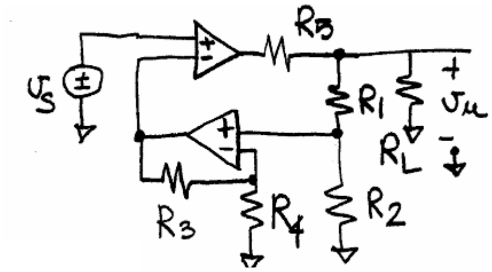
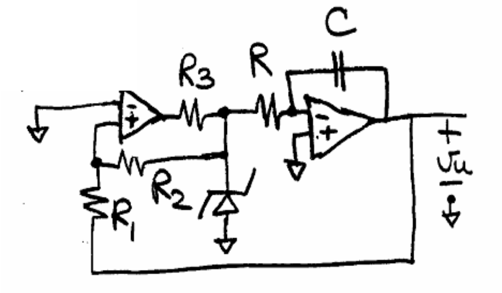
**Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni**
**12 gennaio 2010**

## Parte A

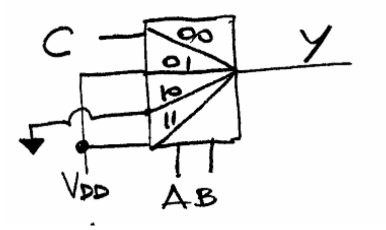
1. Calcolare la funzione di trasferimento e la resistenza di uscita del circuito in reazione mostrato a lato. Si supponga che i due amplificatori operazionali siano amplificatori di tensione ideali, con $A_v$=1000. Altri dati del problema $R_1$=1KΩ, $R_2$=2KΩ, $R_3$=3KΩ, $R_4$=4KΩ, $R_5$=5KΩ, $R_L$=500Ω.




2. Si realizzi il filtro che abbia uno zero nell'origine e due poli complessi coniugati di modulo $\omega_0$ = 6.28Krad/s, e fase ±2π/3. Ricavare la funzione di trasferimento del filtro e quotare tutti i componenti per ottenere le singolarità richieste.




3. Mostrare il funzionamento del circuito mostrato a lato, disegnando e quotando l'andamento delle tensioni all'uscita dei due operazionali. Giustificare il procedimento. [$R_1$=10KΩ, $R_2$=10KΩ, $R_3$=3KΩ, R=1KΩ, C=1μF, Vz=4.7V]




4. Disegnare e quotare la porta complessa CMOS che svolga la stessa funzione logica del circuito mostrato a lato.

*Punteggio totale Parte A: 14*

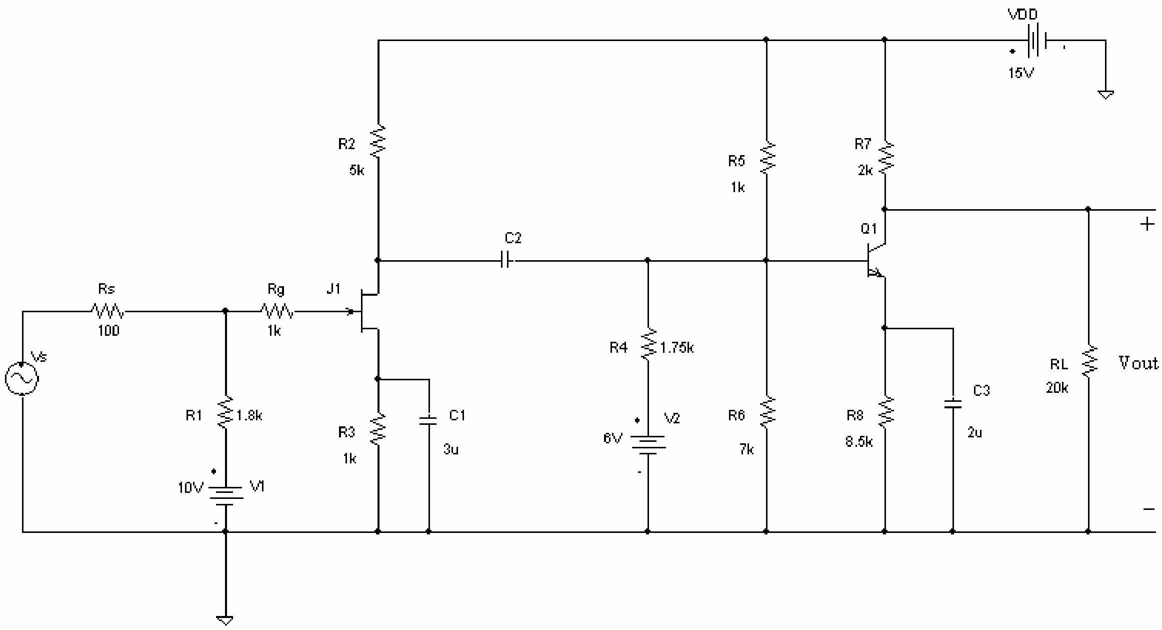
## Parte B

Dato l'amplificatore disegnato in figura, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori,
- l'amplificazione Vu/Vs a centrobanda,
- il limite superiore di banda e il limite inferiore di banda

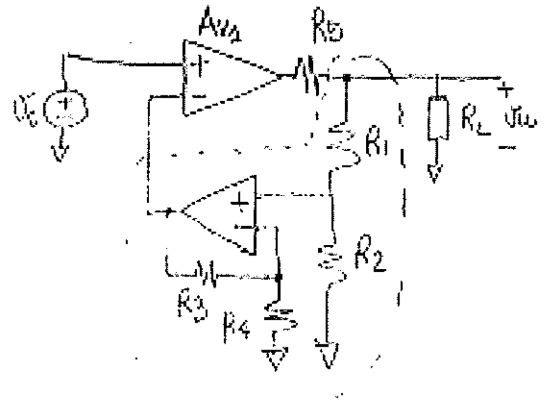
NOTE:

- Il BJT è un BC109B con hoe=0;
- Il JFET è un 2N3819 con rd → ∞.
- $C_2$ ha valore praticamente infinito.




*Punteggio totale Parte B: 14*

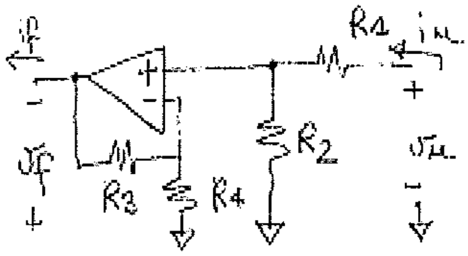
# Parte A
## Esercizio 1




$R_1 = 1K\Omega$
$R_2 = 2K\Omega$
$R_3 = 3K\Omega$
$R_4 = 4K\Omega$
$R_5 = 5K\Omega$
$R_L = 500\Omega$
$A_{V1} = 1000$

Prelievo di tensione e inserzione di tensione

Rete per $\beta$




$v_f = \beta v_u + R_{of} i_f$

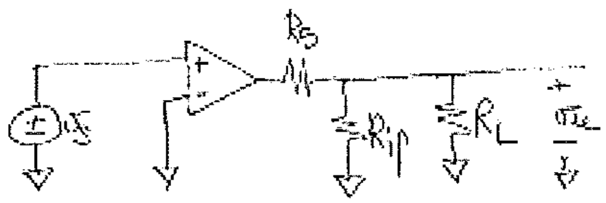
$i_u = \frac{v_u}{R_{o\beta}} + K_{\beta} i_f$

$$\beta = \frac{v_f}{v_u}\bigg|_{i_f=0} = \frac{R_2}{R_1+R_2}\left(1+\frac{R_3}{R_4}\right) = \frac{2}{3}\left(1+\frac{3}{4}\right) = \frac{7}{6} \simeq 1.17$$

$$R_{of} = \frac{v_f}{i_f}\bigg|_{v_u=0} = 0$$

$$R_{if} = \frac{v_u}{i_u}\bigg|_{i_f=0} = R_1 + R_2 = 3K\Omega$$

Rete per $A_e$




$$A_e = \frac{v_u}{v_S} = A_{V1}\frac{R_L /\!/ R_{if}}{R_L /\!/ R_{if} + R_5} = \frac{428.6 \cdot 10^3}{428.6 + 5000} = 78.9$$

$$A_F = \frac{A_e}{1-\beta A_e} = 0.846$$

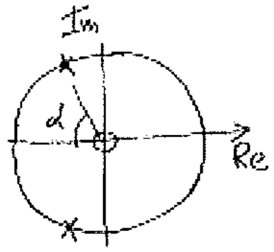
Resistenza di uscita

$$A_{eo} = A_{v1} \frac{R_{if}}{R_{if}+R_5} = 10^3 \cdot \frac{3}{8} = 375$$

$R_L$ rimosso

$$R_{OF} = \frac{(R_{if} // R_5)}{1 - \beta A_e} = \frac{1.875}{439.75} = 4.26\ \Omega$$

# ESERCIZIO 2




$\alpha = \pi/3$

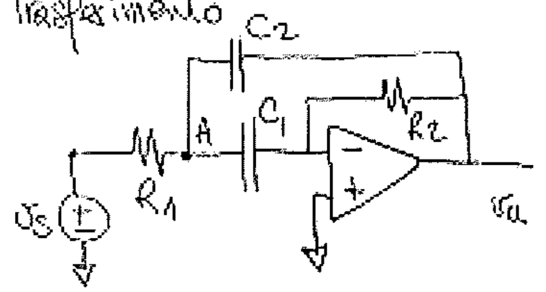
il filtro che vogliamo ottenere è un passabanda

$$H(s) = \frac{H_{CB} \frac{s}{\omega_0 Q}}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{s}{\omega_0 Q} + 1}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = 2\cos\alpha\,\omega_0 \rightarrow Q = \frac{1}{2\cos\alpha} = 1$$

$$\omega_0 = 6.28 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

Usiamo un filtro passabanda e ricaviamo la funzione di trasferimento




$$v_u = -R_2 C_1 s\, v_A$$

$$v_A \left( \frac{1}{R_1} + C_1 s + C_2 s \right) - \frac{v_S}{R_1} - C_2 s\, v_u = 0$$

$$v_u\left(1+R_1C_1 s + R_1C_2 s\right) + R_2C_1 s\, v_s + R_1R_2C_1C_2 s^2 v_u = 0$$

$$\frac{v_u}{v_s} = \frac{-R_2C_1 s}{R_1R_2C_1C_2 s^2 + \left(R_1C_1 + R_1C_2\right)s + 1}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{R_1(C_1+C_2)} \rightarrow Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{R_1(C_1+C_2)}$$

poniamo $C_1 = C_2 = C$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1R_2C^2} \qquad Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

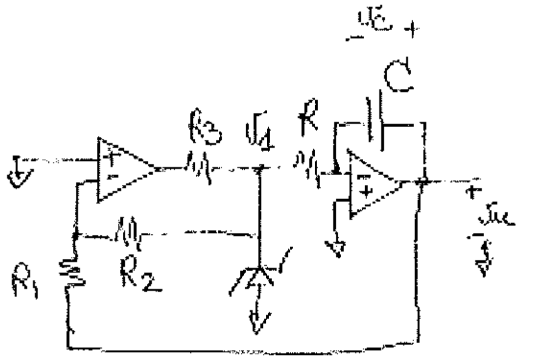
se vogliamo $Q = 1 \Rightarrow R_2 = 4R_1$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{4R_1^2C^2} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{2R_1C}$$

poniamo $R_1 = 1\,k\Omega \rightarrow C = \frac{1}{2R_1\omega_0} = 79{,}6\ nF$

$\Rightarrow R_2 = 4\,k\Omega$

# ESERCIZIO 3




$R_1 = 10 K\Omega$

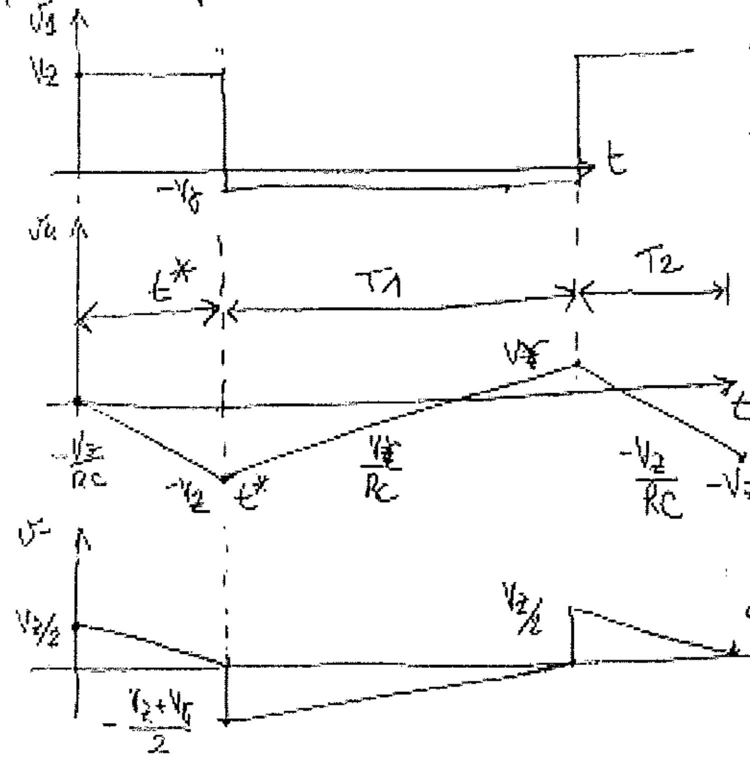
$R_2 = 10 K\Omega$

$R_3 = 3 K\Omega$

$R = 1 K\Omega$ $\qquad RC = 10^{-3}$ s

$C = 1 \mu F$

poniamo che per $t=0$ $v_C = v_u = 0$, e $v_1 = V_Z$




per $t>0$

$$\frac{dv_u}{dt} = -\frac{1}{RC} V_Z$$

$$v^- = \frac{v_1 + v_u}{2}$$

quando $v^- = 0$ si ha la commutazione (cioè per $v_u = -V_Z$)

se $v_1 = -V_\gamma$

$$\dots \frac{dv_u}{dt} = \frac{V_\gamma}{RC}$$

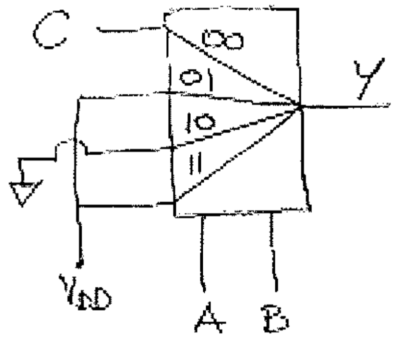
[nuova commutazione per $v_u = V_\gamma$]

$$T_1 = \frac{V_Z + V_\gamma}{V_\gamma / RC} = RC \frac{V_Z + V_\gamma}{V_\gamma} = 10^{-3} \frac{5.4}{0.7} = 7,7 \text{ ms}$$

$$T_2 = \frac{V_\gamma + V_Z}{V_Z / RC} = RC \frac{V_Z + V_\gamma}{V_Z} = 10^{-3} \frac{5.4}{4.7} = 1.15 \text{ ms}$$

$$t^* = \frac{V_Z}{V_Z} RC = \underline{1 \text{ms}}$$

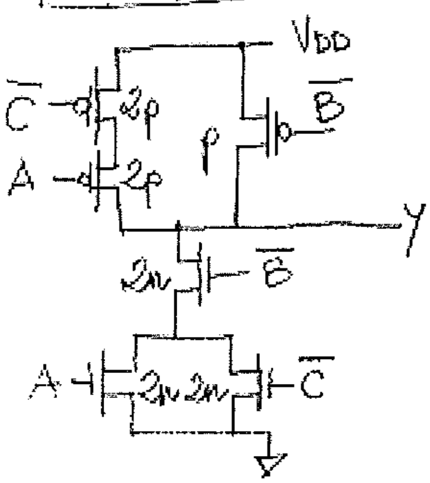
# ESERCIZIO 4




$$Y = C\bar{A}\bar{B} + \bar{A}B + AB =$$
$$= C\bar{A}\bar{B} + B$$

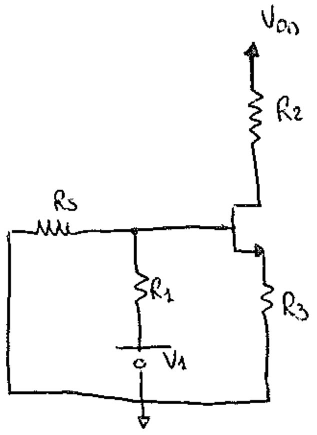
| C \ AB | 00 | 01 | 11 | 10 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

$$Y = C\bar{A} + B$$



# PARTE B

## PUNTO DI RIPOSO JFET




$$V_G = \frac{R_5}{R_1 + R_5} \cdot V_1 = 0.526\,V$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_3 \cdot I_{DS} \Rightarrow I_{DS} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_3}$$

$$\begin{cases} V_{GS1} = 0 \Rightarrow I_{DS1} = 0.526\,mA \\ V_{GS2} = -3V \Rightarrow I_{DS2} = 3.526\,mA \end{cases}$$

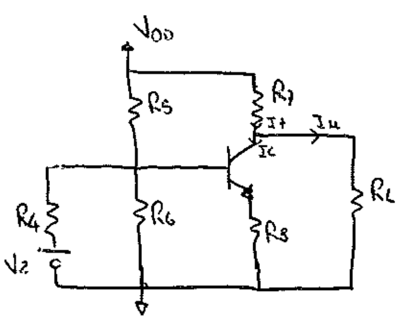
Tracciando la retta sulle caratteristiche si ottiene: $V_{GS} = -1.7\,V$ ; $I_{DS} = 2.226\,mA$

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_2 + R_3) \cdot I_{DS} = 1.644\,V$$

VERIFICA HP. JFET IN SATURAZIONE: $V_{GS} > V_{GSoff} = -3V$ OK

$V_{DS} > V_{GS} - V_{GSoff} = 1.3V$ OK

## PUNTO DI RIPOSO BJT




Hp. PARTITORE PESANTE E SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

$$V_B = V_{B1} + V_{B2}$$

$$V_{B1} = \frac{R_6 // R_5}{R_4 + R_6 // R_5} \cdot V_2 = 2V$$

$$V_{B2} = \frac{R_4 // R_6}{R_4 // R_6 + R_5} \cdot V_{DD} = 8.75\,V$$

$$V_B = V_{B1} + V_{B2} = 10.75\,V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = V_B - V_\gamma \cong 10.05\,V$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_E}{R_8} \cong 1.18\,mA$$

$$\begin{cases} I_C + I_u = I_7 \\ I_7 = \dfrac{V_{DD} - V_C}{R_7} \\ I_u = \dfrac{V_C}{R_L} \end{cases}$$

$$I_C + \frac{V_C}{R_L} = \frac{V_{DD} - V_C}{R_7}$$

$$R_L R_7 I_C + R_7 V_C = R_L V_{DD} - R_L V_C$$

$$V_C = \frac{R_L V_{DD} - R_L R_7 I_C}{R_7 + R_L} \cong 11.5\,V$$

$$I_7 = \frac{V_{DD} - V_C}{R_7} \cong 1.75\,mA$$

$$I_u = \frac{V_C}{R_L} \cong 0.57\,mA$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \cong 1.45\,V$$

VERIFICA HP. PARTITORE PESANTE

$$h_{FE\,typ} = 290$$

$$I_{R5} = \frac{V_{DD} - V_B}{R_5} = 4.25\,mA$$

$$I_{R4} = \frac{V_B - V_2}{R_4} = 2.71\,mA$$

$$I_{R6} = \frac{V_B}{R_6} = 1.54\,mA$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \cong 4\,\mu A$$

$I_B \ll I_{R4}, I_{R5}, I_{R6}$ OK

CALCOLO DEI PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE DEL JFET

$g_m \cong 3.5 mS$

$C_{iss} \cong 3 pF$

$C_{rss} \cong 1.5 pF$

$C_{GD} = C_{rss} \cong 1.5 pF$

$C_{GS} = C_{iss} - C_{rss} \cong 1.5 pF$

CALCOLO DEI PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE DEL BJT

$h_{fe} = 300$

$h_{ie} @ 2mA = 4.8 k\Omega$

$$r_{b'e} @ 2mA = \frac{V_T \cdot h_{fe}}{I_C @ 2mA} = 3.9 \; k\Omega$$

$r_{bb'} = h_{ie} - r_{b'e} = 900 \Omega$

$$h_{ie} = r_{b'e} + r_{bb'} = \frac{V_T \cdot h_{fe}}{I_C} + r_{bb'} \cong 7.51 \; k\Omega$$

$f_T \cong 130 \; MHz$

$$g_m^{BJT} = \frac{I_C}{V_T} \cong 45.38 \; mS$$

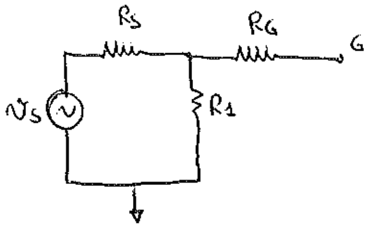
$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = V_{CE} - V_\gamma = 0.75 V$

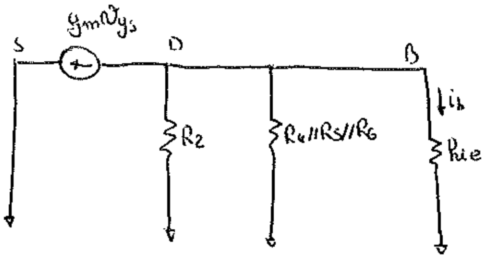
$C_{b'c} \cong 7.5 pF$

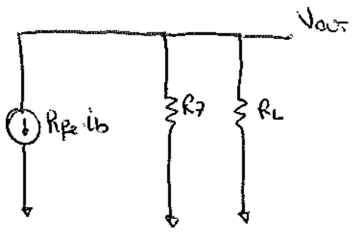
$$C_{b'e} = \frac{g_m^{BJT}}{2\pi f_T} - C_{b'c} \cong 48.1 \; pF$$

GUADAGNO A CENTRO BANDA






$$v_{out} = - R_L // R_7 \cdot h_{fe} \cdot i_b$$

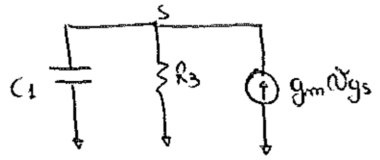
$$i_b = - g_m v_{gs} \frac{R_2 // R_4 // R_5 // R_6}{h_{ie} + R_2 // R_4 // R_5 // R_6}$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = v_g$$

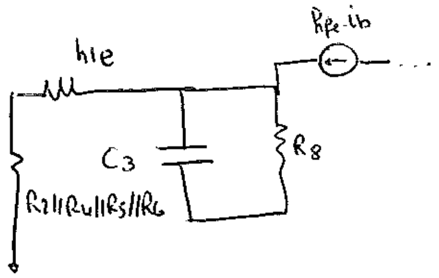
$$v_g = \frac{R_1}{R_1 + R_S} \cdot v_s$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_s} = R_L // R_7 \cdot h_{fe} \cdot g_m \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_S} \cdot \frac{R_2 // R_4 // R_5 // R_6}{h_{ie} + R_2 // R_4 // R_5 // R_6} \cong 118$$

## LIMITE INFERIORE DI BANDA



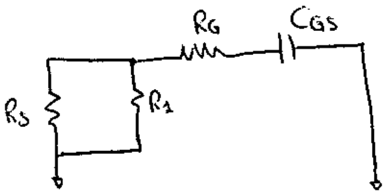

$$R_{VC_1}\Big|_{C_3\ \text{corto}} = R_3 // \frac{1}{g_m} \cong 0.222\ k\Omega$$



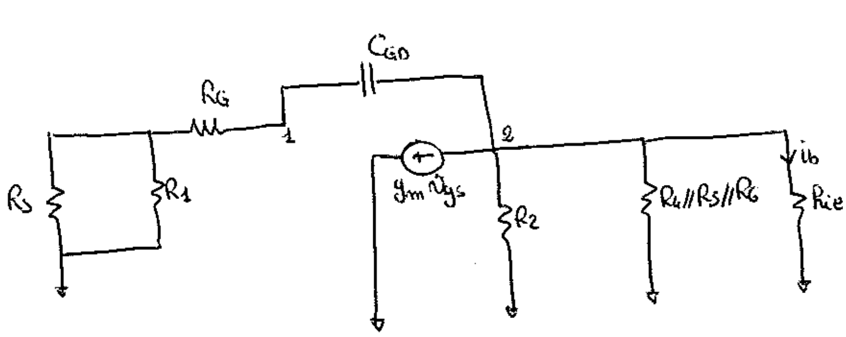

$$R_{VC_3}\Big|_{C_1\ \text{corto}} = R_8 // \left[\frac{h_{ie} + R_2//R_4//R_5//R_6}{h_{fe}+1}\right] \cong 26.5\,\Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{C_1 \cdot R_{VC_1}} + \frac{1}{C_3 R_{VC_3}}\right] \cong 3.24\,KHz$$

## LIMITE SUPERIORE DI BANDA




$$R_{VC_{GS}} = R_G + (R_S // R_1) \cong 1.09\ k\Omega$$



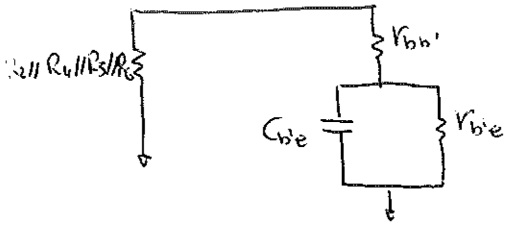

$$R_{VC_{GD}} = R_{IN}\ (1 + |A_V|) + R_{OUT}$$

$$R_{IN} = R_{VC_{GS}} = 1.09\ k\Omega$$

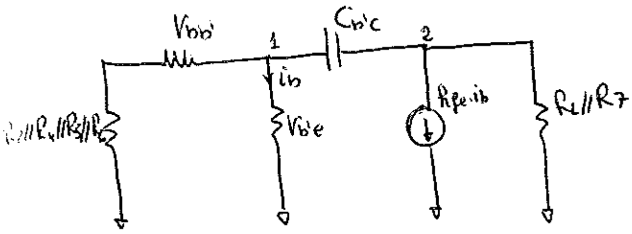
$$R_{OUT} = R_2 // R_4 // R_5 // R_6 // h_{ie} \cong 488\,\Omega$$

$$A_V = \frac{V_2}{V_1} = -\frac{R_{OUT}\, g_m v_{gs}}{v_{gs}} = -R_{OUT}\, g_m$$

$$R_{VC_{GD}} = R_{IN}\ (1 + R_{OUT}\, g_m) + R_{OUT} \cong 3.44\ k\Omega$$




$$R_{V_{C_{b'e}}} = r_{b'e} \,//\, \left[ r_{bb'} + R_2//R_4//R_5//R_6 \right] \cong 1.17\,k\Omega$$




$$R_{V_{C_{b'c}}} = R_{IN}\left(1+|A_V|\right) + R_{OUT}$$

$$R_{IN} = R_{V_{C_{b'e}}} = 1.17\,k\Omega$$

$$R_{OUT} = R_L//R_7 = 1.82\,k\Omega$$

$$A_V = \frac{V_2}{V_1} = -\frac{h_{fe}\, i_b \cdot R_L//R_7}{r_{b'e}\cdot i_b} =$$

$$= -g_m^{BJT}\left(R_L//R_7\right) = -g_m^{BJT} R_{OUT} \cong 82.6$$

$$R_{V_{C_{b'c}}} \cong 99.63\,k\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\left[ C_{GS}\cdot R_{V_{C_{GS}}} + C_{GD}\cdot R_{V_{C_{GD}}} + C_{b'e}\cdot R_{V_{C_{b'e}}} + C_{b'c}\cdot R_{V_{C_{b'c}}} \right]} \cong 196\,kHz$$