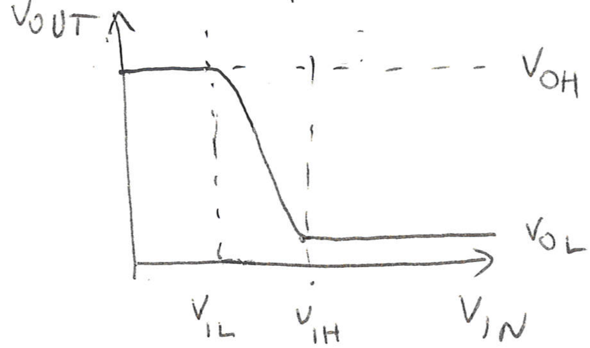
Lezione 7. Circuiti con transistor bipolare

A. Circuito NOT (semplice)

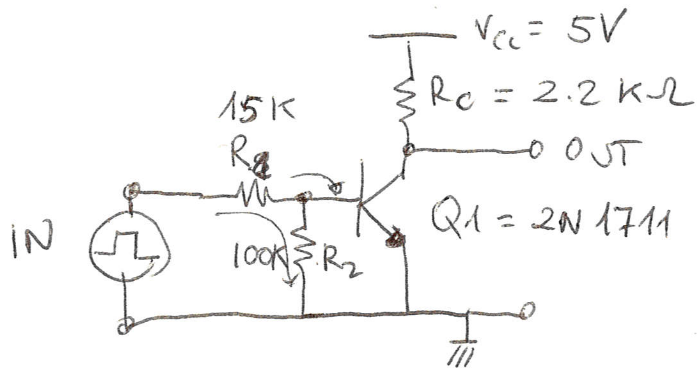
Specifica



V_{IN}	V_{OUT}
$V_{IN}<V_{IL}$	V_{OH} = "alto"
$V_{IL}<V_{IN}<V_{IH}$	INDEFINITO
$V_{IN}>V_{IH}$	V_{OL} = "basso"

Livelli logici

TTL ~ 5 V



$\boxed{\text{Se } V_{IN} \sim 0} \rightarrow$

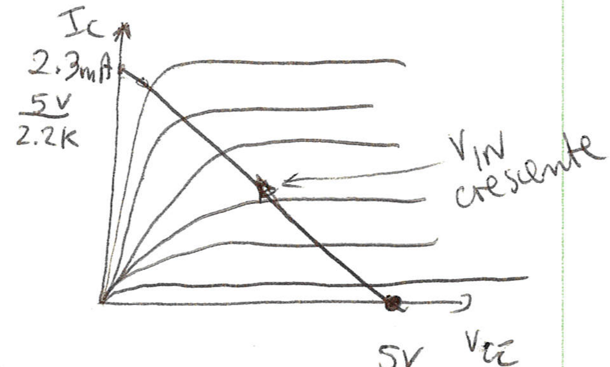
Q1 interdetto $\rightarrow I_C = 0$

$V_{OUT} = V_{CC} = 5V$

$\boxed{\text{Se } V_{IN} = 5V} \rightarrow$

Q1 saturato (da verificare)

$V_{OUT} = V_{CE(sat)} \sim 0.2\ V$



Studiamo le transizioni:

1) Fino a quale V_{IN} rimane interdetto?

$I_B \sim 0 \quad V_{BE} = V_{IN} \dfrac{1}{1 + R_1/R_2}$

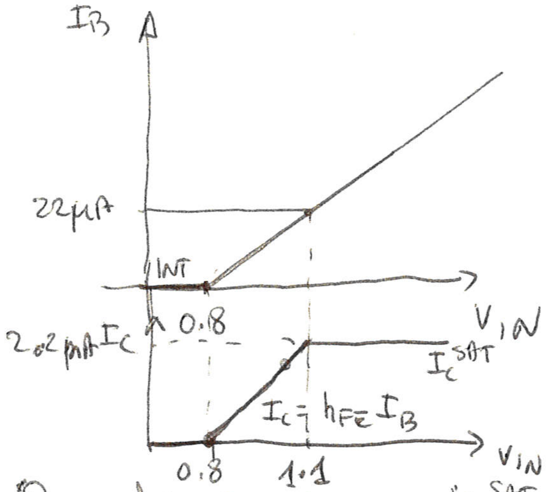
$= V_{IN} \dfrac{1}{1.15}$

Fino a $0.7V \times 1.15 \sim 0.8\ V$ il transistor è interdetto

2) Fino a quando rimane in zona attiva?

In zona attiva V_{BE} è $0.7V$

$$I_B \cong \frac{V_{IN} - 0.7}{R_1} - \frac{0.7}{R_2} = \frac{V_{IN}}{R_1} - \frac{0.7}{R_1 /\!/ R_2} \cong \frac{V_{IN}}{R_1} - 50\,\mu A \quad (V_{IN} > 0.8)$$



I_B cresce, $I_C = h_{FE} I_B$

Condizione di saturazione:

$$I_C^{SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE(SAT)}}{R_C} = I_C^{MAX}$$

$$= \frac{5 - 0.2}{2.2} = 2.2\ mA$$

$$I_B^{SAT} = \frac{I_C^{SAT}}{h_{FE}} = 22\,\mu A$$

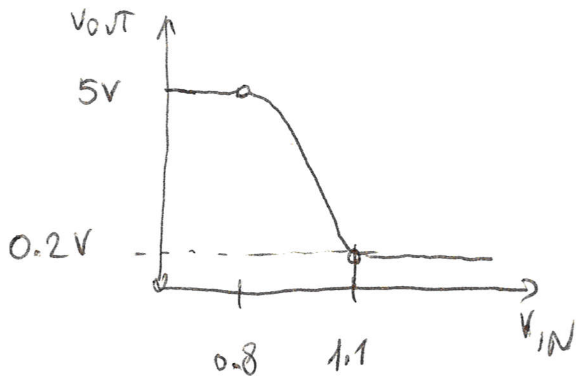
Quando I_B supera I_B^{SAT} il transistor entra in saturazione e lì rimane. I_C = cost = I_C^{SAT}; $V_{OUT} = V_{CE}(SAT)$

A quale V_{IN} accade? $V_{IN}^{(SAT)} = R_1 (I_B^{SAT} + 50\mu A) \simeq 1.1\ V$

3) Controllo che se $V_{IN} = 5V$ il transistor sia in SAT:

se $V_{IN} = 5V$ $\quad I_B = \frac{5V}{R_1}\left(-50\mu A\right) = 330 - 50 = 280\mu A$

La corrente di collettore "sarebbe" ~ $h_{FE} I_B = 28\ mA$, ben sopra quello che il ramo di collettore può erogare (2.3 mA) → SATURAZIONE

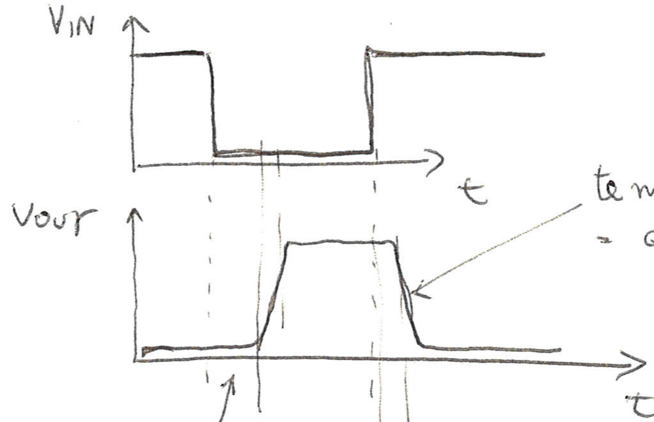


Tempi di commutazione: associati alle capacità di BE ed alla carica immagazzinata in base.

C_{INV} ~ relativamente piccola (spessore svuotato)

C_{DIR} ~ grande (piccolo o nullo spessore svuotato)

Commutazione



tempo di salita/discesa = = attraversamento zona attiva

uscita dalla saturazione = capacità diretta

uscita dall'interdizione = capacità inversa

N.B. "deep saturation" perché $I_B \gg I_B^{SAT}$ → ci vuole parecchio tempo.

280 μA 22 μA

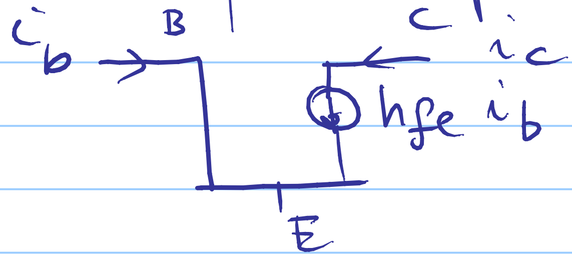
5 Modello a piccolo segnale (ATTIVO)

Fissato il punto di lavoro esaminiamo le variazioni rispetto ad esso.

$$v(t) = V(t) - V_m \rightarrow \text{variazioni}$$

Tensioni continue $\rightarrow \emptyset$

a. Il circuito più semplice è (attivo)

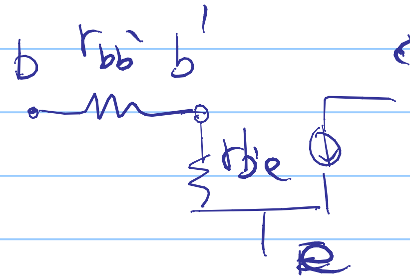


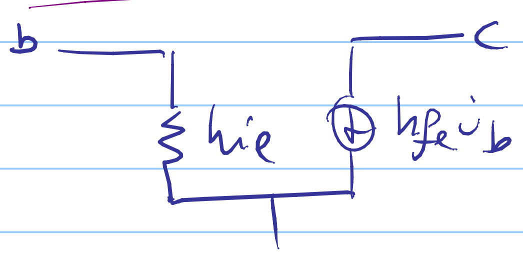
Tolgo il diodo, perché V_γ non varia

b. Resistenza differenziale del diodo BE

$I_B = I_{B0}\, e^{V_{BE}/V_T}$ $\qquad \dfrac{dI_B}{dV_{BE}} = \dfrac{I_B}{V_T}$

più spreading resistance (ohmica lungo la base)





modello più usato

$h_{ie} \sim 2K$

$h_{fe} \sim 100 - 1000$

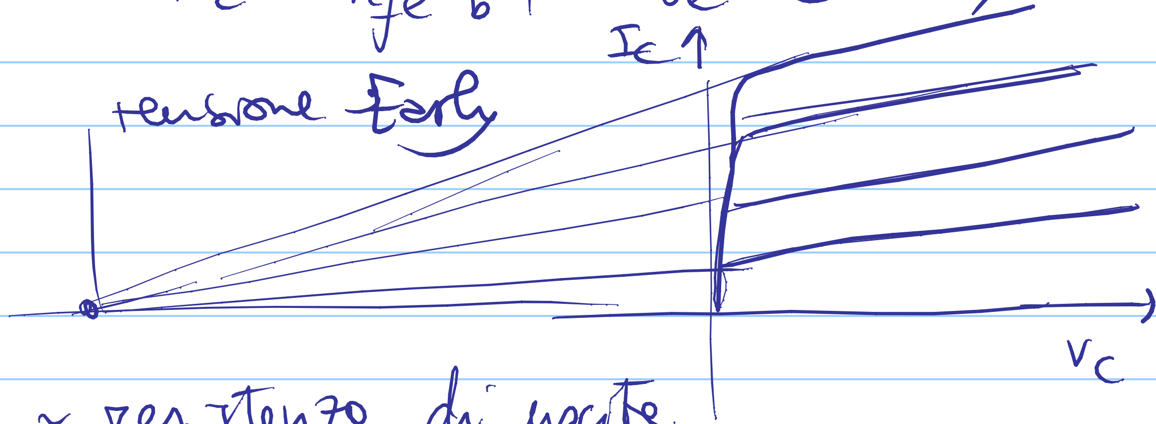
c. Effetto Early (base-width modulation)

Se aumento V_{CE} → la giunzione BC diventa più svuotata → riduzione di spessore della base → I_C aumenta.

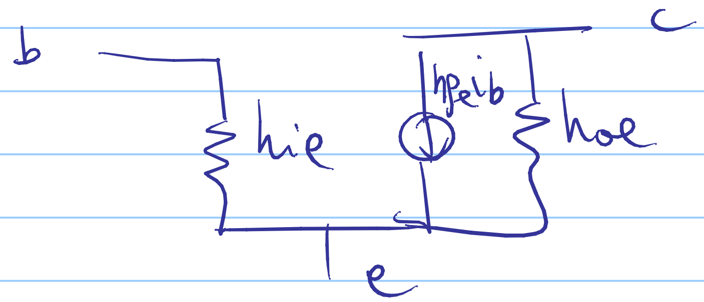
Quindi

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_c$$

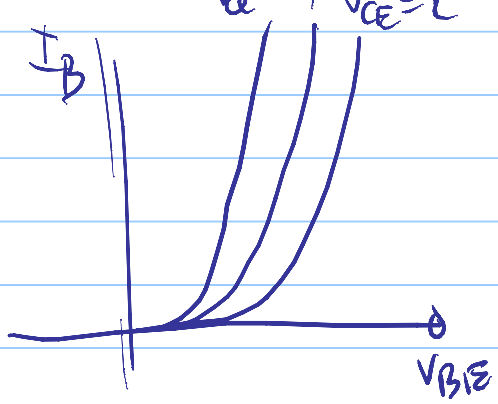
h_{oe} → conduttanza

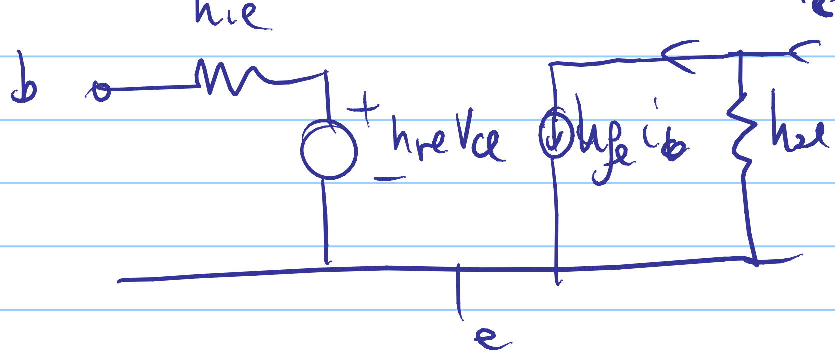


$1/h_{oe}$ ~ resistenza di uscita



Riduzione spessore base → diminuzione della corrente di ricombinazione in base → si riduce i_B → h_{re}





$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie}\, i_b + h_{re}\, v_{ce} \\ i_c = h_{fe}\, i_b + h_{oe}\, v_{ce} \end{cases}$$

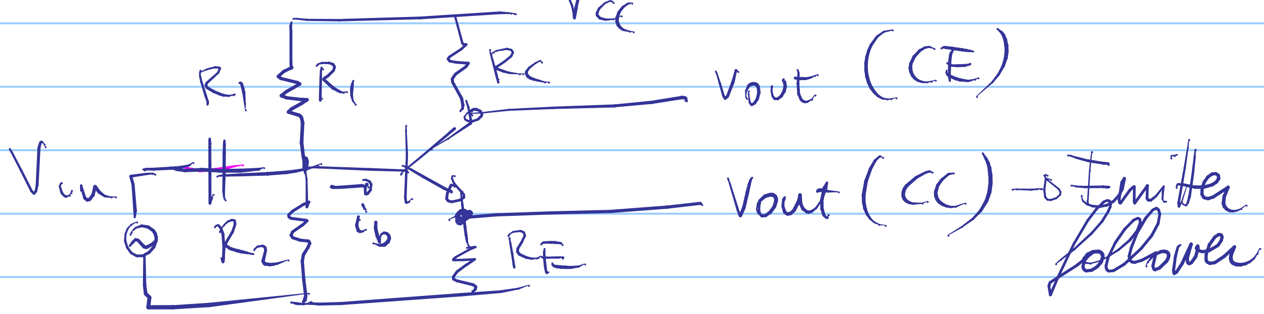
$h_{fe} \sim 100 - 1000$

$h_{ie} \sim 1 - 10\,k$

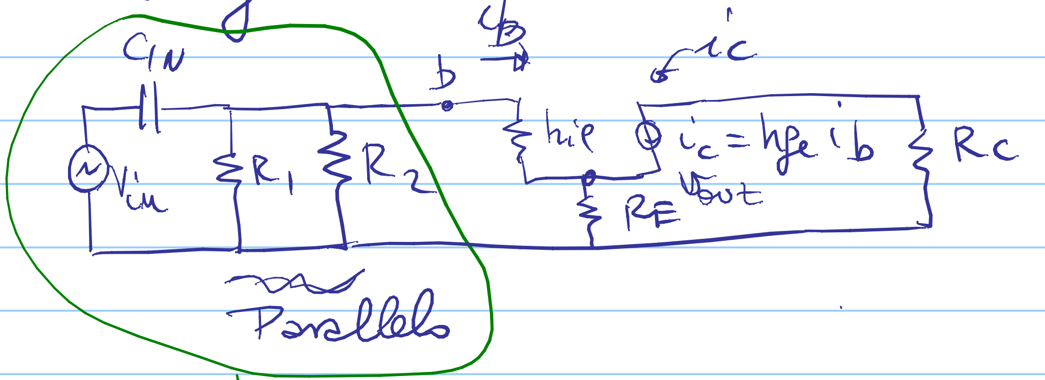
$h_{re} \sim 10^{-4}$

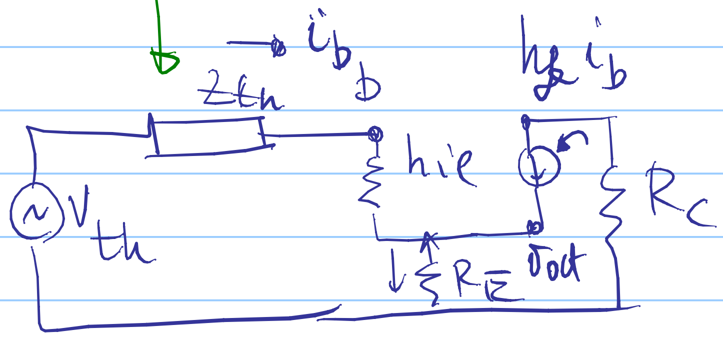
$h_{oe} \sim 10^{-5}\,S$

Amplificatori a transistor



Piccolo segnale → tensioni continue = 0.





- $v_{th} - (Z_{th} + h_{ie}) i_b - i_e R_E = 0$
- $i_e = (h_{fe}+1) i_b$

$$V_{th} = V_{in} \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + Z_C}$$

$$v_{th} - i_b \left[Z_{th} + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E \right] = 0$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$i_B = \frac{v_{th}}{Z_{th} + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E}$$

$$Z_{Th} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + j\omega C} = R_B // Z_C$$

$$v_{out} = R_E i_e = R_E (h_{fe}+1) i_b =$$

(togliere C)

$$= \frac{R_E (h_{fe}+1)}{Z_{th} + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E} v_{th}$$

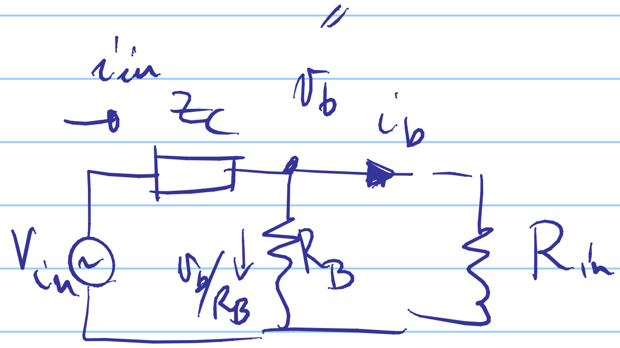
$$v_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_B}{R_B + Z_C} \cdot \frac{R_E (h_{fe}+1)}{R_B // Z_C + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E}$$

Se: $R_E (h_{fe}+1) \gg$ altre impedenze

$A_v \simeq 1$

$i_b h_{ie} + (1+h_{fe}) i_b R_E$

//



Impedenze di ingresso

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} =$$

$$R_{in} \text{ intrinseca} = \frac{v_b}{i_b} = \underset{1K}{h_{ie}} + (1 + \underset{100}{h_{fe}}) \underset{1K}{R_E}$$

$$\sim 100K - 300K\Omega$$

Poi c'è in parallelo R_B

Impedenze di uscita

$$Z_{out} = \frac{v_{out}(Z_L = \infty)}{i_{out}(Z_L = 0)} = \frac{v_{out}}{\lim_{R_E \to 0} \frac{v_{out}}{R_E}} = \frac{\frac{\cancel{v_{th} (h_{fe}+1)} R_E}{Z_{th} + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E}}{\frac{\cancel{v_{th} (h_{fe}+1)}}{Z_{th} + h_{ie}}}$$

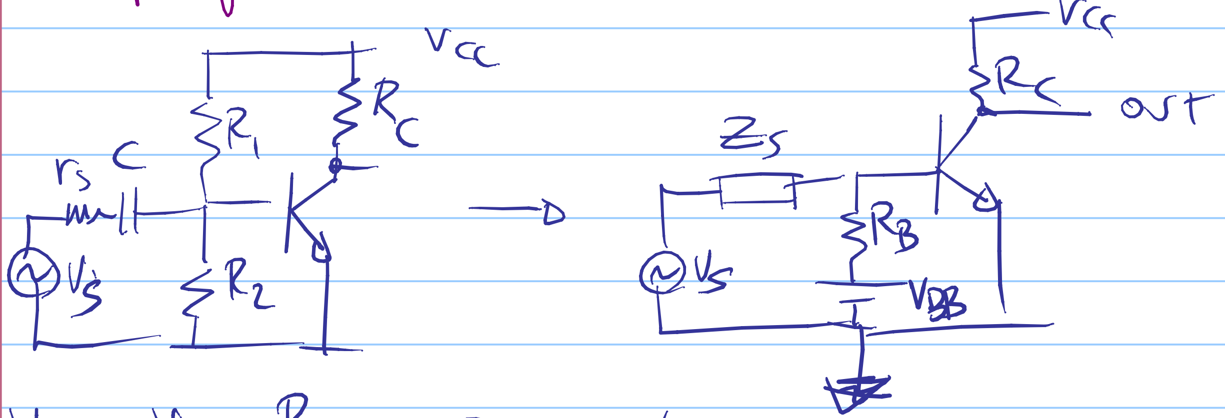
$$\lim_{R_E \to \infty} \frac{v_{th} (h_{fe}+1)}{Z_{th} + h_{ie} + (h_{fe}+1) R_E} \to \frac{v_{th} (h_{fe}+1)}{Z_{th} + h_{ie}}$$

||

$$Z_{out} = \frac{R_E \cdot (Z_{th} + h_{ie})}{Z_{th} + h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E} \to \frac{Z_{th} + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \sim \frac{1K}{100}$$

$$= 10\Omega$$

2. Amplificatore Common Emitter

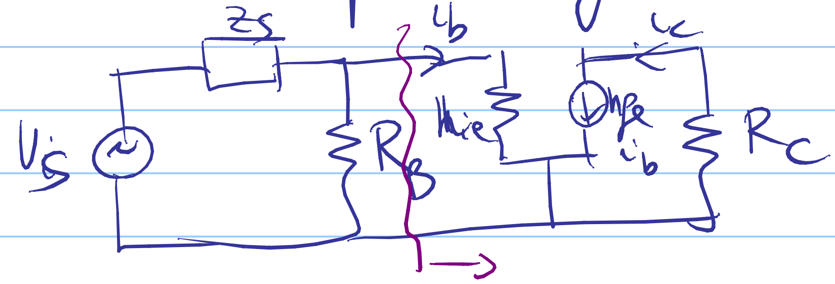


$$V_{BB} = V_{CC}\frac{R_2}{R_1+R_2}\ ;\ R_B = R_1 // R_2$$

$$Z_S = r_S + \frac{1}{j\omega C}$$

Polarizzazione $I_B = \frac{(V_{BB}-V_{BE})}{R_B}$

Modello a piccolo segnale



Guardiamo il circuito della base

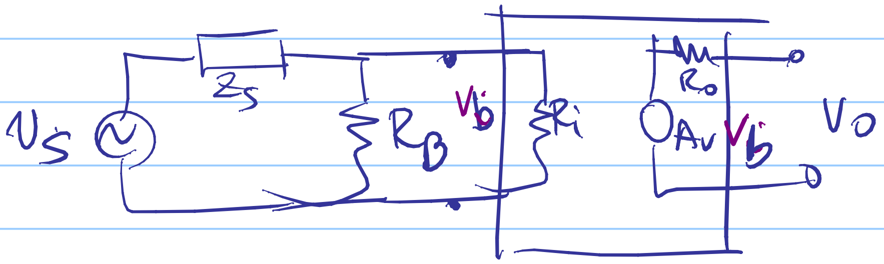
$i_b = v_b / h_{ie}$ $\qquad v_{out} = -h_{fe} i_b R_c = -h_{fe}\frac{R_c}{h_{ie}} v_b$

$A_v = -h_{fe}\frac{R_c}{h_{ie}}$ $\qquad R_i = \frac{v_b}{i_b} = h_{ie}$

$A_i = -i_c/i_b = -h_{fe}$ $\qquad R_{out} = \frac{v_{out}}{i_c(R_c=0)} = \frac{\cancel{h_{fe}} R_c / \cancel{h_{ie}}\ \cancel{v_b}}{\cancel{h_{fe} \cdot \frac{v_b}{h_{ie}}}} = R_c$

NB se considero R_c parte del circuito esterno (Load) $\rightarrow R_o \rightarrow \infty$

Se adesso metto Z_S ?



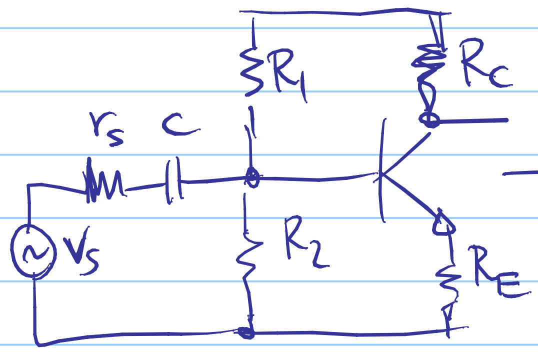
$$V_b' = V_S \cdot \frac{R_B // R_i}{R_B // R_i + Z_S}$$

$R_B \gg h_{ie}$
$\rightarrow R_B // h_{ie} \sim h_{ie}$

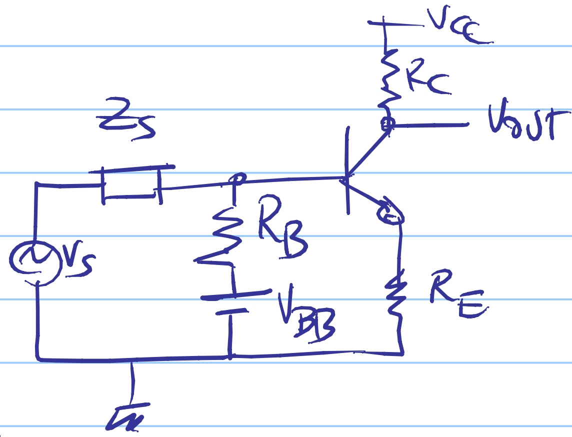
$$A_V' = \frac{V_o}{V_S} = \frac{V_o}{V_b'} \cdot \frac{V_b}{V_S} = A_V \cdot \frac{R_B // R_i}{R_B // R_i + Z_S} = h_{fe} \cdot \frac{h_{ie}}{h_{ie} + Z_S}$$

Guadagno dipende da h_{fe} → variabile
→ Resistenze di emettitore

3 Common emitter con R_E



→



Punto di lavoro solito

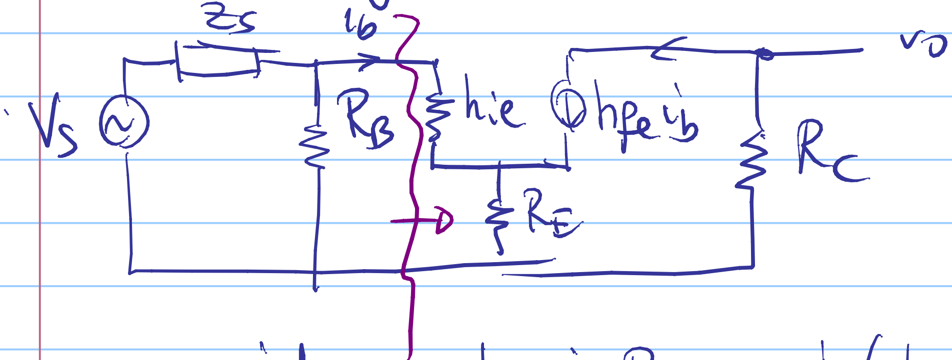
$$V_{BB} - (R_B + h_{FE} R_E) I_B - V_{BE} = 0$$

$$I_C^Q = \frac{h_{FE}(V_{BB} - V_{BE})}{R_B + h_{FE} R_E} \simeq \frac{(V_{BB} - V_{BE})}{R_E}$$

$$V_{OUT}^Q = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - (V_{BB} - V_{BE}) \frac{R_C}{R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = V_{CC} - (V_{BB} - V_{BE})\left(1 + \frac{R_C}{R_E}\right)$$

Piccolo segnale



$$v_b = i_b h_{ie} + h_{fe} i_b R_E = i_b (h_{ie} + h_{fe} R_E) \qquad A_V$$

$$i_c = h_{fe} i_b = h_{fe} v_b / (h_{ie} + h_{fe} R_E)$$

$$v_{out} = -i_c R_C = -v_b \cdot \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + h_{fe} R_E} \sim -v_b \frac{R_C}{R_E}$$

Guadagno dipende solo dalle resistenze

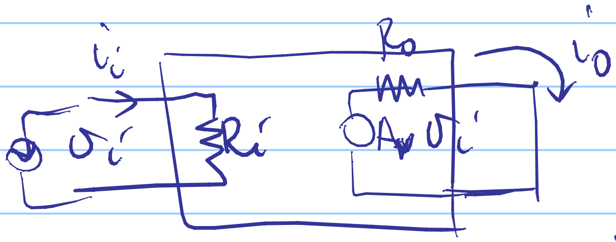
$$R_E \gg \frac{h_{ie}}{h_{fe}} \sim \frac{1K}{100} = 10\,\Omega$$

$$A_V = -R_C / R_E \qquad R_{in} = \frac{v_b}{i_b} = h_{ie} + h_{fe} R_E$$

più grosse

$$R_{out} = R_C \qquad A_I = -h_{fe}$$

Nota

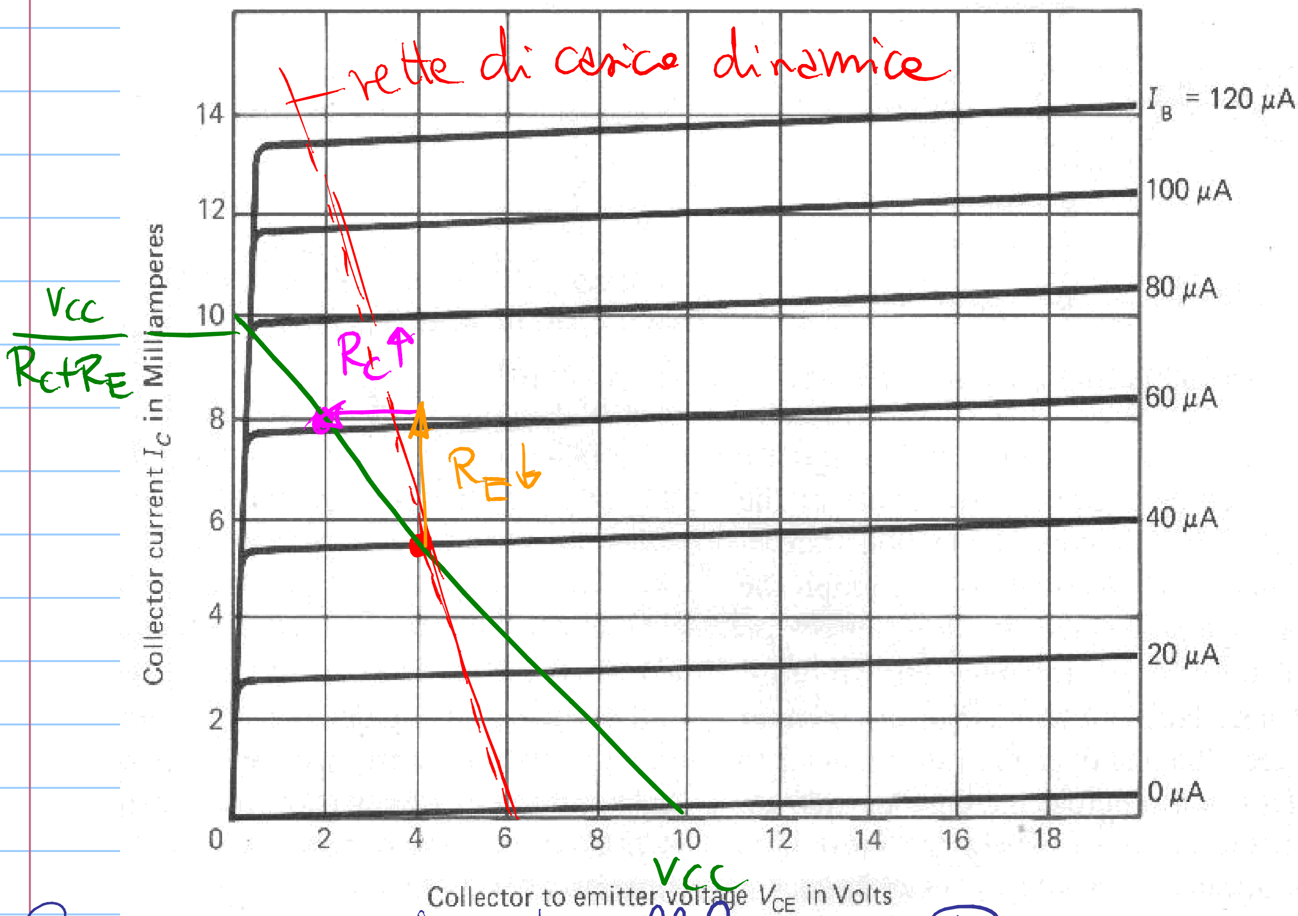


$$\boxed{A_V = A_I \cdot \frac{R_o}{R_i}}$$

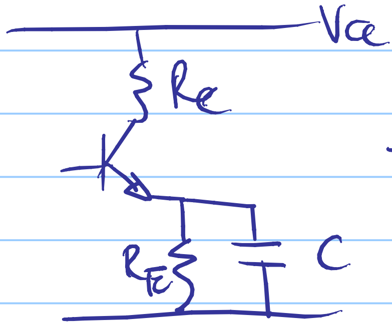
$$\frac{A_V v_i}{R_o} = i_o = A_I \cdot i_i = A_I \cdot \frac{v_i}{R_i}$$

4. Condensatore di emettitore e retta di carico dinamica

Per aumentare il guadagno in tensione devo diminuire R_E e/o aumentare R_C
→ Punto di lavoro non centrato → clipping



Se metto C in parallelo con R_E
Punto di lavoro non cambia



$$Z_E = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R_E}} = \frac{R_E}{1+j\omega/\omega_0} \to |Z_E| \sim \frac{\omega_0 R_E}{\omega}$$

$$A_V = -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + h_{fe} Z_E} \to -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

Retta di carico dinamica $V_{CC} = V_{CE} + I_C(R_C + Z_E)$