

## Amplificatori a BJT

### Sommario argomenti trattati

Amplificatori a BJT .....	1
Il BJT: cenni storici e richiami sul funzionamento.....	1
Amplificatore a BJT: generalità.....	2
Il circuito equivalente a parametri ibridi .....	3
Determinazione dei parametri caratteristici dell'amplificatore E.C. ....	5
Studio statico.....	5
Studio dinamico .....	5
Guadagno di corrente parziale $A_{ip}$ .....	6
Resistenza d'ingresso.....	7
Guadagno di tensione.....	7
Resistenza di uscita .....	7

In questo capitolo vogliamo affrontare lo studio degli amplificatori a transistor. Nel campo degli amplificatori i transistori stanno cedendo sempre più il passo ai componenti integrati ed in particolare gli op-amp, in virtù della maggiore semplicità di progettazione di questi ultimi. I transistori hanno ancora un certo spazio nelle applicazioni di potenza, alle alte frequenze, ed in altre applicazioni.

In questa breve analisi considereremo solo un tipo di transistor: il BJT.

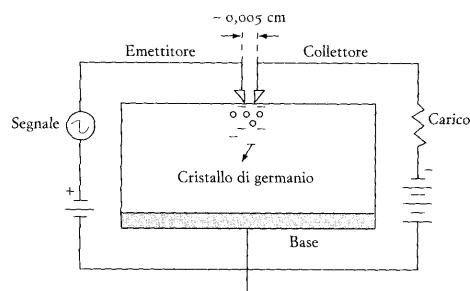
### Il BJT: cenni storici e richiami sul funzionamento

Il 23 di dicembre del 1947 John Bardeen e Walter H. Brattain illustrano ad un gruppo di dirigenti dei laboratori della Bell Telephone il primo prototipo sperimentale di un transistor a semiconduttore (germanio nel caso specifico) chiamato *transistore a punta di contatto*, in grado di garantire un guadagno di corrente di circa 40 ed un guadagno di tensione di circa 100. A seguito di questa scoperta John Bardeen, Walter H. Brattain, e William B. Shockley che aveva dato un forte contributo teorico e sperimentale al successo della scoperta, ricevettero nel 1956 il premio Nobel per la Fisica .



**Fig. 1 John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Schokley**

Nella figura che segue vediamo schematizzata la struttura del primo transistor "funzionante" inventato dai tre scienziati americani. Il dispositivo ha subito vari mutamenti tecnologici al fine di migliorarne le caratteristiche.



**Fig. 2 - Struttura fisica del primo transistore**

In estrema sintesi il BJT può operare in tre diverse regioni di funzionamento:

- Regione attiva, in cui il BJT si comporta da amplificatore di corrente, ossia in cui la corrente di uscita (la corrente di collettore) è proporzionale alla corrente d'ingresso (la corrente di base), per questa sua caratteristica il BJT è un dispositivo a *controllo di corrente*.
- Regione di saturazione, in cui il BJT si comporta come un interruttore chiuso i cui estremi sono collettore ed emettitore.
- Regione di interdizione, in cui il BJT si comporta come un interruttore aperto i cui estremi sono collettore ed emettitore.

## Amplificatore a BJT: generalità

Interessandoci gli amplificatori è evidente che il BJT dovrà essere innanzitutto polarizzato in regione attiva e per far ciò sarà necessario ricorrere ad un opportuno circuito di polarizzazione.

Si dovrà anche garantire che il punto di lavoro del BJT rimanga il più possibile fisso nella posizione imposta dal progettista, per evitare che spostandosi si posizioni in una zona in cui il BJT non opera più da amplificatore.

In un BJT i fattori che influenzano il punto di lavoro o punto di quiet sono:

- Le condizioni ambientali e la temperatura in particolare;
- L'invecchiamento dei dispositivi;
- La forte dispersione delle caratteristiche, ovvero la forte variabilità delle caratteristiche da BJT a BJT, anche se nominalmente sono dello stesso tipo.

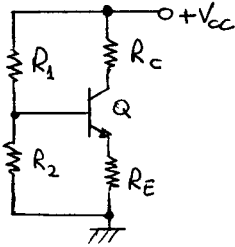


Fig. 3 Circuito di polarizzazione automatica a partitore di tensione

Tra i vari circuiti di polarizzazione adottati, il più usato nei circuiti a componenti discreti è il circuito di polarizzazione automatica a partitore di tensione, la cui struttura si può vedere in Fig. 3, ricordo che l'effetto di stabilizzazione del punto di lavoro è prevalentemente dovuto alla resistenza  $R_E$  presente sull'emettitore, ed è tanto più elevato quanto maggiore è la  $R_E$ .

Per la realizzazione di un amplificatore è necessario applicare in ingresso il segnale da amplificare ed in uscita il carico. Una prima soluzione che affrontiamo fa uso di capacità dette "di accoppiamento" in quanto per l'appunto collegano ("accoppiano") generatore d'ingresso ed amplificatore, amplificatore e carico.

Queste capacità assolvono alle seguenti funzioni:

- Impedire alla corrente continua di arrivare su generatore e carico con possibilità di arrecare dei danni (si pensi ad un altoparlante o ad una puntina di giradischi);
- impedire che il collegamento del carico o del generatore d'ingresso possano cambiare il punto di lavoro del BJT;
- realizzare un filtro passa-alto in modo da eliminare le basse frequenze (es. amplificatore per uso musicale);

Come terminali di ingresso nel BJT si può utilizzare o la base o l'emettitore, mentre come uscita si utilizza o il collettore o l'emettitore.

Nel caso che si intende trattare l'ingresso è la base e l'uscita il collettore, inoltre al fine di ottenere particolari prestazioni, viene inserita una capacità tra emettitore e massa, detta **capacità di bypass**, il cui scopo è di collegare direttamente a massa l'emettitore almeno alle frequenze che si intendono amplificare, perciò tale capacità deve essere scelta di valore sufficientemente elevato così da risultare effettivamente un cortocircuito alle frequenze d'interesse.

Si ottiene così lo schema completo di Fig. 4 noto sotto il nome di **amplificatore emettitore comune** (o semplicemente E.C.).

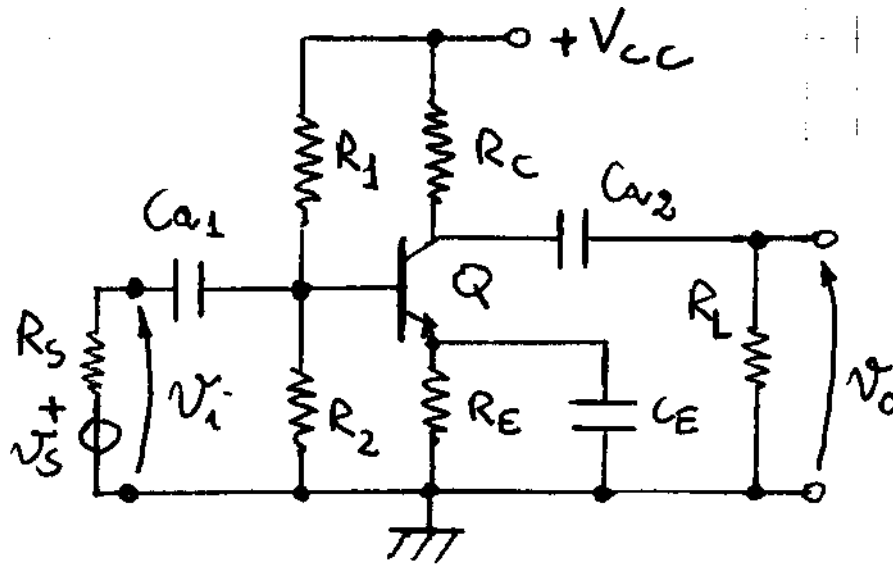


Fig. 4 Amplificatore a BJT emettitore comune ( $C_{a1}$  e  $C_{a2}$  sono le capacità di accoppiamento,  $C_E$  è la capacità di bypass).

### Il circuito equivalente a parametri ibridi

Per poter effettuare lo studio dell'amplificatore, come indicato nel capitolo precedente, è necessario poter rappresentare in modo approssimato il comportamento del transistor nei confronti dei piccoli segnali con un circuito lineare, comunemente chiamato **circuito equivalente per i piccoli segnali**.

Per i BJT esistono numerosi circuiti equivalenti, ciascuno particolarmente adatto a schematizzare il comportamento del BJT in varie situazioni (alte frequenze, audiofrequenze, etc..), in questi appunti ci si limiterà a considerarne il più utilizzato per le frequenze audio: il **circuito equivalente a parametri ibridi**, il cui schema è riportato in Fig. 5

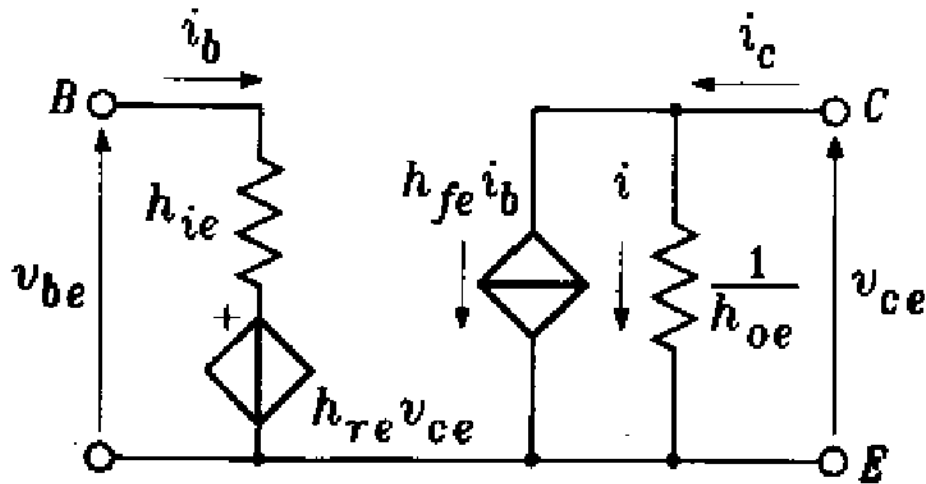


Fig. 5 Circuito equivalente a parametri ibridi

Si noti la presenza di generatori "strani", a forma di rombo, questi sono dei generatori dipendenti, ossia che erogano una corrente o una tensione dipendente da un'altra grandezza elettrica.

I vari parametri del circuito equivalente sono così definiti:

<i>parametro</i>	<i>definizione</i>	<i>dimensioni campo valori</i>	<i>note</i>
$h_{ie}$ : hybrid-input emitter	$h_{ie} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right _{V_{CE} = \text{cost.}}$	Resistenza 500 W , 20 kW	resistenza d'ingresso del BJT con uscita in cortocircuito
$h_{fe}$ : hybrid-forward emitter	$h_{fe} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right _{V_{CE} = \text{cost.}}$	Guadagno di corrente 50 , 500	guadagno di corrente del BJT con uscita in cortocircuito
$h_{oe}$ : hybrid-output emitter	$h_{oe} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right _{I_B = \text{cost.}}$	Conduttanza (S) ( 5 , 60) mS	conduttanza d'uscita del BJT con ingresso aperto
$h_{re}$ : hybrid-reverse emitter	$h_{re} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right _{I_B = \text{cost.}}$	Guadagno di tensione $10^{-4}$ , $10^{-5}$	reazione di tensione del BJT con ingresso aperto

I parametri sono dimensionalmente tutti diversi e perciò sono stati chiamati **ibridi** (in inglese *hybrid* ).

I pedici hanno il seguente significato:

- l'"e", comune a tutti, ricorda che ci si riferisce alla connessione a emettitore comune;
- l'altro carattere del pedice specifica la funzione del parametro:
  - *i* = *input* (ingresso)
  - *o* = *output* (uscita)
  - *r* = *reverse* (inverso)
  - *f* = *forward* (diretto)

Normalmente i parametri  $h_{oe}$  e  $h_{re}$  sono molto piccoli, al punto che spesso, per semplicità, si considerano nulli.

Si ricorda, per l'ennesima volta, che il circuito equivalente a parametri ibridi mi descrive in **modo approssimato** il comportamento del BJT, solo ed **esclusivamente** per i **segnali** variabili<sup>1</sup> (quindi **non** è utilizzabile per la **continua**), l'errore commesso è tanto più piccolo quanto più piccoli sono i segnali.

<sup>1</sup> Il pignolo di turno potrebbe far notare che un segnale è per definizione collegato ad una variazione di una grandezza fisica e perciò il termine "variabili" è superfluo, ma di ciò non ci interessiamo.

## Determinazione dei parametri caratteristici dell'amplificatore E.C.

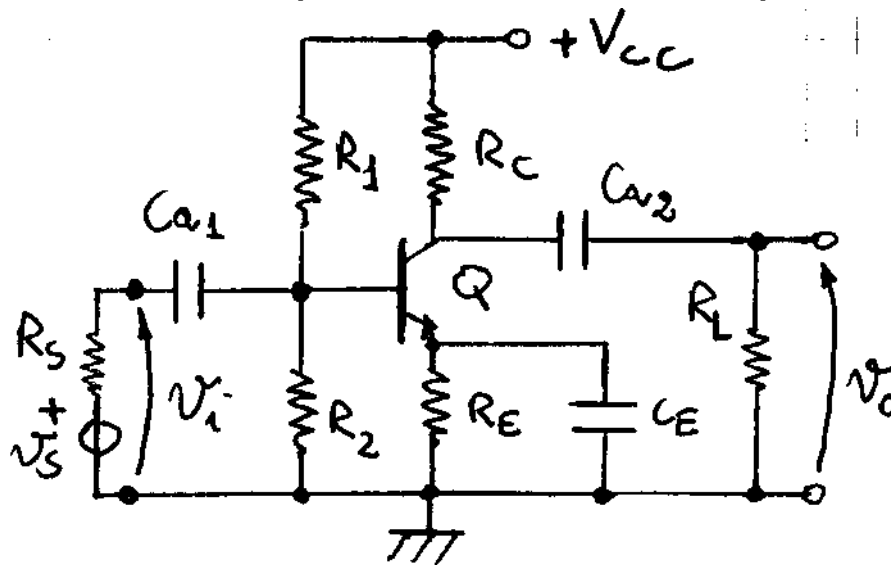


Fig. 6 Amplificatore a BJT emettitore comune.

Lo studio dell'amplificatore E.C. in cui sono presenti contemporaneamente tensioni continue e variabili (alternate), procede come segue:

### Studio statico

Ipotizzo presenti le sole tensioni e correnti continue e determino per via grafica o con qualche altro metodo dell'elettrotecnica la tensioni e le correnti continue a cui è soggetto il componente elettronico, in pratica determino il punto di funzionamento a riposo o punto di lavoro Q. Questa fase del procedimento è indicata con il termine **studio statico** ed il circuito considerato **circuito statico**.

Nel caso in questione, ricordato che le capacità in continua sono circuiti aperti, il circuito statico dell'amplificatore è quello di Fig. 7

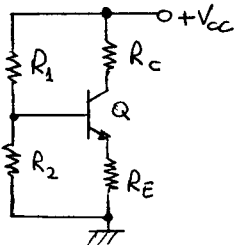


Fig. 7 Circuito statico amplificatore E.C.

### Studio dinamico

Ipotizzo presenti i soli segnali alternati o variabili ed inoltre considero di operare a frequenze sufficientemente elevate (frequenze di centro banda o frequenze medie) da poter ritenere le capacità di accoppiamento e bypass cortocircuiti.

Devo quindi ridisegnare il circuito dell'amplificatore considerando:

- nulle le tensioni e correnti continue erogate dai generatori eventualmente presenti (in questo caso dovrò sostituire  $+V_{cc}$  con la massa, in quanto  $+V_{cc}=0$ );
- cortocircuiti  $C_{a1}$ ,  $C_{a2}$ ,  $C_E$ ;

si ottiene così il circuito di , detto **circuito dinamico**.

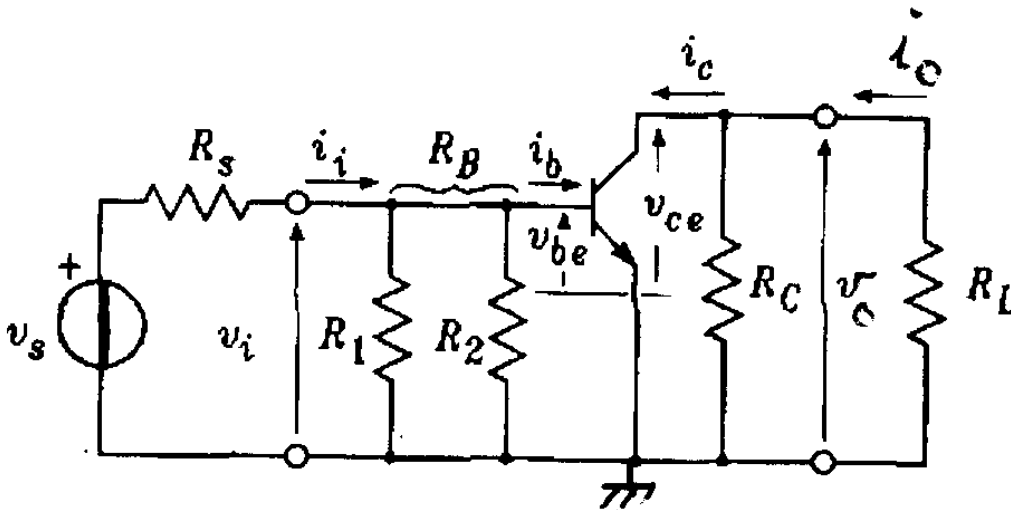


Fig. 8 Circuito dinamico amplificatore E.C.

Per determinare i parametri caratteristici dell'amplificatore, devo considerare il comportamento del BJT descritto dal corrispondente circuito equivalente a parametri ibridi, si ottiene così il circuito di , detto **circuito dinamico per i piccoli segnali**.

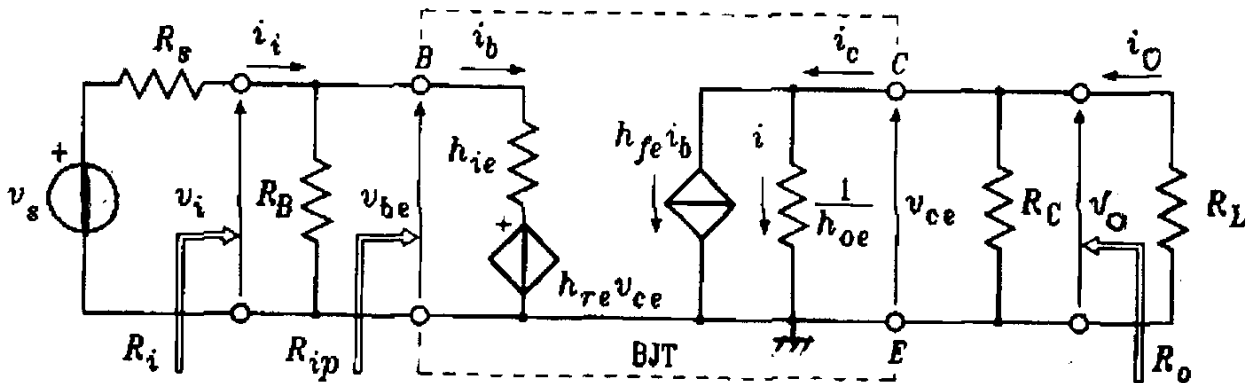


Fig. 9 Circuito dinamico per i piccoli segnali ( $R_B=R_1/R_2$ )

Possiamo ora procedere alla determinazione dei parametri caratteristici dell'amplificatore.

### Guadagno di corrente parziale $A_{ip}$

Si definisce guadagno di corrente parziale la quantità:  $A_{ip} = \frac{i_c}{i_b}$ , cerchiamo di determinare una espressione in funzione dei componenti del circuito amplificatore, perciò cerchiamo di esprimere la  $i_c$  in funzione della  $i_b$ :

§ scriviamo l'equazione delle correnti al nodo sul collettore:  $i_c = h_{fe}i_b + i$

§ la corrente  $i$  coincide con la corrente che circola sulla resistenza  $1/h_{oe}$ , perciò in base alla legge di Ohm:

$$i = \frac{v_o}{1/h_{oe}} = h_{oe}v_o$$

§ la tensione di uscita coincide con la tensione ai capi del parallelo fra  $R_C$  e  $R_L$  che chiamiamo per comodità  $R_P$ , si ha  $v_o = -R_P i_c$

§ sostituendo:  $i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_o = h_{fe}i_b - h_{oe}R_P i_c$ ;

§ risolvo al fine di ricavare la  $i_c$ :  $i_c + h_{oe}R_P i_c = h_{fe}i_b \Rightarrow i_c(1 + h_{oe}R_P) = h_{fe}i_b \Rightarrow i_c = \frac{h_{fe}i_b}{(1 + h_{oe}R_P)}$

§ sostituisco nella definizione di guadagno di corrente:  $A_{ip} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{h_{fe} i_b}{i_b (1 + h_{oe} R_p)}$

§ eliminando la  $i_b$  ottengo la relazione cercata:

**Eq. 1 Guadagno di corrente parziale**  $A_{ip} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} R_p}$

§ se  $h_{oe} \approx 0 \Rightarrow A_{ip} \approx h_{fe}$

### Resistenza d'ingresso

Osservando il circuito d'ingresso si ha:

**Eq. 2 Resistenza d'ingresso**  $R_i = R_B // R_{ip}$

con  $R_{ip}$  resistenza d'ingresso parziale (o del BJT) definita come:  $R_{ip} = \frac{v_{be}}{i_b}$ , procediamo come prima e cerchiamo di

esprimere la  $v_{be}$  in funzione della corrente di base:

§ dal circuito applicando la legge di Ohm:  $v_{be} = v_i = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$

§ ma  $v_{ce} = v_o = -R_p i_c = -R_p A_{ip} i_b$

§ sostituendo:  $v_i = h_{ie} i_b - h_{re} R_p A_{ip} i_b = (h_{ie} - h_{re} R_p A_{ip}) i_b$

§ si ricava la:  $R_{ip} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{(h_{ie} - h_{re} R_p A_{ip}) i_b}{i_b} = h_{ie} - h_{re} R_p A_{ip}$

§ se  $h_{re} \approx 0 \Rightarrow R_{ip} \approx h_{ie}$

### Guadagno di tensione

Per definizione:  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_p i_c}{R_{ip} i_b}$  ed infine ricordando la definizione di guadagno di corrente parziale:

**Eq. 3 Guadagno di tensione**  $A_v = -\frac{R_p}{R_{ip}} A_{ip}$

§ se  $h_{re} \approx 0$  e  $h_{oe} \approx 0$  allora  $A_v = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_p$

Da questa relazione si deduce che l'amplificatore E.C. è un amplificatore **invertente** con guadagno abbastanza elevato (circa 50-500).

### Resistenza di uscita

Per definizione la resistenza di uscita  $R_o$  è la resistenza che si vede ai morsetti di uscita dell'amplificatore posto di aver annullato tutti i generatori indipendenti presenti, nel caso in questione l'unico generatore indipendente presente è il generatore d'ingresso  $v_s$ , annullandolo il circuito dinamico per i piccoli segnali diventa quello di Fig. 10

Dallo schema risulta evidente che la  $R_o$  coincide con il parallelo della  $R_c$ , della resistenza  $1/h_{oe}$  e della resistenza del generatore dipendente  $h_{fe} i_b$ , ossia:

$$R_o = R_c // (1/h_{oe}) // R_{hfe}$$

Cerchiamo di determinare la resistenza del generatore di corrente dipendente  $h_{fe} i_b$  che chiamiamo  $R_{hfe}$ , per definizione di resistenza risulta:

$R_{hfe} = \frac{v_{ce}}{h_{fe} i_b} = \frac{v_o}{h_{fe} i_b}$  cerco ora di esprimere la  $i_b$  in funzione della  $v_o$ , allo scopo considero il circuito d'ingresso.

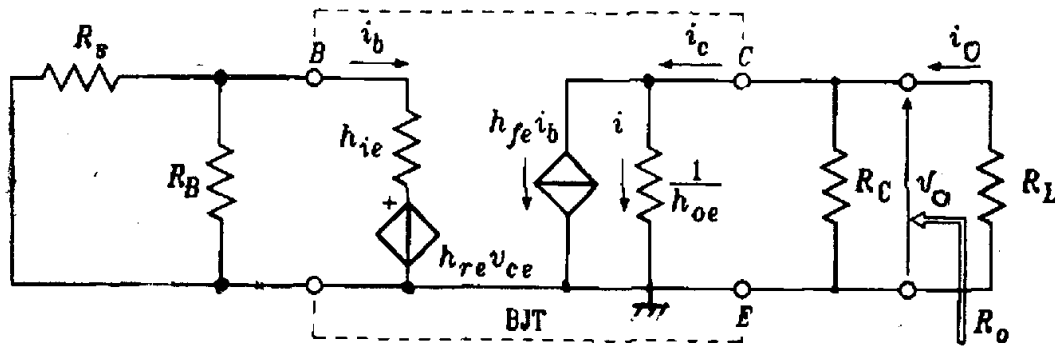


Fig. 10 Circuito dinamico per il calcolo della resistenza di uscita

In ingresso l'unico generatore presente è quello dipendente  $h_{re}v_{ce}$ , che alimenta una resistenza complessiva costituita dalla serie di  $h_{ie}$  e del parallelo di  $R_S$  e  $R_B$ , applicando la legge di Ohm si può ricavare la corrente:

$$i_b = -\frac{h_{re}v_{ce}}{h_{ie} + R'_S} \text{ dove } R'_S = R_B // R_S, \text{ sostituendo si ha:}$$

$$R_{h_{fe}} = \frac{v_o}{h_{fe}i_b} = \frac{v_o}{-h_{fe} \frac{h_{re}v_o}{h_{ie} + R'_S}} = -\frac{1}{\frac{h_{fe}h_{re}}{h_{ie} + R'_S}} \text{ e quindi la relazione desiderata:}$$

$$\text{Eq. 4 } R_{h_{fe}} = -\frac{h_{ie} + R'_S}{h_{fe}h_{re}}$$

Il risultato ottenuto merita è di particolare interesse: la resistenza del generatore di corrente dipendente  $h_{fe}i_b$  in questo particolare caso è **negativa**, ciò non è assurdo in quanto non ci si riferisce ad un resistore ohmico vero e proprio. Determiniamo infine l'espressione complessiva della resistenza di uscita:

$$\text{Eq. 5 Resistenza di uscita amplificatore } R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_C} + h_{oe} - \frac{h_{fe}h_{re}}{h_{ie} + R'_S}}$$

L'effetto di  $R_{h_{fe}}$  sulla resistenza di uscita dell'amplificatore è quello di dar luogo ad un aumento della resistenza di uscita, effetto chiaramente indesiderato in un amplificatore di tensione in cui la resistenza di uscita deve essere la più piccola possibile.

Anche per la resistenza di uscita si può identificare una relazione approssimata:

$$\text{§ se } h_{re} \approx 0 \text{ e } h_{oe} \approx 0 \text{ allora } R_o \approx R_C$$

relazione molto utile in sede di progetto.