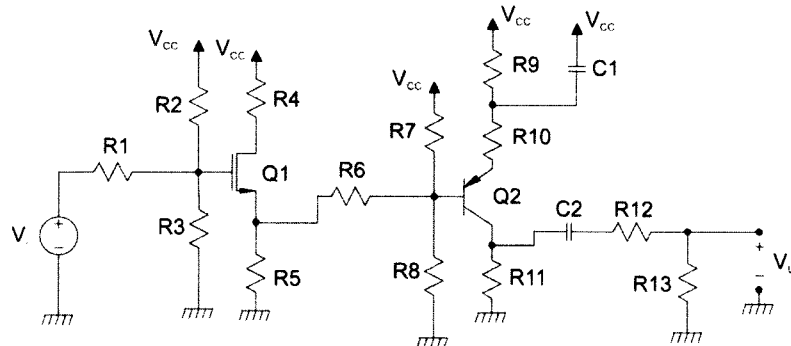


# ELETTRONICA DIGITALE

## Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 28 gennaio 2025

### Esercizio A



$R1 = 24 \text{ k}\Omega$	$R2 = 10 \text{ k}\Omega$	$R4 = 3 \text{ k}\Omega$	$R5 = 3 \text{ k}\Omega$	$R6 = 500 \Omega$	$R7 = 4250 \Omega$	$R8 = 9.5 \text{ k}\Omega$
$R9 = 3.8 \text{ k}\Omega$	$R10 = 100 \Omega$	$R11 = 2.6 \text{ k}\Omega$	$R12 = 100 \Omega$	$R13 = 9.9 \text{ k}\Omega$	$V_{CC} = 18 \text{ V}$	

Q1 è un transistor MOS a canale n resistivo con  $V_T = 1 \text{ V}$  e la corrente di drain in saturazione data da  $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$  con  $k = 0.5 \text{ mA/V}^2$ ; Q2 è un transistor BJT BC179A resistivo con  $h_{re} = h_{oe} = 0$ ; per gli altri parametri forniti dal costruttore si utilizzino i valori tipici o, in loro assenza, i valori massimi.

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R3 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sull'emettitore di Q2 sia 10.2 V; si ipotizzi di poter trascurare la corrente di base di Q2 rispetto alla corrente che scorre in R7. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di Q1 (per la corrente di base di Q2 è sufficiente fornirne una stima).
- 2) Determinare l'espressione e il valore di  $V_U/V_i$  alle frequenze per le quali i condensatori riportati nel circuito in figura possono essere considerati dei corti circuiti.

### Esercizio B

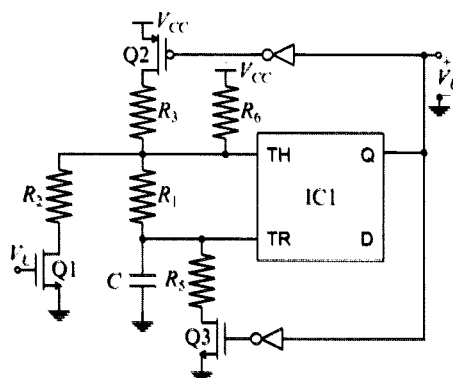
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

$$Y = \overline{A}(\overline{B} + \overline{C} + E) + CDA$$

Determinare il numero dei transistori necessari e disegnarne lo schema completo. Dimensionare inoltre il rapporto (W/L) di tutti i transistori assumendo che l'inverter di base abbia 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 di tutti i transistori, inclusi quelli di eventuali inverter.

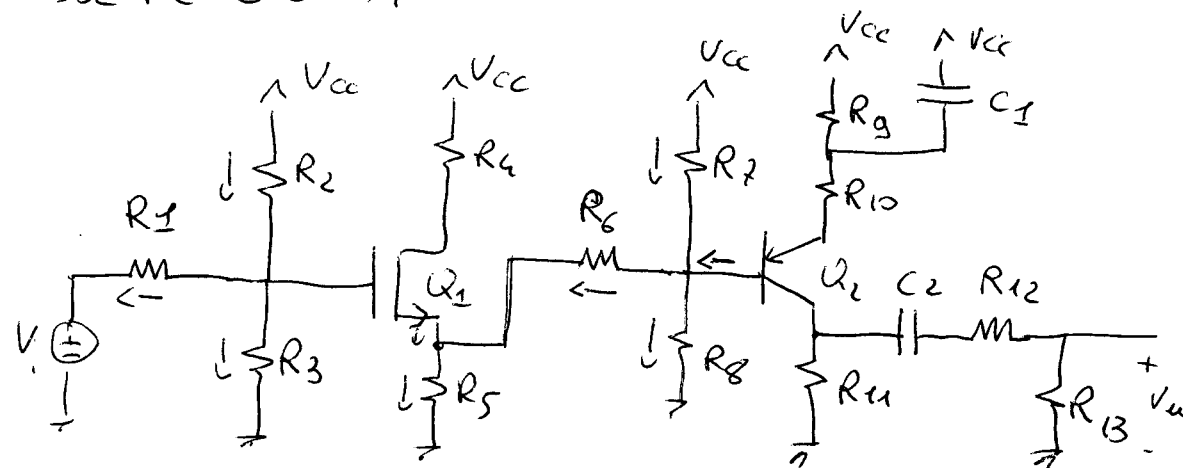
### Esercizio C

$R_1 = 1.8 \text{ k}\Omega$	$R_6 = 13.2 \text{ k}\Omega$
$R_2 = 6 \text{ k}\Omega$	$C = 470 \text{ nF}$
$R_3 = 1.32 \text{ k}\Omega$	$V_{CC} = 6 \text{ V}$
$R_5 = 5 \text{ k}\Omega$	



Il circuito IC1 è un NE555 alimentato a  $V_{CC} = 6 \text{ V}$ ; Q1 e Q3 hanno  $R_{on} = 0$  e  $V_{Tn} = 1 \text{ V}$ ; Q2 ha  $R_{on} = 0$  e  $V_{Tp} = -1 \text{ V}$ . Gli inverter sono ideali e alimentati a  $V_{CC}$ . (i) Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile; (ii) determinare la frequenza del segnale di uscita,  $V_U$ , a regime.

ESERCIZIO A



$$R_1 = 24 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = 500 \Omega$$

$$R_7 = 4250 \Omega$$

$$R_8 = 9.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_9 = 3.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} = 100 \Omega$$

$$R_{11} = 2.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_{12} = 100 \Omega$$

$$R_{13} = 9.3 \text{ k}\Omega$$

$$V_{CC} = 18 \text{ V}$$

1) DET  $R_3$  PER  $V_E = 10.2 \text{ V}$ 

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_E}{R_9 + R_{10}} = 2 \text{ mA}$$

hp:  $Q_2$  IN ZONA ATTIVA DIRETTA  $\Rightarrow I_C \approx I_E$ 

$$V_C = R_{11} I_C = 5.2 \text{ V}$$

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

PER  $V_{CE} = -5 \text{ V}$  E  $|I_C| = 2 \text{ mA}$  IL COSTRUTTORE NONFORNISCE IL VALORE DI  $h_{FE}$  MA SOLO  $h_{ie} = 2.7 \text{ k}\Omega$ 

$$\text{E } h_{fe} = 260 - 1$$

NONA VERIFICA Z.A.D. :  $V_{CE} = -5 \text{ V} < V_{CESAT} \approx -0.2 \text{ V}$  VERIFICA OKPER  $I_B$  POSSIAMO DARNE UNA STIMA USANDO IL GRAFICO A PAG. 18 DELLECARATTERISTICHE DEL BC179 - PER  $V_{CE} = -5 \text{ V}$  E  $|I_C| = 2 \text{ mA}$  SI VEDE CHE

~~$$8 \mu\text{A} < |I_B| < 10 \mu\text{A}$$~~

$$V_B = V_E - V_{EB} = 10.2 - 0.7 = 9.5 \text{ V}$$

$$I_7 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_7} = 2 \text{ mA}$$

$$I_8 = \frac{V_B}{R_8} = 1 \text{ mA}$$

$$I_6 = I_7 + I_B - I_8 \approx I_7 - I_8$$
 ESSENDO  $I_B \ll I_7, I_8$  COME RIPORTATO NEL TESTO E COME DIMOSTRATO DALLA STIMA DI  $I_B$ 

$$I_6 = 1 \text{ mA}$$

$$V_S = V_B - R_6 I_6 = 9V$$

$$I_5 = \frac{V_S}{R_5} = 3mA$$

$$I_S = I_5 - I_6 = 2mA$$

$$I_G = 0 \Rightarrow I_S = I_D = 2mA$$

$$hp: Q_1 \text{ SATURO} \Rightarrow I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}} \quad \text{SCELGO SOLUZIONE } (+) \text{ PERCHÉ } Q_1 \text{ CONDUCE PER } V_{GS} \geq V_T$$

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

$$V_D = V_{CC} - R_4 I_D = 12V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 12 - 9 = 3V$$

VERIFICA hp SATURAZIONE:

$$V_{DS} \stackrel{?}{\geq} (V_{GS} - V_T)$$

$$3V > (3 - 1) = 2V$$

OK

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

$$V_G = V_{GS} + V_S = 3 + 9 = 12V$$

$$I_2 = \frac{V_{CC} - V_G}{R_2} = 0.6mA$$

$$I_1 = \frac{V_G}{R_1} = 0.5mA$$

$$I_3 = I_2 - I_1 = 0.1mA$$

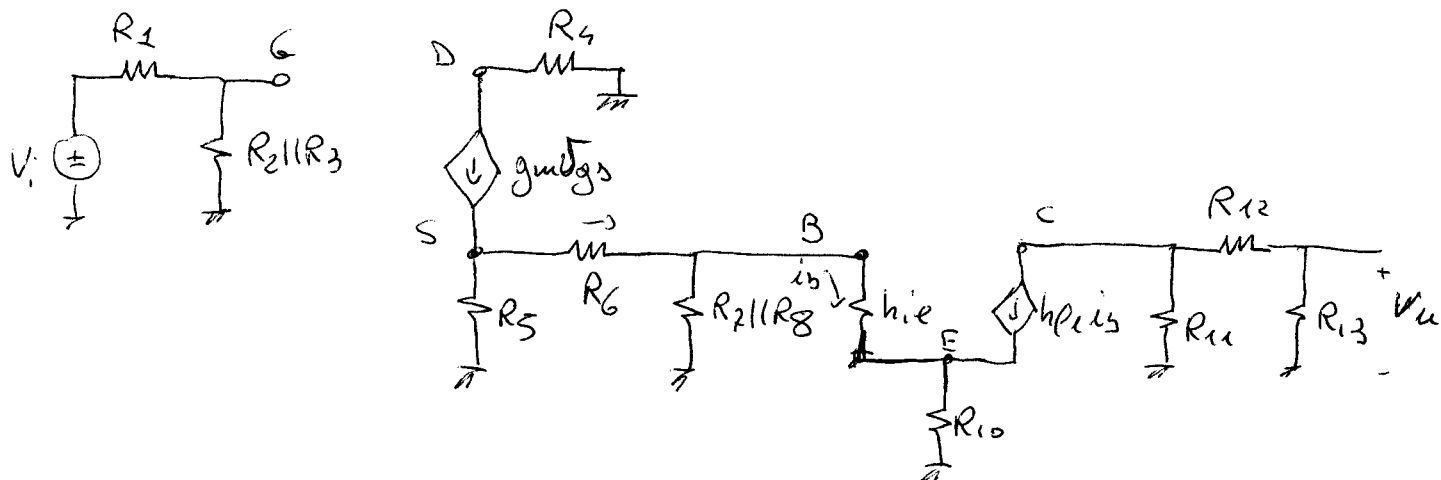
$$\underline{R_3} = \frac{V_G}{I_3} = \underline{\underline{120K\Omega}}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_D = 2mA \\ V_{DS} = 3V \\ V_{GS} = 3V \\ g_m = 2 \times 10^{-3} A/V \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_C = 2mA \\ V_{CE} = -5V \\ h_{fe} = 260 \\ h_{ie} = 2700\Omega \end{cases}$$

2) DETERMINARE  $\frac{V_u}{V_i}$  PER C: CORTOCIRCUITATI

(3)



$$V_u = (-h_{fe} i_b) \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{12} + R_{13}} R_{13}$$

$$i_b = i_6 \frac{R_7 || R_8}{(R_7 || R_8) + h_{ie} + R_{10}(h_{fe} + 1)}$$

$$R_v = h_{ie} + R_{10}(h_{fe} + 1) = 28800 \Omega$$

$$i_6 = (g_m J_{gs}) \frac{R_5}{R_5 + R_6 + R_7 || R_8 || R_v}$$

$$\begin{cases} V_s = (g_m J_{gs}) [R_5 || (R_6 + R_7 || R_8 || R_v)] \\ V_{gs} = V_g - V_s \end{cases} \Rightarrow J_{gs} = \frac{J_g}{1 + g_m [R_5 || (R_6 + R_7 || R_8 || R_v)]}$$

$$V_g = V_i \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = (-h_{fe}) \frac{R_{11} R_{13}}{R_{11} + R_{12} + R_{13}} \frac{R_7 || R_8}{(R_7 || R_8) + R_v} g_m \frac{R_5}{R_5 + R_6 + R_7 || R_8 || R_v}$$

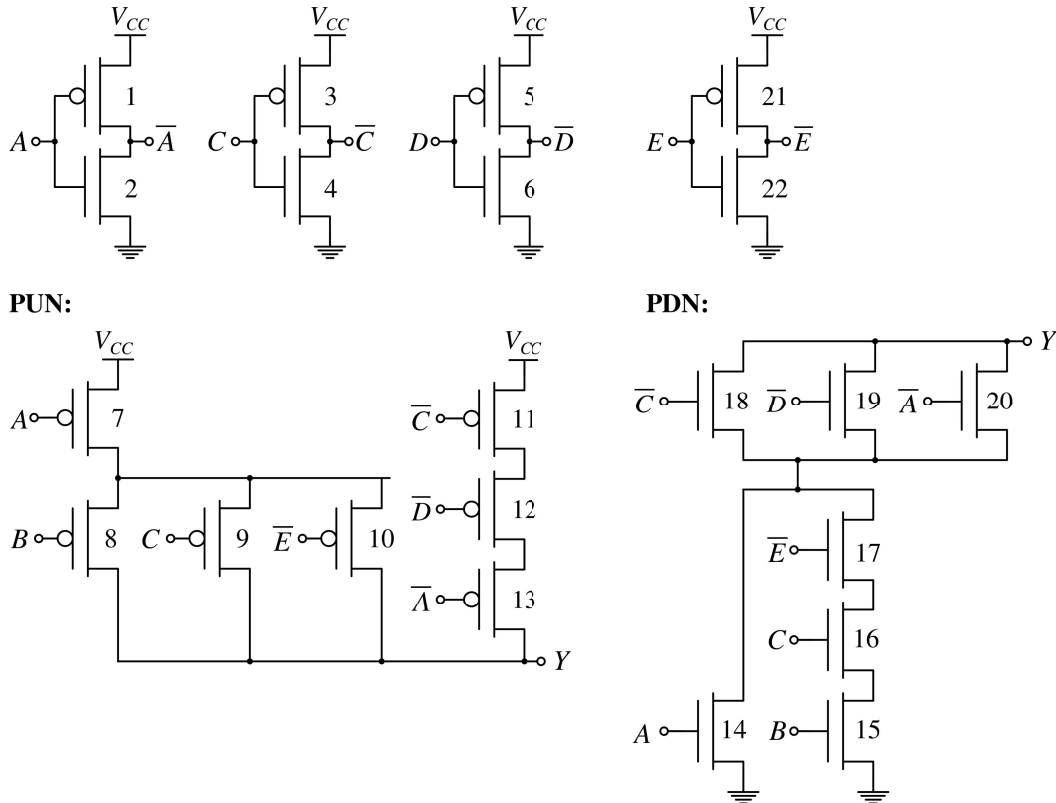
$$\frac{1}{1 + g_m [R_5 || (R_6 + R_7 || R_8 || R_v)]} \frac{0.245}{0.27} \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3} = -3.256$$

## Esercizio B – svolgimento

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

Numero di MOS:  $(7 + 4) \times 2 = 22$

Schema completo:



### Dimensionamento degli inverter:

Dai dati  $(W/L)_p = p = 5$ ,  $(W/L)_n = n = 2$ .

$$(W/L)_{1,3,5,21} = p = 5; (W/L)_{2,4,6,22} = n = 2$$

### Dimensionamento della PUN:

Percorsi con 3 MOS in serie: 11-12-13:  $(W/L)_{11,12,13} = x$ ;  $3 \times \frac{1}{x} = \frac{1}{p} \implies x = 3p = 15$

Percorsi con 2 MOS in serie: 7-8, 7-9, 7-10.  $(W/L)_{7,8,9,10} = y$ ;  $2 \times \frac{1}{y} = \frac{1}{p} \implies y = 2p = 10$

### Dimensionamento della PDN:

Percorsi con 4 MOS in serie:

- 15-16-17-18, impossibile dovuto a  $C$  e  $\bar{C}$ .
- 15-16-17-19, possibile.
- 15-16-17-20, possibile.

$$(W/L)_{15,16,17,19,20} = z; \quad 4 \times \frac{1}{z} = \frac{1}{n} \implies z = 4n = 8.$$

Percorsi con 2 MOS in serie:

- 14-18, possibile.
- 14-19, possibile. 19 già dimensionato
- 14-20, impossibile dovuto a  $A$  e  $\overline{A}$ .

Rimane da dimensionare 14 e 18. Esistono quindi due casi:

- **Caso A:** si dimensiona prima 14 per soddisfare i requisito sul persorso 14-19. In seguito si dimensiona 18.
- **Caso B:** si dimensiona 14-18 e si verifica il percorso 14-19.

**Caso A:**

$$(W/L)_{14} = w; \quad \frac{1}{w} + \frac{1}{z} = \frac{1}{n} \implies w = \frac{zn}{z-n} = \frac{4n}{3} = \frac{8}{3}.$$

$$(W/L)_{18} = v; \quad \frac{1}{w} + \frac{1}{v} = \frac{1}{n} \implies v = \frac{wn}{w-n} = 4n = 8.$$

**Caso B:**

$$(W/L)_{14,18} = a; \quad 2 \times \frac{1}{a} = \frac{1}{n} \implies a = 2n = 4.$$

$$\text{Verifica del percorso 14-19: } \frac{1}{a} + \frac{1}{z} = \frac{1}{2n} + \frac{1}{4n} = \frac{3}{4n} < \frac{1}{n}. \quad (\text{Verifica corretta}).$$

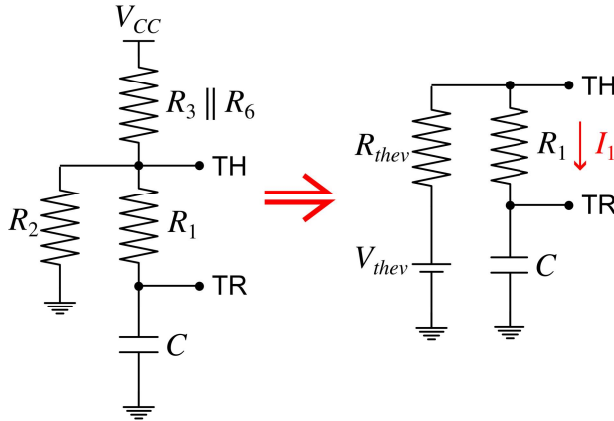
**Dimensionamento ad area minima:**

	Caso A	Caso B
$(W/L)_{14}$	8/3	4
$(W/L)_{18}$	8	4
Totale:	32/3=10.6	8

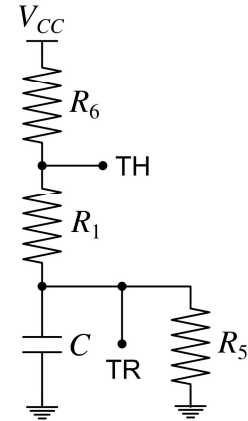
Il Caso B è più vantaggioso.

## Esercizio C – svolgimento

### FASE DI SET:



### FASE DI RESET:



Fase di SET:  $Q=1$ ;

$V_{G1} = 6\text{ V}$ ,  $V_{S1} = 0\text{ V}$ ,  $V_{GS1} = 6\text{ V} > V_{Tn} = 1\text{ V}$ : Q1 acceso.

$V_{G3} = 0\text{ V}$ ,  $V_{S3} = 0\text{ V}$ ,  $V_{GS3} = 0\text{ V} < V_{Tn} = 1\text{ V}$ : Q3 spento.

$V_{G2} = 0\text{ V}$ ,  $V_{S2} = 6\text{ V}$ ,  $V_{GS2} = -6\text{ V} < V_{Tp} = 1\text{ V}$ : Q2 acceso.

All'inizio della fase di SET consideriamo lo schema riportato in figura:

$$R_{thev} = R_3 || R_6 || R_2 = 1\text{ k}\Omega. \quad V_{thev} = \frac{R_2}{R_2 + (R_3 || R_6)} V_{CC} = 5\text{ V}.$$

$$V_{i1} = V_{CC}/3 = 2\text{ V}; \quad V_{f1} = V_{thev} = 5\text{ V}; \quad V_{com1} = V_{TH} - R_1 I_1,$$

$$\text{dove: } V_{TH} = (2/3)V_{CC} = 4\text{ V}, \quad I_1 = \frac{V_{thev} - V_{TH}}{R_{thev}} = 1\text{ mA}. \quad \text{Da cui: } V_{com1} = 2.2\text{ V}.$$

Si verifica quindi la condizione per la commutazione:  $V_{i1} < V_{com1} < V_{f1}$ :  $2\text{ V} < 2.2\text{ V} < 5\text{ V}$ .

La resistenza vista da  $C$  durante la fase di SET:  $R_{v1} = R_{thev} + R_1 = 2.8\text{ k}\Omega$ .

La costante di tempo caratteristica,  $\tau_1$ , della carica di  $C$  durante la fase di SET, è:

$$\tau_1 = R_{v1} C = 1316\text{ }\mu\text{s}.$$

La durata della fase di SET,  $T_1$ , si calcola come:

$$T_1 = \tau_1 \ln \left( \frac{V_{f1} - V_{i1}}{V_{f1} - V_{com1}} \right) = 90.795\text{ }\mu\text{s}.$$

Fase di RESET:  $Q=0$ ;

$V_{G1} = 0\text{ V}$ ,  $V_{S1} = 0\text{ V}$ ,  $V_{GS1} = 0\text{ V} < V_{Tn} = 1\text{ V}$ : Q1 spento.

$V_{G3} = 6\text{ V}$ ,  $V_{S3} = 0\text{ V}$ ,  $V_{GS3} = 6\text{ V} > V_{Tn} = 1\text{ V}$ : Q3 acceso.

$V_{G2} = 6\text{ V}$ ,  $V_{S2} = 6\text{ V}$ ,  $V_{GS2} = 0\text{ V} > V_{Tp} = 1\text{ V}$ : Q2 spento.

Consideriamo quindi il circuito in figura, relativo alla fase di RESET:

$$V_{i2} = V_{com1} = 2.2\text{ V}; \quad V_{f2} = \frac{R_5}{R_1 + R_5 + R_6} V_{CC} = 1.5\text{ V}; \quad V_{com2} = V_{i1} = 2\text{ V}.$$

Si verifica quindi la condizione di commutazione:  $V_{i2} > V_{com2} > V_{f2}$ :  $2.2\text{ V} > 2\text{ V} > 1.5\text{ V}$ .

La resistenza vista da  $C$  durante la fase di RESET:  $R_{v2} = R_5 || (R_1 + R_6) = 3.75 \text{ k}\Omega$ .

La costante di tempo caratteristica,  $\tau_2$ , della scarica di  $C$  durante la fase di RESET, è:

$$\tau_2 = R_{v2}C = 1762.5 \text{ }\mu\text{s}.$$

La durata della fase di RESET,  $T_2$ , si calcola come:

$$T_2 = \tau_2 \ln \left( \frac{V_{f2} - V_{i2}}{V_{f2} - V_{com2}} \right) = 593.032 \text{ }\mu\text{s}.$$

La frequenza di oscillazione dell'astabile è  $f = \frac{1}{T_1 + T_2} = 1462.358 \text{ Hz}$ .