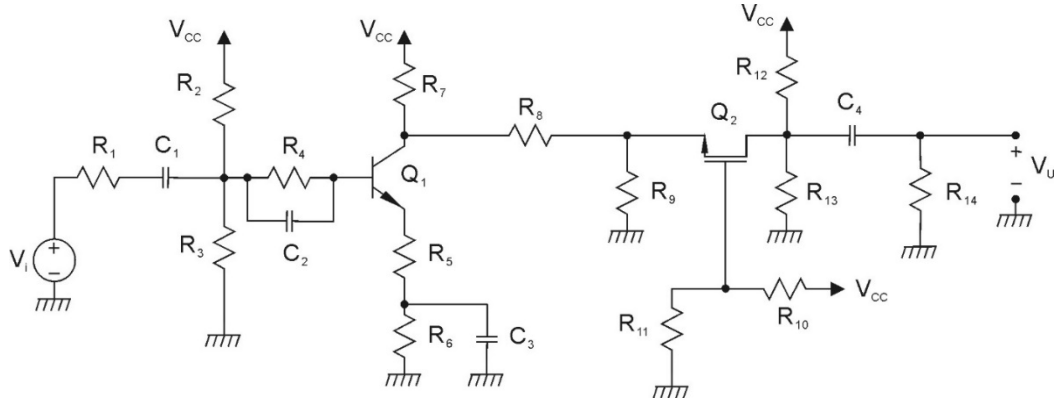


# ELETTRONICA DIGITALE

## Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 13 giugno 2022

### Esercizio A



$R_1 = 50 \, \Omega$	$R_2 = 15 \, \text{k}\Omega$	$R_3 = 5 \, \text{k}\Omega$	$R_5 = 100 \, \Omega$	$R_6 = 1.1 \, \text{k}\Omega$	$R_7 = 21.2 \, \text{k}\Omega$	$R_8 = 400 \, \Omega$
$R_9 = 16 \, \text{k}\Omega$	$R_{10} = 7 \, \text{k}\Omega$	$R_{11} = 11 \, \text{k}\Omega$	$R_{12} = 3 \, \text{k}\Omega$	$R_{13} = 21 \, \text{k}\Omega$	$R_{14} = 20 \, \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 18 \, \text{V}$

$Q_1$  è un transistor BJT BC109B resistivo con  $h_{re} = h_{oe} = 0$ ;  $Q_2$  è un transistor MOS a canale n resistivo con  $V_T = 1 \, \text{V}$  con la corrente di drain in saturazione 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  $R_4$  in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul drain di  $Q_2$  sia  $10.5 \, \text{V}$ . Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di  $Q_2$ .
- 2) Determinare l'espressione e il valore di  $V_u/V_i$  alle frequenze per le quali  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  possono essere considerati dei corto circuiti.

### Esercizio B

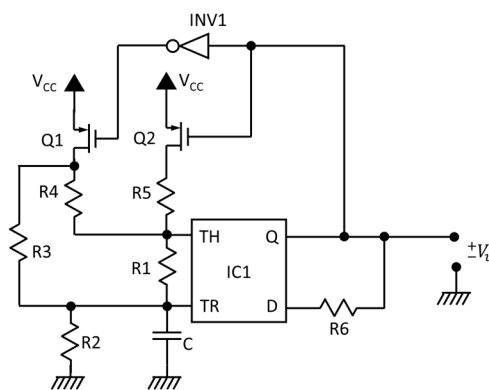
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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

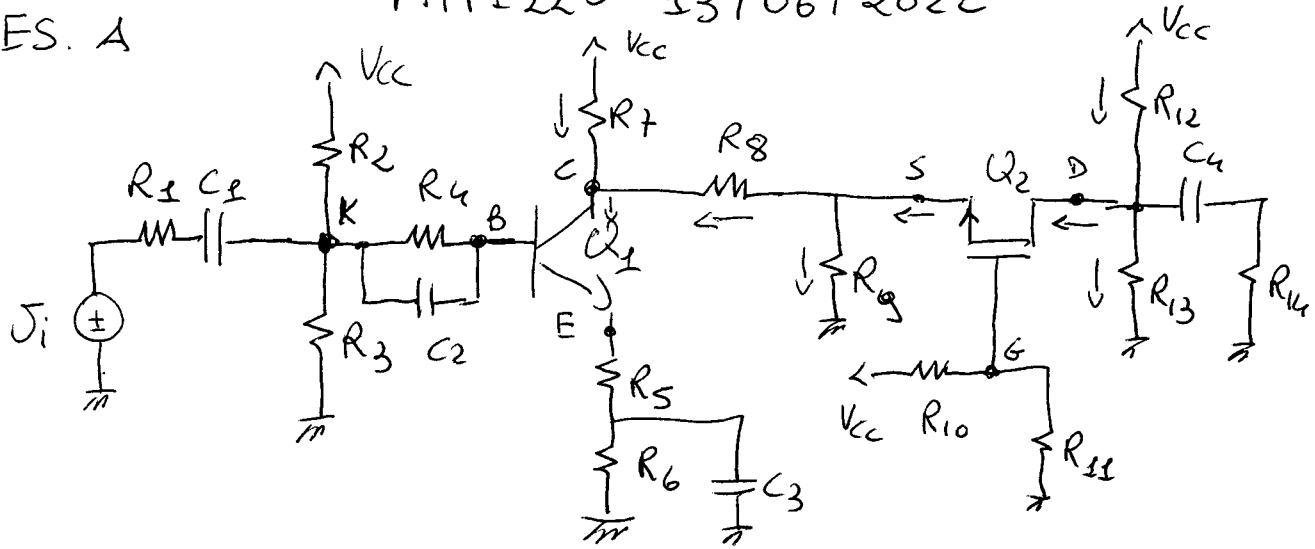
$R_1 = 2400 \, \Omega$	$R_5 = 8240 \, \Omega$
$R_2 = 2 \, \text{k}\Omega$	$R_6 = 1 \, \text{k}\Omega$
$R_3 = 3 \, \text{k}\Omega$	$C = 1 \, \text{nF}$
$R_4 = 3600 \, \Omega$	$V_{CC} = 6 \, \text{V}$



Il circuito  $IC_1$  è un NE555 alimentato a  $V_{CC} = 6 \, \text{V}$ ;  $Q_1$  e  $Q_2$  hanno una  $R_{on} = 0$  e  $V_{Tp} = -1$ , l'inverter è ideale. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

ES. A

APPELLO 13/06/2022



$R_1 = 50k\Omega$   
 $R_2 = 15k\Omega$   
 $R_3 = 5k\Omega$   
 $R_5 = 100\Omega$   
 $R_6 = 1.1k\Omega$   
 $R_7 = 21.2k\Omega$   
 $R_8 = 400\Omega$   
 $R_9 = 16k\Omega$   
 $R_{10} = 7k\Omega$   
 $R_{11} = 11k\Omega$   
 $R_{12} = 3k\Omega$   
 $R_{13} = 21k\Omega$   
 $R_{14} = 20k\Omega$   
 $V_{CC} = 18V$

1) CALCOLOARE  $R_4$  IN MODO CHE  $V_D = 10.5V$

$$I_{12} = \frac{V_{CC} - V_D}{R_{12}} = 2.5mA$$

$$I_{13} = \frac{V_D}{R_{13}} = 0.5mA$$

$$I_D = I_{12} - I_{13} = 2mA$$

$$I_G = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_D = I_S \\ V_G = V_{CC} \frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}} = 11V \end{cases}$$

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

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

~~TRA~~ TRA LE DUE SOLUZIONI POSSIBILI SCELGO LA SOLUZIONE CON IL "+" PERCHÉ

UN MOS A CANALE N CONDUCE PER  $V_{GS} \geq V_T$

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 3V$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 11 - 3 = 8V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 10.5 - 8 = 2.5V$$

VERIFICA DELLA IPOTESI DI SATURAZIONE:  $V_{DS} \stackrel{?}{\geq} V_{GS} - V_T$

$$2.5V \geq 3 - 1 = 2V \quad \underline{OK}$$

$$g_m = 2K (V_{GS} - V_T) =$$

$$= 2 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 2 = 2 \times 10^{-3} A/V$$

$$Q_2: \begin{cases} I_D = 2mA \\ V_{DS} = 2.5V \\ V_{GS} = 3V \\ g_m = 2 \times 10^{-3} \frac{A}{V} \end{cases}$$

$$I_g = \frac{V_s}{R_g} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_g = I_s - I_g = 1.5 \text{ mA}$$

$$V_c = V_s - R_g I_g = 7.4 \text{ V}$$

$$I_f = \frac{V_{cc} - V_c}{R_f} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_c = I_f + I_g = 2 \text{ mA}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_c = 2 \text{ mA} \\ V_{ce} = 5 \text{ V} \\ I_B = 6.89655 \mu\text{A} \\ h_{FE} = 290 \\ h_{fe} = 300 \\ h_{ie} = 4800 \Omega \end{cases}$$

$$h_p: I_B \ll I_c \Rightarrow I_E \approx I_c$$

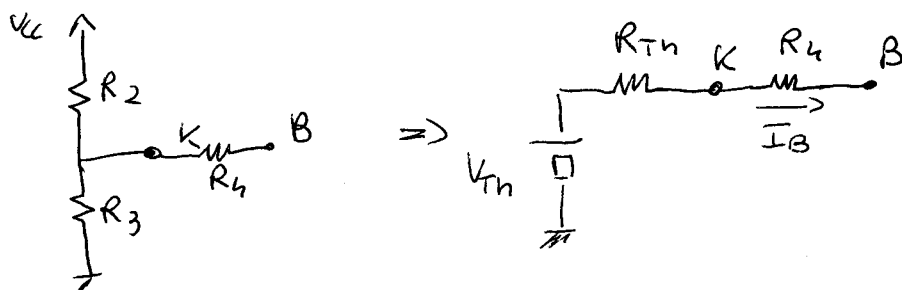
$$V_E = I_E (R_5 + R_6) = 2.4 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_c - V_E = 7.4 - 2.4 = 5 \text{ V}$$

SIAMO NEL PUNTO DI LAVORO  $I_c = 2 \text{ mA}$   $V_{CE} = 5 \text{ V}$  NEL QUALE IL COSTRUTTORE CI FORNISCE I SEGUENTI PARAMETRI:  $h_{FE} = 290$ ,  $h_{fe} = 300$ ,  $h_{ie} = 4800 \Omega$

$$I_B = \frac{I_c}{h_{FE}} = 6.89655 \mu\text{A} \ll I_c = 2 \text{ mA} \Rightarrow h_p \text{ VERIFICATA}$$

PER RISOLVERE IL CIRCUITO POSSIAMO FARE L'EQUIVALENTE DI THEVENIN TRA IL NODO K E IL COMUNE



$$V_{Th} = \frac{V_{cc} R_3}{R_2 + R_3} = 4.5 \text{ V}$$

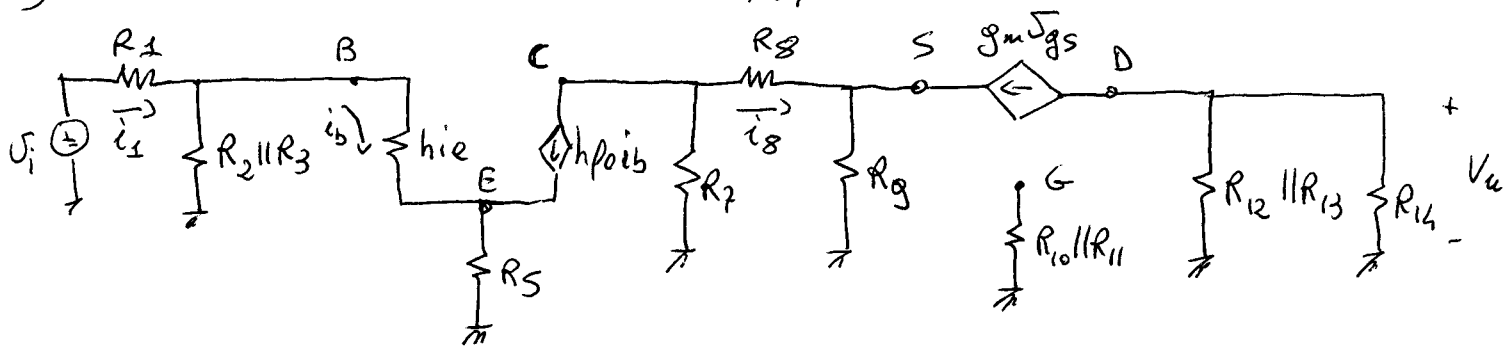
$$R_{Th} = R_2 || R_3 = 3750 \Omega$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = V_f + V_E = 3.1 \text{ V}$$

$$\underline{\underline{R_4 = \left( \frac{V_{Th} - V_B}{I_B} \right) - R_{Th} = 199250 \Omega}}$$

2) DETERMINARE E CALCOLARE  $V_u/V_i$  A CENTRO BANDA

(3)



$$V_u = (-g_m V_{gs}) (R_{12} \parallel R_{13} \parallel R_{14}) \quad \left\{ \Rightarrow V_u = (g_m V_d) (R_{12} \parallel R_{13} \parallel R_{14}) \right.$$

$$V_g = \phi \Rightarrow V_{gs} = -V_d$$

$$V_d = i_g \left( R_g \parallel \frac{1}{g_m} \right)$$

$$i_g = (-h_{fe} i_b) \frac{R_7}{R_7 + R_8 + \left( R_g \parallel \frac{1}{g_m} \right)}$$

$$i_b = i_1 \frac{R_2 \parallel R_3}{(R_2 \parallel R_3) + h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)}$$

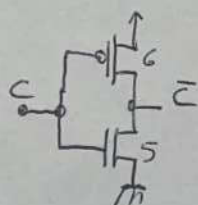
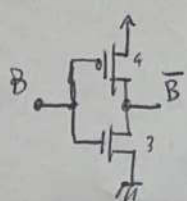
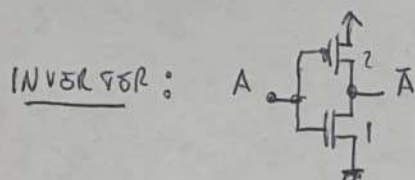
$$i_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_2 \parallel R_3 \parallel [h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)]}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = g_m (R_{12} \parallel R_{13} \parallel R_{14}) \left( R_g \parallel \frac{1}{g_m} \right) (-h_{fe}) \frac{R_7}{R_7 + R_8 + \left( R_g \parallel \frac{1}{g_m} \right)} \frac{R_2 \parallel R_3}{(R_2 \parallel R_3) + h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)}$$

$$\frac{1}{R_1 + R_2 \parallel R_3 \parallel [h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)]} = -18.297$$

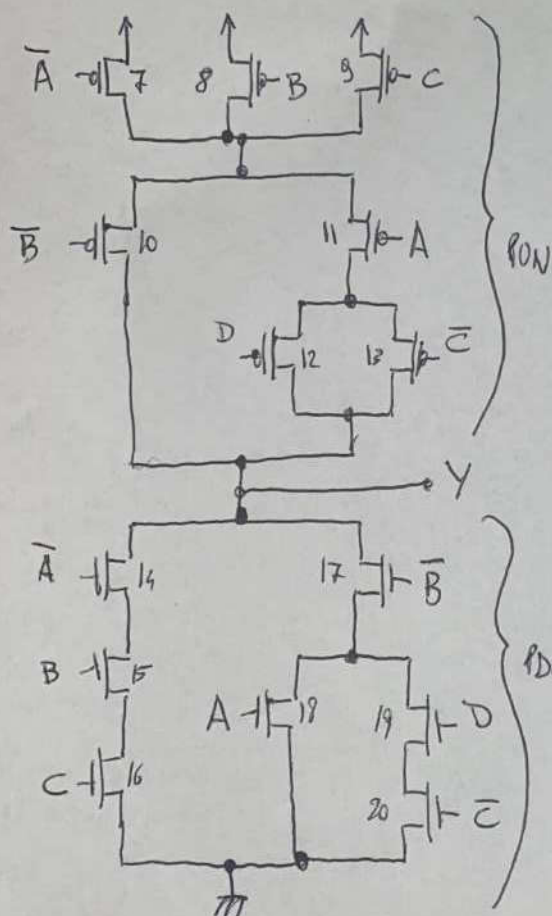
$$Y = (A + \bar{B} + \bar{C})(B + \bar{A} \cdot (\bar{D} + C))$$

$$N = 2 \times (7 + 3) = 20$$



$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3,5} = n = 2$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{2,4,6} = p = 5$$



Dim. PUN:  $\odot$  percorsi DA 3 mos:

7-11-12 } IMPOSSIBILI ( $\bar{A} \neq \bar{A}$ )  
7-11-13 }

8-11-12 } POSSIBILI  
8-11-13 }

9-11-12 }  
9-11-13 IMPOSSIBILI ( $\bar{C} \neq \bar{C}$ )

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{8,9,11,12,13} = x$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x} + \frac{1}{x} = \frac{3}{x} = \frac{1}{p} \rightarrow x = \left(\frac{W}{L}\right)_{8,9,11,12,13} = 3p = 15$$

$\odot$  percorsi DA 2 mos: NB. 8,9 già dimensionati

7-10

8-10 IMPOSSIBILI ( $B \neq \bar{B}$ )

9-10

OPB. (A): DIMENSIONO 7-10 UGUALI USANDO IL PERCORSO 7-10 e poi VERIFICO COSA SUCCEDERÀ IN 8-10

OPF. (B): DIMENSIONO PRIMA 10 USANDO 8-10 e poi 7 USANDO 7-10

OPB. A:  $\left(\frac{W}{L}\right)_{7,10} = 6 \rightarrow \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{2}{6} = \frac{1}{p} \rightarrow t = \left(\frac{W}{L}\right)_{7,10} = 2p = 10$

VERIFICO 8-10:  $\frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)_8} + \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)_{10}} = \frac{1}{3p} + \frac{1}{2p} = \frac{2+3}{6p} = \frac{5}{6p} < \frac{1}{p}$

OK  
CONDIZIONE SU  
PON e PON (EQU)  
RISPETTATA

OPZ (B): DISTRIBUZIONE (10) USANDO 9-10

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{10} = f \rightarrow \frac{1}{f} + \frac{1}{3p} = \frac{1}{p} = \frac{3}{3p} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{3p} \rightarrow f = \left(\frac{W}{L}\right)_{10} = \frac{3p}{2} = 7.5$$

DISTRIBUZIONE (2) USANDO 7-10

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 5 \rightarrow \frac{1}{5} + \frac{1}{\frac{3p}{2}} = \frac{1}{5} + \frac{2}{3p} = \frac{1}{p} = \frac{3}{3p} \rightarrow \frac{1}{5} = \frac{1}{3p} \rightarrow 5 = \left(\frac{W}{L}\right)_7 = 3p = 15$$

CONFRONTO DI DUE OPZIONI

	OPZ A	OPZ B
7	$2p = 10$	$3p = 15$

10	$2p = 10$	$\frac{3p}{2} = 7.5$
----	-----------	----------------------

SOMMA  $4p = 20$   $\frac{3p}{2} = 22.5$

→ SCEGLIO L'OPZ A IN QUANTO  
È AD AREA MINIMA

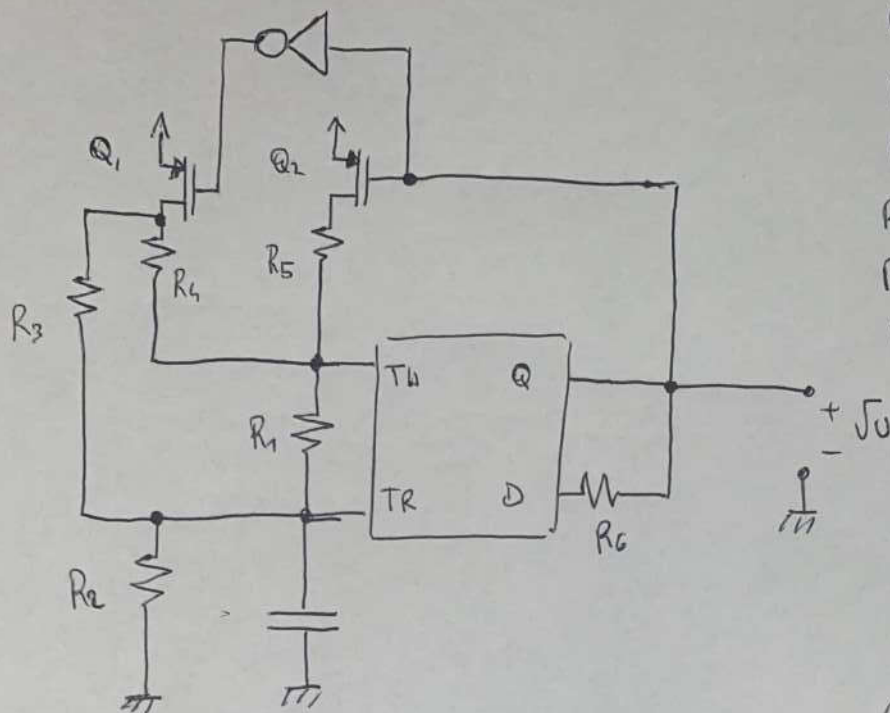
DISTR. PDN: (C) PERCORSO DA 9 NODI:  $\left. \begin{array}{l} 14-15-16 \\ 17-19-20 \end{array} \right\} \text{ POSSIBILI}$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14,15,16,17,19,20} = k \rightarrow \frac{1}{k} + \frac{1}{k} + \frac{1}{k} = \frac{3}{k} = \frac{1}{m} \rightarrow k = \left(\frac{W}{L}\right)_{14,15,16,17,19,20} = 3m = 6$$

(C) PERCORSO DA 2 NODI: 17-18 POSSIBILE (17 GIÀ DISTRIBUITO NASTO)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{18} = 2 \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{1}{3m} = \frac{1}{m} = \frac{2}{3m} \rightarrow \frac{1}{2} = \frac{2}{3m} \rightarrow 2 = \left(\frac{W}{L}\right)_{18} = \frac{3m}{2} = 3$$





$$R_1 = 2400 \Omega$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 3600 \Omega$$

$$R_5 = 8240 \Omega$$

$$R_6 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C = 1 \text{ mF}$$

$$V_{TP} = -1 \text{ V}$$

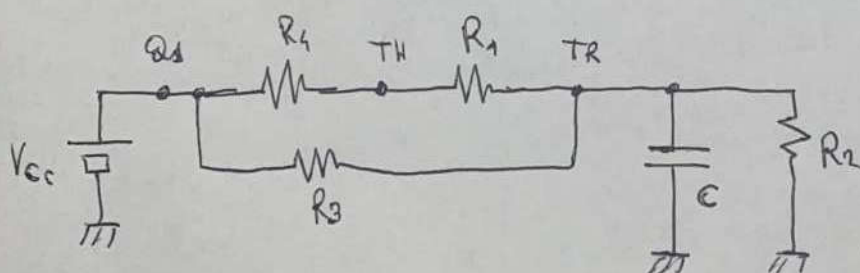
$$R_{on\_PMOS} = 0 \Omega$$

SET (FAS5 1)  $\rightarrow$   $\begin{cases} Q = '1' \rightarrow V_Q = V_{CC} = 6 \text{ V} \\ D = 'H\bar{0}' \rightarrow V_D = V_{CC} \text{ (NO CURRENTS SU } R_6) \end{cases}$

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

$$V_{Q2} = V_{CC} = 6 \text{ V} \rightarrow V_{GS2} = 0 \text{ V} > V_{TP} = -1 \text{ V} \rightarrow Q_2 \text{ OFF}$$

$$V_{Q1} = 0 \text{ V} \rightarrow V_{GS1} = -V_{CC} = -6 \text{ V} < V_{TP} = -1 \text{ V} \rightarrow Q_1 \text{ ON}$$



$$R_p = (R_4 + R_1) // R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$V_{F1} = V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_p} = 3 \text{ V}$$

$$COM1: I_{R1} = I_{R4} = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_4} \approx \frac{2 V_{CC}}{3} = 0.5 \text{ mA}$$

$$V_{COM1} = V_{TH} - R_1 \cdot I_{R1} = 2.6 \text{ V}$$

VERIFICO C40

$$V_{i1} < V_{com1} < V_{F1}$$

$$2V < 2.66V < 3V \quad \underline{OK}$$

$$R_{v1} = R_2 // R_p = 1K\Omega$$

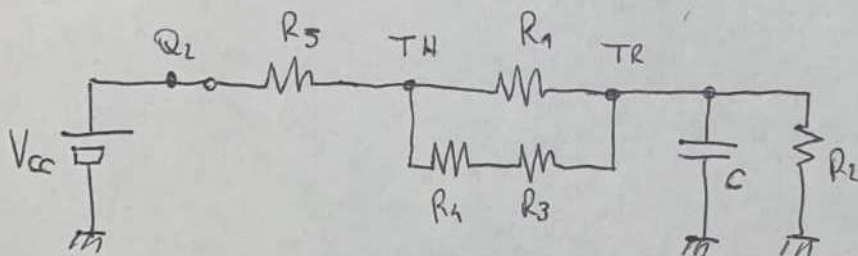
$$\tau_1 = R_{v1} \cdot C = 1\mu s$$

$$T_1 = \tau_1 \cdot \ln \left\{ \frac{V_{F1} - V_{O1}}{V_{F1} - V_{com1}} \right\} = 1.0986 \mu s$$

RESET (FASE 2)  $\rightarrow \left\{ Q = D = '0' \rightarrow V_Q = V_D = 0V \right.$

$$V_{Q2} = 0V \rightarrow V_{GS2} = -6V < V_{TP} = -1V \rightarrow Q_2 \text{ ON}$$

$$V_{Q1} = 6V \rightarrow V_{GS1} = 0V > V_{TP} = -1V \rightarrow Q_1 \text{ OFF}$$



$$R_{p2} = R_1 // (R_1 + R_3) = 1760 \Omega$$

$$V_{i2} = V_{com1} = 2.6V$$

$$V_{com2} = V_{i1} = \frac{1}{3}V_{cc} = 2V$$

VERIFICO C40

$$V_{i2} > V_{com2} > V_{F2}$$

$$2.6 > 2V > 1V$$

OK

$$V_{F2} = V_{cc} \frac{R_2}{R_3 + R_{p2} + R_2} = 1V$$

$$R_{v2} = R_2 // (R_3 + R_{p2}) = 1666.6\Omega$$

$$\tau_2 = R_{v2} \cdot C = 1.6\mu s$$



$$T_2 = r_2 \cdot \ln \left\{ \frac{V_{F2} - V_{i2}}{V_{F2} - V_{oon2}} \right\} = 0,85138 \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 1,95 \mu s$$

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = 512,82 \text{ KHz}$$