

Tutti gli esercizi con il titolo numerato sono presi dal libro di testo:

Microelettronica by Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock V edizione

in cui in fondo a ogni capitolo ci sono esercizi con le soluzioni scaricabili online dal sito dell'editore.

In questi quaderni ci sono tutti passaggi per svolgere un esercizio con le relative formule di riferimento.

Il prof. Mugnaini segue il libro del Pieraccini per coprire tutta la parte del corso fino al diodo, giunzione pn e MOS, dai BJT in poi segue sullo Jaeger. La parte finale del corso segue il Millman compresi gli amplificatori differenziali.

Consiglio di fare tutti gli esercizi, dai più basilari per poi passare ai più complicati, per non avere problemi allo scritto con il prof. Mugnaini.

NB: Se pensate che questo sia l'inferno, ancora c'è da vedere Elettronica mod 2.

Buon divertimento e buona fortuna, ne avrete bisogno.

Leonardo Burroni

ESERCIZI JAEGHER

CAPITOLO 3 DIODI PM

3.1 Dato:

$$\text{Reg. p } N_A = 10^{19} / \text{cm}^3$$

$$\text{Reg. n } N_D = 10^{18} / \text{cm}^3$$

RICH: a) Calcolare lunghezza reg. svuotata udo

b) Calcolare X_n, X_p

c) potenziale intrinseco

d) EMAX?

Richiedere formule:

- Legge Az. massa $m_p = m_i^2$ con $m_i^2 = \left(\frac{10^{10}}{\text{cm}^3} \right)^2$

- $N_D X_n = N_A X_p$ ($\uparrow$ drogaggio $\Rightarrow \downarrow$ Reg. svuotata)

- $W_{do} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \varphi}$ con φ potenziale intrinseco (built-in)

- $\varphi = V_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{m_i^2} \right)$

- $X_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \varphi \cdot \frac{N_A}{N_D} \left(\frac{1}{N_A + N_D} \right)}$

$$X_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \varphi \cdot \frac{N_D}{N_A} \left(\frac{1}{N_A + N_D} \right)}$$

- $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [C]} \quad k = 8,99 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right] \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$

$$\epsilon_{\text{silicio}} = 11,7 \cdot \epsilon_0 = 1,035 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$$

c) potenziale intrinseco

$$\begin{aligned} \varphi &= V_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{m_i^2} \right) = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{10^{19} \cdot 10^{18}}{10^{20}} \right) = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 39,14 = \\ &= 978 \text{ mV} \end{aligned}$$

a) Lunghezza reg. svuotata udo. $\epsilon_s = 1,035 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$

$$W_{do} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-10}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{19}} + \frac{1}{10^{18}} \right) 978 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= \sqrt{12,92 \cdot 10^8 (1,1 \cdot 10^{-18}) 978 \cdot 10^{-3}} = \sqrt{1,39 \cdot 10^{-9}} = 3,73 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$\lambda_{\text{obj}} = 0,373 \mu\text{m}$ $0,0373 \mu\text{m}$

$$b) \quad X_m = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-10}}{1,602 \cdot 10^{-19}}} \cdot \frac{10^8}{10^8} \left(\frac{1}{10^9 + 10^8} \right) 978 \cdot 10^{-3} =$$

$$= \sqrt{12,92 \cdot 10^8 \cdot 10 \cdot (9,09 \cdot 10^{-20}) \cdot 978 \cdot 10^{-3}} = \sqrt{1,15 \cdot 10^{-9}} = 3,39 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$= 33,9 \mu m$$

$$X_m = \frac{\omega d_0}{1 + \frac{N_D}{N_A}}$$

$$X_m = \frac{0,0373 \cdot 10^{-6}}{1 + \frac{10^{18}}{10^9}} = 3,39 \cdot 10^{-8} = 3,39 \cdot 10^{-2} \mu m = 0,039 \mu m$$

$$X_p = \frac{W_{do}}{1 + \frac{N_A}{N_D}} = \frac{0,0373 \cdot 10^{-6}}{1 + \frac{10^{19}}{10^{18}}} = 3,39 \cdot 10^{-9} = 3,39 \cdot 10^{-3} \mu m$$

d) ENMAX

$$\bar{E}_{AX} = \frac{q N_A X_p}{\epsilon_s} = \frac{(1,602 \cdot 10^{-19}) \cdot 10^{15} \cdot 3,39 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2}}{1,035 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-2} \text{ cm}} = 5,24 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

3.6 Diodo con
 $W_{d0} = 0,4 \mu\text{m}$
 $\phi_j = 0,85\text{V}$

RICHIESTA: Tensione inversa ~~da~~ da applicare
 a) affinché raddoppiare lunghezza
 reg. svuotata

b) Calcolare W_{d0} per una Tensione inversa
 di 5V

Richiama: TENSIONE INVERSA V_R

↳ quando si applica al diodo, cade ai capi della reg. svuotata, e
 va a sommarsi al potenziale intrinseco

$$V_j = \phi_j + V_R \quad \text{con } V_R > 0$$

$$W_d = W_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}} \quad \text{lunghezza regione svuotata applicando una tensione inversa}$$

a) voglio raddoppiare W_{d0} quindi posso $W_d = 2W_{d0}$

$$2W_{d0} = W_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}} \rightarrow 4 = 1 + \frac{V_R}{\phi_j}$$

$$(4-1)\phi_j = V_R \rightarrow V_R = 3 \cdot 0,85\text{V} = 2,55\text{V}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } W_d &= W_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{5}{0,85}} = \\ &= 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,62 = 1,048 \mu\text{m} \end{aligned}$$

3.8

$\rho = 0,5 \Omega \cdot \text{cm}$ resistività della regione neutra di tipo n

$J_n = 1 \text{ kA/cm}^2$ densità di corrente di deriva che ottiene la
 regione neutra di tipo n.

RICHIESTA: Determinare campo elettrico nella reg. neutra n.
 ($\hookrightarrow$ svuotata)

$$\cancel{V} \quad \cancel{E} \quad \cancel{J}$$

$$E = \rho J = 0,5 \text{ kV/cm}^2$$

$$\rho = \frac{1}{G} ; J_m = G E$$

$$G = \frac{1}{\rho} = 2 \Omega^{-1}$$

$$E = \frac{J_m}{G} = \frac{1}{2} \frac{\frac{kA}{cm^2} \Omega \cdot cm}{cm^2} = 0,5 \frac{kV}{cm} = 500 \frac{V}{cm}$$

$$\underline{3.9} \quad \rho = \frac{2}{0,8} \Omega \cdot cm$$

$$J_p = 5 \frac{kA}{cm^2}$$

→ Qui la corrente di deriva attraversa una rug. svuot. della zona p.

RICH: CE nella rug. svuot. p

$$J_p = G E ; \rho = \frac{1}{G}$$

$$G = \frac{1}{\rho} = 2 (\Omega \cdot cm)^{-1} ; E = \frac{J_p}{G} = \frac{5}{2} \frac{kA}{cm^2} \Omega \cdot cm =$$

$$E = \frac{J_p}{G} \text{ ma } \rho = \frac{1}{G} \Rightarrow E = J_p \cdot \rho = 5 \frac{kA}{cm^2} \cdot 2 \Omega \cdot cm =$$

$$= 10 \frac{kV}{cm} = 8000 \frac{V}{cm}$$

3.10 La massima velocità dei portatori di carica $v \approx 10^7$ cm/s. Qual è la massima valore della corrente di deriva che può fluire in una rug. di tipo n con drogaggio di $4 \cdot 10^{15}$ /cm³?

$$J = q \cdot n \cdot v$$

CORRENTE DERIVA

velocità

può fluire in una rug. di tipo n con drogaggio di $4 \cdot 10^{15}$ /cm³?

$$n = 4 \cdot 10^{15} /cm^3 \Rightarrow J_{max} = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{15} \cdot 10^7 = 6408 \frac{A}{cm^2}$$

C = A.s $\frac{1}{cm^2} \cdot \frac{cm}{s}$

OK

Caratteristica i-V del diodo, Equaz. diodo, Polariz. Inversa, Nulla, Diretta

3.19 Dati diodo

$$I_S = 1 \text{ pA}$$

$$m = 1$$

Rich: a) Tracciare grafico

TRASCRATT. Diodo $i_D = I_S \left[e^{\frac{V_D}{mV_T}} - 1 \right]$ $V_T = 25 \text{ mV}$ a T. ambiente

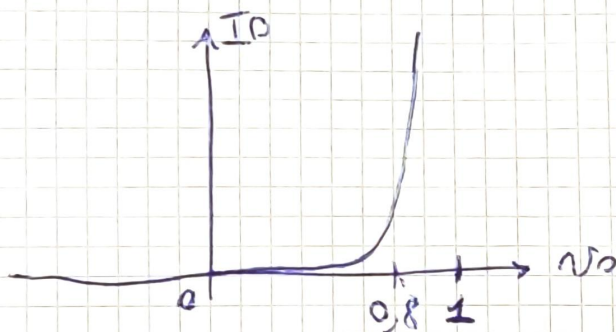
Per $V_D = 0 \Rightarrow i_D = 0$

$$V_D = 0,1 \rightarrow i_D = 1 \cdot 10^{-12} \left[e^{\frac{0,1}{25 \cdot 10^{-3}}} - 1 \right] = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ A} = 0,5 \text{ pA}$$

$$V_D = 0,5 \rightarrow i_D = 48 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,7 \rightarrow i_D = 1,44 \text{ A}$$

$$V_D = 0,8$$



3.22 Dati diodo:

$$I_S = 1 \text{ aA}$$

$$m = 1,05$$

a) Tensione ai capi del diodo V_D in corrispondenza di una corrente di $70 \mu\text{A} = i_D$

b) V_D se $i_D = 5 \mu\text{A}$

c) i_D se $V_D = 0$, $V_D = -7 \text{ mV}$, $V_D = -5 \text{ V}$?

a) $\frac{i_D}{I_S} = \left(e^{\frac{V_D}{mV_T}} - 1 \right) \rightarrow \frac{i_D}{I_S} + 1 = e^{\frac{V_D}{mV_T}}$ applico logaritmo

$$\ln\left(\frac{i_D}{I_S} + 1\right) = \frac{V_D}{mV_T} \rightarrow V_D = mV_T \ln\left[\frac{i_D}{I_S} + 1\right]$$

$$V_D = 1,05 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln\left[\frac{70 \cdot 10^{-6}}{10^{-18}} + 1\right] = 26,25 \quad 31,88 \cdot 10^{-3}$$

$$= 836,85 \cdot 10^{-3} \approx 0,83 \text{ V}$$

$$b) U_0 = 1,02 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln\left(\frac{5 \cdot 10^{-6}}{10^{-18}} + 1\right) = 26,25 \cdot 10^{-3} \cdot 29,24 \approx 0,76 \text{ V}$$

c) $150 = 0 \Rightarrow i_0 = 0$

$$V_D = -75 \text{ mV} \Rightarrow i_D = -9,13 \cdot 10^{-13} \text{ A} = -91,3 \text{ pA}$$

photocurrente ~~non~~ corrente

$$u_0 = -5V \Rightarrow i_0 = \cancel{-10A} - 1A$$

Periodo im polo nord-orientale invernale

336

~~11~~

$$W_{do} = 1 \mu m$$

$$g_j = 0,8 \sqrt{}$$

a) Ampiera reg. skrot. wd per $V_R = 5V$

b) Wd per $V_D = -10V$

$$\omega_d = \omega_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{Q_i}}$$

$$V_D = -V_R$$
$$\Downarrow$$
$$V_R = -V_D$$

$$a) \lambda_d = 1 \cdot 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{5}{0,8}} = 2,69 \mu m$$

$$b) \lambda_d = 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{10}{0,8}} = 3,67 \mu m$$

OK

3.37

$$N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$$

$$N_A = 10^{16} / \text{cm}^3$$

RICH:

RICH: • calcolare u_{ab}, ϕ_j .

- Ampiezza dello spostamento u_d per una tensione u_{messa}

$V_R = 10V$ e poi $V_R = 100V$

$$\phi_j = \sqrt{\tau} \ln \left(\frac{N_{D^+A}}{n_{i2}} \right) = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{10^{15} \cdot 10^{16}}{10^{20}} \right) = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25,33 =$$

$$= \cancel{0,63 \text{ mV}} \quad 633 \text{ mV} = 0,63 \text{ V}$$

soultbe 10^{-10} mal the proton im $\frac{F}{cm}$.

$$\omega_{do} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \phi_j} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,035 \cdot 10^{-12}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{15}} + \frac{1}{10^{16}} \right) 0,63} \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$= \sqrt{12,92 \cdot 10^6 \cdot (10^{-15}) \cdot 0,63} = \sqrt{10^{12} \cdot 8,14} = 2,85 \cdot 10^6 \text{ cm}$$

$$= 9,463 \cdot 10^{-5} \text{ cm} = 0,946 \mu\text{m} \text{ NON MI TORNA}$$

$$w = w_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}} = 0,946 \cdot 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{10}{0,63}} = 3,89 \mu m$$

$$w_{low} = 0,946 \cdot 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{100}{0,63}} = 9,77 \mu m \approx 12 \mu m$$

3,39 $w_{d0} = 1 \mu m$
 $\phi_j = 0,6 V$

RICH: Tensione rottura del diodo assumendo, in condiz. di rottura, $E_{max} = 300 \frac{kV}{cm}$

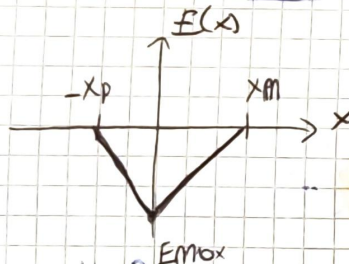
Richiama $\phi_j = - \int_{-x_m}^{x_p} E(x) dx \approx E \cdot w_{d0}$

Identico ai capi della reg. sinusoidale
 ma se si applica una tens. $V_R \Rightarrow V_j = \phi_j + V_R$
 quindi
 $\phi_j + V_R = E \cdot w_{d0}$ a rottura $E_{max} = \phi_j + V_R = E_{max} \cdot w_{d0}$

$w_{d0} = w_d = w_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}}$ quindi ho l'equaz.

$\phi_j + V_R = E_{max} \left(w_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}} \right)$

Richiama $\phi_j = \frac{1}{2} E_{max} w_{d0}$



ma qui applico una tensione V_R quindi ho:

$(\phi_j + V_R) = \frac{1}{2} E_{max} w_{d0} \leftarrow$ No w_{d0} !

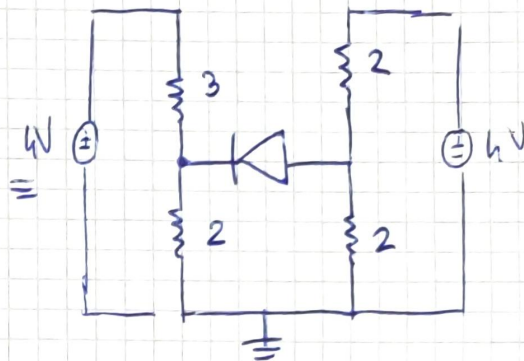
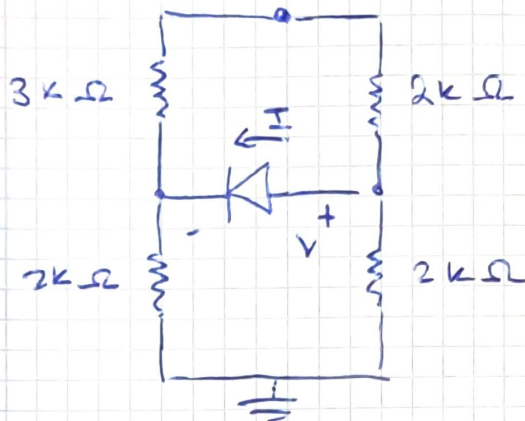
$\phi_j + V_R = \frac{1}{2} E_{max} w_{d0} \sqrt{1 + \frac{V_R}{\phi_j}}$

3.66

Rich: $\alpha = (I_0, V_0)$

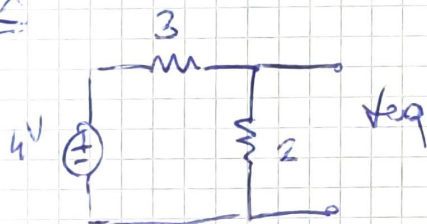
$V_{om} = 0,6V$

$+hV$



Faccio l'open-circuit sia al circuito a sx che quello a dx

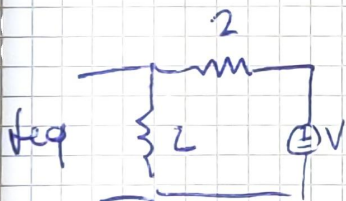
SX



$$V_{eq} = 4 \cdot \frac{2}{3+2} = \frac{8}{5} = 1,6V$$

$$R_{eq} = \frac{2 \cdot 3}{2+3} = \frac{6}{5} = 1,2k\Omega$$

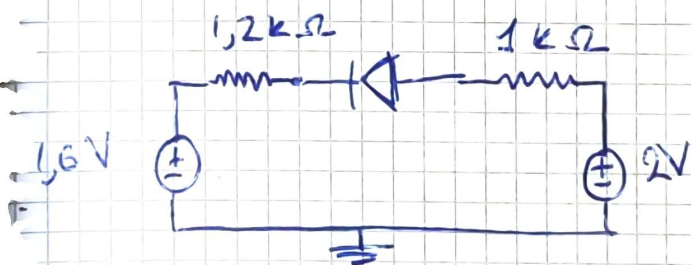
DX



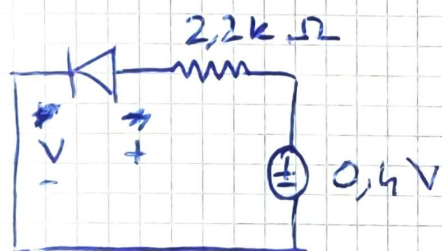
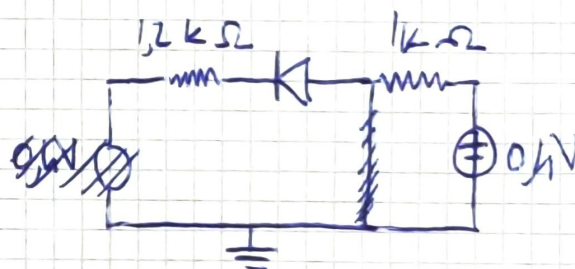
$$V_{eq} = 2 \cdot \frac{2}{2+2} = \frac{8}{4} = 2$$

$$R_{eq} = \frac{2 \cdot 2}{2+2} = \frac{4}{4} = 1k\Omega$$

allora



=



Il diodo è polarizzato direttamente!

11. 12. 1944

12. 12. 1944

13. 12. 1944

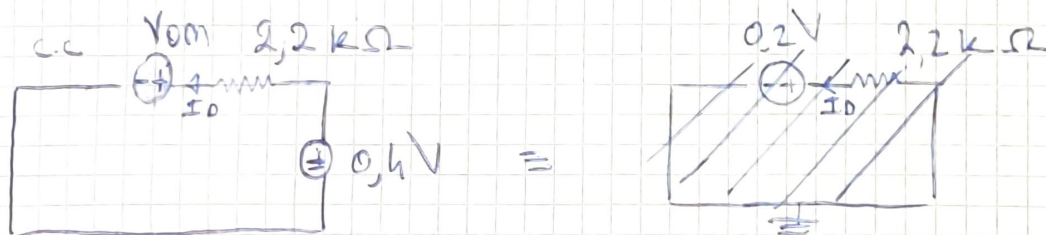
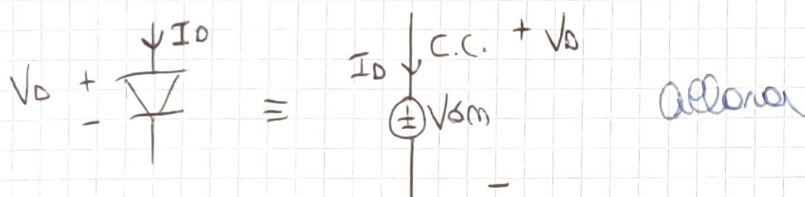
14. 12. 1944

15. 12. 1944

16. 12. 1944

Suppongo diodo acceso (fa scorrere corrente $\Rightarrow$ c.c.)

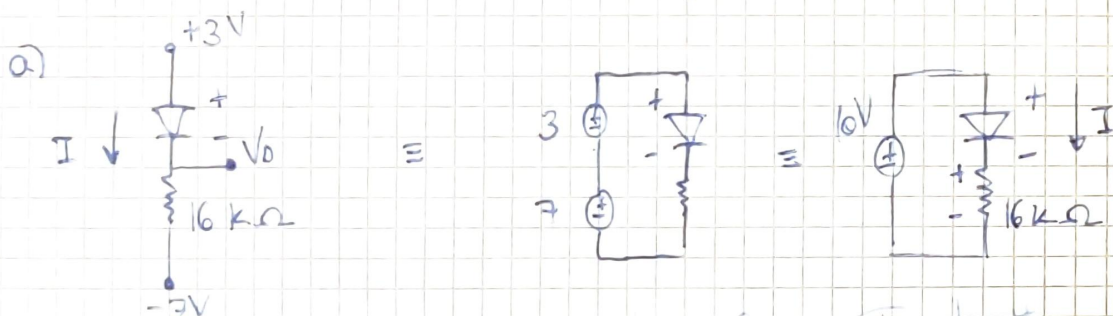
Modello diodo a caduta di tensione costante



$$I_D = \frac{0.4 - 0.6}{2.2 \cdot 10^3} = -0.09 \text{ mA} \leftarrow \text{CORRENTE NEGATIVA! Il diodo è SPENTO}$$

$$\Rightarrow Q \equiv (0 \text{ mA}; 0.4 - 0.6 \text{ V}) \equiv (0 \text{ mA}; -0.2 \text{ V})$$

3.69 Calcolare I_D e V_D nei 4 circuiti usando modello a caduta di tensione costante. $V_{DN} = 0.7 \text{ V}$

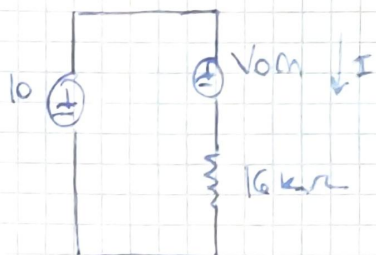


diodo polarizzato direttamente

$$I = \frac{10}{16 \text{ k}\Omega} = 0.625 \text{ mA}$$

Sostituisco modello a caduta di tensione costante

Suppongo diodo acceso



I due generatori hanno segni discordi quindi si sottraggono

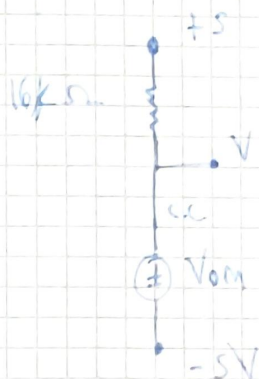
$$I = \frac{10 - V_{Dm}}{16 \text{ k}\Omega} = \frac{9.3}{16 \text{ k}\Omega} = 0.581 \text{ mA}$$

$$V_D = 3 - 0.7 = 2.3 \text{ V}$$

OK



Resistore in serie



Potenziale di riferimento

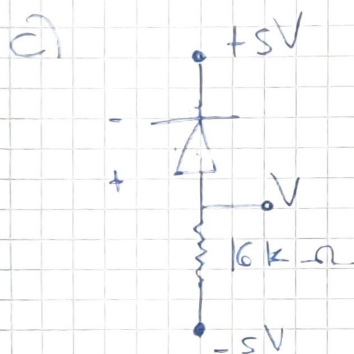
$$V = V_{om} - 5V = V_{om} - 5V$$

$$= 0,7 - 5 = -4,3V$$

~~Il diodo è polarizzato direttamente~~

$$I = \frac{5 + 4,3}{16k\Omega} = 0,581 \text{ mA}$$

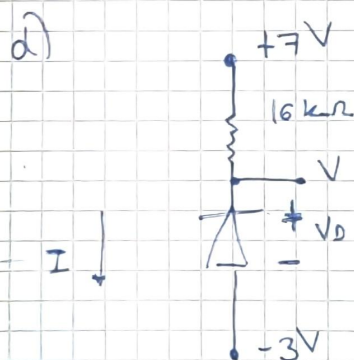
Diode polarizzata DIRETTAMENTE



Diode polarizzata inversamente $\Rightarrow I_D = 0$

$$V = 16k\Omega \cdot I - 5 = 0 - 5 = -5V$$

$$V_D = -10V$$



Diode polarizzata inversamente! (Si vede anche dalle
convenzioni delle scorse in verso opposto)
 $\Rightarrow I_D = 0$

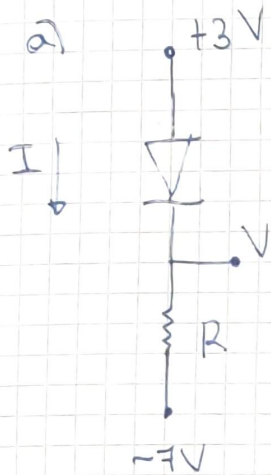
maglia uscita $7 = 16k\Omega \cdot I + V$

$$\hookrightarrow V = 7 - 16 \cdot I^0 = 7V$$

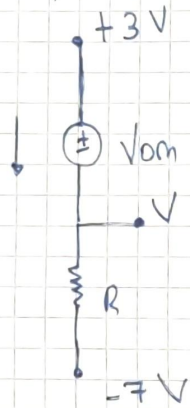
$$V = +V_D - 3 \rightarrow V_D = V + 3 = 7 + 3 = 10V$$

OK

370 Calcolare I e V usando modello a conduzione di tensione, $V_{on} = 0,6V$ e resistenza di $100k\Omega$



• Diodo polarizzato DIRETTAMENTE (dopo verso della corrente)

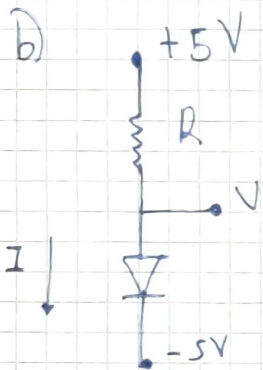


~~$V = -7V$~~
 ~~$I = \frac{-7}{R} = \frac{-7}{100k\Omega} = -0,07mA$~~

Equazioni: $3 = V_{om} + V \rightarrow V = 3 - V_{om} = 3 - 0,6 = 2,4V$

parte inferiore

$V = RI - 7 \rightarrow RI = V + 7 \rightarrow I = \frac{V+7}{R} = \frac{2,4+7}{100 \cdot 10^3} = 0,094mA$



Polarizzato DIRETTAMENTE



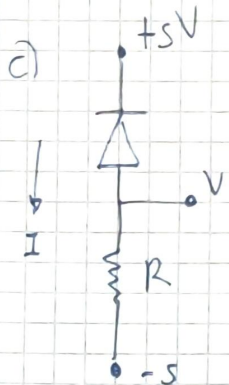
$V = V_{om} - 5 = 0,6 - 5 = -4,4V$

$S = RI + V$

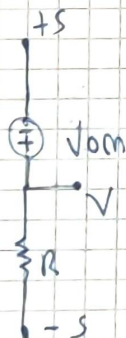
$S = RI - 4,4$

$RI = S + 4,4 = 9,4V$

$I = \frac{9,4}{100 \cdot 10^3} = 0,094mA = 94\mu A$



Polarizzato invernalmente!



$\Rightarrow I = 0$

~~$S = -V_{om} + V$~~

~~$V = S + V_{om} = 5,6V$~~

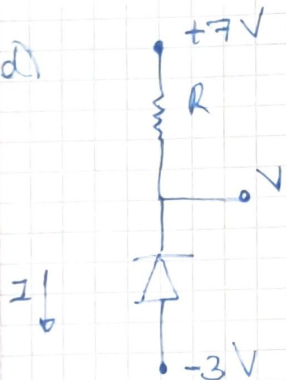
$V = RI - 5 = -5V$

$+5 = V_D + V$

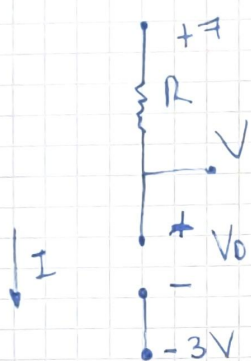
$5 = V_D - 5 \rightarrow V_D = S + 5 = 10V$

OK

d)

Polarizzato inversamente!! $I = 0$

$$+7 = \overset{0}{R}I + V \rightarrow V = -7V$$



$$V = +V_0 - 3 \rightarrow +V_0 = V + 3$$

$$V_0 = +V + 3 = +7 + 3 = 10V$$

NB I e V_0 quando il diodo è spento va preso secondo la convenzione degli utilizzatori seguendo il verso della corrente che viene data dall'esercizio.

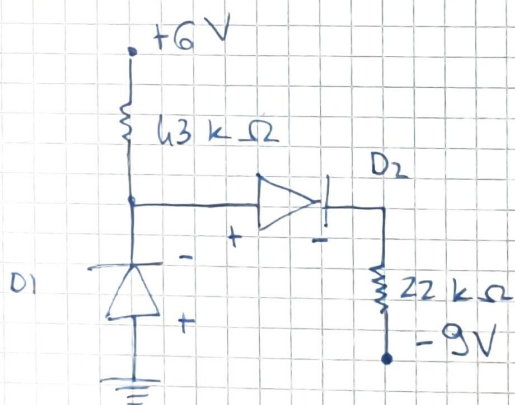
NB: V_{0m} si considera solo quando il diodo è acceso cioè polarizzato direttamente e non inversamente

CIRCUITI A PIÙ DIODI

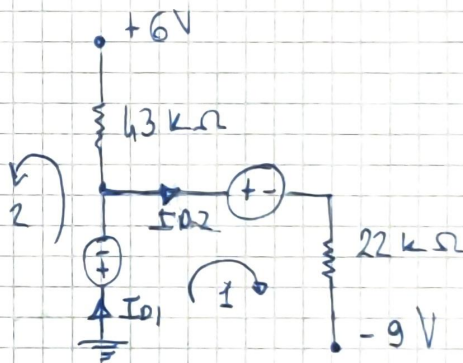
3.71

Determinare p.to di lavoro $Q = (I_0, V_0)$ per i circuiti usando modello a caduta di tensione $V_{0N} = 0,75V$

a)



SUPPONGO ENTRAMBI I DIODI ACCESI



$$KVL 1: +0,75 + 0,75 + I_{02}(22k\Omega) - 9 = 0$$

$$-7,5 + I_{02}(22k\Omega) = 0$$

$$I_{02} = \frac{7,5}{22 \cdot 10^3} = 0,341 \text{ mA} \approx 341 \mu A$$

KVL 2:

$$+0,75 + (I_{01} - I_{02})(43k\Omega) + 6 = 0$$

$$(I_{01} - I_{02})(43k\Omega) = -6,75$$

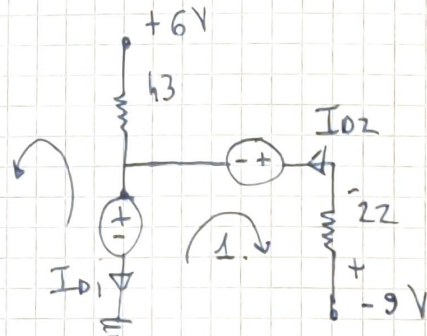
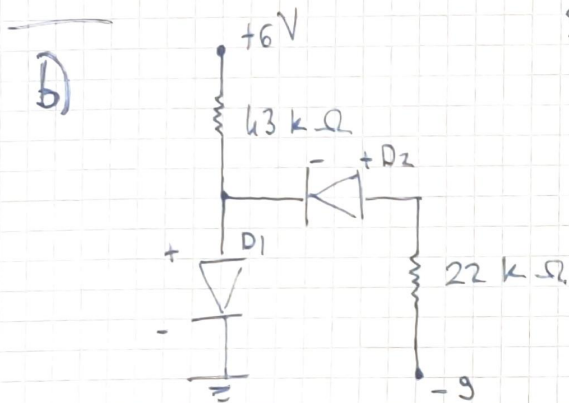
$$I_{01} - I_{02} = \frac{-6,75}{43k\Omega} \rightarrow I_{01} = \frac{-6,75}{43k\Omega} + I_{02}$$

$$I_{D1} = -157 \mu A + 341 \mu A = \cancel{-184 \mu A} \quad 184 \mu A$$

$$Q_1 = (184 \mu A; 0,7 V)$$

$$Q_2 = (341 \mu A; 0,7 V)$$

Suppongo: entrambi diodi accesi e sostituisco il modello



$$KVL 1: -0,75 - 0,75 - I_{D2}(22 k\Omega) - 9 = 0$$

$$I_{D2}(22 k\Omega) = -10,5 \rightarrow I_{D2} = \frac{-10,5}{22} = -0,477 mA \approx -477 \mu A$$

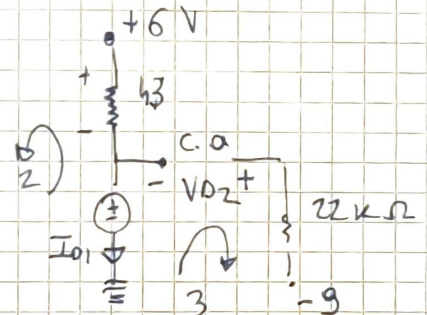
⚠ $I_{D2} < 0 \Rightarrow$ Il diodo non è acceso MA SPENTO!
 $\Rightarrow \underline{I_{D2} = 0}$

Essendo $I_{D2} = 0$ il circuito è come se fosse:

$$KVL 2: -0,75 - 43 k\Omega \cdot I_{D1} + 6 = 0$$

$$5,25 = 43 k\Omega \cdot I_{D1}$$

$$I_{D1} = \frac{5,25}{43 k\Omega} = 122 \mu A$$



c) $Q_1 = (122 \mu A; 0,75 V) \quad Q_2 = \cancel{(0 A; 0,75 V)}$

NB: Devo trovare V_{D2} cioè la tensione del c.a. causata dallo spegnimento di D_2 .

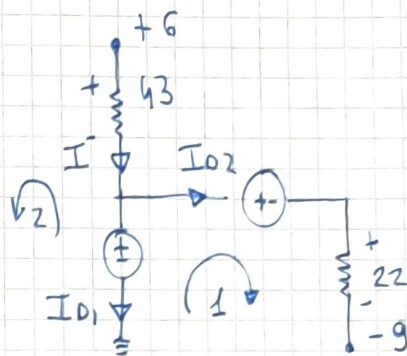
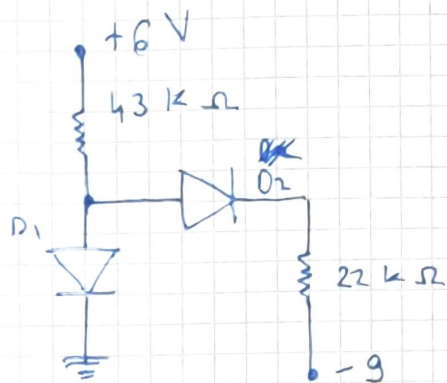
$$KVL 3: -0,75 - V_{D2} + 22 k\Omega \cdot I - 9 = 0$$

$$-V_{D2} - 9,75 = 0 \Rightarrow V_{D2} = -9,75 V$$

$$\Rightarrow Q_2 = (0 A; -9,75 V)$$

Suppongo entrambi accesi

c)



$$\text{KVL 1} \quad -0,75 + 0,75 + 22I_{02} - 9 = 0$$

$$I_{02} = \frac{9}{22} = 0,409 \text{ mA} = 409 \mu\text{A}$$

$$\text{KAL} \quad +I - I_{01} - I_{02} = 0 \quad I = I_{01} + I_{02}$$

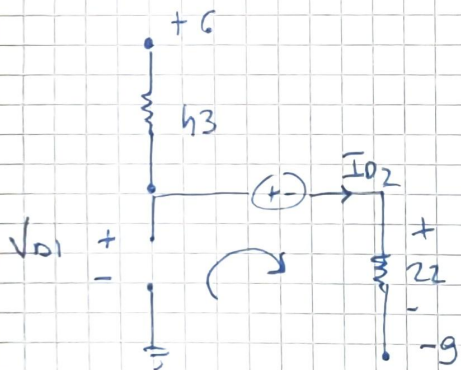
$$\text{KVL 2:} \quad -0,75 - 43(I) + 6 = 0$$

$$-0,75 - 43(I_{01} + I_{02}) + 6 = 0$$

$$5,25 = 43(I_{01} + I_{02})$$

$$I_{01} + I_{02} = \frac{5,25}{43 \text{ k}\Omega} \rightarrow I_{01} = 122 \mu\text{A} - I_{02} = 122 - 409 = -287 \mu\text{A}$$

Verificare V_{01} ← ≤ 0 Di è spento c.a.



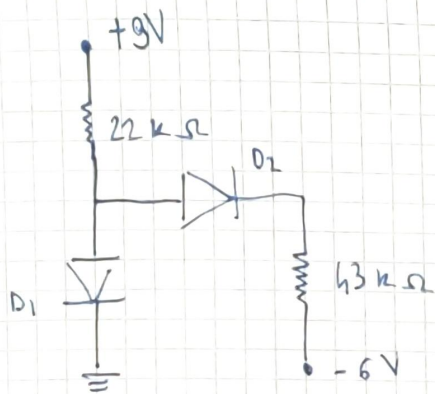
$$\text{KVL} \quad -V_{01} + 0,75 + 22 \text{ k}\Omega I_{02} - 9 = 0$$

$$V_{01} = -8,25 + 8,998 = 0,748 \text{ V} = 748 \text{ mV}$$

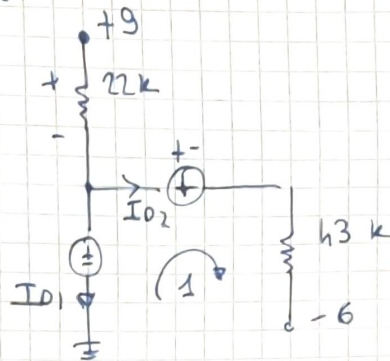
$$\Rightarrow Q_1 = (0 \text{ A}; 748 \text{ mV}); \quad Q_2 = (409 \mu\text{A}; 0,75 \text{ V})$$

d) metti page

d)



Suppongo entrambi accesi



KVL 1 $-0,75 + 0,75 + 43k\Omega \cdot I_{D2} - 6 = 0$

$$I_{D2} = \frac{6}{43k\Omega} = 140 \mu A$$

Rango Rango verticale $9 = (22k\Omega)(I_{D1} + I_{D2}) + 0,75 = 0$

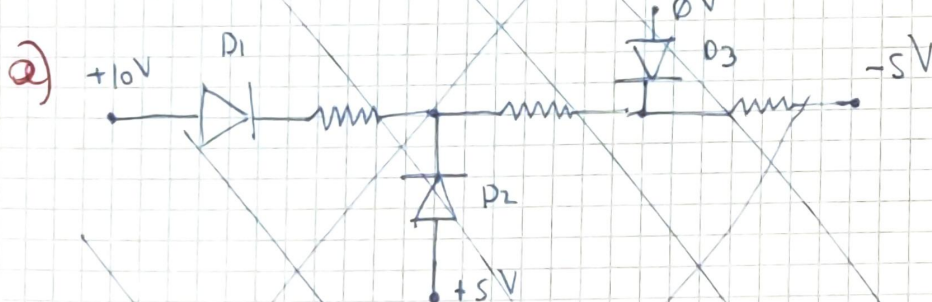
$$\frac{9 - 0,75}{22k\Omega} = I_{D1} + I_{D2}$$

$$375 \mu A - I_{D2} = I_{D1} \rightarrow I_{D1} = 375 - 140 = 235 \mu A$$

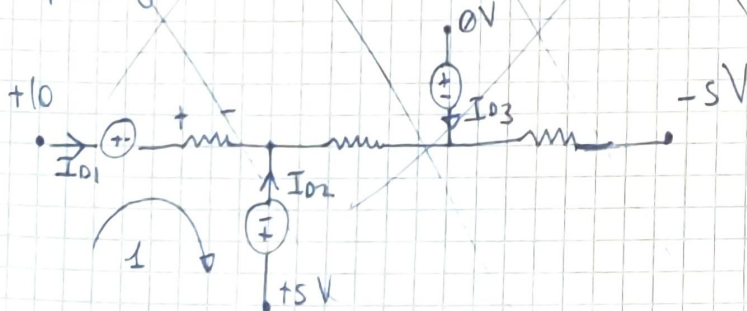
$Q_1 = (235 \mu A; 0,75 V)$ $Q_2 = (140 \mu A; 0,75 V)$

3,72 Determinare punto di lavoro dei diodi usando modello a caduta di tensione costante $V_{on} = 0,75 V$

Tutte le resistenze $R = 15 k\Omega$



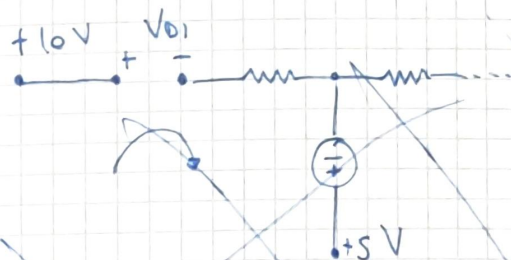
Suppongo tutti i diodi accesi



KVL 1: $10 + 0,75 + R I_{D1} - 0,75 + 10 + 0,75 + R I_{D1} - 0,75 + 5 = 0$

$$15 + R I_{D1} = 0$$

$$I_{D1} = \frac{-15}{15k\Omega} = -1\mu A \rightarrow \underline{I_{D1} = 0} \quad \text{Diode spento}$$



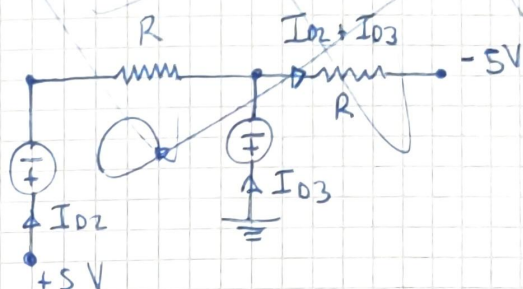
$$10 + V_{D1} - 0,75 + 5 = 0$$

$$V_{D1} = -14,25 V$$

$$Q_1 = (0 A; -14,25 V)$$

polarizzato indirettamente (inverted A.)

LAVORO SU Q2

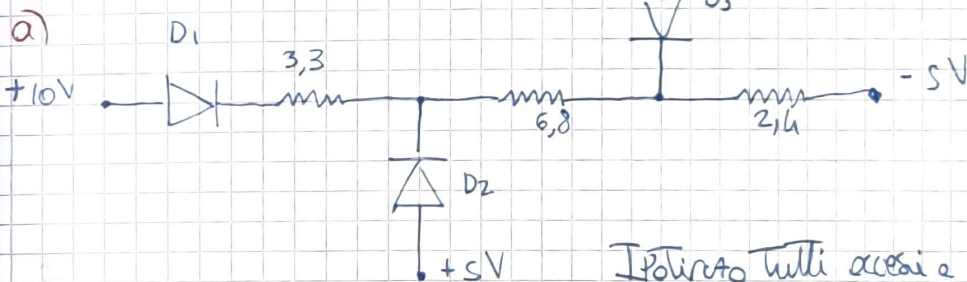


$$+5 + 0,75 + R I_{D2} - 0,75 = 0$$

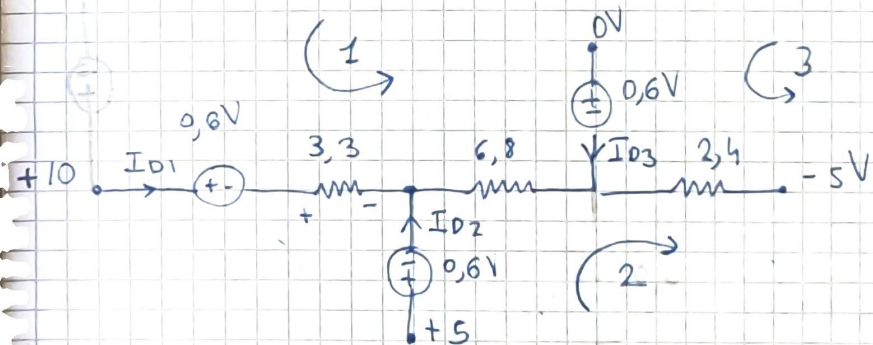
$$I_{D2} = 0$$

3.74 Punto di lavoro dei diodi con modello a caduta di tensione costante con $V_{om} = 0,6V$

Resistenze espresse in $k\Omega$



Ipotizzo tutti accesi e sostituirli a tutti le modello



$$+10 + 0,6 + 3,3 I_{D1} - 0,6 + 5 = 0$$

$$15 + 3,3 I_{D1} = 0$$

$$I_{D1} = \frac{-15}{3,3} = -4,545 mA$$

$$\text{EVL 1: } +10 + 0,6 + 3,3 I_{D1} - 0,6 + 5 = 0 \rightarrow 15 + 3,3 I_{D1} = 0$$

$$\text{EVL 2: } +5 + 0,6 + 6,8 (I_{D1} + I_{D2}) - 0,6 = 0 \rightarrow 5 + 6,8 (I_{D1} + I_{D2}) = 0$$

$$\text{EVL 3: } +0,6 + 2,4 (I_{D1} + I_{D2} + I_{D3}) - 5 = 0$$

$$\text{KVL 1} \quad -10 + 0,6 + 3,3I_{D1} + 6,8(I_{D1} + I_{D2}) - 9,6 = 0$$

$$+ 6,8(I_{D1} + I_{D2}) + 3,3I_{D1} - 10 = 0$$

$$10,1 I_{D1} + 6,8 I_{D2} = 0$$

$$\text{KVL 2} \quad -5 + 0,6 + 6,8(I_{D1} + I_{D2}) + 2,4(I_{D1} + I_{D2} + I_{D3}) - 5 = 0$$

$$-9,4 + 6,8I_{D1} + 6,8I_{D2} + 2,4I_{D1} + 2,4I_{D2} + 2,4I_{D3} = 0$$

$$-9,4 + 9,2I_{D1} + 9,2I_{D2} + 2,4I_{D3} = 0$$

$$\text{KVL 3} \quad 0,6 + 2,4I_{D1} + 2,4I_{D2} + 2,4I_{D3} - 5 = 0$$

$$2,4I_{D1} + 2,4I_{D2} + 2,4I_{D3} - 4,4 = 0$$

$$10,1 I_{D1} = -6,8 I_{D2}$$

$$I_{D1} = -0,67 I_{D2}$$

$$-9,4 + 9,2(-0,67 I_{D2}) + 9,2I_{D2} + 2,4I_{D3} = 0$$

$$-9,4 - 6,16 I_{D2} + 9,2I_{D2} + 2,4I_{D3} = 0$$

$$-9,4 + 3,04 I_{D2} + 2,4I_{D3} = 0$$

$$3,04 I_{D2} = +9,4 - 2,4I_{D3}$$

$$I_{D2} = \frac{9,4}{3,04} - \frac{2,4}{3,04} I_{D3}$$

$$I_{D2} = 3,09 - 0,79 I_{D3}$$

allora $I_{D1} = -0,67 [3,09 - 0,79 I_{D3}] =$

$$I_{D1} = -2,07 + 0,53 I_{D3}$$

Da KVL3

$$2,4 [-2,07 + 0,53 I_{D3}] + 2,4 [3,09 - 0,79 I_{D3}] + 2,4 I_{D3} - 4,4 = 0$$

$$-4,97 + 1,27 I_{D3} + 7,42 - 1,9 I_{D3} + 2,4 I_{D3} - 4,4 = 0$$

$$1,77 I_{D3} - 1,95 = 0$$

$$I_{D3} = \frac{1,95}{1,77} = 1,10 \text{ mA}$$

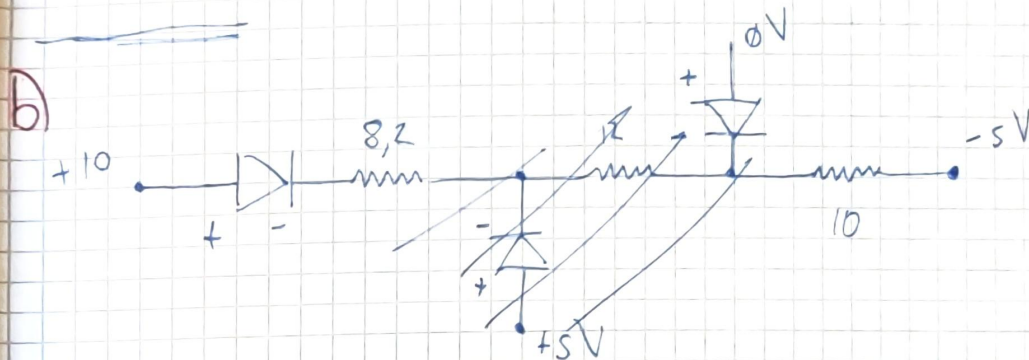
allora

$$I_{D2} = 3,09 - 0,79 \cdot 1,10 = 2,22$$

$$I_{D1} = -2,07 + 0,53 \cdot 1,10 = -1,20$$

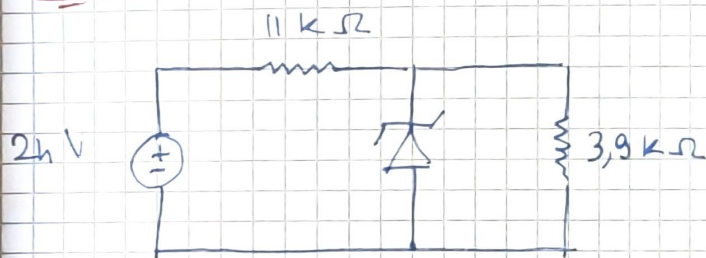
$$\begin{cases} I_{D1} = -1,2 \text{ mA} \\ I_{D2} = 2,22 \text{ mA} \\ I_{D3} = 1,10 \text{ mA} \end{cases}$$

NO! (bestimmte!)



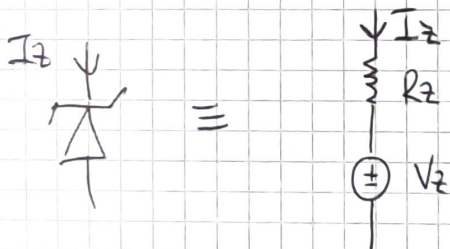
Analisi diodi polarizzati nella regione di rottura

3,78 Determinare p.t.o lavoro del diodo Zener



$$\begin{aligned} V_Z &= 4V \\ R_Z &= 0 \end{aligned}$$

Richiamare Diodo Zener

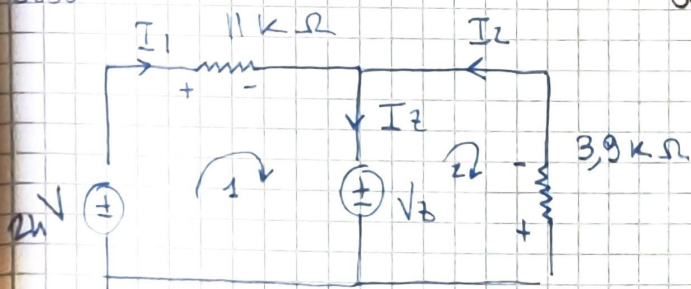


Il modello del diodo Zener è valido solo in regione di rottura

È in rottura se $I_Z > 0$

(In scene con senso opposto in cui la corrente di un normale diodo dovrebbe scorrere)

Allora



$$\bullet Q_Z = (I_Z, V_Z) \text{ OBIETTIVO}$$

$$\bullet \text{KVL 1: } -24 + 11 I_1 + V_Z = 0$$

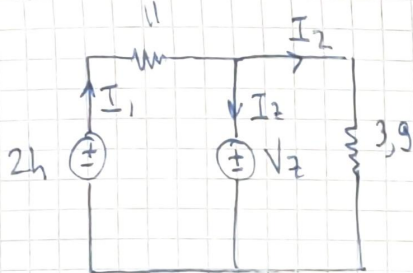
$$11 I_1 = 24 - V_Z = 20$$

$$I_1 = \frac{20}{11k} = 1,81 \text{ mA}$$

$$\bullet \text{KVL 2: } -V_Z - I_Z \cdot 3,9 = 0$$

$$I_Z = \frac{-4}{3,9k} = -1,37 \text{ mA} \text{ Ha verso opposto}$$

Quindi



Ho corretto il senso di I_2

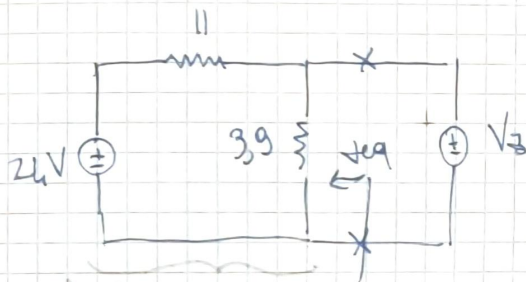
$$I_1 = 1,81 \text{ mA}; \quad I_2 = 1,37 \text{ mA}$$

$$\text{KCL: } -I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_3 = I_1 - I_2 = 1,81 - 1,37 = 0,44 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow Q_2 = (0,44 \text{ mA}; 4 \text{ V}) \quad \underline{\text{NO!}}$$

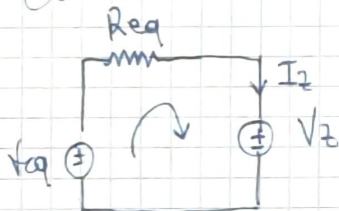
Il libro fa, inizialmente, il calcolo di V_{eq} e R_{eq} .
METODO LIBRO



$$V_{eq} = 24 \frac{3,9}{3,9 + 11} = 6,28 \text{ V}$$

$$R_{eq} = \frac{11 \cdot 3,9}{11 + 3,9} = 3,88 \text{ k}\Omega$$

Quindi



$$-V_{eq} + R_{eq} I_2 + V_z = 0$$

$$R_{eq} I_2 = V_{eq} - V_z$$

$$I_2 = \frac{6,28 - 4}{3,88 \cdot 10^3} = 0,792 \text{ mA} \approx 792 \mu\text{A}$$

$$I_2 > 0 \Rightarrow \underline{\text{Zener è in regione di rottura}} \Rightarrow Q_2 = (792 \mu\text{A}; 4 \text{ V}) \quad \underline{\underline{\text{SÌ}}}$$

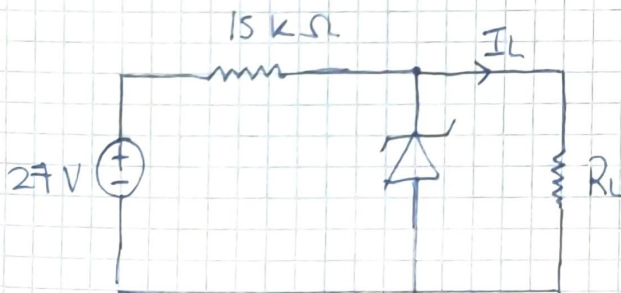
DIODO ZENER

3.80

a) valore massimo di I_L che può essere erogato dal regolatore di tensione Zener se questo mantiene tensione costante in uscita.

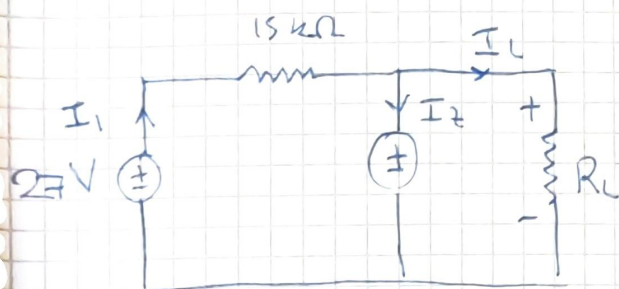
b) Valore minimo di R_L per il quale la tensione di uscita può essere ancora regolata

$$V_z = 9 \text{ V}; \quad R_z = 0 \Omega$$



Sostituisci modello del diodo Zener.

Condiz. di rottura dello Zener, $I_Z > 0$



$$-27 + V_Z + 15 I_1 = 0$$

$$I_1 = \frac{27 - 9}{15 \text{ k}\Omega} = 1,2 \text{ mA}$$

KCL: $+I_Z + I_L - I_1 = 0$

$$I_Z = I_1 - I_L \quad \text{pongo } I_Z > 0 \quad I_1 - I_L > 0$$

$$I_L < I_1$$

$$I_L < 1,2 \text{ mA} \quad \text{valore massimo } I_L$$

b) $V_{RL} = V_Z = 9V$

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L}$$

$$R_L = \frac{V_Z}{I_L} = 7,5 \text{ k}\Omega$$

⇒ valore minimo di R_L t.c. la tensione di uscita può essere regolata

$$R_L > 7,5 \text{ k}\Omega \quad \text{ML PERCHÉ?}$$

3,81

Dissipazione di POTENZA del diodo Zener dell'es. precedente per $R_L \rightarrow \infty$

$$R_L \rightarrow \infty \Rightarrow R_L \text{ diventa un c.a.} \Rightarrow I_L = 0$$

$$\Rightarrow I_Z = I_1 = 1,2 \text{ mA}$$

$$P_Z = V_Z \cdot I_Z = 9 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 10,8 \text{ mW}$$

OK

Raddrizzatore a Semiconda

3,86 Un diodo ha:

• corrente di satur. inversa $I_s = 1 \text{ mA}$, $m = 2$

RICH: Qual è la caduta di tensione diretta in corrispondenza di una corrente di picco di $48,6 \text{ A}$?

$$I_D = 48,6 \text{ A}$$

RICH: V_D

$$I_D = I_s \left[e^{+\frac{V_D}{mV_T}} - 1 \right] \Rightarrow V_D = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_D}{I_s} \right)$$

$$\text{Allora } V_D = 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[1 + \frac{48,6}{10^{-3}} \right] = 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 24,61 = 1230,34 \text{ mV} \\ \approx 1,23 \text{ V}$$

3,87 Diodo

$$I_{DSS} = 10 \text{ mA}$$

$$m = 1,6$$

RICH: a) Caduta di tensione diretta V_D
con una corrente di picco $I_D = 100 \text{ A}$

b) Dissipazione di potenza nel diodo in un raddrizzatore a semiconda operante a 60 Hz se la resistenza serie è di $10 \text{ m}\Omega$ e l'intervallo di conduzione è di 1 ms .

$$a) I_D = I_{DSS} \left(e^{\frac{V_{Dm}}{mV_T}} - 1 \right) \quad \frac{I_D}{I_{DSS}} + 1 = e^{\frac{V_{Dm}}{mV_T}}$$

$$\ln \left(\frac{I_D}{I_{DSS}} + 1 \right) = \frac{V_{Dm}}{mV_T} \Rightarrow V_{Dm} = mV_T \ln \left(\frac{I_D}{I_{DSS}} + 1 \right)$$

$$V_{Dm} = 1,6 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{100}{10 \cdot 10^{-3}} + 1 \right) = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 23,03 = 921,2 \text{ mV}$$

$$V_{Dm} = 0,92 \text{ V} \Rightarrow V_D = V_{Dm} + I_D R_s = 0,92 \text{ V} + 100 \cdot 0,01 \Omega = 1,92 \text{ V}$$

b) Raddrizzatore a Semiconda

- V_T tensione di ondulazione
- ΔT intervallo di conduzione poiché il diodo conduce solo in questo piccolo intervallo di tempo.
- θ_c angolo di conduzione (intervallo di fase equivalente)

$$\Delta T = 1 \text{ ms}$$

$$T = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 0,0166 \text{ sec} = 16,6 \text{ ms}$$

$$I_{DC} = \frac{I_p \Delta T}{2T} \quad I_p = 100A \quad I_{DC} \approx 3A$$

Quindi

$$P_{\text{junction}} = V_{ON} \cdot I_{DC} = V_{ON} \frac{I_p \Delta T}{2T} = 0,92 \cdot \frac{100 (1 \text{ ms})}{2 \cdot 16,6 \text{ ms}} = 0,92 \cdot 3,01 = 2,75 \text{ W}$$

$$P_R = \frac{4}{3} \frac{T}{\Delta T} I_{DC}^2 R_s =$$

$$= \frac{4}{3} \frac{16,6}{1} (3)^2 \cdot 0,01 = 2 \text{ W}$$

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{junction}} + P_R = 2,75 + 2 = 4,75 \text{ W}$$

Revisare potenza dissipazione a semiondu

IPOTESI: Come ai capi del diodo è costante $v(t) = V_{ON}$
Si ha quindi, la potenza dissipata dal diodo

$$P_D = V_{ON} I_{DC} = V_{ON} I_{DC} \frac{\Delta T}{2T}$$

Poi i diodi hanno una piccola resistenza interna R_s e anche questa può dissipare potenza

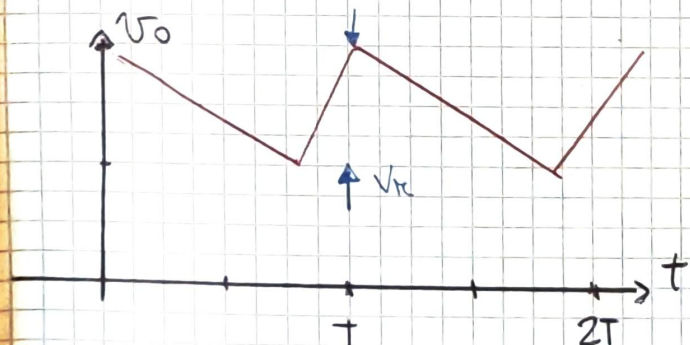
$$P_R = \frac{4}{3} \frac{T}{\Delta T} I_{DC}^2 R_s$$

$$\Rightarrow P_{\text{tot}} = P_D + P_R$$

3.88 DATI

$$V_{TC} = 5\% \text{ di } V_p - V_{ON} = 18V$$

RICHIESTA: valore reale della componente continua della forma d'onda della tensione di uscita del grafico



$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \left[(V_p - V_{TC})T - \frac{T V_{TC}}{2} \right]$$

$$V_{DC} = \left[(V_p - V_{TC}) - \frac{0,05(V_p - V_{TC})}{2} \right] = (V_p - V_{TC}) [1 - 0,025] = (V_p - V_{TC}) 0,975$$

$$V_{DC} = (18) \cdot 0,975 = 17,6V$$

ELETRONICA

MOD.1

ESERCIZIO 3

PignaColours



Caratteristiche di Trasferimento e Transizioni a Svuotamento

4,36 $k_m = 250 \mu A/V^2$ $V_{DS} = 6V$
 $V_{TH} = -2V$ a) Calcolo i_D
 $\lambda = 0$ b) // i_D con $\lambda = 0,03V$
 $V_{GS} = 5$

già fatto nel quaderno precedente

4,37 NMOS a svuotamento parallelo. con $V_{GS} = V_{DS} > 0$
 Reg. di funzionamento?

Ho che $V_{GS} > 0 \Rightarrow V_{GS} > V_{TH}$ quindi è Triodo oppure SAT.

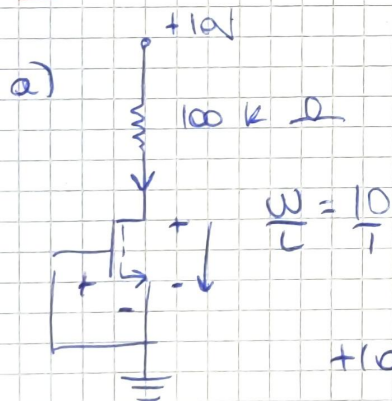
Condiz. reg. lin. $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{TH})$ NO

~~reg. SAT: $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH})$ SÌ $\Rightarrow$ SAT.~~

$V_{TH} < 0$

$\Rightarrow V_{DS} \leq (V_{GS} - (-V_{TH})) \rightarrow V_{DS} \leq V_{GS} + V_{TH} \Rightarrow$ REG. LINEARE

4,39 $V_{TH} = -2V$



Rich.

1) Calcolo i_D

2) // i_D con $R = 50k\Omega$ e $W/L = 20/1$

$k_m = k_m' \frac{W}{L} = 100 \cdot 10^{-6} \frac{10}{1} = 1000 \mu A/V^2 = 1 mA/V^2$

$+10 = (100k\Omega) i_D + V_{DS}$

Suppongo SATURAZ: $\Rightarrow V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH})$

pongo $V_{GS} = 2V \Rightarrow V_{DS} \geq 4V \Rightarrow$ ~~non si verifica~~ pongo $V_{GS} = 5V$,

allora

$(100k\Omega) i_D = 10 - V_{DS} = 5 \rightarrow i_D = \frac{5}{100 \cdot 10^3} = 0,05 mA$

Riprovare

$i_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} (2+2)^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 16 = 8 mA$

maglio uscita $10 = R i_D + V_{DS}$

$$R i_D = 10 - V_{DS} \rightarrow i_D = \frac{10 - V_{DS}}{R}$$

Saturazione $V_{DS} > (V_{DS} - V_{TH})$
 $> (1)$

$$i_D = \frac{k_n}{2} (V_{DS} - V_{TH})^2 = \frac{k_n}{2} \Rightarrow \frac{10 - V_{DS}}{R} = \frac{k_n}{2}$$

$$10 - V_{DS} = \frac{R}{2} k_n \quad -V_{DS} = \frac{R}{2} k_n - 10$$

$$V_{DS} = 10 - \frac{R}{2} k_n = 10 - \frac{1}{2} 100 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 10 - 100 = -90V$$

ma non è possibile perché si ha un generatore di +10V.

Alcuni

Suppongo Regione lineare

$$i_D = \frac{10 - V_{DS}}{R} ; \quad i_D = k_n (V_{DS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$$

Si risolve come esercizio precedente

Effetto body

4.12 Effetto body

Per $V_{SB} = 0$ MOSFET si comporta come un dispositivo a 3 terminali (come di normale)

- Se $V_{SB} \neq 0 \Rightarrow$ c'è EFFETTO BODY $\rightarrow$ La transconduttanza dipende anche da V_{SB} che dipende a sua volta da V_{TH}

$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

↑
 Misure tensione di soglia dell'effetto body

↑
 Tensione di soglia quando $V_{SB} = 0$.

NMOS

$$W/L = 16,8/1$$

$$2\mu_F = 0,75 \text{ V}$$

$$V_{TO} = 1,5 \text{ V}$$

$$\gamma = 0,5 \sqrt{\text{V}}$$

$$V_{SB} = 4 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 2 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 5 \text{ V}$$

RICH:

a) Calcolo i_D

b) " i_D per $V_{DS} = 0,5 \text{ V}$

Calcolo la nuova Tensione di soglia perché $V_{SB} \neq 0$

$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\mu_F} - \sqrt{2\mu_F} \right) =$$

$$= 1,5 + 0,5 \left(\sqrt{4 + 0,75} - \sqrt{0,75} \right) =$$

$$= 1,5 + 0,5 (0,94) \approx 1,97 \text{ V} \quad \text{SI È ALZATA LA TENSIONE DI SOGLIA}$$

$$K_M = K_M' \frac{W}{L} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 16,8 = 1,68 \text{ mA/V}^2$$

Reg. sottrazione?

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$$

$$5 \geq 2 - 1,97$$

$$= 0,03$$

SÌ

SET

$$i_D = \frac{K_M}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{1,68 \cdot 10^{-3}}{2} (2 - 1,97)^2 \approx 7,56 \cdot 10^{-7} = 75,6 \mu\text{A}$$

$$V_{DS} < V_{TH} \rightarrow 2 < 1,97 \text{ V} \Rightarrow \text{INTERDIZIONE} \Rightarrow i_D = 0$$

b) IC RESISTIVO, cioè lo stato di interdizione, non dipende da V_{DS}

4,43 NMOS

$$W/L = 8$$

$$2\mu_F = 0,6 \text{ V}$$

$$V_{TO} = 1 \text{ V}$$

$$\gamma = 0,7 \sqrt{\text{V}}$$

$$V_{SB} = 3 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 3,5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 5 \text{ V}$$

RICH:

a) Calcolo i_D

b) " i_D con $V_{DS} = 0,5 \text{ V}$

$V_{SB} \neq 0 \Rightarrow$ Effetto body $\rightarrow$ Calcolo la nuova V_{TH}

$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\mu_F} - \sqrt{2\mu_F} \right) =$$

$$= 1 + 0,7 \left(\sqrt{3 + 0,6} - \sqrt{0,6} \right) \approx 1,79 \text{ V}$$

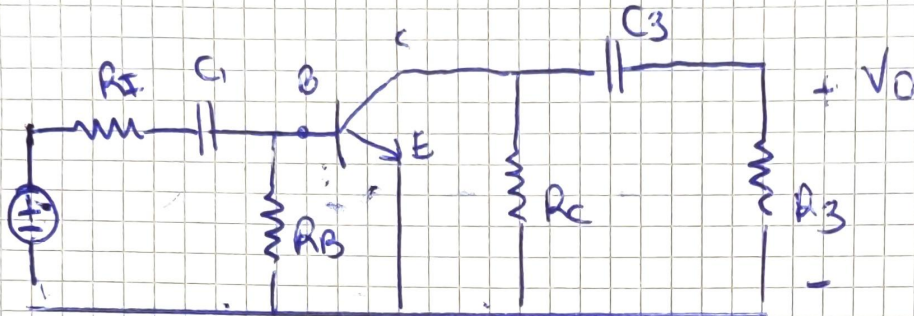
ELETRONICA
MOD 1
ESERCIZI Q. 4



ELETTRONICA 1

Resistenza di ingresso e di uscita degli amplificatori CE e CS

13.107 CE, circuito eq. in AC amplif.



$C \rightarrow \infty$

$$R_i = 750 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 100 \text{ k}\Omega$$

$$\beta_0 = 100$$

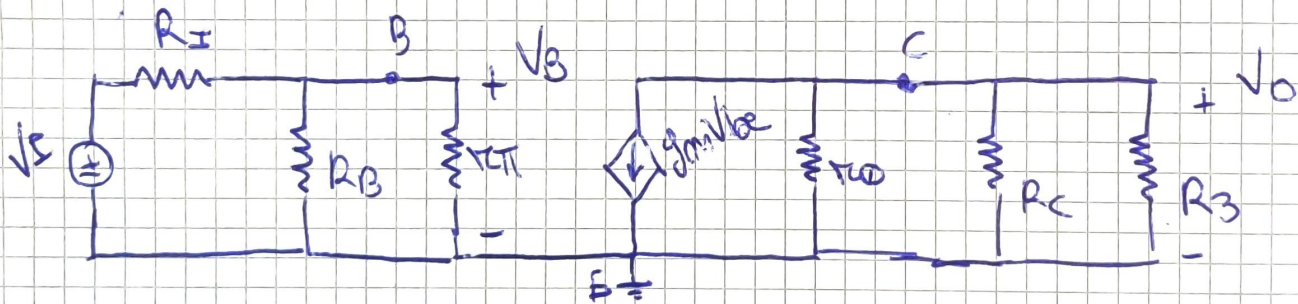
$$V_A = 7.5 \text{ V}$$

$$Q = (50 \mu\text{A}; 10 \text{ V})$$

Rich: Resistenza ingresso e
resistenza in uscita

Resistenza in ingresso $\equiv$ Resistenza vista dal Terminale B
 $\Rightarrow R_{in} = \frac{V_B}{i_B}$

Sostituisco modello a piccoli segnali



$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{50 \mu\text{A}}{0.025} = 2000 \mu\text{A} = 2 \text{ mS}$$

$$r_{e\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{100}{2 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$r_{co} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} = \frac{7.5 + 10}{50 \cdot 10^{-6}} = 37 \text{ k}\Omega$$

$$R_{in} = R_B // R_{E\pi} = \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} = 33.3 \text{ k}\Omega$$

• Resistenza in uscita $\equiv$ Resistenza vista dal Terminale C MA
SENZA IL CARICO!!

$$R_o = r_o \parallel R_c = \frac{1700 \cdot 100}{1700 + 100} = 94,4 \text{ k}\Omega$$

OK

13.108

Max e min della R_{in} e R_o del problema precedente
 se $60 \leq \beta_o \leq 100$ con α invariato.

$\beta_o = 100$ già calcolato nell'es. prec.

$\beta_o = 60$

$$r_{\pi \text{ min}} = \frac{60}{g_m} = \frac{60}{2 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ k}\Omega$$

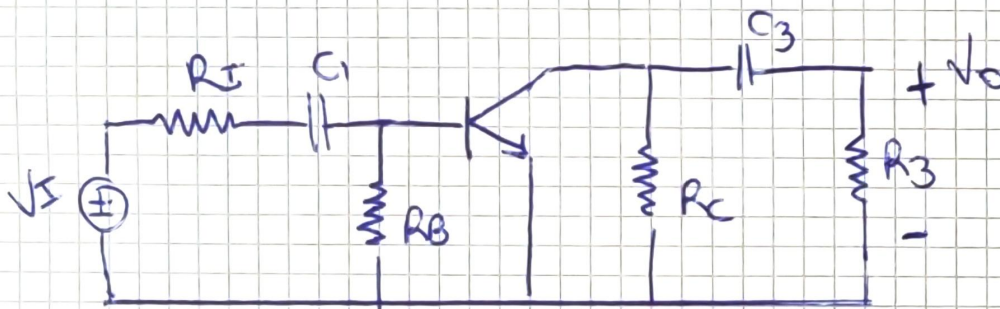
$\Rightarrow R_o$ resta invariata

$$R_{in \text{ min}} = R_B \parallel r_{\pi \text{ min}} = \frac{100 \cdot 30}{100 + 30} \approx 23 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow 23 \text{ k}\Omega \leq R_{in \text{ min}} \leq 33,3 \text{ k}\Omega$$

OK

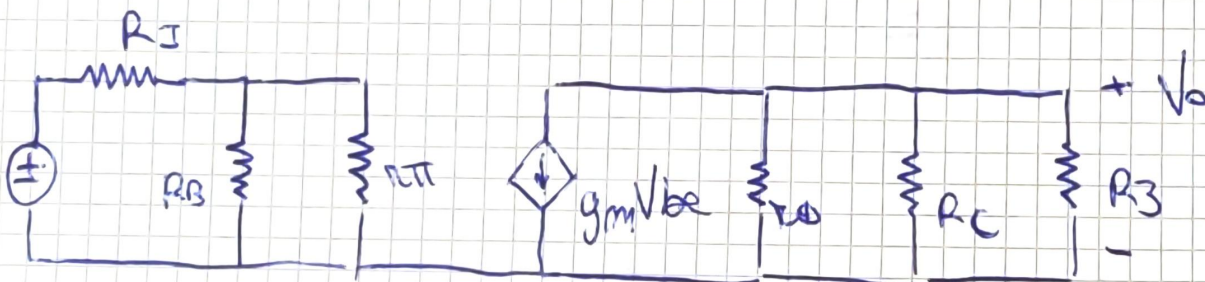
13.109



$C \rightarrow \infty$
 $R_I = 10 \text{ k}\Omega$
 $R_B = 5 \text{ M}\Omega$
 $R_C = 1,5 \text{ M}\Omega$
 $R_L = 3,3 \text{ M}\Omega$
 $\alpha = (4 \mu\text{A}; 1,5\text{V})$
 $\beta_o = 100$
 $V_A = 50\text{V}$

Rich: R_{in} , R_{out}

Modello piccolo segnale



$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = \frac{10^{-6}}{0,025} = 4,10^{-5} S = 410 \mu S$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta_0}{g_{m1}} = \frac{100}{410 \cdot 10^{-6}} = 243,9 \text{ k}\Omega$$

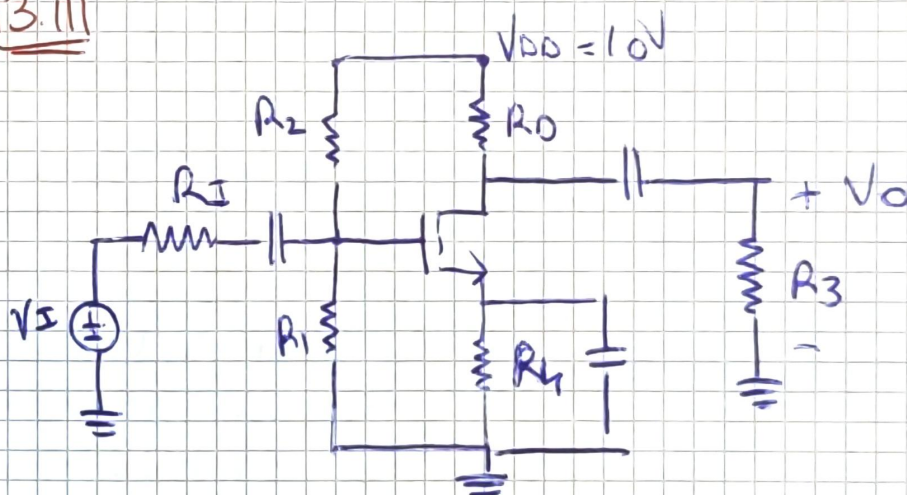
$$r_{o1} = \frac{V_A}{I_{C1}} = \frac{50}{10^{-6}} = 50 \text{ M}\Omega$$

$$R_{in1} = r_{\pi 1} \parallel R_B = \frac{243,9 \cdot 1}{1 + 1} = 121,95 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = r_{o1} \parallel R_C = \frac{50 \cdot 1,5}{50 + 1,5} = 1,45 \text{ k}\Omega$$

OK

13.111



$$R_I = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 430 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 560 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 43 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 100 \text{ k}\Omega$$

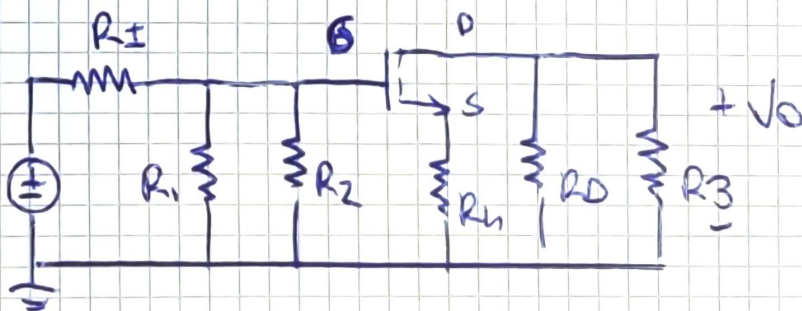
$$\beta_{DC} = 0,5 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TH} = 1 \text{ V}$$

$$\lambda = 0,0133 \text{ V}^{-1}$$

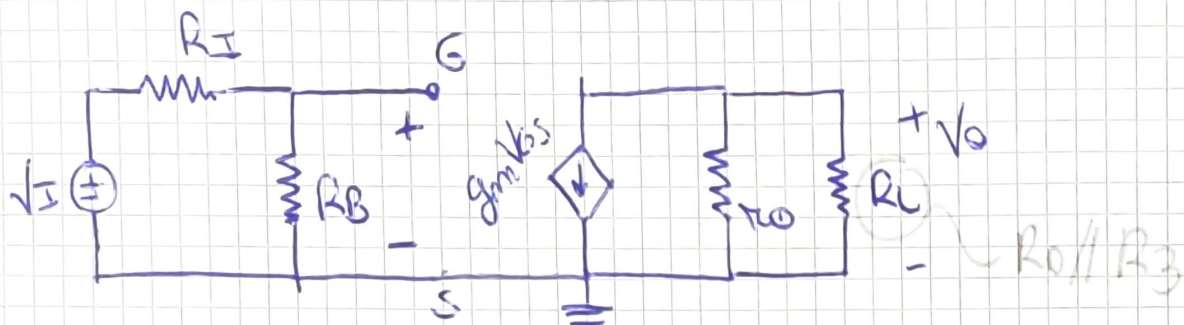
RICH: R_{in}, R_{out}

Modello piccolo segnale $\leftarrow$ c.c. $\Rightarrow$ c.c. acim. V_{DD} a Terra



$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{430 \cdot 560}{430 + 560} = 243,95 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = R_C \parallel R_L = \frac{43 \cdot 100}{43 + 100} = 30 \text{ k}\Omega$$



$$R_{in} = R_B$$

$$R_{out} = r_{o0} || R_0$$

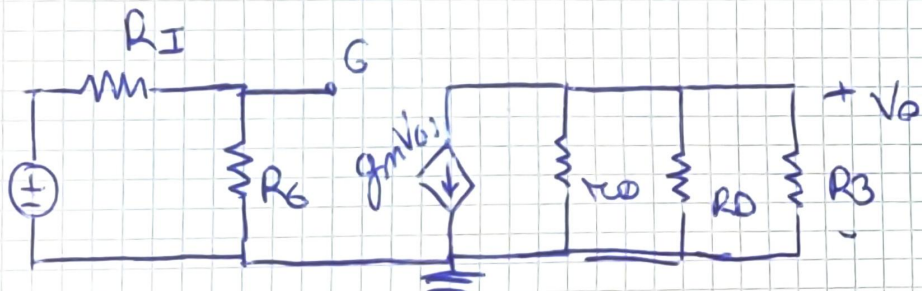
$$r_{o0} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,0133 \cdot 130 \cdot 10^{-6}} = 578,37 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = \frac{578,37}{578,37 + 43} = 110 \text{ k}\Omega \quad \underline{\underline{0,12}}$$

13.113 / 13.112

Quali sono i valori estremi per la resistenza di ingresso e uscita del problema 13.98 se $200 \leq k_m \leq 700 \mu\text{A/V}^2$?

Assumere $\lambda = 0,02$



RICH: R_{in}, R_{out}

$$R_I = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = 6,8 \text{ M}\Omega$$

$$R_0 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 120 \text{ k}\Omega$$

$$Q = (100 \mu\text{A}; 5 \text{ V})$$

$$k_m = 500 \mu\text{A/V}^2$$

$$\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$$

$$R_{in} = R_G$$

calcolo R_{out}

$$R_{out} = r_{o0} || R_0$$

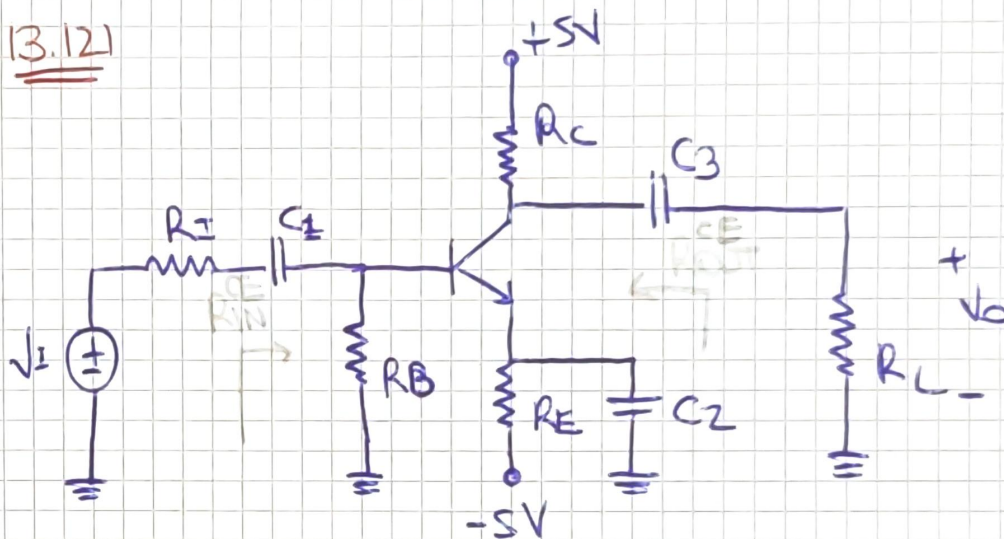
$$r_{o0} = \frac{1/\lambda + V_{DS}}{I_D} = \frac{1/0,02 + 5}{100 \cdot 10^{-6}} = 0,55 \text{ M}\Omega = 550 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_o // R_L = \frac{550 \cdot 50}{550 + 50} = 45,83 \text{ k}\Omega$$

R_{in} e R_{out} sono INDIPENDENTI da R_m .

Esempi amplificatori a emettitore comune e Source Common

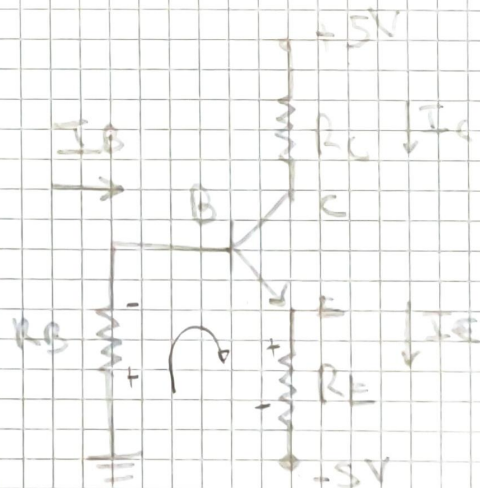
13.121



$$\begin{aligned} R_I &= 330 \Omega \\ R_B &= 10 \text{ k}\Omega \\ R_E &= 1,6 \text{ k}\Omega \\ R_C &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_L &= 220 \text{ k}\Omega \\ \beta_F &= 65 \\ V_A &= 50 \text{ V} \end{aligned}$$

RICH: A_v , R_{in} , R_{out}

• Analisi in DC: Trovare punto di lavoro



KVL

- $+R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - 5 = 0$
- $5 = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - 5 = 0$

IPOTESI RDD $\left\{ \begin{array}{l} V_{BE} \approx 0,7 \\ V_{CE} > V_{BE} \\ V_{BC} < -0,7 \end{array} \right. \quad V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

$$I_C = \beta_F I_B$$

1.

$$R_B I_B + 0,7 + R_E (\beta_F + 1) I_B - 5 = 0$$

$$I_B [R_B + R_E (\beta_F + 1)] = -0,7 + 5$$

$$I_B = \frac{4,3}{[10 + 1,6(66)] \cdot 10^3} = \frac{4,3}{115,6 \cdot 10^3} = 3,71 \cdot 10^{-5} = 37,1 \mu\text{A}$$

$$I_E = 66 \cdot 37,1 = 2448,6 \mu\text{A} \approx 2,45 \text{ mA}$$

$$I_C = 65 \cdot 37,1 = 2411,5 \mu\text{A} \approx 2,41 \text{ mA}$$

Applica KVL 2 Trovare V_{CE}

$$5 = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - 5$$

$$10 = 10^3 \cdot 2,41 \cdot 10^{-3} + V_{CE} + 1,6 \cdot 10^3 \cdot 2,45 \cdot 10^{-3}$$

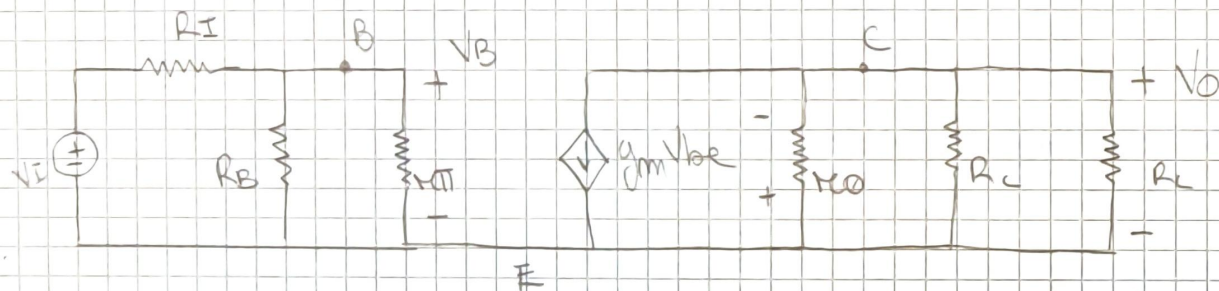
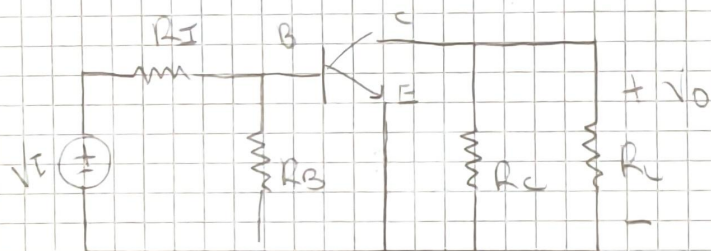
$$10 = 2,41 + V_{CE} + 3,92 \Rightarrow V_{CE} = 3,67 \text{ V}$$

Verifica RDB $V_{CE} \geq V_{BE}$ $3,67 \geq 0,7$ OK $V_{BC} = 0,7 - 3,67 = -2,97 < 0$ OK

$$\Rightarrow Q = (I_C, V_{CE}) = (2,41 \text{ mA}, 3,67 \text{ V})$$

• Analisi AC $\leftarrow$ alimentazione a massa

Sostituire Modello pic segn



$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2,41 \cdot 10^{-3}}{0,025} = 0,0964 \text{ S} \approx 96,4 \text{ mS}$$

$$r_{\pi} = \frac{V_A + V_{BE}}{I_C} = \frac{50 + 0,7}{2,41 \cdot 10^{-3}} \approx 21 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{\beta_F}{g_m} = \frac{65}{96,4 \cdot 10^{-3}} = 674 \Omega$$

• CALCOLO Δv $\Rightarrow$ TENGHIAMO PUNTO DI Q, in caso $V_A = 0$ LO TRASCIAMO

$$\Delta v = \frac{V_O}{V_I} = \frac{V_O}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_I}$$

$$r_{\pi} / R_B = \frac{674 \cdot 10 \cdot 10^3}{674 + 10 \cdot 10^3} = 631 \Omega$$

Allora

$$V_B = \sqrt{I} \frac{(r_{\pi} // R_B)}{(r_{\pi} // R_B) + R_I}$$

Ventire, ovvero V_O

$$r_{\pi} // R_B // R_I = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 10^3} + \frac{1}{10^3} + \frac{1}{220 \cdot 10^3}} = 0,950 \text{ k}\Omega \approx 950 \Omega$$

$$-V_O - g_m V_{be} (r_{\pi} // R_B // R_I) = 0$$

$$V_O = -g_m V_{be} (950)$$

$$\underline{V_B} \quad V_{be} = 0,7$$

$$A_v = \frac{V_O}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_I} = \frac{-g_m V_B (950)}{V_B} \cdot \frac{\cancel{V_B} \frac{(r_{\pi} // R_B)}{(r_{\pi} // R_B) + R_I}}{\cancel{V_B}} =$$

$$= -g_m 950 \cdot \frac{(r_{\pi} // R_B)}{(r_{\pi} // R_B) + R_I} = -96,4 \cdot 10^{-3} \cdot 950 \cdot \frac{631}{631 + 330} =$$

$$= -91,58 \cdot 0,656 \approx -60,13 \quad \sim \text{prodotto giusto ma con sbagliato}$$

• Resistenza in ingresso

$$R_{in} = r_{\pi} (1 + g_m R_E) \text{ ma } r_{\pi} \text{ è in } // R_B \text{ quindi}$$

$$R_{in} = R_B // r_{\pi} (1 + g_m R_E)$$

$$r_{\pi} (1 + g_m R_E) = 674 \cdot (1 + 90,96 \cdot 1,6 \cdot 10^3) = 104631$$

$$R_{in}' = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 104631}{10 \cdot 10^3 + 104631} = 9127,63 \Omega \Rightarrow 9,127 \text{ k}\Omega$$

• Resistenza in uscita. (non contare R_C carico)

$$R_{out} = r_{\pi} [1 + g_m (R_E // r_{\pi})] \text{ ma abbiamo anche } R_C$$

$$R_{out} = R_C // r_{\pi} [1 + g_m (R_E // r_{\pi})]$$

$$R_E // r_{\pi} = 474 \Omega$$

$$1 + g_m (R_E // r_{\pi}) = 45,69$$

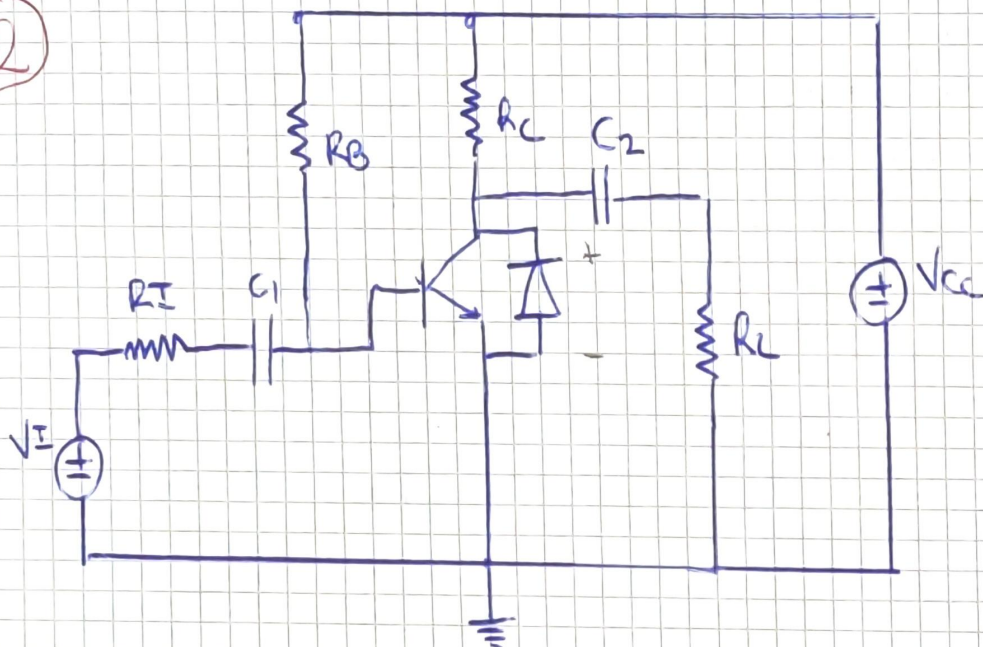
$$r_{\pi} (1 + g_m (R_E // r_{\pi})) = 959 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = 998,96 \Omega$$

OK

ESAME 22 GENNAIO 2018

2



$$\beta_F = 90$$

$$V_{CC} = 12V$$

$$R_I = 2k\Omega$$

$$R_1 = 360k\Omega$$

$$R_2 = 750k\Omega$$

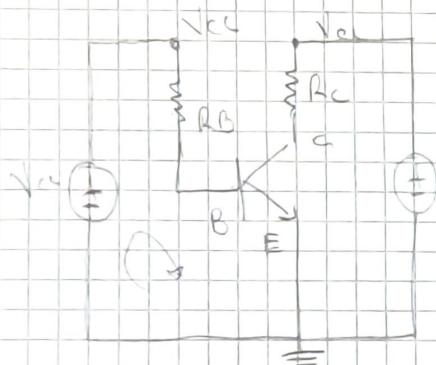
$$R_B = 8k\Omega$$

$$R_C = 4k\Omega$$

Circuito DC

RXH: Q , I_B

Punto di lavoro, circuito DC: Comptensazioni c.a.



IPOTESI RAD

$$V_{BE} \geq 0,7V$$

$$V_{CE} \geq V_{BE}$$

$$V_{BC} \leq 0,1V$$

$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$$

KVL a magrezza $-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0$

$$R_1 // R_2 = 243,24k\Omega$$

$$R_B I_B = V_{CC} - V_{BE} \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1 // R_2} = \frac{12 - 0,7}{243,24 \cdot 10^3} = 4,615 \cdot 10^{-5} A =$$

$$I_B = 46,15 \mu A$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 91 \cdot 46,15 \cdot 10^{-6} = 4,23 mA$$

$$I_C = \beta_F I_B = 90 \cdot 46,15 \cdot 10^{-6} = 4,18 mA$$

KVL uscita

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 12 - 4 \cdot 10^3 \cdot 4,18 \cdot 10^{-3} = -3,72V$$

$V_{CE} \geq V_{BE}$ NO RAD

IPOTESI SAT

$$\begin{cases} V_{BE} \approx 0,7 \\ V_{CESAT} = 0,2V \\ I_C < \beta F I_B \end{cases}$$

KVL INGR è la stessa $I_B = 46,45 \mu A$

KVL USATA

$$+V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$$

$$R_C I_C = V_{CC} - V_{CE}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{12 - 0,2}{4 \cdot 10^3} = 2,95 \text{ mA}$$

condiz. di SAT.

$$I_C < \beta F I_B \rightarrow 2,95 \text{ mA} < 90 \cdot 46,45 \mu A$$

$$4180,5$$

$$2,95 \text{ mA} < 4,180 \text{ mA} \quad \underline{\underline{OK SATURAZIONE}}$$

$$\rightarrow Q = (I_C; V_{CE})_{SAT} = (2,95 \text{ mA}; 0,2V)$$

- Essendo $V_{CE} > 0 \rightarrow$ diodo polarizzato inversamente quindi il diodo è un c.a.

$$I_E = I_C + I_B$$

③ Giunzione pn, una delle due reg. maggiormente drogata

$$N_A = \frac{10^{17}}{\text{cm}^3}$$

$$N_D = \frac{10^{20}}{\text{cm}^3}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\epsilon_{\text{campessivo}} = 80 \cdot 10^{-14} \text{ F/m}$$

potenziale di banda proibita $\approx 1,12 \text{ V} = E_G$
spessore campessivo del p-n 100 μm

RICH:

potenziale di giunzione ψ_i
estensione della reg. svuotata
da quale parte sarà maggiore? Perché?

$$n_i^2 = B \cdot T^3 e^{-\frac{E_G}{k \cdot T}}$$

IPOTESI a Temp. ambiente

$$= 10^{31} (25 + 273,15)^3 e^{-\frac{1,12}{8,62 \cdot 10^{-5} (25 + 273,15)}}$$

$$= 2,65 \cdot 10^{38} \cdot 1,18 \cdot 10^{-19} = 3,14 \cdot 10^{19}$$

• potenziale di giunzione (unimiscel)

$$\varphi_j = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0,025 \ln \left(\frac{10^{17} 10^{20}}{314 \cdot 10^{19}} \right) = 0,025 \cdot 10,30 \approx 1V$$

• estensione regione sottile

$$W_{do} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \varphi_j} = \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{20}} \right) 1} =$$

$$= \sqrt{10^6 (1,001 \cdot 10^{-17})} = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ cm} = 3,16 \mu\text{cm}$$

Calcolo lunghezza della reg n e reg p

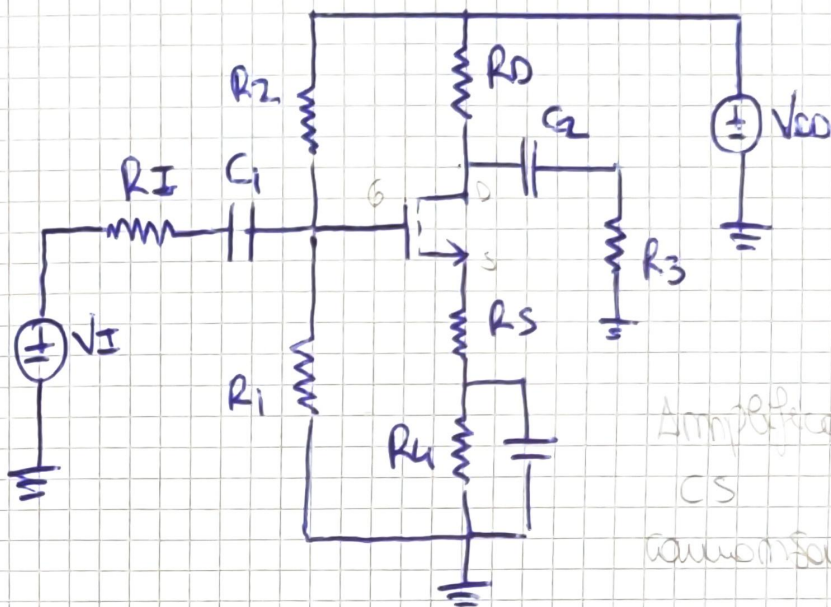
$$X_n = \frac{W_{do}}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{3,16 \cdot 10^{-6}}{1 + \frac{10^{20}}{10^{17}}} = 3,15 \cdot 10^{-9} = 3,15 \text{ mcm}$$

$$X_p = \frac{W_{do}}{1 + \frac{N_A}{N_D}} = 3,15 \cdot 10^{-6} \text{ cm} = 3,15 \mu\text{cm}$$

la parte p è più grande.



11 Settembre 2018



$$k_n = 0,5 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TH} = 1 \text{ V}$$

$$\lambda = 0,0133 \text{ V}^{-1}$$

$$Q = (0,241 \text{ mA}; 3,81 \text{ V})$$

$$R_I = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 2,2 \text{ M}\Omega$$

$$R_S = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = 22 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 10 \text{ k}\Omega$$

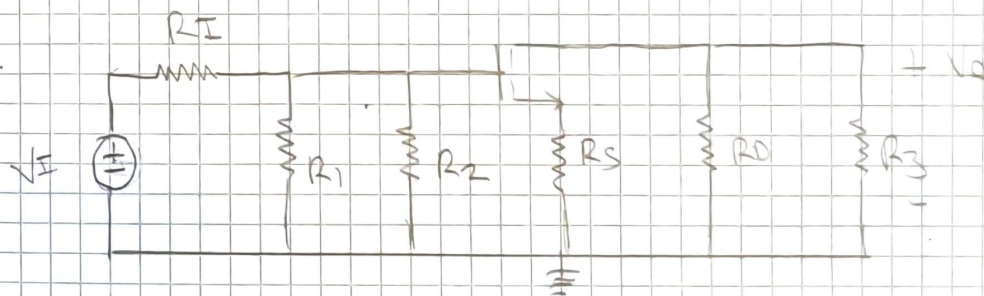
$$R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 12 \text{ V}$$

$$C_1, C_2 \rightarrow \infty$$

Rich. A_v ,
massimo valore di V_I compatibile
con l'ipotesi di funzionamento a piccoli segnali.

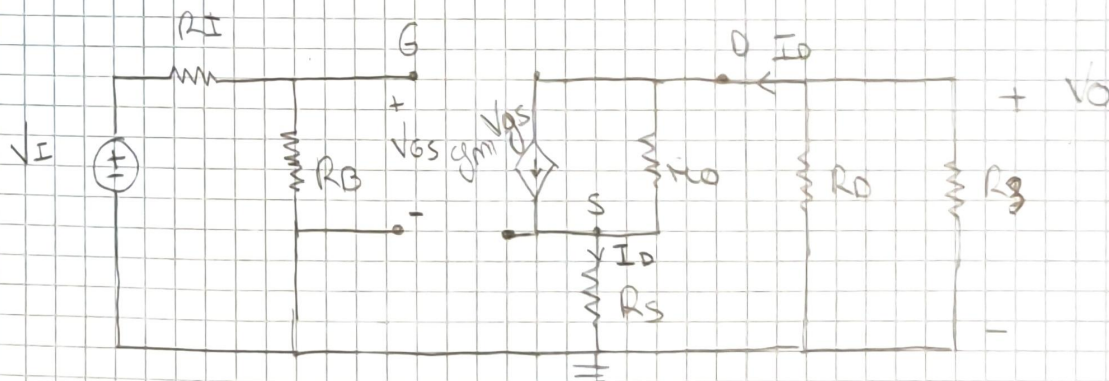
• Circuito in AC



Sostituisco modello
a piccoli segnali

$$I_D = 0,241 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = 3,81 \text{ V}$$



$$R_B = R_1 // R_2 = 0,89 \text{ M}\Omega \approx 892 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ds} = \frac{\frac{1}{\lambda} + V_{DS}}{I_D} = \frac{78,99}{0,241 \cdot 10^{-3}} = 327,79 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m1} = \sqrt{2 K_m I_0 (1 + \lambda V_{GS})} = \sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,241 \cdot 10^{-3} (1 + 0,0133 \cdot 3,81)} =$$

$$= \sqrt{2,41 \cdot 10^{-7} (1,05)} = 5,03 \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega^{-1} \approx 0,5 \text{ mS}$$

E siccome $g_{m1} = \frac{2 I_0}{V_{GS} - V_{TH}}$ $(V_{GS} - V_{TH}) g_{m1} = 2 I_0$

$$V_{GS} - V_{TH} = \frac{2 I_0}{g_{m1}}$$

$$V_{GS} = \frac{2 I_0}{g_{m1}} + V_{TH} = \frac{2 \cdot 0,241 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3}} + 1$$

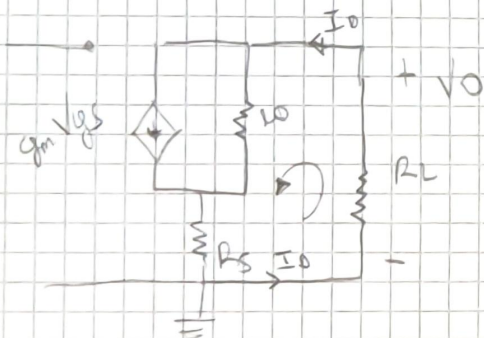
$$V_{GS} = 1,96 \text{ V}$$

$$R_L = R_D // R_S = 18 \text{ k}\Omega$$

Guadagno in Tensione $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_G} \frac{V_G}{V_i}$

$$V_G = V_i \frac{R_B}{R_B + R_i}$$

Trovare V_o



Trovare a mano V_o oppure usare la formula

$$A_v = \frac{R_B}{R_i + R_B} \left(\frac{-g_{m1} R_L}{1 + g_{m1} R_S} \right) = -2,3$$

V_G Me il guadagno A_v si è trascurato nel picco $R_L < R_D$ e quindi R_L è come se fosse un c.c. per la corrente.

Massimo valore di V_i compatibile con l'ipotesi di piccolo segnale.

$$V_i \leq 0,2 (V_{GS} - V_{TH}) (1 + g_{m1} R_S)$$

$$V_i \leq 0,2 (1,96 - 1) (1 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3)$$

$$V_{S1} \in 0,2(0,96)(2) \Rightarrow V_{S1} \leq 0,384 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{S1 \max} = 0,384 \text{ V}$$

② Transistor NMOS

$$V_{GS} = 1 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 0,1 \text{ V}$$

$$V_{TH} = 1,5 \text{ V}$$

$$\mu_m = 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

Rich: I_D , cm^2

$$W = 10 \mu\text{m}$$

$$L = 1 \mu\text{m}$$

$T_{ox} = 25 \text{ nm}$ spessore dell'ossido

$$k_m' = \mu_m C_{ox} = \mu_m \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \frac{3,9 \cdot \epsilon_0}{25 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \frac{34,53 \cdot 10^{-14}}{25 \cdot 10^{-9}} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2} \frac{1}{\text{m}} =$$

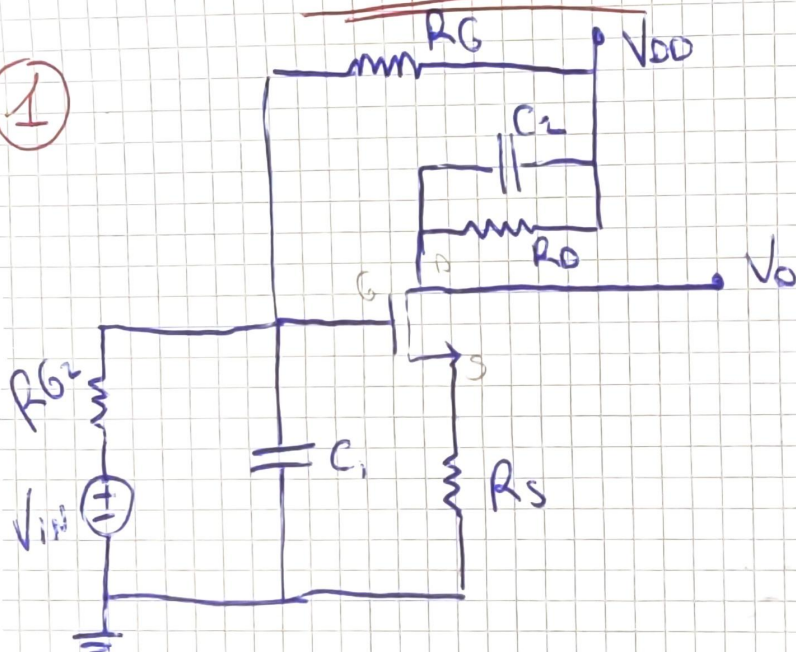
$$= 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \frac{34,53 \cdot 10^{-14}}{25 \cdot 10^{-11}} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2} = 0,691 \frac{\text{F}}{\text{Vs}} = 0,691 \text{ A/V}^2$$

1/6

Since $V_{GS} \leq V_{TH} \Rightarrow$ INTERDIZIONE $I_D = 0$

18 GIUGNO 2019

①



$$\begin{aligned} V_{TH} &= 1V \\ K_{M} &= 2 \text{ mA/V}^2 \\ g_{m1} &= 2 \text{ mS} \\ V_{DD} &= 12V \\ C_1 &= 1 \mu F \\ C_2 &= 1 \text{ mF} \\ R_G &= 30 \text{ k}\Omega \\ R_D &= 5 \text{ k}\Omega \\ R_{G2} &= 10 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Rich: punto di riposo

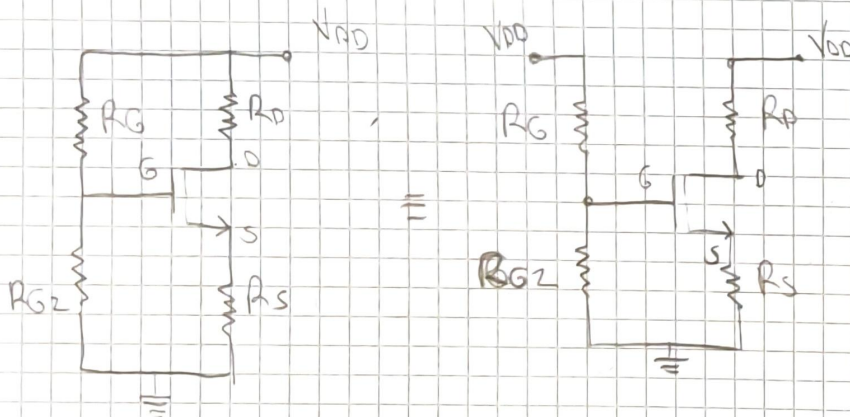
R_S per cui $I_{DS} = 1 \text{ mA}$

Fun. di Trasferimento e diag. di Bode del modulo

PUNTO DI RIPOSO: p.to di lavoro con $V_I = 0$

CIRCUITO in DC

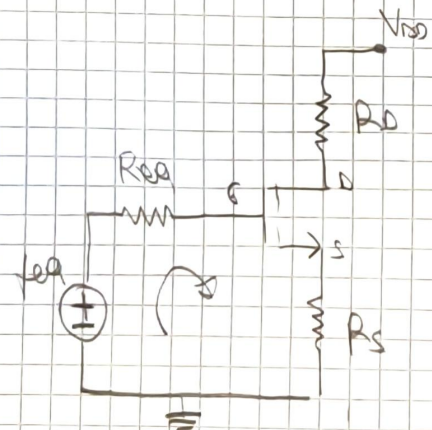
$V_I = 0 \Rightarrow \text{C.C.}$



Oper. in circuito di ingresso

$$V_{eq} = \frac{R_{G2}}{R_G + R_{G2}} \cdot V_{DD} = \frac{10}{30 + 10} \cdot 12 = 3V$$

$$R_{eq} = R_G // R_{G2} = \frac{10 \cdot 30}{10 + 30} = 7,5 \text{ k}\Omega$$



$$\text{KVL } -V_{eq} + V_{GS} + R_S I_D = 0$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$

$$V_{GS} - V_{TH} = \frac{2I_D}{g_m}$$

$$V_{GS} = \frac{2I_D}{g_m} + V_{TH}$$

$$V_{GS} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + 1 = 2V$$

$V_{GS} - V_{TH} \gg 0 \Rightarrow$ quindi siamo in REG LINE oppure in SAT ma in ampiezza

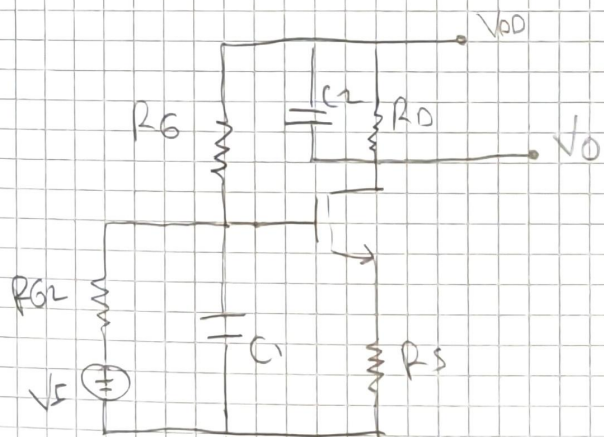
$$R_S I_D = V_{eq} - V_{GS} \quad \boxed{R_S = \frac{3-2}{10^{-3}} = 1k\Omega}$$

trovare V_{DS} per punto di riposo

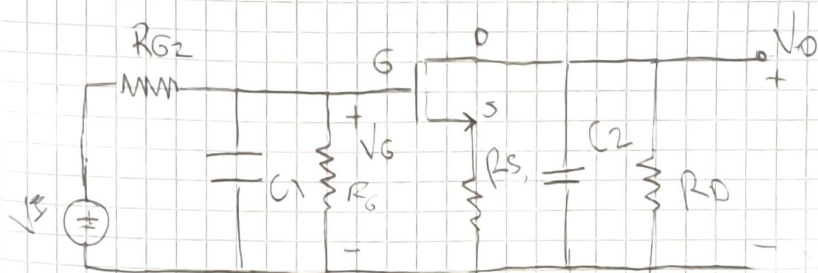
$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D = I_D (R_D + R_S) + V_{DS}$$

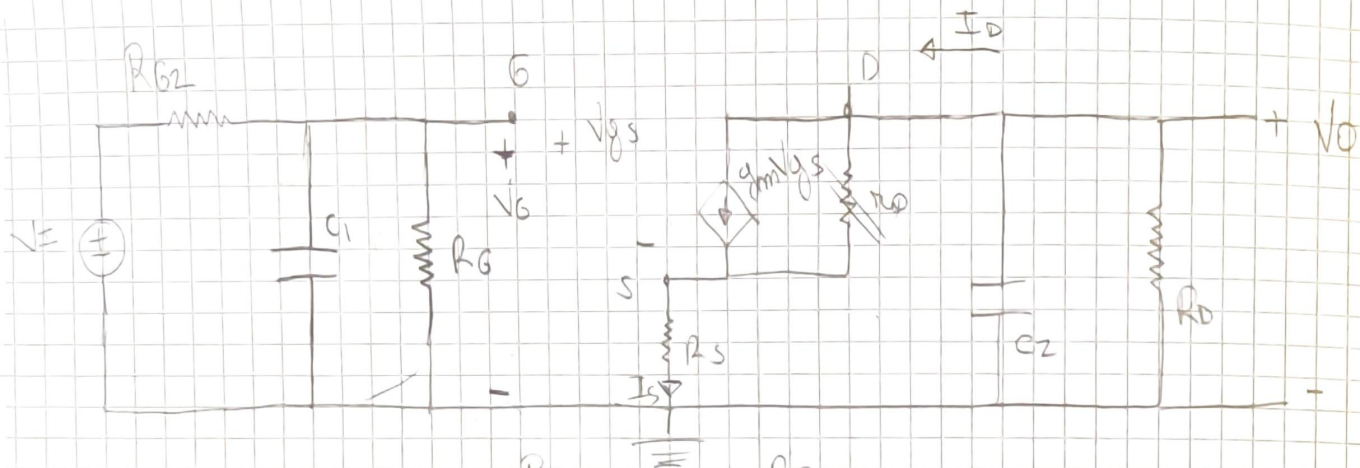
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) \\ = 12 - 10^{-3} \cdot 10^3 (5+1) = 6V$$

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO, fare il modello a piccoli segnali



Sostituire il modello a piccoli segnali
① Lasciare i condensatori
per scrivere la f. di trasferimento!





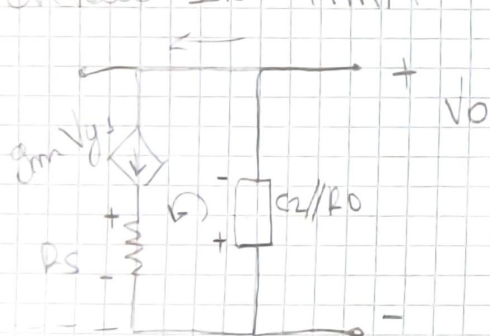
$$C_1 // R_G = \frac{C_1 R_G}{C_1 + R_G} = \frac{\frac{R_G}{sC_1}}{\frac{1}{sC_1} + R_G} = \frac{\frac{R_G}{sC_1}}{\frac{1 + sC_1 R_G}{sC_1}} = \frac{R_G}{1 + sC_1 R_G}$$

$$V_G = V_I \frac{\frac{R_G}{1 + sC_1 R_G}}{R_{G2} + \frac{R_G}{1 + sC_1 R_G}} = V_I \frac{R_G}{R_{G2}(1 + sC_1 R_G) + R_G}$$

$$= \frac{R_G}{R_{G2}(1 + sC_1 R_G) + R_G} V_I$$

$$C_2 // R_D = \frac{R_D}{sC_2} = \frac{R_D}{1 + sC_2 R_D} = \frac{R_D}{1 + sC_2 R_D}$$

Assume $I_D = 1 \text{ mA}$



$$V_o = -g_m V_{gs} (C_2 // R_D) = -g_m V_{gs} \left[\frac{R_D}{1 + sC_2 R_D} \right]$$

$$\frac{V_o}{V_I} = \frac{V_o}{V_G} \frac{V_G}{V_I} = \frac{-g_m V_{gs} \frac{R_D}{1 + sC_2 R_D}}{\frac{R_G}{R_{G2}(1 + sC_1 R_G) + R_G}} \frac{R_G}{V_I}$$

$$V_G = V_{GS} + R_S V_{GS} g_m$$

$$V_G = V_{GS} (1 + R_S g_m)$$

$$V_{GS} = \frac{V_G}{1 + R_S g_m}$$

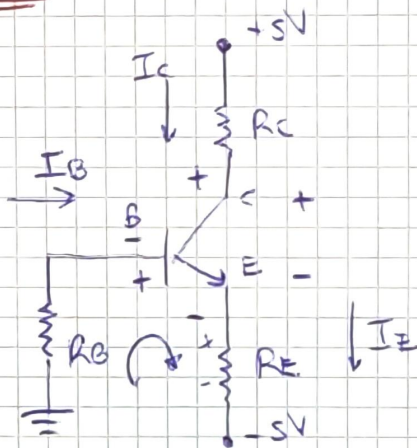
quindi

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{V_O}{V_G} \frac{V_G}{V_I} = \frac{-g_m \frac{V_G}{-R_S g_m (1 + g_m R_D)} \frac{R_D}{R_G}}{\frac{V_G}{R_G (1 + s C_1 R_G) + R_G}} =$$

$$= \frac{-g_m R_D}{(1 + R_S g_m)(1 + s C_2 R_D)} \frac{R_S}{R_G (1 + s C_1 R_G) + R_G} \approx 10^7$$

Disposizione di potenza ed escursione del segnale

B.127



$$R_B = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 16,2 \text{ k}\Omega$$

$$\beta_F = 65$$

Rich:

Resist. di potenza
in ognuno degli
elementi del circuito.

Confrontare i risultati ottenuti
con la potenza erogata dalle
alimentazioni

IPOTESI RAO

$$\begin{cases} V_{BE} \approx V_{BE} \\ V_{BE} \approx 0,7 \\ V_{CE} < -0,1 \end{cases}; V_{CE} = V_{BE} - V_{CE}$$

$$\text{KVL } R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - 5 = 0$$

$$R_B I_B + R_E (\beta_F + 1) I_B = 4,3 = 0$$

$$I_B \{ R_B + R_E (66) \} = 4,3$$

$$I_B = \frac{4,3}{(100 + 16,2 \cdot 66) \cdot 10^3} = 3,67 \mu\text{A}$$

$$I_E = 66 I_B = 242,22 \mu A$$

$$I_C = 65 I_B = 238,55 \mu A$$

Potenza sviluppata (dissipata) dai resistori

$$P = V \cdot I = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2$$

$$P_{RB} = R_B \cdot I_B^2 = 100 \cdot 10^3 \cdot (3,67 \cdot 10^{-6})^2 = 1,35 \mu W$$

$$P_{RC} = 10 \cdot 10^3 (238,55 \cdot 10^{-6})^2 = 5,69 \cdot 10^{-4} W \approx 569 \mu W$$

$$P_{RE} = 16,2 \cdot 10^3 (242,22 \cdot 10^{-6})^2 = 9,50 \cdot 10^{-4} = 950 \mu W$$

Potenza del BJT

$$P_{BJT} = I_C V_{CE} + I_B V_{BE}$$

Trovo V_{CE}

$$5 = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - 5$$

$$10 - R_C I_C - R_E I_E = V_{CE} \leadsto V_{CE} = 3,67 V$$

$$P_{BJT} = 238,55 \cdot 10^{-6} \cdot 3,67 + 3,67 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7 = 8,78 \cdot 10^{-4} = 0,878 \text{ mW}$$

Potenza dei generatori:

Ho due generatori, uno in alto che chiamo G_1 e uno in basso che chiamo G_2 .

$$P_{G1} = 5 V \cdot I_C = 1,19 \text{ mW}$$

$$P_{G2} = -5 V \cdot (-I_E) = 1,21 \text{ mW}$$

$$P_{GEN} = P_{G1} + P_{G2} = 2,4 \text{ mW}$$

Ripetizione: La potenza generata dai generatori deve essere uguale alla potenza dissipata da tutte le altre componenti

$$P_{RB} + P_{RC} + P_{RE} + P_{BJT} \approx 2,398 \cdot 10^{-3} W \approx 2,4 \text{ mW} = P_{GEN}$$

Fine inizia capitolo 13

OK

3 Configurazioni di base:

1. AMPLIFICATORI INVERTENTI (CE, CS)
2. INSEGUITORI (CC, CD)
3. AMPLIFICATORI NON INVERTENTI (CB, CG)

1. AMPLIFICATORI INVERTENTI CE, CS.

- alti valori di guadagno di tensione e di corrente.
- alti valori di R_{in} e R_{out} .
- $A_{vBJT} > A_{vMOS}$ grazie all'elevata conduttanza del BJT
- da $R_{in}^{(MOS)}$ del MOS è migliore per amplificazioni con alta resistenza di ingresso.
- MOS ha un campo di variazione più ampio del segnale di ingresso.

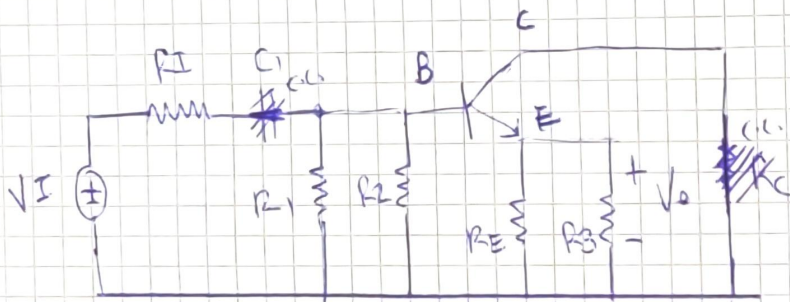
2. INSEGUITORI CC, CD (Inseguitori di ^{BJT} ~~source~~ e di _{MOS})
- $A_v \approx 1$
 - R_{in} elevata e R_{out} bassa
 - Guadagno di corrente moderato β
 - Campo di variaz. del segnale in ingresso più alto di tutti

3. NON INVERTENTI CB, CG

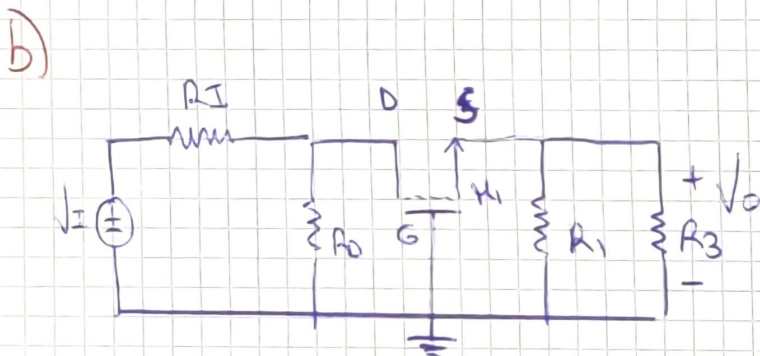
- A_v , R_{out} , campo di variaz. del segn. in ingresso simile a quelli INVERTENTI.
- R_{in} più bassa
- Guadagno di corrente $\beta < 1$

Classificazione degli amplificatori

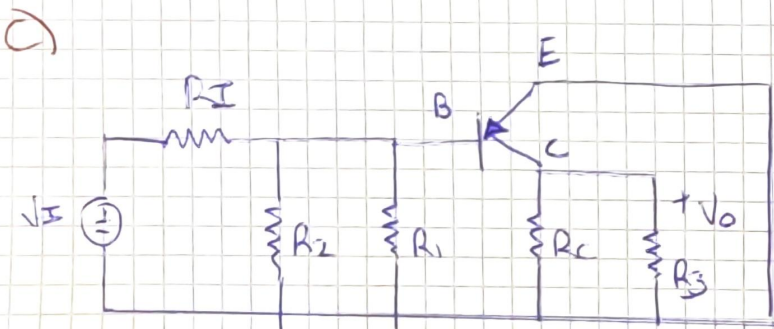
1h, 1
a) Disegnare i circuiti equivalenti in AC e classificazione
d'amplificatore con CS, CG, CD, CE, CB, CC oppure MOM
utilizzabile



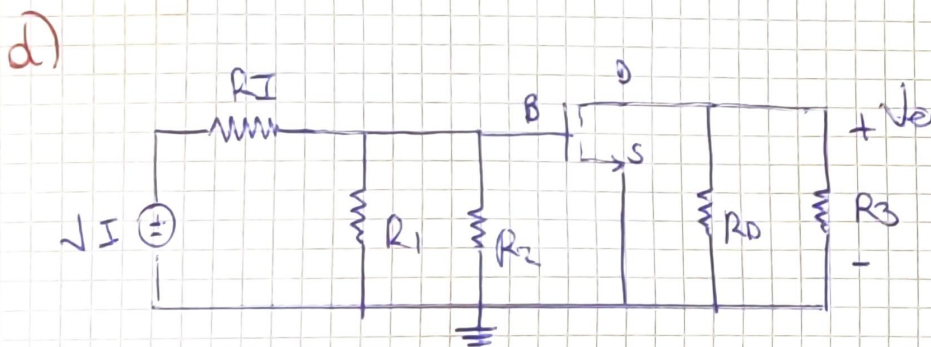
mpm
C.C. inseguitore di
~~emettitore~~ emettitore



NON FUNZIONA perché il
segnale di ingresso V_I è
iniettato nel terminale
di DRAIN mentre va
messo nel GATE

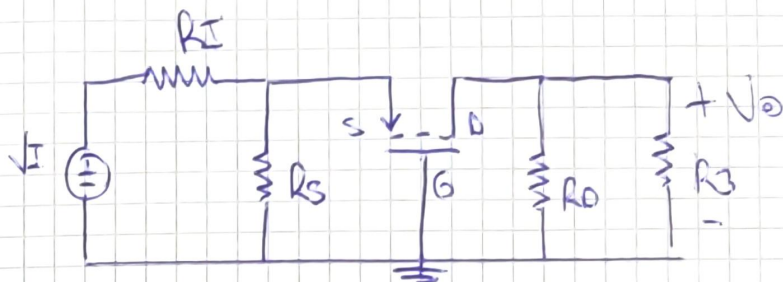


BJT pmp CC
Amplificatore invertente



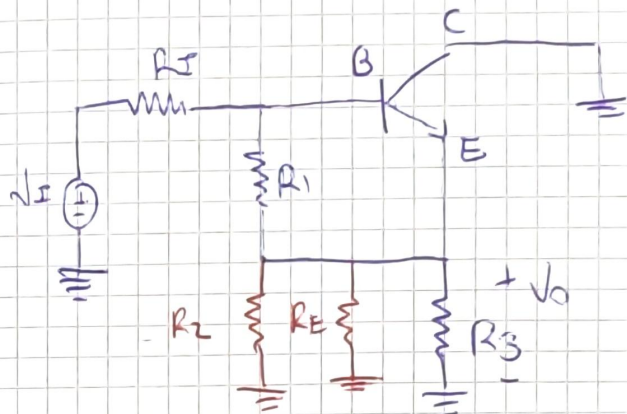
Nmos CS
Amplificatore invertente

e)



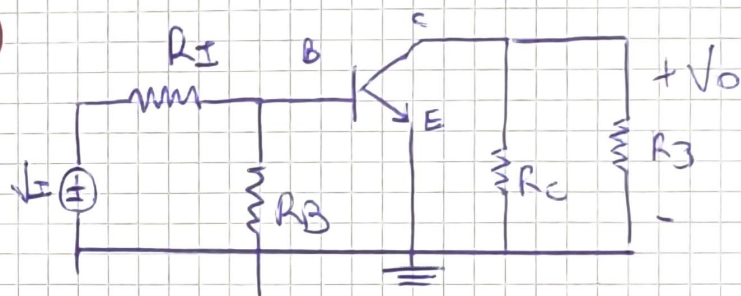
PMOS CG
non funziona
amplificatore non invertente

f)



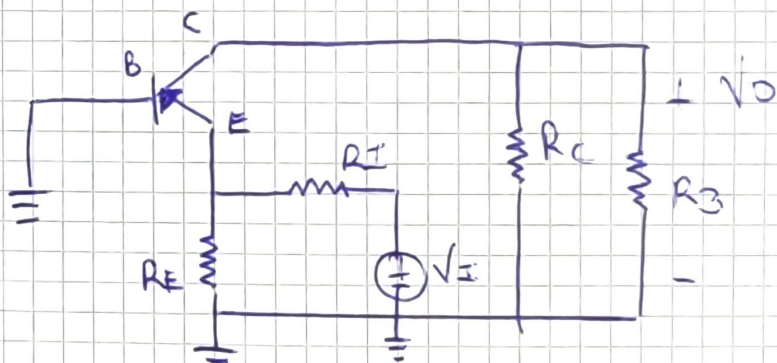
BJT npn CE
Inseguitore di emettitore

g)



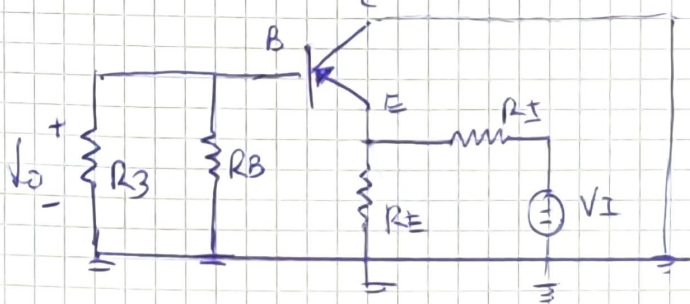
npn
BJT ~~npn~~ CE
Amplificatore invertente

h)



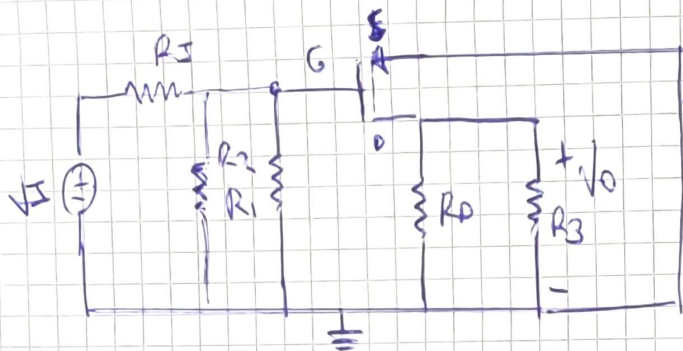
BJT pnp CB
Amplificatore non invertente

i)



BJT pnp CC.
~~Inseguitore~~ Non funziona
perché l'uscita è presa
dal terminale di base.

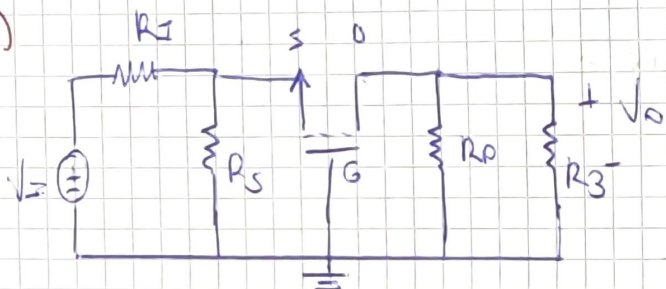
J)



PMOS C.S

Amplificatore invertente

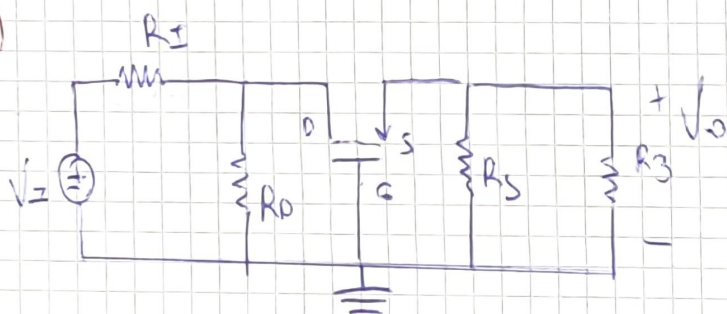
K)



NMOS CG

Amplificatore non invertente

L)



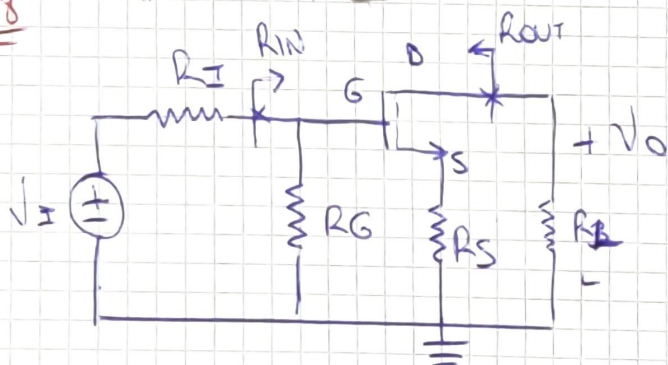
PMOS CG

Non funziona perché il segnale è iniettato nel drain con la resistenza R_D .

14.2 Amplificatori invertenti - Circuiti CE, CS

14.8

COMMON SOURCE



$$R_G = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_I = 75 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_S = 200 \Omega = 0,2 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = 5 \text{ mS}$$

$$r_o = 10 \text{ k}\Omega$$

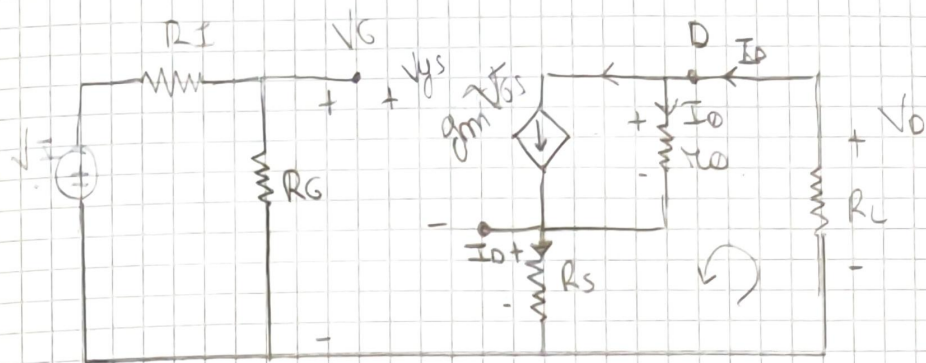
RHA

a) A_v , R_{in} , R_{out} per lo stadio a source comune del disegno

b) A_{vTH} , R_{in} , R_{out} , A_i se R_S è cortocircuitato da un condensatore

Sostituisco modello a piccoli segnali del MOS

a)



$A_v = A_{vt}^{cs} \frac{V_G}{V_I}$ guadagno ai terminali

$$A_{vt}^{cs} = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_S} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3}{1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^3} = -5$$

$$A_v = \frac{V_O}{V_I} = A_{vt}^{cs} \cdot \frac{R_G}{R_I + R_G} = -5 \cdot \frac{10^6}{75 \cdot 10^3 + 10^6} = -5 \cdot 0,93 = -4,65$$

$R_{IN} = R_G$

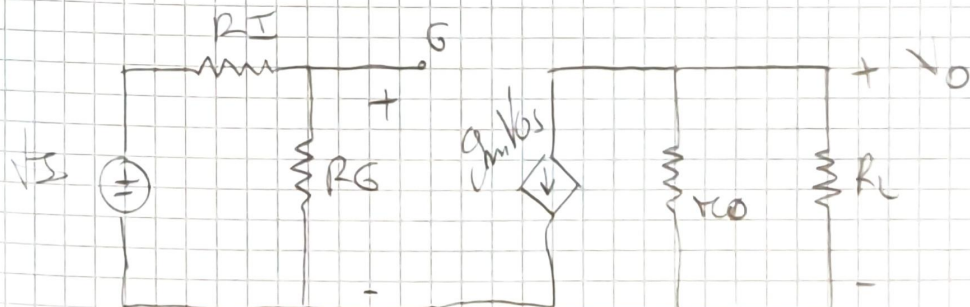
$R_{OUT} = r_{DS} (1 + g_m R_S) = 10^4 (1 + 5 \cdot 0,2) = 20000 \Omega = 20 k\Omega$

$R_{OUT} \gg R_L$

Guadagno di corrente

$$A_i = -R_G \frac{g_m}{1 + g_m R_S} = -10^6 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1 + 5 \cdot 0,2} = -2500$$

b) Se R_S è in cc. con condensatore $\Rightarrow R_S$ va a farsi fottere.



$V_G = V_{GS}$

$$r_{o1} || R_L = 1,66 \text{ k}\Omega$$

$$V_o = -g_m V_G (r_{o1} || R_L) = -g_m V_G \cdot 1,66 \cdot 10^3$$

$$V_G = V_I \frac{R_G}{R_G + R_I}$$

allora

$$A_v = \frac{V_o}{V_I} = \frac{V_o}{V_G} \frac{V_G}{V_I} = \frac{-g_m V_G \cdot 1,66 \cdot 10^3}{V_G} \frac{V_I \frac{R_G}{R_G + R_I}}{V_I}$$

$$= -5 \cdot 1,66 \cdot \frac{0,93}{1} = -7,719$$

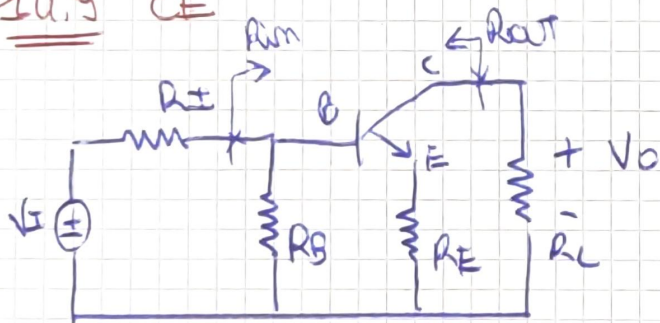
$$\underline{R_{in}} = R_G$$

$R_{out} = r_{o1}$ NB: Non si conta il carico nella resistenza media di uscita.

$$A_i = -R_G g_m = -10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = -5000$$

$A_i = \frac{i_o}{i_s}$ — corrente in uscita che scade su R_L
 i_s — corrente in ingresso generata da V_I

14.9 CE



$$g_m = 20 \text{ mS}$$

$$\beta_0 = 75$$

$$r_{o1} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_I = 500 \Omega = 0,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 12 \text{ k}\Omega$$

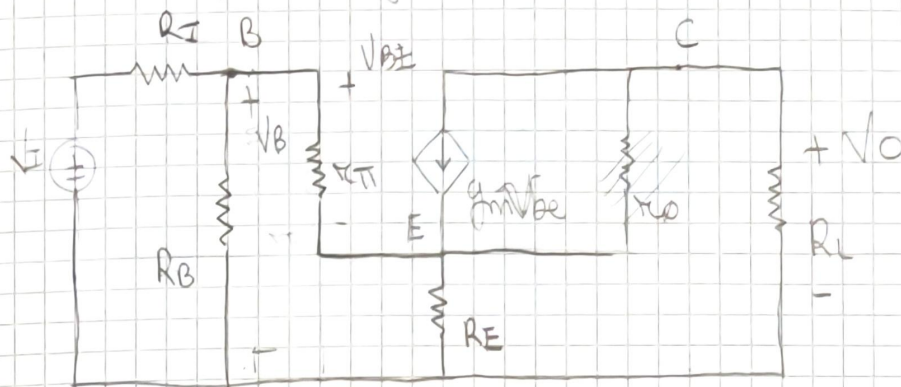
$$R_E = 300 \Omega = 0,3 \text{ k}\Omega$$

Rich:

a) A_v , R_{in} , R_{out} , A_{ih}

b) gli stessi valori se R_E portato a 620Ω ?

a) Modello piccolo segnale



Per il guadagno di tensione trascurare r_{ce}

$$r_{ce} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{75}{20 \cdot 10^{-3}} = 3,75 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = A_{v_{ce}} \frac{R_B // R_{iB}}{R_i + R_B // R_{iB}}$$

$R_B // R_{iB} \sim$ Resistenza di ingresso da terminale B

$$A_{v_{ce}} = \frac{V_o}{V_{ce}} = - \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_E} = - \frac{20 \cdot 12}{1 + 20 \cdot 0,3} = -34,29$$

$$R_{iB} = r_{ce} (1 + g_m R_E) = 3,75 \cdot 10^3 (1 + 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^3) = 26,25 \text{ k}\Omega$$

$$R_B // R_{iB} = \frac{15 \cdot 26,25}{15 + 26,25} \text{ k}\Omega = 9,58 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = -34,29 \frac{9,58 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 10^3 + 9,58 \cdot 10^3} = -32,58$$

$$R_{out} = r_{ce} (1 + g_m R_E)$$

altrimenti $R_{out} = r_{ce} \left(1 + \frac{\beta_0 R_E}{R_{Th} + r_{ce} + R_E} \right) = 100 \text{ k}\Omega \left(1 + \frac{75(300)}{(15 \text{ k}\Omega // 500 \Omega) + 3750 \Omega + 300 \Omega} \right) = 596 \text{ k}\Omega \Rightarrow 12 \text{ k}\Omega = R_L$

$$A_{ii} = -\beta_0 \frac{R_B}{R_B + r_{ce} + (\beta_0 + 1) R_E} = -75 \frac{15 \text{ k}\Omega}{15 \text{ k}\Omega + 3750 \text{ k}\Omega + 76(300)}$$

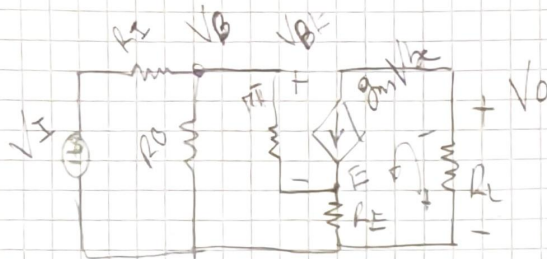
$$= -27,1$$

Non copio da dove vengono fuori le formule

FACCIO A MANO $\rightarrow$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_i}$$

$\swarrow$ $\swarrow$ $\swarrow$
 A_{ce} A_{vB} A_{vE}



$$V_B = V_i \frac{R_B}{R_I + R_B}$$

$$V_o = -R_L g_m V_{BE}$$

$$V_{BE} = V_B - g_m V_{BE} R_E \rightarrow V_{BE} + g_m V_{BE} R_E = V_B \rightarrow V_{BE} (1 + g_m R_E) = V_B$$

$$\frac{V_B}{V_i} = \frac{R_B}{R_I + R_B}$$

$$V_{BE} = \frac{V_B}{1 + g_m R_E}$$

TROVARE V_o/V_B

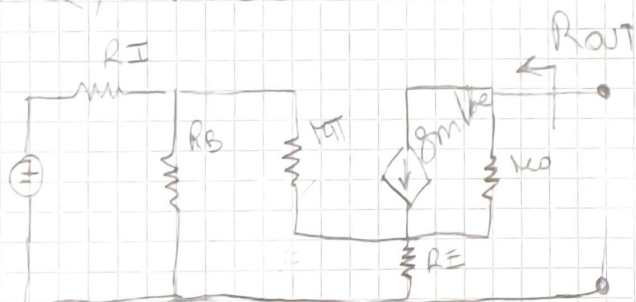
$$\frac{V_o}{V_B} = \frac{-R_E g_m V_{BE}}{V_B} = \frac{-R_E g_m V_B}{(1 + g_m R_E) V_B} = \frac{-R_E g_m}{1 + g_m R_E}$$

Quindi

$$A_v = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_E} \cdot \frac{R_B}{R_I + R_B} \quad \underline{\underline{A_v}}$$

~~$R_{in} = R_B$~~

~~R_{out}~~ , considero r_o

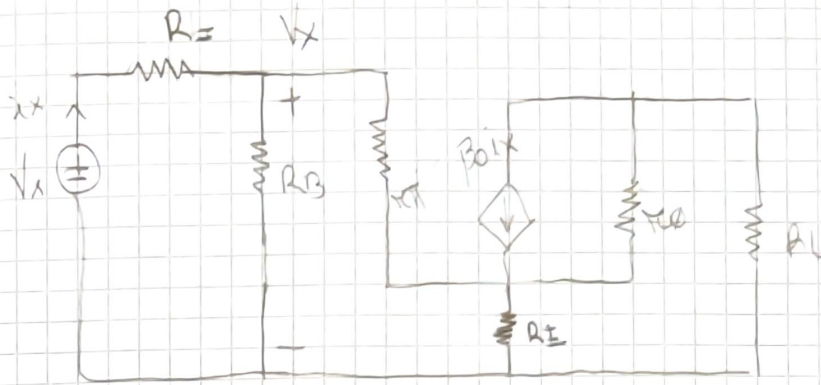


$$g_m V_{BE} = \beta i_x$$

$$V_i = V_x$$

che mette in piedi

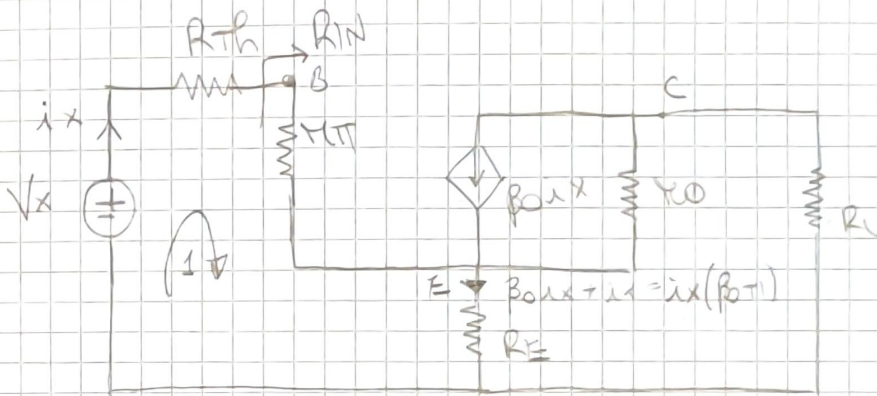
Quindi il circuito



Quando V_x spento c.c.

$$R_{th} = R_E // R_B = \frac{0,5 \cdot 15}{0,5 + 15} = 0,483 \text{ k}\Omega = 483 \Omega$$

Quando



RESISTENZA IN INGRESSO, si deve contare anche r_{π} .

NB Per R_{in} non considerare R_{th} perché R_{in} si guarda dal terminale B

KVL 1.

$$-V_x + r_{\pi} i_x + R_E i_x (\beta + 1) = 0$$

$$V_x = i_x [r_{\pi} + (\beta + 1) R_E]$$

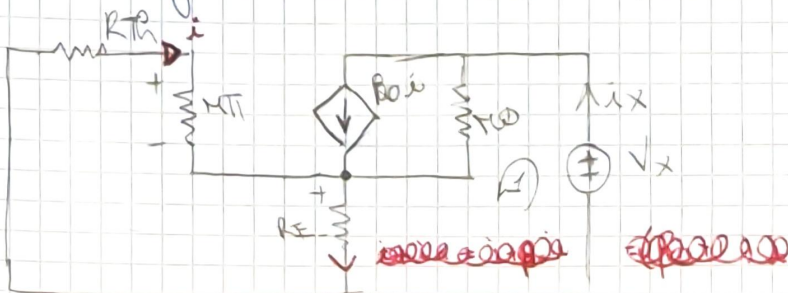
$$R_{in} = \frac{V_x}{i_x} = \frac{i_x [r_{\pi} + (\beta + 1) R_E]}{i_x} = r_{\pi} + (\beta + 1) R_E$$

$$V = R I \rightarrow R = \frac{V}{I}$$

RESISTENZA IN USCITA R_{out} , dal terminale C quindi non si conta R_L

$R_{out} = \frac{V_x}{I_x}$ con $i_x = \beta i_b$ la corrente attraverso le gemelle pulite

$\Rightarrow$ le gemelle V_x viene messo al posto del carico



$$V_{RE} = R_E (\beta_0 + 1) i$$

i passa da su R_{TH} che M_T che sono IN SERIE

$$KVL \downarrow -V_E - (R_{TH} + M_T) i = 0 \rightarrow i = - \frac{V_{RE}}{R_{TH} + M_T}$$

$$V_E = + R_E (\beta_0 + 1) i =$$

$$V_{RE} = - R_E (\beta_0 + 1) \frac{V_{RE}}{R_{TH} + M_T} \quad V_{RE} + \frac{R_E (\beta_0 + 1) V_{RE}}{R_{TH} + M_T} = 0$$

$$V_{RE} \left[\frac{R_E (\beta_0 + 1)}{R_{TH} + M_T} \right] = 0 \Rightarrow V_{RE} = 0$$

allora

$$-0 - (R_{TH} + M_T) i = 0 \Rightarrow i = 0$$

allora

$$\beta_0 i = i_x \Rightarrow i_x = 0$$

$$KVL \downarrow -V_x + V_{BE} + V_{RE} = 0 \rightarrow V_x = V_{BE} + V_{RE}$$

Corrente che scorre su M_T

$$i_x + i_0 - \beta_0 i = 0 \quad i_0 = i_x + \beta_0 i$$

Mentre la corrente su R_E :

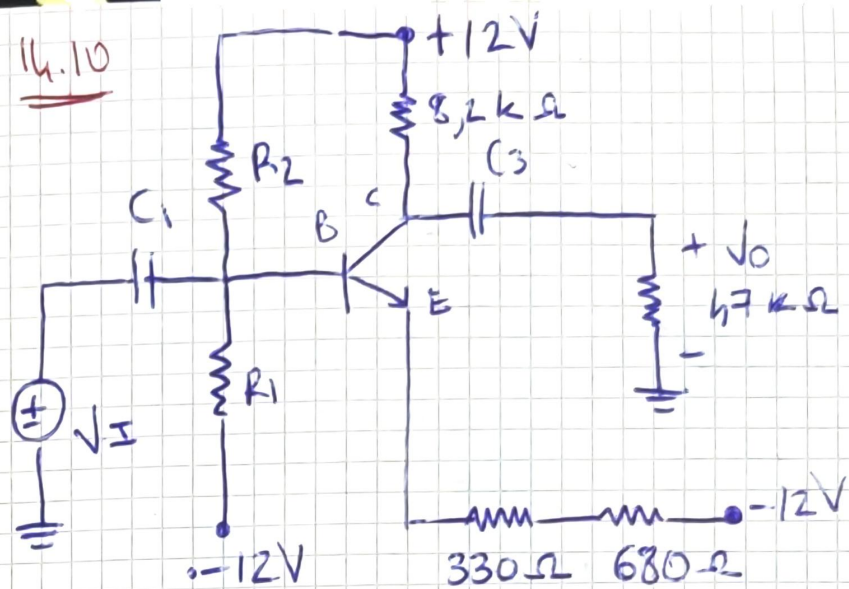
R_E è in parallelo con $(R_{TH} + M_T)$ allora

$$V_{RE} = [(R_{TH} + M_T) // R_E] \cdot i_x = \frac{(R_{TH} + M_T) R_E}{R_{TH} + M_T + R_E} \cdot i_x$$

Partita di corrente sull'emettitore

$$i = -i_x \frac{R_E}{R_{TH} + M_T + R_E}$$

14.10



a) Stimare il guadagno di tensione dell'amplificatore inalterato

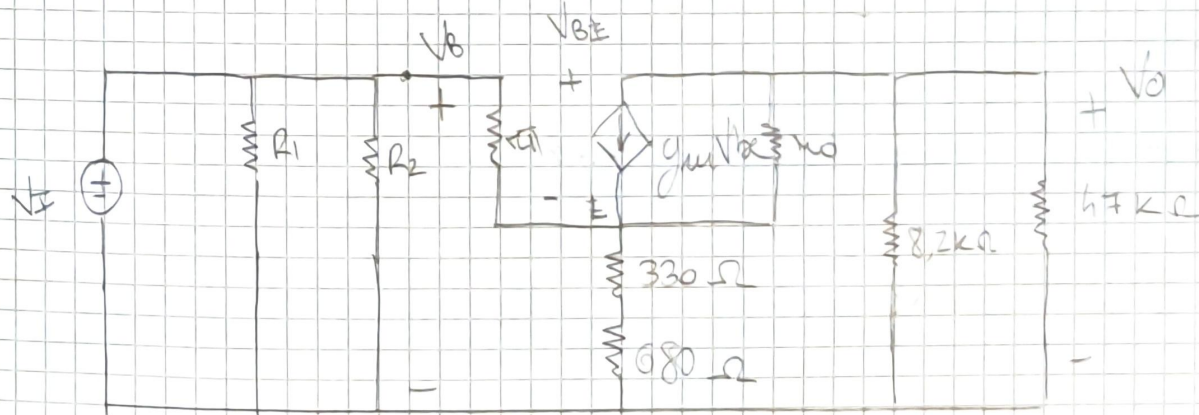
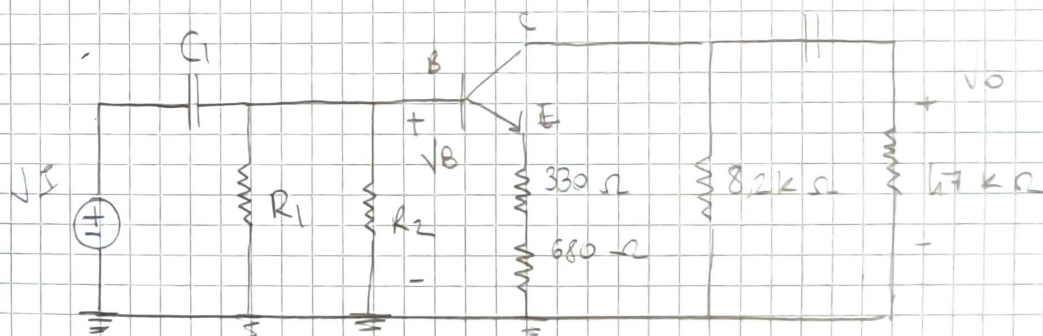
b) Usare un condensatore di bypass nel circuito e ottenere un guadagno di -10

c) Dove mettere condensatore di bypass per avere un guadagno di -20

d) Dove mettere il condensatore di bypass per avere questo ~~guadagno~~ guadagno

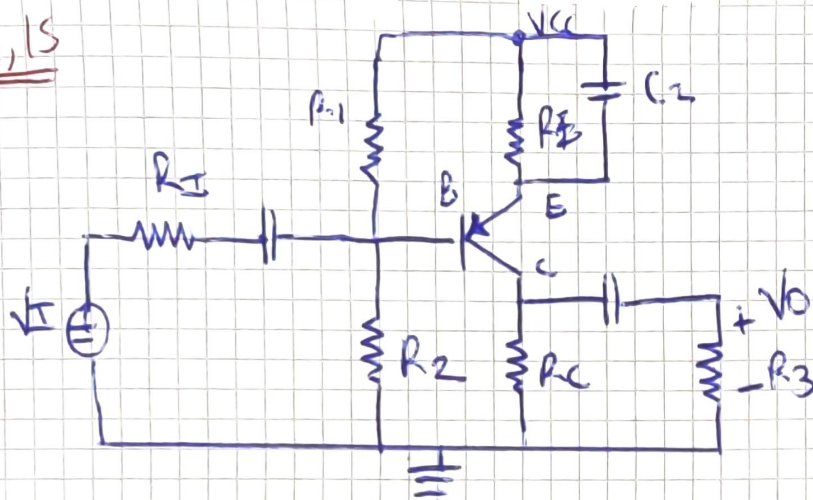
e) Stimare questo guadagno

Modello piccolo segnale



$$A_V = \frac{V_O}{V_I} = \frac{V_O}{V_B} \frac{V_B}{V_I}$$

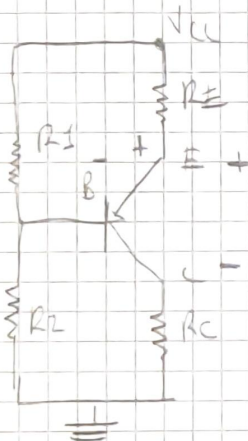
14, 15



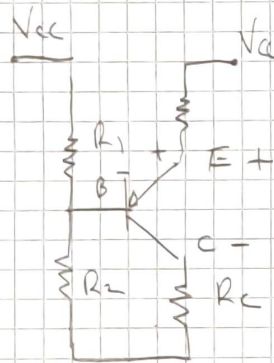
$$\begin{aligned} R_I &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_1 &= 20 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 62 \text{ k}\Omega \\ R_E &= 3,9 \text{ k}\Omega \\ R_C &= 8,2 \text{ k}\Omega \\ V_{CC} &= 9 \text{ V} \\ \beta_F &= 75 \end{aligned}$$

RKTH: A_v , A_i , R_{in} , R_{out} , massima ampiezza del segnale di ingresso per l'amplificatore.

PUNTO DI LAVORO



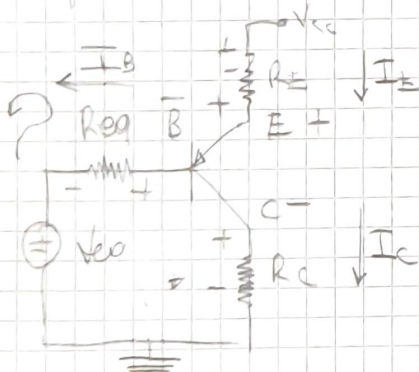
=



Circuito eq di Thevenin sul circuito di ingresso

$$V_{eq} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 9 \frac{62}{20 + 62} = 6,8 \text{ V}$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 \approx 15 \text{ k}\Omega$$



KVL INGRESSO

$$V_{CC} = R_E I_E + V_{EB} + R_{eq} I_B + V_{eq}$$

IPOTESI RAD

$$\begin{aligned} V_{EB} &\approx 0,7 \\ V_{EC} &\geq V_{EB} \\ V_B &< 0,1 \end{aligned}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

Quindi

$$\begin{aligned} V_{CC} - V_{EB} - V_{eq} &= R_E (\beta_F + 1) I_B + R_{eq} I_B \\ &= I_B [R_E (\beta_F + 1) + R_{eq}] \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0,7 - 6,8}{R_E(\beta_F + 1) + R_{eq}} = \frac{1,5}{3,9 \cdot 75 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} = \frac{1,5}{307500} = 4,87 \mu A$$

allora

$$I_E = 76 \cdot 4,87 \mu A = 370,12 \mu A \approx 0,37 \text{ mA}$$

$$I_C = 75 I_B = 365,25 \mu A \approx 0,36 \text{ mA}$$

Unknown: V_{EC}

$$V_{CC} = R_E I_E + V_{EC} + R_C I_C$$

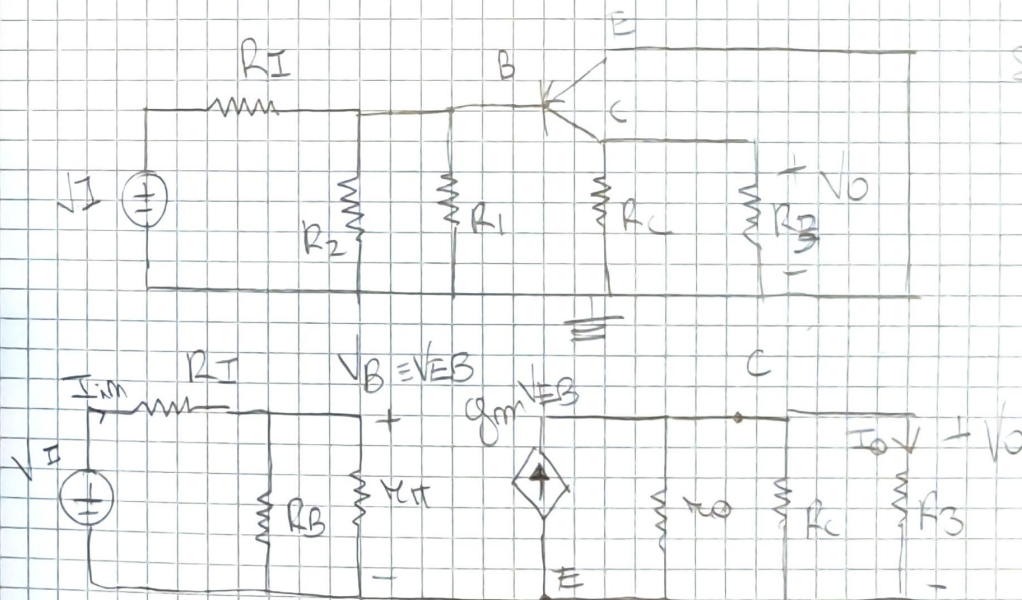
$$V_{EC} = V_{CC} - R_E I_E - R_C I_C = 9 - 3,9 \cdot 0,37 - 8,2 \cdot 0,36 = 4,6 \text{ V}$$

$$V_{CB} = V_{EB} - V_{EC} < -0,1 \text{ V} \quad V_{EC} > V_{EB} \quad \Rightarrow \text{S/A in RAO}$$

$$Q \equiv (I_C, V_{EC}) \equiv (365,25 \mu A, 4,6 \text{ V})$$

ANALISI AC piccolo segnale $\rightarrow$ condensatori a, d, e, m a massa

Sostituisco il modello



$$A_V = \frac{V_O}{V_I}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 15,12 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0,36 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 0,0144 \text{ S} \approx 14,4 \text{ mS}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = 5208 \Omega \approx 5,2 \text{ k}\Omega$$

$$R_B \parallel r_{\pi} = 3,86 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = V_I \frac{R_B/R_{TH}}{R_B/R_{TH} + R_I} = V_I \frac{3,86}{3,86 + 1} = V_I \cdot 0,8$$

Trovare V_O , la trascurabile perché non c'è V_A

$$R_C/R_3 = \frac{8,2 \cdot 100}{8,2 + 100} = 7,58 \text{ k}\Omega$$

$$V_O = - (R_C/R_3) g_m V_{EB} = -7,58 \cdot 10^3 g_m V_B$$

allora

$$A_v = \frac{V_O}{V_I} = \frac{V_O}{V_B} \frac{V_B}{V_I} = \frac{-7,58 \cdot 10^3 \cdot 14,4 \cdot 10^{-3} g_m}{g_m} \frac{V_B \cdot 0,8}{V_I} = -87,32$$

Resistenza in ingresso

NB Mon si considerano V_I e R_I , Rimangono quindi R_B e R_{TH} in parallelo

$$\Rightarrow R_{in} = R_B/R_{TH} = 3,86 \text{ k}\Omega$$

Resistenza in uscita, si considera V_O Mon si considera il carico R_3

$$R_{out} = r_{ce}/R_C$$

$$\text{con } r_{ce} = \frac{V_{EB}}{I_C} = \frac{0,7}{0,36 \cdot 10^{-3}} = 1944,44 \Omega \approx 1,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = \frac{1,9 \cdot 8,2}{1,9 + 8,2} = 1,54 \text{ k}\Omega$$

$$V = R I \quad I = \frac{V}{R}$$

Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$I_{in} = \frac{V_I}{(R_B/R_{TH}) + R_I} = \frac{V_I}{(3,86 + 1) \cdot 10^3} = 4,86 \cdot 10^{-3}$$

$$I_{out} = \frac{V_O}{r_{ce}/R_C/R_3} = \frac{V_O}{1,51 \cdot 10^3} = \frac{-7,58 \cdot 10^3 g_m V_B}{1,51 \cdot 10^3} = \frac{-7,58 \cdot 10^3 g_m V_I \cdot 0,8}{1,51 \cdot 10^3}$$

$$= \frac{-7,58 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \sqrt{I}}{1,51} = -57,8 \cdot 10^{-3} \sqrt{I}$$

Quindi

$$A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{-57,8 \cdot 10^{-3} \sqrt{I}}{\frac{\sqrt{I}}{4,86 \cdot 10^3}} = \frac{-57,8 \cdot 10^{-3} \cancel{\sqrt{I}}}{\cancel{\sqrt{I}} / 4,86 \cdot 10^3} = -200,9$$

SBAGLIATO

Diminuzione del segnale in ingresso

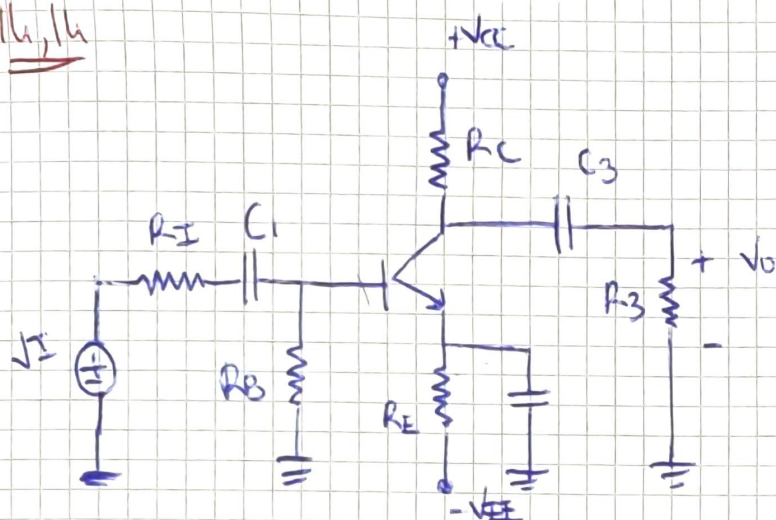
$$V_{be} = v_i \frac{R_{in}}{R_i + R_{in}} = v_i \frac{3,86 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 3,86 \text{ k}\Omega} = 0,794 v_i$$

$$v_i = \frac{5 \text{ mV}}{0,794} = 6,30 \text{ mV}$$

Da chiedere il: Guad di corrente

Massima ampiezza del segnale in ingresso

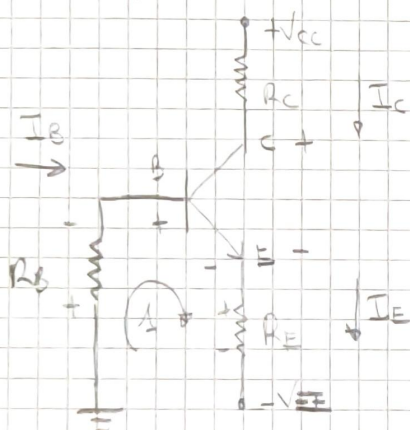
I_{B1}, I_{B2}



$$\begin{aligned} R_1 &= 500 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_B &= 1 \text{ M}\Omega \\ R_3 &= 500 \text{ k}\Omega \\ R_C &= 33 \text{ k}\Omega \\ V_{DD} &= 20 \text{ V} \\ \beta_F &= 100 \end{aligned}$$

RICH. A_v , A_i , R_{in} , R_{out} , massima ampiezza del segnale in ingresso

TROVARE punto di lavoro ANALISI DC



IPOTESI RAO

$$\begin{cases} V_{BE} \approx 0,7 \\ V_{CE} > V_{BE} \\ V_{BC} < 0,1 \end{cases}$$

KVL: $R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - V_{EE} = 0$

$$R_B I_B + 0,7 + R_E (\beta_F + 1) I_B - 20 = 0$$

$$I_B (R_B + R_E (\beta_F + 1)) = 20 - 0,7$$

$$I_B = \frac{19,3}{R_B + R_E (\beta_F + 1)} = \frac{19,3}{10^6 + 100 \cdot 10^3 (101)} = \frac{19,3}{11000000} \approx 1,74 \mu\text{A}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 101 \cdot 1,74 \mu\text{A} = 175,74 \mu\text{A} \approx 0,175 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta_F I_B = 174 \mu\text{A} \approx 0,174 \text{ mA}$$

TROVARE V_{CE}

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - V_{EE}$$

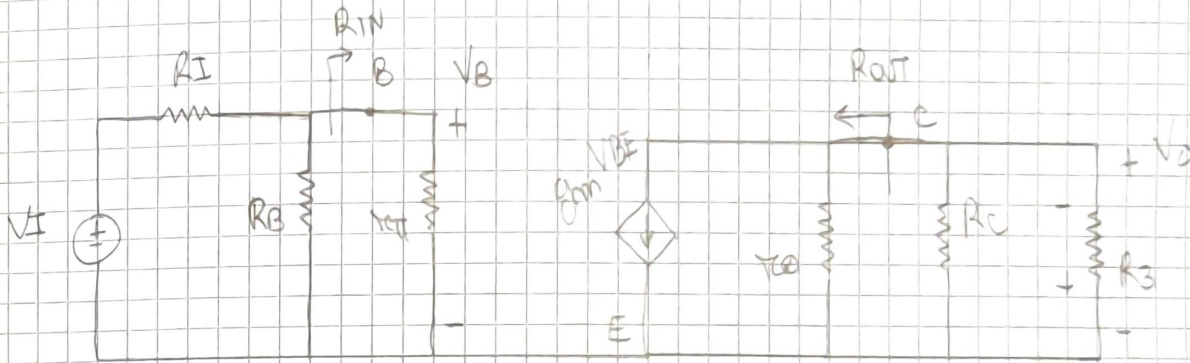
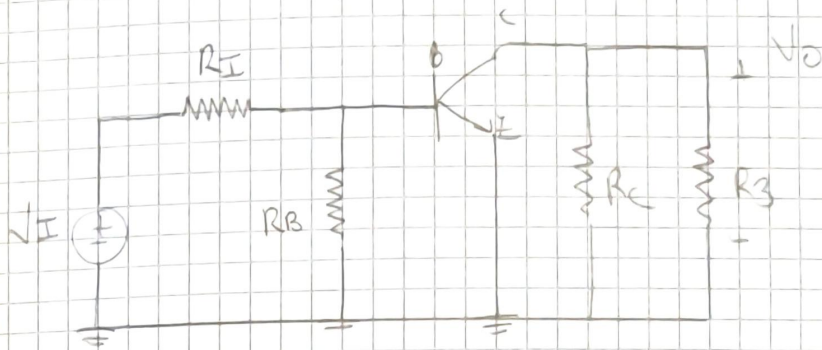
$$V_{CC} + V_{EE} = 33 \cdot 0,174 + V_{CE} + 100 \cdot 0,175$$

$$40 = 5,74 + V_{CE} + 17,5$$

$$V_{CE} = 40 - 5,74 - 17,5 = 16,76 \text{ V}$$

$$\Rightarrow Q \equiv (I_C, V_{CE}) \equiv (174 \mu\text{A}; 16,76 \text{ V})$$

ANALISI IN DC



$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0,174 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 6,91 \text{ mS}$$

$$r_{\pi} = R_0 / g_m = \frac{100}{6,91 \cdot 10^{-3}} = 14471,78 \Omega \approx 14,47 \text{ k}\Omega$$

$$r_{e0} = \frac{V_{BE}}{I_C} = \frac{0,7}{0,174 \cdot 10^{-3}} = 4022,98 \Omega \approx 4 \text{ k}\Omega$$

Guadagno in Tensione $A_V = \frac{V_0}{V_I} = \frac{V_0}{V_B} \frac{V_B}{V_I}$, Troviamo V_B perché V_I non specificato

$$R_B // r_{\pi} = \frac{10^6 \cdot 14,47 \cdot 10^3}{10^6 + 14,47 \cdot 10^3} = 14448 \Omega \approx 14,48 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = V_I \frac{R_B // r_{\pi}}{R_B // r_{\pi} + R_I}$$

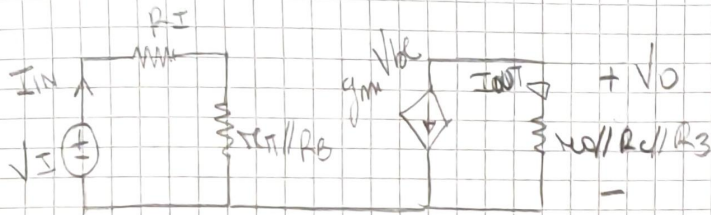
$$R_C // R_3 = \frac{39 \cdot 500}{39 + 500} \approx 36 \text{ k}\Omega$$

$$V_0 = -R_3 g_m V_{BE} = -R_3 g_m V_B \text{ Allora, il guadagno in Tensione}$$

$$A_V = \frac{-R_3 g_m V_B}{V_B} \cdot \frac{V_I \frac{R_B // r_{\pi}}{R_B // r_{\pi} + R_I}}{V_I} = -500 \cdot 10^3 \cdot 6,91 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{14,48 \cdot 10^3}{14,48 \cdot 10^3 + 500 \cdot 10^3} = -97,24$$

Guadagno di corrente

$$\Delta i = I_{OUT} / I_{IN}$$



$$I_{IN} = \frac{\sqrt{I}}{R_I + R_E || R_B} = \frac{\sqrt{I}}{(500 + 11,48) \cdot 10^3} = \frac{\sqrt{I}}{511,48 \cdot 10^3}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_O}{R_O || R_C || R_E}$$

$$R_O || R_C || R_E = \frac{4 \cdot 36}{4 + 36} = 3,6 \text{ k}\Omega$$

$$I_{OUT} = \frac{V_O}{3,6 \cdot 10^3} = \frac{-R_3 g_m V_B}{3,6 \cdot 10^3} = \frac{-R_3 g_m}{3,6 \cdot 10^3} \sqrt{I} \frac{R_B || R_{TH}}{R_B || R_{TH} + R_I} =$$

$$= \frac{-500 \cdot 6,31}{3,6 \cdot 10^3} \frac{11,48}{(11,48 + 500) \cdot 10^3} \sqrt{I} = -0,027 \sqrt{I}$$

Quindi

$$\Delta i = \frac{-0,027 \sqrt{I}}{\sqrt{I}} \frac{511,48 \cdot 10^3}{\sqrt{I}} = -13890,96$$

Resistenza in ingresso

$$R_{IN} = R_E || R_{TH} = 11,48 \text{ k}\Omega$$

Resistenza in uscita $R_{OUT} = R_C || R_O = \frac{39 \cdot 4}{39 + 4} = 3,62 \text{ k}\Omega$

Massima ampiezza del segnale di ingresso

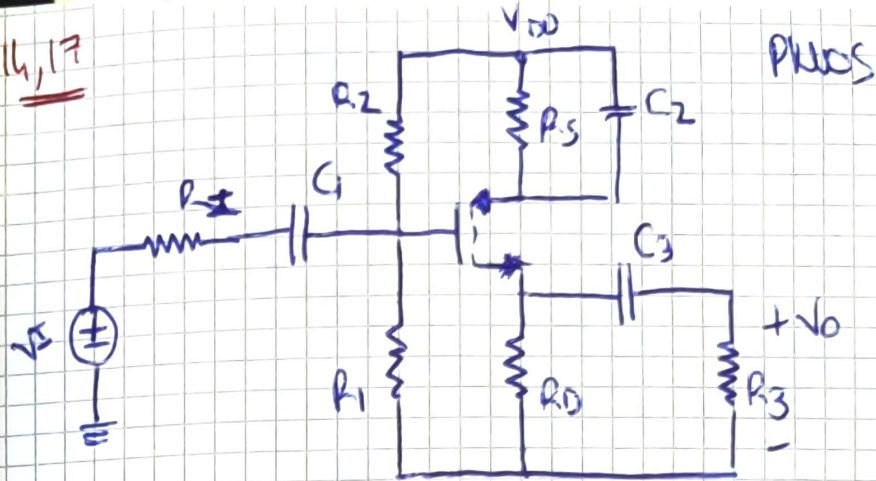
$$V_i \leq \frac{0,005 \text{ V}}{V_{be}} = \frac{0,005}{V_{be}} \text{ con } V_{be} = \frac{R_B || R_{TH} \sqrt{I}}{R_B || R_{TH} + R_I} = 0,0281 \text{ V} \approx 28 \text{ mV}$$

$$V_i \leq \frac{0,005}{28} = 0,28 \text{ mV}$$

Massima ampiezza del segnale di ingresso

OK

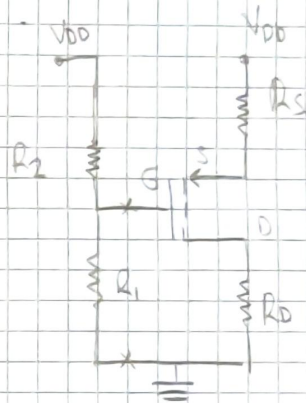
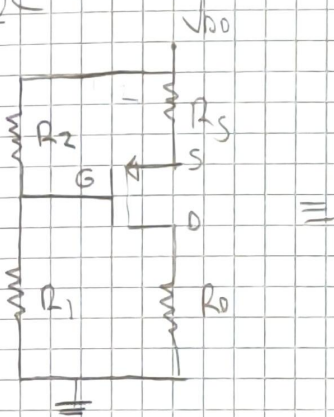
14, 17



$R_I = 1 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 470 \text{ k}\Omega$
 $R_1 = 2,2 \text{ M}\Omega$
 $R_2 = 2,2 \text{ M}\Omega$
 $R_5 = 22 \text{ k}\Omega$
 $R_0 = 18 \text{ k}\Omega$
 $V_{DD} = 22 \text{ V}$
 $K_P = 400 \mu\text{A/V}^2$
 $V_{TP} = -1 \text{ V}$

RICH: A_v , A_i , R_{in} , R_{out} , massima
ampiezza del segnale in ingresso

ANALISI DC

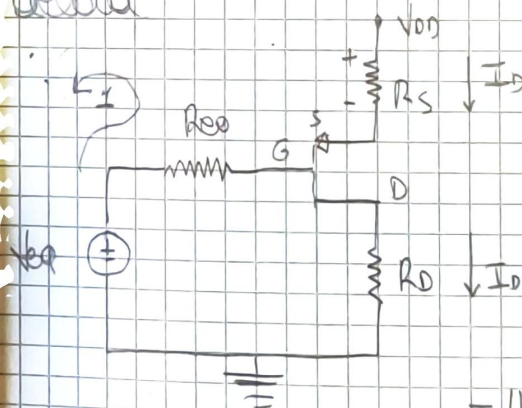


Prendiamo il
corto a sx

$$V_{eq} = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 22 \frac{2,2}{2,2 + 2,2} = 11 \text{ V}$$

$$R_{eq} = R_1 || R_2 = \frac{2,2 \cdot 2,2}{2,2 + 2,2} = 1,1 \text{ M}\Omega$$

ANALISI



$$\text{KVL I} = V_{eq} + V_{GS} - R_S I_D + V_{DD} = 0$$

IPOTESI SATURAZIONE:

$$I_D = \frac{K_P}{2} (V_{GS} - V_{TP})^2$$

$$-11 + 22 + V_{GS} - R_S I_D = 0 \rightarrow V_{GS} - R_S I_D + 11 = 0$$

Sostituisco I_D

$$V_{GS} - \frac{R_S K_P}{2} (V_{GS} - 1)^2 = 0$$

$$\frac{R_S K_P}{2} = \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{2} = 4,4$$

$$V_{GS} - 4,4 (V_{GS}^2 + 1 - 2V_{GS}) = 0$$

$$-4,4 V_{GS}^2 + 8,8 V_{GS} + V_{GS} - 4,4 = 0$$

$$-4,4 V_{GS}^2 + 9,8 V_{GS} - 4,4 = 0$$

$$4,4 V_{GS}^2 - 9,8 V_{GS} + 4,4 = 0 \quad \text{Equas. di II° grado}$$

$$V_{GS}^2 - 2,22 V_{GS} + 1 = 0$$

$$\frac{-2,22 \pm \sqrt{4,93 - 4}}{2} = \frac{-2,22 \pm 0,96}{2} \begin{cases} -0,63 \text{ V} \\ -1,59 \text{ V} \end{cases}$$

Condizione di SAT.

$$|V_{GS}| \geq |V_{GS} - V_{TP}| \geq 0 \Rightarrow |V_{GS} - V_{TP}| \geq 0 \text{ scelgo } V_{GS} = -0,63 \text{ V}$$

così $|V_{GS} - (-1)| \geq 0$

$$V_{GS} = -0,63 \text{ V}$$

Quindi

$$I_D = \frac{K_P}{2} (V_{GS} - V_{TP})^2 = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{2} (-0,63 - 1)^2 = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 2,65 = 531 \mu\text{A}$$

TROVARE VDS

$$V_{DD} = R_S I_D + V_{DS} + R_D I_D$$

$$= I_D (R_S + R_D) - V_{DS}$$

$$V_{DS} = I_D (R_S + R_D) - V_{DD} = 531 \cdot 10^{-6} (22 + 18) \cdot 10^3 - 22 =$$

$$= 21,24 - 22 = -0,76 \text{ V}$$

VERIFICA CONDIZIONE

$ V_{GS} \geq V_{GS} - V_{TP} $
$0,76 \geq 1,63 $

NON SIAMO IN SATURAZIONE

Sbagliato a fare la maglia

$$V_{DD} = R_S I_D - V_{GS} + 11$$

PROVA SAT

$$I_P = \frac{K_P}{2} (V_{GS} - V_{TP})^2 \rightarrow \sqrt{\frac{2I_P}{K_P}} = V_{GS} - V_{TP} \rightarrow V_{GS} = V_{TP} + \sqrt{\frac{2I_D}{K_P}}$$

Quindi la maglia

$$V_{DD} = R_S I_D - V_{TP} - \sqrt{\frac{2I_D}{K_P}} + 11$$

$$R_S I_D - \sqrt{\frac{2I_D}{K_P}} = V_{DD} + V_{TP} - 11 = 22 - 1 - 11 = 10$$

$$R_S I_D - 10 = \sqrt{\frac{2I_D}{K_P}} \text{ elevo tutto al quadrato}$$

$$(R_S I_D - 10)^2 = \frac{2 I_D}{K_P}$$

$$R_S^2 I_D^2 + 100 - 20 R_S I_D - \frac{2 I_D}{K_P} = 0$$

$$484 \cdot 10^6 I_D^2 - 20 \cdot 22 \cdot 10^3 I_D - \frac{2}{100 \cdot 10^{-6}} I_D + 100 = 0$$

$$484 \cdot 10^6 I_D^2 - 445 \cdot 10^3 I_D - 100 = 0$$

$$484 \cdot 10^3 I_D^2 - 445 I_D + 0,1 = 0$$

$$\frac{445 \pm \sqrt{198025 - 4(484 \cdot 10^3)(0,1)}}{2 \cdot 484 \cdot 10^3} = \frac{445 \pm \sqrt{4425}}{2 \cdot 484 \cdot 10^3} = \frac{445 \pm 66,52}{2 \cdot 484 \cdot 10^3}$$

$5,28 \cdot 10^{-4}$
 $3,91 \cdot 10^{-4}$

scelgo $I_D = 3,91 \cdot 10^{-4} \approx 391 \mu A$

TROVARE V_{DS}

$$V_{DD} = R_S I_D - V_{DS} + R_D I_D = I_D (R_S + R_D) - V_{DS}$$

$$V_{DS} = I_D (R_S + R_D) - V_{DD} = 391 \cdot 10^{-6} (22 + 18) \cdot 10^3 - 22 =$$

$$V_{DS} = -6,36 V$$

Verifica SATURAZIONE $|V_{DS}| \geq |V_{GS} - V_{TP}| \geq 0$

$$V_{GS} = V_{TP} + \sqrt{\frac{2 I_D}{K_P}} = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot 391 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}}} \approx 0,4 V$$

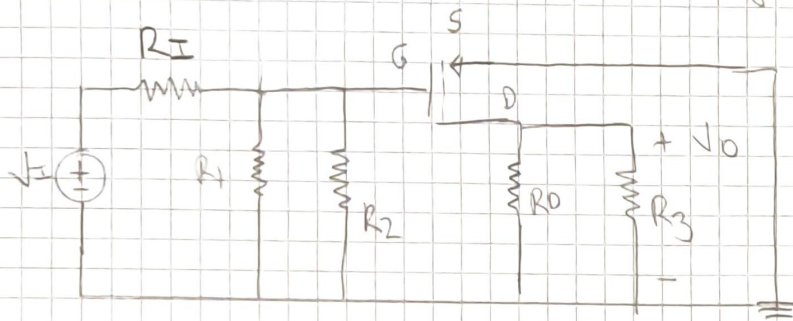
$$6,36 \geq 0,4 + 1 = 1,4 \quad \underline{OK} \quad \text{SATURAZIONE completa}$$

$$Q \equiv (I_D, V_{DS}) \approx (391 \mu A; -6,36 V)$$

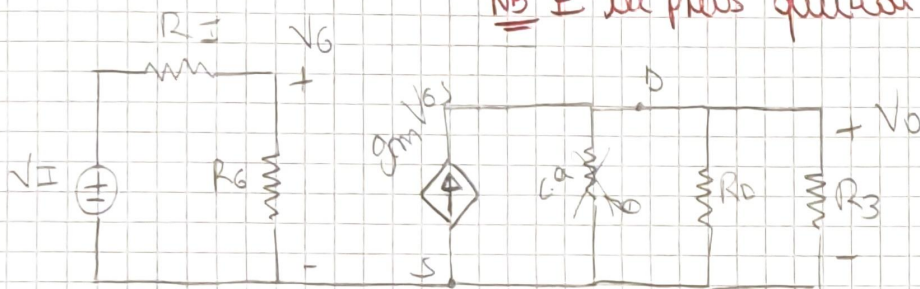
Analisi in AC

Analisi AC $R_G = R_1 // R_2 = 1,1 \text{ M}\Omega$

Sostituisco modello ai piccoli segnali



NB È un pmos quindi freccia di corrente del gen. controllato



$$g_m = \sqrt{2k_n I_D} = \sqrt{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 391 \cdot 10^{-6}} = 5,59 \cdot 10^{-4} \approx 0,559 \text{ mS}$$

$r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_D}$ ma λ non specificato quindi suppongo $r_{ds} \rightarrow \infty$ ca

Guadagno in tensione $A_v = \frac{V_O}{V_I} = \frac{V_O}{V_G} \frac{V_G}{V_I}$

$$V_G = V_I \frac{R_G}{R_G + R_I}$$

$$R_L = R_D // R_3 = \frac{18 \cdot 470}{18 + 470} = 17,33 \text{ k}\Omega$$

$$V_O = -R_L g_m V_{GS} = -R_L g_m V_G$$

$$A_v = \frac{V_O}{V_G} \frac{V_G}{V_I} = \frac{-R_L g_m V_G}{V_G} \frac{V_I}{V_I} \frac{R_G}{R_G + R_I} =$$

$$= -17,33 \cdot 10^3 \cdot 0,559 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,1 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 10^6 + 1 \cdot 10^3} \approx -9,68 \text{ V/V}$$

Resistenza in ingresso

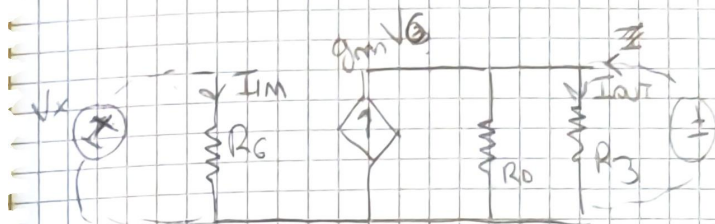
$$R_{in} = R_G = 1,1 \text{ M}\Omega$$

Resistenza di uscita

$$R_{out} = R_L = 17,33 \, \Omega$$

Guadagno in corrente

$$A_i = \frac{I_o}{I_{in}}$$



$$I_{in} = \frac{V_g}{R_g}$$

$$I_{out} = \frac{V_o}{R_3} = \frac{-R_L g_m V_g}{R_3}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{-R_L g_m V_g}{R_3} \cdot \frac{R_g}{V_g} =$$

però finalmente

$$A_i = \frac{-R_L g_m R_g}{R_3} = \frac{-17,33 \cdot 10^{-3} \cdot 0,559 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^6}{470 \cdot 10^3} = -22,67 \, \Omega$$

Massima ampiezza del segnale di ingresso

$$V_{gs} \leq 0,2 (V_{gs} - V_{th})$$

(non capisco mai come si trova senza formule)

$$V_g = \sqrt{I} \frac{R_g}{R_g + R_L} \approx 1 \, \Omega \cdot \sqrt{I}$$

$(V_{gs} - V_{th})$ si ricava dall'espressione della corrente in SAT

$$I_D = \frac{k_p}{2} (V_{gs} - V_{th})^2 \Rightarrow V_{gs} - V_{th} = \sqrt{\frac{2 I_D}{k_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 39 \cdot 10^{-6}}{400 \cdot 10^{-6}}} = 1,4$$

Quindi

$$1 \, \Omega \cdot \sqrt{I} \leq 0,2 (1,4) \Rightarrow \sqrt{I} \leq 0,2 \cdot 1,4 = 0,28 \, V$$

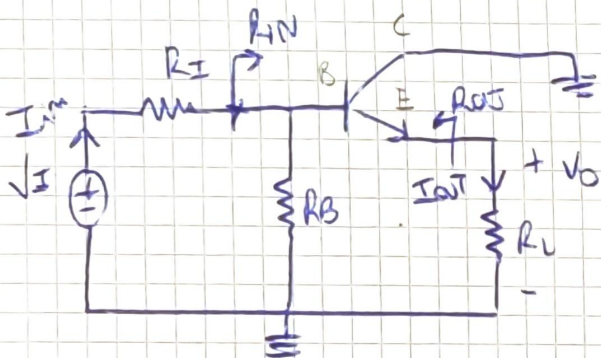
$$\Rightarrow V_i \leq 0,28 \, V \text{ massima ampiezza}$$

quindi si applica la condiz. di piccolo segnale e si trova V_i per coprire quanto più variabile mantenendo comunque la condizione

Ok

11.3 CIRCUITI INSEGUITORI - Amplificatore a collezione comune e drain comune

11.20



$$R_I = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 47 \text{ k}\Omega$$

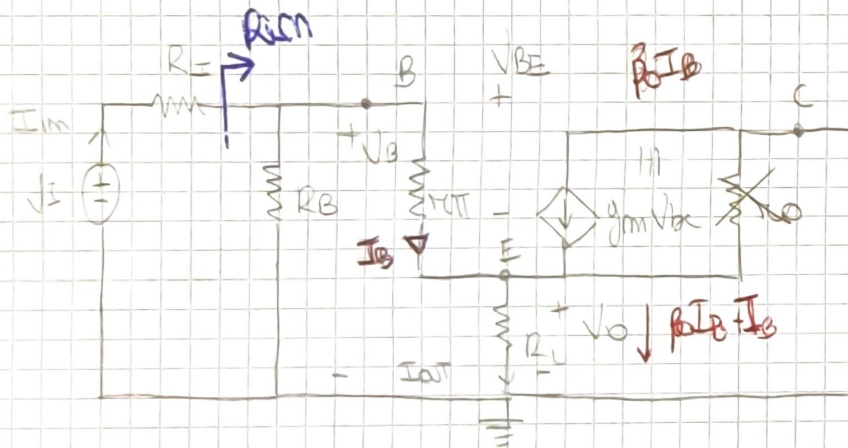
$$R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\beta_D = 80$$

$$g_m = 0.4 \text{ S}$$

Rich: A_{vth} , R_{in} , R_{out} , A_i

Analisi in AC sostituisco modello a piccolo segnale



$$r_{pi} = \frac{\beta_D}{g_m} = \frac{80}{0.4} = 200 \Omega$$

A mom è specificata quindi suppongo $r_{pi} \rightarrow +\infty$ c.a

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_B} \frac{V_B}{V_i} = A_{vth} \frac{V_B}{V_i}$$

~~$V_B = V_i \frac{R_B}{R_B + R_I}$~~ È segnata I_B la corrente che dipende dalla tensione V_B

$$V_o = R_L (\beta_D I_B + I_B) = R_L I_B (\beta_D + 1)$$

$$V_B = V_{BE} + V_o = r_{pi} I_B + R_L I_B (\beta_D + 1) = I_B [r_{pi} + R_L (\beta_D + 1)]$$

Quindi

$$A_{vTh} = \frac{V_o}{V_B} = \frac{R_L I_B (\beta_0 + 1)}{I_B [\pi_{\pi} + R_L (\beta_0 + 1)]} = \frac{R_L (\beta_0 + 1)}{\pi_{\pi} + R_L (\beta_0 + 1)}$$

$$= \frac{R_L \beta_0}{\pi_{\pi} + R_L (\beta_0)} = \frac{g_m \pi_{\pi} R_L}{\pi_{\pi} + R_L g_m \pi_{\pi}} \approx \frac{g_m R_L}{1 + R_L g_m}$$

$$g_m I_B \pi_{\pi} = \beta_0 I_B$$

$$g_m \pi_{\pi} = \beta_0$$

si trascura l'1 di $(\beta_0 + 1)$

Quindi

$$A_{vTh} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{1 + 0,4 \cdot 10^3} = 0,99$$

$$A_v = A_{vTh} \frac{V_B}{V_I} \leadsto \text{possa sapere che } V_B = V_I \frac{R_B}{R_B + R_I}$$

$$\frac{V_B}{V_I} = \frac{R_B}{R_B + R_I} = 0,82$$

$$\Rightarrow A_v = 0,99 \cdot 0,82 = 0,8118$$

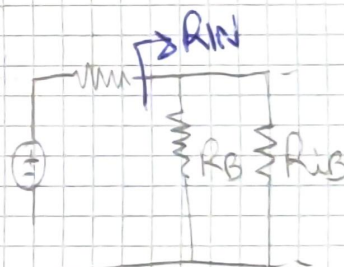
Resistenza in ingresso $R_{iB} = \frac{V_B}{I_B}$ vista dopo il terminale B

$$R_{iB} = \frac{I_B [\pi_{\pi} + R_L (\beta_0 + 1)]}{I_B} = \pi_{\pi} + R_L [\beta_0 + 1]$$

$$81,2 \text{ k}\Omega = 81200 \text{ }\Omega$$

Quindi

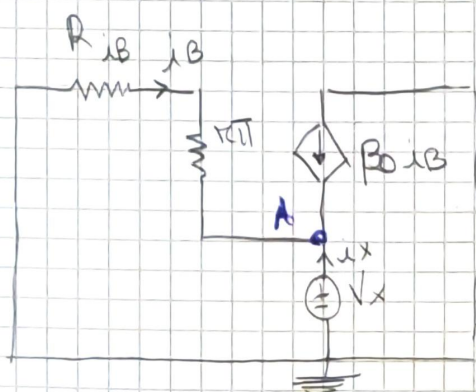
$$R_{in} = R_B // R_{iB} = \frac{47 \cdot 81,2}{47 + 81,2} = 29,8 \text{ k}\Omega$$



Resistenza in uscita Resistenza dal terminale di emettitore

NB Non si conta il carico R_L !

Si attacca un generatore di prova al posto di R_L



KCL A

$$+I_x + \beta_0 I_B + I_B = 0$$

$$I_x = I_B (\beta_0 + 1)$$

$$I_B = \frac{V_x}{R}$$

Si ridistribuisce tra R_{iB} e π_{π} quindi

$R = R_{iB} + \pi_{\pi}$ che sono in serie

$$i_x = \frac{V_x}{R_{ib} + r_{\pi}} (\beta + 1)$$

$$V_x = R_x \cdot i_x \rightarrow R_x = \frac{V_x}{i_x}$$

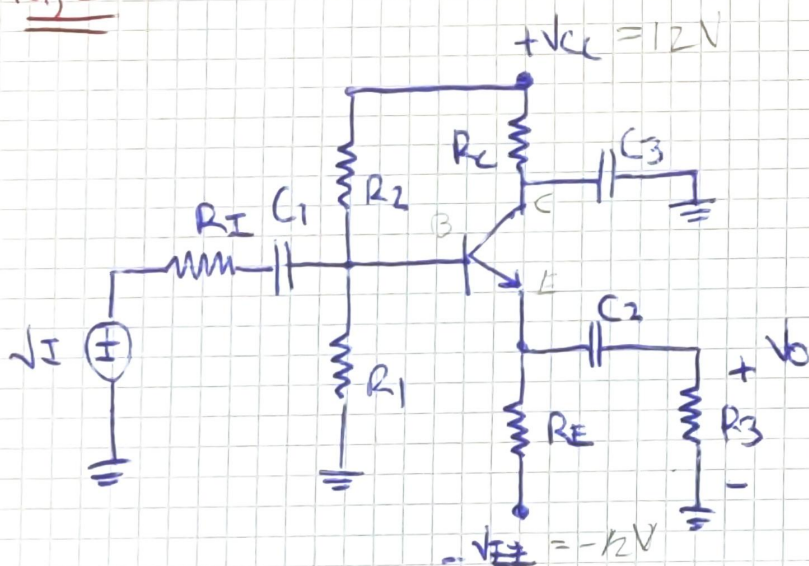
$$\frac{i_x}{V_x} = \frac{\beta + 1}{R_{ib} + r_{\pi}} \rightarrow \frac{V_x}{i_x} = \left| R_x = \frac{R_{ib} + r_{\pi}}{\beta + 1} \right| = \frac{81200 + 200}{81} = \underline{\underline{1004 \Omega}}$$

Guadagno di corrente $A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}}$

$$A_i = (\beta + 1) \left[\frac{R_B}{R_B + r_{\pi} + (\beta + 1)R_L} \right] \left(\frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + R_L} \right) =$$

$$= 81 \frac{47 \text{ k}\Omega}{47 \text{ k}\Omega + 200 \Omega + 81(1 \text{ k}\Omega)} = 29,7$$

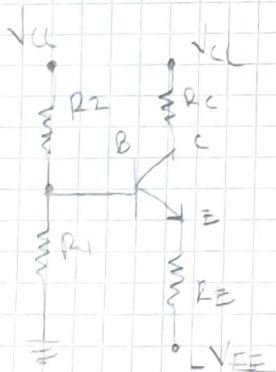
14,23



$$\begin{aligned} R_I &= 500 \Omega \\ R_1 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 100 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 2 \text{ k}\Omega \\ R_E &= 4,7 \text{ k}\Omega \\ R_C &= 2 \text{ k}\Omega \\ V_{CC} &= 12 \text{ V} \\ V_{EE} &= -12 \text{ V} \\ \beta_F &= 125 \\ V_A &= 50 \text{ V} \end{aligned}$$

Rich: A_v , R_{in} , R_{out} , massima ampiezza del segnale di ingresso per l'amplificatore

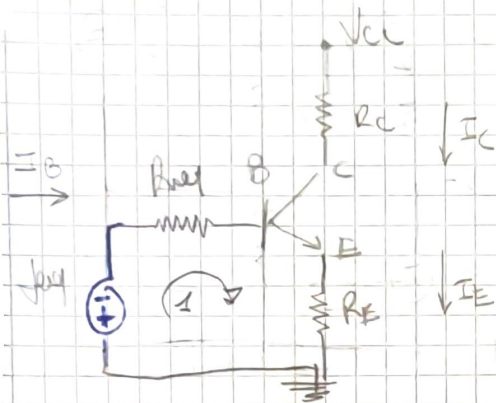
ANALISI DC



$$V_{eq} = -12 + 12 \frac{100}{100 + 100} = -6 \text{ V}$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

2) Considerato $-V_{EE}$ nell'equivalente di Thevenin non
 a più portabile dietro dato che è compreso dentro V_{EQ}



IPOTESI RAO

$$\begin{cases} V_{BE} \approx 0,7V \\ V_{CE} > V_{BE} \\ V_{BC} < -0,1 \end{cases}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

$$\text{KVL 1: } +V_{tq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

$$R_{eq} I_B + R_E I_B (\beta_F + 1) = -V_{tq} - V_{BE}$$

$$I_B (R_{eq} + R_E (\beta_F + 1)) = V_{tq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{+6 - 0,7}{(50 + 4,7 \cdot 126) \cdot 10^3} = 8,25 \mu A$$

$$I_E = 126 \cdot 8,25 \mu A \approx 1,04 \text{ mA}$$

$$I_C = 125 \cdot 8,25 \mu A \approx 1,03 \text{ mA}$$

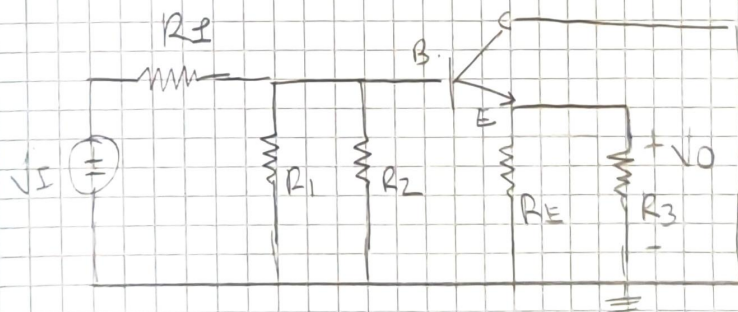
Allora V_{CE}

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$

$$V_{CE} = 24 - 2 \cdot 1,03 - 4,7 \cdot 1,04 = 17,1 \text{ V}$$

$$V_{CE} > V_{BE} \Rightarrow \underline{\text{OK STAMO IN RAO}} \Rightarrow Q \equiv (1,03 \text{ mA}, 17,1 \text{ V})$$

ANALISI AC



$$R_B = R_1 // R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

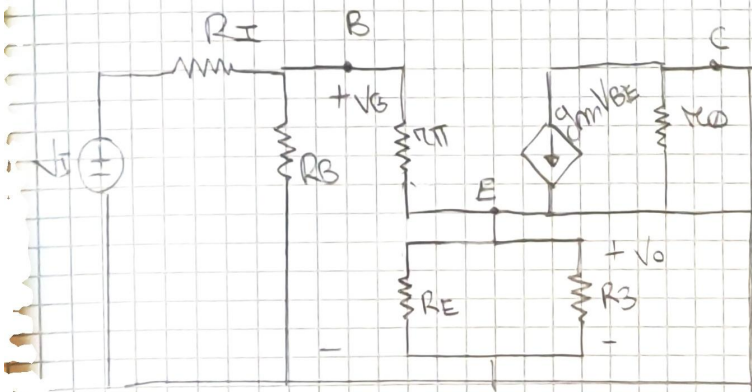
Sostituisco modello a piccola
 segnale

$$g_m = I_C / V_T = \frac{1,03}{25} = 0,0412 \text{ S}$$

$$= 41,2 \text{ mS}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} \approx 3 \text{ k}\Omega$$

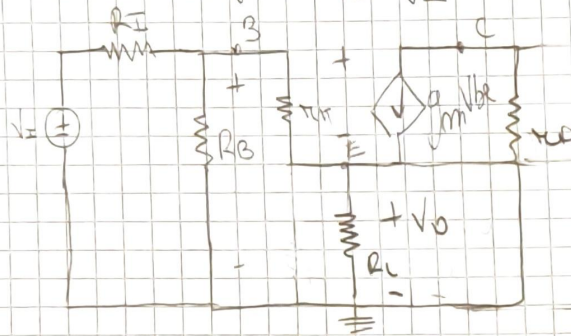
$$r_{L0} = \frac{V_0 + V_{BE}}{I_C} = 65,1 \text{ k}\Omega$$

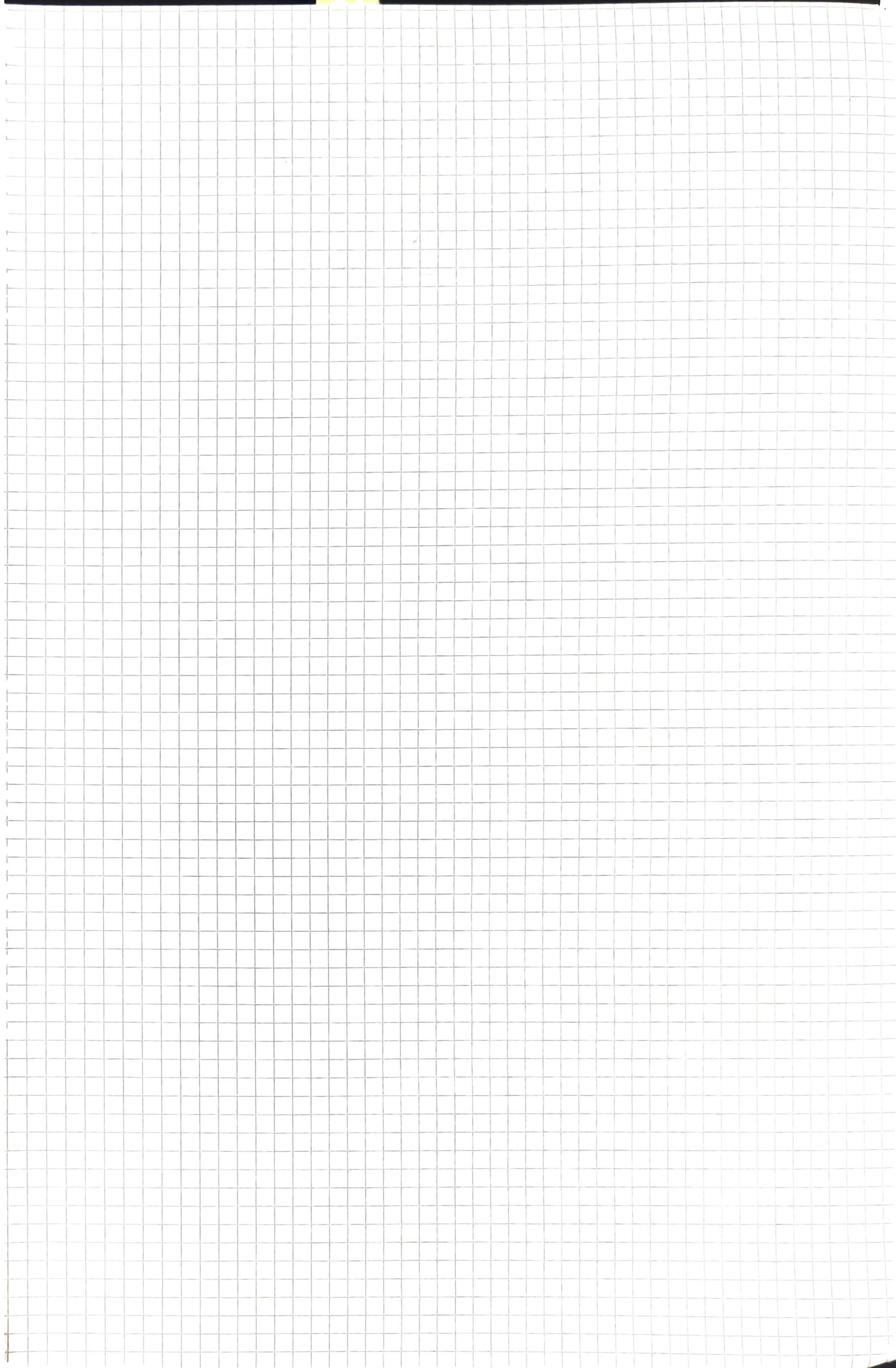


Guadagno in tensione $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_B} \frac{V_B}{V_i}$ non trascuro più parte di V_B

$$V_B = V_i \frac{R_B}{R_B + R_i}$$

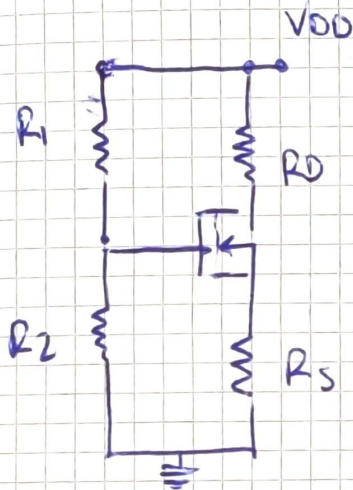
$$R_i = R_E // R_3 = 3,93 \text{ k}\Omega$$





13 FEBBRAIO 2018

①



$$V_{DD} = 18V$$

$$R_1 = 5,6 k\Omega$$

$$R_2 = 4,7 k\Omega$$

$$R_S = 1,2 k\Omega$$

$$R_D = 2,2 k\Omega$$

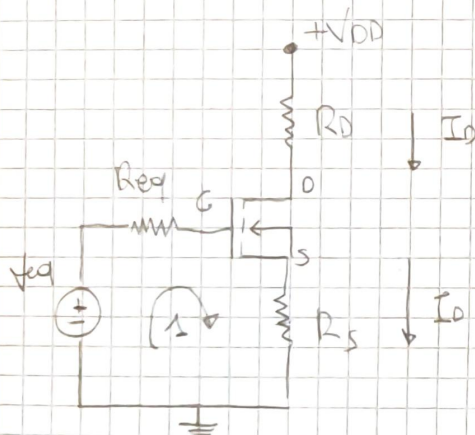
$$k_m = 0,4 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TH} = 3V$$

RICH: Punto di lavoro Q.

$$V_{eq} = 18 \frac{R_2}{R_2 + R_1} = 18 \frac{4,7}{4,7 + 5,6} = 8,21V$$

$$R_{eq} = R_1 // R_2 = \frac{5,6 \cdot 4,7}{5,6 + 4,7} = 2,55 k\Omega$$



IPOTESI SAT

$$I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad V_{GS} \geq V_{GS} - V_{TH}$$

KVL I.

$$-V_{eq} + V_{GS} + R_S I_D = 0$$

$$-V_{eq} + V_{GS} + \frac{R_S k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0$$

$$-8,21 + V_{GS} + \frac{1,2 \cdot 0,4}{2} (V_{GS} - 3)^2 = 0$$

$$-8,21 + V_{GS} + 0,24 (V_{GS}^2 + 9 - 6V_{GS}) = 0$$

$$-8,21 + V_{GS} + 0,24 V_{GS}^2 + 2,16 - 1,44 V_{GS} = 0$$

$$0,24 V_{GS}^2 - 0,44 V_{GS} - 6,05 = 0$$

$$0,44 \pm \sqrt{0,1936 - 4(0,24)(-6,05)}$$

$$2 \cdot 0,24$$

$$= 0,44 \pm 2,44$$

$$1,76$$

$$1,63V$$

$$-1,13V$$

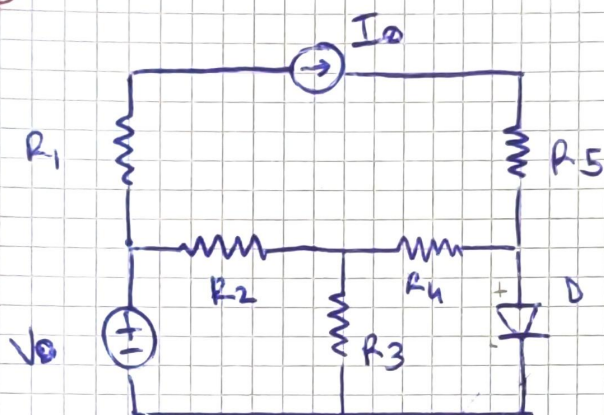
Mon. Siaw im SAT.

PROBLEMA LINEARE

$$\begin{cases} I_D = I_{S0} \left(V_{DS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \\ -V_{eq} + V_{DS} + R_S I_D = 0 \\ V_{DS} = R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D = 0 \end{cases}$$

3 equaz. a 3 incognite

(2)



$$V_0 = 2,5V$$

$$I_0 = 65 \mu A$$

$$R_1 = 10 k\Omega$$

$$R_2 = 10 k\Omega$$

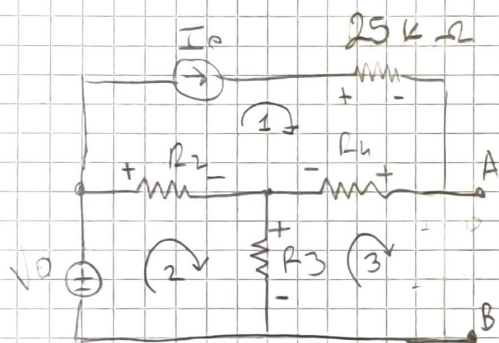
$$R_3 = 20 k\Omega$$

$$R_4 = 15 k\Omega$$

$$R_5 = 15 k\Omega$$

$$V_{TH} = 0,7V$$

RICH. costante due diodi considerando temp. ambiente.



$$R_1 + R_5 = 25 k\Omega$$

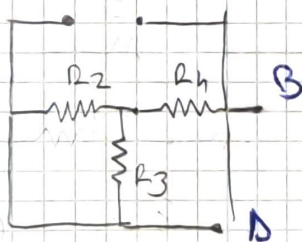
$$1 \quad I_0 \cdot 25 k\Omega + V_{R4} - V_{R2} = 0$$

$$2 \quad -V_0 + V_{R2} + V_{R3} = 0$$

$$3 \quad -V_{R3} - V_{R4} + V_0 = 0$$

Cerca di trovare

Req



$$R_3 // R_4 = \frac{20 \cdot 10}{20 + 10} = 6,66 k\Omega$$

$$(R_3 // R_4) + R_4 = 21,66 k\Omega \equiv R_{eq}$$

$$R_{eq} = 6,6 k\Omega$$

Per trovare la Req in derivando la Tensione ai morsetti A, B usando PSE

CAPITOLO 17 RISPOSTA IN FREQUENZA

17.1

$$A_v(s) = \frac{50s^2}{(s+2)(s+30)}$$

$$A_v(s) = 50 \frac{s^2}{(s+2)(s+30)}$$

$$A_{mid} = 50$$

$$F_L(s) = \frac{s^2}{(s+2)(s+30)}$$

• Polo dominante a -30

APPROSSIMAZIONE: $F_L(s) = \frac{s}{s+30} \Rightarrow A_v(s) = 50 \frac{s}{s+30}$

$$\omega_L = 2\pi f_L = 30 \Rightarrow f_L = \frac{30}{2\pi} = 4,77 \text{ Hz}$$

SENZA APPROSSIMAZIONE

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2^2 + 30^2 - 2(0^2 - 0^2)} \approx 4,78 \text{ Hz}$$

17.2

$$A_v(s) = \frac{200s^2}{2s^2 + 1100s + 100000} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

RICH: Stesse dell'es. precedente

$D(s) = 0$ eq II° grado, Trovo le soluzioni $\begin{cases} s_1 = -80,8 \\ s_2 = -619, \end{cases}$ quindi

$$A_v(s) = 200 \frac{s^2}{(s+80,8)(s+619)}$$

ZERI $z=0, \mu=2$ POLI $p=-80,8$
 $p=-619$

$$A_{mid} = 200$$

Reso dominante $\omega_p = 619$

APPROSSIMATO $A_V(s) = 200 \frac{s}{s + 619}$

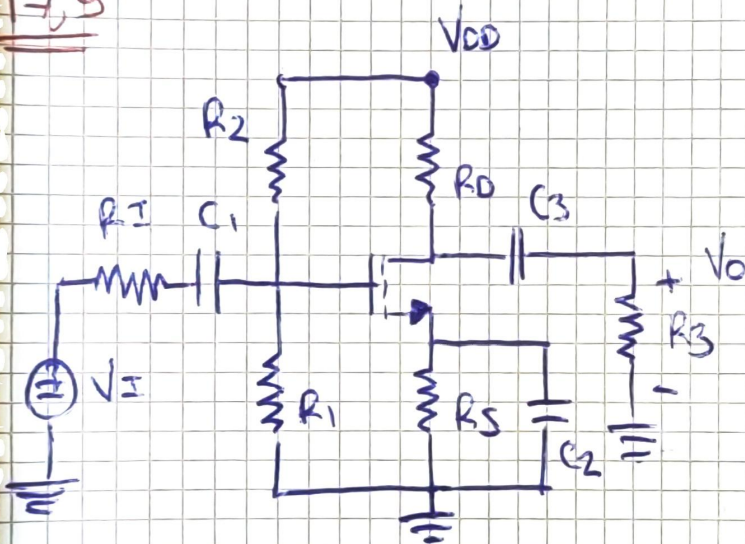
$f_L = \frac{619}{2\pi} = 98,5 \text{ Hz}$

SENZA APPROSSIMAZIONE

$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{80,8^2 + 619^2} = 99,3 \text{ Hz}$

Caratterizzazione diretta di poli e zeri a BASSA FREQUENZA
 • Amplificatore a SOURCE COMUNE

Fig. 9



$R_I = 1 \text{ k}\Omega$

$C_1 = 0,1 \mu\text{F}$

$R_1 = 4,3 \text{ M}\Omega$

$C_2 = 10 \mu\text{F}$

$R_2 = 5,6 \text{ M}\Omega$

$C_3 = 0,1 \mu\text{F}$

$R_h = 13 \text{ k}\Omega$

$R_D = 43 \text{ k}\Omega$

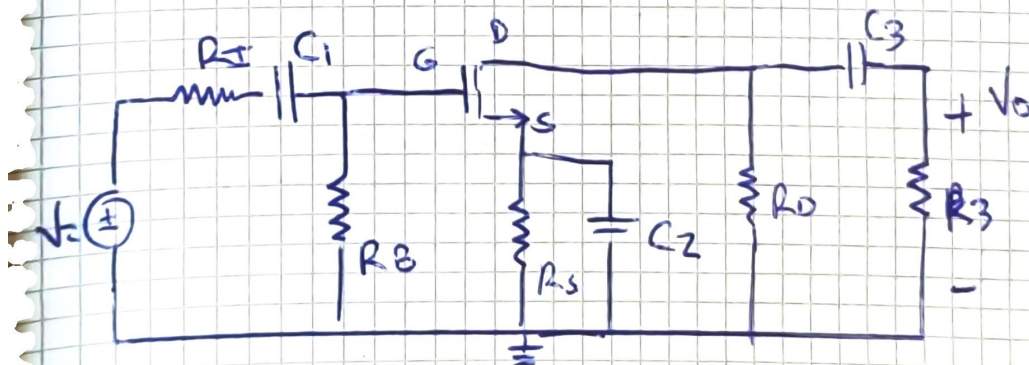
$R_3 = 170 \text{ k}\Omega$

$Q = (0,2 \text{ mA}; 5 \text{ V})$

$V_{GS} - V_{TN} = 1 \text{ V}$

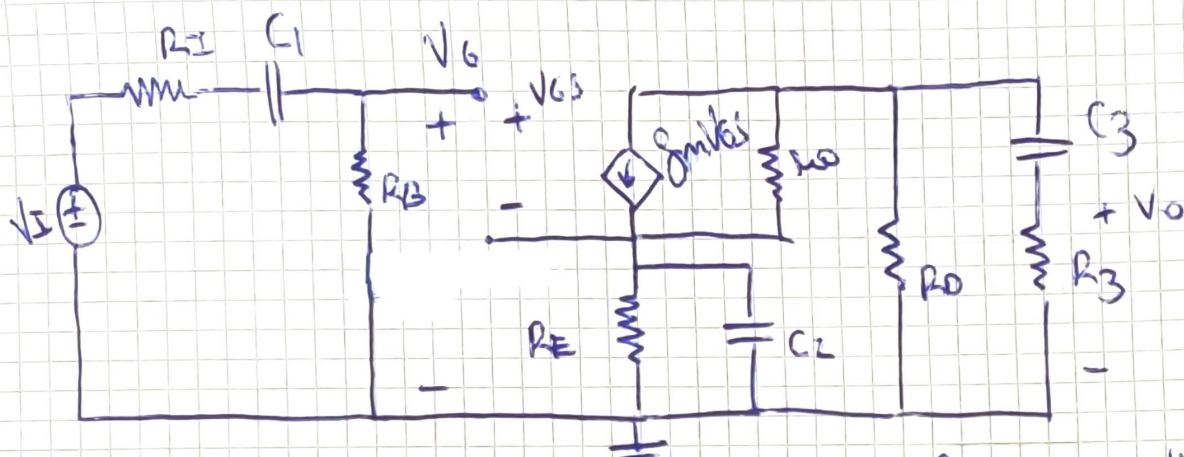
RICH: a) Disegnare circuito equivalente a basse frequenze
 b) Frequenza di taglio inferiore e il guadagno a centro banda.

c) A bassa frequenza ci sono solo i condensatori C_1, C_2, C_3

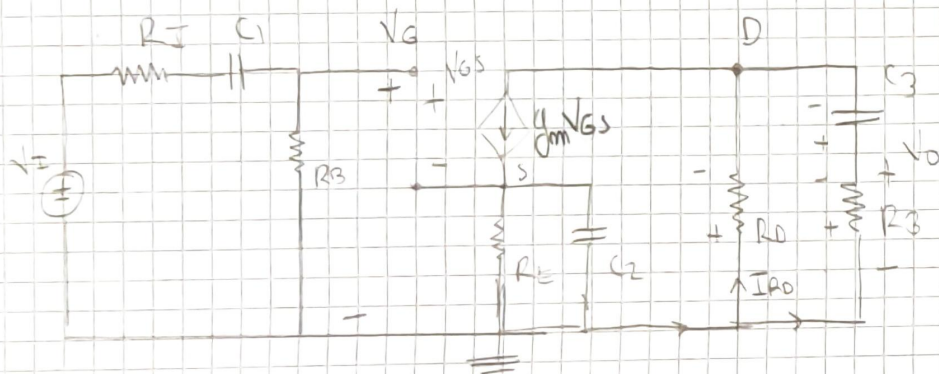


Sostituisco modello piccoli segnali al MOS

$R_B = R_1 // R_2 = 2,43 \text{ M}\Omega$



r_{ds} si trascura perché non è stata specificata quindi la trascuriamo come fosse un c.a.



b) Frequenza di taglio inferiore e guadagno a centro banda

$$A_v(s) = A_{mid} F_L(s)$$

$$g_m = \frac{2 I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,4 \text{ mS}$$

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

$$R_E // C_2 = \frac{R_E \cdot \frac{1}{sC_2}}{R_E + \frac{1}{sC_2}} = \frac{R_E}{sC_2} \cdot \frac{1}{\frac{R_E sC_2 + 1}{sC_2}} = \frac{R_E}{sC_2} \cdot \frac{sC_2}{R_E sC_2 + 1} = \frac{R_E}{R_E sC_2 + 1}$$

$$I_{D0} = g_m V_{GS} \cdot \frac{R_D}{R_D + R_3 + \frac{1}{sC_3}} = \frac{R_D}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1} = \frac{R_D (sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1)}{sC_3} g_m V_{GS}$$

potenza di corrente

$$V_{D0} = R_3 I_{D0} = \frac{R_D^2 (sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1)}{sC_3} g_m V_{GS}$$

$$I_{R3} = g_m V_{GS} \frac{R_3 + 1/sC_3}{R_3 + \frac{1}{sC_3} + R_D} = \frac{R_3}{sC_3} \frac{1}{sC_3 R_3 + sC_3 R_D + 1} = \frac{R_3}{sC_3} \frac{sC_3}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1}$$

$$= \frac{R_3}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1} g_m V_{GS}$$

$$V_O = R_3 \cdot I_{R3} = \frac{R_3^2 g_m V_{GS}}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1}$$

$$V_O = \sqrt{I} \frac{R_B}{R_B + R_I + \frac{1}{sC_1}} = \sqrt{I} \frac{R_B}{\frac{sC_1 R_B + sC_1 R_I + 1}{sC_1}} = \frac{sC_1 R_B}{sC_1 R_B + sC_1 R_I + 1} \sqrt{I}$$

$$V_O = g_m V_{GS} (R_E \parallel R_{C2}) = \frac{R_E}{sC_2 R_E + 1} g_m V_{GS}$$

Quindi

$$A_v(s) = \frac{V_O(s)}{V_G(s)} \frac{\sqrt{I}(s)}{\sqrt{I}(s)} = \frac{\frac{R_3^2}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1} g_m V_{GS}}{\frac{R_E}{sC_2 R_E + 1} g_m V_{GS}} \cdot \frac{\frac{sC_1 R_B}{sC_1 R_B + sC_1 R_I + 1} \sqrt{I}}{\sqrt{I}} =$$

$$= \frac{R_3^2}{sC_3 R_D + sC_3 R_3 + 1} \frac{sC_2 R_E + 1}{R_E} \frac{sC_1 R_B}{(sC_1 R_B + sC_1 R_I + 1)}$$

portare la f di trasformazione a memoria

$$A_v(s) = \frac{R_3^2}{[s(C_3 R_D + C_3 R_3) + 1]} \frac{sC_2 R_E + 1}{R_E} \frac{sC_1 R_B}{[s(C_1 R_B + C_1 R_I) + 1]} =$$

$$= \frac{R_3^2 (C_2 R_E) (C_1 R_B)}{R_E (C_3 R_D + C_3 R_3)} \frac{1}{s + \frac{1}{(C_1 R_B + C_1 R_I) C_3 R_D + C_3 R_3}} \frac{s + \frac{1}{C_2 R_E}}{1} \frac{s}{s + \frac{1}{C_1 R_B + C_1 R_I}} =$$

Quid

$$\Delta(s) = \frac{R_3^2 (G_{RE}) (G_{RB})}{R_E (C_3 R_0 + C_3 R_3) (C_{RB} + C_{RI})}$$

$$\frac{R_E (C_3 R_0 + C_3 R_3) (C_{RB} + C_{RI})}{\text{Amid}}$$

Amid

$$\left(s + \frac{1}{C_2 R_E} \right) s$$

$$\left(s + \frac{1}{C_{RB} + C_{RI}} \right)$$

$$\Delta_{mid} = \frac{R_3^2 C_2 R_E \cancel{C_{RB}}}{R_E C_3 (R_0 + R_3) \cancel{C_{RB}} (R_B + R_I)}$$

$$\frac{R_3^2 C_2 R_B}{C_3 (R_0 + R_3) (R_B + R_I)}$$

$$= \frac{R_3^2 C_2 R_B}{C_3 (R_0 + R_3) (R_B + R_I)}$$

$$= \frac{R_3^2 C_2 R_B}{C_3 (R_0 + R_3) (R_B + R_I)}$$

$$= \frac{(470 \cdot 10^3)^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2,43 \cdot 10^8}{0,1 \cdot 10^{-6} (43 + 470) \cdot 10^3 (2,43 \cdot 10^6 + 10^3)}$$

$$= \frac{5,36 \cdot 10^{12}}{0,1 \cdot 10^{-6} (513) 10^3 \cdot (2,43 \cdot 10^6)}$$

$$0,1 \cdot 10^{-6} (43 + 470) \cdot 10^3 (2,43 \cdot 10^6 + 10^3)$$

$$0,1 \cdot 10^{-6} (513) 10^3 \cdot (2,43 \cdot 10^6)$$

$$\Delta_{mid} = 42997296,63 \text{ e doublet venen } -16,5$$

21 Gennaio 2022

$$R_G = 10k\Omega$$

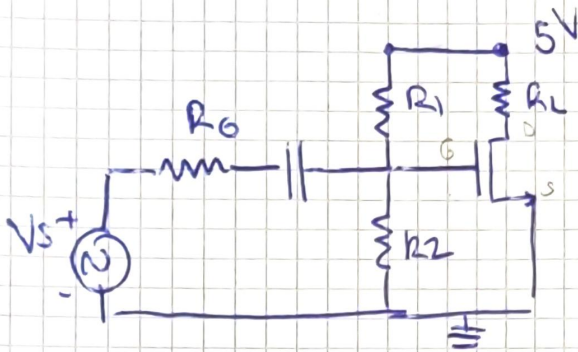
$$R_L = 1k\Omega$$

$$k_{mn} = 2mA/V^2$$

$$V_T = 0,8V$$

$$V_A = \infty$$

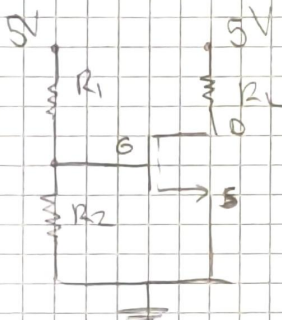
$$I_D = 1,25mA \text{ in SATURAZIONE}$$



a) Determinare valore di R_1 e R_2 in modo opportuno da avere quella I_D in SATURAZIONE

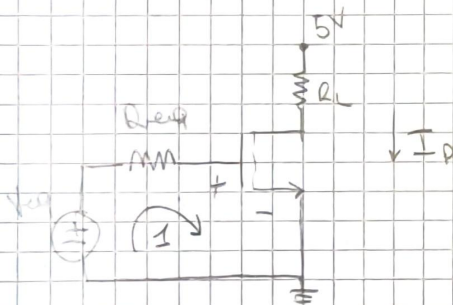
ANALISI DC

Divisione del carico a SX



$$V_{eq} = 5 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



IPOTESI SATURAZIONE

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \geq 0$$

$$I_D = \frac{k_{mn}}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$V_{GS} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2I_D}{k_{mn}}} \rightarrow V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2I_D}{k_{mn}}} = 0,8 + \sqrt{\frac{2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} = 1,91V$$

Regola di KVL

$$5 = R_L I_D + V_{DS} \rightarrow V_{DS} = 5 - R_L I_D = 5 - 10^3 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} = 3,75V$$

$$\text{Condizione di saturazione } V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \geq 0 \rightarrow 3,7 \geq 1,91 - 0,8 \quad \text{OK}$$

$$V_{DS} = 3,75V$$

$$V_{GS} = 1,91V$$

$$I_D = 1,25mA$$

$$KVL 1 - V_{eq} + V_{GS} = 0$$

$$V_{eq} = V_{GS}$$

$$5 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1,91$$

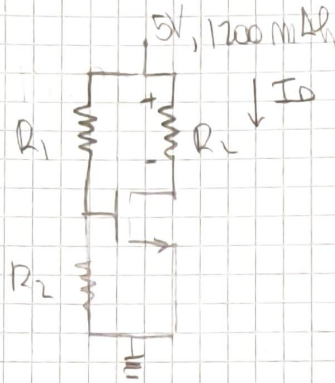
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1,91}{5} = 0,382$$

$$R_1 = 0,382(R_1 + R_2) \quad R_1 = 0,382R_1 + 0,382R_2 \quad R_1(1 - 0,382) = 0,382R_2$$

$$R_1 = \frac{0,382}{1 - 0,382} R_2 \rightarrow R_1 = 0,62R_2 \quad \begin{cases} R_2 = 10k\Omega \\ R_1 = 6,2k\Omega \end{cases}$$

si calcoli per questo tempo il circuito possa funzionare considerando una alimentazione a batteria da 1200 mAh

$$\frac{1200 \text{ mAh}}{I_0 + \text{corrente}} \text{ possa su } R_1 \text{ e } R_2$$

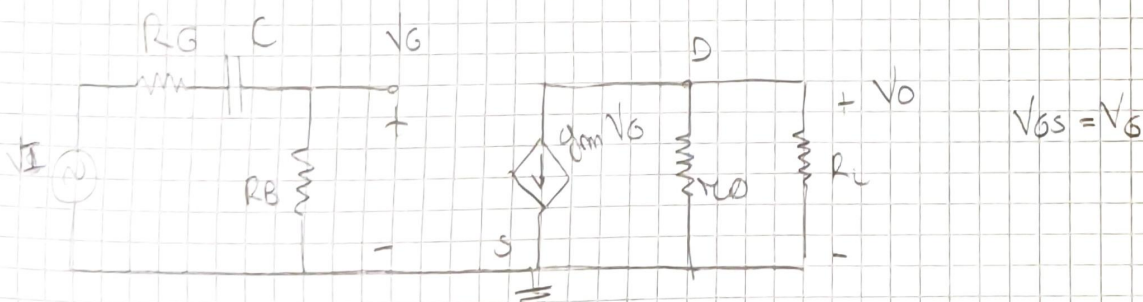
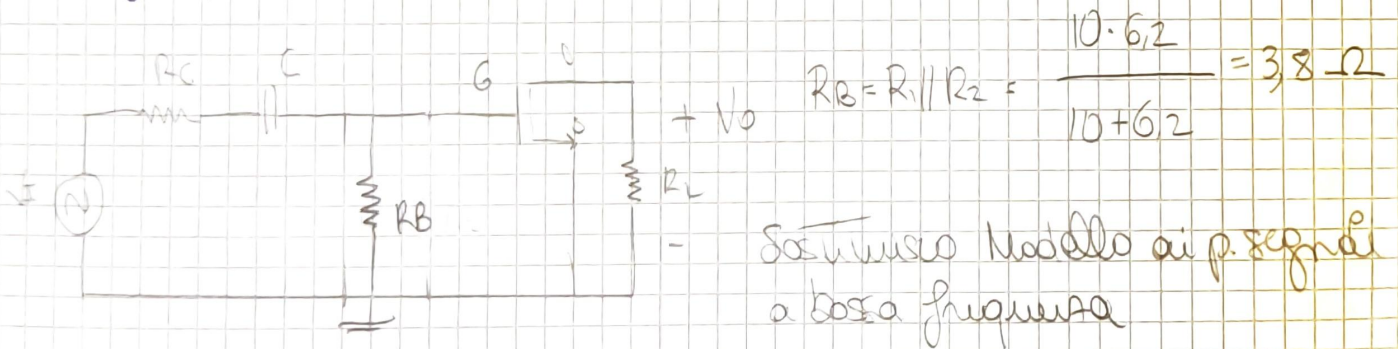


Saremo $(R_1 + R_2)$ che fanno in unica resistenza che ai capi ha una tensione di 5V

$$I_{R_1, R_2} = \frac{5}{R_1 + R_2} = \frac{5}{16,2 \cdot 10^3} \approx 0,3 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow \text{Tempo} = \frac{1200 \text{ mAh}}{1,25 + 0,3 \text{ mA}} = 776 \text{ ore} \rightarrow 32,25 \text{ giorni}$$

b) Calcolare il valore della capacità C da mettere tra il generatore forzante e il modo di gate, in grado di consentire l'amplificazione di segnali audio di frequenza superiore a 20 Hz



$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{V_o(s)}{V_g(s)} \cdot \frac{V_g(s)}{V_i(s)}$$

Supponi $V_A = \infty \Rightarrow r_{ds} \rightarrow \infty$ Trascurabile

$$V_O(s) = -g_m R_L V_G(s)$$

$$V_O(s) = \sqrt{I} \frac{R_B}{R_G + R_B + \frac{1}{sC}} = \frac{R_B \sqrt{I}}{\frac{sC(R_B + R_G) + 1}{sC}} = \frac{sC R_B \sqrt{I}}{sC(R_B + R_G) + 1}$$

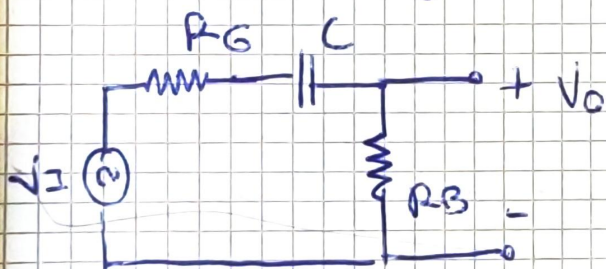
Quindi

$$V_O(s) = -g_m R_L R_B \frac{sC}{sC(R_B + R_G) + 1} \quad \text{allora}$$

$$\frac{V_O(s)}{V_G(s)} \frac{V_G(s)}{\sqrt{I}(s)} = -g_m R_L R_B \frac{sC}{sC(R_B + R_G) + 1} \cdot \frac{sC R_B}{sC(R_B + R_G) + 1}$$

$$A_V(s) = -g_m R_L R_B^2$$

Bidogan mette le condensatore T_{OL} da togliere frequenze inferiori a 20Hz, ma ci comporta come se mos fosse dopo quindi si considera il circuito fino al terminale di gate



$$A_V = \frac{V_O(s)}{V_I(s)}$$

$$V_O(s) = V_I \frac{R_B}{R_G + R_B + \frac{1}{sC}} = \frac{R_B \sqrt{I}}{\frac{sC(R_G + R_B) + 1}{sC}} =$$

$$= \frac{sC R_B}{sC[R_G + R_B] + 1} \sqrt{I} \Rightarrow A_V(s) = R_B \frac{sC}{(sC[R_B + R_G] + 1)}$$

$$A_V(s) = \frac{R_B R}{R[R_B + R_G]} \frac{s}{\left(s + \frac{1}{C[R_B + R_G]}\right)} \quad \text{pozo in } - \frac{1}{C(13,8 \cdot 10^3)}$$

Si ha un polo dominante

$$\Rightarrow \omega_L = \omega_p \Rightarrow f_L = \frac{\omega_p}{2\pi}$$

$$20 \text{ Hz} = \frac{1}{C(13,8 \cdot 10^3) \frac{1}{2\pi}}$$

$$C = \frac{1}{20 \cdot 2\pi (13,8 \cdot 10^3)} = 5,76 \cdot 10^{-7} \text{ F} = 57,6 \text{ nF}$$

c) Disegnare la risposta in frequenza del filtro in ingresso di modulo e fase con le diagramme di Bode.

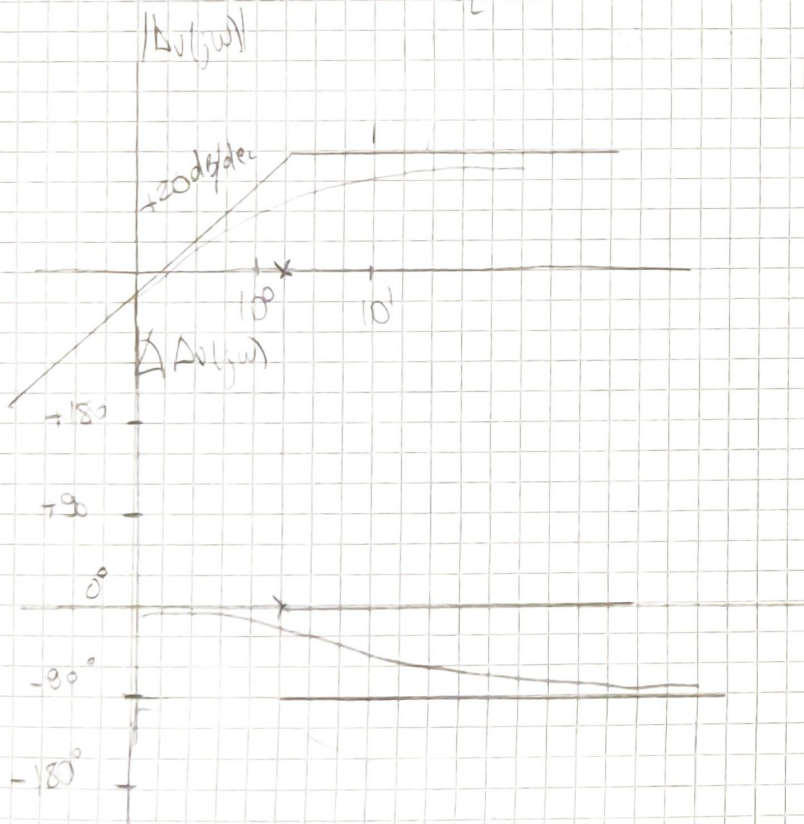
$$A_v(s) = \frac{R_B}{R_B + R_G} \frac{s}{s + \frac{1}{C(R_B + R_G)}} = 0,27 \frac{s}{s + \frac{1}{0,79489}} = 0,27 \frac{s}{s + 1,26}$$

$$|A_v(s)|_p = 20 \log_{10}(1,26) = 2,007$$

$z=0 \Rightarrow$ INIZIO con $+20 \text{ dB/dec}$

$\Delta \Delta_v(\omega)$

OK



ESERCITAZIONE ELETTRONICA 1 28 marzo 2019

Progettare una rete di polarizzazione a 1 tensione per un transistor npr. bjt da ottenere:

$$I_C = 10 \mu A$$

$$V_{CE} = 6V$$

$$V_{CC} = 18V$$

$$\beta_F = 75$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

IPOTESI SUT

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$V_{CE} \gg V_{BE} \quad ok$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{75} A = 0,13 \mu A$$

$$I_E = 0,133 \cdot 10^{-6} \cdot 76 = 10,1 \mu A$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_C = 10 \mu A \\ I_E = 10,1 \mu A \\ I_B = 0,13 \mu A \end{cases}$$

abbiamo che $V_{CC} - V_{CE} = 12V = V_{RC} + V_{RE}$

Suppongo di voler distribuire EQUAMENTE la tensione fra le due resistenze

$$V_{RC} = 6V \quad V_{RE} = 6V$$

$$V = I \cdot R \quad R = \frac{V}{I}$$

allora le resistenze valgono

$$R_C = \frac{6}{10 \cdot 10^{-6}} = 600 k\Omega$$

$$R_E = \frac{6}{10,1 \cdot 10^{-6}} = 594 k\Omega$$

Dalla prima parte abbiamo

$$V_{CC} = V_{R1} + V_{R2}$$

$$-V_{R2} + V_{BE} + V_{RE} = 0 \rightarrow V_{R2} = V_{BE} + V_{RE} = 0,7 + 6 = 6,7V$$

$$\rightarrow V_{R1} = V_{CC} - V_{R2} = 11,3V$$

$$V_{CB} = 5,3V$$

$$I_2 = I_1 - I_B$$

$$V_{R1} = 11,3V$$

$$V_{R2} = 6,7V$$

$$S_1 \quad \begin{cases} -I_2 R_2 + V_{BE} + V_{RE} = 0 \\ I_2 = I_1 - I_B \\ -I_1 R_1 + R_E I_C + V_{BC} = 0 \end{cases} \quad I_2 R_2 = 6,7$$

$$2 \quad V_{CC} = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

Assumo di fornire a R_1 una corrente pari a 10 volte di quella in base

$$I_1 = 10 \cdot I_B = 1,3 \mu A$$

$$C \quad R_1 = \frac{V_{R1}}{I_1} = \frac{11,3}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 8,69 \text{ M}\Omega$$

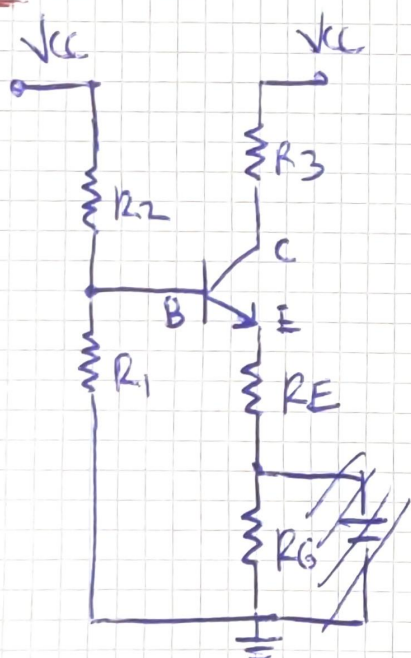
$$I_2 = I_1 - I_B = 1,7 \mu A$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{6,7}{1,7 \cdot 10^{-6}} = 3,94 \text{ M}\Omega$$

OK

da cui $V_{BC} < 0$ e transistoro

ESERCIZIO 2



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 12 \text{ V} \\ R_I &= 2 \text{ k}\Omega \\ R_1 &= 160 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 300 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 22 \text{ k}\Omega \\ R_E &= 3 \text{ k}\Omega \\ R_6 &= 10 \text{ k}\Omega \\ R_F &= 100 \text{ k}\Omega \\ \beta_F &= 100 \\ V_b &= 50 \text{ V} \end{aligned}$$

RICH: a) punto di lavoro Q e verificare funzionamento con PFD

b) circuito eq piccoli segn. e calcolare A_v , A_{im} , A_{ot}

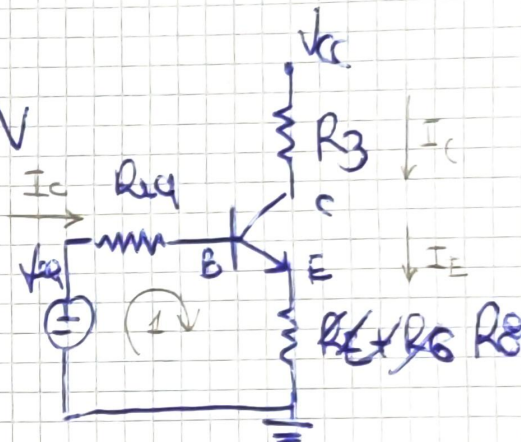
c) Assumendo di fornire un ingresso in segnale sinusoidale con frequenza $f_s = 1 \text{ kHz}$, si dimensioneranno i condensatori C_1, C_2, C_3

Q) Operiamo a sx

$$V_{eq} = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 12 \frac{160}{160 + 200} = 4,17 \text{ V}$$

$$R_{eq} = R_1 || R_2 \approx 104 \text{ k}\Omega$$

$$R_E + R_6 = 13 \text{ k}\Omega = R_8$$



IPOTESI QQQ

$$\text{KVL I} \quad -V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_8 I_E = 0$$

$$\begin{cases} V_{BE} \approx 0,7 \text{ V} \\ V_{CE} \geq V_{BE} \\ V_{BC} < -0,1 \end{cases}$$

$$R_{eq} I_B + R_8 (\beta_F + 1) I_B = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B [R_{eq} + R_8 (\beta_F + 1)] = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{eq} - V_{BE}}{R_{eq} + R_8 / \beta_F} = \frac{3,47}{1417 \cdot 10^3} \approx 2,49 \mu\text{A}$$

$$I_E = 101 \cdot 2,49 \mu\text{A} = 251,49 \mu\text{A} \approx 0,251 \text{ mA}$$

$$I_C = 100 \cdot 2,49 \mu\text{A} \approx 249 \mu\text{A} \approx 0,249 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = R_3 I_C + V_{CE} + R_8 I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_3 I_C - R_8 I_E = 12 - 22 \cdot 10^3 \cdot 0,249 - 13 \cdot 0,251 = 3,26 \text{ V}$$

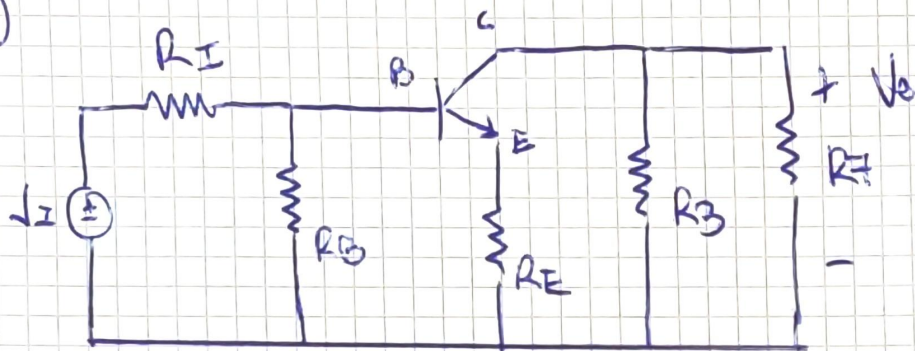
$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -2,56 < -0,1 \quad \underline{\text{OK}}$$

$$V_{CE} \gg V_{BE}$$

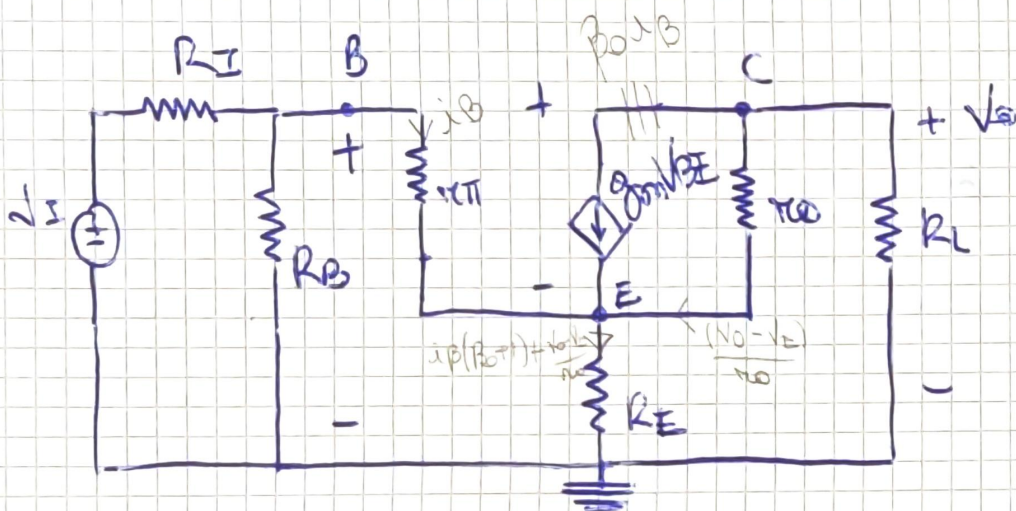
$$\Rightarrow \text{STATO IN QQQ} \quad Q \approx (249 \mu\text{A}; 3,26 \text{ V})$$

$$P_{QF} = (245 \mu\text{A}; 3,39 \text{ V})$$

b)



Sostituire il modello a piccoli segnali



$$g_m v_{be} = \beta_0 i_B \approx \beta_F i_B$$

$$g_m v_{be} = \beta_0 i_B$$

$$R_L = R_3 // R_F = 75 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = R_1 // R_2 = 106 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{265 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-3}} = 9,8 \text{ mS}$$

$$r_{ie} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{100}{9,8 \cdot 10^{-3}} = 10,2 \text{ k}\Omega$$

$$r_{oe} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} = \frac{50,7}{265 \cdot 10^{-6}} = 207 \text{ k}\Omega$$

Si può trascurare r_{oe} nel calcolo del guadagno in tensione A_v se

$$A_v \ll \mu_f \quad \text{con} \quad \mu_f = \frac{V_A + V_{CE}}{V_T} \approx \frac{V_A}{V_T} = 9,025$$

(guadagno intrinseco di tensione)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_b} \frac{V_b}{V_o}$$

$$V_b = V_i \frac{R_b}{R_i + R_b}$$

$$V_{be} = V_b \cdot \mu_{LH}$$

Saturat? $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} = 2,5 - 1,79 = 0,71 \Rightarrow$ SÌ SAT!

$$k_m = 100 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^2 = 800 \mu\text{A/V}^2 = 0,8 \text{ mA/V}^2$$

$$i_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{0,8}{2} \cdot 10^{-3} (2,5 - 1,79)^2 = \frac{0,8}{2} \cdot 10^{-3} (0,5)^2 = 0,201 \text{ mA}$$

b) $V_{DS} = 0,5 \text{ V}$

In questo caso $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} = 0,71$ NO!

$\Rightarrow$ Reg di TRI 000

$$i_D = k_m \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} =$$

$$= 0,8 \cdot 10^{-3} \left(0,71 - \frac{0,5}{2} \right) 0,5 = 0,184 \text{ mA}$$

4,4h NMOS a Sottosoglia ($V_{TH} < 0$)

$$2\phi_F = 0,75 \text{ V}$$

$$V_{TO} = -1,5 \text{ V}$$

$$\gamma = 1,5 \sqrt{\text{V}}$$

RICH: Determinare V_{SB} T.c. ienno dinente
ad onicchiamento ($V_{TH} > 0$) precisente
con $V_{TH} = 0,85 \text{ V}$

$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

$$\frac{V_{TH} - V_{TO}}{\gamma} = \sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F}$$

$$\frac{V_{TH} - V_{TO}}{\gamma} + \sqrt{2\phi_F} = \sqrt{V_{SB} + 2\phi_F}$$

$$\frac{0,85 + 1,5}{1,5} + 0,87 = \sqrt{V_{SB} + 2\phi_F}$$

$$2,44 = \sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} \rightarrow 5,94 = V_{SB} + 2\phi_F$$

$$\Rightarrow V_{SB} = 5,94 - 0,75 = \boxed{5,17 \text{ V}}$$

MOSTREI A CORRETE P - PLOS

pag 1065

4,46 PLOS

RICH: Calcolare k_p^1

$$\mu_p = 200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$T_{ox} = 50 \text{ nm}, 20 \text{ nm}, 10 \text{ nm}, 5 \text{ nm}$$

$$k_p^1 = \mu_p C_{ox} = \mu_p \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,9 \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}$$

$$F = \frac{C}{V}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,9 \cdot \epsilon_0 = 34,54 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}$$

per te ϵ_{ox} da F/cm a F/cm

$$\text{cm} \cdot 10^2 = \text{cm}$$

$$\epsilon_{ox} = 34,54 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{10^2 \text{ cm}} = 34,54 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$$

Ho parte da cm a mcm

$$a) k_p^1 = 200 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}} \cdot 34,54 \cdot 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}} \frac{1}{50 \cdot 10^{-9} \cdot 10^2 \text{ cm}} =$$

$$= 200 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}} \cdot 34,54 \cdot 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}} \frac{1}{50 \cdot 10^{-7} \text{ cm}} =$$

$$= 1,3816 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{V}\cdot\text{s}} \frac{\text{C}}{\text{V}} = 13,816 \mu \frac{\text{C}}{\text{V}\cdot\text{s}^2}$$

$$C = A \cdot s$$

$$= 13,816 \mu \frac{A \cdot s}{s \cdot \text{V}^2}$$

$$= 13,816 \mu \text{A}/\text{V}^2 \quad \underline{\underline{OK}}$$

$$b) k_p^1 = \frac{200 \cdot 34,54 \cdot 10^{-14}}{50 \cdot 10^{-7}} \approx 34,54 \mu \text{A}/\text{V}^2$$

gli altri si calcolano allo stesso modo

4,49 PMOS
 $W/L = 20/1$
 $V_{GS} = 0V$

b) $V_{GS} = -1,3V$
 $V_{DS} = -0,2V$

RICH. Calcolare i_D nei
 casi a) b) c).

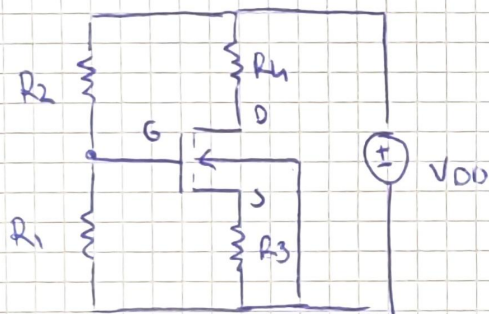
a) $V_{GS} = -1,1V$
 $V_{DS} = -0,2V$

c) fare a) e b) con
 $V_{GS} = 1V$

a)

Polarizzazione con rete a 4 resistenze

4,51



$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$
 $R_4 = 12 \text{ k}\Omega$

$V_{DD} = 12V$
 $V_{TH} = 1V$
 $\gamma = 0$
 $W/L = 5/1$

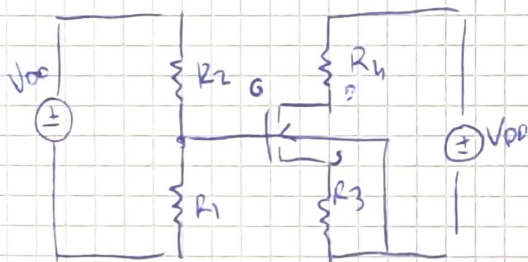
RICH.

a) p.t.s. lavoro Q

b) p.t.s. lavoro Q con $W/L = 10/1$

a)

$k_m = 100 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2} = 500 \mu A/V^2 = 0,5 \text{ mA/V}^2$

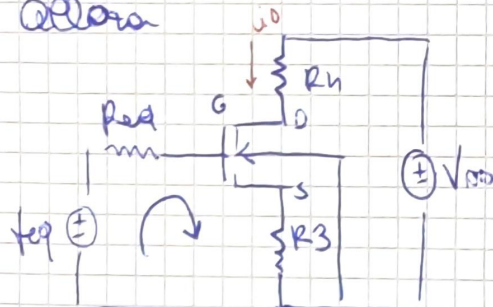


Operiamo maglia di amperes

$V_{eq} = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 12 \frac{100}{100 + 220} = 3,75V$

$R_{eq} = R_1 // R_2 = \frac{100 \cdot 220}{100 + 220} = 68,75 \text{ k}\Omega$

allora



IPOTESI: SATURAZIONE

$V_{GS} \geq V_{GS} - V_{TH}$

KVL $-V_{eq} + V_{GS} + R_3 i_D = 0$

$i_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$ sostituiamo

$-V_{eq} + V_{GS} + R_3 \left[\frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \right] = 0$

$$-V_{eq} + V_{GS} + \frac{k_m R_3}{2} (V_{GS}^2 - 2V_{GS} V_{TH} + V_{TH}^2) = 0$$

$$-3,75 + V_{GS} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 24 \cdot 10^3 (V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1) = 0$$

$$-3,75 + V_{GS} + 6V_{GS}^2 - 12V_{GS} + 6 = 0$$

$$6V_{GS}^2 - 11V_{GS} + 2,25 = 0$$

$$\frac{11 \pm \sqrt{121 - 4 \cdot 6 \cdot 2,25}}{12} = \frac{11 \pm \sqrt{64}}{12} = \frac{11 \pm 8,19}{12} \begin{cases} 1,6 \text{ V} \\ 0,23 \text{ V} \end{cases}$$

Si sceglie $V_{GS} - V_{TH} > 0$ per situazione scelta

$$V_{GS} = 1,6 \text{ V}$$

Quindi

$$i_D = 0,25 \cdot 10^{-3} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0,25 \cdot 10^{-3} (1,6 - 1)^2 = 0,15 \text{ mA} = 150 \mu\text{A}$$

~~0,15 mA~~
0,08 mA = 80 μA

KVL maglia di uscita

$$-V_{DS} + R_{D1} i_D + R_3 i_D + V_{GS} = 0$$

$$-12 + 12 \cdot 0,15 + 24 \cdot 0,15 + V_{GS} = 0$$

$$-12 + 1,8 + 3,6 + V_{GS} = 0$$

$$-6,6 + V_{GS} = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS} = 6,6 \text{ V}$$

$$\Rightarrow Q = (I_D, V_{DS}) = (0,15 \text{ mA}, 6,6 \text{ V})$$

* invece di calcolare i_D con la formula posso risolverlo con l'eq. KVL

$$-V_{eq} + V_{GS} + R_3 i_D = 0$$

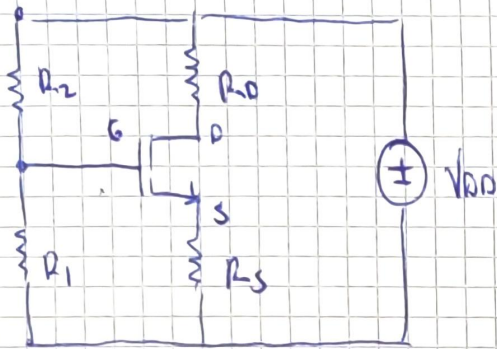
$$-3,75 + 1,6 + 220 \cdot 10^3 i_D = 0$$

$$-2,15 + 220 \cdot 10^3 i_D = 0 \rightarrow 220 \cdot 10^3 i_D = 2,15$$

$$i_D = \frac{2,15}{220 \cdot 10^3} = 9,77 \mu\text{A}$$

OK

4.100



$$R_S = 17 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = 38,3 \text{ k}\Omega$$

$$K_M = 35 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$V_{eq} = 4 \text{ V}$$

$$R_1 = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 1,5 \text{ M}\Omega$$

$$V_{DD} = 10 \text{ V}$$

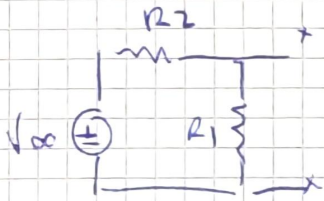
$$V_{TN} = 1 \text{ V}$$

Rich:

a) p.to di lavoro

b) " " " $K_M = 25 \mu\text{A}/\text{V}^2$ e $V_{TH} = 0,7 \text{ V}$

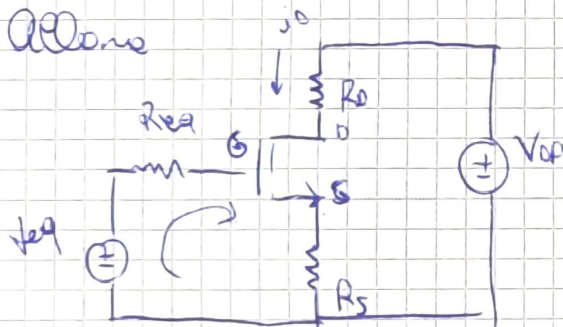
Foro Obiettivo del circuito equivalente della maglia di ingresso a sx:



$$V_{eq} = 10 \frac{1 \cdot 10^6}{(1 + 1,5) \cdot 10^6} = 4 \text{ V}$$

$$R_{eq} = \frac{1 \cdot 1,5}{1 + 1,5} = 0,6 \text{ M}\Omega = 600 \text{ k}\Omega$$

Alloce



$$-V_{eq} + V_{GS} + R_S i_D = 0$$

IPOTESI: SATURAZ:

$$i_D \approx (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$i_D = \frac{K_M}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 17,5 \cdot 10^{-6} (V_{GS} - 1)^2$$

$$-V_{eq} + V_{GS} + R_S [17,5 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1)] = 0$$

$$= 4 + V_{GS} + 17,5 \cdot 10^{-3} [17,5 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1)] = 0$$

$$= 4 + V_{GS} + 29,75 \cdot 10^{-3} (\dots) = 0$$

$$= 4 + V_{GS} + 0,029 V_{GS}^2 - 0,06 V_{GS} + 0,029 = 0$$

$$0,029 V_{GS}^2 + 0,99 V_{GS} - 3,97 = 0$$

$$-0,99 \pm \sqrt{0,99^2 - 4(0,029)(-3,97)} = -0,99 \pm \sqrt{0,99^2 + 0,99} = -0,99 \pm 1,06$$

In questo esercizio già le continue del precedente

$$-V_{eq} + V_{GS} + R_{SIO} = 0$$

$$V_{GS} = V_{eq} + R_{SIO} = 4 + R_{SIO}$$

allora

$$I_D = \frac{35}{2} \cdot 10^{-6} (4 + R_{SIO} - 1)^2 = 17,5 \cdot 10^{-6} (R_{SIO} + 3)^2 =$$

$$= 17,5 \cdot 10^{-6} (R_{SIO}^2 + 9 + 6R_{SIO})$$

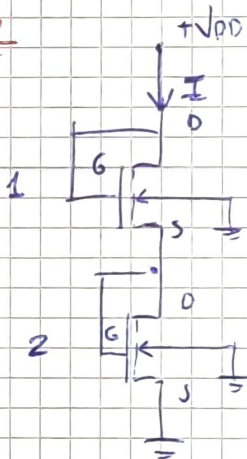
Le conversioni del libro sono sbagliate

$$\Rightarrow 285000 I_D^2 + 10200 I_D + 9 = 0$$

$$-10200 \pm \sqrt{\quad}$$

Problemi relativi alla polarizzazione

4.122



ASSUNZIONI:

$$I_{D1} = I_{D2}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2}$$

$$V_{DS1} = V_{DS2}$$

DATI: $V_{DD} = 5V$

$$V_{TO} = 1V$$

$$\gamma = 0$$

$$W/L = 20/1 \text{ x entrambi}$$

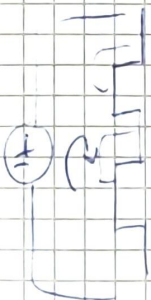
RICH: Calcolare I

$$V_{DD} = V_{DS1} + V_{DS2} = 2V_{DS} \rightarrow V_{DS} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5V$$

Suppongo entrambi in saturazione.

$$I = \frac{K_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$K_m = 100 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 2000 \mu A/V^2 \approx 2 mA/V^2$$



$$-V_{DD} + V_{GS1} + V_{DS2} = 0 \rightarrow V_{DD} = V_{GS1} + V_{DS2}$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = 2,5V$$

$$I_D = \frac{2}{2} \cdot 10^{-3} (2,5 - 1)^2 = 10^{-3} \cdot 2,25 = 2,25 mA$$

c) Si ripeta il punto precedente con $\gamma = 0,5 \text{ nV}$
Ho effetto body quindi la nuova tensione di soglia è

$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma (\sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F})$$

NS: Le tensioni di soglia sono differenti a causa dell'effetto body nei transistor superiori.

Le correnti di drain devono essere le stesse, ma le tensioni gate-source saranno differenti.

$$V_{GS1} = V_{TH1} + \sqrt{\frac{2I_D}{k_n}}$$

$$V_{GS1} + V_{GS2} = 5V$$

$$V_{GS2} = V_{TH2} + \sqrt{\frac{2I_D}{k_n}}$$

$$V_{TH1} = 1V$$

$$V_{TH2} = 1 + 0,5 (\sqrt{V_{GS1} + 0,6} - \sqrt{0,6})$$

combiniamo le equaz. e otteniamo

$$5 - 2V_{GS1} - 0,5 (\sqrt{V_{GS1} + 0,6} - \sqrt{0,6}) = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = 2,27V$$

$$V_{GS2} = 5 - V_{GS1} = 2,73V$$

$$\text{allora } I_{D1} = I_{D2} = \frac{100}{2} \cdot 10^{-6} \frac{20}{1} (2,27 - 1)^2 = 1,61 \text{ mA}$$

VERIFICA:

$$V_{TH2} = 1 + 0,5 (\sqrt{2,27 + 0,6} - \sqrt{0,6}) = 1,46V$$

$$I_{D2} = \frac{100}{2} \cdot 10^{-6} \frac{20}{1} (2,73 - 1,46)^2 = 1,61 \text{ mA}$$

Prova di Progettazione dei Transistori MOS

4,129

DATI: $V_{DD} = -15V$

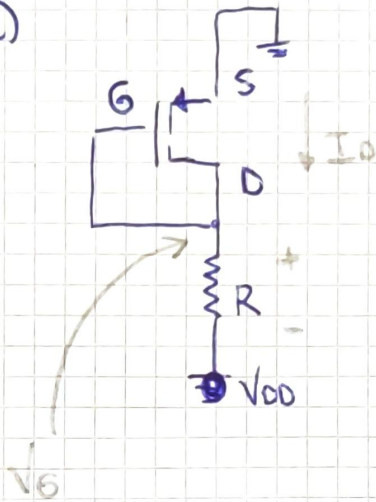
$R = 75 k\Omega$

$W/L = 1/1$

RICHI: P.T.O di lavoro Q.

$V_{TH} = -0,75V$

a)



NB nota posizione di G, S, D

IPOTESI: Saturazione

$V_S = 0$

$V_G = R I_D + V_{DD} = V_{GS}$

IPOTESI: SATURAZ

$$I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$k_m = 40 \cdot 10^{-6} = 0,1 \mu A/V^2$$

$$I_D = \frac{40}{2} \cdot 10^{-6} (R I_D + V_{DD} - V_{TH})^2$$

Tabella Valori
Principali

	Nmos	Pmos
V_{TO}	0,75V	-0,75V
γ	0,75 $\sqrt{V}$	0,5 $\sqrt{V}$
$2\phi_F$	0,6V	0,6V
k_m	100 $\mu A/V^2$	40 $\mu A/V^2$

$$-V_{DD} - R I_D + V_{GS} = 0 \quad \text{maglia di uscita}$$

$$I_D = 20 \cdot 10^{-6} \quad \rightarrow R I_D = V_{GS} - V_{DD} \quad \rightarrow I_D = \frac{V_{GS} - V_{DD}}{R}$$

allora sostituisco

$$I_D = \frac{V_{GS} - V_{DD}}{R} = 20 \cdot 10^{-6} \left(R \frac{V_{GS} - V_{DD}}{R} + V_{DD} - V_{TH} \right)^2$$

$$\frac{V_{GS} - 15}{R} = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS} - V_{DD} + V_{DD} - V_{TH})^2 = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS} - 0,75)^2$$

$$\frac{V_{GS} - 15}{R} = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 0,56 - 1,5 V_{GS})$$

$$\begin{aligned} I_D &= 20 \cdot 10^{-6} (75000 I_D - 15 + 0,75)^2 = 20 \cdot 10^{-6} (75000 I_D - 14,25)^2 = \\ &= 20 \cdot 10^{-6} (5,6 \cdot 10^9 I_D^2 + 203,06 - 150000 I_D) = \\ &= 112 \cdot 10^3 I_D^2 - 3 I_D + 4,07 \cdot 10^{-3} = I_D \end{aligned}$$

$$112 \cdot 10^3 I_D^2 - 3I_D - I_D + 1,07 \cdot 10^{-3} = 0$$

$$112 \cdot 10^3 I_D^2 - 4I_D + 1,07 \cdot 10^{-3} = 0$$

$$I_D = \frac{4 \pm \sqrt{16 - 4(112 \cdot 10^3)(1,07 \cdot 10^{-3})}}{2 \cdot 112 \cdot 10^3} = 4 \pm \sqrt{\frac{16}{224000}} \quad \Delta < 0$$

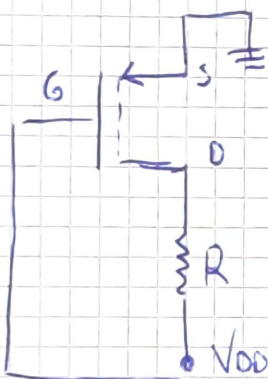
Provo a risolvere l'eq. di 2° grado da parte

$$I_D = 20 \cdot 10^{-6} (-15 + 75000 I_D + 0,75)^2 \Rightarrow I_D = 153 \mu A$$

Dalla maglia di uscita

$$V_{DS} = -15 + 75000 I_D = -3,525 V \rightarrow Q = (153 \mu A, -3,53 V)$$

b)



DATI: $V_{DS} = -15 V$
 $R = 75 k\Omega$
 $W/L = 1/1$

RICH: p.to Q.

$$V_S = 0$$

$$V_G = V_{DD} = -15 V \Rightarrow V_{GS} = -15 V$$

$V_{GS} = -15 V$ è un valore alto rispetto a prima quindi il Transistor sta operando in regione di Triodo

$$I_D = \frac{V_{DS} - (-15)}{75000} = 20 \cdot 10^{-6} \left(-15 - (-0,75) - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

$$\Rightarrow V_{DS} = -0,347 V \text{ e } I_D = 195 \mu A$$

Verifica:

$$|V_{DS}| \leq |V_{GS} - V_t|$$

$$0,347 \leq |-15 + 0,75| \quad \underline{\underline{\text{Verificato!}}}$$

4,135

$$R = 50 \text{ k}\Omega$$

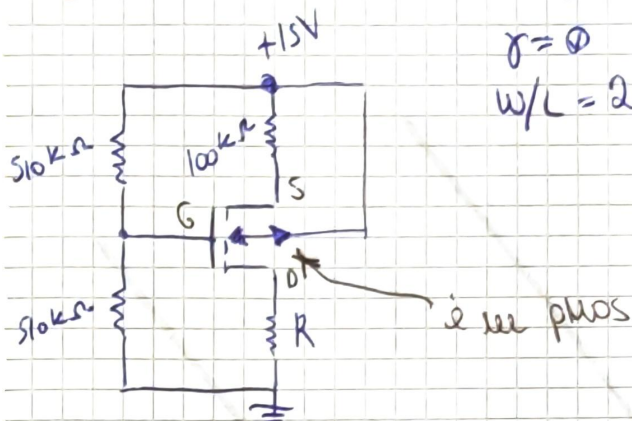
$$\gamma = 0$$

$$W/L = 20/1$$

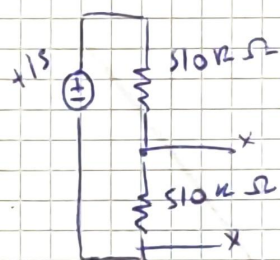
RICH:

a) p.t.o. lavoro

b) valori di R che garantisce la polarizzazione in regione di saturazione



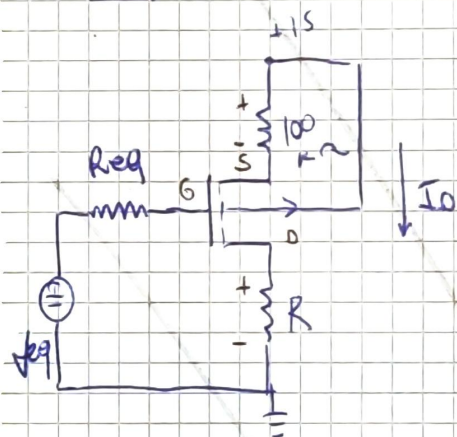
Calcolo Thevenin su maglia di ingresso



$$V_{eq} = 15 \cdot \frac{510}{510+510} = 7,5 \text{ V}$$

$$R_{eq} = \frac{510 \cdot 510}{510+510} = 255 \text{ k}\Omega$$

Allora ho il circuito



KVL ingresso

$$-V_{eq} + V_{GS} + R I_D = 0 \rightarrow R I_D = V_{eq} - V_{GS}$$

KVL uscita

$$15 = 100 \text{ k}\Omega (I_D) - V_{DS} + R I_D$$

Suppongo Regione lineare: $|V_{DS}| \leq |V_{GS} - V_{TH}|$

$$V_{TH} = -0,75 \text{ V}$$

$$k_m = 40 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{20}{1} = 80 \cdot 10^{-6} = 80 \mu\text{A/V}^2$$

$$I_D = k_m \left[V_{GS} + 0,75 - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}$$

$$V_{GS} = V_{eq} - R I_D \quad I_D = \frac{V_{eq} - V_{GS}}{R}$$

$$V_{GS} = 15 - 100 \text{ k}\Omega I_D \quad V_{GS} = (100 \text{ k}\Omega + R) I_D - 15$$

Nella prima sostituisco I_D

$$\frac{V_{eq} - V_{GS}}{R} = k_m \left[V_{GS} + 0,75 - \frac{V_{GS}}{2} \right] V_{GS}$$

$$I_0 = k_m \left(V_{GS} + 0,75 - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

$$I_0 = \frac{V_{eq} - V_{GS}}{R}$$

$$V_{DS} = (100 \text{ k}\Omega + R) I_0 - 1,5 = (150 \text{ k}\Omega) \frac{V_{eq} - V_{GS}}{R} - 1,5$$

$$= \frac{150 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \cdot (V_{eq} - V_{GS}) - 1,5 = 3(V_{eq} - V_{GS}) - 1,5$$

Nella 1^a eq. sostituisco tutto

$$\frac{V_{eq} - V_{GS}}{R} = k_m \left[V_{GS} + 0,75 - \frac{1}{2} [3(V_{eq} - V_{GS}) - 1,5] \right] =$$

$$\frac{7,5 - V_{GS}}{R \cdot k_m} = V_{GS} + 0,75 - \frac{1}{2} [3(\cancel{V_{eq} - 7,5}) - 1,5] =$$

$$= V_{GS} + 0,75 - \frac{3}{2} (7,5 - V_{GS}) + \frac{1,5}{2} =$$

$$= V_{GS} + 0,75 - 11,25 + \frac{3}{2} V_{GS} + \frac{1,5}{2} = V_{GS} + \frac{3}{2} V_{GS} - 3 =$$

$$\frac{7,5 - V_{GS}}{50 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot 10^{-3}} = 2,5 V_{GS} - 3$$

$$\frac{7,5 - V_{GS}}{4} = 2,5 V_{GS} - 3 \rightarrow 1,87 - \frac{1}{4} V_{GS} = 2,5 V_{GS} - 3$$

$$2,5 V_{GS} + \frac{1}{4} V_{GS} = 1,87 + 3 = 4,87$$

$$2,75 V_{GS} = 4,87 \rightarrow V_{GS} = \frac{4,87}{2,75} = 1,77 \text{ V}$$

allora

$$I_A = \frac{V_{eq} - V_{GS}}{R} = \frac{7,5 - 1,77}{50 \cdot 10^3} = 11,46 \text{ nA}$$

$$V_{DS} = 150 \cdot 10^3 \cdot 11,46 \cdot 10^{-3} - 15 = 1704 \text{ V}$$

verifica

$$|V_{DS}| \leq |V_{GS} - V_{TH}| \rightarrow 1704 \leq 1,77 + 0,75$$

NO! Non siamo
in reg.
lineare!

Di cosa?

IPOTESI SATURAZ condiz. $|V_{DS}| \geq |V_{GS} - V_{TH}|$

$$\begin{cases} I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 40 \cdot 10^{-6} (V_{GS} + 0,75)^2 = 40 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 1,5 V_{GS} + 0,56) \\ V_{DS} = 150 \text{ k}\Omega \cdot I_D - 15 \\ I_D = \frac{V_{eq} - V_{GS}}{R} \end{cases}$$

$$\frac{V_{eq} - V_{GS}}{50 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = V_{GS}^2 + 1,5 V_{GS} + 0,56$$

$$\frac{V_{eq} - V_{GS}}{2} = V_{GS}^2 + 1,5 V_{GS} + 0,56$$

$$V_{GS}^2 + 1,5 V_{GS} + 0,56 - 3,75 + \frac{V_{GS}}{2} = 0$$

$$V_{GS}^2 + 2 V_{GS} - 3,22 = 0 \quad \text{equat. di II}^\circ \text{ grado}$$

$$\frac{-2 \pm \sqrt{4 - 4(-3,22)}}{2} = \frac{-2 \pm \sqrt{16,88}}{2} = \frac{-2 \pm 4,11}{2} \begin{cases} 1,055 \text{ V} \\ -3,055 \end{cases}$$

• $V_{GS} = 1,055 \text{ V}$ perché deve essere $> V_{TH}$

$$\begin{cases} V_{DS} = 150 \cdot 10^3 I_D - 15 \\ I_D = \frac{V_{eq} - V_{GS}}{50 \cdot 10^3} = \frac{7,5 - 1,055}{50 \cdot 10^3} = 12,89 \text{ mA} \end{cases}$$

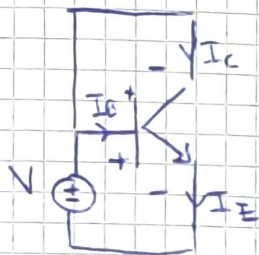
$$V_{DS} = 150 \cdot 10^3 \cdot 12,89 \cdot 10^{-3} - 15 = 1918,5 \text{ V}$$

~~$$V_{eq} = 7,8V$$~~
~~$$V_{eq} = 2I_D - V_{GS}$$~~

BJT

5,2 Modello del trasporto dei Transistori mpm

5,2



$$V = 0,640V$$

$$I_C = 275 \mu A$$

$$I_B = 5 \mu A$$

$$\alpha_R = 0,5$$

RICH. $V_{BE}, V_{BC}, I_S, \beta_F, \beta_R$

$$V_{BE} = V = 0,640V$$

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} = 1$$

$$I_E = I_C + I_B = 280 \mu A$$

sapendo che $I_C = \beta_F I_B \Rightarrow \beta_F = \frac{I_C}{I_B} = 55$

Tramite I_S sapendo che

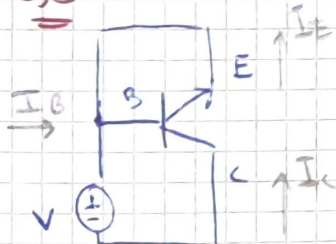
$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} \rightarrow \frac{I_B}{I_S} \beta_F = e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_S = \frac{I_B \beta_F}{e^{V_{BE}/V_T}} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 55}{e^{\frac{0,640}{25 \cdot 10^{-3}}}} = \frac{275 \cdot 10^{-6}}{1,31 \cdot 10^{11}} = \frac{275}{1,31} \cdot 10^{-17} \approx 210 \cdot 10^{-17} s$$

$$= 21 pA$$

OK

5,3



$$V = 0,630V$$

$$I_E = -275 \mu A$$

$$I_B = 125 \mu A$$

$$\alpha_F = 0,975$$

RICH)

V_{BE}, V_{BC}

• Verificare i valori dei componenti

• I_S, β_F, β_R

È un BJT mpm

$$V_{BC} = 0,630V$$

$$V_{BE} = 0$$

Se $I_E = I_B + I_C \Rightarrow I_C = I_E - I_B = 150 \mu A$?

~~$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} = \frac{0,975}{1 - 0,975} = 39$$~~

$$I_E = -\beta_R I_B \rightarrow \beta_R = -\frac{I_E}{I_B} = \frac{+275}{125} = 2,2$$

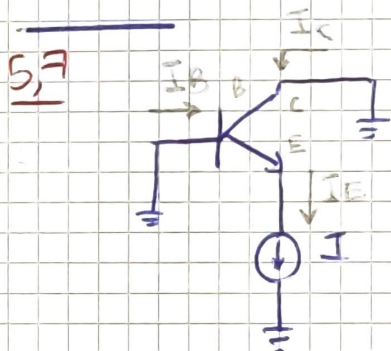
$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} = 39$$

Calcolo I_S

Qui qui usa le formule della RAI

$$I_E = -I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_S = \frac{-I_E}{e^{V_{BE}/V_T}} = \frac{275 \cdot 10^{-6}}{0,63/25 \cdot 10^{-3}} = \frac{275 \cdot 10^{-6}}{8,75 \cdot 10^0} = 31,29 \cdot 10^{-16} \approx 3,129 \text{ fA}$$



$$I_S = 2 \text{ fA}$$

$$\beta_F = 100$$

$$\beta_R = 0,25$$

$$I = 175 \mu\text{A}$$

RICH: a) Individ. i allettoni

b) Tipo di transistor

c) V_{BE} , V_{BC}

d) Connetti e veri I_E , I_B , I_C

Transistori MPM.

$$I_E = 175 \mu\text{A}$$

posso dire che $V_B = 0$, $V_E = 0 \rightarrow V_{BE} = 0$

Devo usare il modello di trasporto completa considerando $V_{BC} = 0$

$$I_E = I_S e^{V_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_F} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_E = I_S e^{V_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_F}$$

$$I_E = e^{V_{BE}/V_T} \left(I_S + \frac{I_S}{\beta_F} \right) - \frac{I_S}{\beta_F}$$

$$\frac{I_E + \frac{I_S}{\beta_F}}{\frac{I_S + \frac{I_S}{\beta_F}}{\beta_F}} = e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad \text{Applico logaritmo}$$

$$I_S + \frac{I_S}{\beta_F}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \left[\frac{I_E + \frac{I_S}{\beta_F}}{I_S + \frac{I_S}{\beta_F}} \right] = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[\frac{1,75 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-15}}{100}}{2 \cdot 10^{-15} + \frac{2 \cdot 10^{-15}}{100}} \right]$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \ln \frac{1,75 \cdot 10^{-4}}{2,02 \cdot 10^{-15}} = 25 \cdot 10^{-3} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25,18 = 629,6 \cdot 10^{-3} \approx 0,63V$$

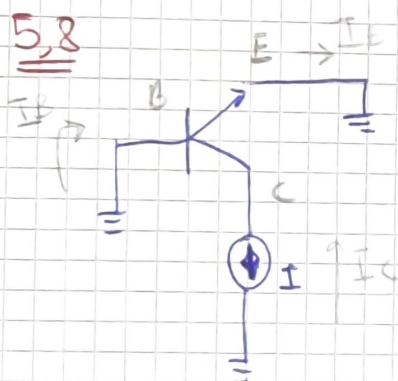
V_{BE}

Uso modello semplificato della RDS

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B \rightarrow I_B = \frac{I_E}{\beta_F + 1} = 1,75 \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 100 \cdot 1,75 \mu A = 175 \mu A$$

OK



$$I_S = 2 \mu A$$

$$\beta_F = 100$$

$$\beta_R = 0,25$$

$$I = 175 \mu A$$

RKH:

$$V_{BE}, V_{BC}$$

$$I_E, I_C, I_S$$

MPM

$$I_C = -175 \mu A$$

$$V_{BE} = 0, V_{BC} > 0$$

Uso modello trasporto completo per I_C

$$I_C = I_S \left[-e^{V_{BC}/V_T} \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

$$= -I_S e^{V_{BC}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{BC}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R}$$

$$= e^{V_{BC}/V_T} \left(-I_S - \frac{I_S}{\beta_R} \right) + \frac{I_S}{\beta_R} = e^{V_{BC}/V_T} I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right) + \frac{I_S}{\beta_R}$$

$$\frac{I_C - I_S/\beta_R}{I_S(-1 - 1/\beta_R)} = e^{V_{BC}/V_T} \quad \text{Applico logaritmo}$$

$$I_S(-1 - 1/\beta_R)$$

$$V_{BC} = V_T \ln \left[\frac{I_C - I_S / \beta_R}{I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right)} \right] = V_T \ln \left(\frac{I_S - \frac{I_C + \frac{1}{\beta_R}}{-1 - \frac{1}{\beta_R}}}{I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right)} \right) =$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[2 \cdot 10^{-15} \frac{-175 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{0,25}}{-1 - \frac{1}{0,25}} \right] =$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(2 \cdot 10^{-15} \frac{-4}{-5} \right) = 25 \cdot 10^{-3} \cdot (-34,069) \approx -0,85 \text{ V}$$

Il procedimento è giusto ma ho trascurato dei termini portandoli a 0 quando invece valgono 1

$$I_C = I_S \left[1 - e^{V_{BC}/V_T} \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right] =$$

$$= I_S - I_S e^{V_{BC}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{BC}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} =$$

$$I_C = e^{V_{BC}/V_T} \left[-I_S - \frac{I_S}{\beta_R} \right] + I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)$$

$$\frac{I_C - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)}{I_S \left[-1 - \frac{1}{\beta_R} \right]} = e^{V_{BC}/V_T} \quad \text{Applico } \ln.$$

$$V_{BC} = V_T \ln \left[\frac{I_C - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)}{I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right)} \right] = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[\frac{-175 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-15} \left(1 + \frac{1}{0,25} \right)}{2 \cdot 10^{-15} \left(-1 - \frac{1}{0,25} \right)} \right]$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[\frac{-1,75 \cdot 10^{-4}}{-1 \cdot 10^{-14}} \right] = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 23,55 \approx 0,59 \text{ V} \quad \underline{\underline{OK}}$$

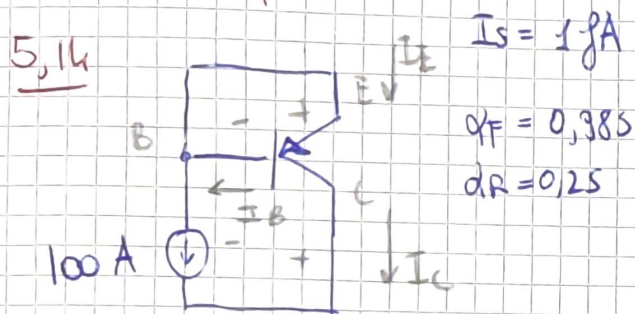
$$= V_{BC}$$

$$V_{BC} = 0,59 \text{ V}$$

$$I_E = \alpha_R I_C \quad \alpha_R = \frac{\beta_R}{\beta_R + 1} = 0,2 \Rightarrow I_E = -35 \mu\text{A}$$

$$I_E = -\beta_R I_B \rightarrow I_B = \frac{-I_E}{\beta_R} = -\frac{-35 \mu A}{0,25} = 140 \mu A \quad \underline{\underline{OK}}$$

transistor pnp



- RICH:
- Terminati
 - V_{EB}, V_{CB} , convenzioni conosciute
 - veniva espletata dal modello di trasporto
 - I_C, I_B, I_E

pnp

$$I_C = -100 A$$

V_B e V_E sono alla stessa tensione quindi $V_{EB} = V_E - V_B = 0$

Usa mod. transp. generale

$$I_C = I_S \left[1 - e^{V_{CB}/V_T} \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[e^{V_{CB}/V_T} - 1 \right] =$$

$$= I_S - I_S e^{V_{CB}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{CB}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} =$$

$$= e^{V_{CB}/V_T} \left(-I_S - \frac{I_S}{\beta_R} \right) + I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) =$$

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} = 0,33$$

$$= e^{V_{CB}/V_T} \left(-I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) \right) + I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)$$

$$\frac{I_C - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)}{I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right)} = e^{V_{CB}/V_T}$$

$$V_{BC} = V_T \ln \frac{I_C - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right)}{I_S \left(-1 - \frac{1}{\beta_R} \right)} = 25 \cdot 10^{-3} \ln \frac{-100 - 10^{-15} \left(1 + \frac{1}{0,33} \right)}{10^{-15} \left(-1 - \frac{1}{0,33} \right)}$$

$$V_{BE} = 25 \cdot 10^{-3} \ln \frac{-100}{-1 \cdot 10^{-15}} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 37,76 = 0,94 \text{ V} = V_{BE}$$

Supporto di errore in BJT

$$I_C = -100 \text{ A}$$

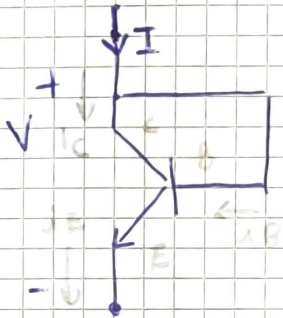
$$V_{BE} = 0,94 \text{ V}$$

$$I_E = \alpha_R I_C = 0,25 \cdot (-100) = -25 \text{ A}$$

$$I_B = - \frac{I_E}{\beta_R} = \frac{+25}{0,33} = 75,75 \text{ A}$$

OK

5,9 mpm BJT configurazione a diodo



$$I_S = 2 \text{ fA}$$

$$\beta_F = 100$$

$$\beta_R = 0,25$$

RICH.

- Usare la equaz. del modello di trasporto x mostrare che le caratteristiche i-v del circuito sono simili a quelle di un diodo
- Determinare corrente di satur. inversa del diodo

Diode equation

$$i_D = I_S \cdot \left[e^{V_D/V_T} - 1 \right]$$

• Note che $V_{BC} = 0$

• $i = i_E = i_C + i_B$

Use mod. transp. completo

$$i_E = I_S \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] = I_S e^{V_{BE}/V_T} - I_S + \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_F}$$

$$= e^{V_{BE}/V_T} \left(I_S + \frac{I_S}{\beta_F} \right) - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) =$$

$$i_E = I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) e^{V_{BE}/V_T} - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) \rightarrow V_{BE} = V_T \ln \frac{i_E + I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right)}{I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right)}$$

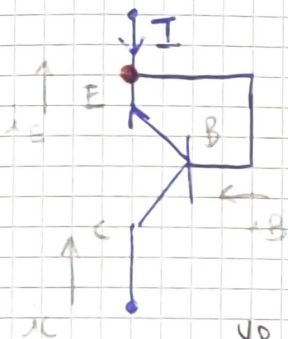
$$= e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right) - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right) =$$

$$= \underbrace{I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right)} \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right]$$

Corrente di saturazione del diodo $\rightarrow I_{DS} = I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right) = 2 \cdot 10^{-15} \left(1 + \frac{1}{10}\right) = 2,2 \text{ fA}$

S10 alpha configurazione a diodo mpm

OK



$$I_S = 5 \text{ fA}$$

$$\beta_F = 60$$

$$\beta_R = 3$$

RICH:

Mostare che le cond. i-n del circuito siano simili a quella del diodo e calcolare corrente di sat. inv. del diodo

$$i_D = I_S \left[e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right] \text{ Per diodo}$$

• ~~$I = I_E$~~ NO

• $V_{BE} = 0$ perché comune in c.c.

Modello Trasporto carrier

$$I_E = I_S \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left[e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right] =$$

$$= I_S \left[1 - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right]$$

$$-I_E = I_S \left[e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right] \text{ Come un diodo}$$

$$I_{S1000} = I_S = 5 \text{ fA}$$

KCV de modo (in Rosso)

$$-I \neq i_E + i_B = 0 \rightarrow I = -i_B + i_C$$

Sapendo che

$$i_E = i_C + i_B \rightarrow -i_E + i_C + i_B = 0 \rightarrow -i_C = -i_E + i_B$$

$$\Rightarrow I = -i_C \text{ Modello Trasporto di } i_C$$

$$I_c = I_s \left[1 - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right] - \frac{I_s}{\beta_R} \left[e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right] =$$

$$= +I_s - I_s e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - \frac{I_s}{\beta_R} e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} + \frac{I_s}{\beta_R} = -I_s e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) + I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) =$$

$$= I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) \left(1 - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right) = i_c$$

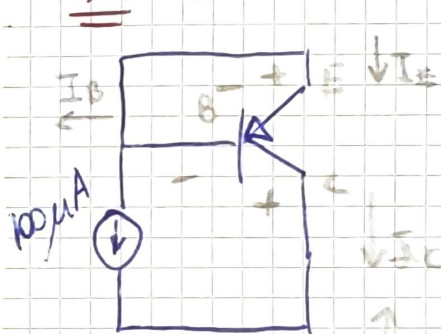
$$-i_c = I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) = I$$

corrente sat. inversa del diodo

$$I_{os} = 5 \cdot 10^{-15} \left(1 + \frac{1}{3} \right) = 6,67 \text{ fA}$$

OK

5.16 Transistor PNP



$$I_s = 1 \text{ fA}$$

$$\alpha_F = 0,985$$

$$\alpha_R = 0,25$$

Richi

- Tipo di Transistor e Terminali
- V_{EB}, V_{CB}
- I_E, I_C, I_B
- Modello semplificato di trasporto β per questa configurazione

β_F, β_R

$$V_{EB} = 0, V_{CB} > 0 \Rightarrow \text{PNP}$$

$$I_c = -100 \mu\text{A} \quad \text{uso modello trasporto generale con } I_c$$

$$I_c = I_s \left[1 - e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} \right] - \frac{I_s}{\beta_R} \left[e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1 \right] =$$

$$= I_s - I_s e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - \frac{I_s}{\beta_R} e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} + \frac{I_s}{\beta_R} = I_s \left(1 - e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} \right) - \frac{I_s}{\beta_R} \left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$= I_s \left(1 - e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} \right) - \frac{I_s}{\beta_R} \left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$= e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} \left(-I_s - \frac{I_s}{\beta_R} \right) + I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) =$$

$$= -e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) + I_s \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) = I_c$$

$$e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} = \frac{I_C - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R}\right)}{I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R}\right)}$$

Appaio negativo

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} = 0,33$$

$$V_{CB} = V_T \ln \left[\frac{-100 \cdot 10^{-6} - 10^{-15} \left(1 + \frac{1}{0,33}\right)}{10^{-15} \left(1 + \frac{1}{0,33}\right)} \right] =$$

$$= V_T \ln \left[1 + \frac{+10^{-4}}{1,03 \cdot 10^{-15}} \right] = 25 \cdot 10^3 \cdot 23,93 = 0,6 \text{ V}$$

$$V_{CB} = 0,6 \text{ V}$$

Abbiamo $V_{EB} = 0$ e $V_{CB} = 0,6 \text{ V} \Rightarrow \text{RAI}$

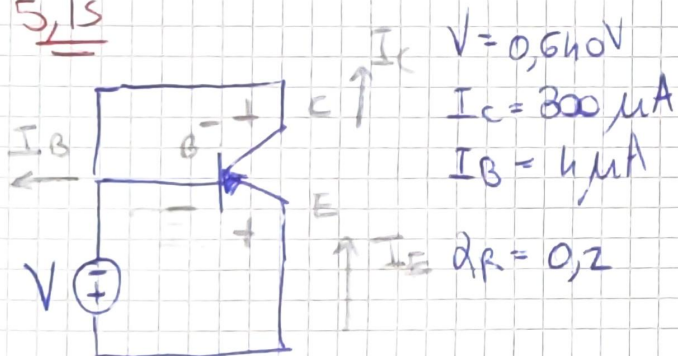
Quindi usiamo modello semplificato della RAI

$$I_E = \alpha_R I_C = 0,25 \cdot (-100 \mu\text{A}) = -25 \mu\text{A}$$

$$I_E = -\beta_R I_B \rightarrow I_B = \frac{-I_E}{\beta_R} = \frac{+25}{0,33} = 75,75 \mu\text{A}$$

OK

5,15



RICH:

- Tipo di Trans. e Terminali
- V_{EB} , V_{CB}
- I_E , I_S , β_F , β_R

$$\bullet V_{CB} = 0$$

$$\bullet +V - V_{EB} = 0 \rightarrow V_{EB} = V = 0,6 \text{ V}$$

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} = 0,25$$

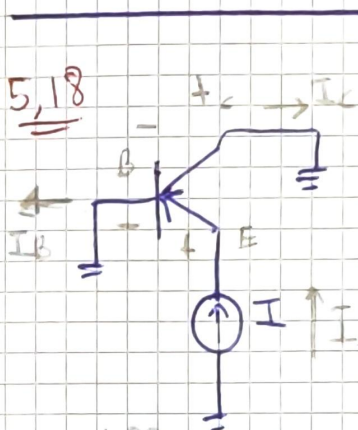
$$+I_E - I_B - I_C = 0 \rightarrow I_E = I_B + I_C = 300 \mu A$$

Assendo $V_{CB} = 0$ e $V_{EB} = 0,604 V$ Siama in RAD

$$I_C = \beta_F I_B \Rightarrow \beta_F = \frac{I_C}{I_B} = 75$$

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \rightarrow I_S = \frac{I_C}{e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}} = \frac{300 \cdot 10^{-6}}{e^{\frac{0,604}{25 \cdot 10^{-3}}}} = \frac{300 \cdot 10^{-6}}{3,108 \cdot 10^{10}} =$$

$$= 2,28 \cdot 10^{-15} A = 2,22 fA$$



$$\begin{aligned} I_S &= 2,22 fA \\ \beta_F &= 100 \\ \beta_R &= 5 \\ I &= 300 \mu A \end{aligned}$$

RICHI: V_{EB}, V_{CB}
 I_E, I_C, I_B

PMP

$$V_{CB} = 0, V_{EB} \neq 0, I_E = I = 300 \mu A$$

Modello trasporto grande

$$I_E = I_S \left[e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left[e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1 \right] = I_{E0} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}}$$

$$= \left[e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} + 1 \right] \left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) I_S =$$

$$\frac{I_E}{\left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) I_S} = e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \rightarrow \ln \left(\frac{I_E}{\left(1 + \frac{1}{\beta_F} \right) I_S} \right) = \frac{V_{EB}}{V_T}$$

allora

$$V_{EB} = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left[\frac{300 \cdot 10^{-6}}{\left(1 + \frac{1}{100} \right) 2,22 \cdot 10^{-15}} \right] = 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{300 \cdot 10^{-6}}{2,24 \cdot 10^{-15}} \right) =$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25,03 = 0,63 V$$

$$\Rightarrow V_{EB} = 0,63 V$$

uso delle espressioni del modello generale

$$V_{EB}/V_T = 0,63 / (25 \cdot 10^{-3})$$

$$e = e = 8,79 \cdot 10^{10}$$

$$I_C = I_S \left[8,79 \cdot 10^{10} - 1 \right] - \frac{I_S}{\beta_R} = 4 \cdot 10^{-15} (8,79 \cdot 10^{10} - 1) = 351 \mu A$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left[8,79 \cdot 10^{10} - 1 \right] = \frac{4 \cdot 10^{-15}}{100} \left[\dots \right] = 3,5 \mu A$$

Ripeteva

non Touse questo!

$$I_E - I_B - I_C = 0 \rightarrow I_C + I_B = I_E \text{ Non Touse}$$

IC libro ha usato il modello semplificato in RAD

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \quad I_C = \beta I_B \quad \text{Come avevo supposto}$$

Ma dovrebbe Touse uguale col modello completo no?

Forme semplificate del Modello di Trasporto

5.46 a)

$$I_S = 1 \text{ fA}$$

$$\beta_F = 75$$

$$\beta_R = 4$$

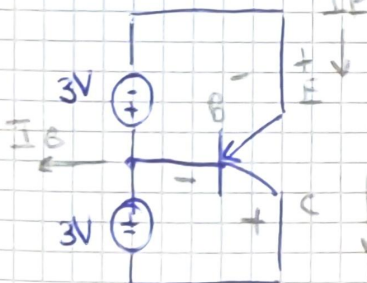
Rich: I_E, I_C, I_B

pmp

$$V_{EB} = -3V$$

$$V_{CB} = -3V$$

=> INTERDIZ.



$$I_C = -I_S / \beta_R = -10^{-15} / 4 = -0,25 \text{ fA}$$

$$I_E = -I_S / \beta_F = 10^{-15} / 75 = 0,013 \text{ fA}$$

$$+I_E - I_C - I_B = 0 \rightarrow I_B = I_E - I_C = 0,23 \text{ fA}$$

$$\mu_m = 52,2 + \frac{1365}{1 + \left(\frac{N_T}{9,68 \cdot 10^{16}} \right)^{0,68}}$$

$$\mu_p = 44,9 + \frac{426}{1 + \left(\frac{N_T}{2,23 \cdot 10^{16}} \right)^{0,72}}$$

Calcolo mobilità
eThomi

OK

Effetti non ideali del Transistore bipolare 5,3

5,66 BJT Tempo Transito $\tau_F = 50 \text{ ps}$

RICH: Capacitor di diffusione in corrispondenza di una I_C di:

- a) $2 \mu\text{A}$
- b) $200 \mu\text{A}$
- c) 20 mA

Capacitor di diffusione: Ricordiamo che le capacitor presenti nei dispositivi fanno limitare il funzionamento ad alta frequenza.
Nel BJT:

variazione di $V_{BE} \Rightarrow$ variazione della carica minoritaria (e quindi di I_C) nella regione di base

Variaz. della carica minoritaria a una capacitor (di diffusione) C_D posta in // al diodo b-e direttamente polarizzato

$$C_D = \frac{I_C}{V_T} \tau_F$$

$$a) C_D = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot 50 \cdot 10^{-12} = 4 \cdot 10^{-15} \quad \frac{A \cdot s}{V} = 4 \text{ fF} \quad F_{ADAD} = \frac{C_{ADAD}}{100}$$

5,67 mpm, $W_b = 1 \mu\text{m}$,
drogaggio base $10^{18} / \text{cm}^3$

RICH: a) calcolare τ_F
b) Ripetere x Transistor p.m.p

τ_F Tempo Transito: Tempo necessario a un elettrone (portatore minoritario) ad attraversare la base

$$\tau_F = \frac{W_b^2}{2V_T} = \frac{W_b^2}{2D_n} \quad \begin{matrix} \text{diffusivita' elettroni} \\ \text{mobilita' elettroni} \end{matrix}$$

$$\mu_n = 260 \frac{\text{cm}^2}{V \cdot s}; \quad \mu_p = 100 \frac{\text{cm}^2}{V \cdot s} \quad \text{Portata in cm}$$

$$N = \frac{10^{18}}{\text{cm}^3}$$

allora a) $\tau_F = \frac{(10^{-4})^2}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 260} = \frac{10^{-8}}{1300} = 7,69 \cdot 10^{-10} = 0,769 \text{ ns}$

5.68 Guad. corrente in continua $\beta_F = 200$
 $f = 75 \text{ MHz}$, $\beta = 10$

a) $\Rightarrow f_T = f \cdot \beta = 75 \cdot 10 = 750 \text{ MHz}$

Rich:

- a) Frequenza Transist.
- b) Frequenza di taglio

b) $f_\beta = \frac{f_T}{\beta_F} = \frac{750}{200} = 3,75 \text{ MHz}$

Guadagni di corrente
 in continua e a
 una freq. + freq. di taglio
 + freq. di transizione

5.69 $f_T = 900 \text{ MHz}$
 $f_\beta = 5 \text{ MHz}$

Rich: Guad. corrente continua e a 50 MHz

$f_T = f \cdot \beta$ con $f = 50 \text{ MHz} \Rightarrow \beta = \frac{f_T}{f} = \frac{900}{50} = 18$ a 50 MHz
 per $f \gg 50 \text{ MHz}$

$f_\beta = f_T / \beta_F \Rightarrow \beta_F = \frac{f_T}{f_\beta} = \frac{900}{5} = 180$ Guadagno in
 continuo

5.70

Drogaggio base $N = 6 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3 = N_A$
 Spessore di base $W_B = 0,5 \mu\text{m} = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^2 \text{ cm} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
 Area sezione di base $25 \mu\text{m}^2 = A$

Rich: Corrente di saturazione $\rightarrow I_S = \frac{q A D_m n_i^2}{W_B \cdot N_A}$

$\mu_m = 52,2 + \frac{1365}{1 + \left(\frac{6 \cdot 10^{18}}{9,68 \cdot 10^{16}} \right)^{0,68}} = 130 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

$D_m = V_T \mu_m = 130 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 3,25 \text{ cm}^2/\text{s}$

$q = 1,60 \cdot 10^{-19} [\text{C}]$

$n_i^2 = \left(\frac{10^{10}}{\text{cm}^3} \right)^2 = \frac{10^{20}}{\text{cm}^6}$ alla

$$I_s = 1,60 \cdot 10^{-13}$$

$$1 \text{ m} = 10^{-2} \text{ cm}$$

$$1 \text{ m}^2 = 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$A = 25 \mu\text{m}^2 = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 25 \cdot 10^{-2}$$

allora

$$I_s = \frac{1,60 \cdot 10^{-13} \cdot 25 \cdot 10^{-2} \cdot 3,25 \cdot 10^{20}}{6 \cdot 10^{18} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = \frac{13}{3 \cdot 10^{12}} = 4,33 \cdot 10^{-12} \text{ A} = 4,33 \text{ pA}$$

Effetto Early

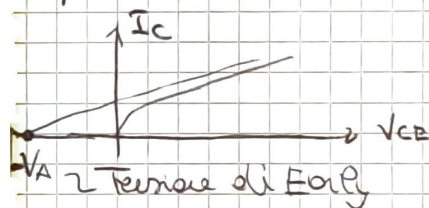
5,72 mpm
RDO
 $I_B = 3 \mu\text{A}$

$V_{CE} = 5 \text{ V} \rightarrow I_C = 240 \mu\text{A}$
 $V_{CE} = 10 \text{ V} \rightarrow I_C = 265 \mu\text{A}$

RICH: β_{FO}, V_A

Effetto Early

Intervista da Transcond. del BJT in RDO ~~mostra~~ ha una pendenza positiva, cioè I_C non è costante.



Si ha un "nuovo modello di trasporto" in RDO

Modello semplificato

$$\begin{cases} I_C = \beta_F I_B = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) I_B \\ I_C = \left(I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) \\ I_B = \frac{I_s}{\beta_{FO}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\ \beta_F = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) \end{cases}$$

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) I_B$$

$V_{CE} = 5 \text{ V}$

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{240}{3} = \beta_{FO} \left(1 + \frac{5}{V_A}\right)$$

$V_{CE} = 10 \text{ V}$

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{265}{3} = \beta_{FO} \left(1 + \frac{10}{V_A}\right)$$

2 equaz. 2 incognite

$$\begin{cases} 80 = \beta_{FO} \left(1 + \frac{5}{V_A} \right) \rightarrow \beta_{FO} = \frac{80}{1 + \frac{5}{V_A}} & I^a \\ 88,33 = \beta_{FO} \left(1 + \frac{10}{V_A} \right) = \frac{80}{\left(1 + \frac{5}{V_A} \right)} \left(1 + \frac{10}{V_A} \right) & II^a \end{cases}$$

$$II^a \quad \frac{88,33}{80} = \frac{1 + \frac{10}{V_A}}{1 + \frac{5}{V_A}} = 1,04$$

$$\frac{\frac{V_A + 10}{V_A}}{\frac{V_A + 5}{V_A}} = \frac{V_A + 10}{V_A} \cdot \frac{V_A}{V_A + 5} = \frac{V_A + 10}{V_A + 5} = 1,04$$

$$V_A + 10 = 1,04(V_A + 5) = 1,04V_A + 5,2$$

$$V_A - 1,04 = 5,2 - 10 \rightarrow +0,04V_A = +4,8 \rightarrow \underline{V_A = \frac{4,8}{0,04} = 120 \text{ V}}$$

$$88,33 - 80 = \frac{10 - 5}{V_A} \cdot 80 = 80 \cdot \frac{V_A + 10}{V_A} =$$

$$\frac{88,33}{80} = \frac{V_A + 10}{V_A} \cdot \frac{V_A}{V_A + 5} = \frac{V_A + 10}{V_A + 5}$$

$$1,04(V_A + 5) = V_A + 10$$

$$1,04V_A + 5,2 = V_A + 10$$

$$V_A - 1,04V_A = 5,2 - 10$$

$$+0,04V_A = +4,8$$

$$V_A = \frac{4,8}{0,04} = 120 \text{ V}$$

allora

$$\beta_{FO} = \frac{80}{1 + \frac{5}{120}} = 71,7$$

OK

ERO

NO

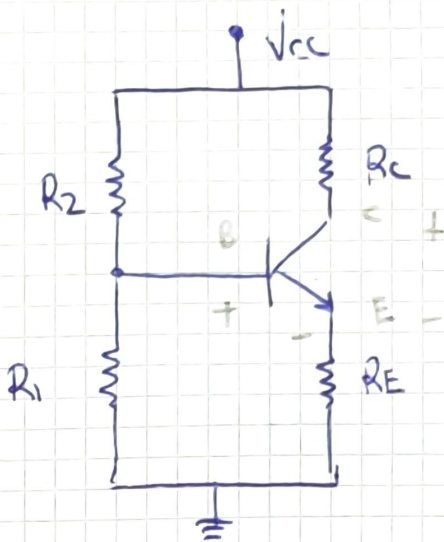
~~120 V~~

Errore di calcolo, procedura giusta.



ESAME 20 GIUGNO 2018

①



$$V_{CC} = 12V$$

$$R_1 = 180 k\Omega$$

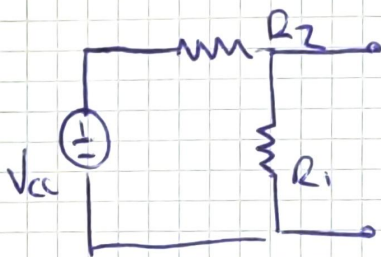
$$R_2 = 360 k\Omega$$

$$R_E = 16 k\Omega$$

$$R_C = 22 k\Omega$$

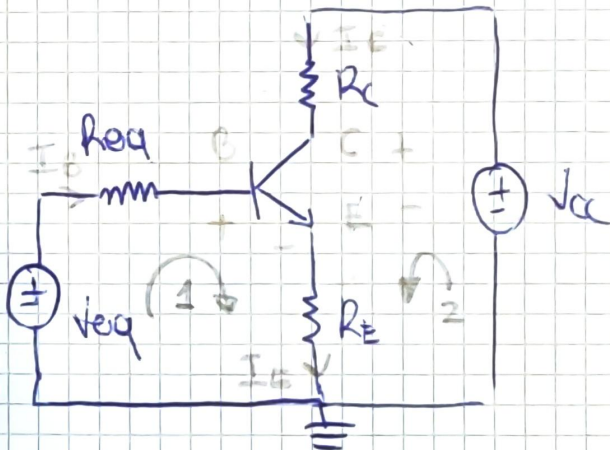
Rich: I_B, I_C, I_E, V_{CE}

Conversion



$$V_{eq} = V_{CC} \frac{R_1}{R_2 + R_1} = 12 \frac{180}{180 + 360} = 12 \cdot \frac{1}{3} = 4V$$

$$R_{eq} = R_1 // R_2 = \frac{180 \cdot 360}{180 + 360} = 120 k\Omega$$



• IPOTESI: ~~RAO~~ RAD

$$V_{BE} \approx 0.7V$$

$$V_{BE} \approx 0.7V$$

cond: ~~IL/IL/~~ $\beta_F I_B$ $V_E \gg V_{BE}$

$$-V_{eq} + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

$$I_E = \frac{V_{eq} - V_{BE}}{R_E} = \frac{4 - 0.7}{16 \cdot 10^3} = 0.206 \cdot 10^{-3} A$$

RAD

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

$$I_C = \beta_F I_B$$

$$IPOTESI \beta_F = \frac{180}{100}$$

$$-V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

$$-V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_E (\beta_F + 1) I_B = 0$$

$$R_{eq} I_B + R_E (\beta_F + 1) I_B = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B [R_{eq} + R_E (\beta_F + 1)] = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{eq} - V_{BE}}{R_{eq} + R_E (\beta_F + 1)} = \frac{4 - 0.7}{[120 + 16(101)] \cdot 10^{-3}} = 1.9 \mu A$$

$$I_E = 101 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} = \cancel{190 \mu A} \quad 19,1 \mu A \quad 0,191 \text{ mA}$$

$$I_C = 100 I_B = \cancel{190 \mu A} \quad 0,19 \text{ mA}$$

$$\text{KVL 2} \quad -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} + R_E I_E = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - R_E I_E =$$

$$= \cancel{12} - \cancel{190 \cdot 10^{-3}} - \cancel{22 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 12 - 0,19 \cdot 22 - 16 \cdot 0,19,1 = \cancel{12} - \cancel{4,18} - \cancel{3,056} \quad 4,78 \text{ V}$$

$$V_{CE} > V_{BE} \rightarrow 4,78 > 0,7 \quad \underline{\underline{OK}} \Rightarrow \underline{\underline{RAS}}$$

$$4,78 = 0,7 - V_{BC} \rightarrow V_{BC} = 0,7 - 4,78 = -4,08 \text{ V} \quad \underline{\underline{OK}} \quad \underline{\underline{V_{BC} < 0,1}}$$

Siamo in RAS

② Semiconduttore intrinseco

~~Sia data l'ampere~~

• Ampiezza banda proibita $E_g = 1,12 \text{ eV}$

• $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

• parametro costitutivo del materiale $B = 10^{+31} \text{ K}^{-3} \text{ cm}^{-6}$

• $\mu_n = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

• $\mu_p = 800 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

$T = 35^\circ \text{C}$

$$T = 35 + 273,15 = 308,15 \text{ K}$$

RICH:

• conducibilità G

• resistività ρ del materiale

$$n_i^2 = B \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \quad \left(\text{cm}^{-6} \right) \quad \begin{array}{l} T \text{ Temp. Kelvin} \\ E_g \text{ ampiezza banda proibita} \end{array}$$

B parametro intrinseco materiale

k Boltzmann $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

$$G = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad [\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}]$$

$$\rho = \frac{1}{G} \quad [\Omega \cdot \text{cm}]$$

NB imminens $\Rightarrow n=p$

$$-1,12 / (8,62 \cdot 10^{-5}) \cdot 308,15$$

$$n_i^2 = B \cdot T^3 \cdot e^{-E_g/k \cdot T} = 10^{31} \cdot 308,15^3 \cdot e^{-1,12 / (8,62 \cdot 10^{-5}) \cdot 308,15}$$

$$= 10^{31} \cdot 2,98 \cdot 10^7 \cdot 4,88 \cdot 10^{-13} = 1,427 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$$

$$n_i = \sqrt{1,427 \cdot 10^{20}} = 1,195 \cdot 10^{10}$$

also

$$G = 1,6 \cdot 10^{-19} (1,195 \cdot 10^{10} \cdot 1350 + 1,195 \cdot 10^{10} \cdot 500) =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} (1,613 \cdot 10^{13} + 5,975 \cdot 10^{12}) =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,211 \cdot 10^{13} = 3,54 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} =$$

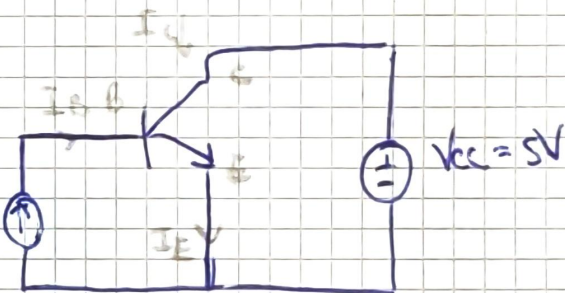
$$= 3,54 \mu\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{G} = 2,82 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm} = 282 \text{ k}\Omega \text{ cm}$$

14 NOVEMBRE 2018

BJT

①



$$I_S = 10^{-16} \text{ A}$$

$$\alpha_F = 0,95$$

$$I_B = 100 \mu\text{A}$$

Rich: I_C, I_E, V_{BE}

$$V_{CE} = 5V$$

IPOTESI ROD

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$\begin{cases} I_E = (\beta_F + 1) I_B \\ I_C = \beta_F I_B \\ \beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \end{cases}$$

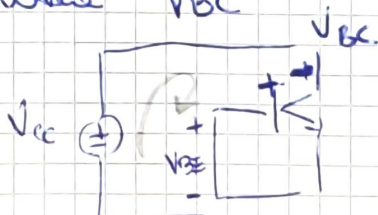
$$\text{cond.} \begin{cases} V_{CE} \geq V_{BE} > 0 \\ V_{BC} < 0,1 \end{cases}$$

$$\beta_F = \frac{0,95}{1 - 0,95} = 19$$

$$\Rightarrow I_C = 19 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 1900 \mu\text{A} = 1,9 \text{ mA}$$

$$I_E = 20 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 2000 \mu\text{A} \approx 2 \text{ mA}$$

trovare V_{BC}



$$\begin{aligned} -V_{CC} - V_{BC} + V_{BE} &= 0 \\ V_{BC} &= V_{CC} - V_{BE} = 4,3V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{BE} - V_{BC} \\ -V_{BC} &= V_{CE} - V_{BE} \end{aligned}$$

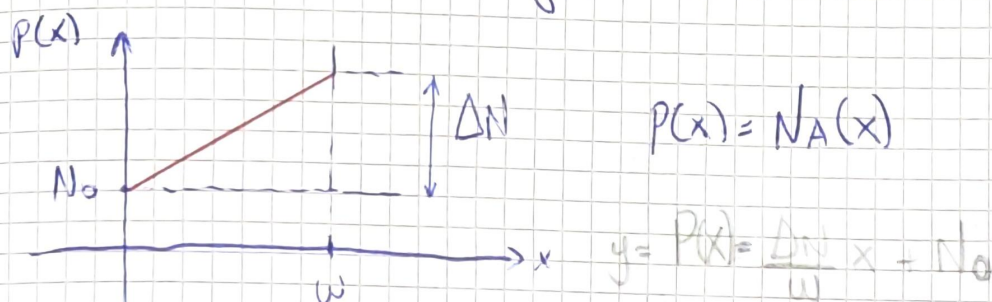
$$\begin{aligned} V_{BC} &= V_{BE} - V_{CE} \\ &= 0,7 - 5 = \end{aligned}$$

OK ROD

$$\leftarrow = -4,3V$$

②. Semiconduttore p

Calcolare la distribuzione del campo e la distribuzione di carica non compensata sapendo che ha spessore w , con distribuzione di drogante come mostrato in figura.



∞ 0 E

$$PE = V_T \frac{d}{dx} P(x) = V_T \frac{d}{dx} \left(\frac{\Delta N}{w} x + N_0 \right) =$$

$$= V_T \frac{\Delta N}{w} = PE$$

$$V_T \frac{\Delta N}{w} = E \left(\frac{\Delta N}{w} x + N_0 \right) \Rightarrow E(x) = V_T \frac{\frac{\Delta N}{w}}{\frac{\Delta N}{w} x + N_0}$$

?

Microelectrónica Efeito Early

572 mpm BND BJT

$$I_B = 3 \mu A$$

RICH: β_{FO}, V_A

$$V_{CE} = 5V \rightarrow I_C = 240 \mu A$$

$$V_{CE} = 10V \rightarrow I_C = 265 \mu A$$

Eff Early

$$\beta_F = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$I_C = \beta_F I_B = (I_S e^{V_{BE}/V_T}) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$V_{CE} = 5V$$

$$I_C = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) I_B \rightarrow \frac{I_C}{I_B} = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$\frac{240 \mu A}{3 \mu A} = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) = 80$$

$$V_{CE} = 10V$$

$$\frac{265 \mu A}{3 \mu A} = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) = 88,33$$

$$\frac{\beta_{FO} \left(1 + \frac{5}{V_A}\right)}{\beta_{FO} \left(1 + \frac{10}{V_A}\right)} = \frac{80}{88,33} = \frac{\left(1 + \frac{10}{V_A}\right)}{\left(1 + \frac{5}{V_A}\right)} = \frac{265}{240} = 1,104$$

find V_A

$$1 + \frac{10}{V_A} = 1,104 \left(1 + \frac{5}{V_A}\right) = 1,104 + \frac{5,52}{V_A}$$

$$\frac{10}{V_A} - \frac{5,52}{V_A} = 1,104 - 1 = 0,104$$

$$\frac{1}{V_A} 4,48 = 0,104 \rightarrow \frac{1}{V_A} = \frac{0,104}{4,48} \rightarrow V_A = \frac{4,48}{0,104} = 43,1V$$

check

$$\beta_{FO} \left(1 + \frac{5}{43,1}\right) = 80 \rightarrow \beta_{FO} = \frac{80}{1 + 0,116} = 71,68$$

OK

5,73 BJT mpm

$$I_S = 100 \text{ nA}$$

$$\beta_F = 100$$

$$V_A = 65 \text{ V}$$

RDD

$$V_{BE} = 0,72 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 10 \text{ V}$$

RICH:

a) I_C

b) I_C con $V_A = \infty$

c) Calcolare il rapporto dei valori di I_C precedentemente calcolati

$$\beta_F = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$

$$\beta_{FO} = \frac{\beta_F}{1 + V_{CE}/V_A} = \frac{100}{1 + \frac{10}{65}} = 80,67$$

$$\begin{aligned} \text{a) } I_C &= I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) = 100 \cdot 10^{-18} e^{\frac{0,72}{25 \cdot 10^{-3}}} \left(1 + \frac{10}{65} \right) \\ &= 100 \cdot 10^{-18} \cdot 3,22 \cdot 10^{12} (1,15) = 10^{-6} \cdot 370,3 = 370,3 \mu\text{A} \approx 0,37 \text{ mA} \end{aligned}$$

b) $V_A = \infty \rightarrow$ Non c'è effetto Early

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{\infty} \right) = 100 \cdot 10^{-18} \cdot 3,22 \cdot 10^{12} = 322 \mu\text{A}$$

$$\text{c) } \frac{370,3}{322} = 1,15$$

NB: Il primo I_C è del 15% maggiore a causa dell'Effetto Early.

5,75 $I_S = 5 \text{ fA}$

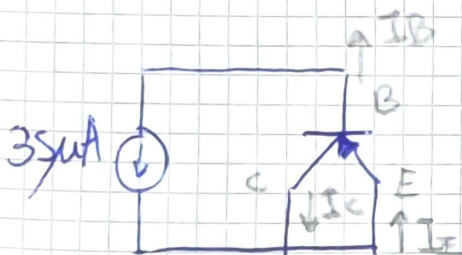
$$\beta_{FO} = 19$$

$$V_A = 50 \text{ V}$$

RICH:

a) Costante del transistor, V_{BE}

b) V_{BE} per $V_A \rightarrow \infty$



$$\text{pmp } I_B = \frac{I_S}{\beta_{FO}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_B = 35 \mu\text{A}$$

$$\frac{I_B \beta_{FO}}{I_S} = e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \rightarrow \ln \left(\frac{I_B}{I_S} \beta_{FO} \right) = \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$V_{BE} = 25 \cdot 10^{-3} \ln\left(\frac{35 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-15}}\right) = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25,61 = 640 \text{ mV}$$

$$= 0,64 \text{ V}$$

allora

$$I_C = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_D}\right) I_B$$

$$V_{CE} = V_{BE} - V_{BC}$$

↓ in questo caso

$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

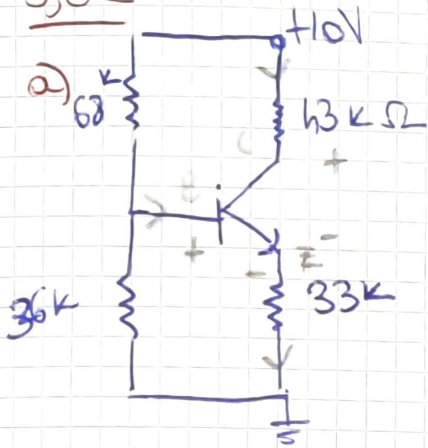
$$I_E = I_C + I_B = \beta_{FO} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_D}\right) I_B + I_B$$

questo esercizio viene risolto a tentativi per iterazione

5. POLARIZZAZIONE BJT

Potenziale di resistenza a li resistenze

5,82

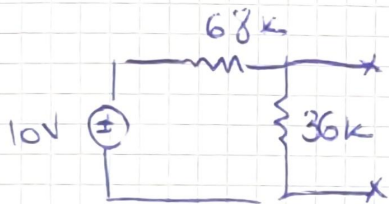
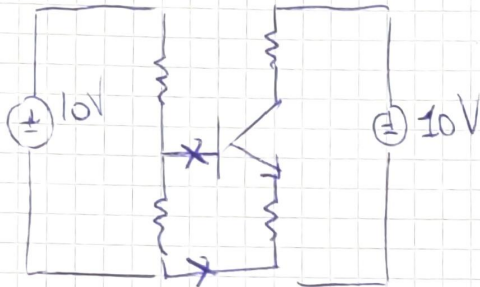


$$\beta_F = 50$$

$$V_{BE} = 0,7$$

RICH: Pmo lobno A

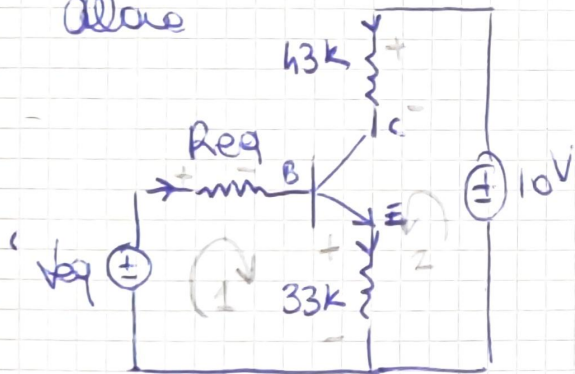
Phenomen circuito di ingresso



$$V_{eq} = 10 \frac{36}{36+68} \text{ k}\Omega = 3,46 \text{ V}$$

$$R_{eq} = \frac{36 \cdot 68}{36 + 68} = 23,54 \text{ k}\Omega$$

Alone



68 ~~SUPPONGO $V_{BE} = 0.7V$~~ perché ~~$V_{BE} \approx 0.7V$~~

$$\begin{aligned} 1. -V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + 33k I_E &= 0 \\ 2. -10 + 13k I_C + V_{CE} + 33k I_E &= 0 \end{aligned}$$

$$\underline{I_E} = (\beta_F + 1) \underline{I_B}$$

$$1 - \beta_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + 33k (\beta_{eq} + 1) I_B = 0$$

$$I_B (R_{BQ} + 33k (R_F + 1)) = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{eq} - V_{BE}}{R_3 + 33 \cdot 10^3 (\Omega)} = \frac{3,46 - 0,7}{1706,54} \frac{V}{k\Omega} = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{V}{k\Omega}$$

$$I_B = 1,62 \mu A$$

allora $I_C = \beta_F I_B = 81 \mu A$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 82,6 \mu A$$

$$Q \equiv (I_C, V_{CE})$$

trovo V_{CE} con la maglia di uscita

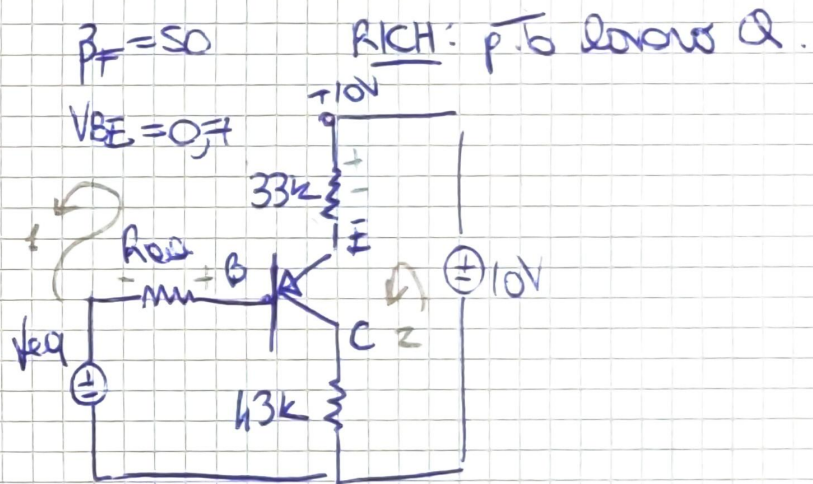
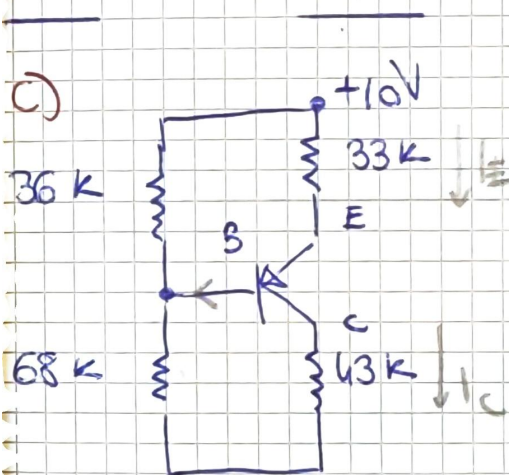
$$V_{CE} = +10 - 43 \cdot 10^3 \cdot 81 \cdot 10^{-6} - 33 \cdot 10^3 \cdot 82,6 \cdot 10^{-6} =$$

$$= +10 - 3,48 - 2,72 = 3,8 V$$

Condiz. RAD. $\begin{cases} V_{CE} \geq V_{BE} \rightarrow 3,8 \geq 0,7 \\ V_{BC} \leq -0,1 \end{cases}$

$$V_{CE} = V_{BE} - V_{BC} \quad V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -3,1 V$$

$$\Rightarrow Q \equiv (81 \mu A; 3,8 V)$$



$$V_{BEQ} = 10 \frac{68}{68+36} = 6,5 V$$

IPOTESI RAD $\begin{cases} V_{BE} \approx 0,7 \\ V_{CE} \geq V_{BE} \\ V_{BC} \leq -0,1 \end{cases}$

$$R_{BEQ} = \frac{68 \cdot 36}{36+68} = 23,5 k\Omega$$

$$1 - V_{BEQ} - R_{BEQ} I_B - 33k I_E + 10 + V_{BE} = 0 \quad I_E = (\beta_F + 1) I_B$$

$$-6,5 - 23,5k I_B - 33k (\beta_F + 1) I_B + 10 - 0,7 = 0$$

$$I_B [-23,5k - 33k (\beta_F + 1)] + 2,8 = 0$$

$$I_B = \frac{-2,8}{-23,5 - 33(51) k\Omega} \frac{V}{10^3 \Omega} = 1,64 \cdot 10^{-3} \frac{V}{10^3 \Omega} = 1,64 \mu A$$

$$I_B = 1,64 \mu A$$

$$I_E = 51 \cdot 1,64 \mu A = 83,64 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 82 \mu A$$

Calcolo V_{EC} dalla maglia di uscita

$$-10 + 33k I_E + V_{EC} + 43k I_C = 0$$

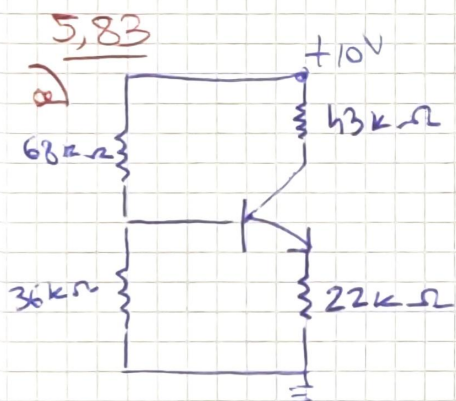
$$-10 + 33 \cdot 83,64 \cdot 10^{-3} + V_{EC} + 43 \cdot 82 \cdot 10^{-3} = 0$$

$$-10 + 2,76 + V_{EC} + 3,52 = 0$$

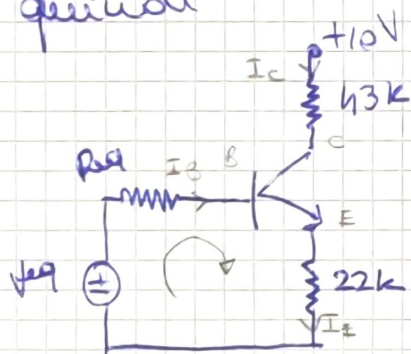
$$V_{EC} = 3,72 V$$

$$V_{EC} > V_{BE} \rightarrow 3,72 > 0,7 \quad \underline{\underline{OK}}$$

$$\Rightarrow Q = (I_C; V_{EC}) = (82 \mu A; 3,72 V) \quad \underline{\underline{OK}}$$



quindi



$$\beta_F = 75$$

$$V_{BE} = 0,7 V$$

RCH: punto di lavoro Q

$$V_{eq} = 10 \frac{36}{36+63} = 3,64 V$$

$$R_{eq} = \frac{36 \cdot 63}{36+63} = 22,9 k\Omega$$

KVL immagine

$$-V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + 22k I_E = 0$$

IPOTESI: RDO

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 76 I_B$$

$$R_{eq} I_B + 22k \cdot 76 I_B = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B (22,9k + 22k \cdot 76) = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{3,64 - 0,7}{1696 \cdot 10^3} = 1,63 \mu A$$

$$I_B = 1,63 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 122,25 \mu A$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B = 123,88 \mu A$$

$$Q = (I_C; V_{CE}) \text{ Trovare } V_{CE}$$

$$10 = h_{FE} \cdot 10^3 I_C + V_{CE} + 22 \cdot 10^3 I_E =$$

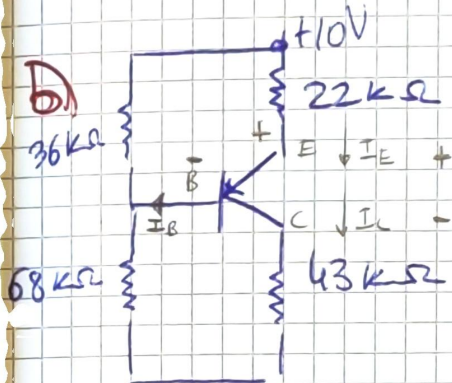
$$= h_{FE} \cdot 10^3 \cdot 122,25 \cdot 10^{-6} + V_{CE} + 22 \cdot 10^3 \cdot 123,88 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 5,25 + V_{CE} + 2,73$$

$$V_{CE} = 10 - 5,25 - 2,73 = 2,02 V$$

$$\Rightarrow Q = (122,25 \mu A; 2,02 V)$$

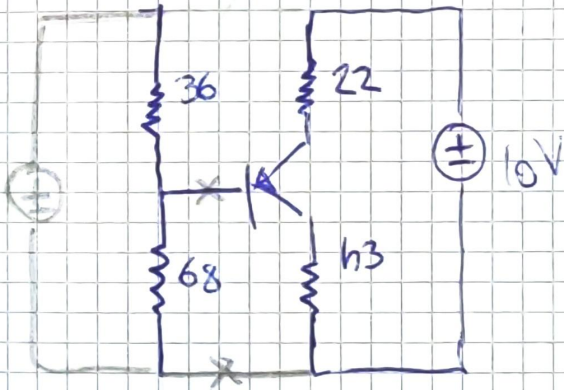
ARCH: p.to lavoro Q



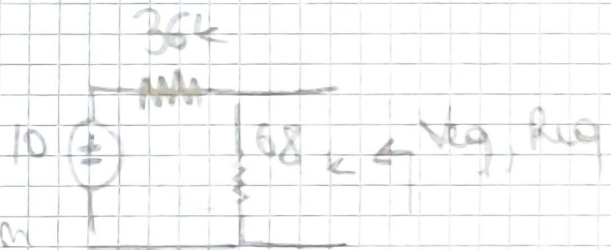
$$\beta_F = 75$$

$$V_{EB} = 0,7$$

Circuito equivalente



Teorema



$$V_{eq} = 10 \frac{68}{68+36} = 6,53 V$$

$$R_{eq} = \frac{36 \cdot 68}{36+68} = 23,5 k\Omega$$

NB: Io conosco $V_{EB} \approx 0,7$ quindi conviene prendere una maglia in cui c'è V_{EB}

$$10 = 22k I_E + V_{EB} + R_{eq} I_B + V_{eq}$$

$$\text{con } I_E = (\beta + 1) I_B = 76 I_B \text{ allora}$$

ho preso una equazione di verde

$$10 - V_{EB} - V_{eq} = 22k \cdot 76 I_B + 23,5k I_B$$

$$2,77 = I_B (1695,5 \cdot 10^3)$$

$$I_B = 2,77 / 1695,5 \cdot 10^3 = 1,63 \mu A$$

IPOTESI RAD

$$I_E = 76 \cdot 1,63 \mu A = 123,88 \mu A$$

$$I_B = 1,63 \mu A$$

$$I_C = 75 \cdot 1,63 \mu A = 122,25 \mu A$$

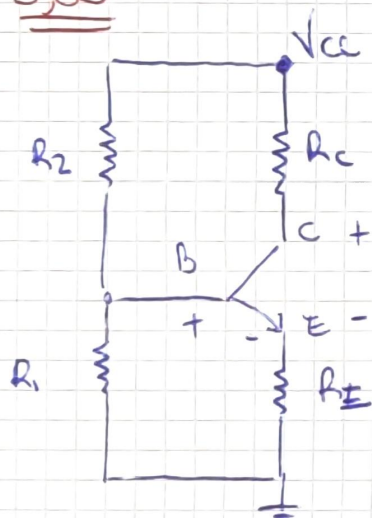
Adesso calcolo V_{EC} con KVL di uscita

$$\begin{aligned} 10 &= 22k I_E + V_{EC} + 13k I_C \\ &= 22 \cdot 123,88 \cdot 10^{-3} + V_{EC} + 13 \cdot 122,25 \cdot 10^{-3} \\ &= 7,982,11 \cdot 10^3 + V_{EC} \end{aligned}$$

$$V_{EC} = 10 - 7,98 = 2,02 V$$

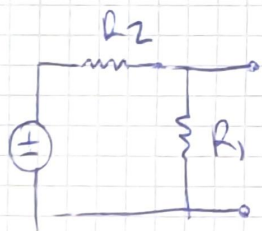
condizione RAD $V_{EC} > V_{EB} \rightarrow 2,02 > 0,7$

5,85



$$\begin{aligned} R_1 &= 6,2k\Omega \\ R_2 &= 12k\Omega \\ R_C &= 5,1k\Omega \\ R_E &= 7,5k\Omega \\ \beta_F &= 100 \\ V_{CC} &= +10V \end{aligned}$$

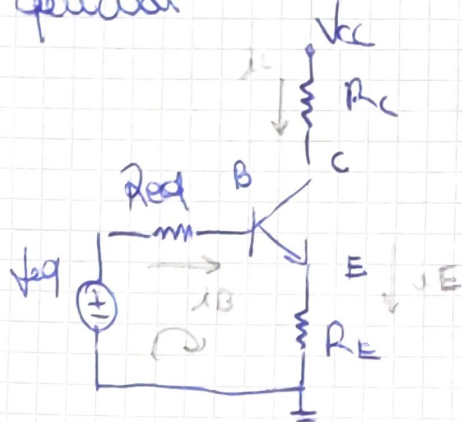
Rich. punto di lavoro



$$V_{eq} = 10 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \frac{6,2}{6,2 + 12} = 3,4V$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{6,2 \cdot 12}{6,2 + 12} = 4,08 k\Omega$$

quindi



$$KVL: -V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

IPOTESI RAD

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 101 I_B \quad \text{quindi}$$

$$-3,4 + R_{eq} I_B + 0,7 + R_E 10 I_B = 0$$

$$I_B (R_{eq} + R_E) = +2,7 \rightarrow I_B = \frac{2,7}{(4,08 + 7,5) \cdot 10^3} = \frac{3,54 \mu A}{23,3 \mu A}$$

$$I_B = 3,54 \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 100 \cdot 3,54 \cdot 10^{-6} = 3,54 \cdot 10^{-4} A \approx 0,354 mA$$

allora Trovo V_{CE}

$$I_E = 0,357 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

$$10 = 5,1 \cdot 10^3 \cdot 0,354 \cdot 10^{-3} + V_{CE} + 7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,357 \cdot 10^{-3}$$

$$10 = 1,8 + V_{CE} + 2,67$$

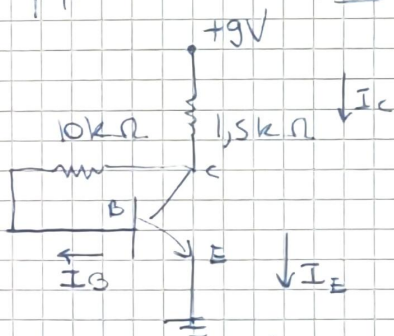
$$V_{CE} = 5,53 V \quad \text{Root cond. } V_{CE} \geq V_{BE} \Rightarrow Q = (I_C, V_{CE}) = (0,354 mA, 5,53 V)$$

Polarizzazione a due resistori

5,93

$$\beta_F = 30$$

Richi: punto di lavoro Q



$$V_E = 0$$

$$V_B = I_B \cdot 10 k \Omega$$

$$\Rightarrow V_{BE} = I_B \cdot 10 k \Omega$$

$$KVL: 9 = I_C \cdot 1,5 k \Omega + V_{CE}$$

$$IPOTESI RAO: V_{BE} = 0,7 V$$

$$I_B = \frac{0,7}{10 \cdot 10^3} = 70 \mu A; \quad I_C = \beta_F I_B = 0,21 mA$$

$$Dalla KVL: 9 = 0,21 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 + V_{CE}$$

$$V_{CE} = 9 - 0,315 = 8,68 V \Rightarrow Q = (0,21 mA, 8,68 V)$$

- Quando c'è una polarizzazione del genere si trova base i calcoli sulla maglia partendo dal generatore di 9V usando il ramo evidenziato in verde.



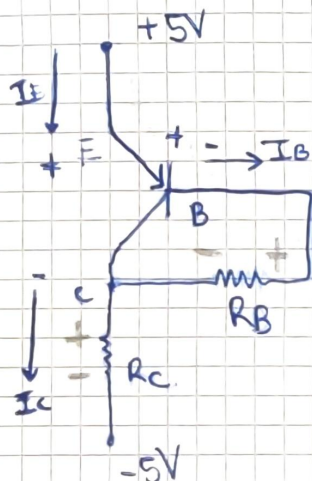
$$9 = 1,5k(I_C + I_B) + 10k(I_B) + V_{BE}$$

perché questo?

poi IPOTESI RAO, $I_C = \beta_F I_B$ e poi è facile

5,95 progetto di circuito di polarizzazione T.C. punto di lavoro $I_C = (10 \text{ mA}, 3 \text{ V})$

$$\beta_F = 60$$



$$I_C = 10 \text{ mA}$$

$$V_{EC} = 3 \text{ V}$$

POTESI RND

$$V_{EB} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_B = \beta_F I_C = 600 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_C = 610 \text{ mA}$$

POT

facendo una maglia di ingesso

$$5 = V_{EB} + R_B I_B + R_C I_C - 5$$

$$5 + 5 - V_{EB} = R_B I_B + R_C I_C$$

$$9,3 = R_B I_B + R_C I_C$$

per, altra maglia

$$5 = V_{EC} + R_C I_C - 5$$

$$10 - V_{EC} = R_C I_C \rightarrow R_C I_C = 7$$

$$R_C = \frac{7}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,7 \text{ k}\Omega$$

Quindi

$$9,3 = R_B I_B + 0,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3}$$

$$9,3 = R_B I_B + 7$$

$$R_B I_B = 2,3 \rightarrow R_B = \frac{2,3}{600 \cdot 10^{-3}} = 3,83 \Omega$$

POTESI di ESSERE in RND

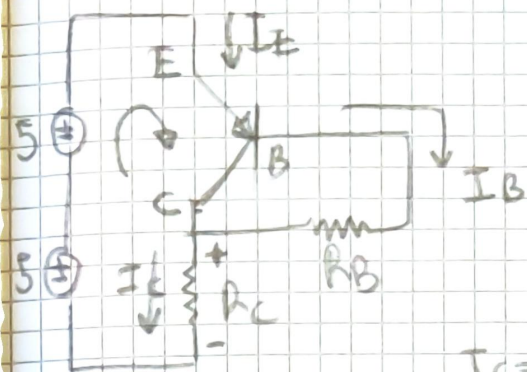
$$V_{EB} = 0,7$$

$$V_{EC} = 3 \text{ V}$$

condiz. RND $V_{EC} \geq V_{EB}$ OK RND

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

ridisegno il circuito



NB Su R_C scade una corrente $I = I_C + I_B$
quindi

KVL applicando

$$-5 - 5 + V_{EC} + R_C(I_C + I_B) = 0$$

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta_F I_B \rightarrow I_B = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,16 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 61 \cdot 0,16 \text{ mA} =$$

DA RAGGIARDARE

CAPITOLO 13 Amplificatori e piccoli segnali

13,1

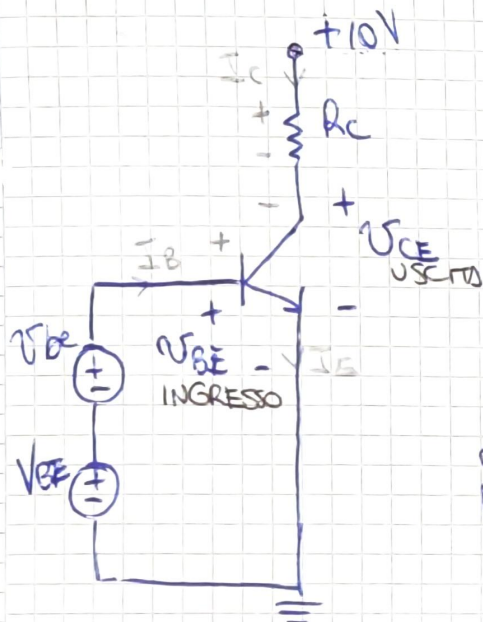
NB: Assumere che Tutti i condensatori e induttori abbiamo valore ∞ e che i BJT abbiamo $V_{BE} \approx 0,7V$
 $\beta_F = \beta_0$

DATI:

$$V_{be} = 5 \sin(2000\pi t) \text{ mV}$$

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$R_c = 3,3 \text{ k}\Omega$$



Relazioni $V_{BE} = V_{be} + V_{BE}$

$$V_{CE} = V_{c} + V_{E}$$

RICH:

a) $V_{BE}(t)$, $V_{ce}(t)$, $V_{CE}(t)$

b) massimo valore I_c che consenta il funzionamento in RAD.

$$a) V_{BE} = 5 \sin(2000\pi t) \cdot 10^{-3} + 0,7 \text{ V} = 0,7 + 0,005 \sin(2000\pi t) \text{ V}$$

$$V_{ce} = \left[\frac{5 \text{ mV}}{8 \text{ mV}} (-1,65 \text{ V}) \right] \sin(2000\pi t) = -1,03 \sin(2000\pi t) \text{ V}$$

$$V_{CE} = 5,00 - 1,03 \sin(2000\pi t) \text{ V}$$

$$10 - 3300 I_c \geq 0,700 \rightarrow I_c \leq 2,82 \text{ mA}$$

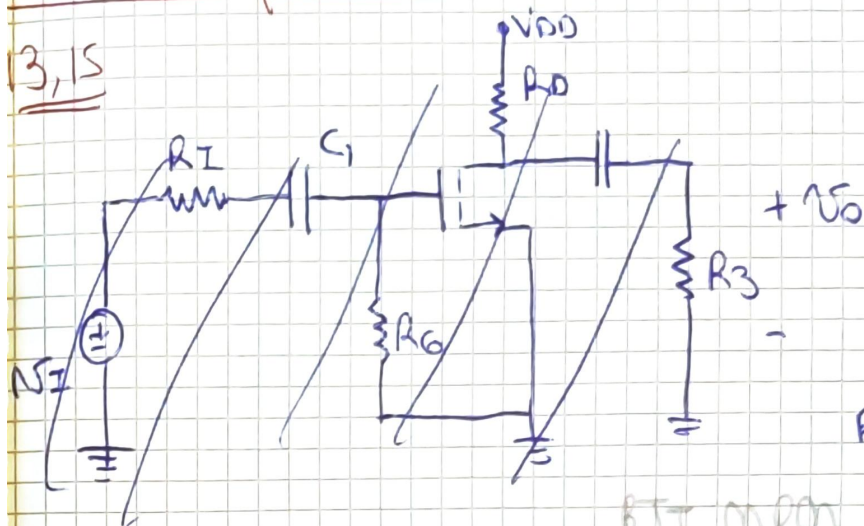
Ma che passaggi sono?
 che valore usare per β_0

Non a ho capito una bella cosa

(?)

Circuiti equivalenti DC e AC

3,15



$$\beta_F = 90$$

$$V_{CC} = 18V$$

$$R_1 = 2k\Omega$$

$$R_2 = 360k\Omega$$

$$R_3 = 750k\Omega$$

$$R_4 = 270k\Omega$$

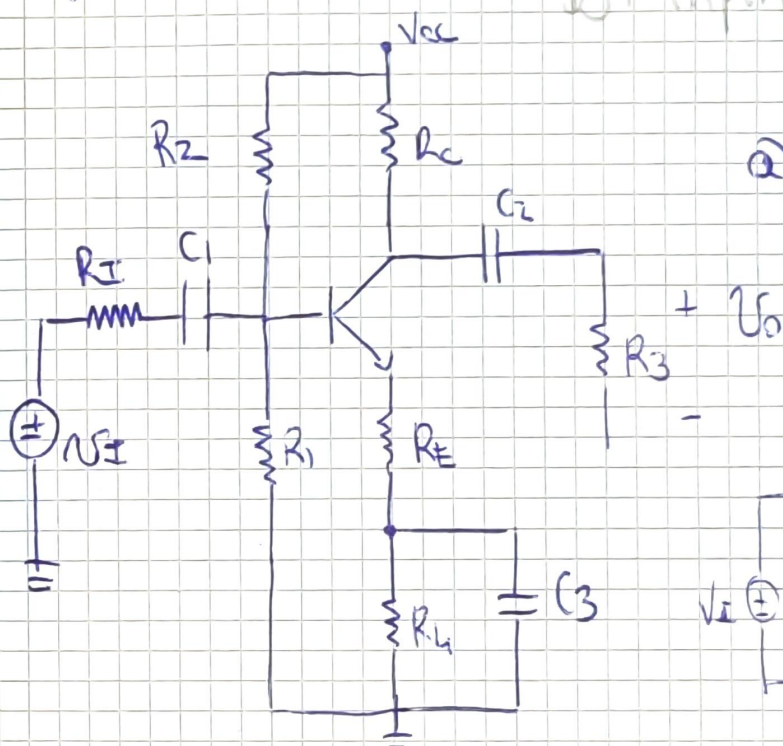
$$R_E = 8,2k\Omega$$

$$R_L = 220k\Omega$$

$$R_3 = 910k\Omega$$

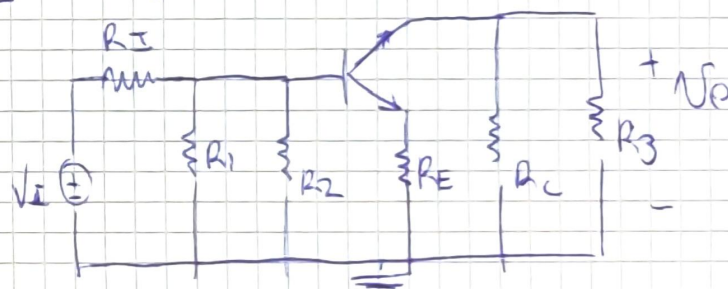
RICH. a) Circuito eq. in DC
b) p.to di lavoro

BJT n-p-n



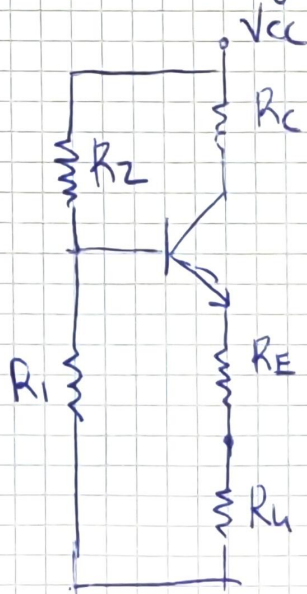
a) CIRCUITO AC

- Condensatori in C.c.
- Alimentatore Vcc a massa



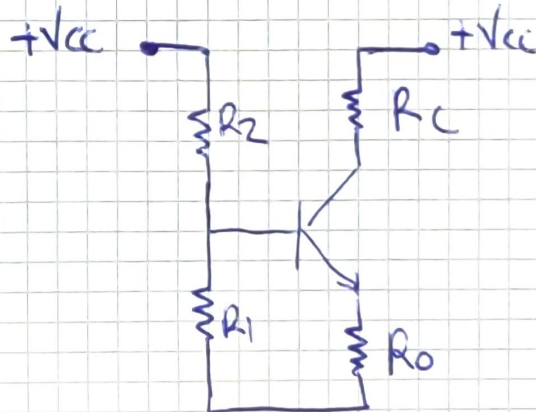
b) Il punto di lavoro si calcola in DC

- Condensatori in C.c.
- Spenti i generatori in DC



$$R_0 = R_E + R_L = 228,2k\Omega$$

Quindi ho il circuito equivalente



Esercizio su maglia di ingranio

$$V_{eq} = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 18 \frac{360}{360 + 750} = 5,84 \text{ V}$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{360 \cdot 750}{360 + 750} = 243,24 \text{ k}\Omega \text{ allora il circuito}$$

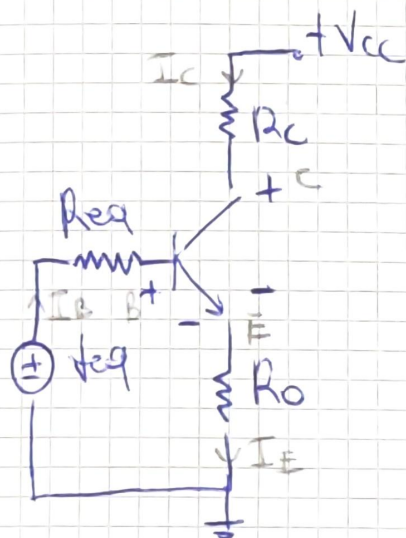
$$R_o = 228,2 \text{ k}\Omega$$

Suppongo BJT

$$V_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$$

$$\text{cond. A. } V_{CE} \geq V_{BE} \text{ e } V_{BC} < -0,1$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B$$



KVL immagine

$$-V_{eq} + R_{eq} I_B + V_{BE} + R_o I_E = 0$$

$$R_{eq} I_B + R_o (\beta_F + 1) I_E = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B (R_{eq} + \beta_F R_o) = V_{eq} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{5,84 - 0,7}{(243,24 + 91 \cdot 228,2) \text{ k}\Omega} = \frac{5,14}{21009,44 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{A}}} =$$

$$= 2,44 \cdot 10^{-7} \text{ A} \approx 0,244 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta_F I_B = 21,96 \mu\text{A} \approx 22 \mu\text{A}$$

$$I_E = I_C + I_B = 22,244 \mu\text{A}$$

TROVARE V_{CE} dalla maglia di uscita

$$V_{cc} - R_C I_C - V_{CE} - R_o I_E = 0$$

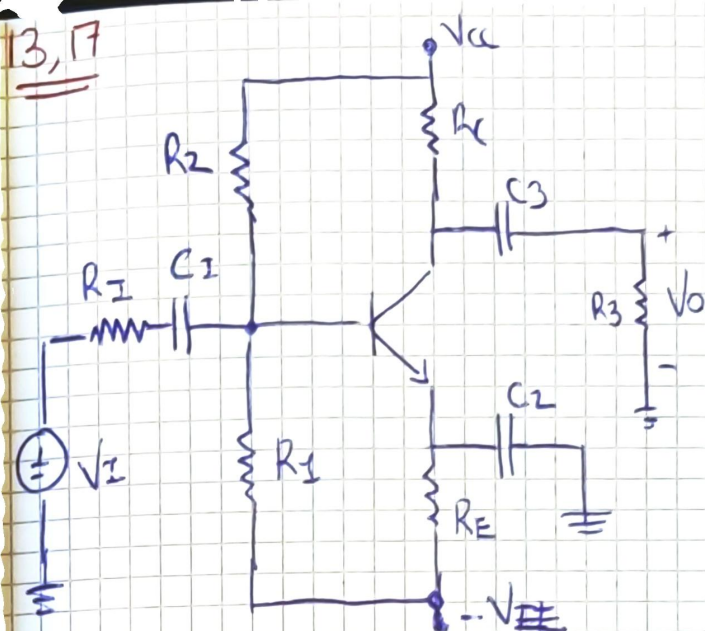
$$V_{CE} = V_{cc} - R_C I_C - R_o I_E = 18 - 270 \cdot 22 \cdot 10^{-3} - 228,2 \cdot 22,44 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 18 - 5,94 - 5,12 = 6,94 \text{ V}$$

$$V_{CE} \geq V_{BE} \text{ e } V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -6,24 < -0,1 \text{ OK BJT}$$

$$\Rightarrow Q = (22 \mu\text{A}; 6,94 \text{ V})$$

13, 17



$\beta_F = 75$
 $V_{CC} = 12$
 $-V_{EE} = -12V$
 $R_I = 1k\Omega$
 $R_L = 5k\Omega$
 $R_2 = 10k\Omega$

$R_3 = 24k\Omega$
 $R_E = 1k\Omega$
 $R_C = 6k\Omega$

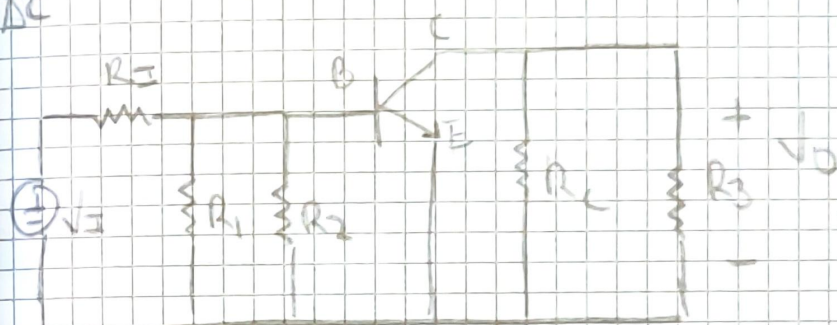
RICH: a) Circuito AC
 b) Punto di lavoro

a) DC

- Condensatori in CC
- Elementi: V_{CC} , $-V_{EE}$ a massa

BJT mpm

AC

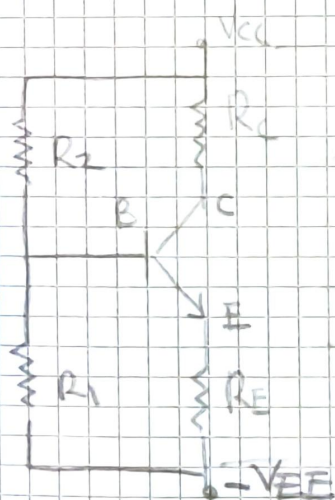


R_E bypassato dal condensatore C_2

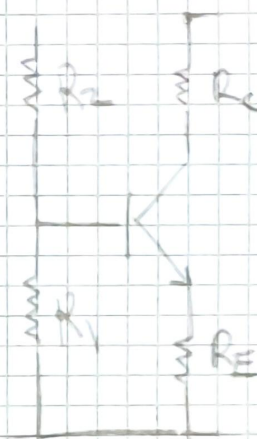
b) Circuito in DC

- Spostare gli elementi di AC
- Condensatori come CA

I due generatori si sommano in uno unico



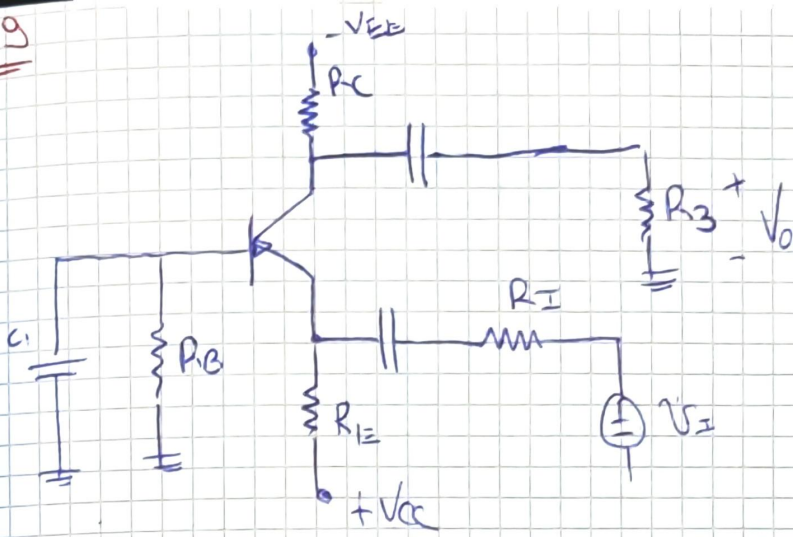
III



Overvoltage moglie di ingresso
 $V_{in} =$

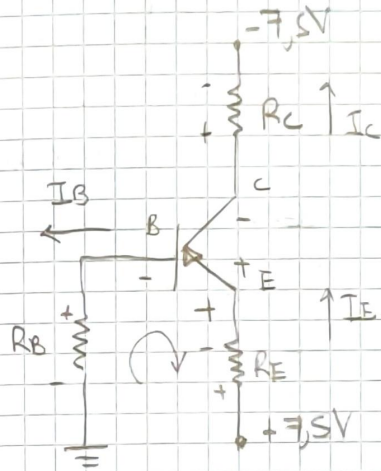
La figura che con vengono sommati i due generatori

B,19



$\beta_F = 75$
 $-V_{EE} = -7,5V$ $V_{CC} = +7,5V$
 $R_1 = 0,47k\Omega$
 $R_2 = 3k\Omega$
 $R_C = 33k\Omega$
 $R_E = 68k\Omega$
 $R_3 = 120k\Omega$

Rich: Circuito in DC e punto di lavoro



IPOTESI R_{th}
 $V_{EB} = 0,7$

LVU INGRESSO

$$-R_B I_B - R_E I_E - V_{EB} + 7,5V = 0$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = 76 I_B \text{ allora}$$

$$-R_B I_B - R_E 76 I_B + 7,5 - 0,7 = 0$$

$$I_B (-R_B - R_E 76) + 6,8 = 0$$

$$I_B = \frac{+6,8}{+R_B + R_E 76} = \frac{6,8}{(3 + 68 \cdot 76) \cdot 10^3} = 1,31 \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 76 \cdot 1,31 = 99,56 \mu A$$

$$I_E = I_C + I_B = 100,87 \mu A$$

trovare V_{EC}

$$-7,5 = -R_C I_C - V_{EC} - R_E I_E + 7,5$$

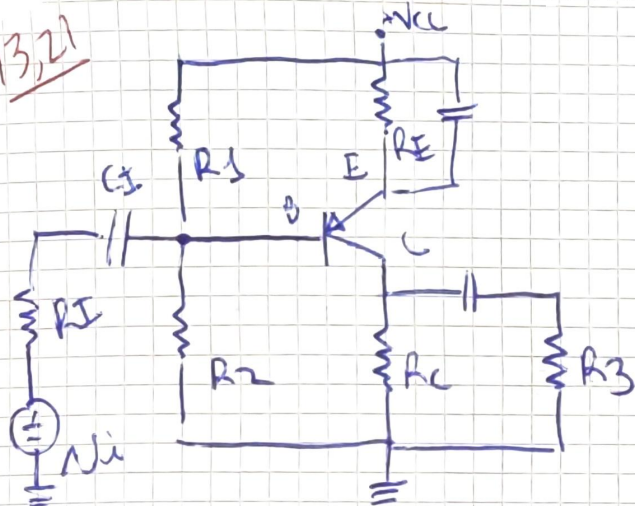
$$V_{EC} = -R_C I_C - R_E I_E + 15$$

$$V_{EC} = -33 \cdot 99,56 \cdot 10^{-3} - 68 \cdot 100,87 \cdot 10^{-3} + 15 = -3,24 - 6,86 + 15 = 4,85V$$

$$\Rightarrow Q \equiv (99,56 \mu A ; 4,85V) \quad \underline{OK} \quad V_{EC} > V_{EB} \Rightarrow \underline{OK} \text{ Rad}$$

$$V_{CB} = V_{EB} - V_{EC} = -4,15V \leq -0,1 \quad \underline{OK} \text{ 2a condizione Rad verificata}$$

13,21



$$\beta_F = 135$$

$$V_{CC} = 9V$$

$$R_1 = 20k\Omega$$

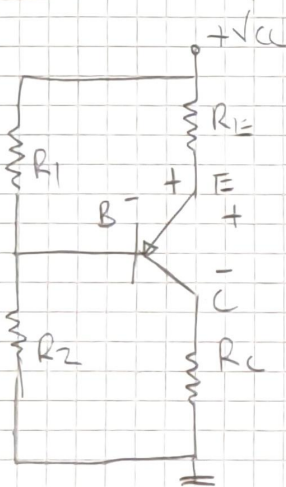
$$R_2 = 62k\Omega$$

$$R_C = 13k\Omega$$

$$R_E = 3,9k\Omega$$

Rich: Circuito DC e punto di lavoro Q

Analisi DC: condensatori con.



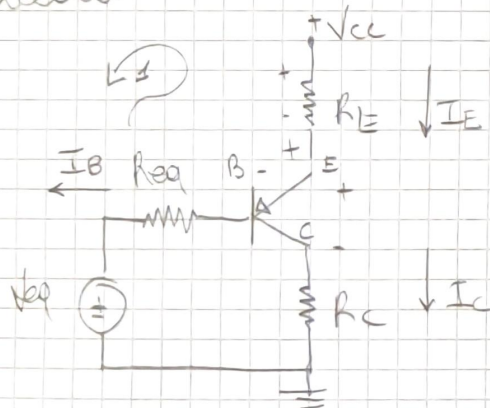
Preleviamo su maglia di immagine facendo partitore di tensione su R_2



$$V_{eq} = 9 \frac{62}{62+20} = 6,8V$$

$$R_{eq} = R_1 // R_2 = 15k\Omega$$

Allora



IPOTESI RAP

$$V_{EB} \approx 0,7V$$

Per analizzare devo prendere una maglia in cui è presente V_{EB}

KVL:

$$V_{CC} = R_E I_E + V_{EB} + R_{eq} I_B + V_{eq}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B \text{ allora}$$

$$V_{CC} = R_E (\beta_F + 1) I_B + V_{EB} + R_{eq} I_B + V_{eq}$$

$$V_{CC} - V_{EB} - V_{eq} = I_B [R_E (\beta_F + 1) + R_{eq}]$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB} - V_{eq}}{R_E (\beta_F + 1) + R_{eq}} = \frac{9 - 0,7 - 6,8}{(3,9(136) + 15) \cdot 10^3} = \frac{1,5}{545400} = 2,75 \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 135 \cdot 2,75 = 371,25 \mu A$$

$$I_E = 136 \cdot 2,75 = 374 \mu A$$

Adesso si Trova V_{EC}

13. ~~to~~ ~~Ques~~ ~~ck~~ $I_S (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) < \underbrace{-9,975 \cdot 10^{-15} \text{ A}}_{I_D \text{ carico morto per carico}}$

$$I_S (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) < I_D'$$

$$e^{\frac{V_D}{V_T}} < \frac{I_D'}{I_S} + 1 \rightarrow \frac{V_D}{V_T} < \ln \left(\frac{I_D'}{I_S} + 1 \right)$$

$$V_D < V_T \ln \left(\frac{I_D'}{I_S} + 1 \right) = 0,025 \ln \left[\frac{-9,975 \cdot 10^{-15}}{10 \cdot 10^{-5}} + 1 \right]$$

$$= 0,025 (-5,93) = -0,149 \text{ V}$$

Quindi, c'è una resistenza maggiore di $1 \text{ P}\Omega$ per valori di V_D .

$$V_D < -0,149 \text{ V}$$

OK

Ricordi segnali BJT

13.19 Per quale valore di corrente di collettore un transistor bipolare mostra una transconduttanza di 30 mS , $250 \mu\text{S}$, $50 \mu\text{S}$?

Transconduttanza $g_m = I_C / V_T \rightarrow I_C = V_T g_m$

• $I_C = 0,025 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ A} \approx 0,75 \text{ mA}$

• $I_C = 0,025 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 6,25 \mu\text{A}$

• $I_C = 0,025 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 1,25 \mu\text{A}$

~~13.50~~ 13.50

BJT con $\beta_0 = 75$.

Per quale corrente si ha $r_{\pi} = 10 \text{ k}\Omega$?

Quali saranno i valori approssimati di g_m , r_o se $V_A = 100 \text{ V}$?

$r_{\pi} = \beta_0 / g_m \rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T}$

quindi $r_{\pi} = \beta_0 \frac{V_T}{I_C}$ isolare I_C $I_C = \frac{V_T \beta_0}{r_{\pi}}$

$$I_C = \frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{75} = 3,33 \text{ A}$$

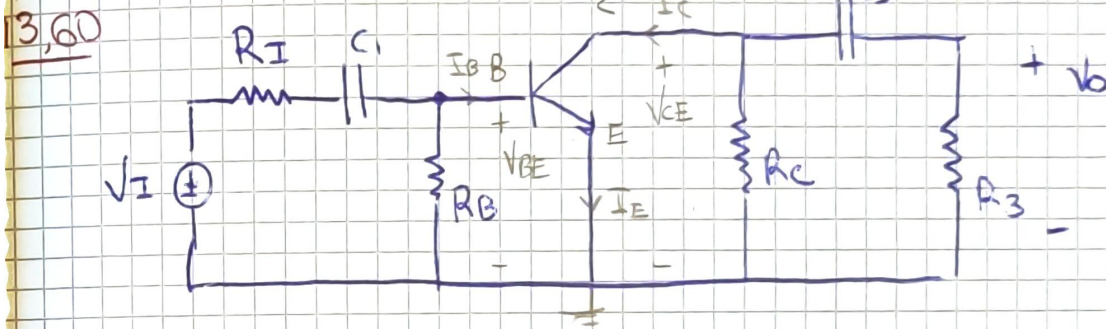
$$V_{CE} = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100}{3,33} \approx 3 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{3,33}{0,025} = 133,2 \text{ } \Omega^{-1} = S$$

$$V = R I \quad R_T =$$

Nota! Area $300 \mu\text{m}^2$
 Sostituire $100 \mu\text{A} / g_m$
 nel procedimento di calcolo.

Amplificatore CE



DATI:

Condensatori
valore ∞

- $R_I = 750 \text{ } \Omega$
- $R_B = 100 \text{ k} \Omega$
- $R_C = 100 \text{ k} \Omega$
- $R_E = 100 \text{ k} \Omega$
- $Q = (50 \mu\text{A}; 10 \text{ V})$
- $\beta_0 = 100$
- $V_A = 75 \text{ V}$

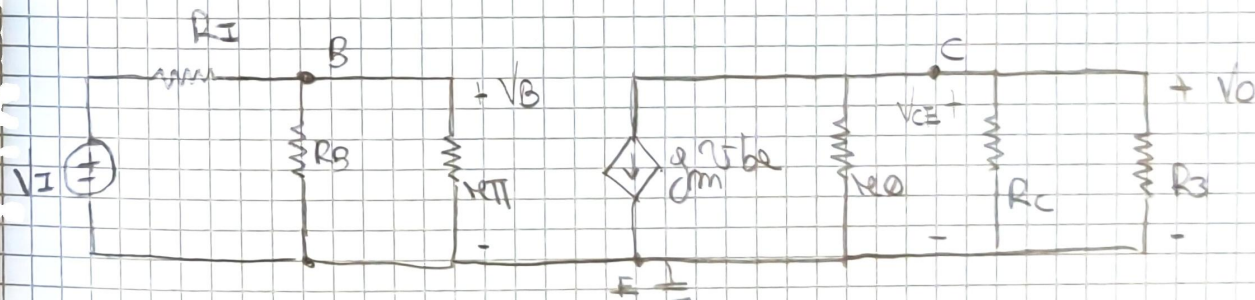
RICH:
 A_v

$$V_{CE} = 10 \text{ V}, \quad I_C = 50 \mu\text{A}$$

Si dà un piccolo segnale
 e condensatori sono c.c.

$$A_v = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_i}$$

Sostituisco al BJT il modello al piccolo segnale.



NB $V_B = V_{BE}$ poiché emettitore è a massa.

$$r_{eT} = \beta_0 / g_m, \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,025} = 2 \text{ mS } [\Omega^{-1}]$$

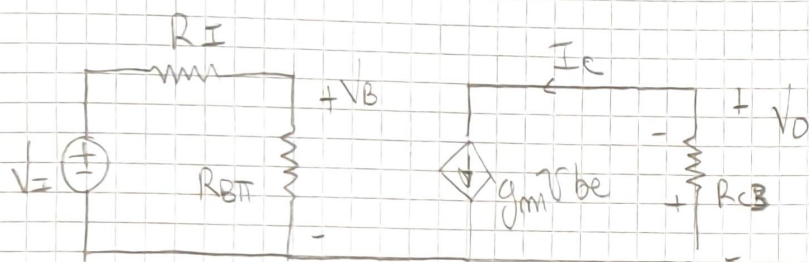
$$r_{eT} = \frac{100}{2 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ k} \Omega$$

$$R_{BT} = R_B // R_T = \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} \text{ k} \Omega = 33,3 \text{ k} \Omega$$

$$R_{C3} = R_C // R_3 = \frac{100 \cdot 100}{100 + 100} \text{ k}\Omega = 50 \text{ k}\Omega$$

quindi ho il circuito

NB: Per A_v si trascura r_{e0}



$$V_B = V_I \frac{R_{BT}}{R_I + R_{BT}} \quad \text{partitore di tensione}$$

$$V_O = -R_{C3} (g_m V_{be}) = -R_{C3} g_m V_B$$

quindi

$$A_v = \frac{V_O}{V_B} \cdot \frac{V_I}{V_B} = \frac{-R_{C3} g_m V_B}{V_B} \cdot \frac{V_I}{V_I \frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_I}} =$$

$$= -R_{C3} g_m \cdot \frac{R_{BT} + R_I}{R_{BT}} = (-50 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{33,3 + 0,75}{33,3} =$$

$$= -100 \cdot 25,52 = -102,25$$

NB: Il libro ha considerato anche r_{e0} ma il procedimento è lo stesso, c'è solo il poletto in più

NB r_{e0} si può trascurare solo quando si calcola A_v e non i fattori di amplificazione.

3,61 valori limite per il guadagno in tensione del problema precedente e β_0 può variare tra 60 e 100?
 - Assumere che il punto Q rimanga invariato.

Siccome $r_{\pi} = \beta_0 / g_m$ dipende tutti da r_{π}

Prendiamo: $g_m = 2 \text{ mS}$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{\beta_0}{2 \cdot 10^{-3}} \Omega$$

$$\beta_0 = 60$$

$$r_{\pi} = \frac{60}{2 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ k}\Omega \quad (\text{PRIMA ERA } 50 \text{ k}\Omega)$$

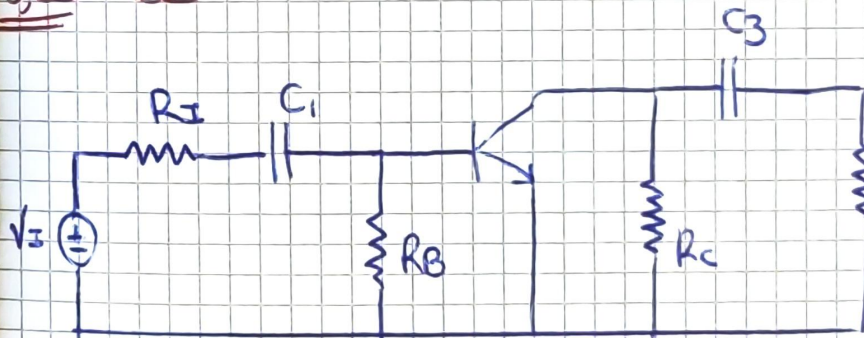
Quindi cambia $R_{B\pi} = R_B // r_{\pi} = \frac{100 \cdot 30}{100 + 30} = 23,07 \text{ k}\Omega$

Il guadagno A_v

$$A_v = -R_{C3} g_m \cdot \frac{R_{B\pi} + R_i}{R_{B\pi}} = (-50 \cdot 2) \cdot \frac{23,07 + 0,75}{23,07} \approx -103,25$$

$$\Rightarrow -103,25 \leq A_v \leq -102,25 \quad \text{SI HA SOLO UNA PICCOLA VARIATIONE}$$

3,63 CE



DATI:

- $C = \infty$
- $R_i = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_B = 5 \text{ M}\Omega$
- $R_C = 1,5 \text{ M}\Omega$
- $R_L = 3,3 \text{ M}\Omega$

$$Q = (1 \mu\text{A}, 1,5 \text{ V})$$

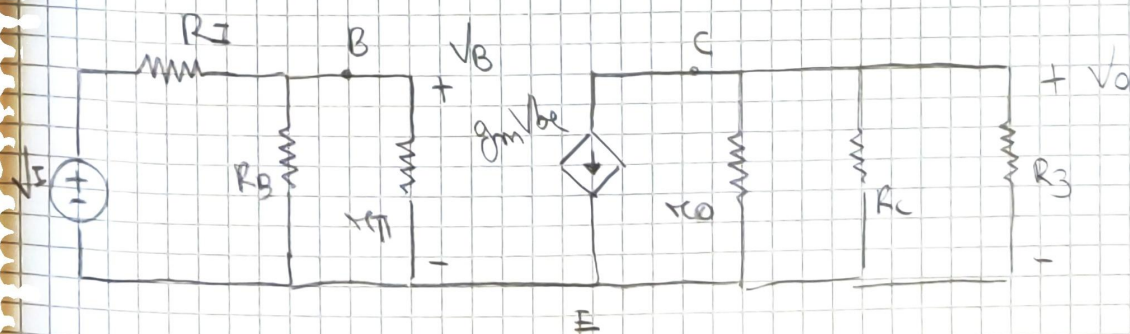
$$\beta_0 = 40$$

$$V_A = 50 \text{ V}$$

RICH: Guadagno tensione A_v

Scegliere senza trascurare r_{π}

Modello piccolo segnale



$$I_C = 1 \mu\text{A}$$

$$V_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{I_c}{V_T} = \frac{10^{-6}}{0,025} = 4 \cdot 10^{-5} = 40 \mu S$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{40}{40 \cdot 10^{-6}} = 1 M\Omega \quad (10^6)$$

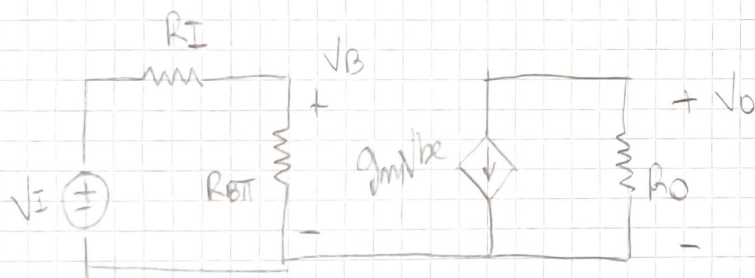
$$r_{e0} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_c} \approx \frac{V_A}{I_c} = \frac{50}{10^{-6}} = 50 M\Omega$$

Faccio paralleli tra le resistenze

$$R_{BT} = R_B // r_{\pi} = \frac{5 \cdot 1}{5+1} M\Omega = 0,83 M\Omega$$

$$R_o = r_{e0} // R_c // R_3 = \frac{1}{\frac{1}{r_{e0}} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{50 \cdot 10^6} + \frac{1}{1,5 \cdot 10^6} + \frac{1}{3,3 \cdot 10^6}} \approx 1 M\Omega$$

Quindi il circuito



000010,0

$$A_c = \frac{V_o}{V_I} = \frac{V_o}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_I}$$

$$V_B = V_I \frac{R_{BT}}{R_I + R_{BT}}$$

$$V_o = -g_m V_{be} \cdot R_o = -g_m V_B R_o \text{ allora}$$

$$A_c = \left(\frac{V_o}{V_B} \right) \cdot \left(\frac{V_B}{V_I} \right) = \left(\frac{-g_m V_B R_o}{V_B} \right) \cdot \left(\frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_I} \cdot \frac{1}{V_I} \right) =$$

$$= (-g_m R_o) \left(\frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_I} \right) = \left(-40 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 \right) \left(\frac{0,83 \cdot 10^6}{0,83 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^3} \right) =$$

$$= -40 \cdot 0,99 = -39,95 \quad \underline{\underline{OK}}$$

(Il libro viene -40 ma va bene uguale)

2) tutti importanti e semplificazioni dei modelli

3.67 Effettua stima approssimativa del guadagno di tensione di un amplificatore a emettitore comune, alimentato da una tensione di 12V.

$$A_v \approx -10 \cdot V_{cc} = -10 \cdot 12 = -120 \quad \text{Ma da dove?}$$

Piccoli segnali Transistore a effetto di campo ~~MOS~~ MOSFET

3.76

$$\mu_f = 250$$

$$I_{DS} = 200 \mu A$$

$$k_m' = 50 \mu A/V^2$$

$$\lambda = 0,02 V^{-1}$$

RICH:

a) Calcolare $\frac{W}{L}$

b) Valore di $V_{GS} - V_{TH}$

a) $\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2k_m}{I_0}} \quad \text{e } k_m = k_m' \frac{W}{L} \quad \text{quindi}$

$$\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2k_m'}{I_0} \frac{W}{L}} \rightarrow \left(\lambda \mu_f \right)^2 = \frac{2k_m'}{I_0} \frac{W}{L}$$

$$\Rightarrow \frac{W}{L} = \frac{I_0}{2k_m'} \left(\lambda \mu_f \right)^2 = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(0,02 \cdot 250 \right)^2 =$$

$$= 2 \cdot 10^5 = 200.000$$

b) $g_m = \frac{2I_0}{(V_{GS} - V_{TH})}$ oppure, se si considera lo struttamento del canale

$$I_0 = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \rightarrow \sqrt{\frac{2I_0}{k_m}} = V_{GS} - V_{TH}$$

con $k_m = 50 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 50 = 2500 \frac{\mu A}{V^2}$ allora

$$V_{GS} - V_{TH} = \sqrt{\frac{2 \cdot 200 \mu A}{2500 \mu A/V^2}} = 0,4 V$$

considera k_m' invece di k_m e secondo me è sbagliato.

se allora fa $\sqrt{\frac{2I_0}{k_m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{50(5 \cdot 10^{-3})}} = 0,16 V$

OK

13,77 MOS comune m

$$k_m = 250 \mu\text{A/V}^2$$

$$V_{TH} = 1\text{V}$$

$$\lambda = 0,02 \text{V}^{-1}$$

Rich: Per quale I_D il MOS
non sarà più in grado di
formare un guadagno di tensione
intrinseco ≥ 1
($\mu_f \geq 1$)?

$$\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2I_D}{k_m}} \geq 1$$

$$\sqrt{\frac{2I_D}{k_m}} \geq \lambda \rightarrow \frac{2I_D}{k_m} \leq \lambda^2 \rightarrow I_D \leq \frac{\lambda^2 k_m}{2}$$

$$I_D \leq 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{250 \cdot 10^{-6}}{2} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ A} = 50 \text{ nA}$$

$$\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2k_m}{I_D}} \leq 1 \quad \frac{2k_m}{I_D} \leq \lambda^2$$

$$\frac{2k_m}{\lambda^2} \leq I_D \rightarrow I_D \geq 1,25 \text{ A}$$

13,78 Progettare un MOSFET con $g_m = 5 \text{ mS}$, $V_{GS} - V_{TH} = 0,5 \text{ V}$.
Calcolare il rapporto $\frac{W}{L}$ assumendo $k_m' = 40 \mu\text{A/V}^2$.

$$k_m = k_m' \frac{W}{L}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$

$$I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{k_m'}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$I_D = \frac{(V_{GS} - V_{TH}) g_m}{2} = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,25 \text{ mA}$$

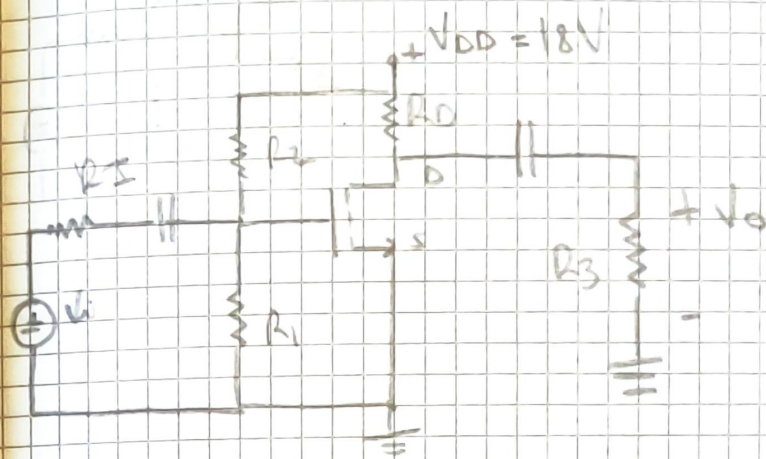
ADIMENSIONANDO

$$\frac{W}{L} = \frac{I_D \cdot 2}{k_m' (V_{GS} - V_{TH})^2} = \frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{40 \cdot 10^{-6} (0,5)^2} = 250$$

OK

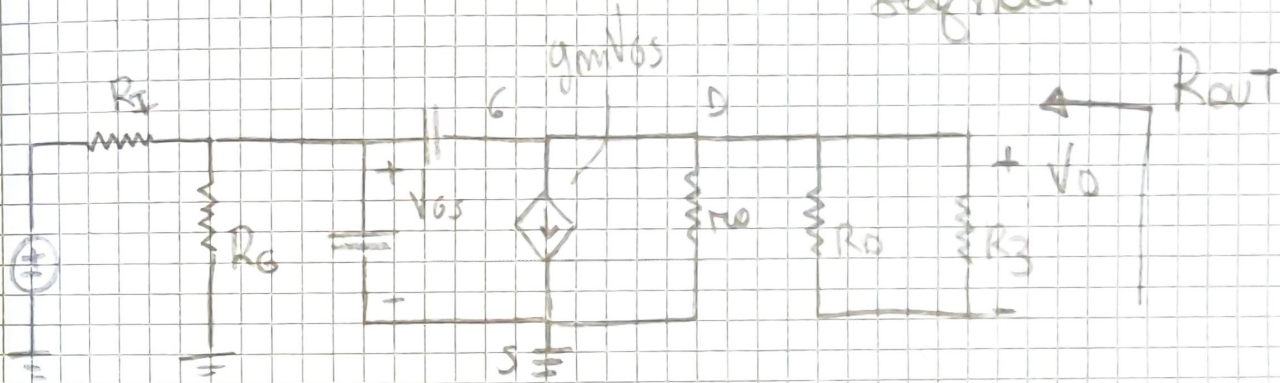
13,82 Con quale scelta del p.t.o di lavoro è possibile ottenere una resistenza $R_{out} = 100 \text{ k}\Omega$ in un'amplificatore common source comune MOSFET caratterizzato da $\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$ e una tensione di alimentazione di 18 V ?

ESEMPio di circuito con MOS a source comune



$$Q \equiv (I_{DS}, V_{DS})$$

Circuito equivalente con Modello a piccoli segnali.



Conseguenze del libro

$$R_{out} = \frac{R_D \cdot r_{oD}}{R_D + r_{oD}}, \text{ utilizzando } V_{GS} = \frac{V_{DD}}{2}$$

$$R_D = \frac{V_{GS}}{I_D} = \frac{9 \text{ V}}{I_D} \rightarrow r_{oD} = \frac{50 \text{ V} + 9 \text{ V}}{I_D} \Rightarrow R_{out} = \frac{7,8 \text{ V}}{I_D}$$

$$I_D = \frac{7,8}{100 \text{ k}\Omega} \text{ quindi trovo } R_D, r_{oD} \text{ e il punto } Q.$$

NB Il circuito che ho disegnato non è corretto all'esercizio! È un circuito che ho preso x vedere se ci acciappassi qualcosa.

13,87 Confronto piccoli segnali MOS e BJT

BJT: $V_A = 25V$
 $V_{CE} = 10V$

MOS: $k_m = 25 \text{ mA/V}^2$
 $\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$
 $V_{DS} = 10V$

RICH: Per quale valore di corrente di polarizzazione, il fattore di amplificazione del MOSFET è uguale a quello del BJT?

Quale è il valore di μ_f per il BJT?

BJT $\mu_f = \frac{V_A}{V_T} = \frac{25}{0,025} = 1000$

MOS $\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2k_m}{I_D}}$

$(\lambda \mu_f)^2 = \frac{2k_m}{I_D}$

$I_D = \frac{2k_m}{(\lambda \mu_f)^2} = \frac{2k_m}{1,25 \cdot 10^{-4}} = 0,125 \text{ mA}$

Il libro ha considerato l'effetto corpo (body) ma se usi un valore k_0 di area 80 da dove viene fuori.

13,88
 BJT $V_A = 50V$
 $I_C = 200 \mu A$

MOS $\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$
 $V_{DS} - V_{TH} = 0,5V$
 $I_{DS} = 200 \mu A$

RICH: a) Fattore di amplificazione di entrambi

b) Transconduttanza di entrambi

BJT

$\mu_f = \frac{V_A}{V_T} = \frac{50}{0,025} = 2000$

$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{0,025} = 0,008 \text{ S} = 8 \text{ mS}$

MOS
 $I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$ Transistor effect body, Transistor k_m

$$k_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_{TH})^2} = \frac{400 \cdot 10^{-6}}{0,25} = 1600 \mu A/V^2$$

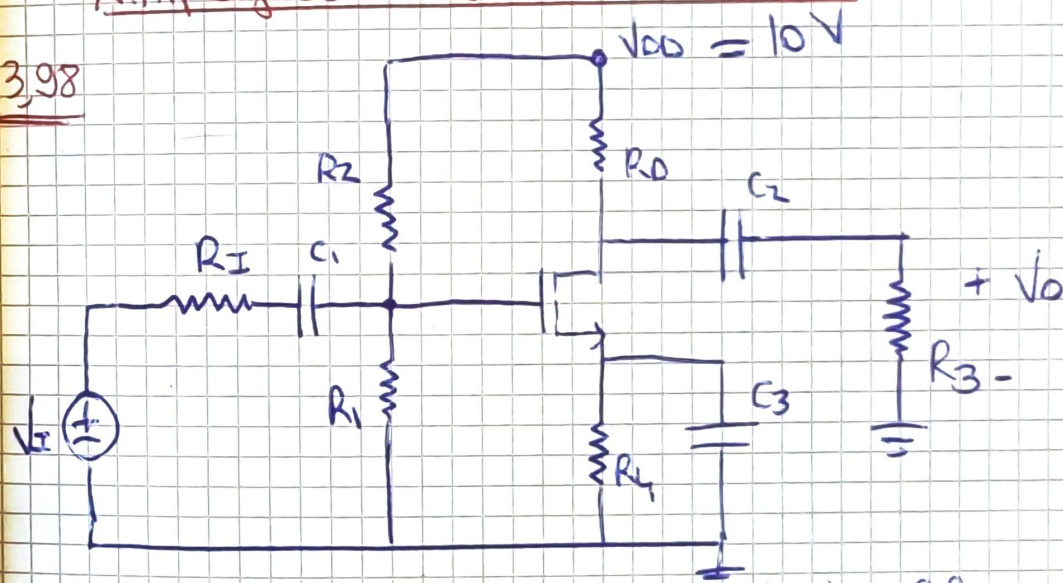
quindi

$$\mu_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2k_m}{I_D}} = \frac{1}{0,02} \sqrt{\frac{2 \cdot 1600 \mu A/V^2}{200 \mu A}} = \frac{4}{0,02} = 200$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = \frac{400 \cdot 10^{-6}}{0,5} = 800 \mu S$$

Amplificatore a Source Comune CS

13,98



DATI:

$$C_1 = C_2 = C_3 \rightarrow \infty$$

$$R_I = 1 k\Omega$$

$$R_1 = 430 k\Omega$$

$$R_2 = 560 k\Omega$$

$$R_D = 43 k\Omega$$

$$R_L = 20 k\Omega$$

$$R_S = 100 k\Omega$$

$$k_m = 0,800 mA/V^2$$

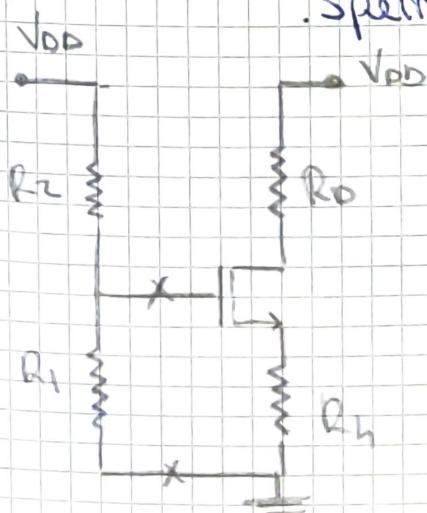
$$V_{TH} = 1 V$$

$$\lambda = 0,0133 V^{-1}$$

RICH: Guadagno di Tensione dell'amplificatore

ANALISI IN DC: Condensatori c.a

Spettro generatore in AC V_i



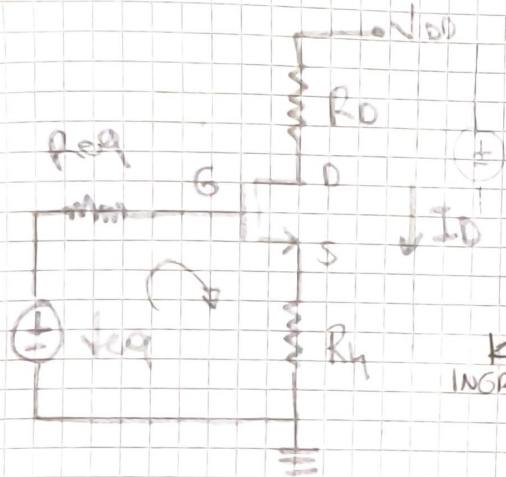
Operazion circuito di ingresso

$$V_{eq} = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \frac{430 k\Omega}{(430 + 560) k\Omega}$$

$$= 4,34 V$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{(430 \cdot 560) (k\Omega)}{(430 + 560) k\Omega} = 243 k\Omega$$

quindi



TROVARE PUNTO DI LAVORO

IPOTESI SAT $\left\{ \begin{array}{l} I_D = \frac{K_M}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 / (1 + \lambda V_{DS}) \\ V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \geq 0 \end{array} \right.$

KVL INGRESSO $-V_{eq} + R_{eq} I_D + V_{GS} + R_{th} I_D = 0$

$-V_{eq} + V_{GS} + R_{th} I_D = 0$

KVL USCITA $V_{DD} = R_O I_D + V_{DS} + R_{th} I_D$

Abbiamo le equazioni

$$\begin{cases} -V_{eq} + V_{GS} + R_{th} I_D = 0 \\ V_{DD} = R_O I_D + V_{DS} + R_{th} I_D \\ I_D = \frac{K_M}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \end{cases}$$

$\sqrt{\frac{2 I_D}{K_M}} = V_{GS} - V_{TH} \rightarrow V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2 I_D}{K_M}}$

Molla 10

$V_{eq} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{2 I_D}{K_M}}} + R_{th} I_D$

Sostituisco I_D nella 10

$-V_{eq} + V_{GS} + R_{th} \frac{K_M}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0$

$-1,3V + V_{GS} + 20 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{2} (V_{GS} - 1)^2 = 0$

$-1,3V + V_{GS} + 5(V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1) = 0$

$-1,3V + V_{GS} + 5V_{GS}^2 - 10V_{GS} + 5 = 0$

$5V_{GS}^2 - 9V_{GS} + 0,66 = 0$ EQ. II° grado

$$V_{GS} = \frac{9 \pm \sqrt{81 - 4(5)(0,66)}}{10} = \frac{9 \pm \sqrt{67,8}}{10} = \frac{9 \pm 8,23}{10}$$

$1,72 V$
 $0,077 V$

Siccome dalla condizione RSD deve essere $V_{GS} \geq V_{TH} \geq 0$ allora scegli

$V_{GS} = 1,72 V$

quindi

$I_D = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{2} (1,72 - 1)^2 = 1,296 \cdot 10^{-4} \approx 129,6 \mu A \approx 130 \mu A$

CAPITAIN APPRO SSIMO!!

Quindi

$$V_{GS} = 1,72V; I_D = 130\mu A$$

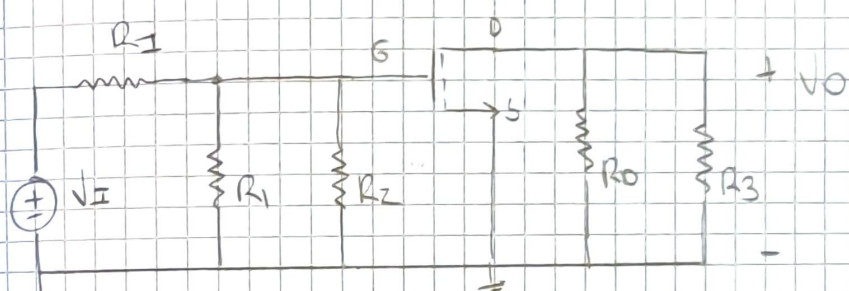
Ricorrendo V_{DS} della maglia di uscita.

$$V_{DD} = I_D(R_D + R_{th}) + V_{GS}$$

$$V_{GS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_{th}) = 10 - 130 \cdot 10^{-6} (43 + 20) \cdot 10^3 = 10 - 8,19 = 1,81V$$

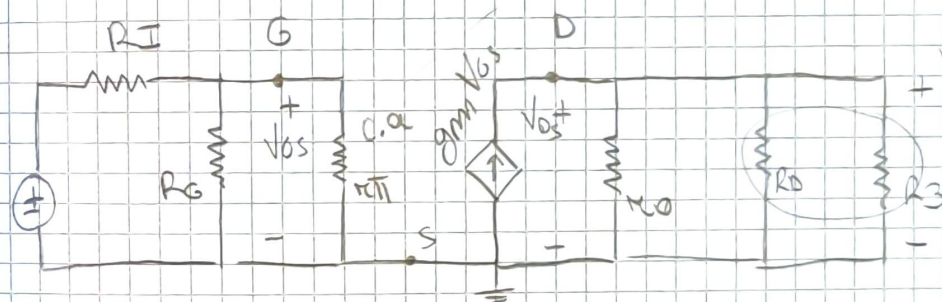
Verifica PDD $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \Rightarrow 1,81 \geq 1,72 - 1$ OK!

- ANALISI IN AC - Condensatori c.c.
(Alimentazione a massa)



Sostituisco modello a piccolo segnale

$$R_G = R_1 // R_2 = \frac{1 \cdot 560}{1 + 560} \approx 1k\Omega$$



$$R_D // R_L = \frac{43 \cdot 100}{43 + 100} = 30k\Omega$$

Calcolo

$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_{TH})} = \frac{2 \cdot 130 \cdot 10^{-6}}{(1,72 - 1)} = 3,61 \cdot 10^{-4} \approx 361\mu S$$

$$r_{th} = \infty$$

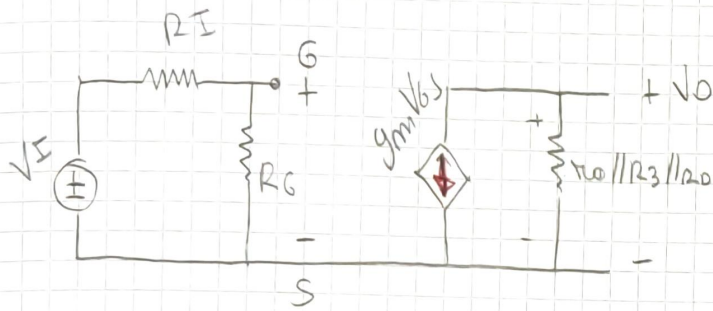
$$r_{do} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,0133 \cdot 130 \cdot 10^{-6}} = 578,37k\Omega$$

- Calcolare guadagno tensione A_v

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{V_o}{V_{gs}} \right) \left(\frac{V_{gs}}{V_i} \right)$$

$$r_{th} // R_D // R_L = \frac{578,37 \cdot 30}{578,37 + 30} = 28,5k\Omega$$

Quindi ho:



$$V_O = g_m V_{GS} (r_o \parallel R_3 \parallel R_0) = \cancel{g_m V_{GS}} \cdot 28,5 \cdot 10^3 \Omega =$$

$$= 381 \cdot 10^{-6} \cdot 1,72 \cdot 28,5 \cdot 10^3 = 1,77 \text{ V}$$

ci doveva essere Req

$$V_{GS} = V_I \frac{R_G}{R_I + R_G} \rightarrow V_I = V_{GS} \left(\frac{R_I + R_G}{R_G} \right)$$

$$A_V = \left(\frac{V_O}{V_{GS}} \right) \left(\frac{V_{GS}}{V_I} \right) = - \left(\frac{g_m V_{GS} (r_o \parallel R_3 \parallel R_0)}{V_{GS}} \right) \left(\frac{V_{GS}}{V_{GS} \frac{R_I + R_G}{R_G}} \right) =$$

$$= g_m (r_o \parallel R_3 \parallel R_0) \frac{R_G}{R_I + R_G} = 381 \cdot 10^{-6} \cdot 28,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{10^3}{10^3 + 10^3} =$$

$$A_V = -10,28 \cdot \frac{10^3}{10^3(1+1)} = -10,28 \cdot \frac{1}{2} = -5,14$$

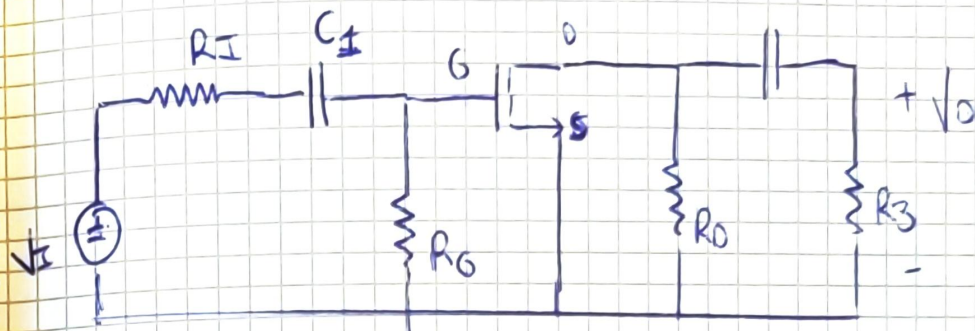
*non Trova perché me
circuito con piccoli segnali
doveva mettere Req*

Ma come mai?



oe

13,99



RICH: Guadagno di Tensione

Quando già \$Q\$ posso all'analisi in DC

\$C \rightarrow \infty\$

$$R_I = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = 6,8 \text{ M}\Omega$$

$$R_D = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 120 \text{ k}\Omega$$

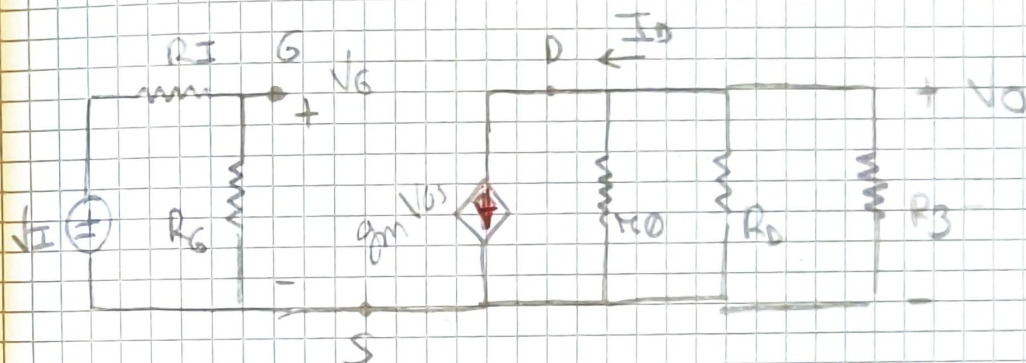
$$Q = (100 \mu\text{A}, 5 \text{ V})$$

$$k_n = 500 \mu\text{A/V}^2$$

$$\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$$

$$I_D = 100 \mu\text{A}$$

$$V_{DS} = 5 \text{ V}$$



$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_G} \frac{V_G}{V_i}$$

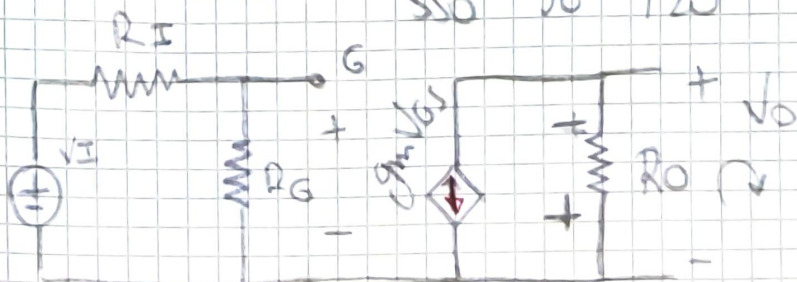
$$V_G = V_i \frac{R_G}{R_G + R_I} \quad \text{partitore di tensione}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{DS} - V_{TH}}$$

TROVARE \$V_{GS}\$

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda + V_{DS}} = \frac{1}{0,02 + 5} = 550 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = r_{ds} \parallel R_D \parallel R_3 = \frac{1}{\frac{1}{550} + \frac{1}{50} + \frac{1}{120}} = 33,16 \text{ k}\Omega$$



KVL

$$+R_o(g_m V_{gs}) + V_o$$

$$V_o = -R_o g_m V_G$$

quindi

$$\Delta V = \frac{V_0}{V_0} \frac{V_0}{V_I} = \frac{-R_0 g_m V_0}{V_0} \cdot \frac{V_I \frac{R_0}{R_0 + R_I}}{V_I} =$$

$$= -R_0 g_m \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_I}$$

trovare g_m transconduttanza

$$\mu_f = \frac{1}{\lambda N} \sqrt{\frac{2 k_m}{I_D}} = g_m \cdot r_{eD}$$

$$\Rightarrow g_m = \frac{1}{\lambda r_{eD} N} \sqrt{\frac{2 k_m}{I_D}} = \frac{1}{902.550 \cdot 10^3 \text{ N}} \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}}} =$$

$$= 9 \cdot 10^{-5} \cdot 3,16 = 2,84 \cdot 10^{-4} \approx 284 \mu S$$

quindi

$$\Delta V = -33,6 \cdot 10^3 \cdot 284 \cdot 10^{-6} \left(\frac{6,2}{6,2 + 0,1} \right) = -9,28$$

Quasi come il libro, differenza a causa delle approssimazioni e del g_m che viene differente e non copisco come lui.

13.100 valore minimo del guadagno per l'amplificazione dell'es. precedente se I_m può variare fra $300 \mu A/V^2$ e $700 \mu A/V^2$?

Assumere che il punto di lavoro resti invariato

- Praticamente dipende da g_m quindi si calcola g_m per $k_m = 300 \mu A/V^2$ e $g_{m \max}$ per $k_m = 700 \mu A/V^2$ e si calcola $A_{v \min}$ e $A_{v \max}$ $g_{m \min}$

$$g_m = \sqrt{2k_n I_D} \quad \text{[~~1.5 \times 10^{-3} A~~]}$$

Resistenza di ingresso e di uscita degli
amplificatori CE e CS

MOSFET CAPITOLO 4

	NMOS	PMOS
V_{TH}	0,75V	-0,75 V
γ	0,75 $\sqrt{V}$	0,5 $\sqrt{V}$
$2\phi_F$	0,6V	0,6 V
k'	100 $\mu A/V^2$	40 $\mu A/V^2$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,9 \epsilon_0 = 3,453 \cdot 10^{-13}$$

$$\epsilon_s = 11,7 \cdot \epsilon_0 = 1,036 \cdot 10^{-12}$$

Condensatore MOS

4.1 Condensatore Mos:

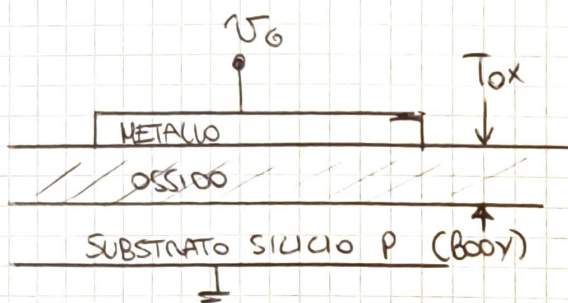
$$V_{TH} = 1V$$

Rich: Indicare regione di funzionamento per:

a) $V_G = 2V$

b) $V_G = -3V$

c) $V_G = 0,5V$



Recupero REGIONI CAPACITORE MOS

- $V_G > V_{TH}$ Regione di inversione a)
- $V_G < V_{TH}$ Regione di saturamento c)
- $V_G < V_{TH}$ Regione di accumulazione b)

NMOS

4.6 $\mu_n = 500 \frac{cm^2}{V \cdot s}$

spessori ossido: a) 40 nm b) 20 nm c) 10 nm d) 5 nm

Rich: Calcolare k_m'

$$k_m = k_m' \frac{W}{L}$$

$$k_m' = \mu_n C_{ox} = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} \leftarrow \text{spessore ossido}$$

$$k_m' = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = \frac{500}{40 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1,035 \cdot 10^{-12}}{1,035 \cdot 10^{-12}} =$$

$$\epsilon_{ox} = 3,9 \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,453 \cdot 10^{-13} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,453 \cdot 10^{-13} \frac{F}{m} \quad \text{cm} = 10^{-2} \text{ m} \quad \epsilon_{ox} = 3,453 \cdot 10^{-11} \frac{F}{cm} =$$

$T_{ox} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \text{ cm} = 40 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$

Quindi $k_m' = 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

$\frac{3,455 \cdot 10^{-9}}{40 \cdot 10^{-11}}$

$\mu_m = 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

$\epsilon_{ox} = 3,9 \cdot \epsilon_0 = 3,9 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} = 34,53 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \equiv 34,53 \cdot 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}}$

$T_{ox} = 40 \text{ mm} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 40 \cdot 10^{-9} \cdot 10^2 \text{ cm} = 40 \cdot 10^{-7}$

$k_m' = 500 \frac{34,53 \cdot 10^{-14}}{40 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \frac{\text{F}}{\text{cm}} \frac{1}{\text{cm}} = 3,453 \cdot 10^{-5} \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}} =$

$= 34,53 \cdot 10^{-6} \text{ F/V} \cdot \text{s} = 34,53 \mu\text{F/V} \cdot \text{s}$

U.S $T_{ox} = 25 \text{ mm}$

a) $V_{GS} - V_{TH} = 1 \text{ V}$

RICH: Dimostrare di calcolare (C/cm^2) nelle corrette

b) $T_{ox} = 10 \text{ mm}$

$V_{GS} - V_{TH} = 2 \text{ V}$

a) $Q' = -W C_{ox}'' (V_{GS} - V_{TH})$

$C_{ox}'' = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$

$Q'' = C_{ox}'' (V_{GS} - V_{TH})$

Quindi $Q'' = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} (V_{GS} - V_{TH}) = \frac{34,53 \cdot 10^{-12}}{25 \cdot 10^{-9}} \cdot 1 \frac{\text{FV}}{\text{m}} \frac{1}{\text{m}} = 1,3812 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F} \cdot \text{V}}{\text{m}^2}$

convertire in cm

$\text{m} = \text{cm} \cdot 10^2 \Rightarrow \text{m}^2 = \text{cm}^2 \cdot 10^4$

$Q'' = 1,38 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F} \cdot \text{V}}{\text{cm}^2 \cdot 10^4} = 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4} = 1,38 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F} \cdot \text{V}}{\text{cm}^2} = \frac{C}{\text{cm}^2} \cdot \frac{V}{\text{cm}^2} = \frac{C}{\text{cm}^2}$

4,8

$$V_{DS} = 0,25V$$

$$W = 5 \mu m$$

$$L = 0,5 \mu m$$

$$V_{TH} = 0,8V$$

$$K_m' = 200 \mu A/V^2$$

RICH:

a) Calcolare i_D con $V_{GS} = 0,1,2,3V$

b) K_m

a) • $V_{GS} = 0$ Regione? $V_{GS} \leq V_{TH} \Rightarrow$ INTERDIT. $\Rightarrow i_D = 0$

• $V_{GS} = 1V$

$$V_{GS} - V_{TH} \geq V_{DS} \rightarrow 1 - 0,8 \geq 0,25 \rightarrow 0,2 \geq 0,25 \text{ NO!}$$

$$\Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} \Rightarrow 0,25 > 0,2 \Rightarrow \text{SATURAZIONE}$$

$$i_D = \frac{K_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$K_m = K_m' \frac{W}{L} = 200 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-6}} \frac{A}{V^2} = \frac{200 \cdot 5}{0,5} \frac{\mu A}{V^2} = 2000 \mu A/V^2$$

Quindi

$$i_D = \frac{2000}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 0,25^2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 40 \mu A$$

• $V_{GS} = 2V$

$$V_{GS} - V_{TH} \geq V_{DS} \quad 1,2 \geq 0,25 \Rightarrow \text{REG. LINEARE (Triodo)}$$

$$i_D = K_m \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} =$$

$$= 2000 \cdot 10^{-6} \left(2 - 0,8 - \frac{0,25}{2} \right) 0,25 = 2000 \cdot 10^{-6} (1,075) 0,25 =$$

$$= 5,375 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 537,5 \mu A$$

• $V_{GS} = 3V \rightarrow$ Reg. lineare

4.9 NMOS

$$a) k_m' = 200 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$W = 60 \mu m$$

$$L = 3 \mu m$$

$$b) W = 3 \mu m$$

$$L = 0,15 \mu m$$

$$c) W = 10 \mu m$$

$$L = 0,25 \mu m$$

Rich: Calculer k_m

$$a) k_m = k_m' \frac{W}{L} \quad k_m = 200 \cdot 10^{-6} \frac{60}{3} = 4000 \mu A/V^2 = 4 \text{ mA/V}^2$$

$$b) k_m = 200 \cdot 10^{-6} \frac{3}{0,15} = 4 \text{ mA/V}^2$$

$$c) k_m = 200 \cdot 10^{-6} \frac{10}{0,25} = 8 \text{ mA/V}^2$$

Régime linéaire (Triodo) MOS

4.10 NMOS

$$V_{GS} = 0, 1, 2, 3 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 0,1 \text{ V}$$

$$W = 10 \mu m$$

$$L = 1 \mu m$$

$$V_{TH} = 1 \text{ V}$$

$$k_m' = 250 \mu A/V^2$$

Rich: i_D , k_m

$$k_m = k_m' \frac{W}{L} = 250 \cdot 10^{-6} \frac{10}{1} = 2500 \mu A/V^2 = 2,5 \text{ mA/V}^2$$

$$a) V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} \leq V_{TH} \Rightarrow \text{INTERDIT.} \rightarrow i_D = 0$$

$$b) V_{GS} = 1 \text{ V}$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow 0,1 \geq (0) \text{ SI} \rightarrow \text{SATURAT. } V_{GS} = V_{TH} \rightarrow \text{INTERDIT}$$

$$i_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0 \quad \text{impôt. } i_D = 0$$

$$c) V_{GS} = 2 \text{ V}$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \quad 0,1 \geq (2-1) \quad 0,1 \geq 1 \quad \underline{\text{NO}} \rightarrow \text{Rég. linéaire}$$

$$i_D = k_m (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} = 2,5 \cdot 10^{-3} (2-1 - 0,05) 0,1 = 0,238 \text{ mA}$$

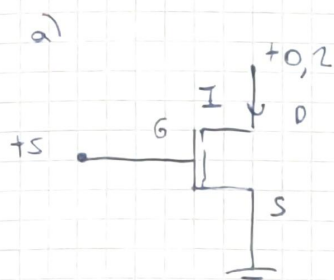
$$d) V_{GS} = 3 \text{ V}$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \quad 0,1 \geq (2) \quad \text{NO} \rightarrow \text{Rég. lin.}$$

$$i_D = k_m (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} = 0,488 \text{ mA} = 488 \mu A$$

4.11 Identificar source, drain e gate, body e determinar la corrente I_D nel transistor

$$V_{TH} = 0,7V, \quad k_m' = 100 \mu A/V^2 = 0,1 mA/V^2$$



$$\frac{W}{L} = 10$$

$$V_{DS} = 0,2V$$

$$V_{GS} = 5V$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH})$$

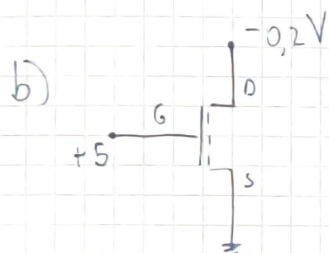
$$0,2 \geq (5 - 0,7)$$

$$\geq 4,3$$

NO! $\rightarrow$ REG. LINEARE

$$I_D = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{2} (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} = 0,1 \cdot 10^{-3} (5 - 0,7 - \frac{0,2}{2}) 0,2 = 0,042 mA \approx 42 \mu A$$

~~840 μA~~



$$\frac{W}{L} = 10$$

$$V_{DS} = -0,2V$$

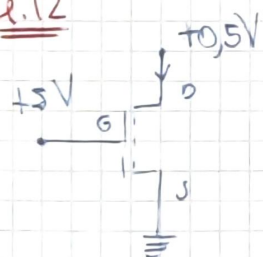
$$V_{GS} = 5V$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow V_{DS} \geq (5 - 0,7) \rightarrow -0,2 \geq 4,3 \text{ NO}$$

$\Rightarrow$ Reg. lineare

$$I_D = k_m' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 (5 - 0,7 + \frac{0,2}{2}) (-0,2) = 0,1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} (4,4) (-0,2) = -0,88 mA \approx -880 \mu A$$

4.12



$$V_{TH} = 0,75V$$

RICHI:

a) Calcolare i_D

b) Calcolare i_D con $V_G = 3V, V_D = 0,2V$

$$\frac{W}{L} = 10$$

$$k_m' = 0,1 mA/V^2$$

a) $V_{GS} = 5V$
 $V_{DS} = 0,5V$

$$k_m = 0,1 \cdot 10 = 1 mA/V^2$$

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow 0,5 \geq (5 - 0,75) \text{ NO} \rightarrow \text{Reg. lineare}$$

$$i_D = k_m (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} = 10^{-3} (5 - 0,75 - \frac{0,5}{2}) 0,5 = 2 mA$$

b) $V_{GS} = 3V$
 $V_{DS} = 0,2V$

$$V_{DS} \gg (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow 0,2 \gg (3 - 0,75) \underline{\text{NO}} \rightarrow \underline{\text{REG. LINEARE}}$$

$$I_D = 10^{-3} \left(3 - 0,75 - \frac{0,2}{2} \right) 0,2 = 0,43 \text{ mA} \approx 430 \mu\text{A}$$

Resistenza di conduzione

4.15 NMOS

a) $W/L = 100/1$

$$V_{GS} = 5V$$

$$V_{TH} = 0,65V$$

b) $V_{GS} = 3,3V$

$$V_{TH} = 0,5V$$

RICH: Calcolare resistenza di conduzione R_{ON}

$$K_M' = 100 \mu\text{A/V}^2$$

$$R_{OS} = \frac{1}{K_M (V_{GS} - V_{TH})}$$

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{OS}}$$

a) $K_M = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 10.000 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} = 10 \text{ mA/V}^2$

$$R_{OS} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3} (5 - 0,65)} = 0,023 \text{ k}\Omega = 23 \Omega$$

b) $R_{OS} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3} (3,3 - 0,5)} = 0,036 \text{ k}\Omega \approx 36 \Omega$

4.17 NMOS

$$I_D = 5A$$

$$V_{DS} \leq 0,1V$$

$$V_{GS} = 5V$$

$$V_{TH} = 2V$$

RICH: a) Valore massimo di R_{OS}

b) minimo valore di K_M per ottenere l' R_{OS} appena calcolato

a) pongo $V_{DS} = 0,1V$

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{OS}} \rightarrow R_{OS} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{0,1}{5} = 0,02 \Omega \approx 20 \text{ m}\Omega$$

b) $R_{OS} = \frac{1}{K_M (3)}$

$$3/K_M = \frac{1}{R_{OS}}$$

$$K_M = \frac{1}{3 R_{OS}} = 16,6 \frac{1}{\text{V} \cdot \Omega} = \frac{A}{\text{V}^2}$$

Regione di saturazione NMOS

4.20 NMOS

$$V_{GS} = 0, 1, 2, 3V$$

$$V_{DS} = 3,3V$$

$$W = 5 \mu m$$

$$L = 0,5 \mu m$$

$$V_{TH} = 1V$$

$$k_m' = 375 \mu A/V^2$$

RICH: a) Determinare k_m

b) Verificare se NMOS sia in saturazione

$$a) k_m = k_m' \frac{W}{L} = 375 \cdot 10^{-6} \frac{5}{0,5} = 3750 \mu A/V^2 = 3,75 mA/V^2$$

b) Condizione di saturazione:

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH})$$

• ~~$3,3 \geq (0 - 1)$ s' $V_{GS} = 0 \Rightarrow V_{DS} < V_{TH}$ interdotta.~~

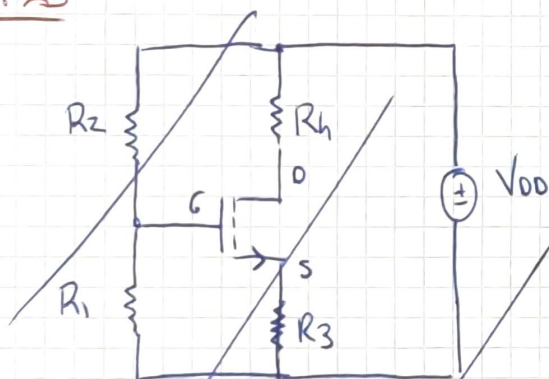
• $3,3 \geq (1 - 1)$ s'

• $3,3 \geq (2 - 1)$ s'

• $3,3 \geq (3 - 1)$ s'

Modello portante della regione di saturazione

4.25



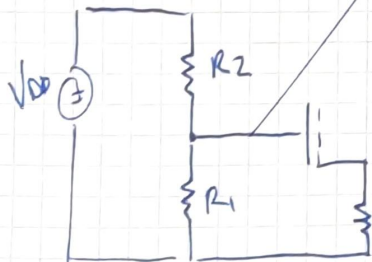
a) $V_{DD} > 0$ calcolare I_D

b) $V_{DD} < 0$ calcolare I_D

Che problema si verifica per $V_{DD} < 0$?

a) Prevedim sul circuito di ingresso fatto il circuito equivalente. $V_{DD} = 5V$

È una buona discesa



Transconduttanza

U.27 Nmos

$$V_{GS} = 2V, 3,3V$$

$$V_{DS} = 3,3V$$

$$W = 20\mu m$$

$$L = 1\mu m$$

$$V_{TH} = 0,7V$$

$$k_n' = 250\mu A/V^2$$

Rich. a) Calcolare Transconduttanza soluzione
b) verificare se è in ~~interdizione~~

a) TRANSCONDUUTTANZA $g_m = k_n (V_{GS} - V_{TH})$

a) $k_n = k_n' \frac{W}{L} = 250 \cdot 10^{-6} \frac{20}{1} = 5000 \mu A/V^2 = 5 mA/V^2$

• $g_m = (2 - 0,7) 5 \cdot 10^{-3} = 6,5 \frac{mA}{V}$
 $= 6,5 mS$

$R = \frac{V}{A} \Rightarrow \frac{A}{V} = \frac{1}{R}$

• $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow 3,3 \geq (2 - 0,7)$ SÌ SAT

• $g_m = 5 \cdot 10^{-3} (3,3 - 0,7) = 13 mS$

$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow 3,3 \geq (3,3 - 0,7)$ SÌ SAT

U.28 $V_{GS} = 4V$

a) $V_{GS} = 4V$

$V_{GS} = 3V$

b) $V_{GS} = 4,5V$

Rich. Stimare la transconduttanza
 g_m per la transist.

Suggerimento: $g_m \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$

Modulazioni della lunghezza di canale

4.29 NMOS

$$k_m = 250 \mu A/V^2$$

$$V_{TH} = 0,75 V$$

$$\lambda = 0,025 V^{-1}$$

$$V_{DS} = 5V$$

$$V_{DS} = 6V$$

RICH:

a) Calcolo i_D

b) " i_D con $\lambda = 0$

Corrente satur. con modulaz. di canale

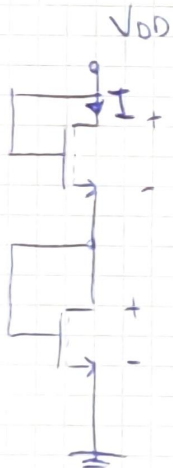
$$i_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

per $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} \approx 0$

a)
$$i_D = \frac{250}{2} \cdot 10^{-6} (5 - 0,75)^2 (1 + 0,025 \cdot 6) = 2596,48 \mu A \approx 2,6 mA$$

b)
$$i_D = 2257 \mu A \approx 2,2 mA$$

4.33



$$V_{DD} = 10V$$

$$\lambda = 0$$

$$\frac{W}{L} = \frac{10}{1} \text{ per entrambi}$$

RICH:

a) Calcolo I

b) " I con $W/L = 20/1$

c) " I di a) con $\lambda = 0,01 V^{-1}$

NB: Quando k_m' non viene specificato allora è $100 \mu A/V^2$

a) suppongo $V_{TH} > 0$

$$V_{GS} = V_{GS} \leftarrow \text{da cosa viene?}$$

$\Rightarrow$ entrambi in saturazione

$$\text{Nel circuito } I_{D1} = I_{D2}$$

$$k_m = k_m' \frac{W}{L} = 100 \frac{10}{1} = 1000 \frac{\mu A}{V^2} = 1 mA/V^2$$

$$I_{D1} = \frac{k_m}{2} (V_{GS1} - V_{TH})^2 (1 + \lambda^0 V_{DS})$$

$$I_{D2} = \frac{k_m}{2} (V_{GS2} - V_{TH})^2$$

$$\frac{k_m}{2} (V_{GS1} - V_{TH})^2 = \frac{k_m}{2} (V_{GS2} - V_{TH})^2$$

$$V_{GS1} - V_{TH} = V_{GS2} - V_{TH} \Rightarrow \boxed{V_{GS1} = V_{GS2}}$$

$$V_{DD} = V_{DS1} + V_{DS2} = V_{GS1} + V_{GS2} = 2V_{GS} \Rightarrow V_{GS} = \frac{V_{DD}}{2} = 5V$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = 5V$$

$$V_{GS2} = 5V$$

Suppongo $V_{TH} = 0,75V$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{1}{2} \text{ mA/V}^2 (5 - 0,75)^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} (4,25)^2 = 9,03 \text{ mA}$$

b) $I_D = 2 \cdot I_{D1} = 9,03 \cdot 2 = 18,06 \text{ mA}$

c) $I_D = \frac{k_m}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) =$

$$= \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} (4,25)^2 (1 + 0,01 \cdot 5) = 10,83 \text{ mA}$$

Caratteristiche di Trasferimento e Transistori a Saturamento

4,36 $\mu\text{A/V}^2$

$$k_m = 250 \mu\text{A/V}^2$$

$$V_{TH} = -2V$$

$$\lambda = 0$$

$$V_{GS} = 5V$$

$$V_{DS} = 6V$$

a) Calcolo i_D

b) " id con $\lambda = 0,03V^{-1}$

a) Suppongo satur. $V_{DS} \gg (V_{GS} - V_{TH})$ verifico

$$6 \gg 5 + 2 \rightarrow 6 \gg 7 \text{ no!}$$

Suppongo Reg. lin $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH} \rightarrow 6 \leq 7$ sì Reg. lineare (risultato)

$$i_D = k_m \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} =$$

$$= 250 \cdot 10^{-6} (5 + 2 - 3) 6 = 6000 \mu\text{A} \approx 6 \text{ mA}$$

b) la Regione di Triodo è indipendente da λ ! Solo la saturazione dipende da λ