

---

# Amplificatori a singolo Transistor: altre configurazioni elementari

# Amplificatori elementari

---

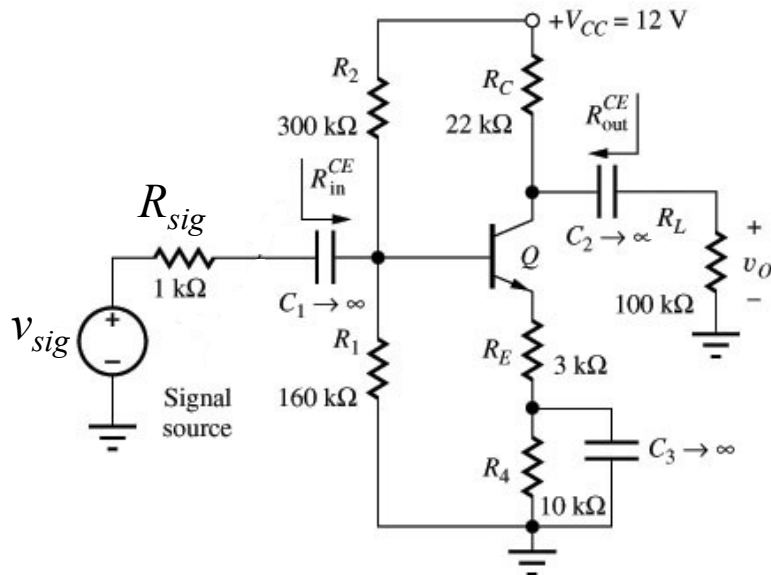
Oltre ai circuiti ad Emittitore Comune ed a Source Comune, esistono altre versioni di amplificatori elementari, a singolo transistor.

Nel seguito ci focalizzeremo sullo studio degli amplificatori basati su BJT; i risultati tuttavia si estendono con facilità ai circuiti con MOS.

---

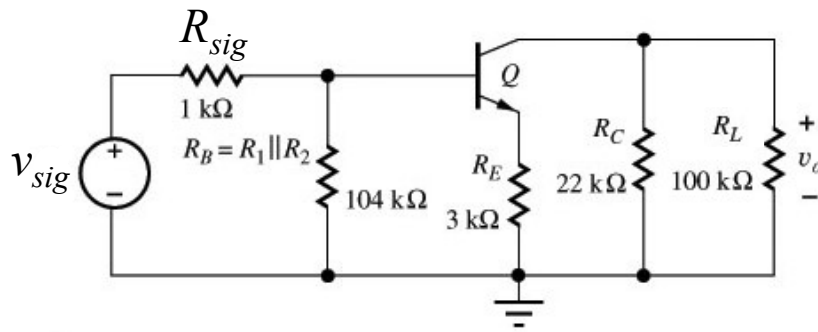
# Amplificatore ad Emettitore Comune con resistenza sull'emettitore

# Amplificatore C-E con resistenza sull'emettitore

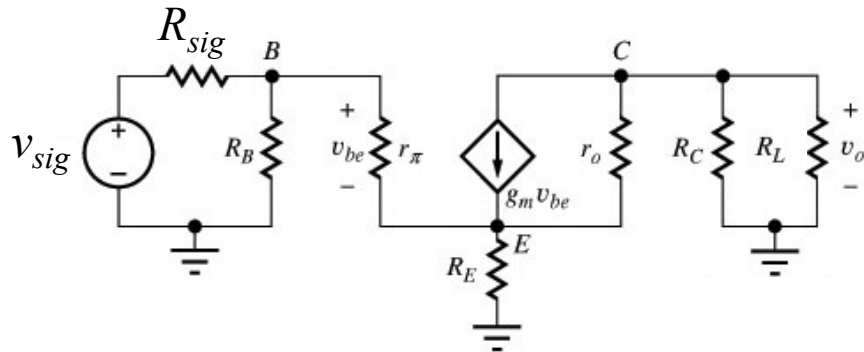


Il circuito mostrato a destra mostra una variante dell'amplificatore ad emettitore comune, in cui **la resistenza  $R_E$  non è bypassata da un condensatore.**

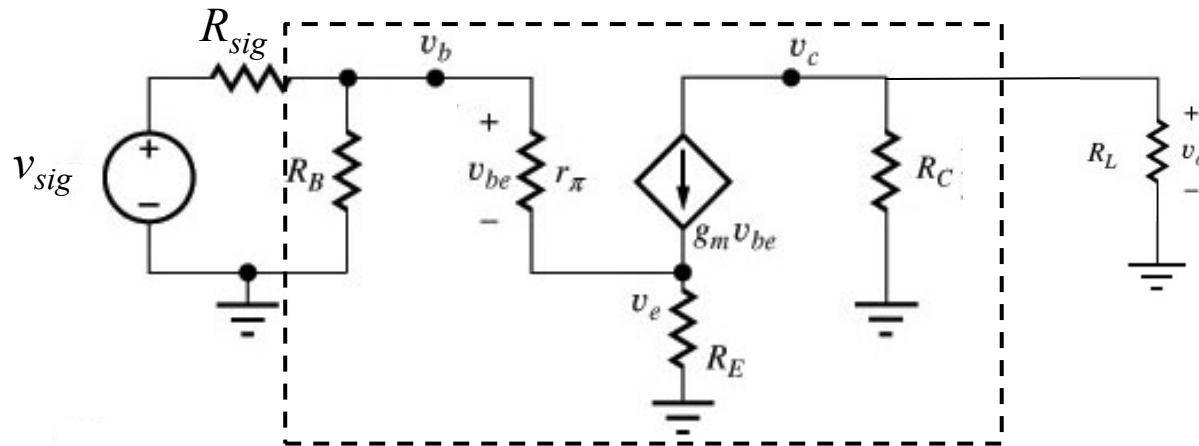
*Ritroviamo pertanto questa resistenza nel circuito a piccoli segnali, mostrato nella Figura in basso. Come vedremo, la  $R_E$  modifica significativamente le caratteristiche del circuito.*



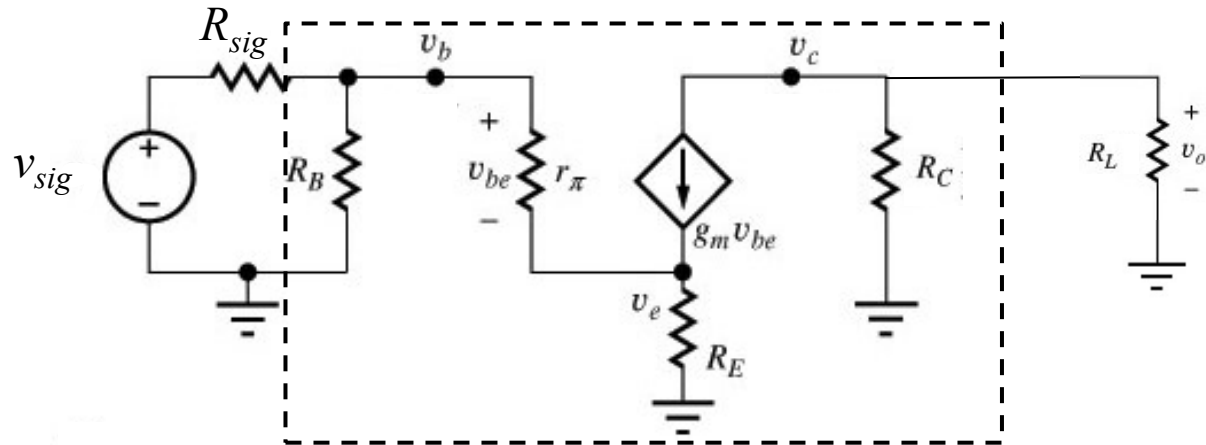
# Circuito per piccoli segnali



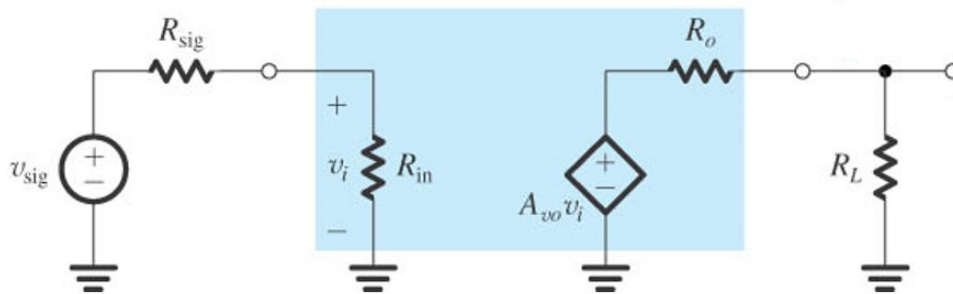
Semplifichiamo il circuito trascurando  $r_o$



# Circuito per piccoli segnali



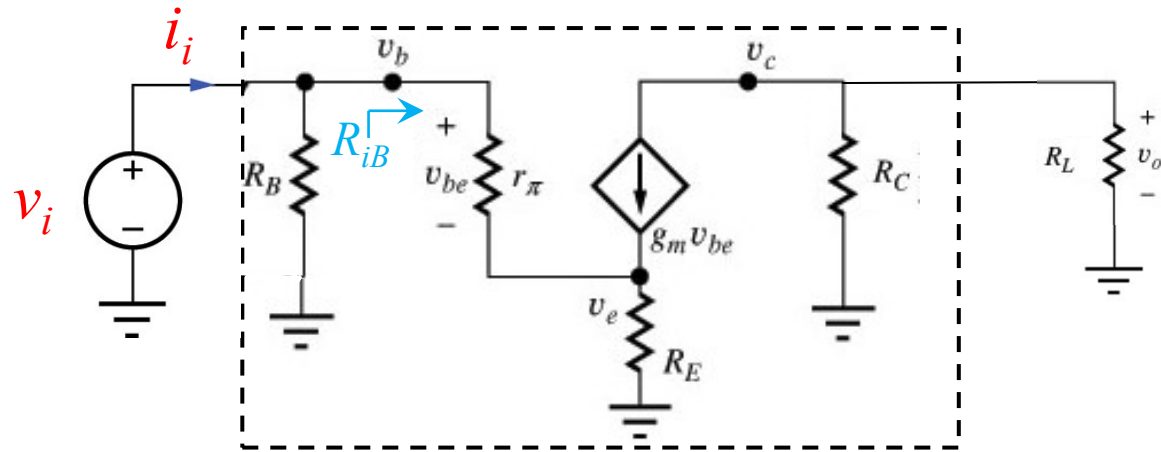
Dobbiamo ora ricondurre l'amplificatore allo schema :



I parametri da calcolare sono:

- La resistenza di ingresso,  $R_{in}$
- La resistenza di uscita,  $R_o$
- Il guadagno di tensione "a vuoto",  $A_{vo}$

# Resistenza di ingresso

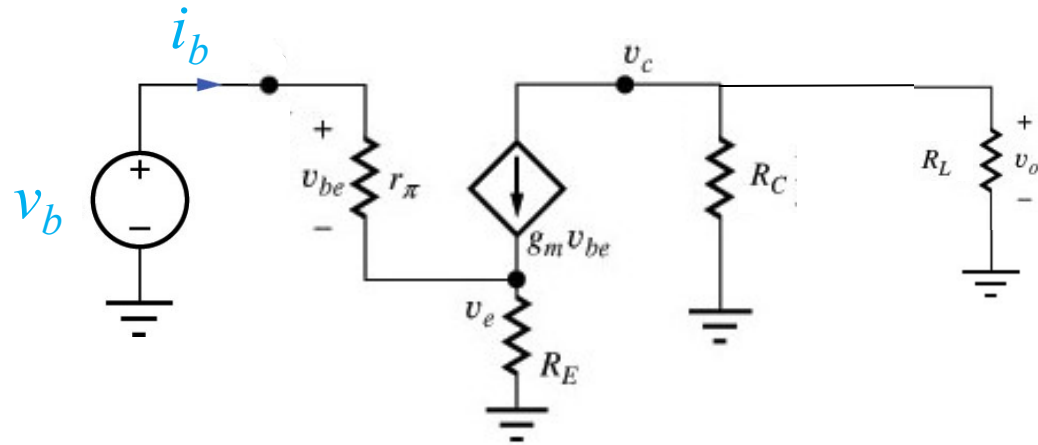


La resistenza d'ingresso è data dal parallelo di  $R_B$  e di ciò che si osserva "guardando" nel terminale di base.

Chiamando  $R_{iB}$  questo secondo contributo si può scrivere:  $R_{in} = R_B \parallel R_{iB}$

# Resistenza di ingresso

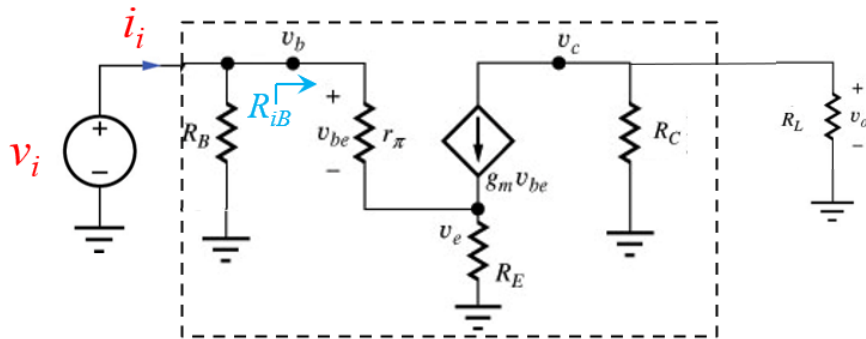
---



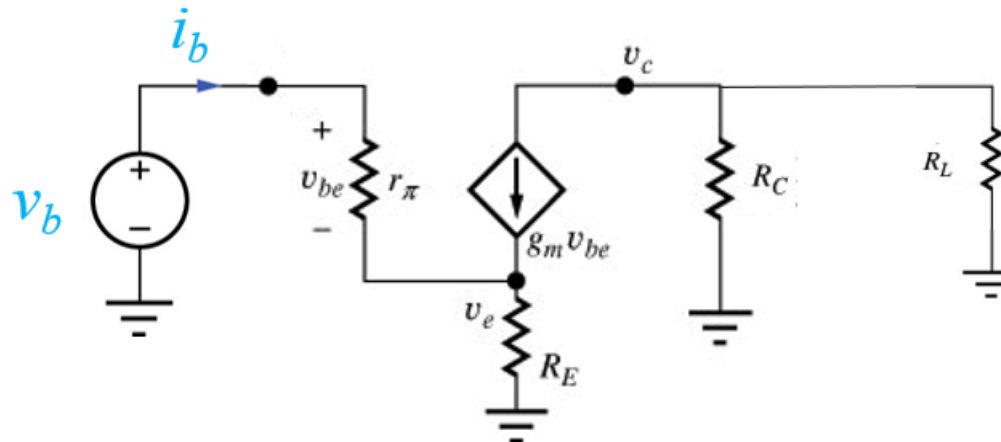
La resistenza d'ingresso è data dal parallelo di  $R_B$  e di ciò che si osserva "guardando" nel terminale di base.

Chiamando  $R_{iB}$  questo secondo contributo si può scrivere:  $R_{in} = R_B \parallel R_{iB}$

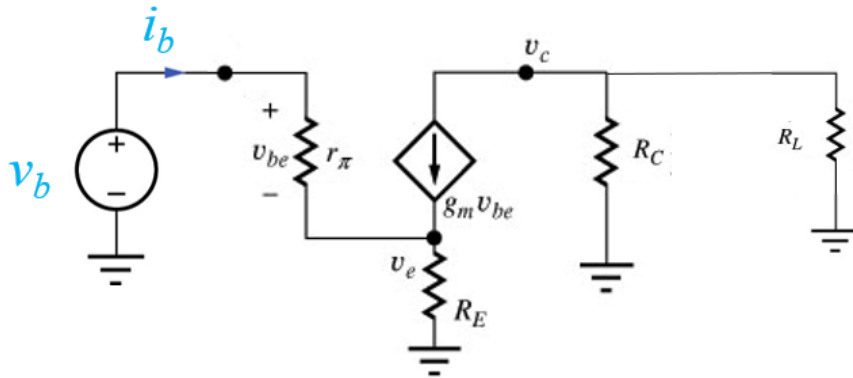
# Resistenza di ingresso



Per il calcolo di  $R_{iB}$  ci aiutiamo con la Figura sottostante, in cui applichiamo una tensione di test,  $v_b$ , e calcoliamo la corrente  $i_b$ :



# Resistenza di ingresso



$$v_{be} = r_{\pi} i_b$$

$$v_e = (i_b + g_m v_{be}) R_E = i_b (1 + g_m r_{\pi}) R_E$$

da cui:

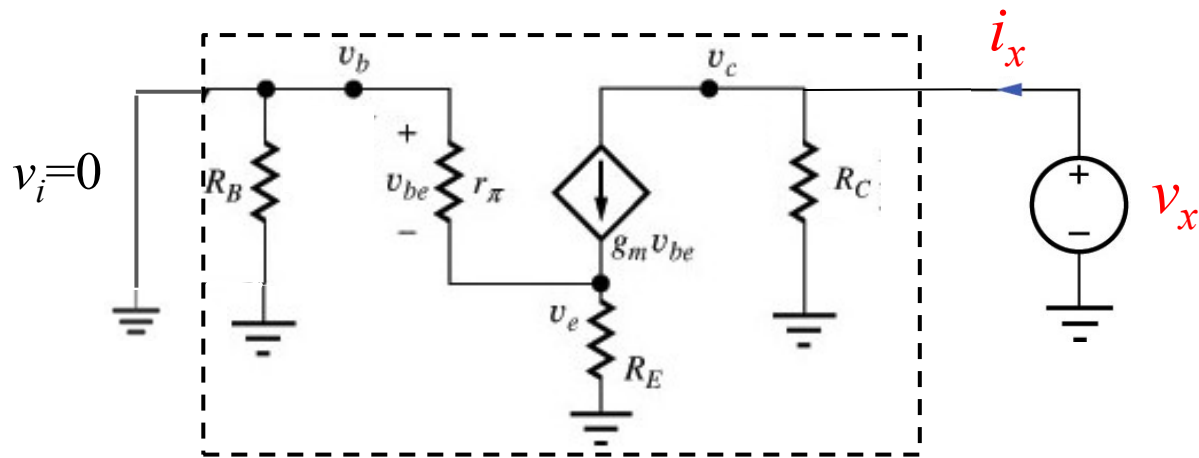
$$v_b = v_{be} + v_e = i_b [r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_E]$$

$$R_{ib} = \frac{v_b}{i_b} = r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_E$$

ricordando che:  $\beta = g_m r_{\pi}$  si ha:  $R_{ib} = \frac{v_b}{i_b} = r_{\pi} + (1 + \beta) R_E$

La resistenza in serie all'emettitore aumenta la resistenza di ingresso.

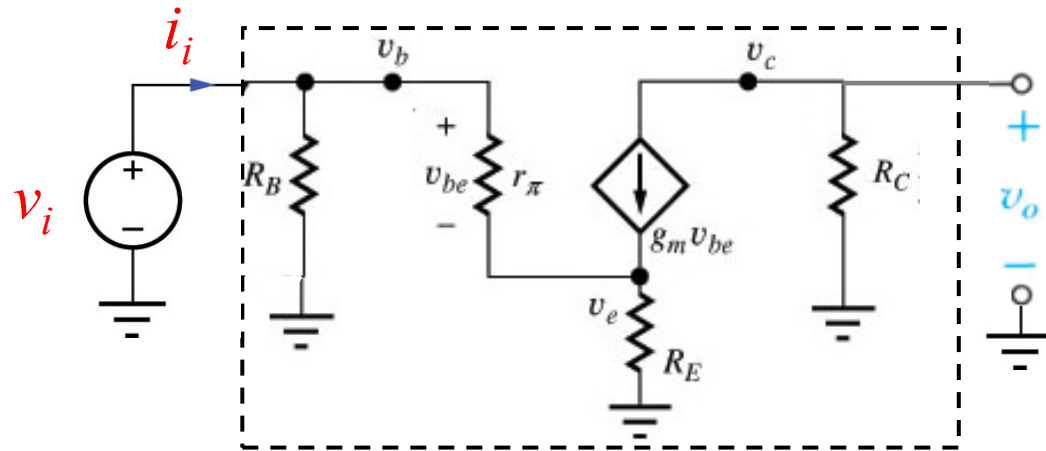
# Resistenza di uscita



La resistenza d'uscita si ottiene spegnendo il segnale di ingresso  $v_i$  e guardando nei morsetti di uscita dell'amplificatore.

Il generatore controllato si spegne e si ha subito:  $R_o = R_C$

# Calcolo del guadagno di tensione "a vuoto"



$$v_o = -g_m v_{be} R_C$$

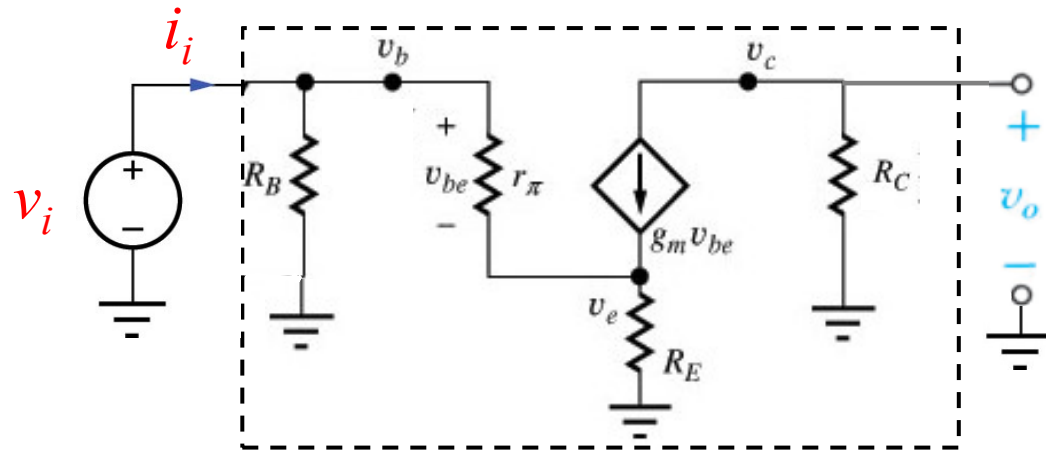
Per esprimere  $v_{be}$  sfruttiamo i calcoli già svolti per la resistenza di ingresso:

$$v_{be} = r_\pi i_b$$

$$i_b = v_i / R_{iB} = v_i / [r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E]$$

$$v_{be} = \frac{r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} v_i$$

# Calcolo del guadagno di tensione "a vuoto"



$$v_o = -g_m v_{be} R_C; \quad v_{be} = \frac{r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} v_i$$

$$A_{vo} = \frac{v_o}{v_i} = -g_m r_\pi \frac{R_C}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

Poiché  $g_m r_\pi = \beta \gg 1$ , risulta:  $A_{vo} \approx -R_C / R_E$

Il **guadagno si riduce** rispetto alla configurazione ad emettitore comune, ma diviene **poco dipendente dai parametri del dispositivo**

# Guadagno complessivo

---

$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel \left[ r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E \right]$$

$$R_o = R_C$$

$$A_{vo} = -g_m r_\pi \frac{R_C}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

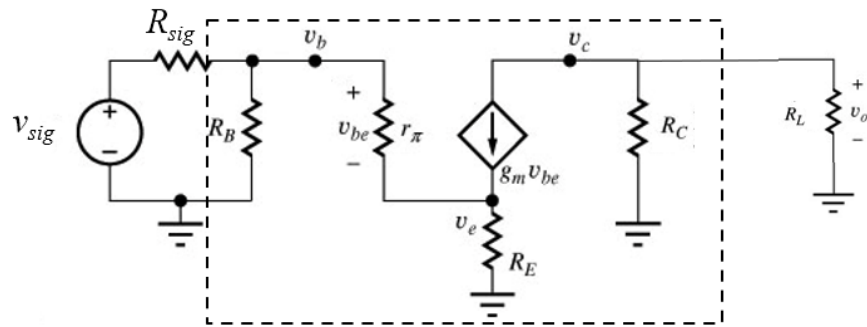
$$A_V = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

Assumendo  $R_{in} \gg R_{sig}$  si ha infine:

$$A_V = -g_m r_\pi \frac{R_C}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} \frac{R_L}{R_C + R_L} \simeq -\frac{R_C \parallel R_L}{R_E}$$

---

# Risultati dell'analisi



$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel \left[ r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E \right]$$

$$R_o = R_C$$

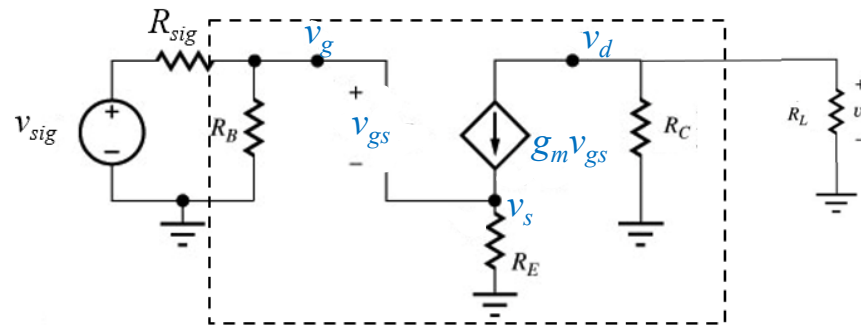
$$A_{vo} \simeq -\frac{R_C}{R_E}$$

$$A_V \simeq -\frac{R_C \parallel R_L}{R_E}$$

- Resistenza di ingresso elevata
- Guadagno di tensione ridotto rispetto alla configurazione ad emettitore, ma poco dipendente dai parametri del dispositivo

# Versione MOS

Valgono tutti i risultati ottenuti in precedenza, ponendo  $r_{\pi} \rightarrow \infty$



$$R_{in} = R_B \quad (R_{ib} \rightarrow \infty)$$

$$R_o = R_C$$

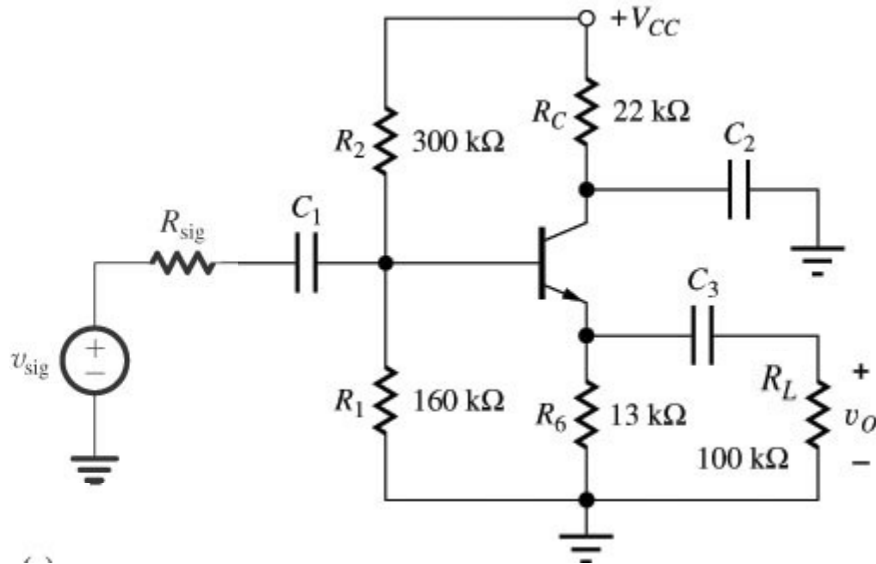
$$A_{vo} \simeq -\frac{R_C}{R_E}$$

$$A_V \simeq -\frac{R_C \parallel R_L}{R_E}$$

---

# Amplificatore a collettore (source) comune

# Amplificatore a Collettore Comune



L'ingresso è applicato sulla base, mentre l'uscita è prelevata sull'emettitore.

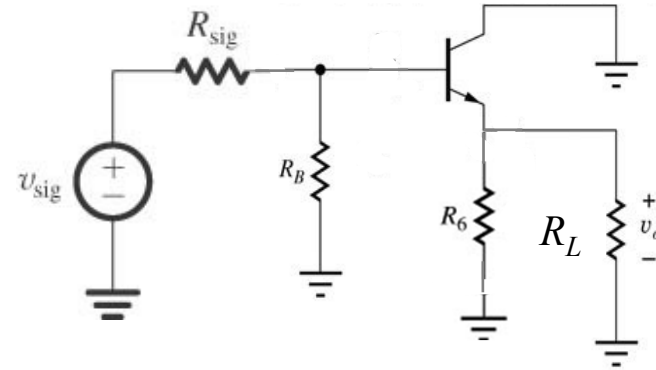
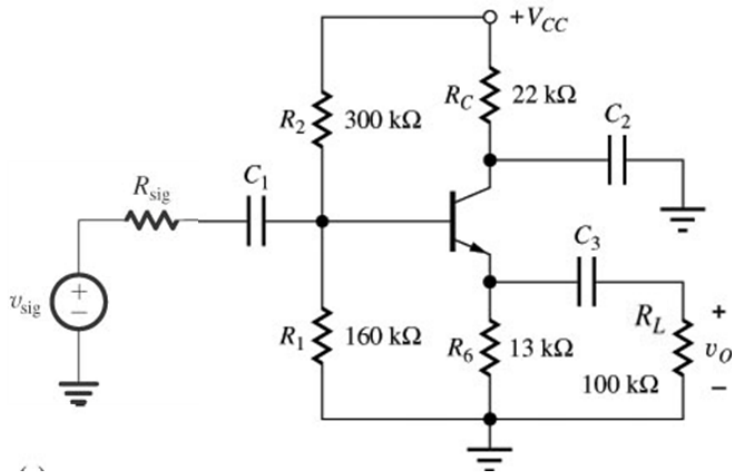
La rete di polarizzazione è la stessa del circuito ad emettitore comune: cambia solo il punto in cui preleviamo l'uscita.

Nel circuito AC il collettore è a massa (grazie al condensatore  $C_2$ ).

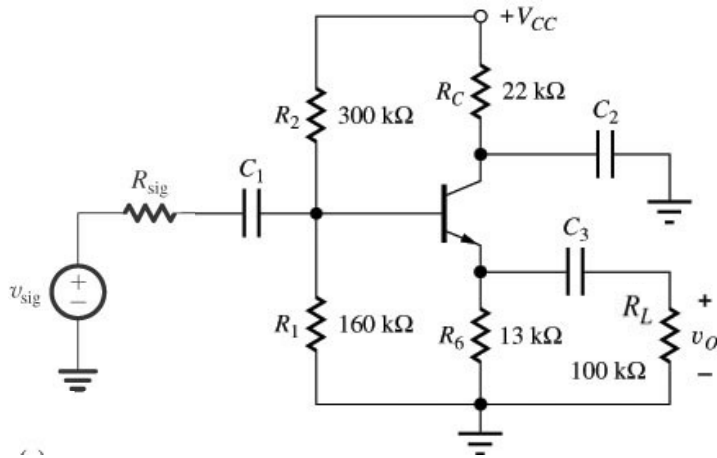
Per le componenti dinamiche, il collettore è dunque collegato al terminale comune, da cui il nome di configurazione a **collettore comune**.

# Analisi configurazione Collettore Comune(C-C)

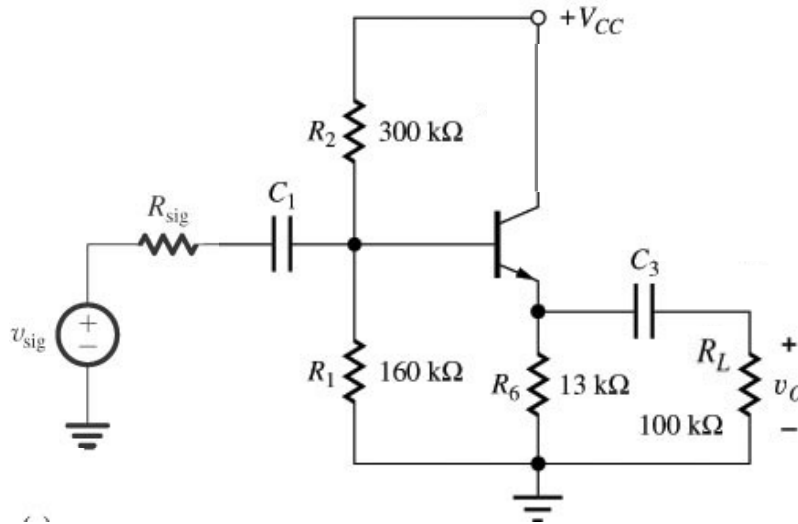
## Circuito ac equivalente



# Amplificatore a Collettore Comune

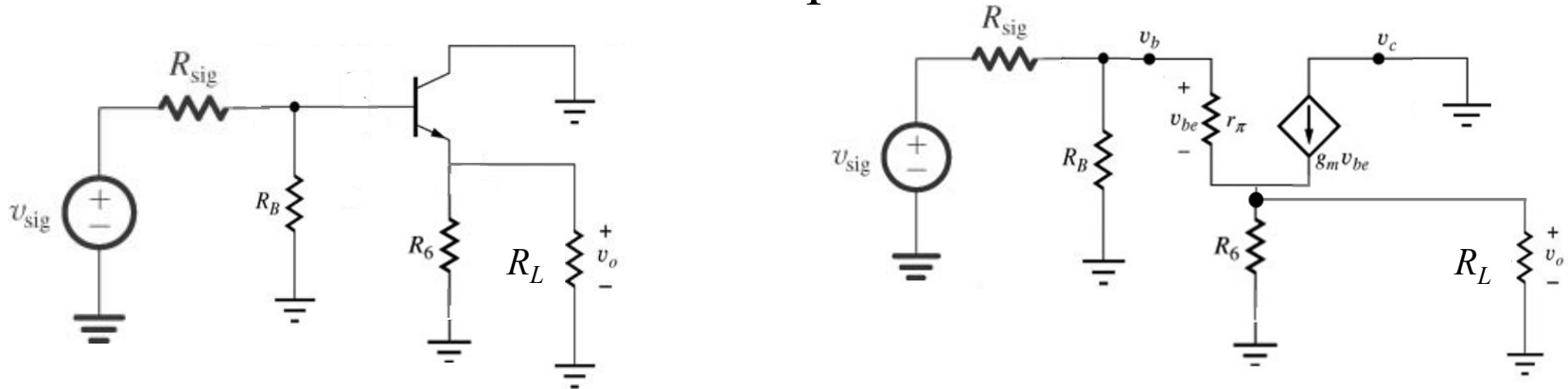


Si noti che la resistenza  $R_C$  è cortocircuitata nel circuito per piccoli segnali. Poiché questa resistenza non è indispensabile per una corretta polarizzazione del transistor essa può essere omessa del tutto. Si ottiene così lo schema semplificato in basso:



# Analisi configurazione Collettore Comune(C-C)

## Circuito ac equivalente

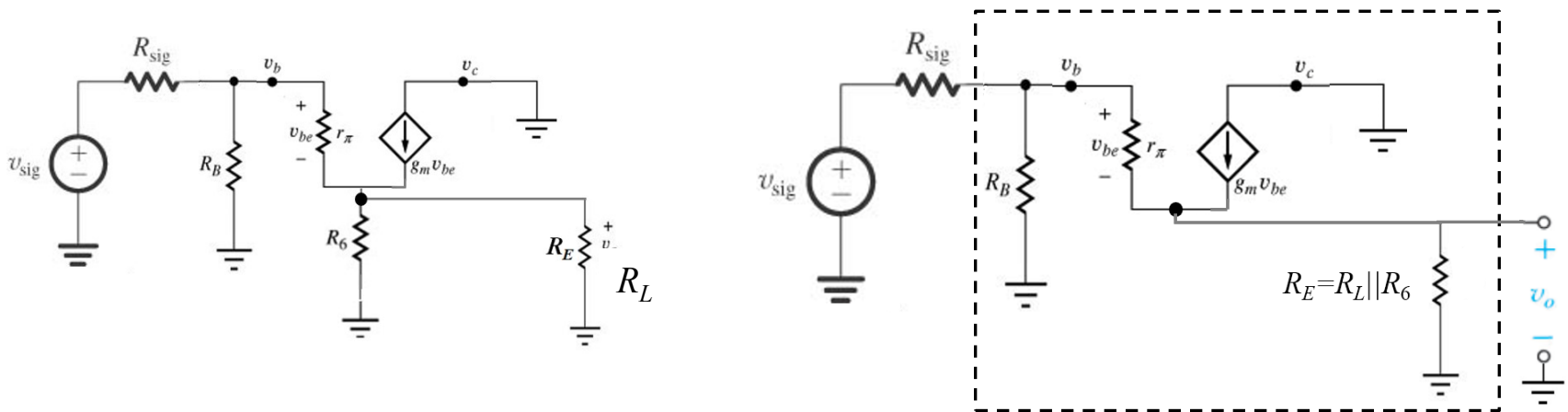


Questo circuito non rientra esattamente nello schema generale di amplificatore finora considerato. Il circuito non è infatti "unidirezionale": il segnale può propagarsi dall'ingresso all'uscita *ma anche in direzione opposta*, cosa non prevista nel nostro modello di amplificatore.

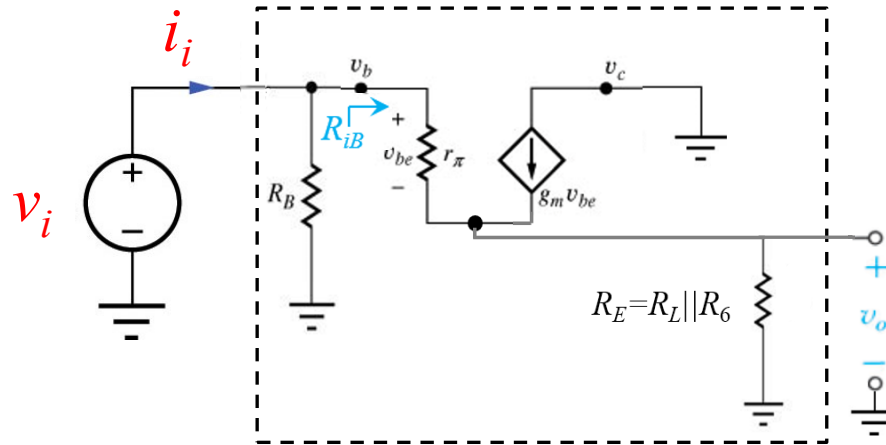
A causa di questo fenomeno vedremo che la resistenza di ingresso  $R_{in}$  sarà dipendente dal carico in uscita  $R_L$ , la resistenza di uscita  $R_o$  sarà dipendente dalla resistenza equivalente del generatore di ingresso  $R_{sig}$  ecc.

# Analisi configurazione Collettore Comune(C-C)

Per semplificare l'analisi, incorporiamo la resistenza di carico  $R_L$  nell'amplificatore, ponendo  $R_E = R_6 || R_L$



# Resistenza di ingresso



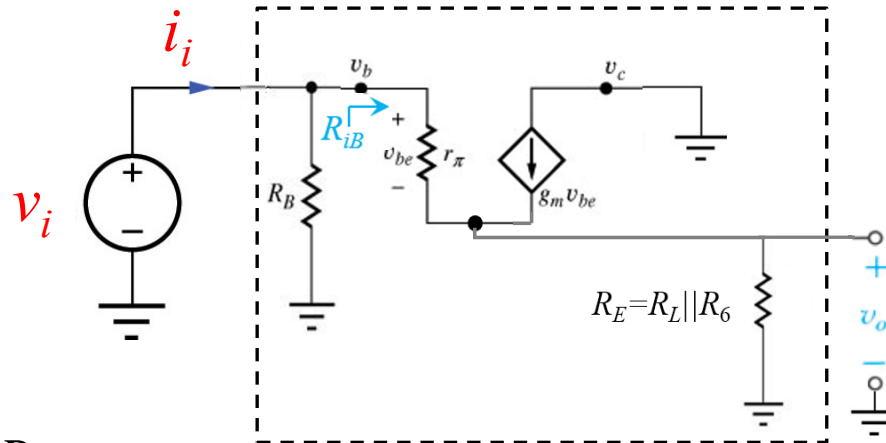
La resistenza d'ingresso è data dal parallelo di  $R_B$  e di ciò che si osserva "guardando" nel terminale di base.

Chiamando  $R_{iB}$  questo secondo contributo (come in precedenza) si può scrivere:  $R_{in} = R_B \parallel R_{iB}$ , dove:  $R_{iB} = r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E$

ricordando che:  $\beta = g_m r_\pi$  si ha:  $R_{iB} = r_\pi + (1 + \beta) R_E$

$$R_{in} = R_B \parallel R_{iB} = R_B \parallel \left[ r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E \right]$$

# Calcolo del guadagno di tensione "a vuoto"



$$v_o = +g_m v_{be} R_E$$

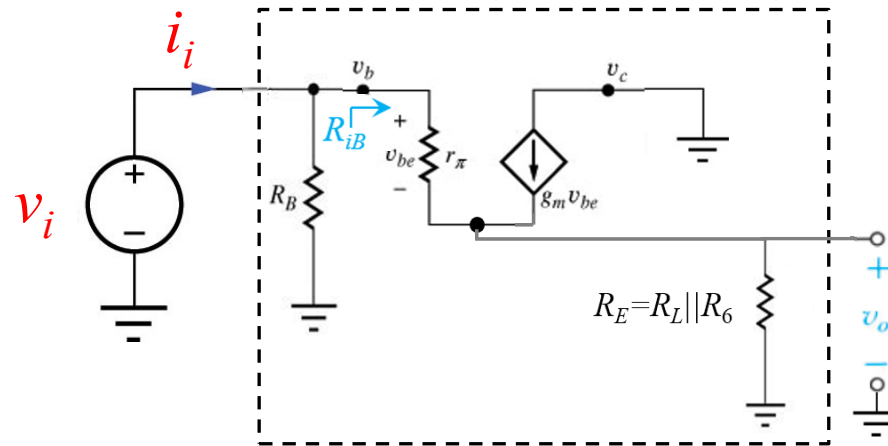
Per esprimere  $v_{be}$  sfruttiamo i calcoli già svolti per la resistenza di ingresso:

$$v_{be} = r_\pi i_b$$

$$i_b = v_i / R_{iB} = v_i / [r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E]$$

$$v_{be} = \frac{r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} v_i$$

# Calcolo del guadagno di tensione "a vuoto"



$$v_o = g_m v_{be} R_E; \quad v_{be} = \frac{r_\pi}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E} v_i$$

$$A_{vo} = \frac{v_o}{v_i} = g_m r_\pi \frac{R_E}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

Poiché  $g_m r_\pi = \beta \gg 1$ , risulta:  $A_{vo} \approx \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} \approx 1$

Il **guadagno è all'incirca unitario** (è di poco minore di 1). La tensione di uscita segue quella di ingresso (da cui il nome di circuito *inseguitore*)

# Guadagno complessivo

---

$$R_{in} = R_B \parallel R_{ib} = R_B \parallel \left[ r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E \right]$$

$$A_{vo} = -g_m r_\pi \frac{R_E}{r_\pi + (1 + g_m r_\pi) R_E}$$

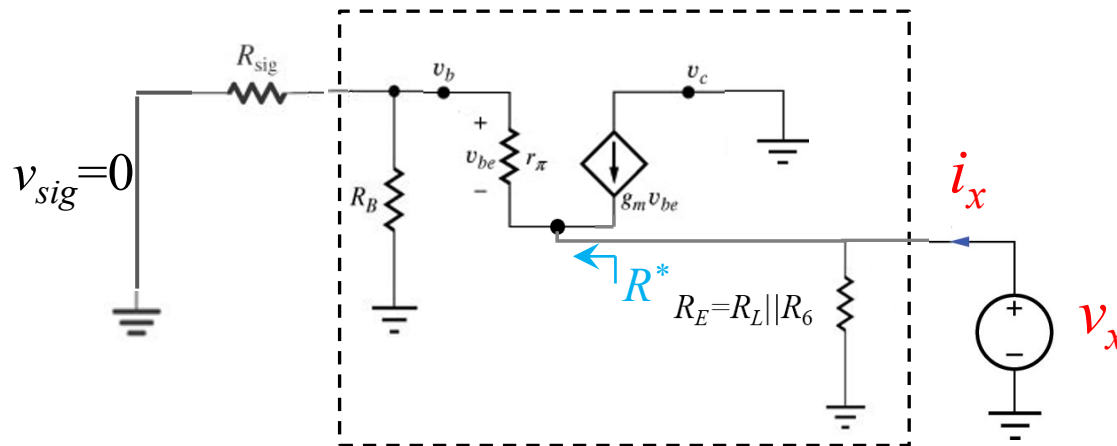
$$A_V = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} A_{vo}$$

(ricordiamo che gli effetti di  $R_L$  sono inclusi nel calcolo di  $A_{vo}$  ed  $R_{in}$ )

Assumendo  $R_{in} \gg R_{sig}$  si ha infine:

$$A_V \simeq A_{vo} \simeq \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} \approx 1$$

# Resistenza di uscita



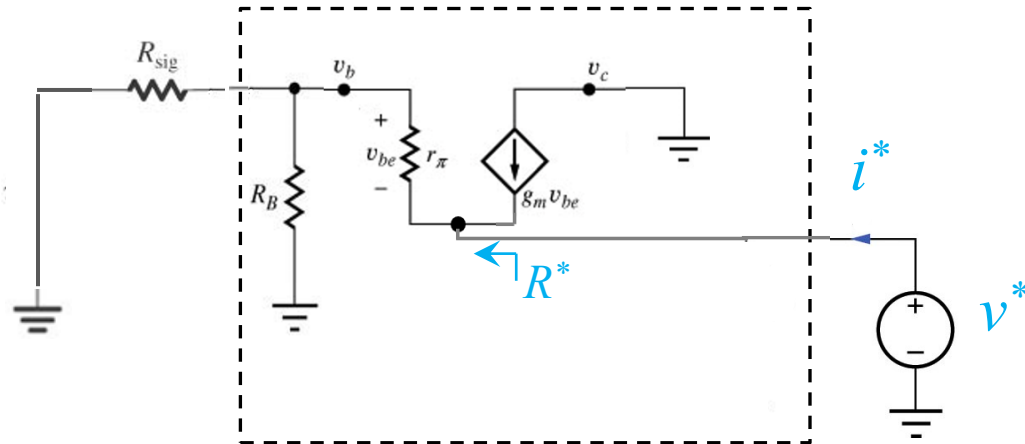
La resistenza d'uscita si ottiene spegnendo il segnale di ingresso  $v_{sig}$  e guardando nei morsetti di uscita dell'amplificatore (notare che in questo caso la resistenza  $R_{sig}$  deve essere inclusa nell'analisi).

Il generatore controllato NON SI SPEGNE in quanto il generatore  $v_x$  produce una  $v_{be} \neq 0$ .

La resistenza d'uscita è data dal parallelo di  $R_E$  e della resistenza  $R^*$  che si osserva "guardando" nel terminale di emettitore:

$$R_o = R_E \parallel R^*$$

# Calcolo di $R^*$



$$R^* = v^* / i^*$$

$$i^* = -g_m v_{be} - v_{be} / r_\pi$$

La  $v_{be}$  può essere calcolata tramite un partitore di tensione fra  $r_\pi$  ed il parallelo di  $R_{sig}$  ed  $R_B$ . Posto dunque  $R_{eq} = R_{sig} || R_B$  si ha:

$$v_{be} = -v^* \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{eq}}$$

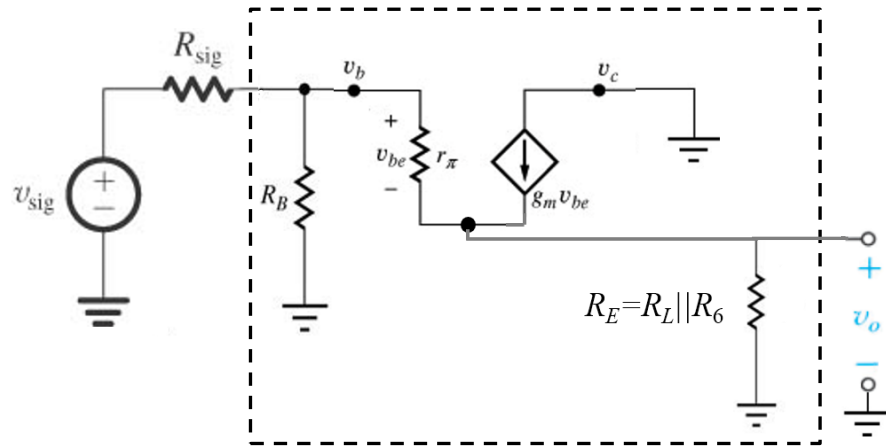
$$i^* = \left( g_m + \frac{1}{r_\pi} \right) \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{eq}} v^* = \frac{1 + g_m r_\pi}{r_\pi + R_{eq}} v^*$$

$$R^* = \frac{r_\pi + R_{eq}}{1 + g_m r_\pi} = \frac{r_\pi + R_{eq}}{1 + \beta}$$

La resistenza d'uscita è molto bassa

Sedra: 5.143; 5.144

# Configurazione Collettore Comune - risultati



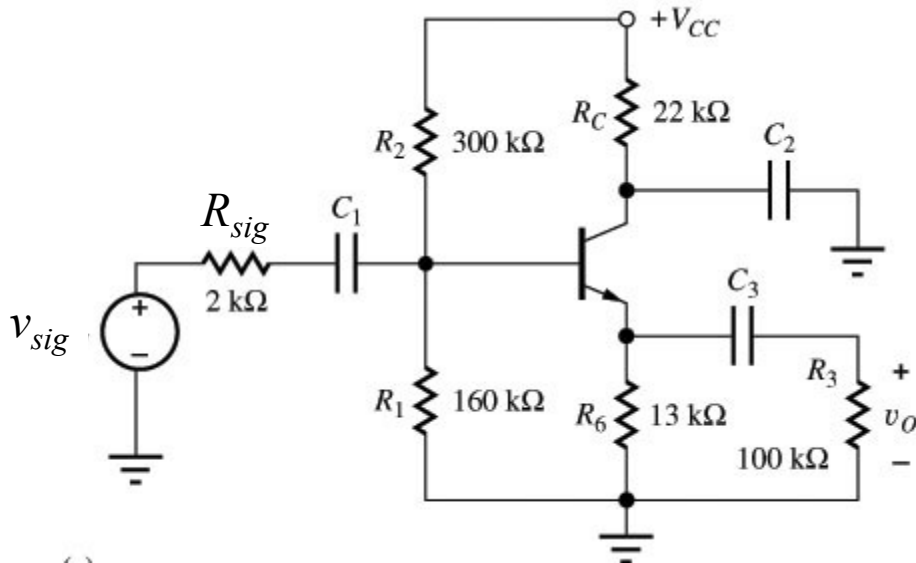
$$R_{in} = R_B \parallel R_{iB} = R_B \parallel \left[ r_{\pi} + (1 + g_m r_{\pi}) R_E r_{\pi} \right]$$

$$A_V \approx A_{v_o} \approx \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} \approx 1$$

$$R_o = R_B \parallel \left[ \frac{r_{\pi} + R_{eq}}{1 + g_m r_{\pi}} \right]$$

- Resistenza di ingresso elevata
- Guadagno all'incirca unitario
- Resistenza di uscita ridotta

# Esempio numerico



Calcolo del punto Q  
e dei parametri a  
piccolo segnale.

$$V_{CC}=12V; \beta_F=100;$$
$$V_A=50V$$

$$I_C \approx 0.25mA;$$

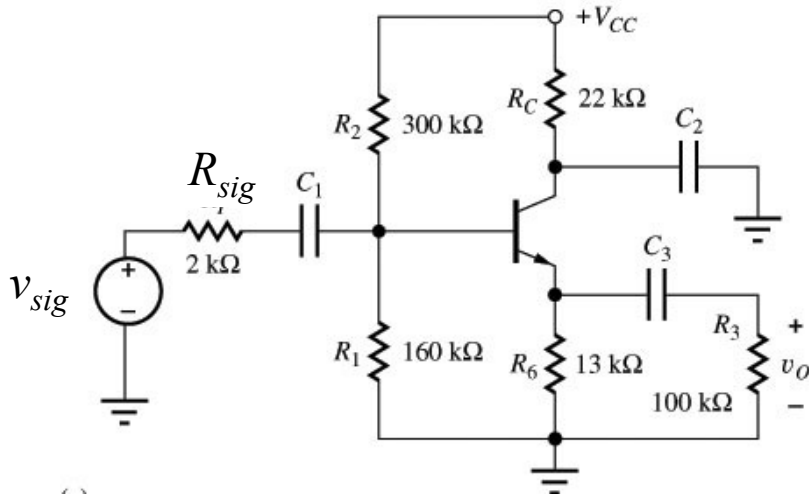
$$V_{CE} \approx 3.25V;$$

$$g_M \approx 10mS;$$

$$r_\pi \approx 10k\Omega;$$

$$r_o \approx 200k\Omega;$$

# Esempio (continua)



$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 104 \text{ k}\Omega$$

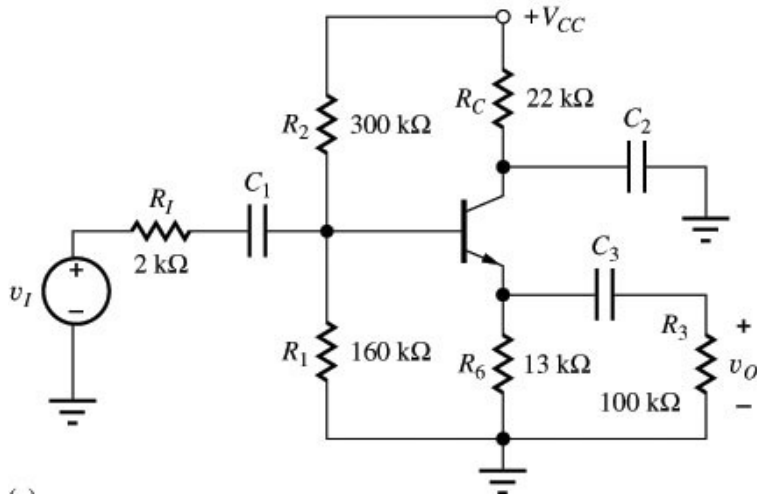
$$R_E = R_3 \parallel R_6 = 11.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{iB} = r_{\pi} (1 + g_m R_E) = 10 \text{ k}\Omega [1 + 10 \text{ mS} (11.5 \text{ k}\Omega)] \approx 1.16 \text{ M}\Omega$$

$$A_o \cong \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} = \frac{10 \text{ mS} (11.5 \text{ k}\Omega)}{1 + 10 \text{ mS} (11.5 \text{ k}\Omega)} = 0.991$$

$$A_v = A_o \left[ \frac{R_B \parallel R_{iB}}{R_{sig} + (R_B \parallel R_{iB})} \right] = 0.956$$

# Esempio (continua)

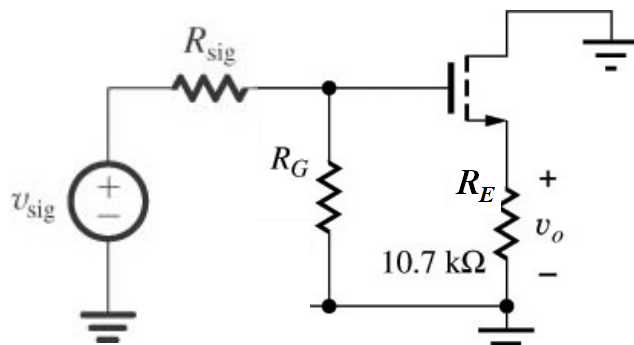
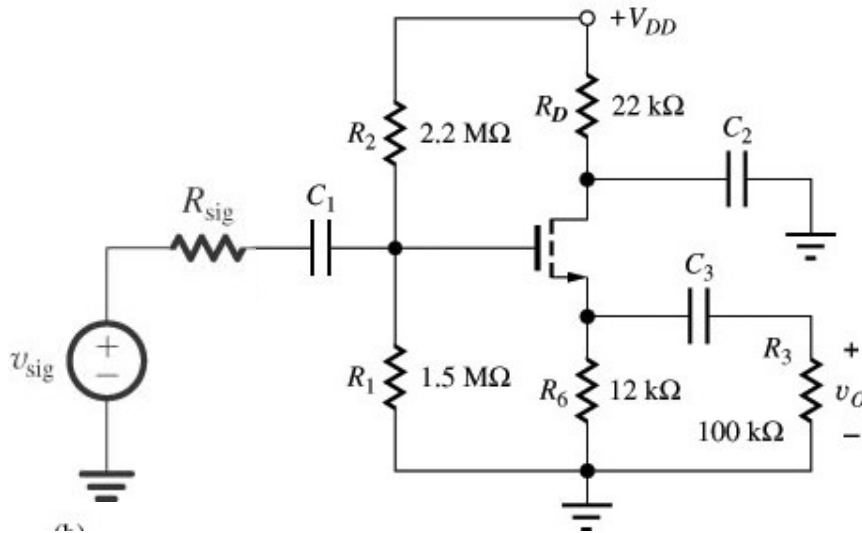


$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 104 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = R_3 \parallel R_6 = 11.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_E \parallel R^* = R_E \parallel \left( \frac{r_\pi + R_{eq}}{\beta + 1} \right) = 121 \Omega$$

# Amplificatore a Drain Comune (C-D)



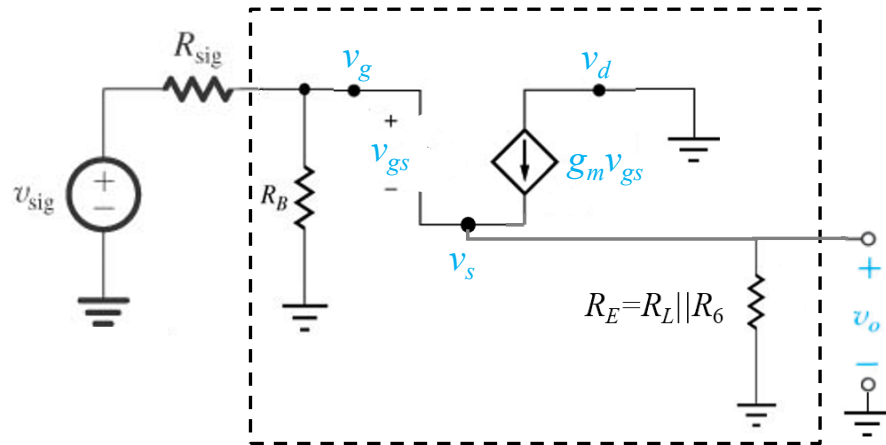
L'ingresso è applicato sulla gate.

L'uscita è prelevata sul source

Il drain nel modello AC è comune fra ingresso ed uscita.

La rete di polarizzazione è la stessa del circuito CE: cambia solo il punto in cui preleviamo l'uscita.

# Analisi configurazione Drain Comune(C-C)



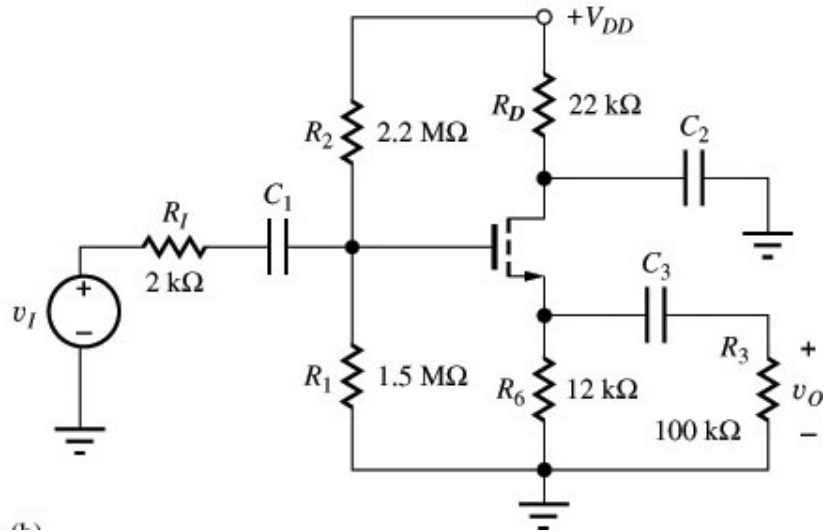
Del tutto analoga alla configurazione a collettore comune. Bisogna solo osservare che  $r_{\pi} \rightarrow \infty$

$$R_{in} = R_B$$

$$A_V \approx A_{vo} \approx \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} \approx 1$$

$$R_o = R_B \parallel \left[ \frac{1}{g_m} \right]$$

# Esempio di amplificatore a Drain Comune



Calcolo del punto Q  
e dei parametri a  
piccolo segnale.

$$V_{DD} = 12V;$$

$$k_n = 500 \mu A/V^2;$$

$$V_T = 1V; \lambda = 0.02 V^{-1}$$

$$V_{GS} - V_T \approx 1V;$$

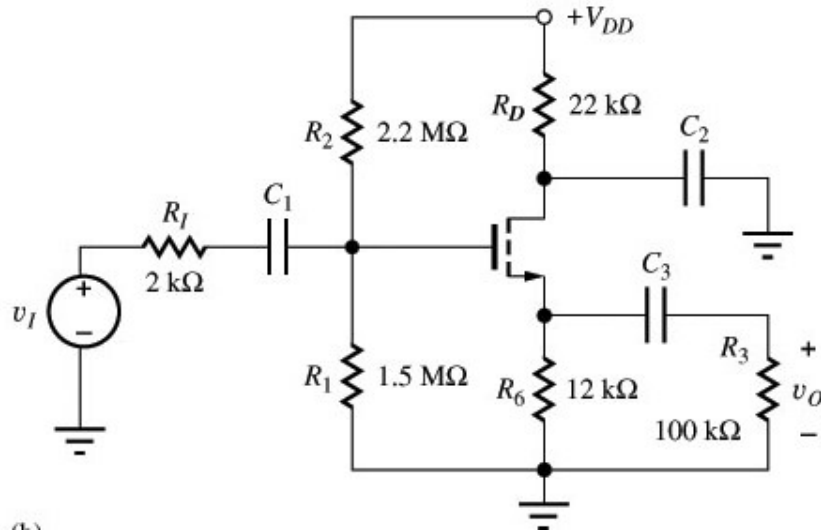
$$I_D \approx 0.25mA;$$

$$V_{DS} \approx 3.75V;$$

$$g_M \approx 0.5mS;$$

$$r_O \approx 200k\Omega;$$

# Esempio (continua)



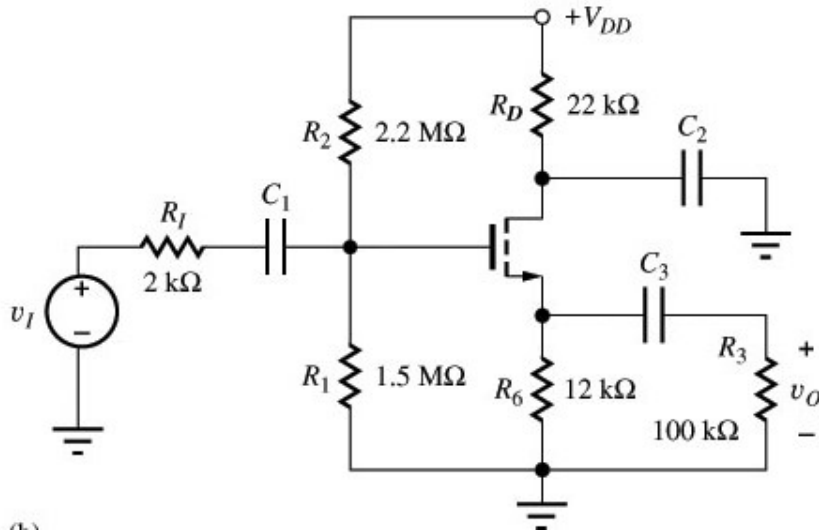
$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 892 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = R_3 \parallel R_6 = 10.7 \text{ k}\Omega$$

$$A_O = \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} = \frac{(0.5 \text{ mS})(10.7 \text{ k}\Omega)}{1 + (0.5 \text{ mS})(10.7 \text{ k}\Omega)} \simeq 0.840$$

$$A_V = A_O \left[ \frac{R_G}{R_I + R_G} \right] = 0.838$$

# Esempio (continua)



$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 892 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = R_3 \parallel R_6 = 10.7 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_E \parallel \frac{1}{g_m} = 1.74 \text{ k}\Omega$$