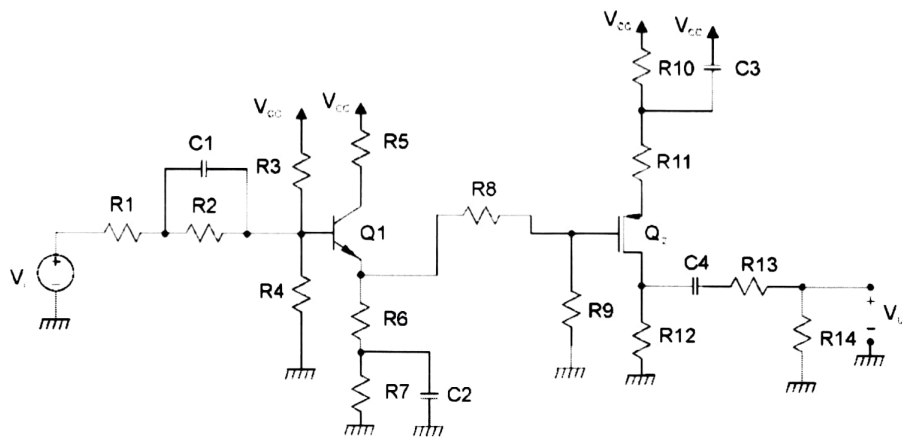


ELETTRONICA DIGITALE

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 12 giugno 2023

Esercizio A



$R1 = 100 \, \Omega$	$R2 = 499.9 \, \text{k}\Omega$	$R4 = 500 \, \text{k}\Omega$	$R5 = 1.5 \, \text{k}\Omega$	$R6 = 1 \, \text{k}\Omega$	$R7 = 9 \, \text{k}\Omega$	$R8 = 500 \, \Omega$
$R9 = 9.5 \, \text{k}\Omega$	$R10 = 900 \, \Omega$	$R11 = 100 \, \Omega$	$R12 = 2 \, \text{k}\Omega$	$R13 = 100 \, \Omega$	$R14 = 9.9 \, \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 18 \, \text{V}$

Q1 è un transistor BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe} = 0$; Q2 è un transistor MOS a canale p resistivo con $V_{T1} = -1 \, \text{V}$ e la corrente di drain in saturazione è data da $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ con $k = 0.5 \, \text{mA/V}^2$.

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R3 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul drain di Q2 sia 9 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di Q2.
- 2) Determinare l'espressione e il valore di V_U/V_i alle frequenze per le quali C1, C2, C3 e C4 possono essere considerati dei corto circuiti.

Esercizio B

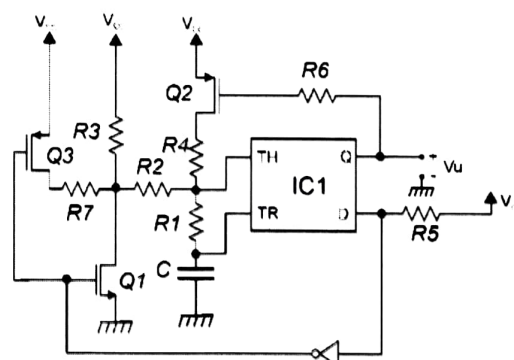
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

$$Y = \bar{A}(B + \bar{C}\bar{D}) + \bar{B}CD$$

Determinare il numero dei transistori necessari e disegnarne lo schema completo. Dimensionare inoltre il rapporto (W/L) di tutti i transistori, assumendo, per l'inverter di base, W/L pari a 2 per il MOS a canale n e pari a 5 per quello a canale p. Si specifichino i dettagli della procedura di dimensionamento dei transistori.

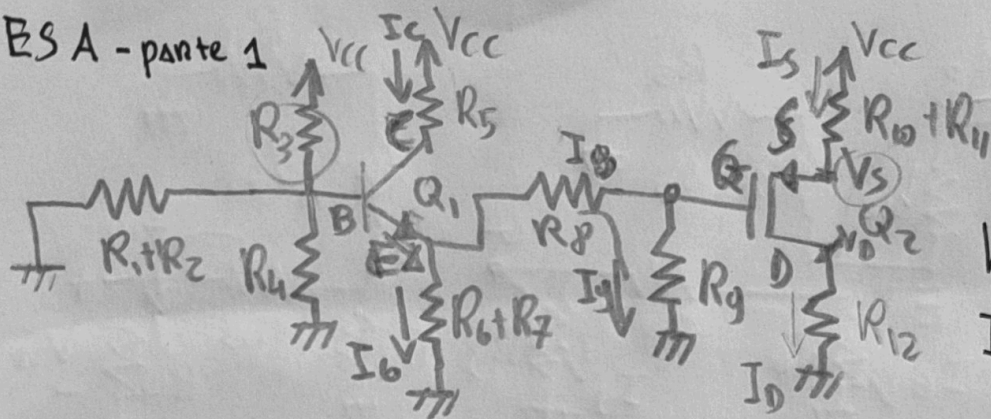
Esercizio C

$R1 = 500 \, \Omega$	$R6 = 1 \, \text{k}\Omega$
$R2 = 100 \, \Omega$	$R7 = 1.8 \, \text{k}\Omega$
$R3 = 1.8 \, \text{k}\Omega$	$C = 100 \, \text{nF}$
$R4 = 900 \, \Omega$	$V_{CC} = 6 \, \text{V}$
$R5 = 1 \, \text{k}\Omega$	



Il circuito IC1 è un NE555 alimentato a $V_{CC} = 6 \, \text{V}$; Q1 ha $R_{on} = 0$ e $V_{Tn} = 1 \, \text{V}$; Q2 e Q3 hanno $R_{on} = 0$ e $V_{Tp} = -1 \, \text{V}$; l'inverter è ideale. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

ESA - parte 1



$$V_D = 9V$$

$$I_D = \frac{V_D}{R_{12}} = 4,5mA$$

hp: Q2 in saturazione

$$I_G = 0A, I_D = I_S$$

$$V_S = V_{CC} - I_S(R_{10} + R_{11}) = 13,5V \quad I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}} \rightarrow \text{scelgo la soluzione negativa perche' deve risultare } V_{GS} < V_T$$

$$V_{GS} = -4V \quad V_{GS} = V_G - V_S \rightarrow V_G = V_{GS} + V_S = 9,5V \quad V_{DS} = V_D - V_S = -4,5$$

$$\text{Verifica della saturazione: } V_{DS} < V_{GS} - V_T \rightarrow -4,5V < -4V - (-1)V \rightarrow -4,5 < -3 \quad \text{OK verifica saturazione}$$

$$I_G = \frac{V_G}{R_9} = 1mA \quad I_G = 0 \Rightarrow I_S = I_D \quad V_E = V_G + R_8 I_S = 10V \quad I_E = \frac{V_E}{R_6 + R_7} = 1mA$$

$$I_E = I_6 + I_7 = 2mA \quad \text{hp: } Q_1 \text{ ON} \rightarrow I_B \ll I_E, I_E \approx I_C = 2mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_5 = 15 \quad V_{CE} = V_C - V_E = 5V \rightarrow h_{ie} = 4,8K\Omega \quad h_{fe} = 300 \quad h_{FE} = 290$$

$$\text{Verifica hp su } Q_1: I_B \ll I_E \rightarrow I_B = \frac{I_E}{h_{FE}} = 6,89\mu A \quad \text{OK verifica}$$

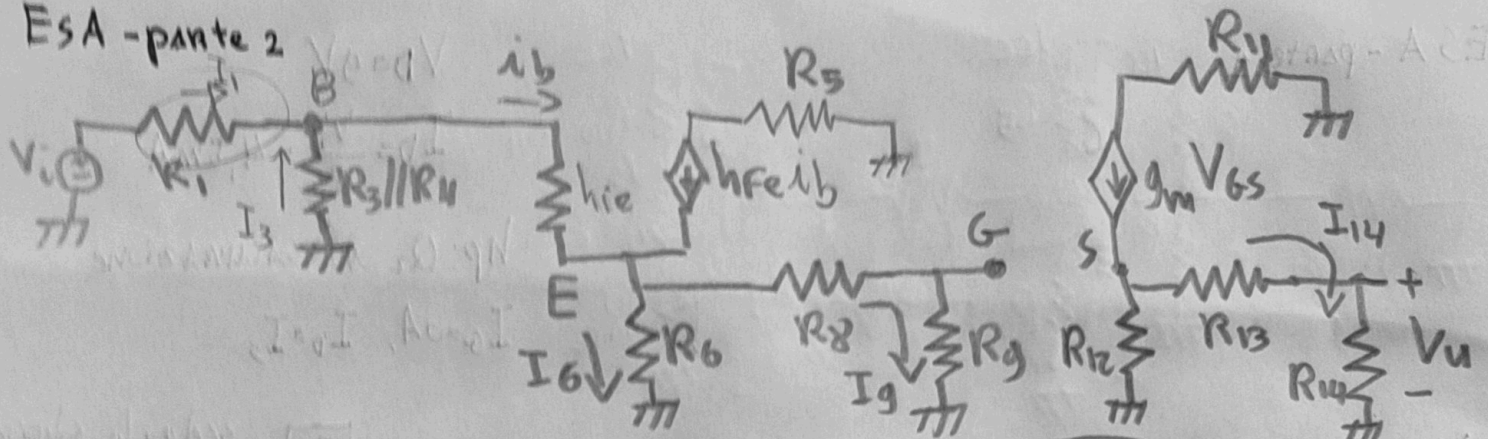
$$V_B = V_E + V_{BE} = 10,7V \quad V_B = V_{CC} \frac{[(R_1 + R_2) // R_4]}{[(R_1 + R_2) // R_4] + R_3} \rightarrow V_B (R_{eq} + R_3) = V_{CC} R_{eq}$$

$$R_{eq} = 250K\Omega$$

$$\rightarrow R_3 = \frac{V_{CC} R_{eq}}{V_B} - R_{eq} = 170560,75\Omega$$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 5mA/V$$

ESA - parte 2



$$V_u = R_{14} I_{14} \quad I_{14} = g_m V_{GS} \quad V_S = g_m V_{GS} \frac{(R_{12} + R_{13} + R_{14}) \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}} \rightarrow R_{eq}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - g_m V_{GS} R_{eq} \rightarrow V_{GS} = \frac{V_G}{1 + g_m R_{eq}} \quad V_G = R_9 I_9$$

$$I_9 = (i_b + h_{fe} i_b) \frac{R_6}{R_6 + R_8 + R_9} = i_b (1 + h_{fe}) \frac{R_6}{R_6 + R_8 + R_9} \quad i_b = I_1 + I_3$$

$$V_B = i_b h_{ie} + V_E \quad I_3 = \frac{V_B}{R_3 // R_4} \quad I_1 = \frac{V_i - V_B}{R_1} \rightarrow V_B = i_b h_{ie} + V_E \quad V_E = I_6 R_6$$

$$I_6 = i_b (1 + h_{fe}) \frac{R_8 + R_9}{R_6 + R_8 + R_9} \rightarrow V_E = i_b (1 + h_{fe}) \frac{(R_8 + R_9) R_6}{R_6 + R_8 + R_9} \rightarrow R_{eq2}$$

$$V_B = i_b h_{ie} + i_b (1 + h_{fe}) \frac{(R_8 + R_9) R_6}{R_6 + R_8 + R_9} = i_b \left(h_{ie} + (1 + h_{fe}) \frac{(R_8 + R_9) R_6}{R_6 + R_8 + R_9} \right)$$

$$i_b = \frac{i_b R_{eq2}}{R_3 // R_4} + \frac{V_i - i_b R_{eq2}}{R_1} \rightarrow i_b \left(1 - \frac{R_{eq2}}{R_3 // R_4} \right) = \frac{V_i}{R_1} - \frac{i_b R_{eq2}}{R_1} \rightarrow i_b \left(1 - \frac{R_{eq2}}{R_3 // R_4} + \frac{R_{eq2}}{R_1} \right) = \frac{V_i}{R_1}$$

$$\rightarrow i_b = V_i \cdot \frac{1}{R_1 \left(1 - \frac{R_{eq2}}{R_3 // R_4} \right) + R_{eq2}} \quad R_{eq} = 166467 \Omega \quad R_{eq2} = 278436,36 \Omega$$

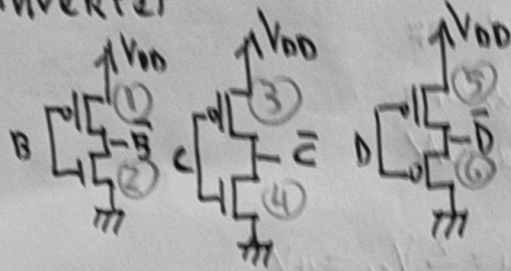
$$R_3 // R_4 = 127177,7016$$

$$\frac{V_u}{V_i} = R_{14} \cdot g_m \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}} \cdot \frac{1}{1 + g_m R_{eq}} \cdot \frac{R_9 (1 + h_{fe}) R_6}{R_6 + R_8 + R_9} \cdot \frac{1}{R_1 \left(1 - \frac{R_{eq2}}{R_3 // R_4} \right) + R_{eq2}} = 0,8254$$

$0,005$ $0,1667$ $0,1071$ $253954,5455$ $9,593 \cdot 10^{-6}$

Es 2 $Y = \bar{A}(B + \bar{C}\bar{D}) + \bar{B}CD$ # MOS = $7 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 20$

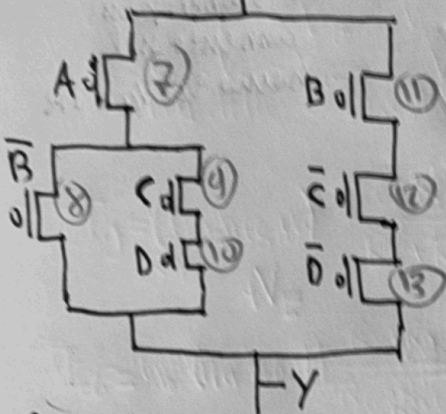
Inverter



$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3,5} = p = 5$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{2,4,6} = n = 2$$

Pull-up



Percorsi da 3

7-9-10 \rightarrow OK, possibili $\left(\frac{W}{L}\right)_{7,9,10,11,12,13} = a$
11-12-13

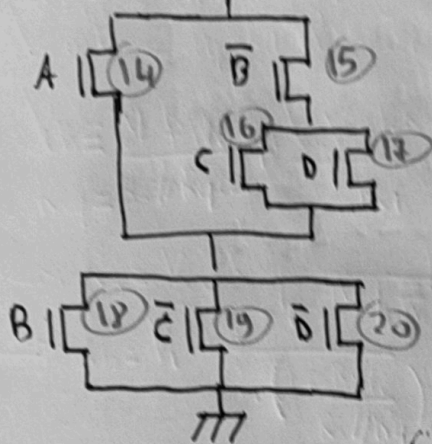
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{1}{p} \rightarrow \frac{3}{a} = \frac{1}{p} \rightarrow \frac{a}{3} = p \rightarrow a = 3p = 15$$

Percorsi da 2

7-8 \rightarrow 7 già dimensionato $\left(\frac{W}{L}\right)_8 = b$

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{3p} = \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{b} = \frac{3}{3p} - \frac{1}{3p} \rightarrow \frac{1}{b} = \frac{2}{3p} \rightarrow b = \frac{3}{2}p = \frac{15}{2} = 7.5$$

Pull down



Percorsi da 3

15-16-17 \rightarrow IMPOSSIBILE, B e \bar{B} sullo stesso percorso

15-16-18 \rightarrow IMPOSSIBILE, C e \bar{C} sullo stesso percorso

15-16-20 \rightarrow possibile

15-17-18 \rightarrow IMPOSSIBILE, B e \bar{B} sullo stesso percorso

15-17-20 \rightarrow possibile

15-18-20 \rightarrow IMPOSSIBILE, D e \bar{D} sullo stesso percorso

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{15,16,17,18,19,20} = c \quad \frac{1}{c} + \frac{1}{c} + \frac{1}{c} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{3}{c} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{c}{3} = n \rightarrow c = 3n = 6$$

Percorsi da 2

14-18 \rightarrow possibile

14-19 \rightarrow 19 e 20 già dimensionati

14-20 \rightarrow dimensionati

Opzione A: dimensiono prima 14-18 e poi verifico 14-19 e 14-20

Opzione B: dimensiono prima 14 con 14-19, e poi 18 con 14-18

Opzione A: $\left(\frac{W}{L}\right)_{14,18} = d \rightarrow \frac{1}{d} + \frac{1}{d} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{2}{d} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{d}{2} = n \rightarrow d = 2n = 4$ Area totale: $4 \cdot 2 = 8$

14-19 $\rightarrow \frac{1}{2n} + \frac{1}{3n} < \frac{1}{n} \rightarrow \frac{2+3}{6n} < \frac{1}{n} \rightarrow \frac{5}{6n} < \frac{1}{n} \rightarrow \frac{5}{6} < 1$ OK verificato

Opzione B: $\left(\frac{W}{L}\right)_{14} = e \rightarrow \frac{1}{e} + \frac{1}{3n} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{1}{e} = \frac{3}{3n} - \frac{1}{3n} \rightarrow \frac{1}{e} = \frac{2}{3n} \rightarrow e = \frac{3}{2}n = 3$

14-18, con 14 dimensionato $\rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_{18} = f \quad \frac{1}{f} + \frac{2}{3n} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{3}{3n} - \frac{2}{3n} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{3n} \rightarrow f = 3n = 6$

Scelgo l'opzione A perché è quella ad area minore [8 < 9]

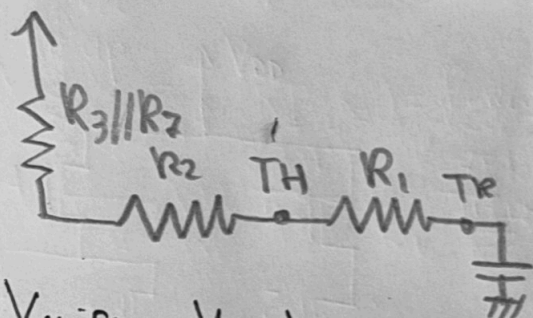
Esercizio C

Fase 1 : $Q = 1, \bar{Q} = 0, D = HI$

$$Q_1: V_{G1} = 0V, V_{S1} = 0V, V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = 0V < V_{T1} = 1V \rightarrow Q_1 \text{ OFF}$$

$$Q_2: V_{G2} = V_{CC}, V_{S2} = V_{CC}, V_{GS2} = V_{G2} - V_{S2} = 0V > V_{T2} = -1V \rightarrow Q_2 \text{ OFF}$$

$$Q_3: V_{G3} = 0V, V_{S3} = V_{CC}, V_{GS3} = V_{G3} - V_{S3} = -6V < V_{T3} = -1V \rightarrow Q_3 \text{ ON}$$



$$V_{i1} = \frac{V_{CC}}{3} = 2V$$

$$V_{th} = \frac{2}{3}V_{CC} = 4V$$

$$V_{COM1} = V_{TH} - R_1 I_1$$

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{th}}{(R_3 // R_2) + R_2} = 2mA$$

$$V_{COM1} = 3V$$

$$V_F = V_{CC} = 6V \text{ perché non sono connesse nel network } V_{CC} \text{ e } TR$$

$$\text{Verifica: } V_{i1} < V_{COM1} < V_F \rightarrow 2V < 3V < 6V \rightarrow OK$$

$$R_V = (R_3 // R_2) + R_2 + R_1 = 1500 \Omega$$

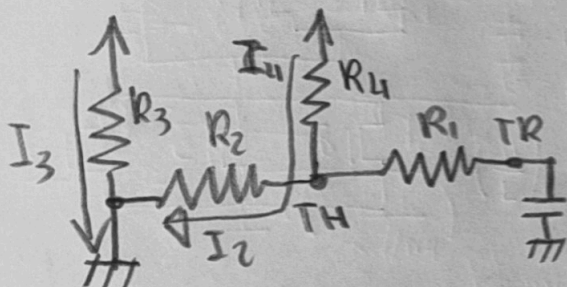
$$\tau_1 = C \cdot R_V = 150 \mu s \quad T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{i1} - V_F}{V_{COM1} - V_F} \right) = 43,152 \mu s$$

Fase 2 : $Q = 0, \bar{Q} = 1, D = 0$

$$Q_1: V_{G1} = V_{CC}, V_{S1} = 0V \rightarrow V_{GS1} = V_{CC} = 6V > V_{T1} = 1V \rightarrow Q_1 \text{ ON}$$

$$Q_2: V_{G2} = 0V, V_{S2} = V_{CC} \rightarrow V_{GS2} = -6V < V_{T2} = -1V \rightarrow Q_2 \text{ ON}$$

$$Q_3: V_{G3} = V_{CC}, V_{S3} = V_{CC} \rightarrow V_{GS3} = 0V > V_{T3} = -1V \rightarrow Q_3 \text{ OFF}$$



$$V_{i2} = V_{COM1} = 3V$$

La corrente di I_3 finisce tutta a ground; $I_1 = 0$ perché il condensatore è unico $\rightarrow I_4 = I_2$

$$V_{COM2} = V_{i2} = 2V$$

$$I_4 = \frac{V_{CC}}{R_4 + R_2} = 6mA$$

$$V_F = V_{CC} - R_4 I_4 = 0.6V$$

$$\text{Verifica: } V_{i2} > V_{COM2} > V_F \rightarrow 3V > 2V > 0.6V \rightarrow OK \quad R_V = (R_2 // R_4) + R_1 = 590 \Omega$$

$$\tau_2 = C \cdot R_V = 59 \mu s \quad T_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{i2} - V_F}{V_{COM2} - V_F} \right) = 31,8 \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 74,952 \mu s \quad F = \frac{1}{T} = 13341,731 \text{ Hz}$$