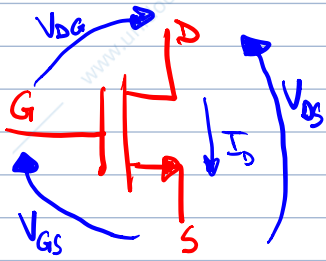


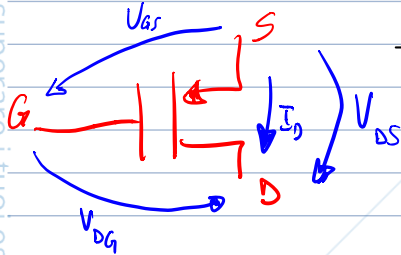
NMOS



	CONDIZIONE	CORRENTE DI DRAINE
INTERDIZIONE:	$V_{GS} < V_{tn}$	$I_D = 0$
TRIODDO:	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{tn}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 2k_n \left[(V_{GS} - V_{tn}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$
(APPROX. OHMICA):	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{tn}$	$I_D \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{tn}) \cdot V_{DS} \right] = \frac{1}{R_{DS}} V_{DS}$ $L \bullet R_{DS} = \frac{1}{2k_n (V_{GS} - V_{tn})}$
SATURAZIONE:	$V_{GS} > V_{tn}$ $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$	$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn})^2 = k_n (V_{GS} - V_{tn})^2$

CON: $k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$

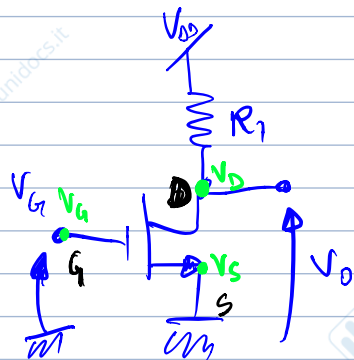
PMOS



	CONDIZIONE	CORRENTE DI DRAINE
INTERDIZIONE:	$V_{GS} > V_{tp}$	$I_D = 0$
TRIODDO:	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} > V_{GS} - V_{tp}$	$I_D = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{tp}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 2k_p \left[(V_{GS} - V_{tp}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$
(APPROX. OHMICA):	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} \gg V_{GS} - V_{tp}$	$I_D \approx \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{tp}) \cdot V_{DS} \right] = \frac{1}{R_{DS}} V_{DS}$ $L \bullet R_{DS} = \frac{1}{2k_p (V_{GS} - V_{tp})}$
SATURAZIONE:	$V_{GS} < V_{tp}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{tp}$	$I_D = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tp})^2 = k_p (V_{GS} - V_{tp})^2$

CON: $k_p = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L}$

ED. A



$$V_{DD} = 12V \quad R_1 = 10k \quad V_T = 2V$$

$$K_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 1 \frac{mA}{V^2}$$

a) V_{out} se $V_G = 1,5V$; $4V$?

→ $V_G = 1V \Rightarrow V_{GS} < V_T \Rightarrow$ MOS è in **INERDIZIONE**

$$\Rightarrow I_D = 0A$$

$$V_O = V_{DD} = 12V$$

$$\text{NB: } V_{GS} = V_G - V_S$$

→ $V_G = 2,5V \Rightarrow V_{GS} = 2,5V > 2V = V_T$

⇒ suppongo MOS in **SATURAZIONE**:

$$\text{Hp: } V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = K V_{ov}^2 = 1 \cdot 0,5^2 = 0,25mA$$

$$V_{R1} = I_D R_1 = 2,5V$$

$$V_{out} = V_{DS} = V_{DD} - V_{R1} = 12 - 2,5V = 9,5V$$

$$V_{DS} = 9,5V > 0,5V = V_{GS} - V_T$$

⇒ MOS in **SATURAZIONE** è verificato.

→ $V_G = 4V \Rightarrow V_{GS} = 4V > 2V = V_T$

suppongo MOS in **SATURAZIONE**:

$$\text{Hp: } V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_D = \dots = 4mA$$

$$V_{R1} = I_D R_1 = 40V$$

$$V_{DS} = V_{out} = V_{DD} - V_{R1} = 12 - 40V = -28V \Rightarrow V_{DS} = -28V < 2V = V_{GS} - V_T$$

⇒ Hp SATURAZIONE NON verificata!

● BONA TRIODO: $V_{DS} < V_{GS} - V_t$

$$I_D = K [2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2] = K [4V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Inoltre I_D è la stessa che scorre su R_1 : $I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_1} = \frac{12 - V_{DS}}{10k}$

⇒ Egualo le equazioni e lo:

$$K [4V_{DS} - V_{DS}^2] = \frac{12 - V_{DS}}{10k} \Rightarrow V_{DS}^2 - 4,1V_{DS} + 1,2 = 0$$

$$\hookrightarrow V_{DS}^I = 0,32V$$

$$\hookrightarrow V_{DS}^{II} = 3,32V$$

Buoni in zona TRIODO: $V_{DS} < V_{GS} - V_t \Rightarrow$ scelgo $V_{DS} = V_{ov} = 0,32V$

⑥ Det. errore che si ottiene con approx. ohmica se $V_{GS} = 4V$

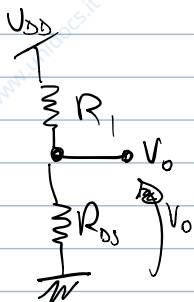
Se $V_{GS} = 4V$ MOS è IN TRIODO $\Rightarrow V_{DS} = 0,32V \ll V_{GS} - V_t = 2V$

Quando $V_{DS} \ll V_{ov} = V_{GS} - V_t$ posso usare approx. ohmica:

Cioè approssimo MOS come resistenza $R_{DS,ON} = \frac{1}{2k_n(V_{GS} - V_{th})}$

e la corrente di drain sarà: $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS,ON}}$

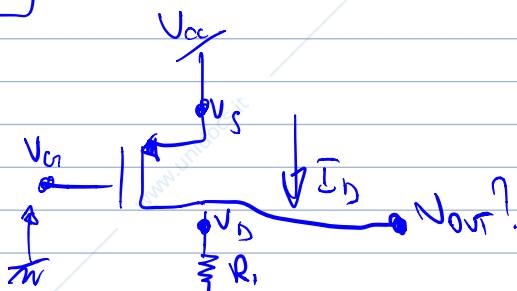
$$\Rightarrow R_{DS,ON} = \frac{1}{2k_n(V_{GS} - V_{th})} = 250\Omega$$



$$V_O = 12V \cdot \frac{R_{DS}}{R_1 + R_{DS}} = 0,293V$$

⇒ con Approx. ohmica ottengo 0,293 al posto di 0,32V con un errore del 9% quindi.

ES. 2



$$V_{CC} = 3.3V$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$V_t = -1V$$

$$K = 2 \frac{mA}{V^2}$$

ⓐ Det. V_{out} se $V_G = 3,3V$, $0V$?

$V_G = 3,3V \Rightarrow$ lo prendo: $V_{GS} = 3,3V - 3,3V = 0V$

$V_{GS} > V_{tp} = -1V \Rightarrow$ INTERDIZIONE $\Rightarrow I_D = 0A$
 $\Rightarrow V_{out} = 0V$

$\Rightarrow V_G = 0V \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = 0 - 3,3V = -3,3V$

$\Rightarrow V_{GS} < V_{tp}$

↳ Suppongo sono in saturazione:

$V_{DS} < V_{GS} - V_t$

$I_D = k V_{ov}^2 = k (V_{GS} - V_t)^2 = 10,6 mA$

$V_{R1} = I_D R_1 = 10,6 mA \cdot 1 k\Omega = 10,6V$

$V_{DS} = V_D - V_S = V_{R1} - V_{CC} = 10,6 - 3,3V = 7,3V$

Ipotesi ipotesi non verificata.

\Rightarrow Mos è in triodo:

$V_{DS} > V_{GS} - V_t$

$I_D = k [2 (V_{GS} - V_t) V_{DS} - V_{DS}^2] = k [-4,6 V_{DS} - V_{DS}^2]$

corrente che scorre I_D su R_1 è la stessa: $I_D = \frac{V_{ov}}{R_1} = \frac{V_{DS} + 3,3V}{1k}$

$\Rightarrow k [-4,6 V_{DS} - V_{DS}^2] = \frac{V_{DS} + 3,3}{1k} \Rightarrow V_{DS}^2 + 5,1 V_{DS} + 1,65 = 0$

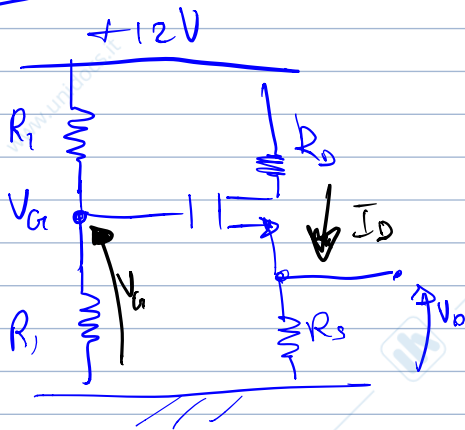
$V_{DS}' = -4,75V$
 $V_{DS}'' = -0,35V$

Per triodo devo avere: $V_{DS} > V_{GS} - V_t \Rightarrow V_{DS} = -0,35V$

$\Rightarrow V_{out} = V_{DS} + 3,3V = 2,95V$

NB: nel triodo
devo sempre
mettere a
confronto
2 eq.

Ex. 3



$$R_1 = 10k = R_2$$

$$R_0 = R_3 = 1k$$

$$V_t = 1V$$

$$k_n = \frac{4mA}{V^2}$$

Q. Var?

Determino V_{GS} : **GATE DEL MOS ha impedenza infinita. \Rightarrow No corrente verso il GATE.**

$$\Rightarrow V_{GS} = 12 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 6V \Rightarrow V_{GS} = V_G - V_{DS} = 6V - R_3 \cdot I_D$$

$$\hookrightarrow I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_3}$$

Ipotesi MOS in SATURAZIONE: $H_{p1}: V_{GS} > V_t$

$$H_{p2}: V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

1° Metodo risolutivo: $I_D = k_n (V_{GS} - V_t)^2$ MOS in SAT.

$$I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_3} \quad \text{Eq. Kirchhoff alla maglia}$$

$$\Rightarrow \frac{6 - V_{GS}}{R_3} = k_n (V_{GS} - V_t)^2$$

pongo $x = V_{GS} - V_t$

$$\Rightarrow 6V - V_t - x = R_3 k_n x^2 \quad 4x^2 + x - 5 = 0$$

$$x^I = 1V \quad ; \quad x^{II} = -\frac{5}{4}V$$

ho: $(V_{GS} - V_t)^I = 1V$; ~~$(V_{GS} - V_t)^{II} = -\frac{5}{4}V$~~ \hookrightarrow scarto perché

ho l'ipotesi H_{p1} che dice: $V_{GS} - V_t > 0$.

$$\Rightarrow V_{GS} - V_t = 1V$$

$$\Rightarrow V_{GS} = 2V$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{6V - V_{GS}}{R_3} = \frac{4}{1k} = 4mA$$

$$V_S = R_3 I_D = 4V$$

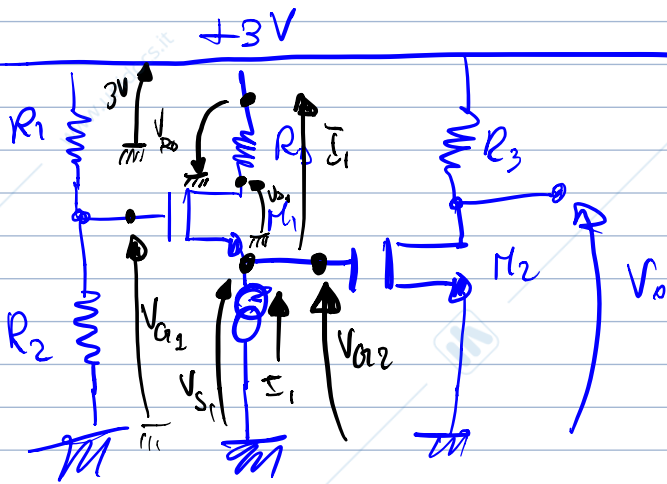
$$V_D = 12V - R_0 I_D = 8V$$

$$V_{DS} = 6V > 1V = V_{GS} - V_t \Rightarrow \text{è anche verificata l' } H_{p2}.$$

\Rightarrow SATURAZIONE e CORRENTE.

$$V_{OUT} = V_S = R_3 I_D = 4V$$

E8.5



$$R_1 = 10k \quad R_2 = 50k \quad R_0 = 700\Omega$$

$$R_3 = 1.1k \quad V_t = 0.5V \quad I_1 = 1mA$$

$$\frac{1}{2} \mu C_{ox} = 100 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_2 = 100$$

Ⓐ Dimensionare $\left(\frac{W}{L}\right)_1$ tale che $V_{G2} = 1V$

$$\Rightarrow V_{G1} = 3V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2.5V$$

Da conseguenza ricavare che: $V_{G2} = V_{S1} = 1V$

$$\Rightarrow V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = 2.5V - 1V = 1.5V > V_t$$

\Rightarrow MOS1 non è in interdizione!

$$V_{RD} = I_1 \cdot R_0 = 0.7V \quad V_{D1} = 3V - V_{RD} = 3 - 0.7 = 2.3V$$

$$V_{DS1} = 2.3V - 1V = V_{D1} - V_{S1} = 1.3V$$

$$\Rightarrow V_{DS1} > V_{GS1} - V_t = 1V \Rightarrow \text{MOS } \bar{c} \text{ IN SATURAZIONE!}$$

$$\Rightarrow I_D = I_1 = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS1} - V_t)^2$$

$$\hookrightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{I_1}{\frac{1}{2} \mu C_{ox}} \cdot \frac{1}{(1.5V - 0.5V)^2} = 10$$

Ⓑ Determinate V_{DS2} ?

$$V_{GS2} = 1V > V_t$$

$$V_{DS2} = 3 - I_{D2} R_3$$

Suppongo saturazione: $I_{DS2} = k V_{DS2}^2 = 2.5mA$

$$V_{DS2} = 3 - I_{D2} R_3 = 0.25$$

$$V_{DS2} < V_{GS2} - V_t \Rightarrow \text{ipotesi di saturazione NON è verificata.}$$

$$\Rightarrow M2 \bar{c} \text{ IN TRIODO: } I_{D2} = k [2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$I_{D2} = K \left[2 \left(\frac{1}{2} V_{DS2} \right) - V_{DS2}^2 \right]$$

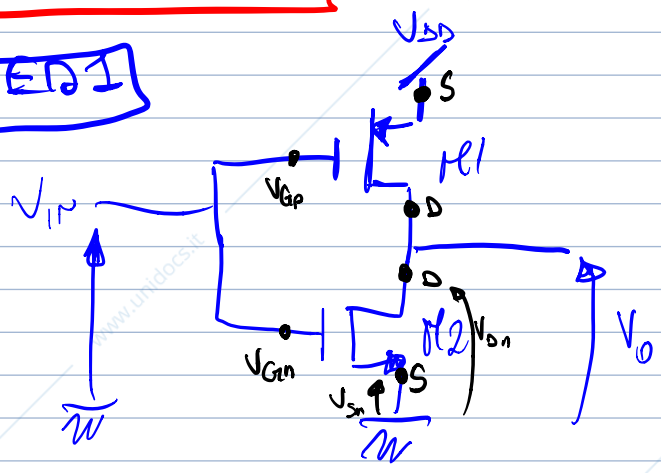
$$V_{DS2} = 3 - I_{D2} R_3 \quad \Rightarrow \quad I_{D2} = \frac{3 - V_{DS2}}{R_3}$$

$$K [V_{DS2} - V_{DS2}^2] = \frac{3 - V_{DS2}}{R_3} \Rightarrow \dots \Rightarrow V_{DS2} = 0,393V = V_{out}$$

PARTE 2

4

ED1



$$V_{DD} = 5V$$

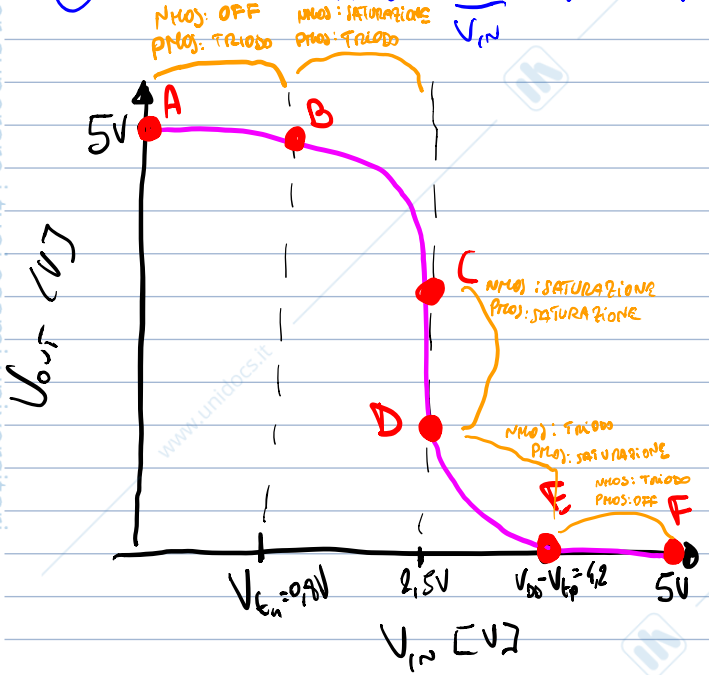
$$V_{tn} = |V_{tp}| = 0,8V$$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} = 75 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\frac{1}{2} \mu_p C_{ox} = 30 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{2\mu m}{1\mu m} \quad \left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{5\mu m}{1\mu m}$$

ⓐ Det. Caratteristica $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ dell'invertitore CMOS



Dal circuito: $V_{Gn} = V_{Gp} = V_{in}$

$$\begin{cases} V_{Sn} = 0V & V_{Sp} = V_{DD} \\ V_{GSn} = V_{Gn} - V_{Sn} = V_{in} - 0V = V_{in} \\ V_{GSp} = V_{in} - V_{DD} \end{cases}$$

• PUNTO A : $V_{in} = 0V$, $V_{out} = 5V$

↳ NMOS : $V_{GSn} = 0V < 0,8V = V_{tn} \Rightarrow$ INTERDIZIONE, NO SCORRE CORRENTE

↳ PMOS : $V_{GSp} = V_{in} - V_{DD} = 0 - 5V = -5V < -0,8V = V_{tp}$

\Rightarrow PMOS è acceso \Rightarrow Uscita portata a V_{DD} :

$$V_o = V_{DD} = 5V$$

$\Rightarrow V_{asp} = V_D - V_S = 5 - 5 = 0V > -4,2V = V_{asp} - V_{tp}$
 \Rightarrow pmos è in TRIODO e può modellizzarlo come resistenza. (zona OMMIA)

• PUNTO B: $V_{in} = 0,8V$, $V_{out} = 5V$

lungo AB NO cambio di polarizzazione

$V_o = V_{DD} = 5V$
 \rightarrow nMOS: NON si accende fino a quando V_{gs} non raggiunge $0,8V$

in B ho: $V_{gsn} = 5V > 0 = V_{gsn} - V_{tn}$
 nMOS è al Bordo della saturazione!

\rightarrow pMOS: $V_{asp} = -4,2V < -0,8V = V_{tp}$

$$V_{asp} = 0 > -3,4V = V_{asp} - V_{tp}$$

\Rightarrow pmos è ancora in zona TRIODO (OMMIA)

• PUNTO C: Per determinare V_{in} in C verifico che pmos e nmos siano

in saturazione $\Rightarrow I_{Dn} = k_n (V_{gsn} - V_{tn})^2$

$$I_{Dp} = k_p (V_{gsp} - V_{tp})^2$$

Applico Kirchhoff delle correnti al nodo V_{out} : $I_{Dn} = I_{Dp}$

$$k_n (V_{gsn} - V_{tn})^2 = k_p (V_{gsp} - V_{tp})^2 \quad \text{dove: } k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_n = 150 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$k_p = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_p = 150 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\Rightarrow k_n = k_p$$

$$\Rightarrow (V_{gsn} - V_{tn})^2 = (V_{gsp} - V_{tp})^2$$

$$\sqrt{(V_{gsn} - V_{tn})^2} = \sqrt{(V_{gsp} - V_{tp})^2}$$

$$|V_{gsn} - V_{tn}| = |V_{gsp} - V_{tp}|$$

$$|V_{in} - V_{tn}| = |V_{in} - V_{DD} - V_{tp}| \quad \leftarrow \text{dichiaro i MOS in saturazione}$$

quindi: V_{in} nmos sarà positiva, V_{in} pmos sarà negativa

$$\Rightarrow V_{in} - V_{tn} = -(V_{in} - V_{DD} - V_{tp})$$

$\Rightarrow V_{in} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5V$ \rightarrow in questo punto il nmos passa da TRIODO A SATURAZIONE.

pmos è al bordo tra TRIODO e SATURAZIONE \Rightarrow studiamolo

$$V_{DSP} = V_{GSP} - V_{TP} = \frac{V_{DD}}{2} - V_{DD} - (-0,8) = -1,7V$$

$$\Rightarrow V_{OUT} = V_{DD} + V_{DSP} = 3,3V$$

\Rightarrow Nel punto C siamo a : 2,5V, 3,3V.

\hookrightarrow nMOS : $V_{GSn} = 2,5V > 0,8V = V_{tn}$

$V_{DSn} = 3,3V > 1,7V = V_{GSn} - V_{tn}$

} \Rightarrow nMOS in C e⁻ IN SATURAZIONE

\hookrightarrow pMOS : $V_{GSp} = -2,5V < -0,8V = V_{tp}$

$V_{DSp} = -1,7V = -1,7V = V_{GSp} - V_{tp} \Rightarrow$ pMOS e⁻ al bordo tra

TRIODO e SATURAZIONE.

• PUNTO D:

V_{in} rimane la stessa $\Rightarrow V_{in} = 2,5V$

V_{out} = impinge condizione di saturazione per transistor nMOS

$\Rightarrow V_{DSn} = V_{GSn} - V_{tn} \Rightarrow V_{out} = V_{DSn} = 2,5V - (0,8V) = 1,7V$

• PUNTO D : 2,5V , 1,7V:

\hookrightarrow nMOS : $V_{GSn} = 2,5V > V_{tn} = 0,8$

$V_{DSn} = V_{Dn} - V_{Sn} = 1,7V = V_{GSn} - V_{tn} = 1,7V$

\Rightarrow nMOS sta passando da SATURAZIONE A TRIODO.

\hookrightarrow pMOS : $V_{GSp} = -2,5V < -0,8V = V_{tp}$

$V_{DSp} = -3,4V < -1,7V = V_{GSp} - V_{tp}$

\Rightarrow pMOS e⁻ in SATURAZIONE.

• PUNTO E (4,2V , 0V)

\hookrightarrow nMOS : $V_{GSn} = 4,2V > 0,8V = V_{tn}$

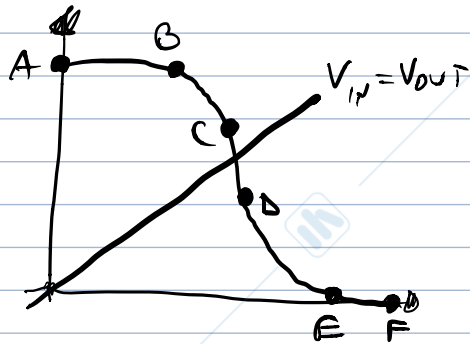
$V_{DSn} = 0V < 3,4V = V_{GSn} - V_{tn}$

\Rightarrow nMOS e⁻ IN TRIODO.

\hookrightarrow pMOS : $V_{GSp} = 0V > -0,8V = V_{tp} \Rightarrow$ pMOS e⁻ IN INTERDIZIONE.

b) Calcolare soglia logica inverter V_{th}

$$V_{th} = V_{in} = V_{out} \quad (\text{regolare per trovare } V_{th})!!$$



\Rightarrow ipotizzo che intersezione cade nel tratto CD.
 \Rightarrow NMOS e PMOS saturati.

$$\Rightarrow V_{in} = V_{out} = \frac{V_{DD}}{2}$$

Verifico che valore di V_{out} appartiene al tratto CD:

$$V_{out D} < V_{out} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5V < V_{out C}$$

$$V_{out D} = 1,7V, \quad V_{out C} = 3,3V \quad \Rightarrow \text{condiz. e' verificata}$$

$$\text{e la soglia e' } V_{th} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5V$$

c) Det. come varia se i transistor sono ad area minima:

$$\text{transistor ad area minima: } \left(\frac{W}{L}\right)_n = \left(\frac{W}{L}\right)_p = 1$$

$$\Rightarrow k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_n = 75 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$k_p = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_p = 30 \frac{\mu A}{V^2}$$

\rightarrow Jogo gli 0 espressioni della corrente in saturazione:

$$(V_{in} - V_{tn})^2 = \frac{k_p}{k_n} (V_{DD} - V_{in} - V_{tp})^2$$

$$V_{in} - V_{tn} = \pm \sqrt{\frac{k_p}{k_n}} (V_{DD} - V_{in} - V_{tp})$$

$$\Rightarrow V_{th} = V_{in} = 2,1V$$

ED. 2

$$V_{DD} = 5V$$

$$V_{th} = |V_{tp}| = 1V$$

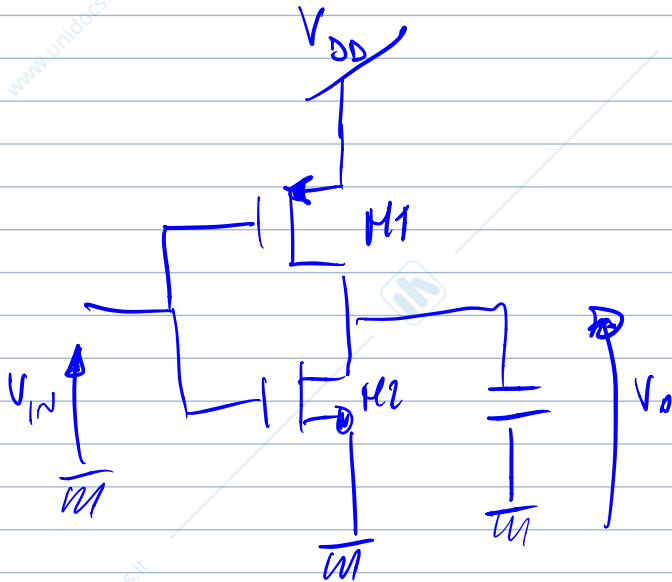
$$\frac{1}{2} \mu_n C'_{ox} = 50 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\frac{1}{2} \mu_p C'_{ox} = 20 \frac{\mu A}{V^2}$$

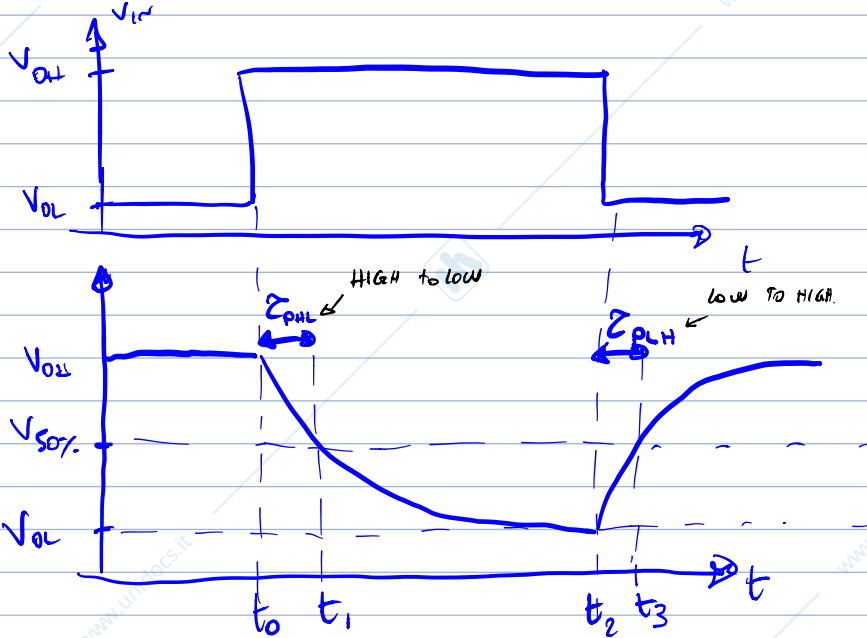
$$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{10 \mu m}{1 \mu m}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{5 \mu m}{1 \mu m}$$

$$C = 1 pF$$

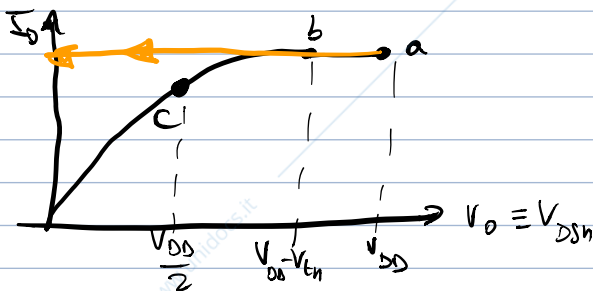


2) Det. ritardo propagazione tra ingresso e uscita inverter:

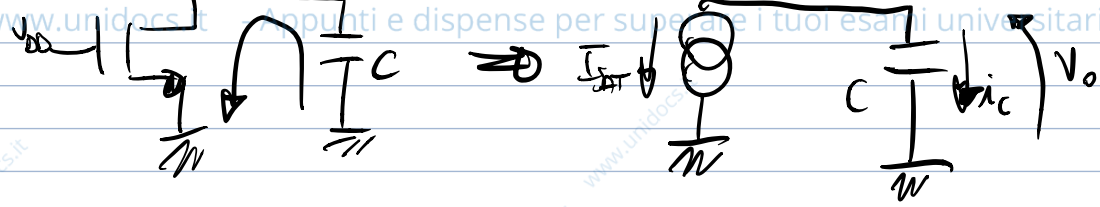


$$\text{Ritardo di propagazione: } \tau_p = \frac{\tau_{PHL} + \tau_{PLH}}{2}$$

Appr. SATURAZIONE: Suppongo corrente costante lungo tutto il periodo di carica o scarica \Rightarrow Suppongo che i MOS siano sempre in SATURAZIONE:



SCARICA VIA NMOSE



⇒ Approssimo r_{DS} a gen. corrente:

$$I_{SATn} = I_{Dn}(\text{SATURAZIONE}) = k_n (V_{ov})^2 = \frac{50 \mu A}{V^2} 10 (5V - 1V)^2 = 8 \text{ mA}$$

Applico LKC: $I_{SATn}(t) = -i_c(t) \Rightarrow I_{SATn}(t) = -C \frac{dV_{out}(t)}{dt}$

⇒ suppongo $t_0 = 0 \Rightarrow \int_0^{t_{PHL}} I_{SATn}(t) dt = \int_{\frac{V_{DD}}{2}}^{V_{DD}} -C dV_{out}(t)$

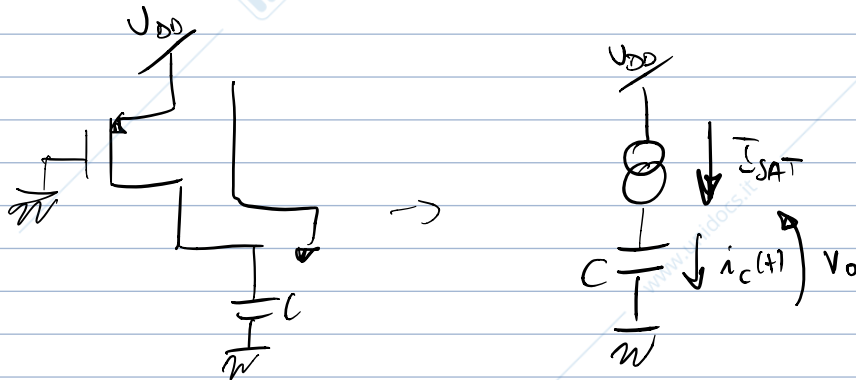
$$I_{SATn} \cdot t_{PHL} = C \cdot \frac{V_{DD}}{2}$$

$$\Rightarrow t_{PHL} = C \cdot \frac{V_{DD}}{2} \cdot \frac{1}{I_{SATn}} = 312 \text{ ps}$$

⇒ in questa approssimazione abbiamo:

- ↳ SOVRASTIMATO corrente di scarica
- ↳ SOTTOSTIMATO tempo di scarica.

ANALISI VIA PMOS:



approx pmos a gen. corrente:

$$I_{SATp} = I_{Dp}(\text{SAT.}) = k_p (V_{ov})^2 = \frac{20 \mu A}{V^2} 5 (-5V + 1V)^2 = 1,6 \text{ mA}$$

$$\int_0^{t_{PLH}} I_{SATp}(t) dt = \int_0^{\frac{V_{DD}}{2}} C \cdot dV_{out}(t)$$

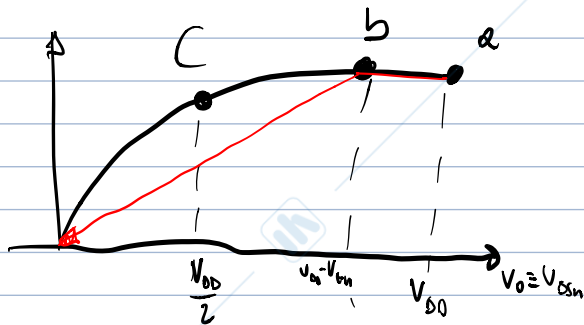
$$t_{PLH} = C \cdot \frac{V_{DD}}{2} \cdot \frac{1}{I_{SATp}} = 1,56 \text{ ns}$$

$$\Rightarrow \tau_p = \frac{\tau_{PHL} + \tau_{PLH}}{2} = \frac{0,312 \text{ ns} + 1,56 \text{ ns}}{2} = 936 \text{ ns}$$

• Il risultato è dato da sovrastima corrente e sottostima tempo propagazione

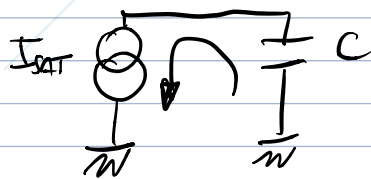
↳ APPR. SATURAZIONE + CARICA:

↳ SCARICA VIA NMOS:

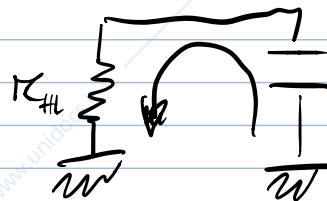


tratto a-b: corrente costante \Rightarrow REG. SATURAZIONE
 tratto b-c: NMOS approx come resistenza r_{HL}

\Rightarrow a-b:



b-c:



\Rightarrow tempo t_{ab} : $\int_0^{t_{ab}} I_{SAT_n}(t) dt = \int_{V_{DD}}^{V_{DD}-V_{tn}} -C dV_{OUT}(t)$

$I_{SAT_n} \cdot t_{ab} = C \cdot V_{tn} \Rightarrow t_{ab} = C \cdot \frac{V_{tn}}{I_{SAT_n}} = 125 \text{ ps}$

$\Rightarrow t_{bc}$ rappresenta la scarica esponenziale:

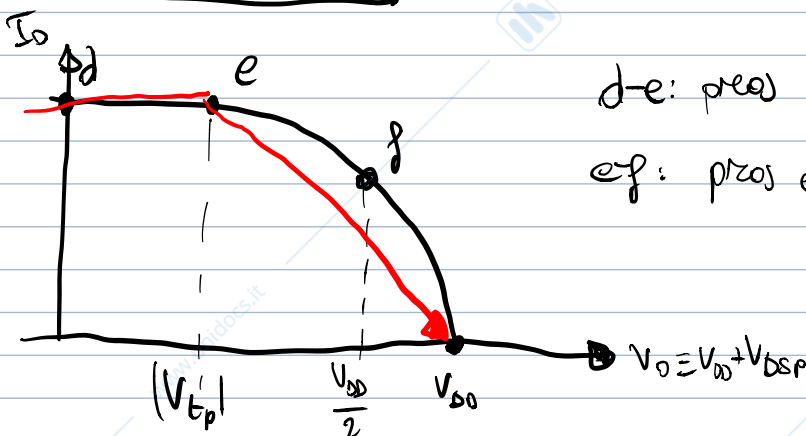
$\Rightarrow r_{HL} = \frac{V_{DD} - V_{tn}}{I_{SAT_n}} = \frac{V_{DD} - V_{tn}}{k_n (V_{DD} - V_{tn})^2} = \frac{1}{k_n (V_{DD} - V_{tn})} = 500 \Omega$

t_{bc} posso trovarlo da:

$\frac{V_{DD}}{2} = (V_{DD} - V_{tn}) e^{-\frac{t_{bc}}{\tau}} \Rightarrow t_{bc} = \tau \ln\left(2 \frac{V_{DD} - V_{tn}}{V_{DD}}\right) = 235 \text{ ps}$
 τ è valore di $r_{HL} = 500$

$\Rightarrow t_{PHL} = t_{ab} + t_{bc} = 360 \text{ ps}$

↳ CARICA VIA PMOS:



d-e: pmos saturazione

e-f: pmos e resist. r_{HL}

Per t_{de} : $\int_0^{t_{de}} I_{SATP}(t) dt = \int_0^{t_{de}} C dV_{out}(t)$ $t_{de} = C \cdot \frac{|V_{tp}|}{I_{SATP}} = 625 ps$

Per t_{eg} : $r_{LH} = \frac{V_{DD} - |V_{tp}|}{I_{SATP}} = 2,5 k\Omega$

$\rightarrow \frac{V_{DD}}{2} = V_{DD} + (|V_{tp}| - V_{DD}) e^{-\frac{t_{eg}}{r_{LH}}} \Rightarrow t_{eg} = r_{LH} \ln \left(2 \frac{V_{DD} - |V_{tp}|}{V_{DD}} \right) = 1,17 ns$

$t_{PLH} = t_{de} + t_{eg} = 1,8 ns$

$\Rightarrow \tau_p = \frac{\tau_{PHL} + \tau_{PLH}}{2} = 1,08 ns \rightarrow$ questo risultato sottoestima consistentemente e sovrastima tempo propagazione

b) Stimare quale è il tempo necessario affinché l'inverter completi la sua transizione:

↳ per la APPROX. SATUR.: i tempi calcolati prima (utilizzano la metà del tempo della transizione):

\Rightarrow raddoppio i tempi come buona approx:

$t_{1 \rightarrow 0} = 2 \cdot t_{HL} = 2 \cdot 312 ps = 624 ps$

$t_{0 \rightarrow 1} = 2 \cdot t_{LH} = 2 \cdot 1,56 ns = 3,12 ns$

↳ APPROX SAT+QNT:

$t_{1 \rightarrow 0} = t_{ab} + 3 t_{bc} = 125 ps + 3 \cdot 500 \Omega \cdot 1 pF = 1,6 ns$

$t_{0 \rightarrow 1} = t_{de} + 3 t_{eg} = 625 ps + 3 \cdot 2500 \Omega \cdot 1 pF = 8,1 ns$

c) Max frequency con DUTY CYCLE 50% in ingresso all'inverter che consente completamente di misura transizione:

↳ APPROX. SAT:

$\frac{T}{2} = t_{0 \rightarrow 1} = 3,12 ns$

\Rightarrow

$T = 2 \cdot t_{0 \rightarrow 1}$

$\Rightarrow f = \frac{1}{T} = 160 MHz$

↳ APPROX. SAT+QNT:

$\frac{T}{2} = t_{0 \rightarrow 1} = 8,1 ns$

$\Rightarrow T = 2 \cdot t_{0 \rightarrow 1}$

$\Rightarrow f = \frac{1}{T} = 62 MHz$

t_{0-1} Sono le transizioni più lente e quindi le peggio.

d) Potenza Media Dissipata quando in ingresso ho il segnale del punto c)?

Energia raccolta dalla carica della capacità:

$$E_{\text{carica}} = \int_0^{T/2} V_{\text{out}} I_D(t) dt = C \int_0^{T/2} V_{\text{out}} \frac{dV_{\text{out}}(t)}{dt} dt = C \int_0^{V_{DD}} V_{\text{out}} dV_{\text{out}} = \frac{1}{2} C V_{DD}^2$$

Nello scarico la stessa quantità di Energia viene dissipata dall'output:

$$P_{\text{DINAMICA}} = \frac{E_{\text{carica}} + E_{\text{scarica}}}{T} = \left(\frac{1}{2} C V_{DD}^2 + \frac{1}{2} C V_{DD}^2 \right) \cdot \frac{1}{T} = C V_{DD}^2 \cdot f$$

$$P_{\text{DINAMICA SATURAZIONE}} = C \cdot V_{DD}^2 \cdot f_{\text{SAT}} = 1 \mu\text{F} \cdot 5^2 \text{V}^2 \cdot 160 \text{kHz} = 4 \text{mW}$$

$$P_{\text{DINAMICA SATURAZIONE}} = C \cdot V_{DD}^2 \cdot f_{\text{SATURAZIONE}} = 1 \mu\text{F} \cdot 5^2 \text{V}^2 \cdot 62 \text{kHz} = 1,55 \text{mW}$$