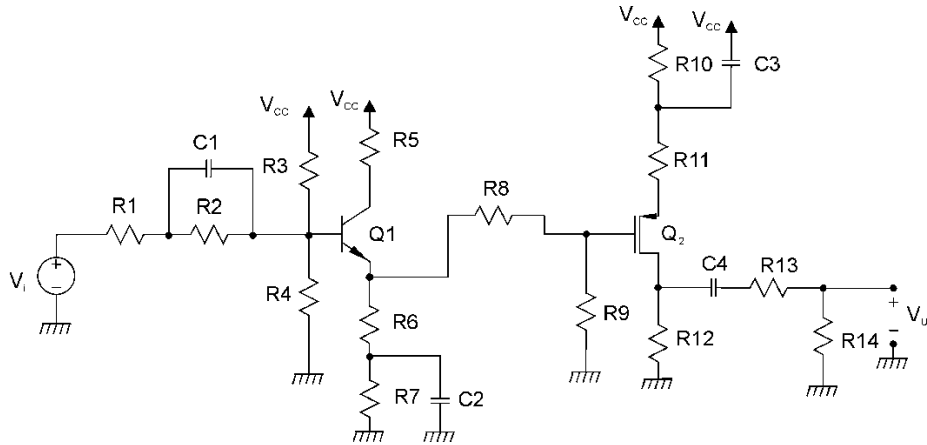


ELETTRONICA DIGITALE

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

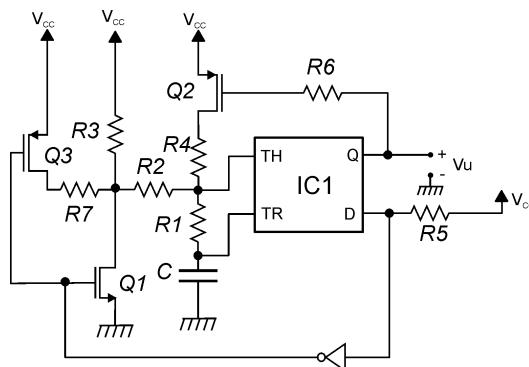
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

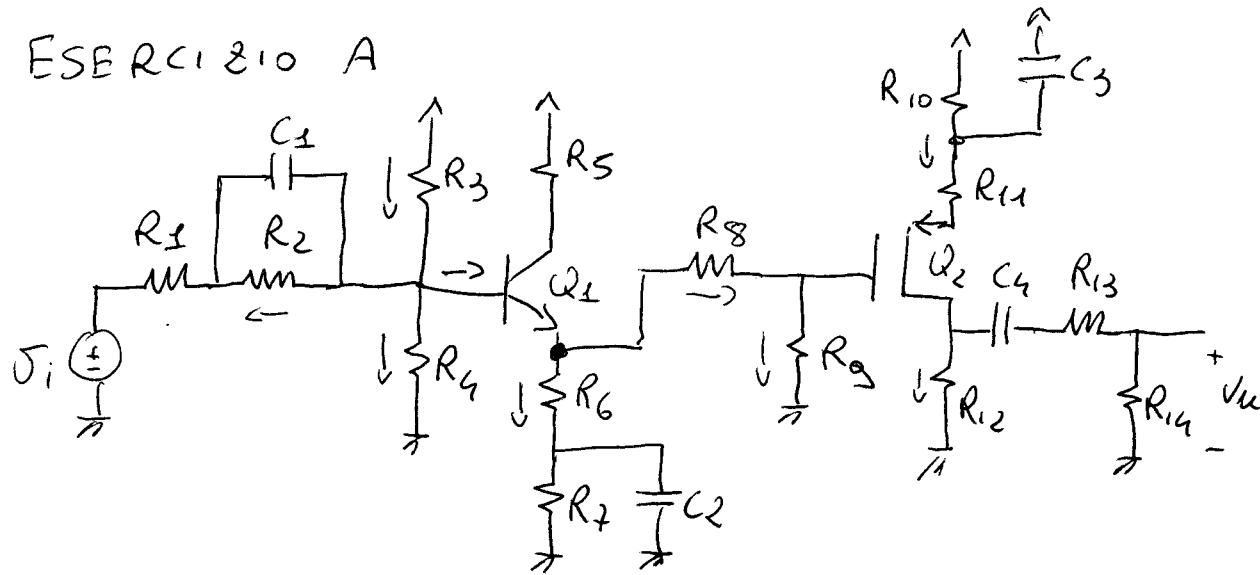
Esercizio C

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



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.

ESERCIZIO A



- $R_1 = 100 \Omega$
- $R_2 = 499.9 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 500 \text{ k}\Omega$
- $R_4 = 1.5 \text{ k}\Omega$
- $R_5 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_6 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_7 = 9 \text{ k}\Omega$
- $R_8 = 500 \Omega$
- $R_9 = 9.5 \text{ k}\Omega$
- $R_{10} = 900 \Omega$
- $R_{11} = 100 \Omega$
- $R_{12} = 2 \text{ k}\Omega$
- $R_{13} = 100 \Omega$
- $R_{14} = 9.9 \text{ k}\Omega$
- $V_{CC} = 18 \text{ V}$

1) DETERMINARE R_3 PER $V_D = 9 \text{ V}$

$$I_{S2} = I_D = \frac{V_D}{R_{12}} = 4.5 \text{ mA}$$

$$I_G = 0 \Rightarrow I_S = I_D$$

$$V_S = V_{CC} - (R_{10} + R_{11}) I_D = 13.5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = -4.5 \text{ V}$$

$$\text{hp: } Q_2 \text{ SATURO} \Rightarrow I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}}$$

POICHE' UN PROS CONDUCE PER $V_{GS} \leq V_T$ SCEGLIARO LA SOLUZIONE "-"

$$V_{GS} = V_T - \sqrt{\frac{I_D}{K}} = -1 - 3 = -4 \text{ V}$$

$$\text{VERIFICA SATURAZIONE: } V_{DS} \stackrel{?}{\leq} (V_{GS} - V_T)$$

$$-4.5 \text{ V} < [-1 - (-1)] = -3 \text{ V} \quad \text{VERIFICA OK}$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = -4 + 13.5 = 9.5 \text{ V}$$

$$g_m = 2K |V_{GS} - V_T| = 3 \text{ mA/V}$$

$$I_g = \frac{V_G}{R_9} = 1 \text{ mA}$$

$$I_G = 0 \Rightarrow I_8 = I_g = 1 \text{ mA}$$

$$V_E = R_8 I_8 + V_G = 10 \text{ V}$$

(2)

$$I_6 = \frac{V_E}{R_6 + R_7} = 1 \text{ mA}$$

$$I_E = I_6 + I_8 = 2 \text{ mA}$$

hp: Q_1 in zona ATTIVA DIRETTA $\Rightarrow I_B \ll I_C \Rightarrow I_E \approx I_C = 2 \text{ mA}$

$$V_C = V_{CC} - R_5 I_C = 15 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 5 \text{ V}$$

SIAMO NEL PUNTO DI LAVORO $I_C = 2 \text{ mA}$ e $V_{CE} = 5 \text{ V}$ PER IL QUALE IL COSTRUTTORE CI FORNISCE I SEGUENTI VALORI: $h_{FE} = 290$, $h_{ie} = 4800 \Omega$ e

$$h_{fe} = 300$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 6.89655 \mu\text{A}$$

VERIFICA hp 2.A.D. : $V_{CE} \stackrel{?}{\geq} V_{CE\text{SAT}}$

$$5 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

$$V_{BE} = V_f = 0.7 \text{ V}$$

$$V_B = V_E + V_f = 10.7 \text{ V}$$

$$I_4 = \frac{V_B}{R_4} = 21.4 \mu\text{A}$$

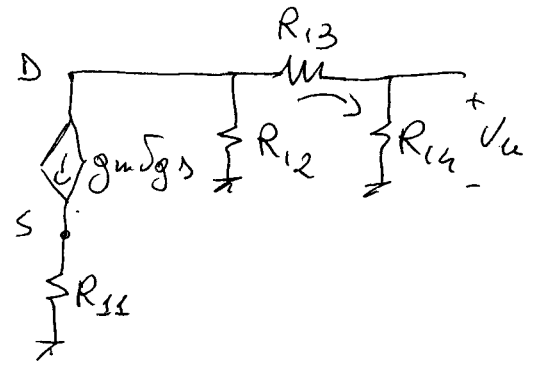
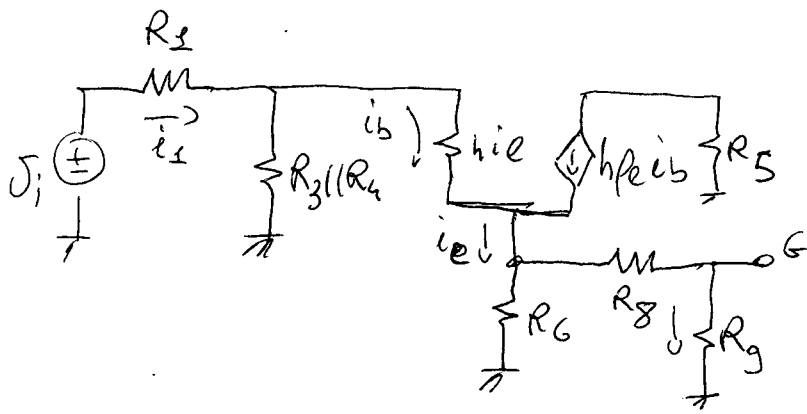
$$I_2 = \frac{V_B}{R_1 + R_2} = 21.4 \mu\text{A}$$

$$I_3 = I_2 + I_4 + I_B = 49.69655 \mu\text{A}$$

$$\underline{\underline{R_3 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_3} = 146891.48 \Omega}}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_D = 4.5 \text{ mA} \\ V_{DS} = -4.5 \text{ V} \\ V_{GS} = -4 \text{ V} \\ g_m = 3 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ V_{CE} = 5 \text{ V} \\ h_{FE} = 290 \\ h_{ie} = 4800 \Omega \\ h_{fe} = 300 \end{cases}$$



$$V_u = R_{14} i_{14}$$

$$i_{14} = (-g_m V_{gs}) \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}}$$

$$\begin{cases} V_D = R_{11} g_m V_{gs} \\ V_{gs} = V_g - V_D \end{cases} \Rightarrow V_{gs} = \frac{V_g}{1 + g_m R_{11}}$$

$$V_g = R_g i_g$$

$$i_g = i_e \frac{R_6}{R_6 + R_8 + R_9}$$

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

$$i_b = i_1 \frac{R_3 \parallel R_4}{(R_3 \parallel R_4) + R_v}$$

$$R_v = h_{ie} + [R_6 \parallel (R_8 + R_9)] (h_{fe} + 1) = 278436.36 \Omega$$

$$i_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_3 \parallel R_4 \parallel R_v}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = (-g_m) \frac{R_{14} R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}} \frac{1}{1 + g_m R_{11}} (h_{fe} + 1) \frac{R_9 R_6}{R_6 + R_8 + R_9} \frac{R_3 \parallel R_4}{(R_3 \parallel R_4) + R_v} \frac{1}{R_1 + R_3 \parallel R_4 \parallel R_v}$$

$$= -3.55$$

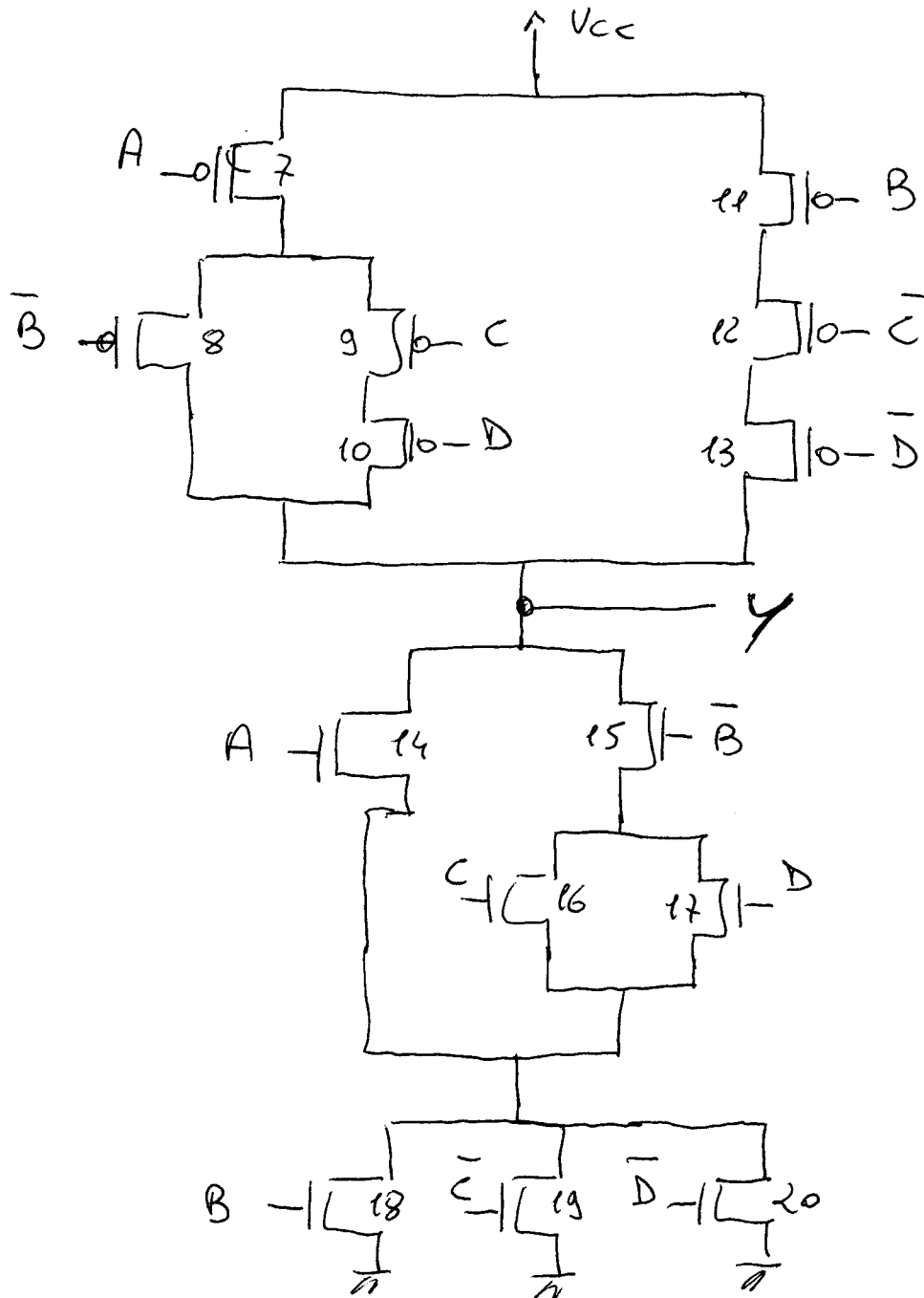
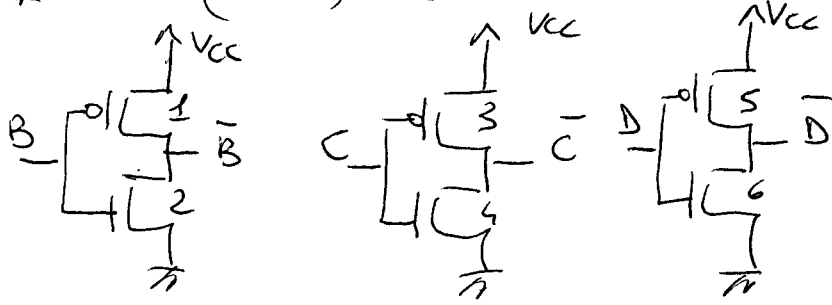
$$Y = \bar{A}(B + \bar{C}\bar{D}) + \bar{B}CD$$

MOS: $(2 \times 2) + (3 \times 2) = 20$

DIREZIONAMENTO INVERTER

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

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



DIREZIONAMENTO PON

(5)

1) PERCORSI CON 3 ROS

$$Q_7 - Q_9 - Q_{10}$$

$$Q_{11} - Q_{12} - Q_{13}$$

$$\left(\frac{K}{L}\right)_{7,9,10,11,12,13} = x = \underline{\underline{15}}$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{p} \Rightarrow \frac{3}{x} = \frac{1}{p} \Rightarrow x = 3p = 15$$

2) PERCORSI CON 2 ROS

$$Q_7 - Q_8 \text{ CON } Q_7 \text{ GIÀ DIREZIONATO}$$

$$\left(\frac{K}{L}\right)_8 = y = \underline{\underline{\frac{15}{2}}}$$

$$\frac{1}{y} + \frac{1}{3p} = \frac{1}{p} \Rightarrow \frac{1}{y} = \frac{2}{3p} \Rightarrow y = \frac{3p}{2} = \frac{15}{2}$$

DIREZIONAMENTO PDN

1) PERCORSI ~~CON~~ CON 3 ROS

$$Q_{15} - Q_{16} - Q_{18} \text{ IMPOSSIBILE PER } B \text{ e } \bar{B}$$

$$Q_{15} - Q_{16} - Q_{19} \text{ IMPOSSIBILE PER } C \text{ e } \bar{C}$$

$$Q_{15} - Q_{16} - Q_{20}$$

$$Q_{15} - Q_{17} - Q_{18} \text{ IMPOSSIBILE PER } B \text{ e } \bar{B}$$

$$Q_{15} - Q_{17} - Q_{19}$$

$$Q_{15} - Q_{17} - Q_{20} \text{ IMPOSSIBILE PER } D \text{ e } \bar{D}$$

$$\left(\frac{K}{L}\right)_{15,16,17,19,20} = a = \underline{\underline{6}}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{3}{a} = \frac{1}{n} \Rightarrow a = 3n = 6$$

2) PERCORSI ~~CON~~ CON 2 ROS

$$Q_{14} - Q_{18}$$

$$Q_{14} - Q_{19} \text{ CON } Q_{19} \text{ GIÀ DIREZIONATO}$$

$$Q_{14} - Q_{20} \text{ CON } Q_{20} \text{ GIÀ DIREZIONATO}$$

1) OPZIONE A: DIREZIONO Q_{14} E Q_{18} E VERIFICO CHE GLI ALTRI PERCORSI SODDISFANO LE TERPISTICHE

$$\left(\frac{K}{L}\right)_{14,18} = b = \underline{\underline{4}}$$

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{2}{b} = \frac{1}{n} \Rightarrow b = 2n = 4$$

VERIFICA: $\frac{1}{2n} + \frac{1}{3n} = \frac{3+2}{6n} = \frac{5}{6n} < \frac{1}{n}$ VERIFICA OK

6

2) OPZIONE B: DIMENSIONO PRIMA Q_{14} ~~allora~~ USANDO 1 PERCORSO

$Q_{14} - Q_{13}$ (OPPURE $Q_{14} - Q_{20}$) E POI Q_{18}

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14} = c = 3$$

$$\frac{1}{c} + \frac{1}{3n} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{1}{c} = \frac{2}{3n} \Rightarrow c = \frac{3}{2}n = 3$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{18} = d = 6$$

$$\frac{1}{d} + \frac{2}{3n} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{1}{d} = \frac{1}{3n} \Rightarrow d = 3n = 6$$

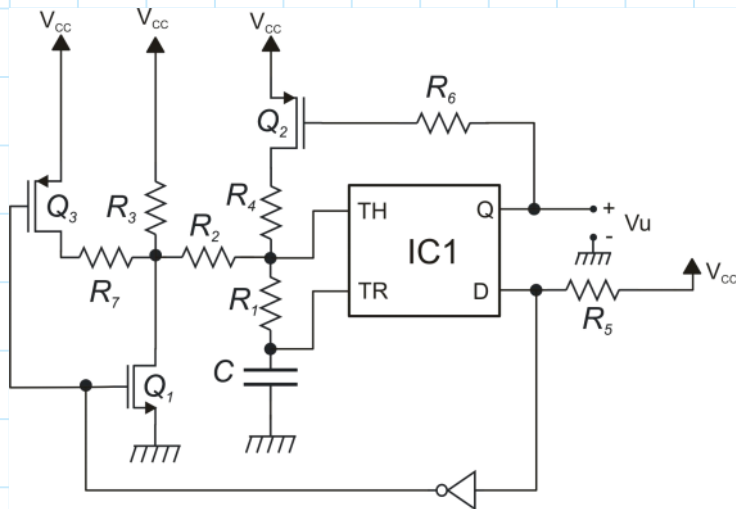
~~VERIFICA~~ VERIFICO OCCUPAZIONE AREA

	$\left(\frac{W}{L}\right)_{14}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_{18}$	TOTALE AREA
OPZIONE A	$2n$	$2n$	$4n = 8$
OPZIONE B	$\frac{3}{2}n$	$3n$	$\frac{9}{2}n = 9$

L'OPZIONE A CONSENTE DI AVERE UN'AREA PIÙ PICCOLA E

~~QUINDI~~ ~~LA~~ ~~PREF~~ QUINDI LA PREFERISCO ~~ALL'OPZIONE A~~ ALL'OPZIONE B

Soluzione Esercizio C



$$\begin{aligned} R_1 &= 500 \Omega & R_2 &= 100 \Omega \\ R_3 &= 1.8 \text{ k}\Omega & R_4 &= 900 \Omega \\ R_5 &= 1 \text{ k}\Omega & R_6 &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_7 &= 1.8 \text{ k}\Omega & C &= 100 \text{ nF} \\ V_{CC} &= 6 \text{ V} \end{aligned}$$

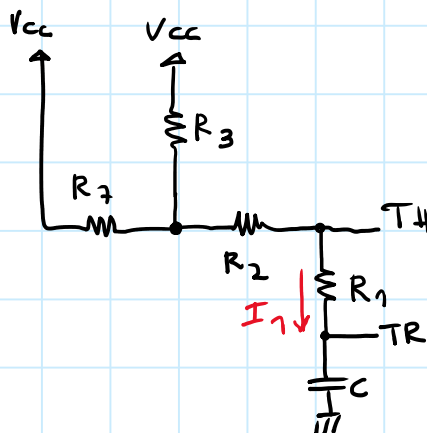
FASE 1) $\left\{ \begin{array}{l} a = '1' \\ D = H.I \end{array} \right.$

$$Q_1: V_{G1} = 0 \text{ V}; V_{S1} = 0 \text{ V}; V_{GS1} = 0 < V_{TN} = 1 \text{ V} \rightarrow Q_1 = \text{OFF}$$

$$Q_2: V_{G2} = V_{CC} = 6 \text{ V}; V_{S2} = V_{CC} = 6 \text{ V}; V_{GS2} = 0 \text{ V} > V_{TP} = -1 \text{ V} \rightarrow Q_2 = \text{OFF}$$

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

CIRCUITO EQUIVALENTE IN FASE 1)



$$V_{i1} = \frac{1}{3} V_{CC} = \frac{6}{3} = 2 \text{ V}$$

$$\text{Definisco } R_{TOT} = R_2 + (R_3 \parallel R_7) = 1000 \Omega$$

$$V_{f1} = V_{CC} = 6 \text{ V}$$

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

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_{TOT}} = \frac{6 - 4}{1000} = 2 \text{ mA}$$

$$\text{quindi } V_{COM1} = V_{TH} - I_1 R_1 = 4 - 2 \times 10^{-3} \times 500 = 3 \text{ V}$$

$$V_{i1} < V_{COM1} < V_{f1}$$

$2V < 3V < 6V$ OK verifica commutazione

$$R_{V_1} = R_{TOT} + R_1 = 1000 + 500 = 1500 \Omega$$

$$\tau_1 = R_{V_1} \cdot C = 1500 \times 100 \times 10^{-9} = 150 \mu s$$

$$T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{i1} - V_{f1}}{V_{com1} - V_{f1}} \right) = 43.1523 \mu s$$

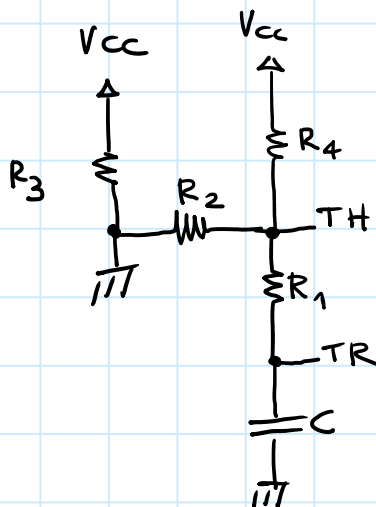
• FASE 2) $\begin{cases} Q = '0' \\ D = '0' \end{cases}$

$Q_1: V_{G1} = V_{CC} = 6V; V_{S1} = 0V; V_{GS1} = V_{CC} = 6V > V_{TN} = 1V \rightarrow Q_1 = ON$

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

$Q_3: V_{G3} = V_{CC} = 6V; V_{S3} = V_{CC} = 6V; V_{GS3} = 0V > V_{TP} = -1V \rightarrow Q_3 = OFF$

• CIRCUITO EQUIVALENTE IN FASE 2)



$$V_{i2} = V_{com1} = 3V$$

$$V_{com2} = V_{i1} = 2V$$

$$V_{f2} = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_2 + R_4} = 0.6V$$

$$V_{i2} > V_{com2} > V_{f2}$$

$3V > 2V > 0.6V$ OK verifica commutazione

$$R_{V_2} = (R_4 \parallel R_2) + R_1 = 530 \Omega$$

$$\tau_2 = R_{V_2} \cdot C = 530 \times 100 \times 10^{-9} = 53.0 \mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{i2} - V_{f2}}{V_{com2} - V_{f2}} \right) = 31.800 \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 74.9531 \mu s$$

$$f = \frac{1}{T} = 13.3417 \text{ KHz}$$