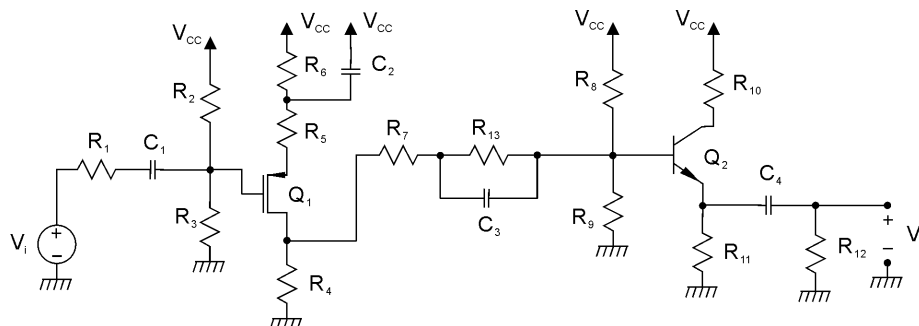


ELETTRONICA DIGITALE
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 14 gennaio 2022

Esercizio A

$R_1 = 50 \, \Omega$	$R_9 = 15.4 \, \text{k}\Omega$
$R_2 = 25 \, \text{k}\Omega$	$R_{10} = 3 \, \text{k}\Omega$
$R_3 = 20 \, \text{k}\Omega$	$R_{11} = 3.5 \, \text{k}\Omega$
$R_4 = 1.4 \, \text{k}\Omega$	$R_{12} = 20 \, \text{k}\Omega$
$R_5 = 10 \, \Omega$	$R_{13} = 950 \, \Omega$
$R_7 = 50 \, \Omega$	$V_{CC} = 18 \, \text{V}$
$R_8 = 4120 \, \Omega$	



Q₁ è un transistor MOS a canale p resistivo con $V_T = -1$ V con la corrente di drain in saturazione data da $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ con $k = 0.5$ mA/V²; Q₂ è un transistor BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe} = 0$;

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R_6 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul collettore di Q_2 sia 12 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di Q_1 .
- 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

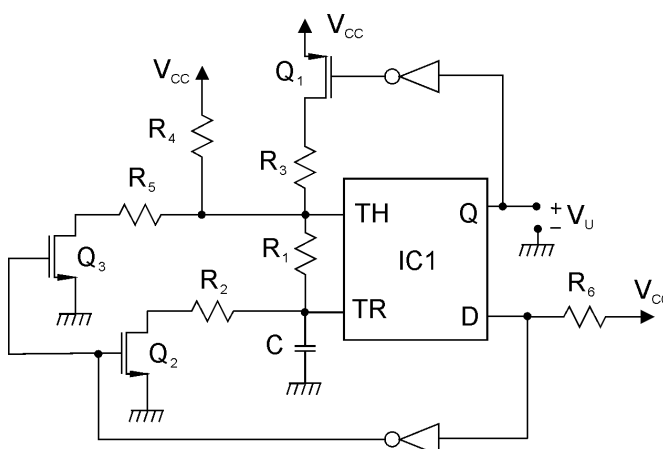
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

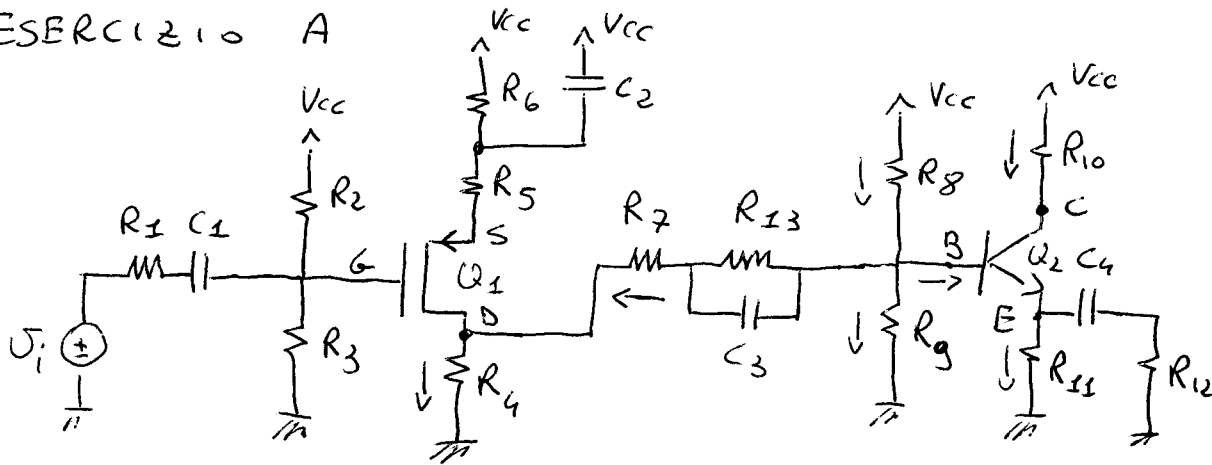
Esercizio C

$R_1 = 500\ \Omega$	$R_5 = 500\ \Omega$
$R_2 = 100\ \Omega$	$R_6 = 5\ \text{k}\Omega$
$R_3 = 2\ \text{k}\Omega$	$C = 470\ \text{nF}$
$R_4 = 2\ \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 6\ \text{V}$



Il circuito IC₁ è un NE555 alimentato a $V_{CC} = 6\text{ V}$; Q₁ ha una $R_{on} = 0$ e $V_T = -1\text{ V}$; Q₂ e Q₃ hanno una $R_{on} = 0$ e $V_T = 1$, gli inverter sono ideali. Dimostrare che il circuito in figura è un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

ESERCIZIO A



- $R_1 = 50 \Omega$
- $R_2 = 25 k\Omega$
- $R_3 = 20 k\Omega$
- $R_4 = 1.4 k\Omega$
- $R_5 = 10 \Omega$
- $R_6 = 50 \Omega$
- $R_7 = 50 \Omega$
- $R_8 = 410 \Omega$
- $R_9 = 15.4 k\Omega$
- $R_{10} = 3 k\Omega$
- $R_{11} = 3.5 k\Omega$
- $R_{12} = 20 k\Omega$
- $R_{13} = 950 \Omega$
- $V_{CC} = 18 V$
- $K = 0.5 \text{ mA/V}$

1) Determinare valore R_6 per $V_C = 12 V$

$$I_{10} = \frac{V_{CC} - V_C}{R_{10}} = 2 \text{ mA} = I_C$$

$$\text{hp BJT: } I_B \ll I_C \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$V_E = R_{11} I_E \approx 7 V$$

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

Il BJT si trova nel punto di lavoro ($I_C = 2 \text{ mA}$ e $V_{CE} = 5 V$) per il quale il costruttore ci fornisce il valore dei parametri:

$$h_{FE} = 290; \quad h_{fe} = 300; \quad h_{ie} = 4.8 k\Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 6.8965 \mu A \Rightarrow \text{hp } I_B \ll I_C \text{ E' VERIFICATA}$$

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

$$V_B = V_E + V_{BE} = 7.7 V$$

$$I_g = \frac{V_B}{R_9} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_8 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_8} = 2.5 \text{ mA}$$

$$I_7 = I_8 - I_g - I_B = 1.993 \text{ mA}$$

$$V_D = V_B - (R_7 + R_{13}) I_7 = 5.707 V$$

$$I_4 = \frac{V_D}{R_4} = 4.0764 \text{ mA}$$

$$I_D = I_4 - I_7 = 2.0834 \text{ mA}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ V_{CE} = 5 V \\ I_B = 6.8965 \mu A \\ h_{FE} = 290 \\ h_{fe} = 300 \\ h_{ie} = 4.8 k\Omega \end{cases}$$

$$I_G = 0 \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow I_S = I_D \\ \Rightarrow V_G = V_{CC} \frac{R_3}{R_3 + R_2} = 8V \end{array} \right.$$

(2)

hp MOSFET IN SATURAZIONE $\Rightarrow I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}} = V_T - \sqrt{\frac{I_D}{K}} = (-1) - 2.0413 = -3.0413V$$

PER IL MOS SI DEVE
AVERE $V_{GS} < V_T$ PER AVERE
LA CONDUZIONE

$$V_S = V_G - V_{GS} = 8 - (-3.0413) = 11.0413V$$

$$(V_{CC} - V_S) = I_S (R_S + R_6) \quad V_{DS} = V_D - V_S = -5.3343V$$

$$\Rightarrow \underline{R_6} = \left(\frac{V_{CC} - V_S}{I_S} \right) - R_S = \underline{3330.07 \Omega}$$

VERIFICA MOSFET: $V_{DS} \stackrel{?}{\geq} V_{GS} - V_T$

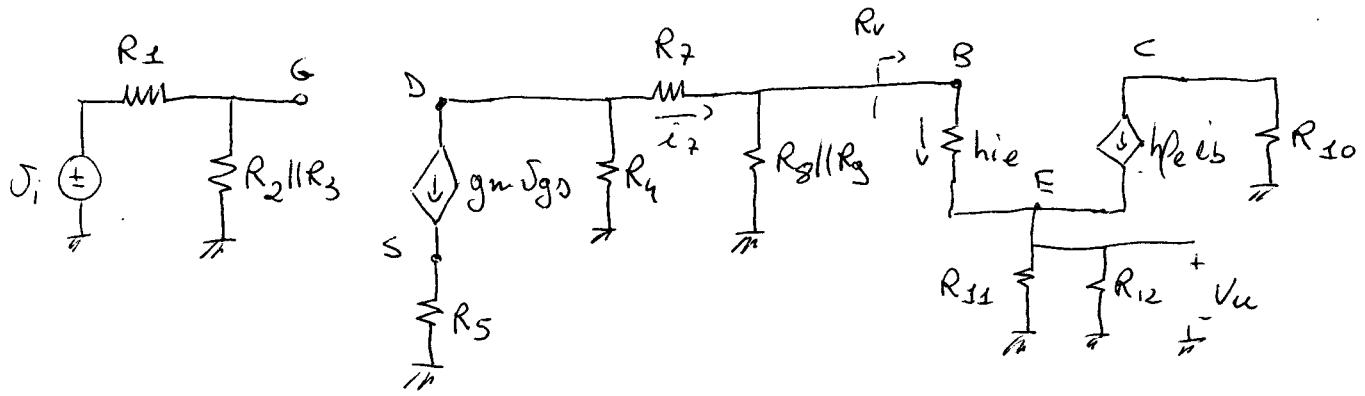
$$-5.3343V < -2.0413V \quad \text{VERIFICATO}$$

$$g_m = 2K |V_{GS} - V_T| = + 2.0413 \frac{mA}{V}$$

$$Q_1: \left\{ \begin{array}{l} I_D = 2.0834 \text{ mA} \\ V_{DS} = -5.3343 V \\ V_{GS} = -3.0413 V \\ g_m = + 2.0413 \frac{mA}{V} \end{array} \right.$$

2) Determinare espressione e valore V_u/V_i a centro banda (3)

(C_1, C_2, C_3 e C_4 cortocircuitati)



$$V_u = i_E (R_{11} || R_{12})$$

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

$$i_b = i_7 \frac{R_8 || R_9}{(R_8 || R_9) + h_{ie} + (R_{11} || R_{12})(h_{fe} + 1)} = i_7 \frac{R_8 || R_9}{(R_8 || R_9) + R_v}$$

$$R_v = h_{ie} + (R_{11} || R_{12})(h_{fe} + 1)$$

$$i_7 = (-g_m J_{gs}) \frac{R_4}{R_4 + R_7 + R_8 || R_9 || R_v}$$

$$J_{gs} = (g_m J_{gs}) R_5$$

$$J_{gs} = J_g - J_{gs} = J_g - (g_m J_{gs}) R_5$$

$$\Rightarrow J_{gs} = \frac{J_g}{1 + g_m R_5}$$

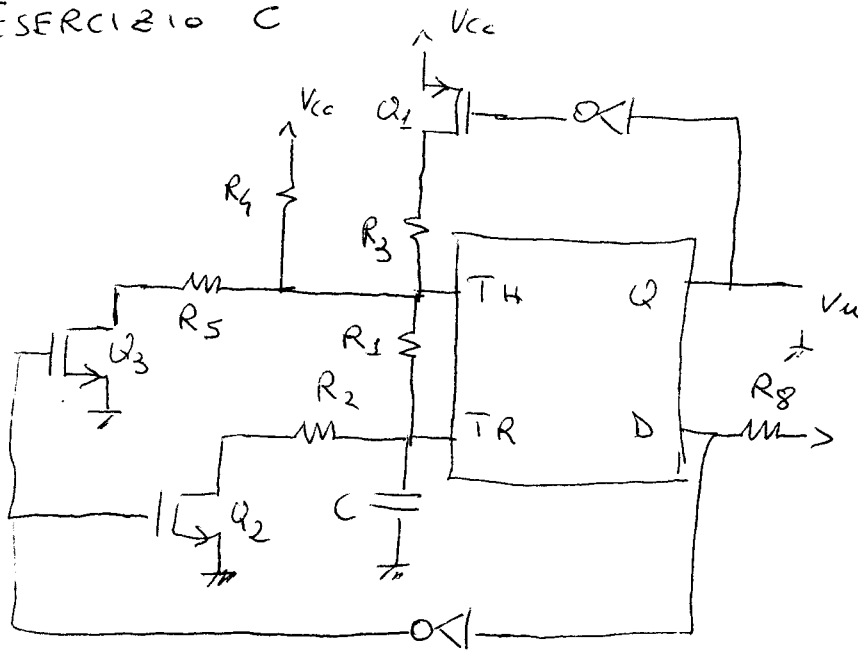
$$J_g = J_i \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = (h_{fe} + 1)(R_{11} || R_{12}) \frac{R_8 || R_9}{\underbrace{(R_8 || R_9) + h_{ie} + (R_{11} || R_{12})(h_{fe} + 1)}_{R_v}} (-g_m) \frac{R_4}{R_4 + R_7 + R_8 || R_9 || R_v}$$

$$= \frac{1}{1 + g_m R_5} \cdot \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3} = \frac{0.38}{0.9355} = -1.916$$

ESERCIZIO C

4

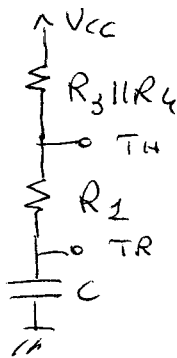


$$\begin{aligned} R_1 &= 500 \Omega \\ R_2 &= 100 \Omega \\ R_3 &= 2k \Omega \\ R_4 &= 2k \Omega \\ R_5 &= 500 \Omega \\ R_6 &= 5k \Omega \\ C &= 470nF \\ V_{CC} &= 6V \end{aligned}$$

FASE 1

$$Q = 1 \Rightarrow V_{G1} = 0V \quad V_{S1} = V_{CC} = 6V \quad V_{GS1} = -6V < V_{T1} = -1V \Rightarrow Q_1 \text{ ON}$$

$$D = HI \Rightarrow V_{G2} = V_{G3} = 0V \quad V_{S2} = V_{S3} = 0V \quad V_{GS2} = V_{GS3} = 0V < V_{T2,3} = 1V \Rightarrow Q_2, Q_3 \text{ OFF}$$



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

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

$$\text{Se } V_{TH} = 4V \Rightarrow I_1 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_3 || R_4} = 2mA$$

$$V_{cor1} = V_{TH} - R_1 I_1 = \underline{3V}$$

$$\text{VERIFICA COMPUTAZIONE: } V_{i1} < V_{cor1} < V_{f1} \\ 2V < 3V < 6V \Rightarrow \underline{OK}$$

$$R_{V1} = R_1 + (R_3 || R_4) = 1500 \Omega$$

$$\tau_1 = C R_{V1} = 705 \mu s$$

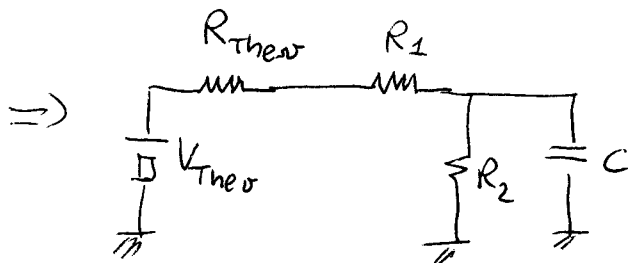
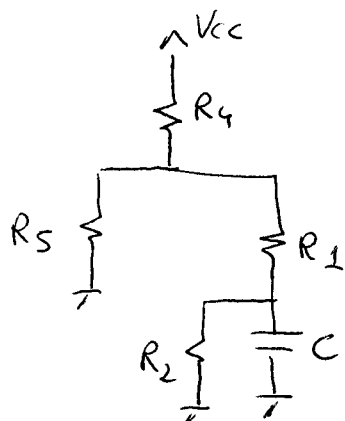
$$T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{i1} - V_{f1}}{V_{cor1} - V_{f1}} \right) = 2.028 \times 10^{-4} s$$

FASE 2

(5)

$$Q=0 \Rightarrow V_{G1}=6V \quad V_{S1}=6V \Rightarrow V_{GS1}=0V > V_{T1}=-1V \Rightarrow Q_1 \text{ OFF}$$

$$D=0 \Rightarrow V_{G2}=V_{G3}=6V \quad V_{S2}=V_{S3}=0V \Rightarrow \begin{cases} V_{GS2}=6V > V_{T2}=+1V \Rightarrow Q_2 \text{ ON} \\ V_{GS3}=6V > V_{T3}=+1V \Rightarrow Q_3 \text{ ON} \end{cases}$$



$$V_{Theor} = V_{CC} \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 1.2V$$

$$R_{Theor} = R_4 \parallel R_5 = 400\Omega$$

$$\underline{V_{i2}} = \underline{V_{con1}} = \underline{3V}$$

$$\underline{V_{con2}} = \underline{V_{i3}} = \underline{2V}$$

$$\underline{V_{f2}} = \underline{V_{Theor} \frac{R_2}{R_{Theor} + R_1 + R_2}} = \underline{0.12V}$$

VERIFICA COMMUTAZIONE : $V_{i2} > V_{con2} > V_{f2}$
 $3V > 2V > 0.12V \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$

$$\underline{R_{v2}} = R_2 \parallel (R_1 + R_{Theor}) = 90\Omega$$

$$\tau_2 = CR_{v2} = 42.3\mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{i2} - V_{f2}}{V_{con2} - V_{f2}} \right) = 1.804 \times 10^{-5} s$$

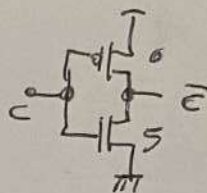
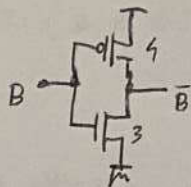
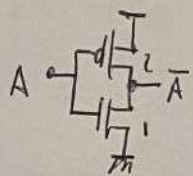
$$T = T_1 + T_2 = 2.2084 \times 10^{-4} s$$

$$\underline{f} = \underline{\frac{1}{T}} = \underline{4528.16 \text{ Hz}}$$

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

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

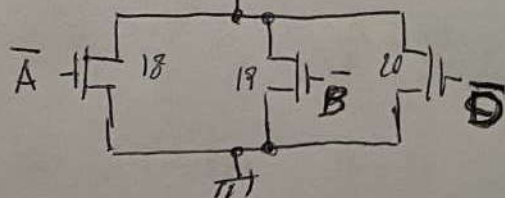
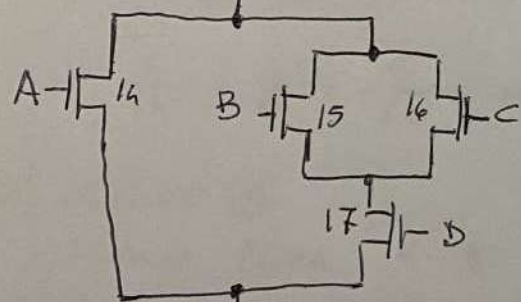
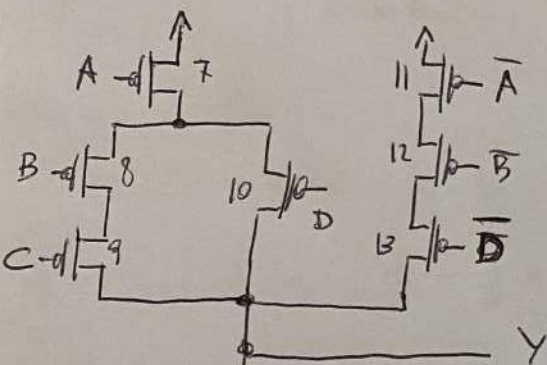
3 INVERTOR :



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

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

PON e PDM :



DIM. PON :

* PORCORSO DA 3 PMOS :

$$\begin{cases} 7-8-9 \\ 11-12-13 \end{cases} \quad \text{POSSIBILITA' ENTRATE}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,9,11,12,13} = X$$

$$\frac{1}{X} + \frac{1}{X} + \frac{1}{X} = \frac{3}{X} = \frac{1}{P}$$

$$X = \left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,9,11,12,13} < 3P = 15$$

* PORCORSO DA 2 : 7-10 POSSIBILITA' (CON 7 G/A DIMENSIONATO)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{10} = Z \rightarrow \frac{1}{Z} + \frac{1}{3P} = \frac{1}{P}$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{3-1}{3P} = \frac{2}{3P}$$

$$Z = \left(\frac{W}{L}\right)_{10} = \frac{3P}{2} = 7.5$$

DIT PDN:

#) PORCORSI DA 3 NIKS:

$$\begin{cases} 15-17-18 & \text{OK} \\ 15-17-19 & \text{IMPOSS (B e } \bar{B}) \\ 15-17-20 & \text{IMPOSS (D e } \bar{D}) \\ 16-17-18 & \text{OK} \\ 16-17-19 & \text{OK} \\ 16-17-20 & \text{IMPOSS (D e } \bar{D}) \end{cases}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{15,16,17,18,19} = t$$

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{t} + \frac{1}{t} = \frac{3}{t} = \frac{1}{m}$$

$$t = \left(\frac{W}{L}\right)_{15,16,17,18,19} = 3m = 6$$

#) PORCORSI DA 2 NIKS:

$$\begin{cases} 14-18 & \text{IMPOSS (A e } \bar{A}) \\ 14-19 \\ 14-20 \end{cases} \text{ POSSIBILI, 19 GIÀ DIMENSIONATO, 14 e 20 DA DIT.}$$

9) OPZIONE (A)

CONSIDERO PRIMA 14-20:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14,20} = J \quad \frac{1}{J} + \frac{1}{J} = \frac{2}{J} = \frac{1}{m} \rightarrow J = \left(\frac{W}{L}\right)_{14,20} = 2m = 4$$

VERIFICO FON DEL PORCORSO 14-19

$$\frac{1}{2m} + \frac{1}{3m} = \frac{5}{6m} < \frac{1}{m} \quad \text{OK, DIMENSIONAMENTO VALIDO}$$

10) OPZIONE (B)

CONSIDERO PRIMA 14-18

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14} = F \quad \frac{1}{F} + \frac{1}{3m} = \frac{1}{m} \rightarrow \frac{1}{F} = \frac{3-1}{3m} = \frac{2}{3m} \rightarrow F = \left(\frac{W}{L}\right)_{14} = \frac{3m}{2} = 3$$

poi CONSIDERO 14-20

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{20} = K \quad \frac{1}{K} + \frac{1}{\frac{3m}{2}} = \frac{1}{m} \rightarrow \frac{1}{K} = \frac{3-2}{3m} = \frac{1}{3m} \rightarrow K = \left(\frac{W}{L}\right)_{20} = 3m = 6$$

CONFRONTO L'AREA OCCUPATA DA 14 E 20 NELLE DUE OPZIONI,
USANDO I W/L :

	OPZ. A	OPZ. B
14	2m	3m/2
20	2m	3m
14+20	4m = 8	4.5m = 9

\Rightarrow L'OPZIONE (A) è
DA PREFERIRE IN
QUANDO AD AREA
MINIMA