

ESEMPIO DI AMPLIFICATORE A BJT A COLLETTORE COMUNE (EMITTER FOLLOWER)

(Dati uguali all'Esempio di par.8.3.2, Fig.8.55
del testo R.R.Spencer & M.M.Ghausi: Introduction to Electronic Circuit Design)

Calcolare il punto di lavoro del BJT Q_1 di Fig.1, le amplificazioni a media frequenza di tensione $A_v = v_o / v_i$ e di corrente $A_i = i_i / i_i$, l'amplificazione di potenza $A_p = W_1 / W_i$ e le resistenze di ingresso R_i e di uscita R_o nei punti P_1 e P_2 indicati. Si trascuri l'effetto Early.

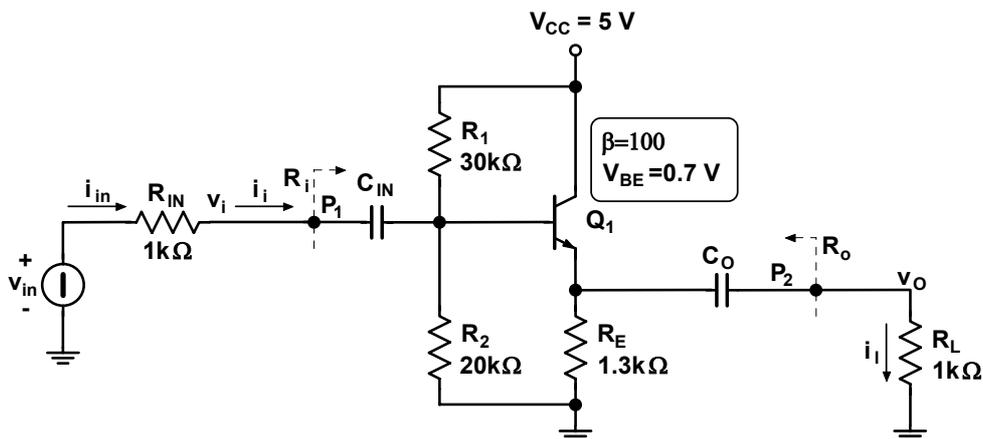


Fig.1. Circuito con transistor BJT connesso a Collettore Comune (Emitter follower)

Soluzione:

a – schema equivalente completo

Si può sostituire il transistor con un suo schema equivalente, ottenendo il circuito di Fig.2, valido sia ai grandi segnali sia ai piccoli segnali. (Il tracciamento del circuito di Fig.2 è un passo intermedio, mostrato per facilitare la comprensione degli sviluppi successivi e viene di solito omissso considerandolo sottinteso).

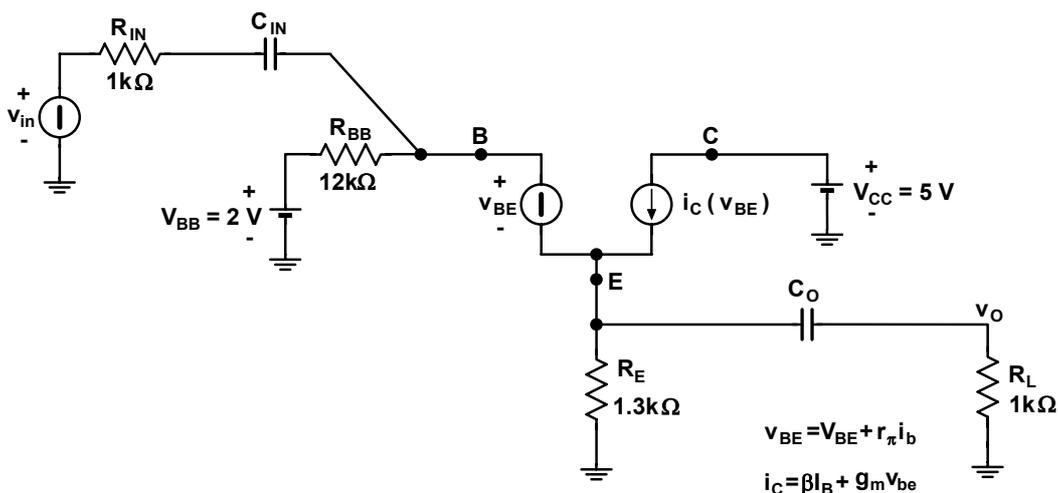


Fig.2. Schema equivalente completo

Nello schema equivalente del transistor, la tensione totale v_{BE} si considera la somma della tensione continua del punto di lavoro V_{BE} , funzione come è noto della corrente I_C , più un termine incrementale ai piccoli segnali pari al prodotto r_π

i_b . Analogamente, la corrente totale di collettore i_C si considera la somma di un termine continuo, relativo al punto di lavoro, βI_B , più un termine ai piccoli segnali $g_m v_{be}$.

Il partitore, formato da R_1 e R_2 ed alimentato da V_{CC} , è stato sostituito dal generatore equivalente V_{BB} e dalla resistenza equivalente R_{BB} . I valori di tali elementi sono dati da

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3} = 2 \text{ V} \quad (1)$$

$$R_{BB} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3} = 12 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

In base al principio della sovrapposizione degli effetti, lo schema equivalente completo si può scindere in uno *schema equivalente ai grandi segnali*, che consente di determinare il punto di lavoro del sistema ed in particolare del BJT, ed in uno *schema equivalente ai piccoli segnali*, su cui si calcolano le amplificazioni e le impedenze richieste, che sono appunto relative al comportamento ai piccoli segnali.

Spesso, e in particolare in questo caso, interessa il comportamento ai piccoli segnali in centro banda, cioè a frequenze diverse dalla continua ma non troppo alte. In questo caso, di solito, i condensatori impiegati nello schema hanno valori tali per cui le loro impedenze risultano molto alte in c. continua e abbastanza basse a frequenza di centro banda. Perciò, se non specificato diversamente, i condensatori si considerano circuiti aperti nel ricavare lo schema ai grandi segnali e corti circuiti nel ricavare lo schema ai piccoli segnali.

b – studio ai grandi segnali

In base a quanto detto, si osserva che, ai fini della determinazione dello schema ai grandi segnali, la parte di circuito a monte di C_{IN} , che comprende il generatore di corrente i_{in} e la resistenza R_{IN} , si può ritenere scollegata dal resto del circuito e senza effetti. Essa viene quindi omessa. Lo schema che si ricava è mostrato in Fig.3.

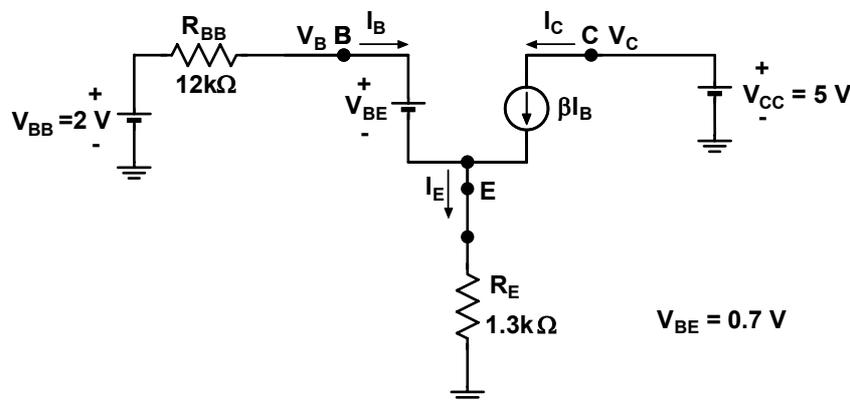


Fig.3. Schema equivalente ai grandi segnali per la determinazione del punto di lavoro

Si suppone che il BJT sia in condizioni di zona attiva e che la tensione base-emettitore sia di fatto $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$.

Considerando la maglia che va dalla base del BJT all'emettitore e comprende il generatore V_{BB} , la resistenza R_{BB} , la caduta base-emettitore V_{BE} e la resistenza R_E , si può scrivere

$$V_{BB} - R_{BB} I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0 \quad (3)$$

e tenendo conto che

$$I_C = \beta I_B \quad (4)$$

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) I_B \quad (5)$$

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V} \quad (6)$$

si ha da (3)

$$V_{BB} - V_{BE} - [R_{BB} + (\beta + 1)R_E] I_B = 0 \quad (7)$$

da cui

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (\beta + 1)R_E} = \frac{2 - 0.7}{12 \cdot 10^3 + (100 + 1)1.3 \cdot 10^3} = 9.07 \mu\text{A} \quad (8)$$

e quindi

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 9.07 \cdot 10^{-6} = 0.907 \text{ mA} \quad (9)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (100 + 1) \cdot 9.07 \cdot 10^{-6} = 0.916 \text{ mA} \quad (10)$$

Note I_C e I_E , si può ricavare la tensione V_{CE} . A tal fine si può scrivere

$$V_C = V_{CC} = 5 \text{ V} \quad (11)$$

$$V_E = R_E I_E = 1.3 \cdot 10^3 \cdot 0.916 \cdot 10^{-3} = 1.191 \text{ V} \quad (12)$$

e perciò

$$V_{CE} = V_C - V_E = 5 - 1.191 = 3.8 \text{ V} \quad (13)$$

Essendo $V_{CE} > 0.2 \text{ V}$, si conferma che *il transistor è in zona attiva*.

c – studio ai piccoli segnali

Dallo schema equivalente completo, azzerando i generatori in continua e quindi *sostituendo i generatori di alimentazione positiva e negativa con connessioni a massa*, sostituendo il condensatore C_{IN} con un corto circuito e inserendo tra Base, Emittitore e Collettore lo schema equivalente del BJT ai piccoli segnali, si ottiene lo schema equivalente ai piccoli segnali di Fig.4.

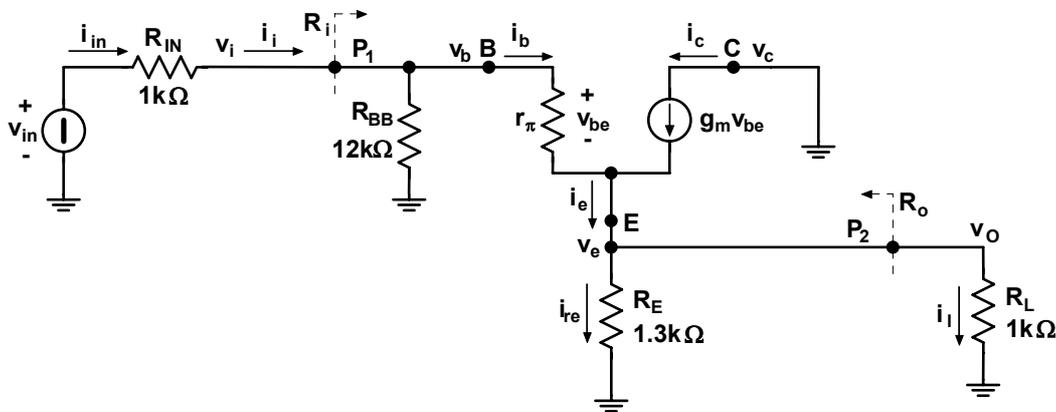


Fig.4. Schema equivalente ai piccoli segnali

Poiché è noto il punto di lavoro del BJT, ed in particolare è nota la corrente di collettore I_C , si può determinare la transconduttanza g_m (che è un parametro ai piccoli segnali). Come è noto si ha

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0.907 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} = 34.88 \cdot 10^{-3} \text{ Siemens} \quad (14)$$

dove V_T è la *tensione termica* (thermal voltage) data da $V_T = kT/q$, con k *costante di Boltzmann*, T *temperatura assoluta in gradi Kelvin*, q *carica dell'elettrone*. Essendo $k = 1.38066 \cdot 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$, $q = 1.60218 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$, e assumendo una temperatura di 27°C e quindi di 300°K , si ottiene $V_T = 25.85 \text{ mV} \approx 26 \text{ mV}$.

Il valore della resistenza differenziale di base r_π si ricava dalla nota formula

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{34.88 \cdot 10^{-3}} = 2.867 \text{ k}\Omega \quad (15)$$

E' conveniente trasformare lo schema equivalente ai piccoli segnali, sostituendo il circuito connesso in base con un generatore equivalente di Thévenin, e riunendo in un'unica resistenza equivalente $R'_E = R'_L$ le due resistenze in parallelo R_E e R_L , come mostrato in Fig.5.

Dallo schema di Fig.4 la tensione "a vuoto" v'_{in} , che si ottiene sconnettendo il circuito che comprende R_{IN} , R_{BB} ed il generatore di tensione v_{in} , vale

$$v'_{in} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} = v_{in} \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 12 \cdot 10^3} = v_{in} \cdot 0.923 \quad (16)$$

La resistenza equivalente R'_{IN} si ottiene nello stesso circuito annullando, cioè chiudendo in corto circuito, il generatore di tensione v_{in} . La R'_{IN} è quindi data dal parallelo di R_{IN} e di R_{BB}

$$R'_{IN} = (R_{IN} // R_{BB}) = \frac{R_{IN} R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 12 \cdot 10^3} = 923 \text{ }\Omega \quad (17)$$

Come detto, la resistenza equivalente R'_L è data da

$$R'_E = R'_L = (R_E // R_L) = \frac{R_E R_L}{R_E + R_L} = \frac{1.3 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3}{1.3 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 565 \text{ }\Omega \quad (18)$$

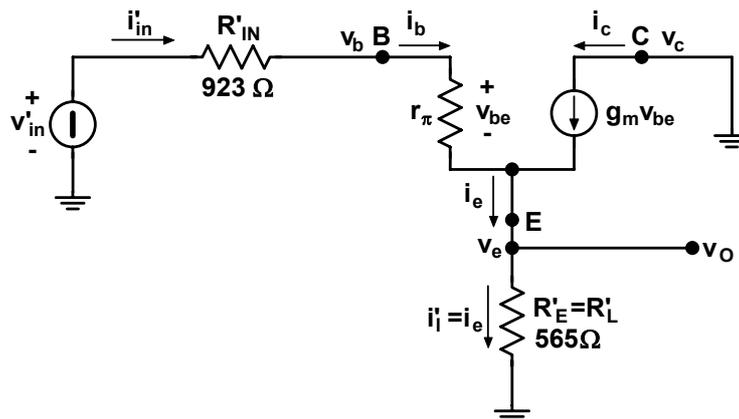


Fig.5. Schema equivalente ai piccoli segnali ridotto

Nello schema ridotto di Fig.5, ricordando che

$$i_c = g_m v_{be} \quad (19)$$

$$i_b = \frac{i_c}{\beta} = \frac{g_m}{\beta} v_{be} \quad (20)$$

$$i_e = i_c + i_b \quad (21)$$

e quindi

$$i_e = \frac{\beta + 1}{\beta} i_c = \frac{\beta + 1}{\beta} g_m v_{be} \quad (22)$$

Considerando la maglia che comprende v'_{in} , R'_{IN} , base, emettitore e $R'_E=R'_L$, si può scrivere

$$v'_{in} - R'_{IN} i_b - v_{be} - R'_E i_e = 0 \quad (23)$$

Tenendo conto delle (20) e (22) si ricava

$$v'_{in} - \left[\frac{1}{\beta} g_m R'_{IN} + 1 + \frac{\beta + 1}{\beta} g_m R'_E \right] v_{be} = 0 \quad (24)$$

$$v_{be} = v'_{in} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} g_m R'_{IN} + \frac{\beta + 1}{\beta} g_m R'_E} \quad (25)$$

e sostituendo nella (20) e nella (19)

$$i_b = v'_{in} \frac{g_m}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = v'_{in} \frac{1}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \quad (26)$$

$$i_c = v'_{in} \frac{g_m \beta}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = v'_{in} \frac{\beta}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \quad (27)$$

$$i_e = v'_{in} \frac{g_m (\beta + 1)}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = v'_{in} \frac{\beta + 1}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \quad (28)$$

Inoltre, dallo schema si ha

$$v_o = v_e = R'_E i_e = v'_{in} \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = v'_{in} \frac{(\beta + 1)R'_E}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \quad (29)$$

Si può definire un'amplificazione di tensione $A'_v = v_o/v'_{in}$, *relativa allo schema ridotto*, che risulta dalla (28)

$$A'_v = \frac{v_o}{v'_{in}} = \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = \frac{(\beta + 1)R'_E}{r_\pi + R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E} \approx 1 \quad (30)$$

dove la semplificazione è valida soprattutto se $\beta + 1 \gg (r_\pi + R'_{IN})/R'_E$. E' da notare che, per la connessione a collettore comune, l'amplificazione di tensione A'_v è *positiva e minore ma prossima a 1*.

Con i dati del caso in esame, dalla (17) si ricava

$$A'_v = \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = \frac{34.88 \cdot 10^{-3} \cdot (100 + 1) \cdot 565}{100 + 34.88 \cdot 10^{-3} \cdot [923 + (100 + 1)565]} = 0.938 \quad (31)$$

Dall'esame del circuito e dalle (25) e (29) si vede che la tensione di base v_b può essere espressa da

$$v_b = v_{be} + v_e = v_{be} \left(1 + \frac{\beta + 1}{\beta} g_m R'_E \right) = v_{be} \left(1 + \frac{(\beta + 1)R'_E}{r_\pi} \right) \quad (32)$$

e dalle (32), (26) e (25) si ricava il rapporto $r_b = v_b/i_b$, che può essere considerato come la *resistenza di ingresso in base del BJT a collettore comune*. Tenendo conto anche della (15) si ottiene

$$r_b = \frac{v_b}{i_b} = \left[\frac{\beta}{g_m} + (\beta + 1)R'_E \right] = [r_\pi + (\beta + 1)R'_E] = [2.867 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 565] = 59.932 \text{ k}\Omega \quad (33)$$

Si può definire inoltre il rapporto $A'_i = i'_1/i'_{in} = i_c/i'_{in}$ come l'amplificazione di corrente *relativa allo schema ridotto* di Fig.5. Dallo schema si vede che $i'_1 = i_c$ e che $i'_{in} = i_b$. Dalle (26) e (28) si ricava quindi

$$A'_i = \frac{i'_1}{i'_{in}} = \frac{i_c}{i_b} = (\beta + 1) = 101 \quad (34)$$

L'amplificazione A'_i è dunque *positiva e grande*.

E' interessante rimarcare che lo schema ridotto di Fig.5 è lo schema tipico della *connessione a emettitore comune con resistenza di emettitore* di un BJT, e che le formule (29), (34), (33) che danno le amplificazioni di corrente e di tensione e la resistenza di ingresso, sono formule classiche riportate in tutte le tabelle.

E' necessario ora tornare allo schema ai piccoli segnali completo di Fig.4 per calcolare i parametri richiesti, relativi allo schema completo.

A questo fine è opportuno esprimere le variabili dello schema in funzione del segnale di ingresso v_{in} anziché di v'_{in} . Sostituendo nelle (26), (27), (25), (29) l'espressione di v'_{in} data dalla (16) si ottiene

$$i_b = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{g_m}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = \quad (35)$$

$$i_c = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{g_m \beta}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} \quad (36)$$

$$v_{be} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{\beta}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} \quad (37)$$

$$v_o = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot A'_V \quad (38)$$

inoltre, dalla (32) e dalla (37) si ricava

$$v_b = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{\beta + (\beta + 1)g_m R'_E}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R'_E]} \quad (39)$$

In base allo schema di Fig.4 risulta che $v_i = v_b$. Dalle (38) e (39) si ricava quindi l'amplificazione di tensione *relativa allo schema completo*

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_b} = \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + (\beta + 1)g_m R'_E} = \frac{(\beta + 1)R'_E}{r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \quad (40)$$

e introducendo i valori numerici

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m (\beta + 1)R'_E}{\beta + (\beta + 1)g_m R'_E} = \frac{34.88 \cdot 10^{-3} \cdot (100 + 1) \cdot 565}{100 + (100 + 1)34.88 \cdot 10^{-3} \cdot 565} = 0.952 \quad (41)$$

Se si fosse voluta calcolare l'amplificazione complessiva $A_{vt} = v_o / v_{in}$ tra il segnale di ingresso e quello di uscita, includendo l'attenuazione dovuta a R_{IN} , dalla (38) e dalla (31) si può ricavare

$$A_{vt} = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot A'_V = \frac{12 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 12 \cdot 10^3} \cdot 0.938 = 0.866 \quad (42)$$

Per calcolare l'amplificazione di corrente $A_i = i_l / i_i$ si devono ricavare le espressioni di i_i e di i_l in funzione delle grandezze già determinate.

Dallo schema di Fig.4 si vede che la corrente $i_i = i_{in}$ è data dalla somma di i_b e della corrente i_{rbb} che fluisce in R_{BB} . Questa corrente, a sua volta, dipende dalla tensione $v_i = v_b$. Si può dunque scrivere, ricordando la definizione di r_b data dalla (33)

$$i_i = i_{rbb} + i_b = \frac{v_b}{R_{BB}} + i_b = i_b \left(\frac{r_b}{R_{BB}} + 1 \right) \quad (43)$$

Ancora da Fig.4 si vede che la corrente $i_e = i_l$ si ripartisce tra le resistenze R_E e R_L . Come è noto, le relative correnti i_{re} e i_l stanno in proporzione inversa alle resistenze (infatti, $i_{re} = v_o / R_E$, $i_l = v_o / R_L$ e $i_e = (i_{re} + i_l)$). Si può dunque scrivere

$$i_l = i_e \frac{R_E}{R_E + R_L} \quad (44)$$

Dalle (43) e (44), tenendo conto della (34), l'amplificazione di corrente *relativa allo schema completo* risulta

$$A_i = \frac{i_l}{i_i} = \frac{i_l}{i_e} \cdot \frac{i_e}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i} = \frac{R_E}{R_E + R_L} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{BB} + r_b} \cdot A'_V \quad (45)$$

e introducendo i valori numerici

$$A_i = \frac{R_E}{R_E + R_L} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{BB} + r_b} \cdot A_i' = \frac{1.3 \cdot 10^3}{1.3 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{12 \cdot 10^3 + 59.932 \cdot 10^3} \cdot (101) = 9.523 \quad (46)$$

L'amplificazione di potenza risulta perciò

$$A_p = \frac{W_i}{W_i} = \frac{v_o \cdot i_l}{v_i \cdot i_i} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{i_l}{i_i} = A_v \cdot A_i = (0.952) \cdot (9.523) = 9.066 \quad (47)$$

Per calcolare la resistenza di ingresso nel punto P₁ (Fig.4) si suppone di sconnettere tutta la parte esterna, cioè il generatore di tensione v_{in} e la resistenza R_{IN}, di annullare nel circuito rimanente tutti i generatori indipendenti (non ve ne sono) e di collegare in P₁ un generatore di prova v_x. Si ottiene la configurazione di Fig.6.

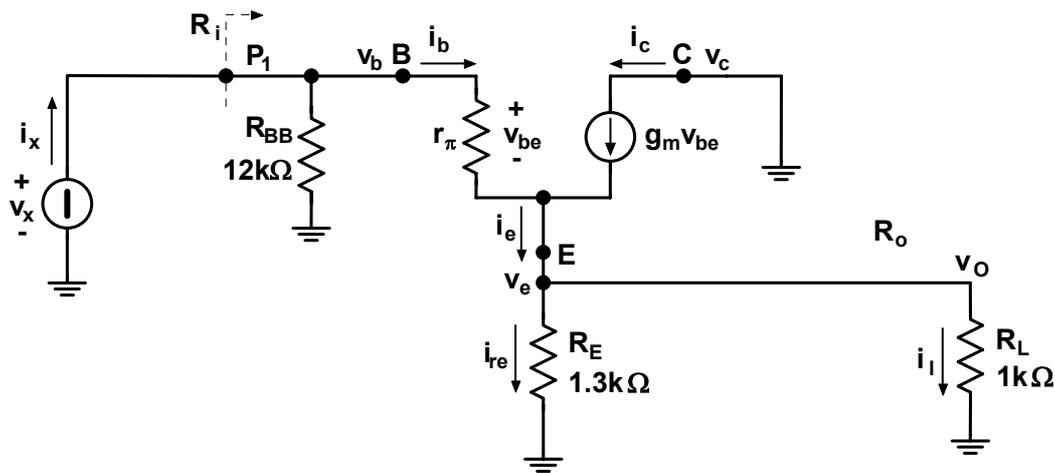


Fig.6. Schema per il calcolo dell'impedenza di ingresso R_i.

Dallo schema, la corrente i_x iniettata da v_x nel punto P₁ risulta

$$i_x = \frac{v_x}{R_{BB}} + i_b = \frac{v_x}{R_{BB}} + \frac{v_b}{r_b} = v_x \left(\frac{1}{R_{BB}} + \frac{1}{r_b} \right) = v_x \left(\frac{1}{R_{BB}} + \frac{1}{r_\pi + (\beta + 1)R'_E} \right) \quad (48)$$

Poiché la resistenza R_i è per definizione R_i = v_x/i_x si ottiene

$$R_i = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_{BB} [r_\pi + (\beta + 1)R'_E]}{R_{BB} + r_\pi + (\beta + 1)R'_E} = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot [2.867 \cdot 10^3 + (100 + 1)565]}{12 \cdot 10^3 + 2.867 \cdot 10^3 + (100 + 1)565} = 9.998 \text{ k}\Omega \quad (49)$$

che è pari al parallelo di R_{BB} e r_b.

In modo simile, per calcolare la resistenza di uscita nel punto P₂ (Fig.4) si suppone di sconnettere tutta la parte esterna, che in questo caso si riduce alla resistenza di carico R_L, di annullare nel circuito rimanente tutti i generatori indipendenti, cortocircuitando il generatore di segnale v_{in}, e di collegare in P₂ un generatore di prova v_x. Si ottiene la configurazione di Fig.7.

E' evidente, dallo schema, che i_x = i_{re} - i_e e che v_e = v_o = v_x. Perciò i_{re} = v_x/R_E.

Per calcolare la corrente i_e causata dalla v_x nell'emettitore, si osserva che a tale corrente, in base alle (19), (20), (21), corrisponde una corrente di base i_b = i_e/(β+1). D'altra parte, come si vede dallo schema, una corrente i_b provoca nel parallelo di R_{IN} e di R_{BB} una tensione v_b che vale

$$v_b = -i_b \cdot (R_{IN} // R_{BB}) = -i_b \frac{R_{IN} R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} = -i_e \frac{1}{\beta + 1} R'_{IN} \quad (50)$$

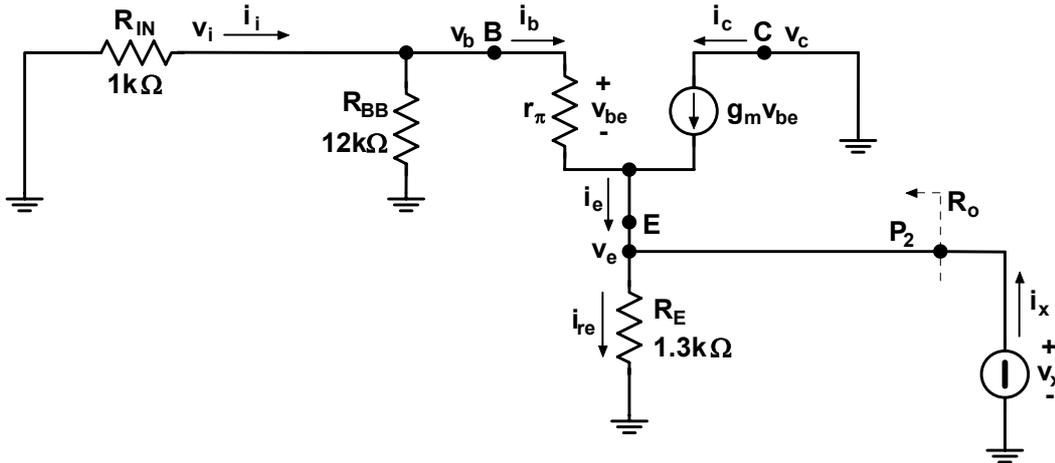


Fig.7. Schema per il calcolo dell'impedenza di uscita R'_o

La stessa i_b provoca nella resistenza r_π una caduta

$$v_{be} = r_\pi \cdot i_b = i_e \frac{r_\pi}{\beta + 1} \quad (51)$$

La tensione v_e provocata da i_e risulta quindi dalle (50) e (51)

$$v_e = v_b - v_{be} = -i_e \left(\frac{R'_{IN}}{\beta + 1} + \frac{r_\pi}{\beta + 1} \right) = -i_e \frac{R'_{IN} + r_\pi}{\beta + 1} \quad (52)$$

Il rapporto $r_e = -v_e/i_e = (R'_{IN} + r_\pi)/(\beta + 1)$ può essere considerato come *resistenza differenziale di emettitore dello schema di Fig.5*. Come si può constatare, dall'emettitore le resistenze connesse in base vengono "viste" come se fossero ridotte del fattore $1/(\beta + 1)$.

Dalle relazioni precedenti si ha

$$i_x = i_{re} - i_e = \frac{v_x}{R_E} + v_e \frac{\beta + 1}{R'_{IN} + r_\pi} = v_x \left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{R'_{IN} + r_\pi} \right) \quad (53)$$

La resistenza di uscita R_o per definizione è quindi

$$R_o = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{R'_{IN} + r_\pi} \right)} = \frac{R_E (R'_{IN} + r_\pi)}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R_E} \quad (54)$$

che è il parallelo di R_E con r_e .

Sostituendo i valori dei parametri si ha

$$R_o = \frac{R_E (R'_{IN} + r_\pi)}{R'_{IN} + r_\pi + (\beta + 1)R_E} = \frac{1.3 \cdot 10^3 (923 + 2.867 \cdot 10^3)}{923 + 2.867 \cdot 10^3 + (100 + 1)1.3 \cdot 10^3} = 36.472 \ \Omega \quad (55)$$

Il risultato ottenuto conferma che *la connessione a collettore comune è caratterizzata da una bassa resistenza di uscita*. Si può osservare che, nel caso si fosse dovuto tener conto dell'effetto Early, si sarebbe dovuta definire una corrispondente resistenza r_o in parallelo al generatore di corrente comandato $g_m v_{be}$ nello schema equivalente ai piccoli segnali del BJT. L'effetto di tale resistenza è normalmente trascurabile nel calcolo dei parametri considerati in questo esercizio. Per la connessione a collettore comune, ciò vale anche nella determinazione della resistenza di uscita R_o .