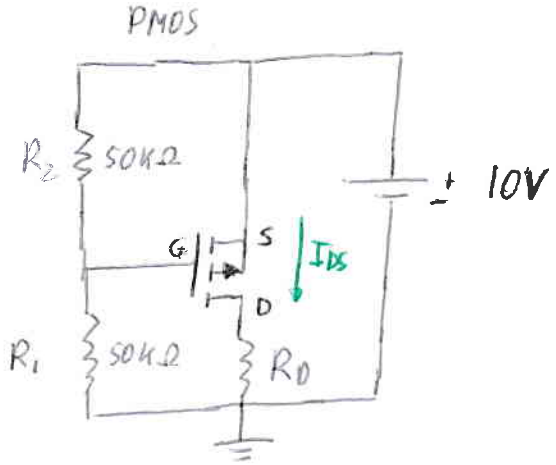
Juan Carlos Llamas Núñez

Entregable

Ejercicio 4.- El transistor está caracterizado por $V_T = -3V$ y $K = 3 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V^2}$. Determina en que región opera y los valores de V_{GS}, V_{DS} e I_{DS} para $R_D = 800\Omega$, $R_D = 25K\Omega$.



Independientemente del valor de R_D se tiene que

$$V_G = V_{R_1} = I_{R_1} \cdot R_1 = \frac{10V}{R_1 + R_2} R_1 = 5V$$

También sabemos que $V_S = 10V$

$\Longrightarrow V_{GS} = -5V < -3V = V_T$ por lo que hay canal P.

Podemos suponer en primer lugar que el transistor está en la zona de saturación.

$$V_D = R_D \cdot I_{DS} \quad y \quad V_{DS} = R_D I_{DS} - 10V$$

$$\Longrightarrow I_{DS} = \frac{k}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = k(-5V - (-3V))^2 = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2\, A = 6 \cdot 10^{-3} A$$

Para $R_D = 800\Omega \Longrightarrow V_{DS} = 0{,}8k\Omega \cdot 6mA - 10V = -5{,}2V$

y $V_{GS} - V_{DS} = -0{,}2V \quad -3V = V_T$ que es la condición de que el transistor esté en la zona de saturación como habíamos supuesto.

Sin embargo $R_D = 25k\Omega \Rightarrow V_{DS} = 25k\Omega \cdot 6mA - 10V = 140V$

y $V_{GS} - V_{DS} = -5V - 140V = -145V < -3V = V_T$

por lo que el transistor trabaja en la zona lineal.

$$\Rightarrow I_{DS} = k(V_{GS}-V_T)\,V_{DS} = k(V_{GS}-V_T)(R_D I_S - 10V) =$$

$$= 3\,\frac{mA}{V^2}\,(-2V)(R_D I_S - 10V) = 60\,mA - 6 R_{DS} I_{DS}\,\frac{mA}{V}$$

$$\Leftrightarrow I_{DS} = \frac{60}{1+6R_{DS}}$$

Para $R_{DS} = 25k\Omega \Rightarrow I_{DS} = 0{,}4\,mA$

De esta forma $V_{DS} = 25k\Omega \cdot 0{,}4mA - 10V = 0V$

y $V_{GS} - V_{DS} = -5V < -3V = V_T$, es decir,

se verifica la condición de la zona lineal.

En resumen:

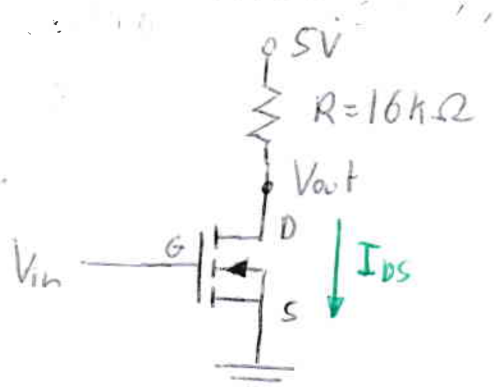
	I_{DS}	V_{GS}	V_{DS}	Zona
$R_D = 0{,}8k\Omega$	$6mA$	$-5V$	$-5{,}2V$	Saturación
$R_D = 25k\Omega$	$0{,}4mA$	$-5V$	$0V$	Lineal.

Ejercicio 5.- Los parámetros son $V_T = 2{,}5V$ y $k = 4\cdot10^{-4}\,\frac{A}{V^2}$

a) Determina la tensión V_{out} para $V_{in} = 0$ y $V_{in} = 5V$

b) Calcula el rango de valores de R que garantiza que $V_{out} \leq 0{,}5V$ cuando $V_{in} = 5V$.

NMOS:



a)

Se tiene que $V_G = V_{in}$, $V_S = 0V$ y $V_D = V_{out} = 5V - RI_{DS}$,

por tanto $V_{GS} = V_{in}$, $V_{DS} = 5V - RI_{DS}$ y $V_T = 2,5V$.

Si $V_{in} = 0V \Rightarrow V_{GS} < V_T$ y no hay canal N por lo que la corriente $I_{DS} = 0$ y $V_{out} = V_{DS} = 5V$

Si $V_{in} = 5V \Rightarrow V_{GS} > V_T$ y hay canal N. Podemos suponer que estamos en la zona de saturación por lo que

$$I_{DS} = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{2}\frac{A}{V}(5V - 2,5V)^2 = 1,25mA$$

Por tanto $V_{DS} = 5V - R \cdot 1,25mA = 5V - 16K\Omega \cdot 1,25mA = -15V$

Se tiene que $V_{GS} - V_{DS} = 5 + 15 = 20V > 2,5V = V_T$ por lo que estaríamos en la zona lineal (contradicción).

Por tanto estamos en la zona lineal ~~e~~

$$I_{DS} = K(V_{GS} - V_T)V_{DS} = 4 \cdot 10^{-4}\frac{A}{V}(2,5V) \cdot (5V - R \cdot I_{DS})$$

$$\Leftrightarrow I_{DS} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1 + 10^{-3}R}$$

Para $R = 16K\Omega \rightarrow I_{DS} = 0,294mA$

y $V_{DS} = 5V - 0,3mA \cdot 16K\Omega = 0,294V$

$V_{GS} - V_{DS} = 4,7 > V_T = 2,5V$ por lo que

se cumple la condición de la zona lineal.

Por tanto si $V_{in} = 0V \Rightarrow V_{out} = 5V$

$V_{in} = 5V \Rightarrow V_{out} = 0,2V$

Este circuito tiene un comportamiento de inversor.

b) Los: $V_{out} \leq 0{,}5V$ con $V_{in} = 5V \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} > 4{,}5V > 2{,}5V = V_T$

por lo que el transistor está trabajando en la zona lineal.

La condición $V_{out} \leq 0{,}5V$ equivale a

$$5V - I(R) \cdot R \leq 0{,}5$$

$$\Updownarrow$$

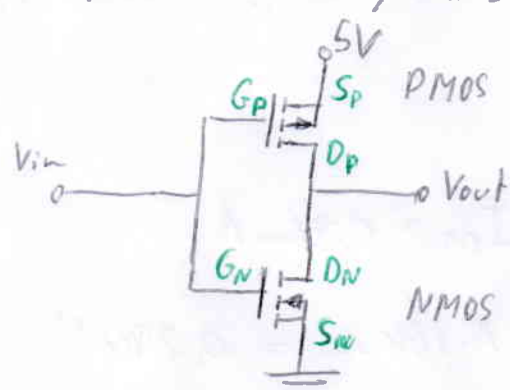
$$5V - \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1 + 10^{-3}R} R \leq 0{,}5 \iff 4{,}5 \leq \frac{5 \cdot 10^{-3} R}{1 + 10^{-3}R} \iff$$

$$\iff 4{,}5 + 4{,}5 \cdot 10^{-3} R \leq 5 \cdot 10^{-3} R \iff 4{,}5 \leq 0{,}5 \cdot 10^{-3} R \iff$$

$$R \geq \frac{4{,}5}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 9 \, k\Omega$$

Por tanto para valores de R mayores o iguales de $9 k\Omega$ cuando $V_{in} = 5V \Rightarrow V_{out} \leq 0{,}5V$ y el circuito funciona idealmente como un inversor.

Ejercicio 6.- El circuito de la figura corresponde a un inversor CMOS. Calcula V_{out} para $V_{in} = 0$ y $V_{in} = 5V$. Considerar $|V_T| = 2{,}5V$ y $k = 84 \cdot 10^{-4} \frac{A}{V^2}$.



Si $V_{in} = 0V$, como $V_{in} = V_{GN}$ y $V_{SN} = 0 \Rightarrow V_{GS} = 0$ para el transistor NMOS. Como $V_T = 2{,}5V \Rightarrow$ No hay canal N y la corriente en toda la rama es $I_{DS} = 0A$

Si ahora nos fijamos en el PMOS se tiene que

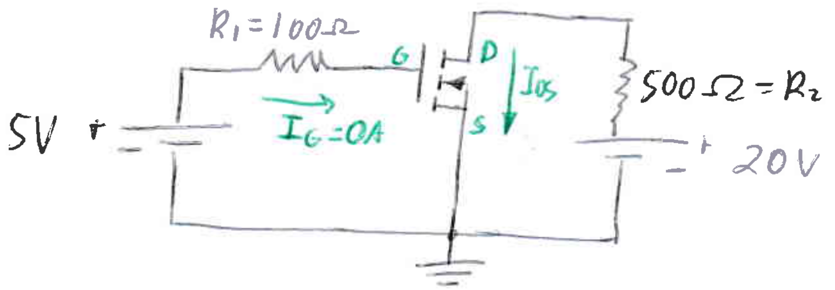
$$V_G = V_{in} = 0V \quad y \quad V_S = 5V \Rightarrow V_{GS} = -5V < -2{,}5V = V_T$$

Esto quiere decir que hay canal P. Además, sabemos que la corriente en toda la rama es cero, por lo que si hay canal y $I_{DS} = 0$ ha de ser $V_{DS} = 0V$. Como $V_S = 5V \Rightarrow V_D = 5V$ y $V_{out} = V_{DP} = 5V$.

Si $V_{in} = 5V$ estamos en el caso simétrico. Si nos fijamos primero en el PMOS se tiene que $V_G = V_{in} = 5V$, $V_S = 5V$ y $V_{GS} = 0V > -2{,}5V = V_T$. Por tanto no hay canal P y la corriente en toda la rama es de 0A (estamos en corte).
Si ahora vemos el NMOS tenemos una situación en la que $V_G = 5V$, $V_S = 0V \Rightarrow V_{GS} = 5V > 2{,}5V = V_T$ por lo que hay canal N. Como $I_{DS} = 0A$ por lo que sucede en el PMOS se tiene que V_{DS} tiene que ser $V_{DS} = 0V. \Rightarrow V_D = 0V$.

Por tanto $V_{out} = V_{DN} = 0V$

Ejercicio 7.- Si $V_T = 1V$ y $K = 2\frac{mA}{V^2}$ determina en que región de operación se encuentra el transistor y calcula I_{DS}, V_{GS} y V_{DS}.



NMOS

En primer lugar

$$V_G = 5V - R_1 \overset{0A}{\cancel{I_G}} = 5V$$

$$V_S = 0V$$

y

$$V_D = 20V + 500\Omega\, I_{DS}$$

Así $V_{GS} = 5V$ Como $V_{GS} > V_T$ hay canal N

$V_{DS} = 20V - 500\Omega\, I_{DS}$ y no estamos en corte.

Podemos suponer entonces que estamos en saturación por lo que

$$I_{DS} = \frac{k}{2}\left(V_{GS} - V_T\right)^2 = \frac{2mA}{2V^2}\left(5V - 1V\right)^2 = 16mA$$

Por tanto $V_{DS} = 20V - 0{,}5K\Omega \cdot 16mA = 12V$

Como $V_{GS} - V_{DS} = -6V < 1V = V_T$ estamos cumpliendo la restricción de la zona de saturación por lo que la solución es coherente.

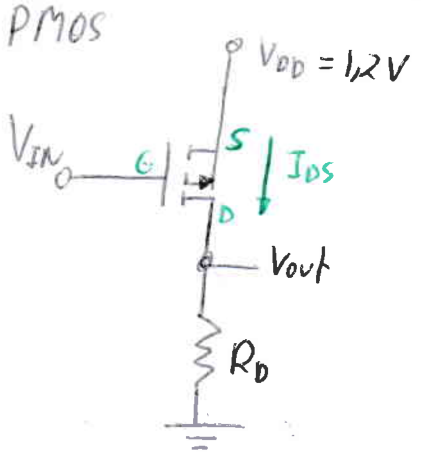
En resumen $I_{DS} = 16mA$, $V_{GS} = 5V$ y $V_{DS} = 12V$ con el transistor operando en la zona de saturación.

Ejercicio 8.- El transistor tiene $V_T = -0{,}3V$, $K = 0{,}6 \frac{mA}{V^2}$

a) Demuestra que si $V_{IN} = V_{DD} \Rightarrow V_{OUT} = 0$

b) Calcula el rango de R_D que garantiza que cuando $V_{IN} = 0 \Rightarrow V_{OUT} \geq 1{,}1V$

PMOS



a) Se tiene que $V_G = V_{in}$ y $V_S = 1{,}2V \Rightarrow$ Para $V_{IN} = 1{,}2V$ entonces $V_{GS} = 0V > -0{,}3V = V_T$ y no hay canal P por lo que $I_{DS} = 0$.

Por tanto $V_{out} = I_{DS} \cdot R_D = 0V$.

b) Si $V_{IN}=0 \longrightarrow V_{GS}=-1,2V < -0,3V = V_T$ por lo que hay canal P y el transistor está en la zona de carga (lineal) o la zona de saturación.

$$V_{DS} = R_D I_{DS} - 1,2V$$

Podemos comenzar suponiendo que el ~~transistor~~ está en la zona de saturación por lo que

$$I_{DS} = \frac{K}{2}(V_{GS}-V_T)^2 = 0,6\,\frac{mA}{V^2}\cdot\frac{1}{2}(-1,2V+0,3V)^2 = 0,243mA$$

$$\Longrightarrow V_{DS} = R_D I_{DS} - 1,2V = R_D \cdot 0,243mA - 1,2V.$$

$$V_{GS} - V_{DS} = -1,2V - R_D\cdot 0,243mA + 1,2V = -R_D\cdot 0,243mA \geq -0,3V$$

$$\Updownarrow$$

$$R_D < 1,23k\Omega$$

Por tanto considerar la zona de saturación es válido siempre que $R_D < 1,23k\Omega$.

En este caso, si $V_{out} \geq 1,1V \Leftrightarrow$

$$\Leftrightarrow R_D I_{DS} \geq 1,1V \Leftrightarrow R_D \geq \frac{1,1}{0,243} = 4,53k\Omega$$

Como estamos asumiendo zona de saturación y $R_D < 1,23k\Omega$ llegamos a contradicción.

Por tanto, suponemos que estamos en la zona lineal

$$I_{DS} = k(V_{GS}-V_T)V_{DS} - k\frac{V_{DS}^2}{2} = -0,6(-1,2+0,3)(RI_{DS}-1,2) -$$

$$- 0,3(RI_{DS}-1,2)^2 = -0,54RI_{DS} + 0,648 - 0,3R^2I_{DS}^2 + 0,72RI - 0,432$$

$$\Leftrightarrow I_{DS}^2(0,3R^2) + (1-0,18R)I_{DS} - 0,216 = 0$$

$$I_{DS} = \frac{-(1-0{,}18R) \pm \sqrt{(1-0{,}18R)^2 + 4\cdot 0{,}3R^2\cdot 0{,}216}}{2\cdot 0{,}3R^2} =$$

$$= \frac{0{,}18R - 1 \pm \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2}}{0{,}6R^2}$$

$$\Longrightarrow V_{DS} = I\cdot R - 1{,}2 = \frac{0{,}18R - 1 \pm \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2}}{0{,}6R} - 1{,}2$$

Para estar en la zona lineal se debe cumplir $V_{GS} - V_{DS} < V_T$

$$\Longleftrightarrow 1{,}2 - \left(\frac{0{,}18R - 1 \pm \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2}}{0{,}6R} - 1{,}2 \right) < -0{,}3 \Longleftrightarrow$$

$$\frac{0{,}18R - 1 \pm \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2}}{0{,}6R} > 0{,}3 \Longleftrightarrow$$

$$0{,}18R - 1 \pm \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2} > 0{,}18R \Longleftrightarrow$$

$$\pm\sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2} > 1$$

(Descartamos la solución $I = \frac{0{,}18R - 1 \ominus \sqrt{\quad}}{0{,}6R}$)

$$\Longleftrightarrow 1 - 0{,}36R + 0{,}2916R^2 > 1$$

$$\Longleftrightarrow R(-0{,}36 + 0{,}2916R) > 0 \underset{R>0}{\Longleftrightarrow} -0{,}36 + 0{,}2916R > 0$$

$$\Longleftrightarrow R > \frac{0{,}36}{0{,}2916} = 1{,}23\,k\Omega$$

Por tanto, si $R \in (0, 1{,}23\,k\Omega)$ estamos en zona de saturación con $I_{DS} = 0{,}243\,mA$

si $R > 1{,}23\,k\Omega$ estamos en zona lineal con $I_{DS} = \frac{0{,}18R - 1 + \sqrt{1-0{,}36R+0{,}2916R^2}}{0{,}6R^2}$

La condición $V_{out} \geq 1,1V$ equivale a

$$V_D > 1,1V \Leftrightarrow I \cdot R \geq 1,1V \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Zona} \\ \text{lineal}}}{\Longleftrightarrow} \frac{0,18R-1+\sqrt{1-0,36R+0,2916R^2}}{0,6R} \geq 1,1$$

$$\Longleftrightarrow 0,18R-1+\sqrt{1-0,36R+0,2916R^2} > 0,66R \Longleftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{1-0,36R+0,2916R^2} > 0,48R+1 \Longleftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \cancel{1}-0,36R+0,2916R^2 > \cancel{1}+0,96R+0,2304R^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 0,0612R^2-1,32R>0 \Leftrightarrow R(0,0612R-1,32)>0 \underset{\substack{\uparrow \\ R>0}}{\Leftrightarrow}$$

$$\Leftrightarrow R > \frac{1,32}{0,0612} = 21,57\,k\Omega.$$

Si $R > 21,57k\Omega \Rightarrow R > 1,23k\Omega$ y está operando en la zona lineal, por lo que la solución es coherente.