

ESEMPIO DI AMPLIFICATORE A BJT AD EMETTITORE COMUNE CON RESISTENZA DI EMETTITORE

(Dati uguali all'Esempio di par.8.2.2, Fig.8.33
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.

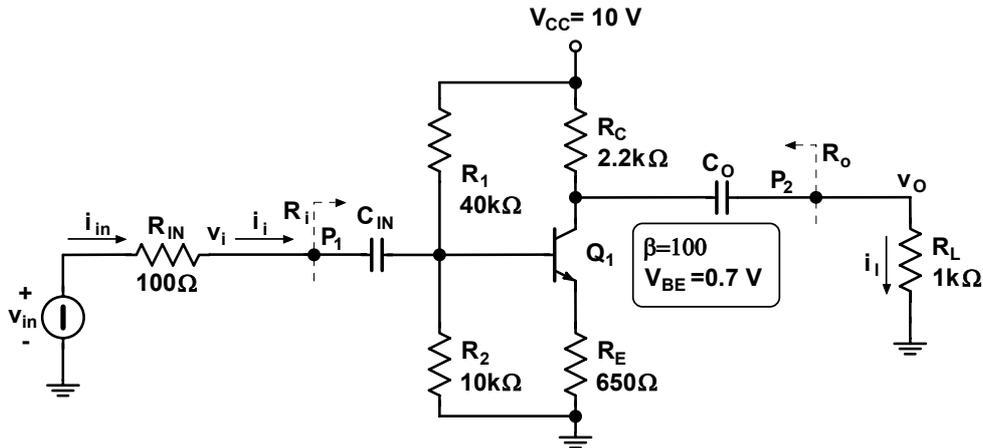


Fig.1. Circuito con transistor BJT connesso a Emittitore Comune con resistenza in emettitore

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 omesso considerandolo sottinteso).

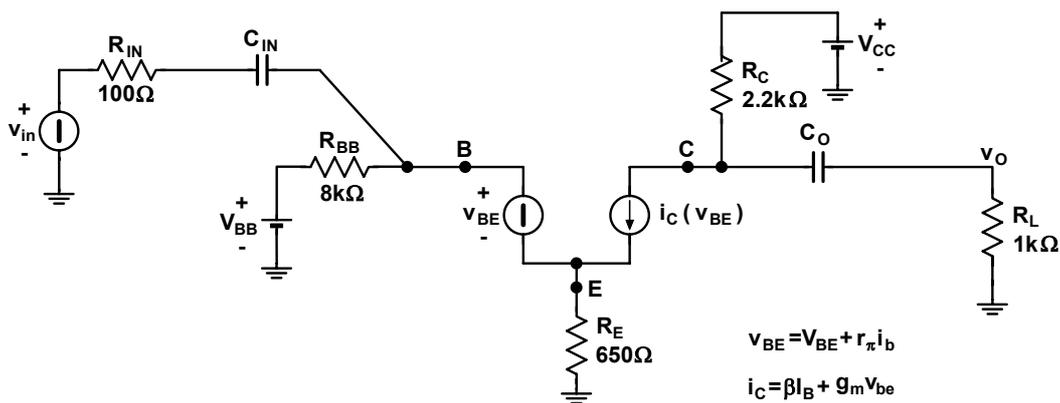


Fig.2. Schema equivalente completo

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 $r_\pi i_b$. 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

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} = 2 \text{ V} \quad (1)$$

$$R_{BB} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} = 8 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

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} , e quello a valle di C_O , che comprende R_L , 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.

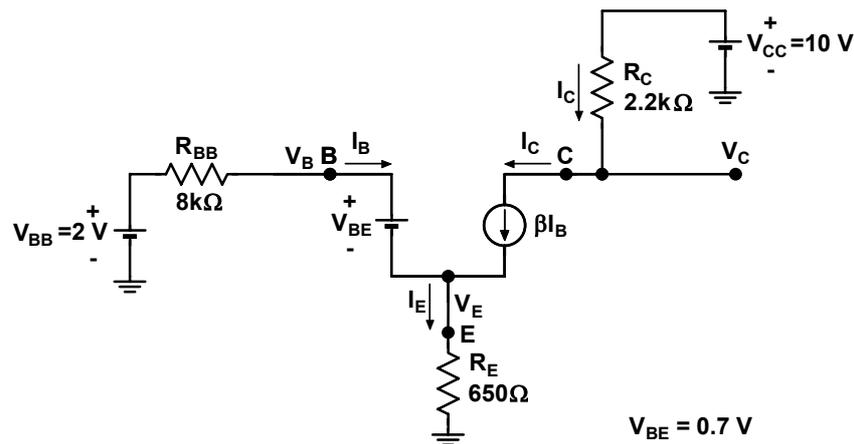


Fig.3. Schema equivalente ai grandi segnali per la determinazione del punto di lavoro

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

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (\beta + 1) R_E} = \frac{2 - 0.7}{8 \cdot 10^3 + (100 + 1)650} = 17.65 \mu\text{A} \quad (8)$$

e quindi

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 17.65 \cdot 10^{-6} = 1.765 \text{ mA} \quad (9)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B = (100 + 1) \cdot 17.65 \cdot 10^{-6} = 1.783 \text{ mA} \quad (10)$$

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

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 10 - 2.2 \cdot 10^3 \cdot 1.765 \cdot 10^{-3} = 6.117 \text{ V} \quad (11)$$

$$V_E = R_E I_E = 650 \cdot 1.783 \cdot 10^{-3} = 1.159 \text{ V} \quad (12)$$

e perciò

$$V_{CE} = V_C - V_E = 6.117 - 1.159 = 4.958 \text{ V} \quad (13)$$

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 i condensatori C_{IN} e C_O con corti circuiti 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.

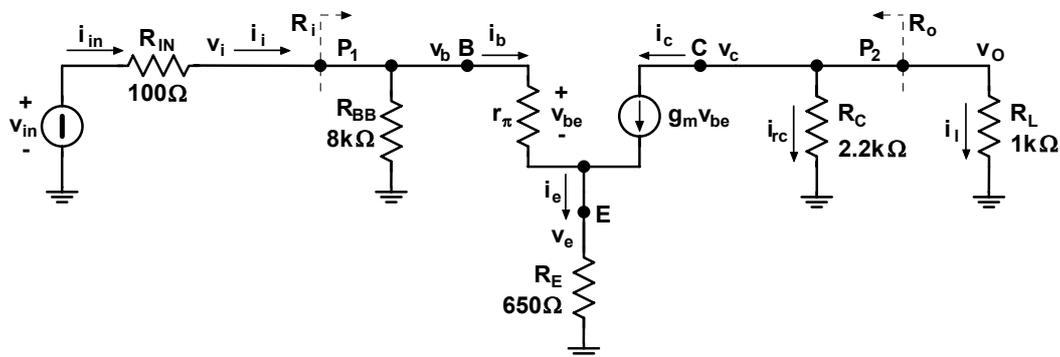


Fig.4. Schema equivalente ai piccoli segnali

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

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1.765 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} = 67.88 \cdot 10^{-3} \text{ Siemens} \quad (14)$$

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

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{67.88 \cdot 10^{-3}} = 1.473 \text{ k}\Omega \quad (15)$$

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'_L le due resistenze in parallelo R_C 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

$$v'_{in} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} = v_{in} \cdot \frac{8 \cdot 10^3}{100 + 8 \cdot 10^3} = v_{in} \cdot 0.988 \quad (16)$$

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}

$$R'_{IN} = (R_{IN} // R_{BB}) = \frac{R_{IN} R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} = \frac{100 \cdot 8 \cdot 10^3}{100 + 8 \cdot 10^3} = 98.77 \text{ }\Omega \quad (17)$$

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

$$R'_L = (R_C // R_L) = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = \frac{2.2 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3}{2.2 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 688 \text{ }\Omega \quad (18)$$

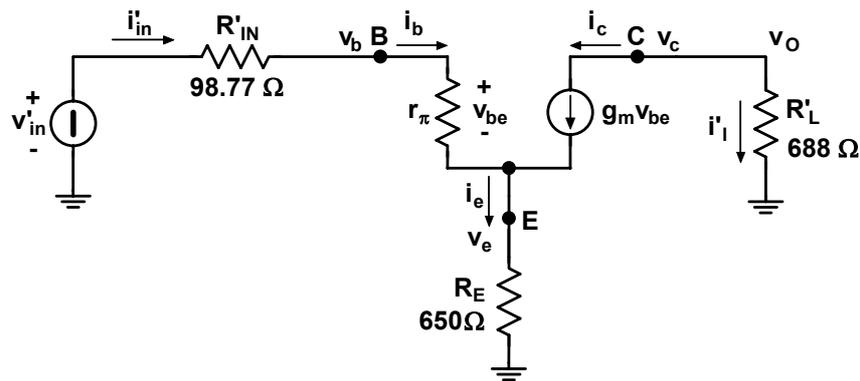


Fig.5. Schema equivalente ai piccoli segnali ridotto

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 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)

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

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

Inoltre, dallo schema si ha

$$v_o = -R'_L i_c = -v'_{in} \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} = -v'_{in} \frac{\beta R'_L}{R'_{IN} + r_{\pi} + (\beta + 1)R_E} \quad (28)$$

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

$$A'_v = \frac{v_o}{v'_{in}} = - \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} = - \frac{g_m R'_L}{1 + \frac{g_m}{\beta} [R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} \approx - \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R_E} \quad (29)$$

dove la semplificazione è valida soprattutto se $\beta \gg 1$. E' da notare che, per la connessione a emettitore comune, l'amplificazione di tensione A'_v è *negativa*.

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

$$A'_v = - \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} = - \frac{67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 688}{100 + 67.88 \cdot 10^{-3} \cdot [98.77 + (100 + 1)650]} = -1.023 \quad (30)$$

Dall'esame del circuito e dalla (22) si vede che la tensione di base v_b può essere espressa da

$$v_b = v_{be} + R_E i_e = v_{be} \left(1 + \frac{\beta + 1}{\beta} g_m R_E \right) = v_{be} \left(1 + \frac{(\beta + 1)R_E}{r_{\pi}} \right) \quad (31)$$

e dalle (31), (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 ad emettitore comune con resistenza in emettitore*. Tenendo conto anche della (15) si ottiene

$$r_b = \frac{v_b}{i_b} = \left[\frac{\beta}{g_m} + (\beta + 1)R_E \right] = [r_{\pi} + (\beta + 1)R_E] = [1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 650] = 67.123 \text{ k}\Omega \quad (32)$$

Si può definire inoltre il rapporto $A'_i = i'_1 / i'_{in}$ 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 (27) si ricava quindi

$$A'_i = \frac{i'_1}{i'_{in}} = \frac{-i_c}{i_b} = -\beta = -100 \quad (33)$$

Anche l'amplificazione A'_i è dunque *negativa*.

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), (33), (32) 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), (28) l'espressione di v'_{in} data dalla (16) si ottiene

$$i_b = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{g_m}{\beta + g_m[R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} \quad (34)$$

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

$$v_{be} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} g_m R'_{IN} + \frac{\beta + 1}{\beta} g_m R_E} \quad (36)$$

$$v_o = -v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + g_m[R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} = v_{in} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot A'_V \quad (37)$$

inoltre, dalla (31) e dalla (36) si ricava

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

In base allo schema di Fig.4 risulta che $v_i = v_b$. Dalle (37) e (38) si ricava quindi l'amplificazione di tensione *relativa allo schema completo*

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_b} = - \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + (\beta + 1)g_m R_E} \quad (39)$$

e introducendo i valori numerici

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + (\beta + 1)g_m R_E} = - \frac{67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 688}{100 + (100 + 1)67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 650} = -1.024 \quad (40)$$

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 (37) si può ricavare

$$A_{vt} = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{R_{BB}}{R_{IN} + R_{BB}} \cdot A'_V = - \frac{8 \cdot 10^3}{100 + 8 \cdot 10^3} \cdot 1.023 = -1.01 \quad (41)$$

Per calcolare l'amplificazione di corrente $A_i = i_i / i_i$ si devono ricavare le espressioni di i_i e di i_i 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 (32)

$$i_i = i_{rbb} + i_b = \frac{v_b}{R_{BB}} + i_b = i_b \left(\frac{r_b}{R_{BB}} + 1 \right) \quad (42)$$

Ancora da Fig.4 si vede che la corrente $i_c = -i_i$ si ripartisce tra le resistenze R_C e R_L . Come è noto, le relative correnti i_{rc} e i_l stanno in proporzione inversa alle resistenze (infatti, $i_{rc} = v_o / R_C$, $i_l = v_o / R_L$ e $i_c = -(i_{rc} + i_l)$). Tenuto conto dei versi, si può dunque scrivere

$$i_l = -i_c \frac{R_C}{R_C + R_L} \quad (43)$$

Dalle (42) e (43), tenendo conto della (33), l'amplificazione di corrente *relativa allo schema completo* risulta

$$A_i = \frac{i_l}{i_i} = \frac{i_l}{-i_c} \cdot \frac{i_b}{i_i} \cdot \frac{-i_c}{i_b} = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{BB} + r_b} \cdot A'_V \quad (44)$$

e introducendo i valori numerici

$$A_i = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{BB} + r_b} \cdot A'_i = \frac{2.2 \cdot 10^3}{2.2 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} \cdot \frac{8 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^3 + 67.123 \cdot 10^3} \cdot (-100) = 7.321 \quad (45)$$

L'amplificazione di potenza risulta perciò

$$A_p = \frac{W_i}{W_i} = \frac{v_o \cdot i_l}{v_i \cdot i_i} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{i_l}{i_i} = A_v \cdot A_i = (-1.024) \cdot (-7.321) = 7.497 \quad (46)$$

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.

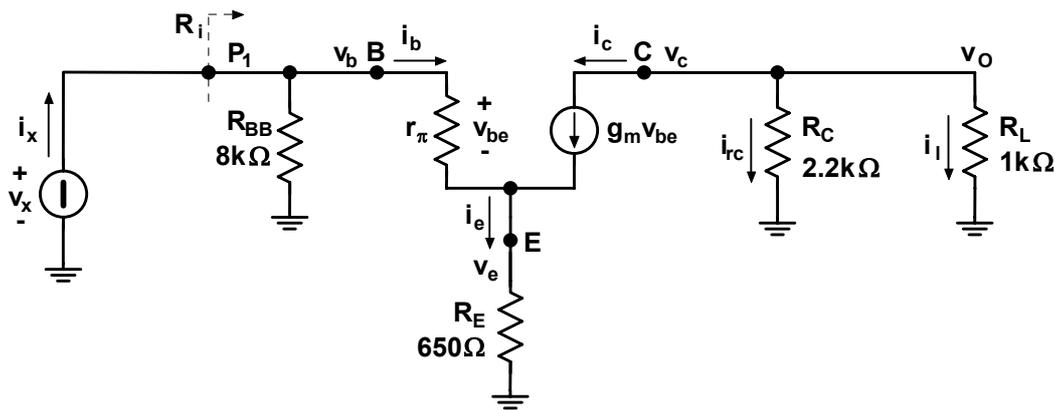


Fig.6. Schema per il calcolo dell'impedenza di ingresso Ri.

Dallo schema, la corrente ix iniettata da vx nel punto P₁ risulta

$$i_x = \frac{v_x}{R_{BB}} + i_b = \frac{v_x}{R_{BB}} + \frac{v_b}{r_b} = v_x \left(\frac{1}{R_{BB}} + \frac{1}{r_b} \right) = v_x \left(\frac{1}{R_{BB}} + \frac{1}{r_\pi + (\beta + 1)R_E} \right) \quad (47)$$

Poiché la resistenza Ri è per definizione Ri = vx/ix si ottiene

$$R_i = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_{BB} [r_\pi + (\beta + 1)R_E]}{R_{BB} + r_\pi + (\beta + 1)R_E} = \frac{8 \cdot 10^3 \cdot [1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 650]}{8 \cdot 10^3 + 1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 650} = 7.148 \text{ k}\Omega \quad (48)$$

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 RL, 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 vx. Si ottiene la configurazione di Fig.7.

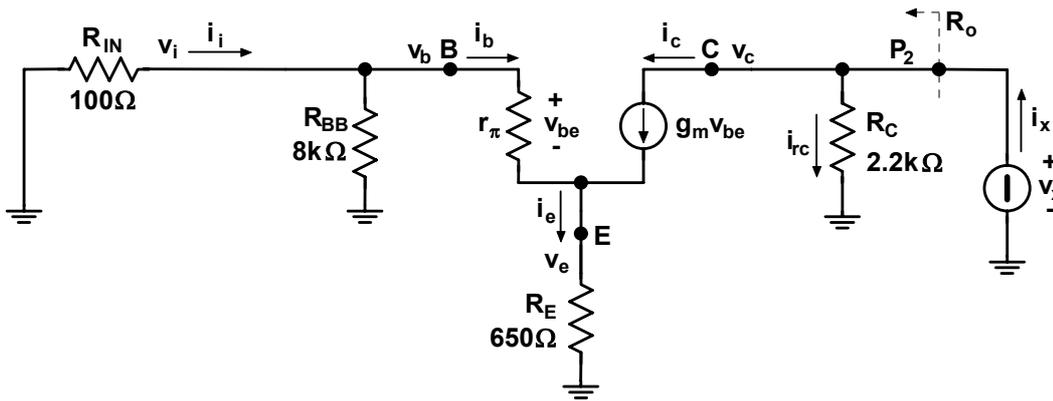


Fig.7. Schema per il calcolo dell'impedenza di uscita R'_o

E' evidente, dallo schema, che $i_x = i_{rc} + i_c$ e che $v_c = v_o = v_x$. Perciò $i_{rc} = v_x / R_C$.

La corrente i_c provocata dalla tensione v_x applicata al collettore è nulla. Infatti, supponendo ad esempio che si abbia una corrente i_c positiva, essa nel nodo di emettitore dovrebbe suddividersi, tra i rami di emettitore e di base, in ragione inversa alle rispettive resistenze equivalenti. Nella base si dovrebbe avere dunque una corrente di verso opposto al verso positivo di i_b indicato in figura, e si dovrebbe provocare quindi una caduta $v_{be} = r_\pi i_b$ negativa. Ma $i_c = g_m v_{be}$ e, poiché si è supposto che $i_c > 0$, dovrebbe essere $v_{be} > 0$, il che è in disaccordo con quanto trovato. Perciò non vi può essere corrente i_c positiva. In modo simile si dimostra che non si può avere i_c negativa causata da v_x .

Si conclude che $i_x = i_{rc} + i_c = i_{rc} = v_x / R_C$. L'impedenza di uscita risulta dunque

$$R_o = \frac{v_x}{i_x} = R_C = 2.2 \text{ k}\Omega \quad (49)$$

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 di tutti i parametri considerati in questo esercizio, tranne che nella determinazione di R_o . Per quest'ultima, soprattutto con valori alti di R_C e R_L , l'espressione di R_o avrebbe incluso anche l'effetto di r_o .

d – condensatore di by-pass in parallelo a R_E

E' interessante valutare come cambiano le amplificazioni dello schema nel caso, abbastanza frequente, che in parallelo a R_E venga connesso un condensatore C_E , come mostrato in Fig.8.

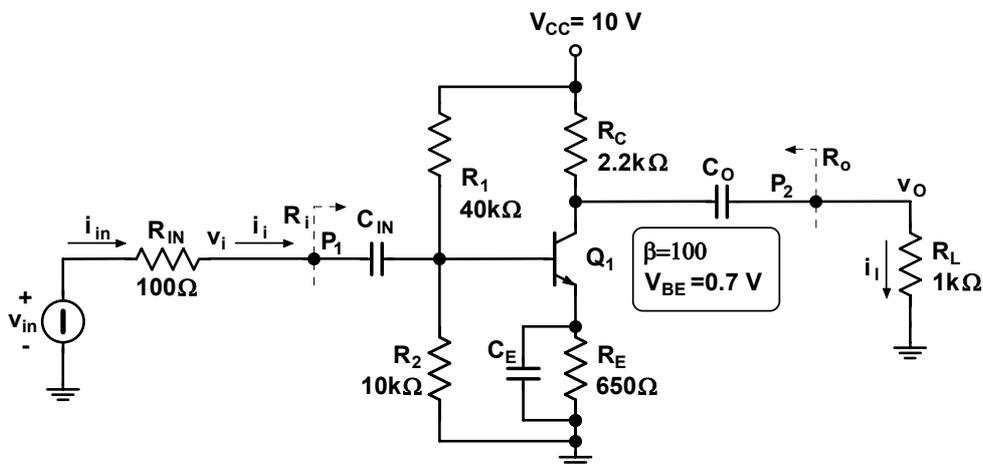


Fig.8. Circuito con transistor BJT connesso a Emittente Comune con resistenza di Emittente avente in parallelo un condensatore di by-pass

Un tale condensatore, come gli altri dello schema, purché di valore adeguato si comporta come un circuito aperto in c. continua e come un corto circuito a media frequenza. Perciò, lo schema ai grandi segnali che si può derivare da Fig.8 è uguale a quello di Fig.3, ricavato nel caso che il condensatore C_E non vi sia. Di conseguenza, il punto di lavoro, ed in particolare la corrente I_C , rimangono gli stessi.

Ai piccoli segnali, la transconduttanza g_m e la resistenza equivalente r_π che, secondo le (14) e (15), sono funzioni di I_C rimangono anch'esse invariate a $g_m=67.88 \cdot 10^{-3}$ Siemens e $r_\pi=1.473 \text{ k}\Omega$.

Invece, nello schema ai piccoli segnali di Fig.4, ed anche in quello ridotto di Fig.5 ed in quelli derivati di Fig.6 e Fig.7, la resistenza R_E risulta cortocircuitata.

Perciò nella (30) che dà l'amplificazione di tensione A'_v relativa allo schema ridotto, la R_E assume valore nullo. Si ha

$$A'_v = -\frac{g_m \beta R'_L}{\beta + g_m [R'_{IN} + (\beta + 1)R_E]} = -\frac{\beta R'_L}{r_\pi + R'_{IN}} = -\frac{67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 688}{100 + 67.88 \cdot 10^{-3} \cdot [98.77 + (100 + 1) \cdot 0]} = -43.77 \quad (50)$$

Analogamente nella (32), che dà la resistenza di ingresso in base del BJT ad emettitore comune con resistenza in emettitore, l'annullamento di R_E dà

$$r_b = [r_\pi + (\beta + 1)R_E] = [1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 0] = r_\pi = 1.473 \text{ k}\Omega \quad (51)$$

L'amplificazione di corrente relativa allo schema ridotto A'_i , come mostra la (33), non dipende da R_E e rimane invariata a $A'_i = -\beta = -100$.

Invece l'amplificazione di tensione relativa allo schema completo A_v , come mostra la (40), diventa

$$A_v = \frac{g_m \beta R'_L}{\beta + (\beta + 1)g_m R_E} = -\frac{67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 688}{100 + (100 + 1)67.88 \cdot 10^{-3} \cdot 0} = g_m R'_L = -46.7 \quad (52)$$

L'amplificazione di corrente relativa allo schema completo A_i , come mostra la (45), varia essendo variata la r_b e diventa

$$A_i = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_{BB}}{R_{BB} + r_b} \cdot A'_i = \frac{2.2 \cdot 10^3}{2.2 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} \cdot \frac{8 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^3 + 1.473 \cdot 10^3} \cdot (-100) = 58.06 \quad (53)$$

L'amplificazione di potenza, data dalla (46), diventa

$$A_p = \frac{W_o}{W_i} = A_v \cdot A_i = (-46.7) \cdot (-58.06) = 2711 \quad (54)$$

La resistenza di ingresso, data dalla (48), diventa

$$R_i = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_{BB} [r_\pi + (\beta + 1)R_E]}{R_{BB} + r_\pi + (\beta + 1)R_E} = \frac{8 \cdot 10^3 \cdot [1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 0]}{8 \cdot 10^3 + 1.473 \cdot 10^3 + (100 + 1) \cdot 0} = 1.244 \text{ k}\Omega \quad (55)$$

Invece, come si può constatare dalle espressioni (42) di R_i e (49) di R_o , poiché in tali espressioni non figura R_E , le resistenze di ingresso e di uscita rimangono invariate.