h_{re} + R_g // R_{12}} v_{\alpha} + h_{oe} v_{\alpha}$$

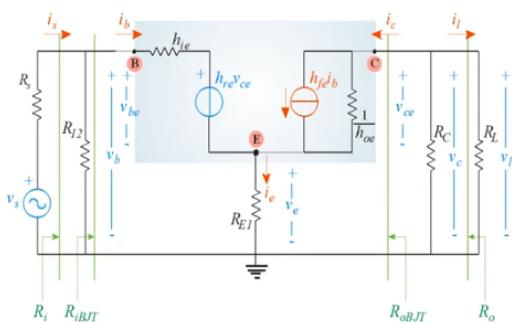
2. $R_{obJT} \equiv \frac{v_{\alpha}}{i_c} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re} b_{fe}}{h_{re} + R_g // R_{12}}} = R_{obJT} \equiv \frac{v_{\alpha}}{i_c} = \frac{\frac{h_{re}}{h_{re} + R_g // R_{12}} + R_g // R_{12}}{h_{oe} (R_g // R_{12}) + (h_{re} b_{oe} - h_{re} b_{fe})}$

Vediamo ora una variante del c-e: c-e con degenerazione di emettitore:



Questo circuito ha il vantaggio di ridurre la distorsione, riduce il rumore, i guadagni (tensione/corrente) sono indipendenti da h_{fe} , ma tutto questo a discapito del guadagno. Studiamolo in alternata (visto che in continua già fatto):

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{\alpha} & (\text{eq. I C.E.}) \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{\alpha} & (\text{eq. II C.E.}) \end{cases}$$



a. Amplificazione in corrente:

i. $A_i \equiv \frac{i_l}{i_s} \quad A_i = \frac{i_l}{i_c} \frac{i_c}{i_b} \frac{i_b}{i_s} = \alpha_{i,o} A_{iBJT} \alpha_{i,i}$

ii. $\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{\alpha} & (\text{eq. I C.E.}) \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{\alpha} & (\text{eq. II C.E.}) \end{cases}$

$v_{ce} = v_c - v_e = -R_{CL} i_c - R_{E1} i_e$ $\Rightarrow \frac{1}{h_{oe}} (i_c - h_{fe} i_b) = -R_{CL} i_c - R_{E1} i_b - R_{E1} i_c$

iii.

$$\Rightarrow A_{iBJT} = \frac{h_{fe} - h_{oe} R_{E1}}{1 + h_{oe} (R_{CL} + R_{E1})}$$

iv. $A_i = -\frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{\frac{h_{fe} - h_{oe} R_{E1}}{1 + h_{oe} (R_{CL} + R_{E1})}}{\frac{R_{12}}{R_{12} + R_{iBJT}}}$

v. R_C molto grande e R_{iBJT} più bassa

b. Resistenza ingresso bjt

$$R_{iBJT} \equiv \frac{v_b}{i_b}$$

i. $R_{iBJT} \equiv \frac{v_b}{i_b} = \frac{v_{be} + (v_e)}{i_b} = \frac{v_{be} + (R_{E1} i_b + R_{E1} i_c)}{i_b}$

$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{\alpha} & (\text{eq. I C.E.}) \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{\alpha} & (\text{eq. II C.E.}) \end{cases} \Rightarrow v_{ce} = \frac{1}{h_{oe}} (i_c - h_{fe} i_b) \Rightarrow v_{be} = h_{ie} i_b + \frac{h_{re}}{h_{oe}} (i_c - h_{fe} i_b)$

ii.

$$R_{iBJT} = \frac{h_{ie} + \Delta h * R_{ce}}{h_{oe} R_{ce} + \Delta h + 1 + h_{oe}} R_{E1}$$

$$= \frac{v_{be} + h_{oe}R_{CL}}{1 + h_{oe}(R_{CL} + R_{E1})} + \frac{h_{oe}R_{CL} + \Delta h + 1 + h_{fe} - h_{re}}{1 + h_{oe}(R_{CL} + R_{E1})} R_{E1}$$

c. Resistenza ingresso:

$$R_i \equiv \frac{v_b}{i_s}$$

i.

$$R_i = R_{12} // R_{iBJT}$$

$$\text{ii. } R_i = R_{12} \left| \left\{ \frac{h_{ie} + \Delta h * R_{CL}}{1 + h_{oe}(R_{CL} + R_{E1})} + \frac{[h_{oe}R_{CL} + \Delta h + 1 + h_{fe} - h_{re}]R_{E1}}{1 + h_{oe}(R_{CL} + R_{E1})} \right\} \right.$$

d. Guadagno in tensione:

$$\text{i. } A_v = A_{vBJT} \alpha_v$$

$$\begin{aligned} A_{vBJT} &\equiv \frac{v_c}{v_b} & \text{in } v_b = v_{be} + v_e = r_{be} + R_{E1}i_e = v_{be} + R_{E1}(i_b + i_c) \\ && \text{out } v_c = v_{ce} + v_e = v_{ce} + R_{E1}i_e = v_{ce} + R_{E1}(i_b + i_c) \end{aligned}$$

$$\text{ii. dalla eq. II C.E. } v_{ce} = \frac{1}{h_{oe}}(i_c - h_{fe}i_b)$$

$$\text{sostituita nella eq. I C.E. } v_{be} = b_{ie}i_b + b_{re}v_{ce} = b_{ie}i_b + \frac{h_{re}}{h_{oe}}(i_c - h_{fe}i_b)$$

$$\Rightarrow A_{vBJT} = \frac{v_c}{v_b} = \frac{v_{ce} + R_{E1}(i_b + i_c)}{v_{be} + R_{E1}(i_b + i_c)} = \frac{\frac{1}{h_{oe}}(i_c - h_{fe}i_b) + R_{E1}(i_b + i_c)}{\frac{h_{re}}{h_{oe}}(i_c - h_{fe}i_b) + R_{E1}(i_b + i_c)}$$

$$\text{iii. ma dall'espressione di } A_{iBJT} = A_{iBJT}i_b = \frac{h_{fe} - h_{re}R_{E1}}{1 + h_{re}(R_{CL} + R_{E1})}i_b \quad \text{si ottiene:}$$

$$A_{vBJT} = \frac{-b_{fe}R_{CL} + b_{oe}R_{CL}R_{E1}}{b_{ie} + (b_{ie}h_{oe} - b_{re}h_{fe})R_{CL} + [b_{oe}R_{CL} + (b_{ie}h_{oe} - b_{re}h_{fe}) + b_{fe} - b_{re}R_{E1}]}$$

Spesso si trascurano hre ed hoe :

$$A_{vBJT} = -\frac{h_{fe}R_{CL}}{h_{ie} + h_{fe}R_{E1}}$$

Se si verifica anche $h_{ie} \ll h_{fe}R_{E1}$

$$A_{vBJT} \cong -\frac{R_{CL}}{R_{E1}} \quad !!!!!!!$$

Quindi in questo caso non è discriminante il tipo di transistor. Quindi nonostante una grande amplificazione (rapporto di due resistenze), si ha lo svantaggio che "comanda" il carico.

$$\text{iv. } \alpha_v = \frac{v_b}{v_g} = \frac{(R_{12} // R_{iBJT})}{(R_{12} // R_{iBJT}) + R_g} = \frac{R_i}{R_i + R_g}$$

e. Resistenza uscita bjt:

$$\text{i. } R_{oBJT} \equiv \frac{v_o}{i_o}$$

$$v_o = \frac{1}{h_{re}}(-R_{E1}i_c - R_{E1}i_b - b_{ie}i_b - R_g // R_{12}i_b)$$

$$\text{ii. } \Rightarrow R_{oBJT} \equiv \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o + v_e}{i_c} = \frac{\frac{1}{h_{re}}(-R_{E1}i_c - R_{E1}i_b - b_{ie}i_b - R_g // R_{12}i_b) + R_{E1}(i_b + i_c)}{i_c}$$

$$R_{oBJT} = \frac{(1 + h_{fe})R_{E1} + (b_{ie}h_{oe} - b_{fe}h_{re})R_{E1} + (b_{oe}R_g // R_{12} - b_{re})R_{E1}}{b_{re}(b_{oe}R_{E1} - b_{fe})} +$$

$$\text{iii. } + \frac{(b_{ie} + R_g // R_{12} + R_{E1} + b_{re}R_{E1})b_{oe}R_{CL} + b_{ie}}{b_{re}(b_{oe}R_{E1} - b_{fe})}$$

iv. Ma se trascurro hoe ed hfe :

$$\text{i. } \frac{b_{fe} - b_{re}R_{E1}}{1 + b_{re}(R_{12} + R_{E1})}i_b$$

f. Resistenza uscita:

$$R_o = R_{oBJT} / R_{CL}$$

Riassumendo quello visto fino ora:

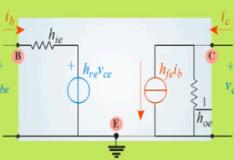
Modello a Parametri Ibridi Completo

$$R_{iBJT} = h_{ie} - \frac{h_{re}h_{fe}R_{CL}}{1 + h_{oe}R_{CL}}$$

$$A_{iBJT} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe}R_{CL}}$$

$$R_{oBJT} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re}h_{fe}}{h_{ie} + R_s||R_{12}}}$$

$$A_{vBJT} = \frac{1}{h_{re} - h_{ie} + \frac{h_{ie}h_{oe}R_{CL}}{h_{fe}R_{CL}}}$$

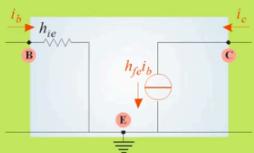
**Modello a Parametri Ibridi Semplificato**

$$R_{iBJT} = h_{ie}$$

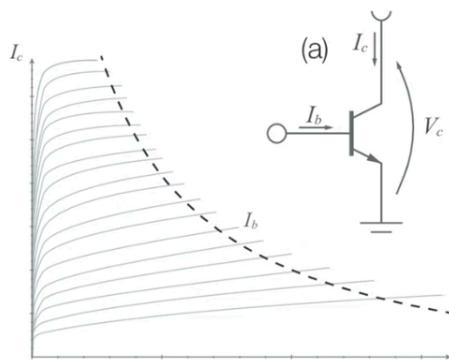
$$A_{iBJT} = h_{fe}$$

$$R_{oBJT} = \infty$$

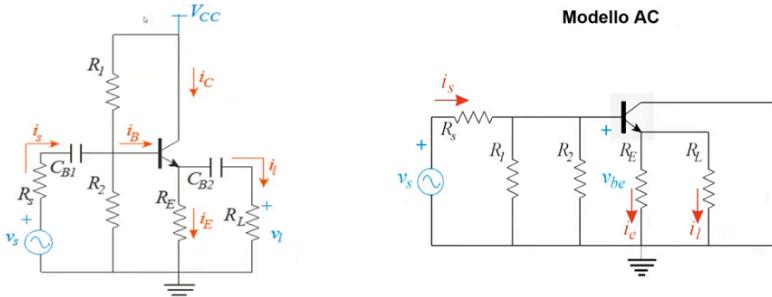
$$A_{vBJT} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_{CL}$$



Per quanto riguarda la potenza del bjt, è limitata in quanto la potenza è limitata:

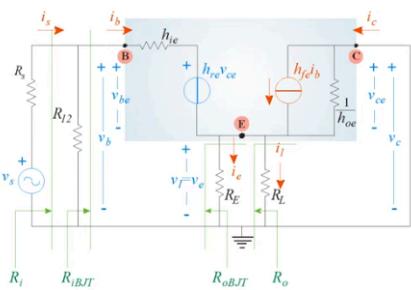
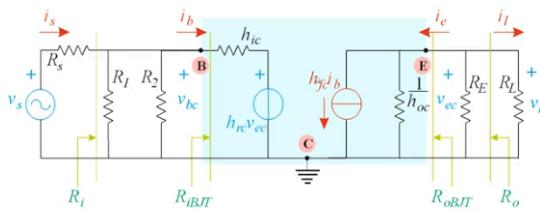


Vediamo il c-c (inseguitore di emettitore)-> tensione uscita segue quella di ingresso:



Parte DC è la stessa del c-e.

Analizziamolo in dinamica:



Sono equivalenti : possiamo studiarlo in entrambi i modi.

1. Resistenza di ingresso:

$$\boxed{R_i = v_{bc}}$$

a. $R_{iBJT} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{i_e}{i_b}$

b. $R_{iBJT} = h_{ic} - \frac{h_{rc}h_{fc}R_{EL}}{1 + h_{oc}R_{EL}}$

2. Amplificazione di corrente:

a. $A_i = \frac{i_l}{i_e} \frac{i_e}{i_b} \frac{i_b}{i_s} = \alpha_{i,o} A_{iBJT} \alpha_{i,i}$

b. $A_{iBJT} = \frac{h_{fc}}{1 + h_{oc}R_{EL}}$

$$\alpha_{i,o} = \frac{i_l}{i_e} \quad i_l = \frac{R_E}{R_E + R_L} i_e \quad \rightarrow \alpha_{i,o} = \frac{R_E}{R_E + R_L}$$

c. $\alpha_{i,i} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{i_b}{i_s} \quad i_b = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{iBJT}} i_s \quad \rightarrow \alpha_{i,i} = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{iBJT}}$

d. $A_i = \frac{R_E}{R_E + R_L} \frac{h_{fc}}{1 + h_{oc}R_{EL}} \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{iBJT}}$

3. Amplificazione di tensione:

a. $A_v = \frac{v_{ec}}{v_{bc}} \frac{v_{bc}}{v_s} = A_{vBJT} \alpha_{v,i}$

b. $A_{vBJT} = -\frac{h_{fc}R_{EL}}{h_{ic} + (h_{ic}h_{oc} - h_{fc}h_{rc})R_{EL}} = -\frac{h_{fc}R_{EL}}{h_{ic} + \Delta h \cdot R_{EL}}$

c. $A_v = -\frac{h_{fc}R_{EL}}{h_{ic} + \Delta h \cdot R_{EL}} \frac{R_{12} || R_{iBJT}}{R_s + (R_{12} || R_{iBJT})}$

4. Resistenza di uscita:

$$R_{oBJT} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{v_{ec}}{i_e}$$

Maglia di ingresso

$$h_{rc}v_{rc} = -(h_{ic} + R_s || R_{12})i_b$$

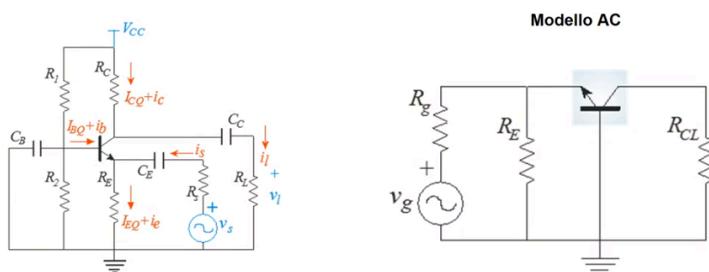
$$\begin{cases} v_{bc} = h_{ic}i_b + h_{rc}v_{ec} & (\text{eq. I CC}) \\ i_e = h_{fc}i_b + h_{oc}v_{ec} & (\text{eq. II CC}) \end{cases}$$

a. $v_s \stackrel{!}{=} 0$

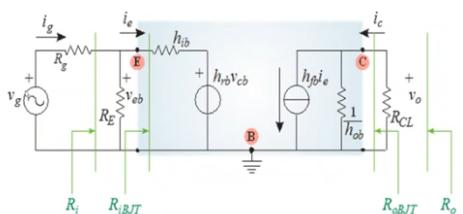
$$i_e = -h_{fc} \frac{h_{rc}}{h_{ic} + R_s || R_{12}} v_{ec} + h_{oc}v_{ec}$$

$$R_{oBJT} = \frac{1}{h_{oc} - \frac{h_{fc}h_{rc}}{h_{ic} + R_s || R_{12}}}$$

Vediamo ora quello a base comune:



Per la statica è lo stesso del c-e
Vediamo ora in dinamica :



$$A_{iBJT} = \frac{h_{fb}}{1 + h_{ob}R_{CL}}$$

$$R_{iBJT} = h_{ib} - \frac{h_{rb}h_{fb}R_{CL}}{1 + h_{ob}R_{CL}}$$

$$A_{vBJT} = \frac{1}{h_{rb} - \frac{h_{ib} + h_{ib}h_{ob}R_{CL}}{h_{ob}R_{CL}}}$$

$$R_{oBJT} = \frac{1}{h_{ob} - \frac{h_{fb}h_{rb}}{h_{fb}h_{rb} + h_{ob}}}$$

Riassumendo :

Amplificatore	CE	CC	CB
A _{vBJT}	Alto $\frac{h_{fe}R_{CL}}{h_{ie} + \Delta h * R_{CL}}$ degraded by R _{E1}	Basso (≈ 1) $\frac{h_{fe}R_{EL}}{h_{ic} + \Delta h * R_{EL}}$	Alto $\frac{h_{fb}R_{CL}}{h_{ib} + \Delta h * R_{CL}}$
A _{iBJT}	Alto $\frac{h_{fe}}{1 + h_{oe}R_{CL}}$	Alto ($\approx 100 \div 200$) $\frac{-h_{fc}}{1 + h_{oc}R_{EL}}$	Basso (≈ 1) $\frac{h_{fb}}{1 + h_{ob}R_{CL}}$
R _{iBJT}	Moderato ($\approx 10^3 \Omega$) $\frac{h_{ie} + \Delta h * R_{CL}}{1 + h_{oe}R_{CL}}$	Molto alto ($\approx 10^6 \Omega$) $\frac{h_{ic} + \Delta h * R_{EL}}{1 + h_{oc}R_{EL}}$	Molto basso ($\approx 10^1 \div 10^2 \Omega$) $\frac{h_{ib} + \Delta h * R_{CL}}{1 + h_{ob}R_{CL}}$
R _{oBJT}	Moderato ($\approx 10^4 \Omega$) $\frac{h_{ie} + R_s R_{12}}{h_{oe}(R_s R_{12}) + \Delta h}$	Molto basso ($\approx 10^1 \Omega$) $\frac{h_{ic} + R_s R_{12}}{h_{oc}(R_s R_{12}) + \Delta h}$	Alto ($\approx 10^3 \div 10^7 \Omega$) $\frac{h_{ib} + R_s R_E}{h_{ob}(R_s R_E) + \Delta h}$
Sfasamento in/out	π or $(2n + 1)\pi$	none or 2π	none or 2π
Funzione chiave	Transcond. ampl. Voltage ampl.	Voltage buffer Imped. match.	Current buffer HF amplifier

Oltre ad usarlo come amplificatore, lo possiamo usare anche come switch:

