



Guía de Ejercicios Nº 5: Transistor MOS

Constante	Valor
q	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
m_0	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
k	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
ϵ_0	$88,5 \text{ fF/cm}$
$\epsilon_r(\text{Si})$	$11,7$
$\epsilon_r(\text{SiO}_2)$	$3,9$
T_{amb}	$27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$

Parte I: NMOS y sus regímenes de operación

- ✓ 1. Dado un transistor NMOS con $\mu_n = 215 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $t_{\text{ox}} = 150 \text{ \AA}$, $V_{T0} = 1 \text{ V}$, $L = 1,5 \text{ }\mu\text{m}$, $W = 30 \text{ }\mu\text{m}$, que tiene aplicadas tensiones $V_{\text{DS}} = 2 \text{ V}$ y $V_{\text{BS}} = 0 \text{ V}$,
 - a) Calcule el rango de tensiones V_{GS} para los cuales el transistor se encontrará operando en los regímenes de:
 - i. corte (cut-off),
 - ii. saturación,
 - iii. lineal (o triodo).
 - b) Grafique I_D en función de V_{GS} , e indique en el gráfico las regiones de corte, saturación y lineal.
- ✓ 2. En la figura 1 se representan dos estados de operación de un transistor MOS con V_T conocido.

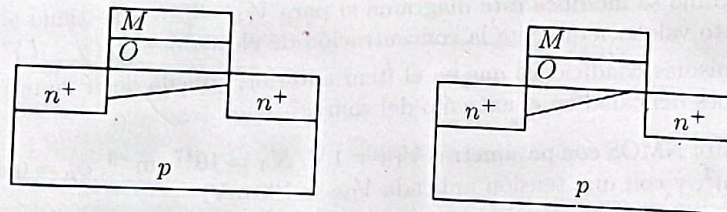


Figura 1

- a) Represente las curvas I_D vs. V_{GS} e I_D vs. V_{DS} e indique en las mismas donde se ubica, para cada caso, los puntos de trabajo representados en las figuras.
 - b) Indique rango de valores posibles para V_G , V_D y V_S en cada caso (considerar siempre $V_{\text{BS}} = 0$).
 - c) Seleccione una polarización adecuada para que el dispositivo funcione en zona de saturación sabiendo que $\mu_n = 215 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $t_{\text{ox}} = 150 \text{ \AA}$, $V_T = 1 \text{ V}$, $L = 1,5 \text{ }\mu\text{m}$, $W = 30 \text{ }\mu\text{m}$ y $\lambda = 0$.
- ✓ 3. En la figura 2 se ilustran algunas curvas de salida de un NMOS para $V_{\text{BS}} = 0 \text{ V}$. Los parámetros del transistor son $W = L = 1 \text{ }\mu\text{m}$ y $t_{\text{ox}} = 200 \text{ \AA}$.

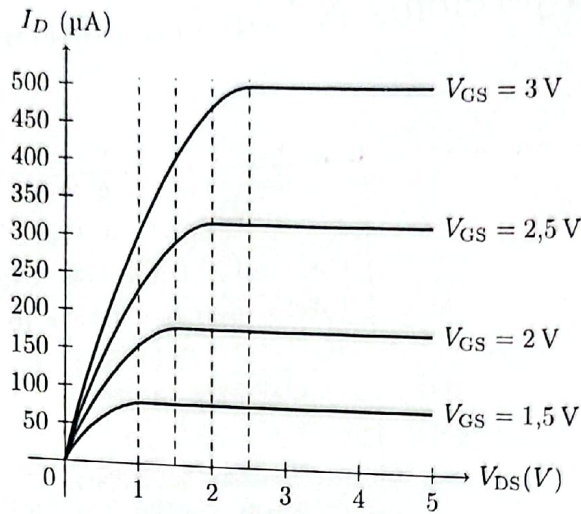


Figura 2

- a) Estime el valor de la tensión umbral, V_{T0} .
 - b) Estime la movilidad de los electrones de la capa de inversión.
4. Dado un transistor NMOS con parámetros $W = 30 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $C'_{ox} = 6 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $V_{T0} = 1 \text{ V}$ y $V_{BS} = 0 \text{ V}$,
- a) Sabiendo que para $V_{GS} = 1,5 \text{ V}$, $V_{DS} = V_{DSsat}$, se tiene $I_D = 0,9 \text{ mA}$, calcule el valor de μ_n .
 - b) Para $V_{GS} = 2,5 \text{ V}$ y $V_{DS} = 0,1 \text{ V}$ ¿en qué región está operando el transistor? ¿Corte, saturación o lineal?
 - c) Realice un diagrama cualitativo de $Q_n(y)$ en el canal para el caso $V_{GS} = 2,5 \text{ V}$, $V_{DS} = 0,1 \text{ V}$ ¿Cuánto vale $Q_n(y = L)$?
 - d) Explique cómo se modifica este diagrama si para $V_{GS} = 2,5 \text{ V}$ se tiene ahora $V_{DS} = 1,5 \text{ V}$. ¿Puede decir cuánto vale exactamente la concentración de electrones $Q_n(y = L)$?
 - e) Para las mismas condiciones que en el ítem anterior, ¿puede decir cuánto vale la concentración de electrones del canal en el extremo del source?
5. Dado un transistor NMOS con parámetros $V_{T0} = 1 \text{ V}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\phi_p = 0,42 \text{ V}$, $\mu_n = 730 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $C'_{ox} = 0,68 \text{ fF/m}^2$, y con una tensión aplicada $V_{DS} = 100 \text{ mV}$:

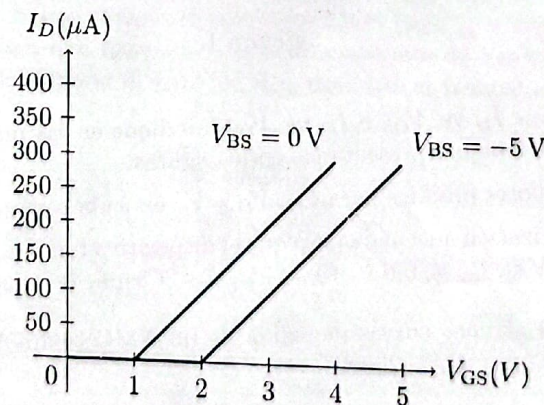


Figura 3

- a) Para $V_{GS} = 1,5 \text{ V}$ y $V_{BS} = 0 \text{ V}$, ¿En qué región está operando el transistor? ¿Corte, saturación o lineal?



- b) A partir de la figura 3 calcule el parámetro γ (backgate parameter) del transistor.
- c) Para $V_{GS} = 1,5\text{ V}$ y $V_{BS} = -5\text{ V}$, ¿En qué región está operando el transistor? ¿Corte, saturación o lineal?

Parte II: PMOS y sus regímenes de operación

- ✓ 6. Dado un transistor PMOS con $\mu_p = 400\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $t_{ox} = 100\text{ \AA}$, $V_{T0} = -0,7\text{ V}$, $L = 0,5\text{ }\mu\text{m}$, $W = 10\text{ }\mu\text{m}$, que tiene aplicadas tensiones $V_{DS} = -2\text{ V}$ y $V_{BS} = 0\text{ V}$,
 - a) Calcule el rango de tensiones V_{GS} para los cuales el transistor se encontrará operando en los regímenes de:
 - I. corte (cut-off),
 - II. saturación,
 - III. lineal (o triodo).
 - b) Grafique I_D en función de V_{GS} , e indique en el gráfico las regiones de corte, saturación y lineal.
 - c) Si el dopaje del sustrato es $N_D = 4 \times 10^{16}\text{ 1/cm}^3$, rehacer los ítems anteriores cuando la tensión del bulk se modifica tal que ahora $V_{BS} = 0,5\text{ V}$.
- ✓ 7. En la figura 4 se ilustran un par de curvas $-I_D$ vs V_{SD} de un transistor PMOS para $V_{BS} = 0\text{ V}$.

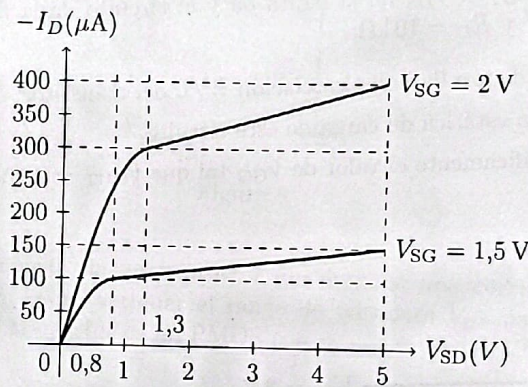


Figura 4

- a) A partir de estas curvas, ¿cuál es el valor de V_{T0} ?
- b) Estime los parámetros $k_p = \frac{W}{L} \mu_p C'_{ox}/2$ y λ del transistor.

Parte III: Polarización

- ✓ 8. Para el circuito de la figura 5a, donde $\mu_n C'_{ox} W/L = 1\text{ mA/V}^2$, $V_T = 1\text{ V}$, $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$, $R_{G1} = 1\text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 2\text{ k}\Omega$, $R_D = 2\text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 3\text{ V}$, indique en qué régimen está polarizado el transistor, y halle todas las corrientes y tensiones del circuito.

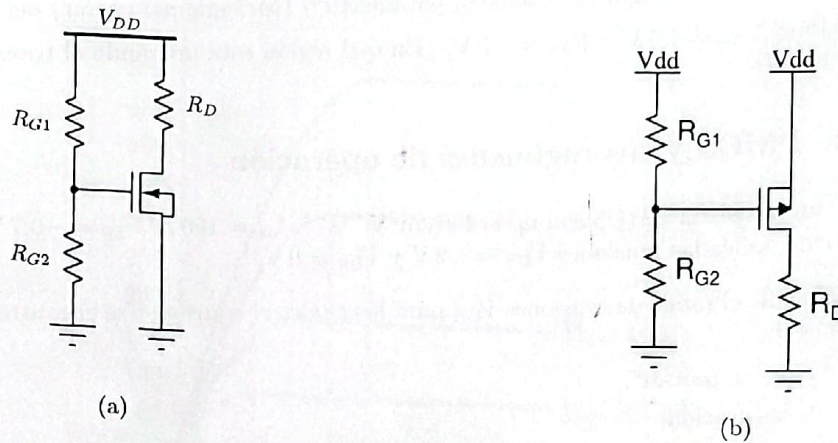


Figura 5

9. Repita el ejercicio 8 para el circuito de la figura 5b donde $V_{DD} = 5\text{ V}$, $R_{G1} = 200\text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 300\text{ k}\Omega$, $R_D = 3,3\text{ k}\Omega$, y los parámetros del transistor son $V_T = -0,9\text{ V}$, $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$, $\mu_p C'_{ox} = 36\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $L = 5\text{ }\mu\text{m}$ y $W = 150\text{ }\mu\text{m}$.
10. Dada la curva de I_D vs. V_{DS} de la figura 6a y el circuito de la figura 6b, con $V_{DD} = 5\text{ V}$, $V_T = 1\text{ V}$, $\mu_n C'_{ox} = 50\text{ }\mu\text{A/V}^2$ y $R_D = 10\text{ k}\Omega$:
 - a) A partir de la figura 6a halle la relación W/L del transistor.
 - b) Dibuje la recta estática de carga de este circuito.
 - c) Determine gráficamente el valor de V_{GG} tal que $V_{OUT} = 2,5\text{ V}$, y halle gráficamente el valor de I_D resultante.

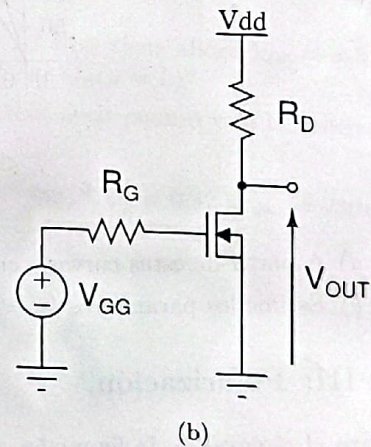
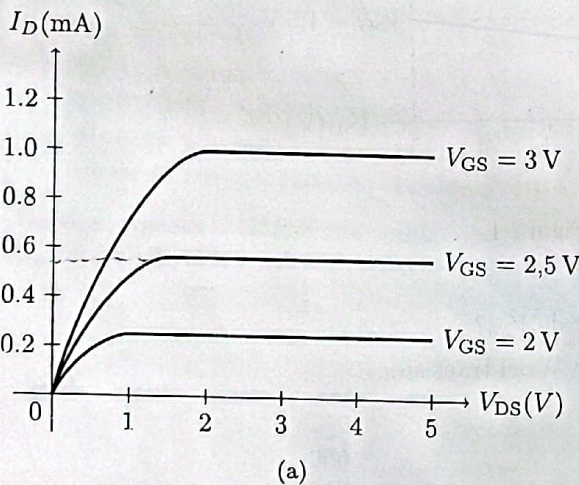


Figura 6

11. Para el circuito de la figura 7, siendo $\mu_n C'_{ox} = 80\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $V_T = 0,8\text{ V}$, $L = 4\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 0,02\text{ V}^{-1}$ y $R_{G1} = 370\text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 130\text{ k}\Omega$, $R_D = 18\text{ k}\Omega$ y $V_{DD} = 5\text{ V}$, se pide:
 - a) Hallar el rango de posibles valores de W tal que el transistor permanezca en saturación.
 - b) Hallar el rango de posibles valores de R_D para el cual el transistor opera en saturación cuando $W = 1\text{ }\mu\text{m}$.
12. Dado el circuito de la figura 8 donde $V_{GG} = 1\text{ V}$, $V_{DD} = 5\text{ V}$, $\mu_n C'_{ox} = 116\text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0,8\text{ V}^{-1}$, $V_T = 0,8\text{ V}$, $W/L = 2$ y $R_G = 50\text{ }\Omega$, determinar R_D para que la corriente de drain sea 5 mA .

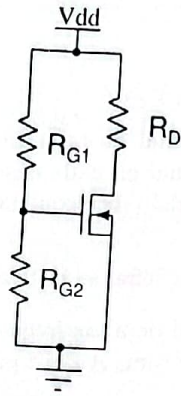


Figura 7

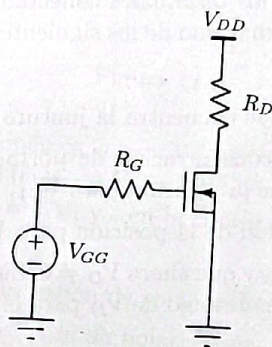


Figura 8

- ✓ 13. El circuito de la figura 9 consta de un transistor que impone una corriente constante de 35 mA en una resistencia variable. Se desea averiguar el rango de tensiones V_{DS} para el cual el transistor va a funcionar correctamente. El transistor es un PMOS con $\mu_p C'_{ox} = 70 \mu A/V^2$, $V_T = -0,5 V$, $W/L = 2000$ y $\lambda = 0,01 V^{-1}$.
- ¿En qué régimen de operación deberá estar el transistor para que este comportamiento sea posible?
 - ¿Cuál es el rango de variación que presentará dicha corriente?
 - ¿Cuál es el rango de tensiones admisible para que el transistor no salga de régimen de operación?
 - ¿Cuál es el rango de R_L admisible?

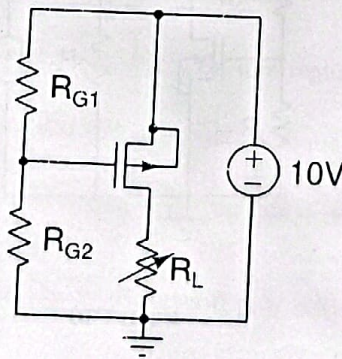


Figura 9



Parte IV: Pequeña señal

- ✓ 14. Hallar los modelos de pequeña señal de baja frecuencia de los ejercicios 8 y 9. ¿Cuál es el límite de validez del modelo de pequeña señal en cada caso? Una vez de hallados, reemplazar los transistores en el esquemático original por el modelo de pequeña señal y dibujar el nuevo circuito obtenido (el *circuito de pequeña señal*).
- ✓ **NOTA:** en el circuito de pequeña señal se pasivan las fuentes de DC.
- ✓ 15. Hallar el modelo de pequeña señal de altas frecuencias del ejercicio 8, siendo que: $W = 2 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $C_{ov} = 0,3 \text{ fF}/\mu\text{m}$, $A_S = 1 \mu\text{m}^2$ y $A_D = 0,5 \mu\text{m}^2$. Dibujar el modelo y el circuito de pequeña señal.

Parte V: Integradores

- ✓ 16. Un NMOS de $V_T = 0,8 \text{ V}$ tiene los terminales conectados de forma que $V_D = V_S = V_B = 0 \text{ V}$, mientras que el terminal de gate puede tomar uno de los siguientes valores: $V_{G1} = -1 \text{ V}$, $V_{G2} = 0,6 \text{ V}$, $V_{G3} = 0,8 \text{ V}$, $V_{G4} = 2 \text{ V}$.
- Identificar en que régimen se encuentra la juntura MOS para cada uno de los casos.
 - Realizar un diagrama de concentración de portadores y de densidad volumétrica de carga de la juntura MOS en función de la posición para V_{G1} , V_{G3} y V_{G4} .
 - Graficar el campo en función de la posición para V_{G4} .
 - Considere que se aplica V_{G4} y que ahora $V_D \neq 0$. Siendo $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W/L = 10$ y $\mu_n = 215 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ calcule $I_{D \text{ SAT}}$ y encuentre el rango de V_D para el cual se puede suponer que el dispositivo trabaja en saturación.
- ✓ 17. Para el circuito de la figura 10 y considerando $k = \frac{\mu C'_{ox}}{2} \frac{W}{L} = 4 \text{ mA}/\text{V}^2$, $V_T = 1 \text{ V}$, $\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$, $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $I_0 = 4 \text{ mA}$, $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_{G2} = \frac{R_{G1}}{2} = 10 \text{ k}\Omega$:
- Encontrar el punto de polarización.
 - Hallar la ecuación de la recta de carga y dibujarla en un gráfico de i_D vs. v_{DS} junto con las curvas de salida del transistor MOS tal que corten a la recta de carga en:
 - el punto de *pinch-off*.
 - el punto donde $I_D = 1 \text{ mA}$.

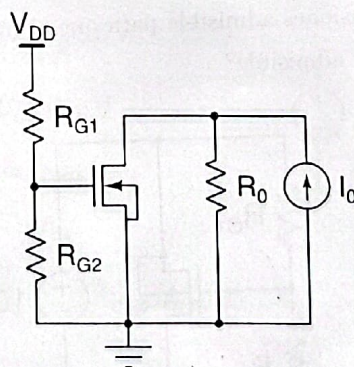


Figura 10

- ✓ 18. Halle todas las corrientes y tensiones del circuito y determine el modo de operación del transistor en los siguientes casos:
- El circuito de la figura 11a, donde $V_{DD} = 3,3 \text{ V}$, $R_{G1} = 130 \text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 200 \text{ k}\Omega$, $R_S = 5,6 \text{ k}\Omega$, y los parámetros del transistor son $V_T = 0,8 \text{ V}$, $\mu_n C'_{ox} = 110 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $L = 5 \mu\text{m}$ y $W = 50 \mu\text{m}$.



- b) El circuito de la figura 11b, donde $V_{DD} = 5\text{ V}$, $R_{G1} = 300\text{ k}\Omega$, $R_{G2} = 200\text{ k}\Omega$, $R_S = 1,5\text{ k}\Omega$, y los parámetros del transistor son $V_T = -0,9\text{ V}$, $\mu_p C'_{ox} = 36\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $L = 5\text{ }\mu\text{m}$ y $W = 150\text{ }\mu\text{m}$.

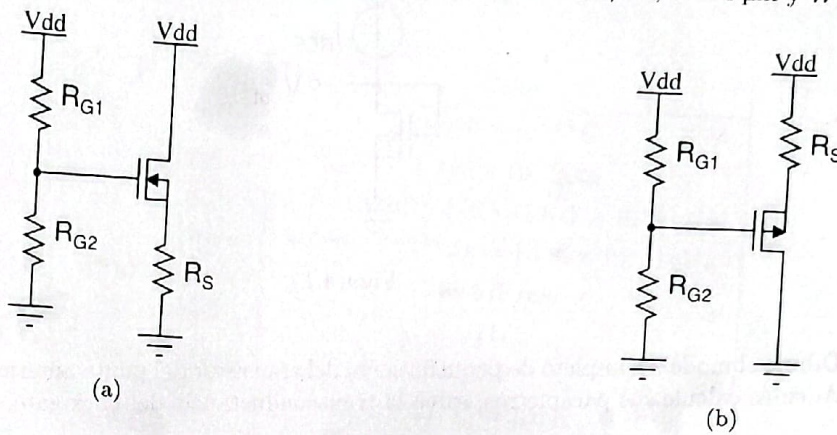


Figura 11

19. Dado un transistor NMOS con parámetros $\mu_n = 215\text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $t_{ox} = 150\text{ \AA}$, $L = 2\text{ }\mu\text{m}$, $W = 30\text{ }\mu\text{m}$, $L_{diff} = 6\text{ }\mu\text{m}$, $C_{ov} = 0,5\text{ fF}/\mu\text{m}$, $\lambda = 0,05\text{ V}^{-1}$, $N_A = 10^{16}\text{ 1/cm}^3$ para el sustrato, $N_D = 10^{18}\text{ 1/cm}^3$ para las difusiones de drain y source, $V_{T0} = 1\text{ V}$, y , en la condición de operación $V_{GS} = 1,5\text{ V}$, $V_{DS} = 1,5\text{ V}$, $V_{BS} = 0\text{ V}$,

- ¿El transistor está operando en la región de corte, saturación o lineal?
- Calcule el valor de V_T y de la corriente de polarización I_D .
- Calcule el rango de variación admisible en v_{gs} .
- Calcule los parámetros del modelo de pequeña señal: g_m , g_{mb} , r_o , C_{gs} , C_{gd} , C_{sb} , C_{db} .
- Dibuje el modelo de pequeña señal del transistor.

20. Para el circuito de la figura 5b, siendo $\mu_p C'_{ox} = -70\text{ mA/V}^2$, $V_T = -1,2\text{ V}$, $W = 30\text{ }\mu\text{m}$, $L = 5\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 0,05\text{ V}^{-1}$, $R_{G2} = 470\text{ k}\Omega$ y $V_{DD} = 5\text{ V}$ se pide:

- Hallar R_{G1} y R_D tal que $I_D = -80\text{ }\mu\text{A}$ y $V_{OUT} = V_D = 2,4\text{ V}$.
- Hallar el rango posible de valores de R_D para el cual el transistor opera en saturación. Representar esta respuesta en el plano $(-I_D, V_{SD})$.
- Hallar el modelo de pequeña señal (bajas frecuencias) bajo las condiciones del ítem (a).

21. En la figura 12 se muestra un circuito elemental muy utilizado en diseños CMOS analógicos para generar una tensión de referencia. Asumiendo $I_{REF} = 40\text{ }\mu\text{A}$, $V_{DD} = 3,3\text{ V}$, $\mu_n C'_{ox} = 116\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $V_T = 0,8\text{ V}$, $\lambda = 0,04\text{ V}^{-1}$, $W/L = 2$,

- Calcular el punto de trabajo del transistor. ¿En qué región de operación se encuentra? ¿Depende de I_{REF} ?
- Hallar el modelo de pequeña señal del circuito. Explique qué efecto representa cada uno de los componentes.
- Suponer que ahora se reemplaza la fuente I_{REF} por una resistencia $R = 10\text{ k}\Omega$. Diseñar el transistor, es decir hallar W/L , para que $V_{OUT} = 1,5\text{ V}$.

22. Para un transistor MOS se realizan las mediciones de las curvas de transferencia y de salida que se muestran en las imágenes.

- Identifique el tipo de canal del transistor y encuentre los parámetros k , V_T y λ a partir de las curvas. En todos los casos justifique su respuesta y deje en claro el procedimiento para hallar los valores.
- Se quiere polarizar este transistor en un circuito con $I_D = 1\text{ mA}$ y $V_{DS} = V_{DD}/2$, utilizando una única fuente $V_{DD} = 5\text{ V}$. Diseñe un circuito que cumpla con estas condiciones utilizando dos resistencias para la polarización del gate y una resistencia conectada en el drain.

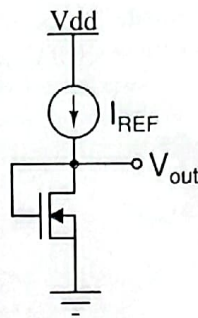


Figura 12

c) Dibuje el modelo completo de pequeña señal del transistor del punto anterior para frecuencias bajas. Además calcule sus parámetros, salvo la transconductancia del back-gate.

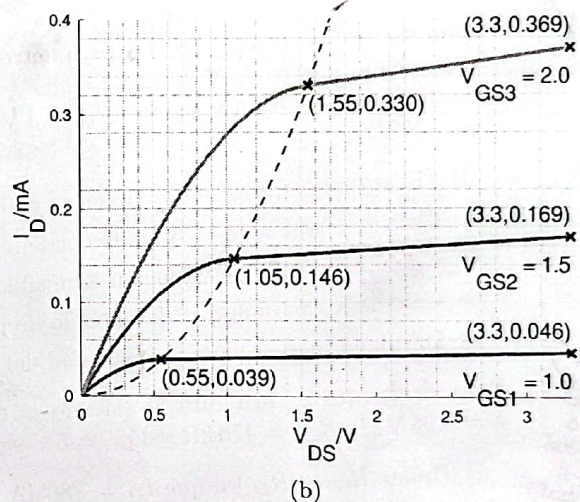
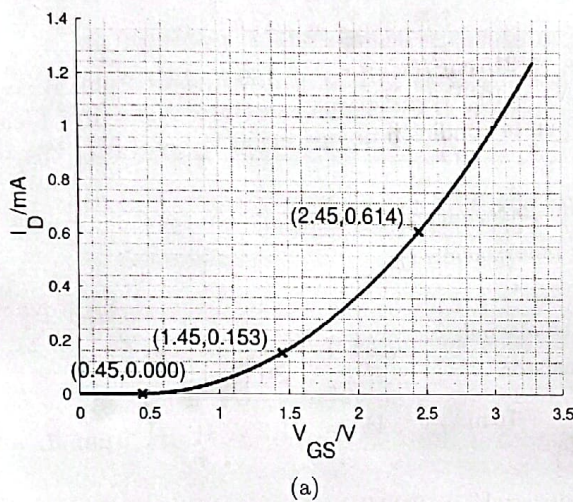


Figura 13

23. A partir del circuito de la figura 14 ($V_{DD} = 5\text{ V}$; $R_{G1} = 2\text{ k}\Omega$; $R_D = 1\text{ k}\Omega$, $T = 300\text{ K}$), obtener la potencia entregada por la fuente cuando el transistor MOS ($\mu_n C'_{ox} = 1\text{ mA/V}^2$; $V_T = 1\text{ V}$; $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$) se encuentra polarizado para que haya una corriente constante de 1 mA circulando a través del diodo ($V_{ON} = 0,7\text{ V}$). Además, determinar el valor de R_{G2} para que el transistor se encuentre en saturación.

* creo que falta $\frac{W}{L}$,
 por lo que tiene
 un coef como $\frac{\mu_n C'_{ox} W}{L}$

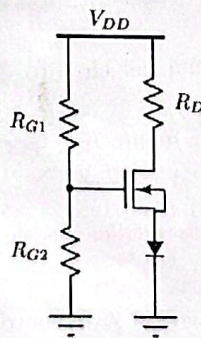


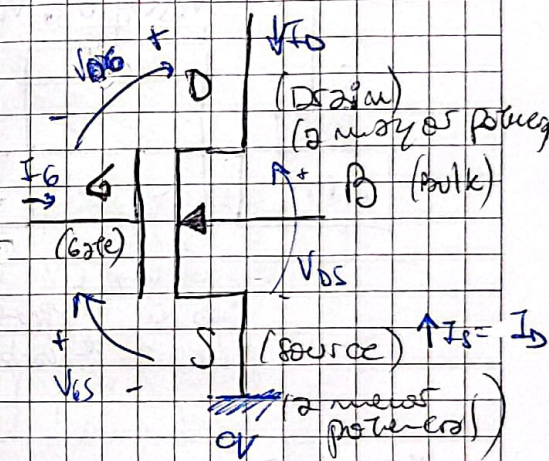
Figura 14

GUÍA 5: TRANSISTOR MOS

• Parte I: NMOS y sus regímenes de operación

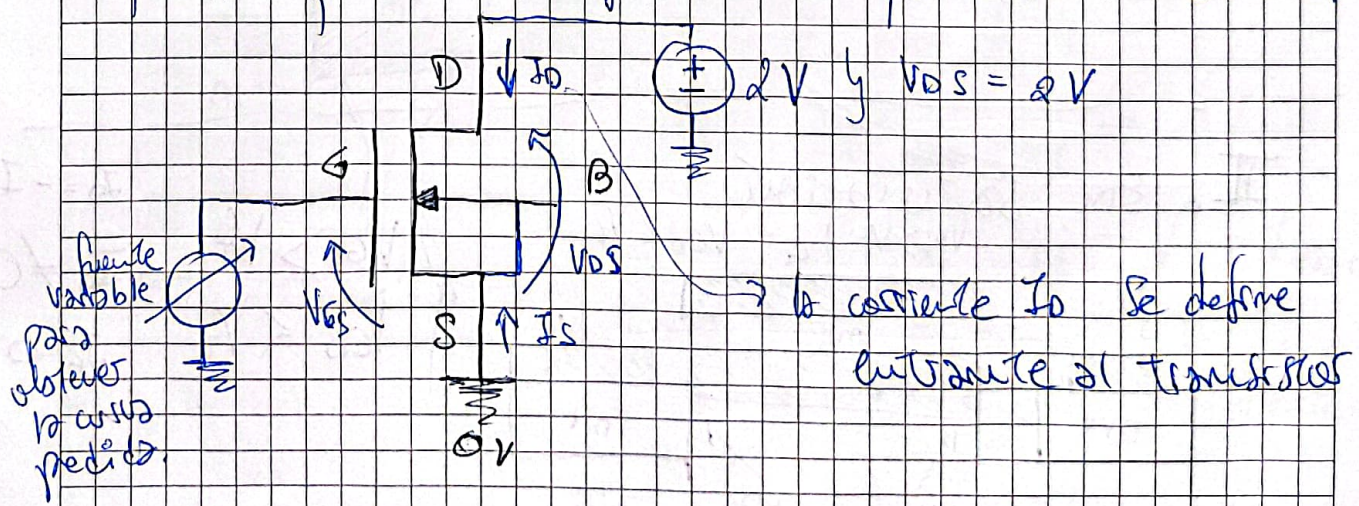
• $\mu_m = 0,215 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ → siempre vale
 $T_{ox} = 150 \text{ \AA} = 150 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ $V_{GS} > 0$
 $V_{TO} = 1 \text{ V}$ $V_{DS} > 0$ por ser NMOS para que funcione bien

$d = 1,5 \mu\text{m} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
 $W = 30 \mu\text{m} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
 $V_{GS} = 2 \text{ V}$
 $V_{DS} = 0 \text{ V}$



source y Drain se definen según el conector de

$V_{DS} = 0 \text{ V} \Rightarrow$ están cortocircuitados, por lo que su diferencia de potencial es nula.



fuente variable para obtener la curva pedida

→ la corriente I_D se define entrante al transistor

(a) Tres modos de operación

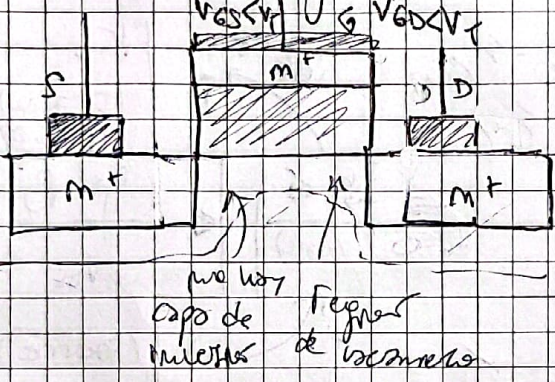
I_D corte: $V_{GS} < V_T$
 $V_{GD} < V_T \Rightarrow I_D = 0$

$V_{GS} < V_T = \frac{1V}{=V_{TO}}$

en los futuros que se forman en los contactos

NO se forma un canal de inversión, por lo que no se forma una conexión entre Drain y Source y la corriente es Nula.

Gráfico de la futura inversión en corte:



Recordar

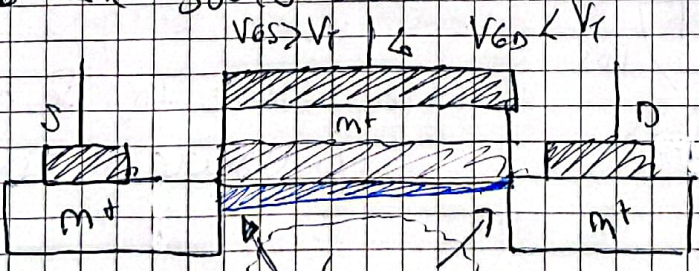
$V_{FB} = -\phi_B$; $V_T = V_{FB} - 2\phi_{s,sub} + \gamma \sqrt{-2\phi_{s,sub}}$

pero en este caso se infiere $V_{TO} = 1V$.

Entonces estará en corte cuando

$V_{GS} < 1V$

II. En saturación



$V_{GS} > V_T \Rightarrow I_D \neq 0$
 $V_{GD} < V_T \Rightarrow I_D = 0$

$I_D = -I_S$

región de inversión
 capa de inversión del lado de drain

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - V_D = V_G - V_D + V_S - V_S = V_{GS} - V_{DS}$$

$$\Rightarrow V_{GS} < V_T \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T = V_{DSsat}$$

Pedir $V_{GS} < V_T$ es equivalente a

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T = V_{DSsat}$$

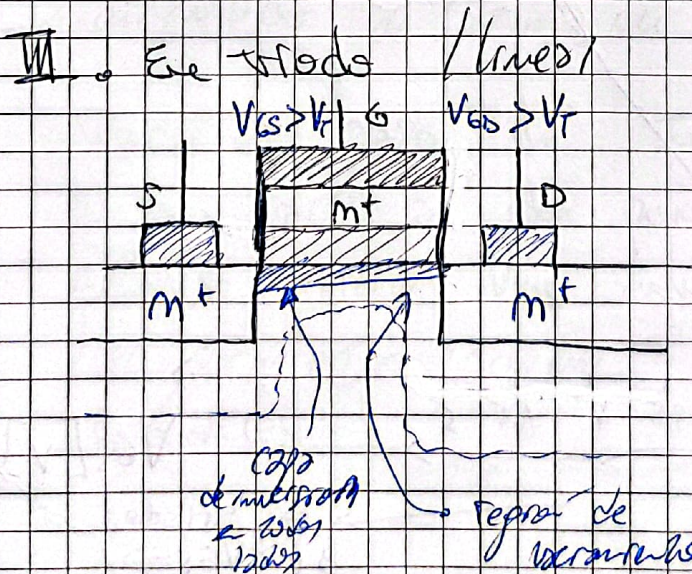
$$2V > V_{GS} - 1V \Rightarrow$$

$$V_{GS} < 3V$$

Dada la situación de corte se tiene que para que se mantenga en saturación

$$1V < V_{GS} < 3V$$

para que se mantenga la condición de saturación.



$$\left. \begin{array}{l} V_{GS} > V_T \\ V_{GD} > V_T \end{array} \right\} \Rightarrow I_D \neq 0$$

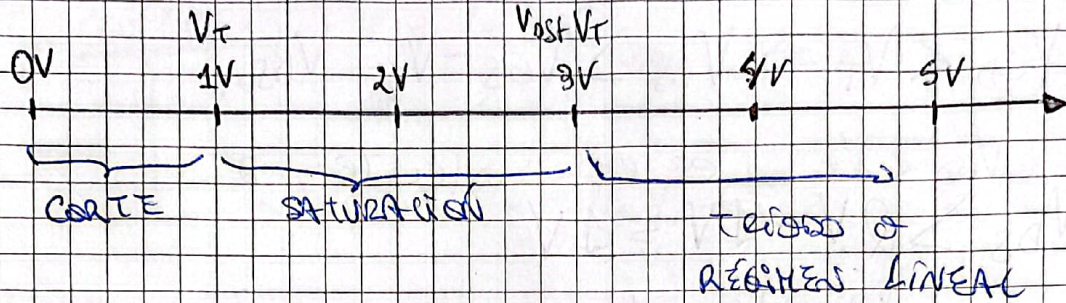
$$\Rightarrow V_{GD} > V_T \Rightarrow$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T = V_{DSsat}$$

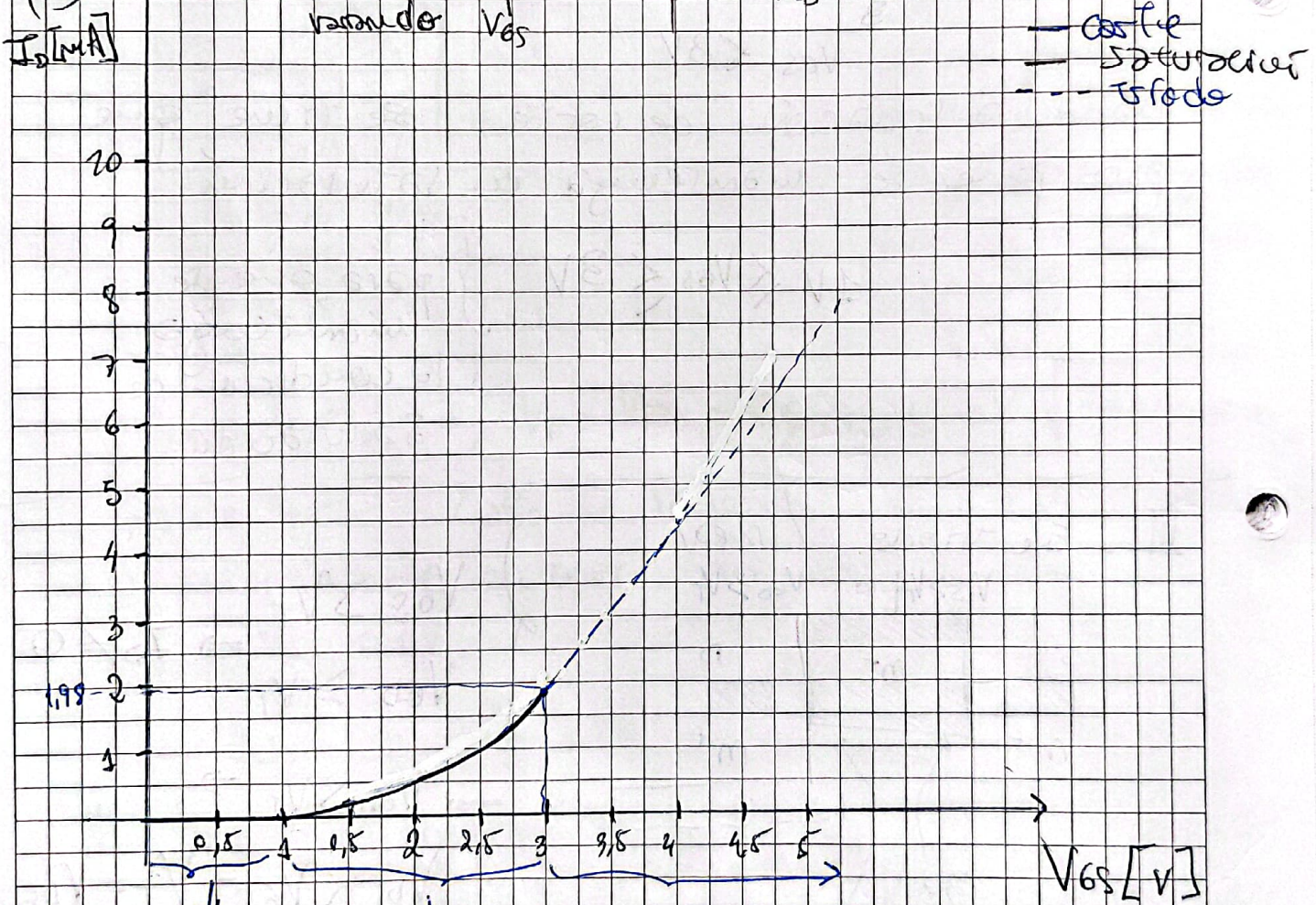
Entonces, se reduce a una resistencia tal que:

$$\begin{array}{l} V_{GS} > V_T = 1V \Rightarrow V_{GS} > 3V \\ V_{GS} > V_{DSsat} + V_T = 3V \end{array}$$

Entradas



(3) Curva de transferencia para $V_{DS} = 2V$
 variable V_{GS}



En corte
 $0 < V_{GS} < 1$
 $I_D = 0$

En saturación
 $1V < V_{GS} < 3V$
 $I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$

En régimen lineal:
 $3V < V_{GS} \Rightarrow$
 $I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - \frac{V_{DS}}{2} - V_t) V_{DS}$

Se sabe $\mu = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} = 0,8 \frac{mA}{V^2}$

esta es la curva de transferencia

$$C'_{ox} = \frac{G_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}}{100 \cdot 10^{-8} \text{ cm}}$$

$$C'_{ox} = 2,302 \cdot 10^{-7} \text{ F/cm}^2$$

$$k = \frac{21 \frac{\text{A}}{\text{V}^2}}{2} \cdot 2,302 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}}{1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} = 4,9471 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}^2}$$

aprox $0,5 \text{ mA/V}^2$

$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_D = k (3\text{V} - 1\text{V})^2 = 1,9788 \text{ mA}$$

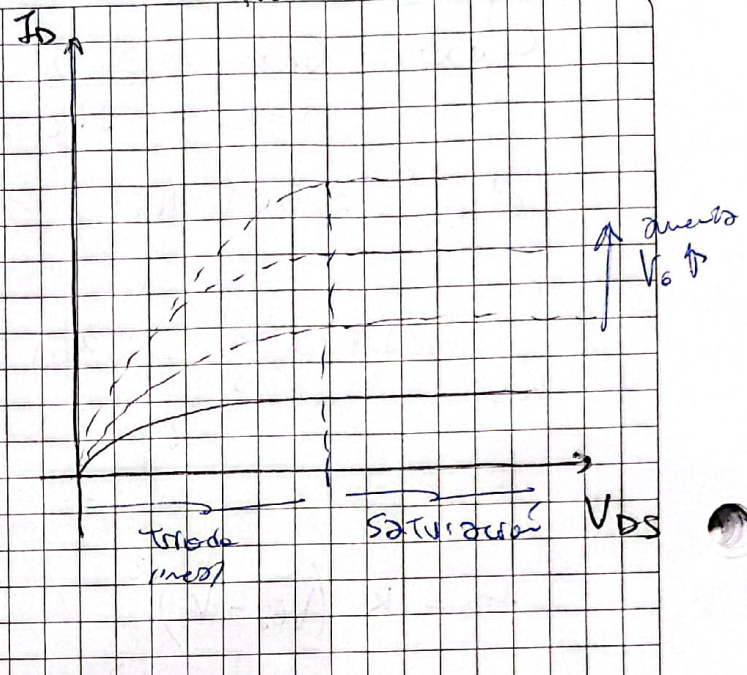
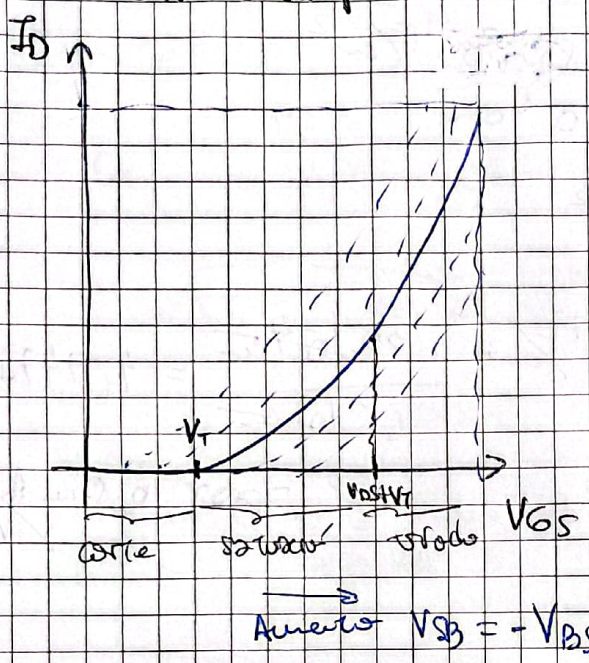
2. a) en la figura de la izquierda se representa la estructura en modo lineal o triodo, por otro lado, en la de la derecha, se encuentra en modo de saturación.

Para el caso de I_D vs. V_{GS} el gráfico es similar al del punto anterior puesto que se tiene V_{DS} constante y se V_{GS} es el parámetro variable.

Entonces:

Curva de transferencia

Curva de salida



Tal que:

$$V_T = -2\phi_s + V_{FB} + \gamma \sqrt{-2\phi_s} - \gamma \sqrt{-2\phi_s + V_{GS}} + \gamma \sqrt{-2\phi_s - V_{BS}}$$

b) Corte:

$V_{GS} < V_T$
 $V_{DS} < V_T$
 $V_S = 0$
 $V_G = V_D < V_T$

$I_D = 0$ (no crece corriente en el corte)

Consideramos siempre $V_{BS} = V_G - V_S = 0$ y corte en el corte de $V_S = 0$

Regimen lineal o triodo

$V_G = V_{GS} > V_T$
 $V_{DS} > V_T$
 $V_S = 0$

Regimen de saturación

$V_{GS} > V_T$
 $V_{DS} < V_T$
 $V_S = 0$
 $I_D = I_{SAT}$

$$(c) \mu_m = 245 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$t_{ox} = 450 \text{ \AA} = 450 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad \int C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 2,305 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F}}{\text{cm}^2}$$

$$V_T = 1 \text{ V}$$

$$L = 1,5 \mu\text{m} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$W = 30 \mu\text{m} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\lambda = 0$$

Em saturação $V_{GS} > V_T$; $V_{DS} > V_{DS\text{sat}}$

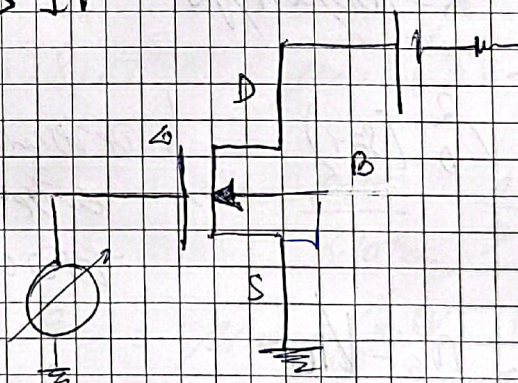
$$I_D = \frac{\mu_m C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{\lambda}{20} (V_{DS} - V_{DS\text{sat}}) \right)$$

$$I_D = \frac{\mu_m C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

Entonces:

$$V_{GS} > 1 \text{ V}$$

Ej:



$$I_D = \frac{245 \text{ cm}^2}{\text{Vs}} \cdot \frac{2,305 \cdot 10^{-7} \text{ F}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}}{1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_D = 0,4947 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{V}^2} (V_{GS} - 1 \text{ V})^2$$

$$V_{GS} < V_{DS} + V_T$$

para que opere
potencialmente si $V_{DS} = V_{GS}$

Asamblea

Si $V_{GS} = \text{cte}$, para que opere a saturación la tensión de saturación está dada por:

$$V_D(\text{sat}) = \frac{V_{GS} - V_{T0}}{n} \quad \text{--- } V_{T0} \text{ extrapolada}$$

$$V_{T0} = V_{T0} + \frac{\gamma}{2\sqrt{-a\phi_p}} V_G \quad \text{--- } V_G$$

Sea de $n = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{-2\phi_{\text{substrato}}}} = \frac{C_{ox} + C_{oc}}{C_{ox}}$

donde

$$C_{oc} = \frac{\gamma C_{ox}}{2\sqrt{-2\phi_{\text{substrato}}}} \quad K_m = \frac{W}{L} \mu_m C_{ox}$$

En NMOS $\Rightarrow n = 1$

$$V_{T0} = 1$$

$$K = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$I_D = \frac{K}{2n} V_D^2 (\text{sat}) \quad \text{y determinamos el punto entre las zonas de triodo y saturación}$$

$$V_D = V_{GS} - V_{T0}$$

$$V_D = V_{GS} - 1 \text{V} \quad (\text{sat})$$

Se puede pre:

$$I_D = \left\{ \begin{array}{l} K_m \left((V_{GS} - V_{T0}) V_D - \frac{n V_D^2}{2} \right) \quad \text{Si } V_D < V_D(\text{sat}) \\ \frac{K_m}{2n} (V_{GS} - V_{T0})^2 \quad \text{Si } V_D \geq V_D(\text{sat}) \end{array} \right.$$

3. NMOS :

$$I_{ox} = 200 \mu A = 200 \cdot 10^{-6} A = 2 \cdot 10^{-4} A$$

$$W = L = 1 \mu m = 1 \cdot 10^{-4} m$$

$$V_{DS} = 0$$

En el gráfico que se presenta se toman
diversos valores de $V_{GS} = cte$ para V_{DS} .

Resulta más simple trabajar con los valores
a solucionar :

para
solucionar $I_D = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \cdot \frac{1}{2} (V_{GS} - V_{TO})^2$

Lo simplifico ya que son iguales.

(1) $500 \cdot 10^{-6} A = \mu_n \cdot \frac{C_{ox}}{2 \cdot 10^{-4} m} \cdot \frac{1}{2} (3V - V_{TO})^2$

$$22598,87 = \mu_n (3V - V_{TO})^2$$

(2) $310 \cdot 10^{-6} = \mu_n \cdot \frac{C_{ox}}{2 \cdot 10^{-4} m} \cdot \frac{1}{2} (3,5V - V_{TO})^2$

$$14011,29 = \mu_n (3,5V - V_{TO})^2$$

Derivando (1) por (2) para eliminar μ_n .
Además $V_{TO} > 0$ por lo que:

$$\frac{50}{31} = \left(\frac{3V - V_{TO}}{3,5V - V_{TO}} \right)^2 \Rightarrow \frac{5\sqrt{62}}{31} = \frac{2,5 - V_{TO} + 0,5}{2,5 - V_{TO} - 0,5} = 4$$

$$\left(\frac{-31 + 5\sqrt{62}}{31} \right) (2,5 - V_{TO}) = 0,5$$

despejando ...

$$V_{T0} = \frac{64 - 5\sqrt{62}}{38} \approx 0,6482 \text{ V}$$

a) $V_{T0} = 0,6482 \text{ V}$

Para obtener la menor V_{T0} se plantea
reemplazo en (4) o en (2) y despeja:

$$22598,87 = \mu_m (3 - 0,6482)^2$$

$$\mu_m = 4085,73 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

El valor es muy elevado por que aumenta
mucho para concentraciones muy grandes.

①

4/0 NMOS

$$W = 30 \mu\text{m} = 30 \cdot 10^{-4} \text{cm}$$

$$L = 1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-4} \text{cm}$$

$$C'_{ox} = 6 \cdot 10^{-7} \text{F/cm}^2$$

$$N_a = 10^{17} \text{cm}^{-3}$$

$$V_{T0} = 1 \text{V}$$

$$V_{DS} = 0 \text{V} \Rightarrow V_T(V_{DS}) = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{-2\phi_F - V_{DS}} - \sqrt{-2\phi_F} \right) \Rightarrow$$

$$V_T(V_{DS}=0) = V_{T0} = 1 \text{V}$$

a) $V_{GS} = 1,5 \text{V} \Rightarrow V_{DS} = V_{DSat}$
 $I_D = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{A}$

En Saturación: (como en a)

$$I_D = \mu_n \frac{C'_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \left[1 + \lambda (V_{DS} - V_{DSat}) \right]$$

reemplazando:

$$0,9 \cdot 10^{-3} \text{A} = \mu_n \cdot \frac{6 \cdot 10^{-7} \text{F/cm}^2}{2} \frac{30 \cdot 10^{-4} \text{cm}}{1 \cdot 10^{-4} \text{cm}} (1,5 \text{V} - 1 \text{V})^2$$

$$\mu_n = 200 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

b) $V_{GS} = 2,5 \text{V}$

$$0 < V_{GS}$$

$$V_{DS} = 0,4 \text{V}$$

$$V_{DSat} = V_{GS} - V_T = 2,5 \text{V} - 1 \text{V} = 1,5 \text{V}$$

en corte: $V_{GS} < V_T = 1 \text{V}$
 $I_D = 0$

$$2,5 \text{V} < 1 \text{V} ? \text{ NO}$$

$$V_{DS} > 0$$

no está
a corte

$$0,4 \text{V} > 0 \quad \checkmark$$

En triodo:

$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} < V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

$$2,5V > 1V \quad \checkmark$$

$$0,1V < 2,5V - 1V = 1,5V \quad \checkmark$$

} esto es en triodo

En saturación

$$V_{GS} > V_T$$

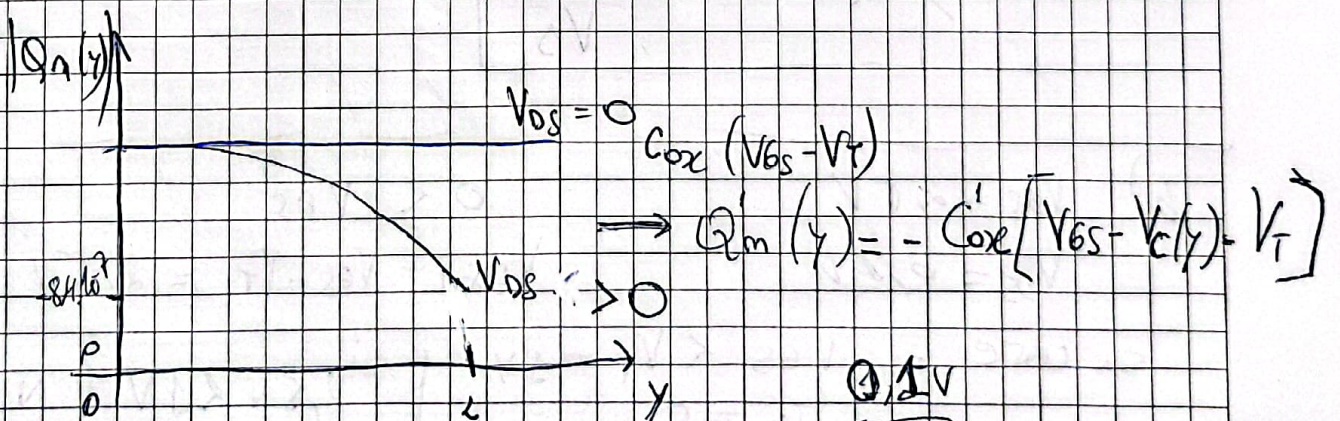
$$V_{DS} > V_{DSsat}$$

$$2,5V > 1V \quad \checkmark$$

$$0,1V > 2,5V - 1V = 1,5V? \quad \text{NO}$$

} no esto es en saturación

c) $V_{GS} = 2,5V$
 $V_{DS} = 0,1V$



$$I_{D1} (V) = - 6 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2} [2,5V - V_C(L) - 1V] = 8,4 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2}$$

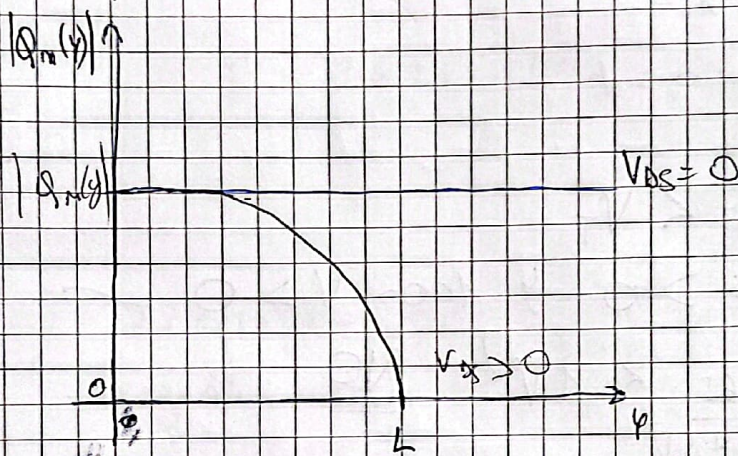
$\underbrace{\hspace{10em}}_{= V_{DS} \text{ (regimen lineal)}}$

d) $V_{GS} = 2,5V$

$V_{DS} = 2,5V$

$$Q_m(y) = -6 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2} \sqrt{2,5V - 2,5V - 1V} = 0$$

La carga se hace nula, se despolariza completamente



e) Indagaremos se pide $N_d(y)$ para $y=0$. (extremo del source)

$N_d(L)$ es para el extremo del drain.

En régimen lineal, $V_c(0) = 0 \Rightarrow$

$$Q_m(0) = -6 \cdot 10^{-7} \frac{F}{cm^2} \sqrt{2,5V - 0 - 1V}$$

$$|Q_m(0)| = -9 \cdot 10^{-7} \frac{C}{cm^2} = -q N_d \Rightarrow$$

$\frac{9 \cdot 10^{-7} C}{1,602 \cdot 10^{-19} C}$

$$N_d = 5,6179 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

*No estoy muy seguro

5. NMOS

$$V_{TO} = 1 \text{ V}$$

$$N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_p = 0,42 \text{ V}$$

$$\mu_n = 730 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$C_{ox} = 0,68 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$$

$$V_{DS} = 100 \text{ mV} = 0,1 \text{ V}$$

a) Corte: $V_{GS} < V_T$

$$V_{DS} > 0 \text{ y } 100 \text{ mV} > 0 \checkmark$$

$$\underbrace{V_{GS}}_{= 1,5 \text{ V}} < 1 \text{ V? } \underline{\text{NO}}$$

Triodo:

$$V_{GS} > V_T$$

$$1,5 \text{ V} > 1 \text{ V} \checkmark$$

$$V_{DS} < V_{DSAT} = V_{GS} - V_T = 1,5 \text{ V} - 1 \text{ V} = 0,5 \text{ V}$$

$$V_{DS} < 0,5 \text{ V?}$$

$$0,1 < 0,5 \text{ V} \checkmark \quad \text{SI, esto es triodo}$$

Saturación

$$V_{GS} > V_T$$

$$1,5 \text{ V} > 1 \text{ V} \checkmark$$

$$0,1 \text{ V} = V_{DS} > V_{DSAT} = 0,5 \text{ V} \quad \text{NO}$$

Estos operando en triodo. (línea 1)

$$(b) \quad \delta = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2 \epsilon_s q N_{av}} \mu$$

factor de sustitución
o hallgate
parameter o
body factor coefficient

$$\delta = \frac{4}{0,68 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2} \sqrt{208,85 \cdot 11,7 \cdot 10^{14}}$$

$$1,602 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{17} \text{ cm}^3$$

$$\delta = 26788,63$$

(c) Del gráfico se puede deducir que está en
región de corte puesto que $I_D = 0$.

Si no, habría que recordar V_T y realizar
unos cálculos

• PARTE II: PMOS y sus regímenes de operación

6. En PMOS el comportamiento es idéntico a NMOS, pero a la inversa.

- corte: $\left\{ \begin{array}{l} V_{GS} > V_T \\ I_D = 0 \end{array} \right.$

- triodo: $\left\{ \begin{array}{l} V_{GS} < V_T \\ V_{DS} > V_{DSsat} \\ I_D = -\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - |V_T| - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \end{array} \right.$

- saturación: $\left\{ \begin{array}{l} V_{GS} < V_T \\ V_{DS} < V_{DSsat} \\ I_D = -\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \left[1 - \lambda (V_{DS} - V_{DSsat}) \right] \end{array} \right.$

Entonces:

(a) I. corte:

$$V_{GS} > -V_T \Rightarrow V_{GS} > -0,7V$$

$$I_D = 0$$

II. Saturación

$$V_{GS} < -0,7V$$

$$V_{DS} < (V_{GS} - V_T) = V_{GS} - V_T$$

$$V_{DS} = -2V \Rightarrow V_{GS} > -2,7V$$

$$-2,7V < V_{GS} < -0,7V$$

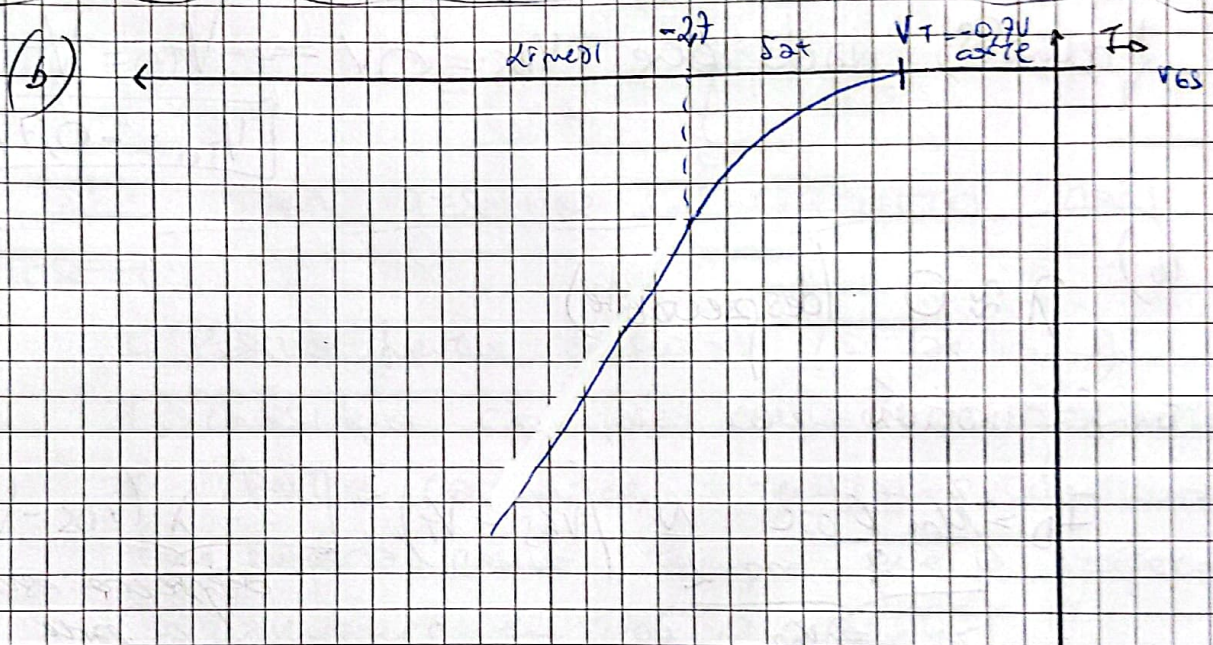
III. Lineal (o modo)

$$V_{GS} \leftarrow -2,7V \text{ y } \rightarrow \text{que}$$

$$-2V \rightarrow V_{GS} + 0,7V$$

y, además,

$$V_{GS} \leftarrow -0,7V$$



(c) Es similar, pero varía V_T

$$C_{ox} = 3,45 \pm 10^{-5} \frac{F}{cm^2}$$

$$\text{pero } V_T(V_{GS}) = V_{T0} - \gamma \left(\sqrt{2\phi_m + V_{GS}} - \sqrt{2\phi_m} \right)$$

$$\phi_m = 25,9mV \text{ en } \left(\frac{11 \cdot 10^{16} cm^{-3}}{6,822 \cdot 10^{19} cm^{-3}} \right) = 0,4036V$$

$$V_T(0,5) = -0,7V - 3,3375 \cdot 10^{-3} \left(\sqrt{2 \cdot 0,4036 + 0,5} - \sqrt{2 \cdot 0,4036} \right)$$

$$V_T(0,5) = -0,7009 \approx -0,7V \text{ (es muy poca el cambio)}$$

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2 q N_A \mu_k} = 3,3375 \cdot 10^{-3}$$

Es despreciable, por lo que todos los resultados hasta ahora (con los cambios).

$$7. a) \quad V_{Dsat} = V_{GS} - V_T$$

$$-0,8 = -4,5 - V_T$$

$$\boxed{V_T = -0,7V}$$

$$-4,3 = -2 - V_T$$

$$-2,3V = -V_T \Rightarrow \boxed{V_T = -0,7V}$$

Además, dado que $V_{BS} = 0V \Rightarrow V_{TO} = V_T$

$$\boxed{V_{TO} = -0,7V}$$

(ojo que el eje dice V_{SD})

$$V_{SD} = -V_{DS}$$

$$V_{GS} = -V_{SG}$$

con orden

(b)

En saturación

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 [1 - \lambda (V_{DS} - V_{DSsat})]$$

$$-100 \mu A = -K_p (-4,5V - (-0,7V))^2 [1 - 0]$$

$$\boxed{K_p = 4,5625 \cdot 10^{-4}}$$

$V_{DS} = V_{DSsat}$

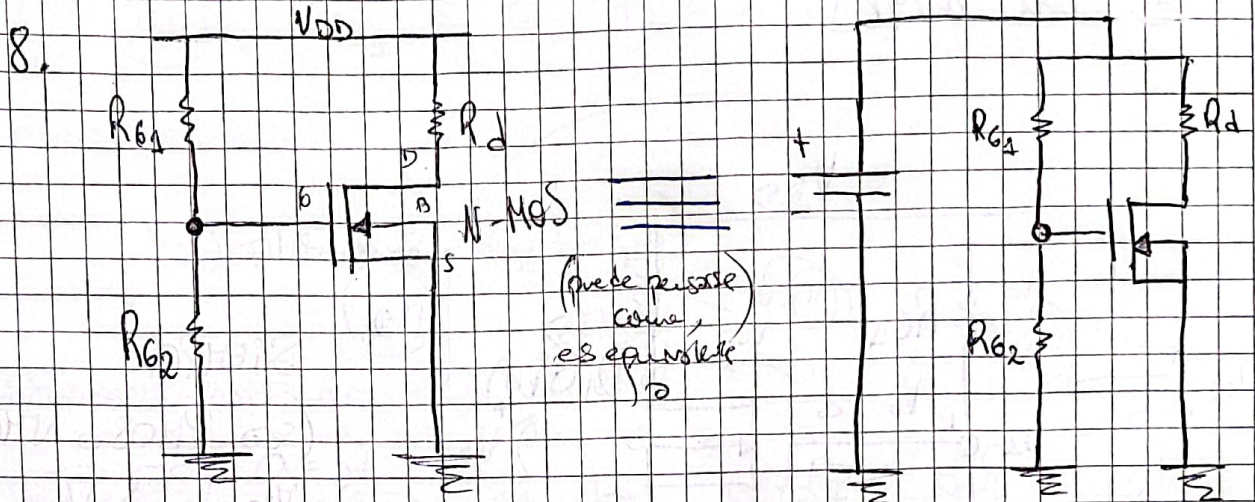
Entonces, tomo el punto $V_{SG} = 4,5V$ - $I_D = -150 \mu A$

$V_{SD} = 5V$

$$-150 \cdot 10^{-6} A = -4,5625 \cdot 10^{-4} (-4,5V + 0,7V)^2 [1 - \lambda (-5V + 0,8)]$$

$$\boxed{\lambda = \frac{5}{42} \approx 0,1190}$$

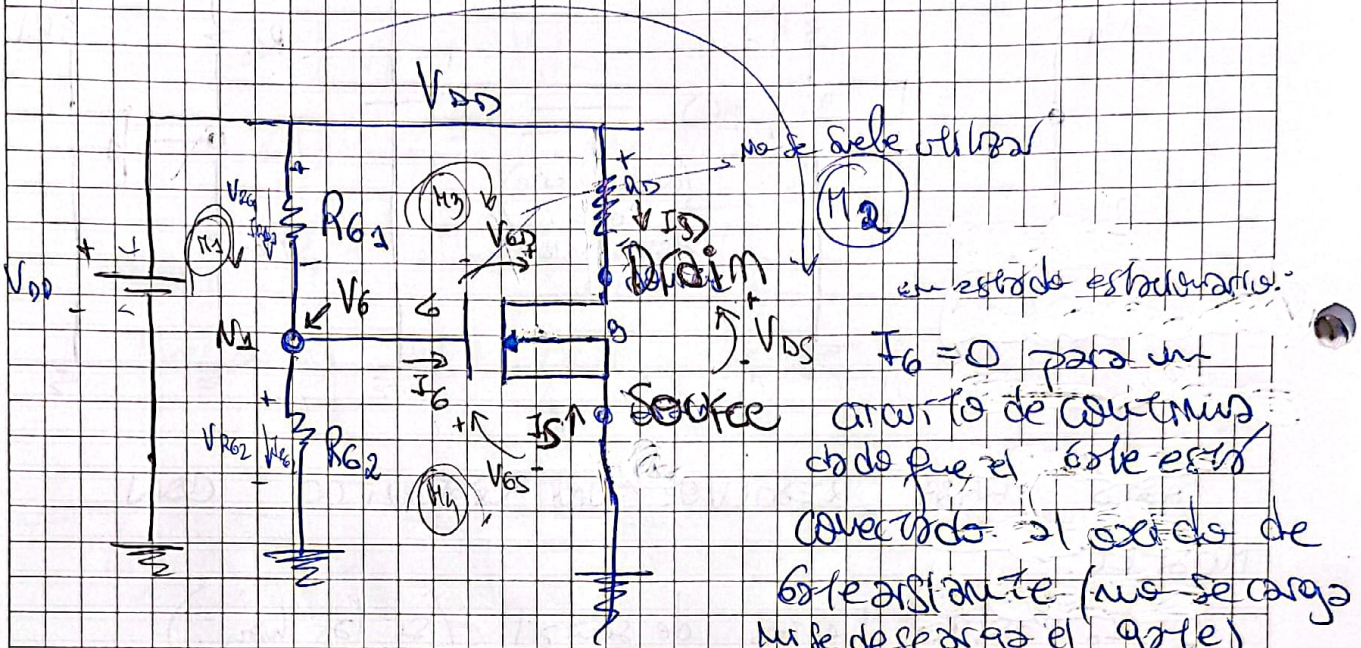
• PARTE III: Polarización



PASOS PARA RESOLVER UN CIRCUITO CON MOSFET:

- I. Pasivos fuertes de señal (si los hay)
- II. Considera capacitores como circuitos abiertos
- III. Plantear corrientes y tensiones del circuito (no importa como siempre que se respete las conexiones en todo lo resuelto).
- IV. obtener Voltajes.
- V. Supongo régimen de saturación
- VI. Resolvo.
- VII. verifico que se cumplan las condiciones de saturación.
- VIII. Si no se cumple, regreso al punto III con otro régimen o caso con la nueva suposición hasta encontrar lo correcto.

La flecha del MOSFET es avante, por lo que es un NMOS



En un canal N hay un flujo de electrones y vale la pena saturarcent:

$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} > V_{DS_{sat}}$$

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \left[1 + \lambda (V_{DS} - V_{DS_{sat}}) \right]$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma \sqrt{-\phi_p - V_{GS}}$$

Análisis por mallas:

(M1)

$$V_{DD} - I_{R_{G1}} R_{G1} - I_{R_{G2}} R_{G2} = 0$$

(M2)

$$V_{DD} - I_D R_D - V_{DS} = 0$$

(M3)

$$I_{R_{G1}} R_{G1} - I_{R_D} R_D - V_{GS} = 0 \Rightarrow V_{DD} = 4V$$

(M4)

$$I_{R_{G2}} R_{G2} - V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} = \frac{I_{R_{G2}} \cdot 2k\Omega}{V_{GS} = 2V}$$

Notas:

$$\textcircled{M1} \quad I_{RG1} = I_{RG2} + \overset{=0}{I_G} = I_{RG2}$$

Entonces:

$$V_{DD} = I_{RG1} (R_{G1} + R_{G2})$$

Además $I_S = -I_D$

De esta manera, con los datos del problema:

$$3V = I_{RG1} (1k\Omega + 2k\Omega)$$

$$\boxed{I_{RG1} = 1mA} \Rightarrow \boxed{I_{RG2} = 1mA}$$

$$V_G = V_{RG2} = I_{RG2} R_{G2} = 1mA \cdot 2k\Omega = \boxed{2V}$$

NMOS en saturación se cumple

que $V_{GS} > V_T$: $2V > 1V$ ✓ y esto es suficiente
 y además $V_{DS} > V_{DSsat} \Rightarrow 1V > 1V$ ✓ esto es sat.

$V_G = V_{DD}$. A partir de $\textcircled{M2}$ e I_D defina

me olvidé el divisor 2

$$\textcircled{M2} \quad I_D = \frac{1mA}{2} \cdot \left(\overset{=2V}{V_{GS} - 1V} \right)^2 = 1mA$$

desprecia efecto de modulación de largo de canal $\lambda \rightarrow 0$

$$\textcircled{M2} \quad 3V - I_D \cdot \overset{=2k\Omega}{R_D} - V_{DS} = 0 \Rightarrow \boxed{V_{DS} = 1V}$$

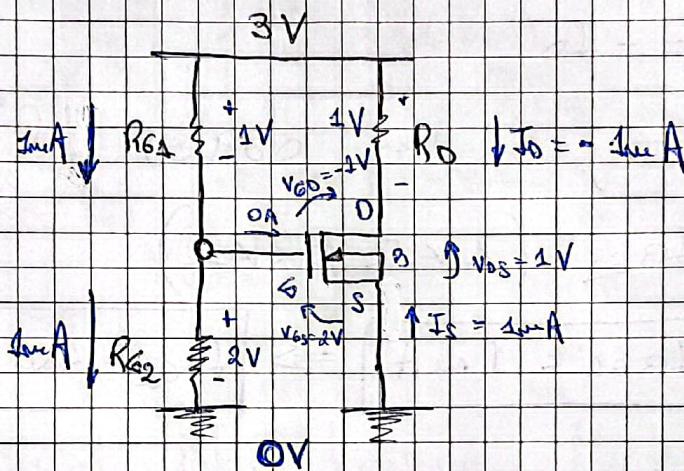
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T = 2V - \overset{=1V}{V_T} = \boxed{1V = V_{DSsat}}$$

Reemplazando en (M3)

$$1\mu A \cdot 1k\Omega - 1\mu A \cdot 2k\Omega = V_{GD}$$

$$\boxed{-1V = V_{GD}}$$

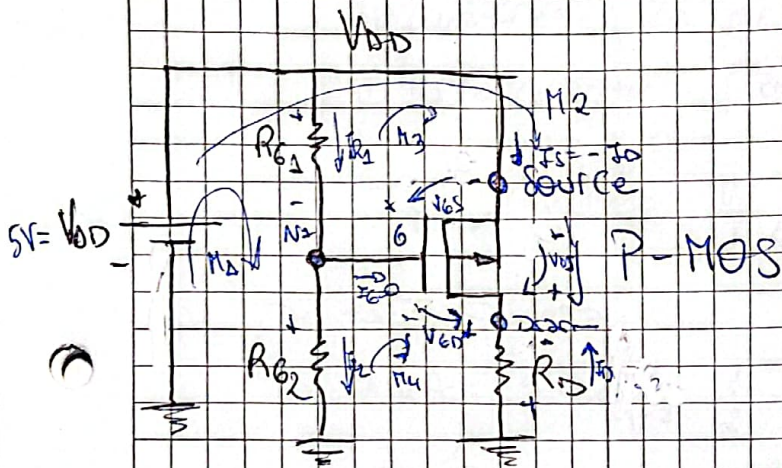
Entonces



Estos en régimen de saturación, se supuso dicho régimen y luego se realizó la verificación, si no hubiera estado en saturación hubiera sido necesario volver a realizar los cálculos.

⊙

9. es similar al 8, solo que cambiamos las condiciones por ser un PMOS



Suponemos EILC (efecto de modulación del largo de canal) $\lambda \rightarrow 0$

y circuito a estado estacionario

Regimen de saturación.

De forma similar,

$$(M1) \quad I_{D1} = I_{D2} + I_6 = I_{D2}$$

$$(M2) \quad V_{DD} - I_{D1} R_{G1} - I_{R2} R_{G2} = 0$$

$$V_{DD} = I_{D1} (R_{G1} + R_{G2}) \Rightarrow \frac{5V}{200k\Omega + 300k\Omega} = 10 \mu A = I_{D1} = I_{D2}$$

$$(M3) \quad V_{DD} + V_{DS} + I_D R_D = 0$$

$$V_{DS} = -12,84378V$$

$$(M4) \quad I_{D1} R_{G1} + V_{GS} = 0$$

$$-I_{D1} R_{G1} = V_{GS} = 1 \cdot 10^{-5} A \cdot 200 \cdot 10^3 \Omega = -2V = V_{GS}$$

$$(M5) \quad I_{D2} R_{G2} - V_{DS} + I_D R_D = 0$$

$$V_{DS} = 0,84378V$$

Además, en PMOS (saturación)

$$V_{DSsat} = -2V + 0,9V = -1,1V$$

$$V_{GS} < V_T \Rightarrow -2V < -0,9V \quad \checkmark$$

esto es saturación

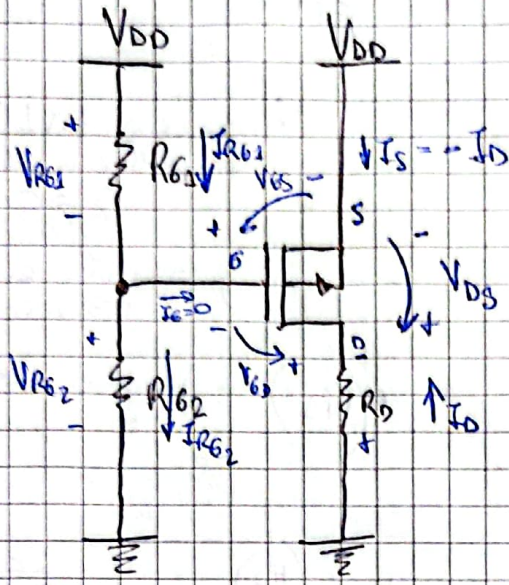
$$V_{DS} < V_{DSsat} \Rightarrow V_{GS} - V_T \Rightarrow -2,84 < -1,1V \quad \checkmark$$

después λ

$$I_D = -\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = -\frac{36 \mu A}{2 V^2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6 m}{5 \cdot 10^3 m} (-2,84 + 0,9V)^2$$

$$I_D = -6,534 \cdot 10^{-5} A$$

De esto manera,



Esto es regimen de saturación como se demuestra anteriormente.

①

10. a) Para el circuito 6.(a) se tiene un NMOS, puesto que $V_{GS} > V_T$ la corriente de saturación I_D es positivo.

De esta manera: (despreciando efecto de modulación de longitud de canal $\lambda \rightarrow 0$):

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = I_{Dsat} = V_{GS} - V_T$$

El V_{GS} si cambia, pero el V_T no (en realidad si, pero lo despreciamos)

De esta manera:

$$1 \mu A = 50 \mu A \cdot \frac{1}{V^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{L} (3V - V_T)^2$$

$$(1) \quad \frac{1}{50} = (3V - V_T)^2$$

$$(2) \quad 0,55 \mu A = 50 \mu A \cdot \frac{1}{V^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{L} (2,5V - V_T)^2$$

$$2,2 \frac{1}{\alpha} = (2,5V - V_T)^2$$

Dividiendo (1) por (2)

$$\frac{20}{11} = \left(\frac{3V - V_T - 0,5V + 0,5V}{2,5V - V_T} \right)^2$$

$$\frac{20}{11} = \left(1 + \frac{0,5}{2,5 - V_T} \right)^2$$

$$\sqrt{\frac{20}{11}} = 1 + \frac{0,5}{2,5 - V_T}$$

$V_T > 0$
(no gráfica)

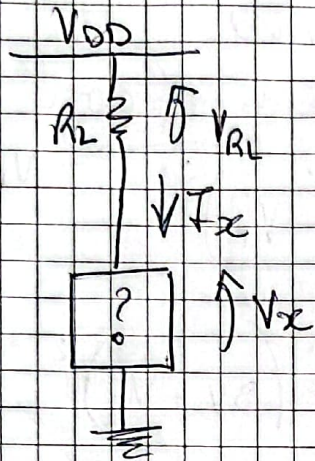
$$\frac{2\sqrt{55}}{11} = 1 + \frac{0,5}{2,5 - V_T} \Rightarrow V_T = \frac{17 - \sqrt{55}}{9}$$

por lo que: $\frac{W}{L} = 10,68$

$$V_T \approx 1,0648V$$

(por el gráfico debe ser > 0)

(b) da recta de carga que de pensada de la siguiente manera:



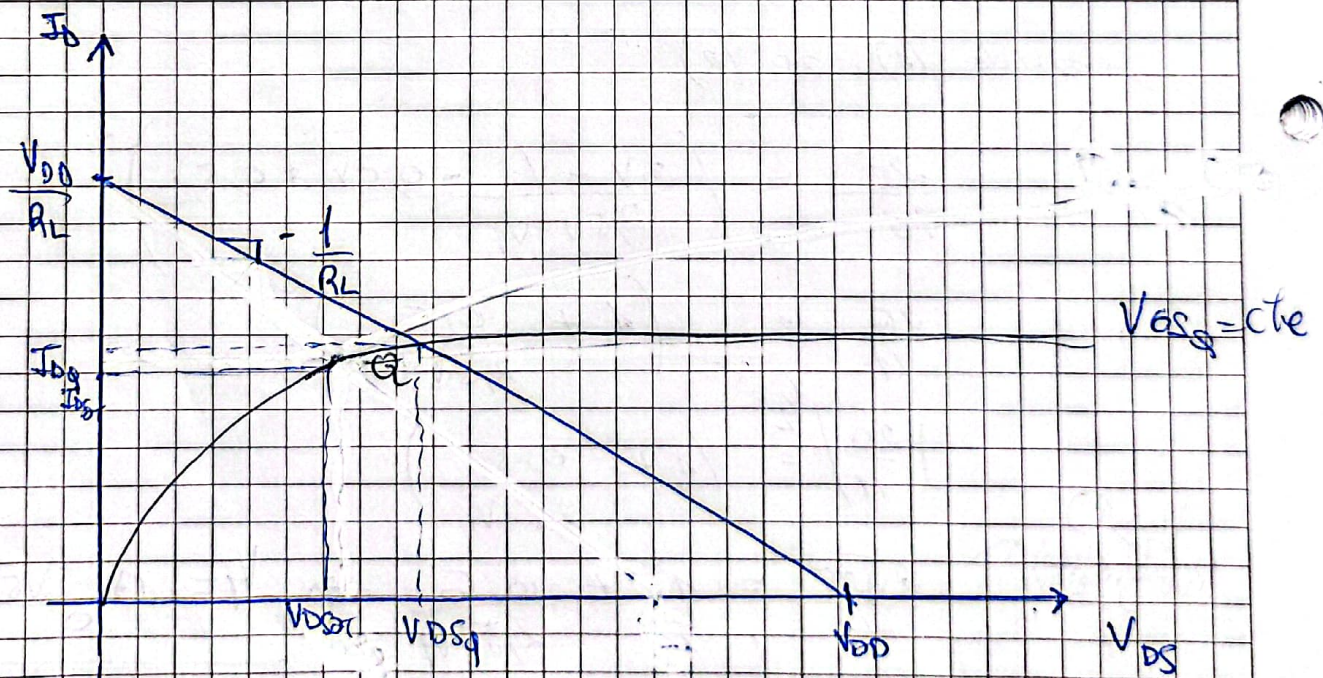
$$I_x = -\frac{1}{R_L} V_x + \frac{V_{DD}}{R_L}$$

La ec. de la recta de carga

La impone R_L y V_{DD} depende del dispositivo que se ponga.

En el circuito en cuestión por lo que:

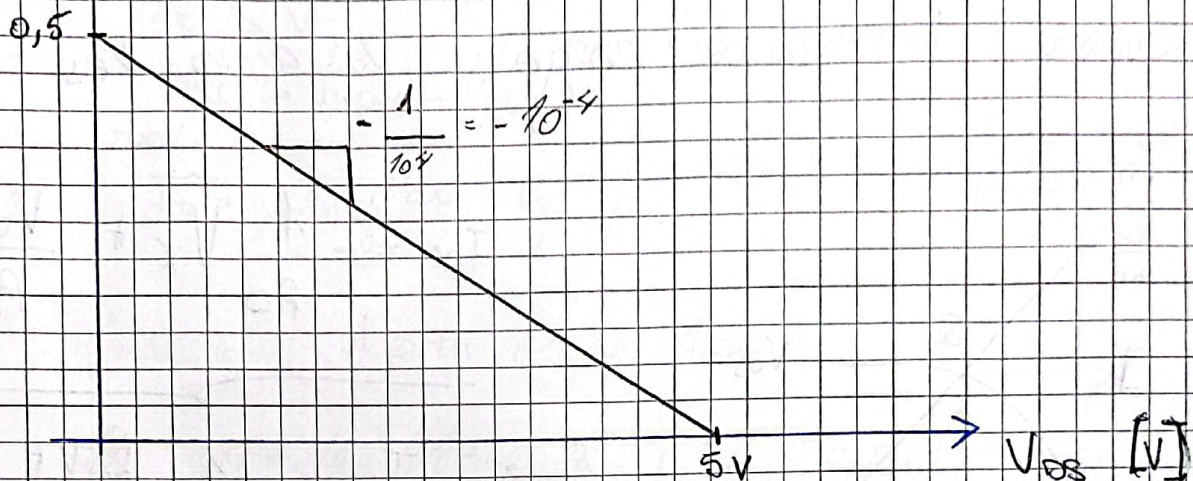
$$R_L = R_D \quad \text{y} \quad V_x = V_{out}$$



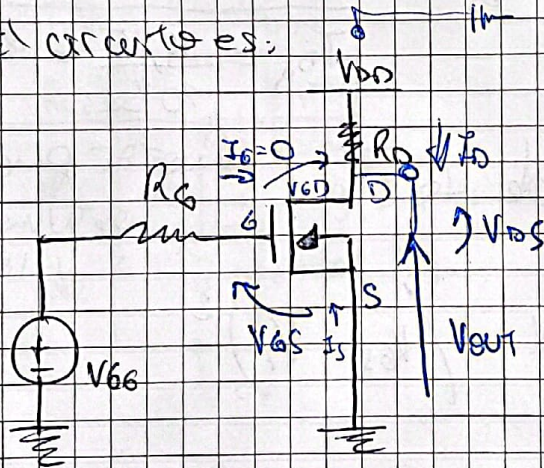
El punto $Q = (I_{DQ}, V_{DSQ})$ es el punto de operación del transistor y el de TRABAJO del circuito (que es la intersección).

Sabiendo que $V_{DD} = 5V$ y $R_D = 10k\Omega$

$I_D [mA]$



c) El circuito es:



$$I_S = -I_D$$

Dado que $I_D = 0$,
 $V_G = V_{GS} = V_{GS}$

y $V_S = 0$ puesto
 que esos conectados
 a tierra

$$V_{OUT} = V_{DS} = 2,5V$$

Por lo que, por ley de
 Ohm:

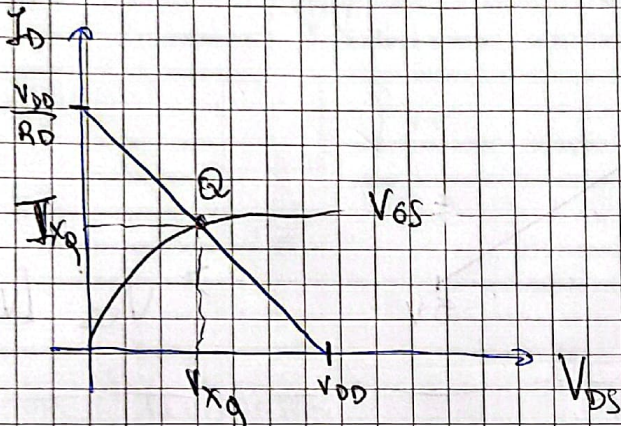
$$I_D \cdot R_D = 2,5V = 5V - 2,5V$$

$$\stackrel{I_D}{=} \frac{2,5V}{10k\Omega}$$

$$I_D = 0,25mA$$

A esto es otro forma de obtener I_D ,
 pero se pide via grafico.

Por el ejercicio pide V_{GS} de forma gráfica, esto se logra obteniendo el punto Q de trabajo del circuito que es el punto de intersección entre la recta de carga y la curva V_{GS} :



$$I_x = -\frac{1}{R_D} V_x + \frac{V_{DD}}{R_D}$$

$$I_{DQ} = -\frac{1}{10 \cdot 10^3 \Omega} \cdot 2,5V + \frac{5V}{10 \cdot 10^3 \Omega}$$

$$I_{DQ} = \frac{2,5}{10^4 \Omega} = 2,5 \cdot 10^{-4} A$$

Con la ecuación de I_D :

(comprobar que se obtiene el mismo valor de I_D)

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

Despejo V_{GS} tal que:

$$\frac{50 \cdot 10^{-4} A/V^2 \cdot 10,68}{2} (V_{GS} - 1V)^2 = 2,5 \cdot 10^{-4} A$$

$$V_{GS} \approx 1,0967V$$

$$V_{GS} = V_G = V_{GS} = 1,1V$$

$$\left[V_{GS} \approx 1,1V \right]$$

Ⓢ

11. El transistor es de tipo N-MOS, el cual permanece en saturación siempre que:

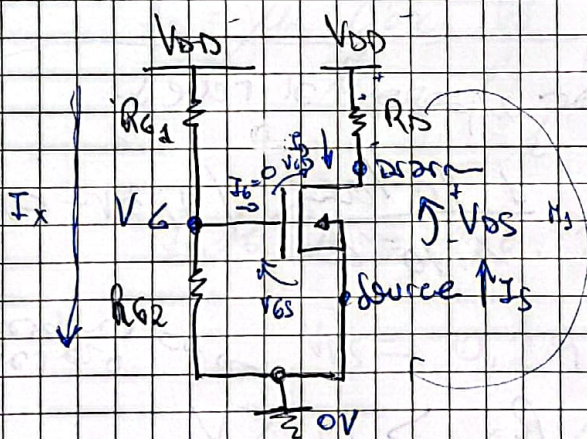
$$V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} > V_{DSat} = V_{GS} - V_T$$

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \begin{matrix} \text{desprezo EDC} \\ \approx 0 \end{matrix}$$

partir de los datos:

$$(A) \quad 116 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}^2 \cdot 2 \cdot (V_{GS} - 0,8 \text{ V})^2 = I_D$$



$$V_G = V_{GS} = I_x R_{G2}$$

$$I_D = -I_S$$

$$I_{R_{G1}} = I_{R_{G2}} = I_x = \frac{V_{DD}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

por lo que

$$I_x = \frac{5 \text{ V}}{500 \cdot 10^3 \Omega} = 10 \mu\text{A}$$

$$V_G = V_{GS} = 10 \mu\text{A} \cdot 130 \cdot 10^3 \Omega$$

$$V_{GS} = 1,3 \text{ V} > V_T = 0,8 \text{ V}$$

$$V_{DS} > V_{DSat} = V_{GS} - V_T = 1,3 \text{ V} - 0,8 \text{ V} = 0,5 \text{ V}$$

$V_{GS} > 0,8 \text{ V}$ } para que este en régimen de saturación

ley de Ohm (11)

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D$$

I_0 (mA) despegar

$$5V - I_0 \cdot 18 \cdot 10^3 \Omega > 0,5V$$

$$2,8 \cdot 10^{-4} A > I_0$$

entonces, despreciando EMIC: (2-00)

$$2,8 \cdot 10^{-4} A > \frac{80 \cdot 10^{-6} A/\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{W}{4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \left(4,3V - 0,8V \right)^2$$

$$0,01 \text{ cm} > W > 0$$

b) El proceso es similar, pero al revés.

$$I_0 = \frac{80 \cdot 10^{-6} A/\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}}{4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}} \left(4,3V - 0,8V \right)^2$$

$$I_0 > 2,8 \mu A$$

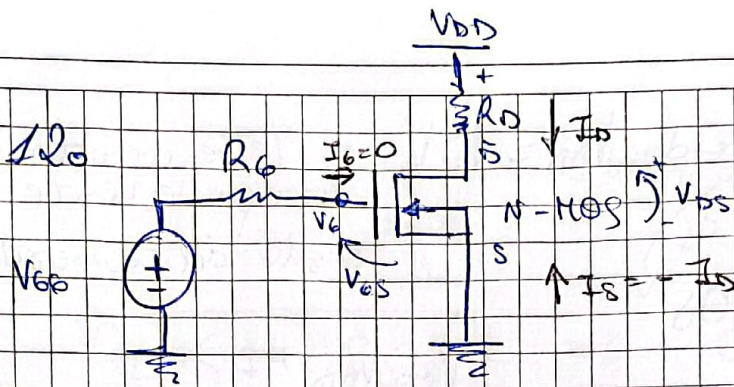
no cambia la otra parte

$$5V - 2,8 \cdot 10^{-6} A \cdot R_D > 0,5V$$

$$4,8 \cdot 10^6 \Omega > R_D$$

$$4,8 M\Omega > R_D > 0$$





Mohms (mA)

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

Este circuito recuerda al de la figura 6 (b)

$$V_{GS} = V_G = V_{GG} = 1V > V_T = 0,8V \quad \checkmark$$

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T = 1V - 0,8V = 0,2V$$

El pñango saturación $V_{DS} > V_{DS_{SAT}} = 0,2V$ (falta verificar)

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} \frac{V_{GS} - V_T}{2} \left[1 + \theta (V_{GS} - V_T) \right] (V_{DS} - V_{DS_{SAT}})$$

$\frac{W}{L} = \frac{1}{2}$ $\frac{V_{GS} - V_T}{2} = \frac{1V - 0,8V}{2} = \frac{0,2V}{2}$

$$5 \cdot 10^{-3} A = 116 \cdot 10^{-3} A/V^2 \cdot \frac{(0,2V)^2}{2} \left[1 + 0,8 (V_{GS} - 0,8) \right]$$

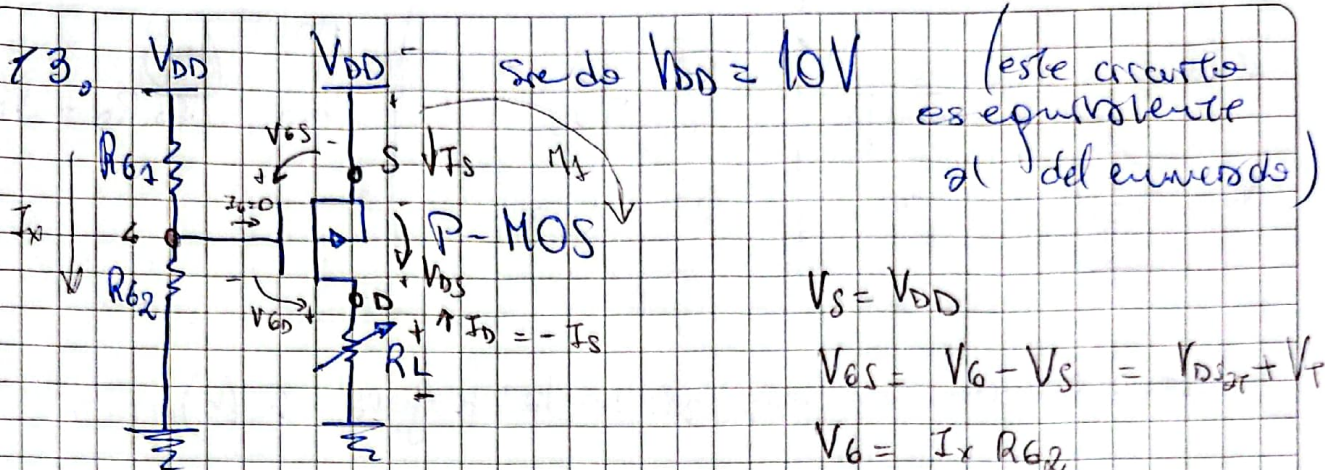
$$V_{DS} = 0,2969V \approx 0,3V > 0,2 = V_{DS_{SAT}}$$

está en régimen de saturación

Reemplazando de en (mA):

$$5V = 5 \cdot 10^{-3} R_D + 0,3V$$

$$\boxed{940,6 \Omega = R_D}$$



(a) Debe estar en saturación para que $I_D = -35\mu A = cte$

b) Para que esto sea válido en un P-MOS:

$$V_{GS} < V_T = -0,5V$$

$$V_{GS} < -0,5V$$

$$V_{DS} < V_{DSAT} = V_{GS} - V_T \Rightarrow V_{DS} < 0$$

$$(11a) \quad V_{DD} + V_{DS} + I_D R_L = 0$$

I_D varía entre 0 y $-35\mu A$ (dado que tomamos ese valor como el de saturación).

$$c) \quad \left. \begin{array}{l} V_{GS} < -0,5V \\ V_{DS} < 0 \end{array} \right\} \text{régimen de saturación}$$

d) R_L :

$$5V + V_{DS} + I_D R_L = 0 \Rightarrow -I_D R_L + 5V = V_{DS}$$

$$\Rightarrow -I_D R_L < 5V$$

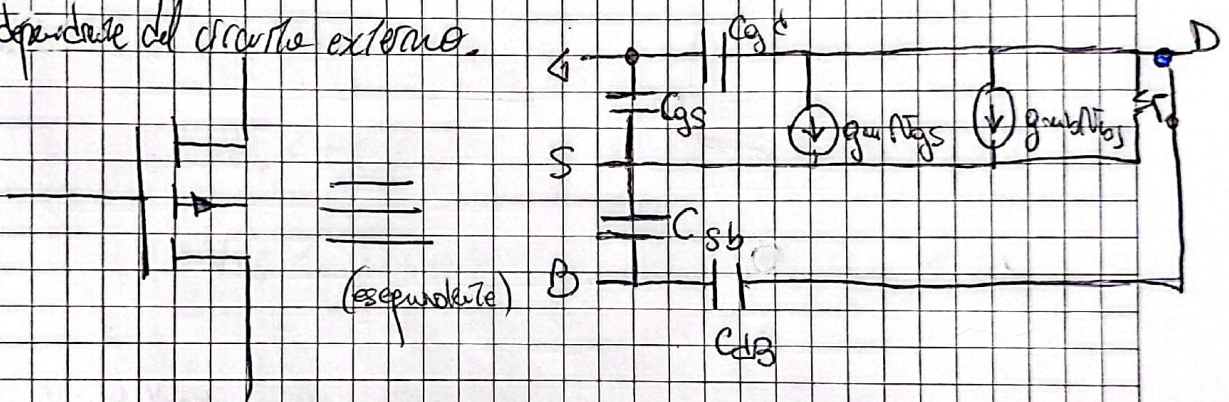
$$R_L < \frac{5V}{35 \cdot 10^{-3}A} = 142,8571 \Omega$$

$$|R_L < 142,86 \Omega| \Rightarrow 0 < R_L < 142,846 \Omega$$

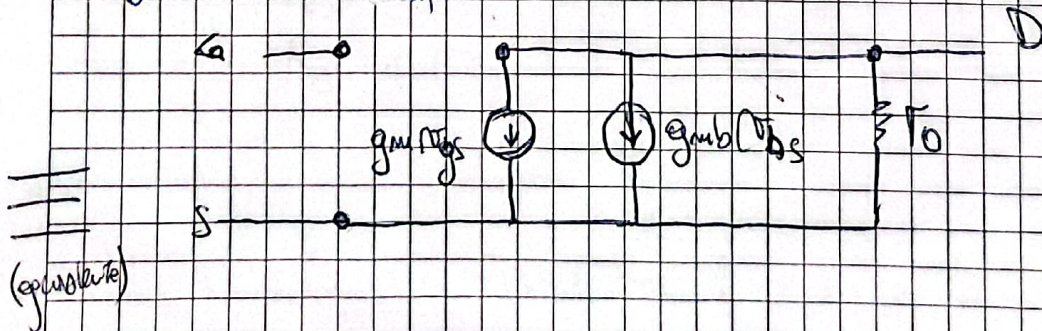
me estoy seguro si este ejercicio está bien.

• PARTE IV: Pequeña Señal

El Modelo de pequeña señal (MPS) se utiliza para modelar mediante elementos lineales el comportamiento del transistor alrededor del punto de trabajo Q . Si trabajamos en su rango de linealidad, nos liberamos de las ecuaciones no lineales de I_b y V_{be} y es más fácil resolver el circuito. Es independiente del circuito externo.



*generalmente en ejercicios de este tipo NO se suelen pedir los capacitores C_{gs} , C_{gd} , C_{sb} y C_{db} , es decir se trabaja con baja frecuencia o media (NO ALTA). Por esto se desaparecen los capacitores, y el circuito puede simplificarse:



* Aunque $V_{DS} = 0$, el parámetro $g_{m,b}$ y la fuente siguen estando. Se define $k = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L}$

Entonces:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_Q = \frac{\partial \sqrt{-k I_{D,sat}}}{\partial \sqrt{k I_{D,sat} [1 + \lambda (V_{DS} - V_{DS,sat})]}} \left[1 - \lambda (V_{DS} - V_{DS,sat}) \right]$$

$\approx \frac{\partial \sqrt{-k I_{D,sat}}}{\partial \sqrt{k I_{D,sat}}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{-k I_{D,sat}}{k I_{D,sat}}} = \frac{1}{2} \sqrt{-1} = \frac{j}{2}$

$$g_{m,b} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_Q = \frac{g_m}{2} \sqrt{2\phi_m + V_{DS}} = \frac{g_m}{2} \frac{j}{\sqrt{2\phi_m - V_{DS}}}$$

$$g_o = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_Q = -\lambda I_{D,sat} = \lambda I_{D,sat} \quad r_o = \frac{1}{g_o}$$

* Para el caso de alta frecuencia, además se debe calcular las capacitancias:

$$C_{gs} = \left. \frac{\partial Q}{\partial V_{GS}} \right|_Q = \frac{2}{3} W L C_{ox} + W C_{ov}$$

$$C_{gd} = \left. \frac{\partial Q}{\partial V_{GS}} \right|_Q = W C_{ov}$$

$$C_{db} = \left. \frac{\partial Q}{\partial V_{DS}} \right|_Q = C_j' A_s$$

$$C_{sb} = \left. \frac{\partial Q}{\partial V_{SB}} \right|_Q = C_j' A_D$$

14. (8) A partir de los resultados obtenidos luego de pobrizar el circuito del ejercicio 8:

$$I_{D_{\text{sat}}} = 1 \mu\text{A} \quad (\text{esto en régimen de saturación})$$

$$V_{DS} = 1\text{V} \quad \left. \begin{array}{l} V_S = 0\text{V} \quad (\text{ver circuito, esto conectado a GND}) \\ V_{GS} = 2\text{V} \end{array} \right\} \begin{array}{l} V_{DS} = V_D - V_S \\ V_{GS} = V_G - V_S \end{array}$$

$$V_{DS} = 0 \quad (\text{GND})$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$V_{DG} = V_D - V_S - V_G + V_S = V_{DG} = -1\text{V}$$

$\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$ es despreciable, por lo que:

$$r_o = -\lambda I_{D_{\text{sat}}} = 0 \Rightarrow r_o \rightarrow \infty$$

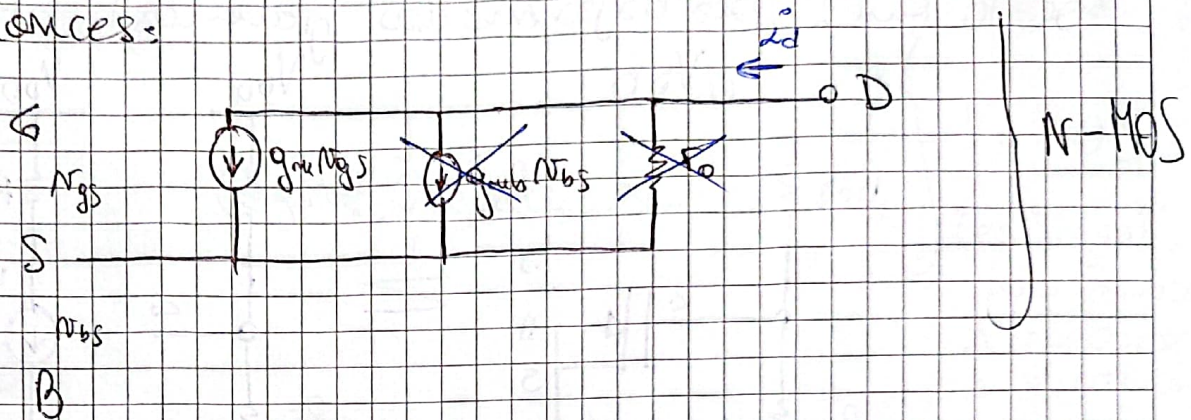
$$g_m = \sqrt{2 \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 10^{-3} \text{ A}}$$

$$g_m = \sqrt{2} \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

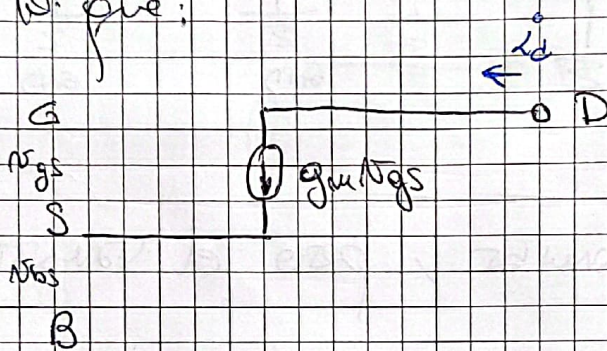
g_{mb} "desaparece" ya que en el modelo de pequeña señal esto se modela con una fuente de corriente controlada por V_{bs} , pero los terminales BULK y SOURCE están cortocircuitados, por lo que dicha fuente desaparece.

Ojo g_{mb} existe, pero $V_{bs} = 0$, entonces por eso desaparece.

Entonces:



por lo que:



El rango de validez del modelo linealizado se acepta un 10% de error en la linealización

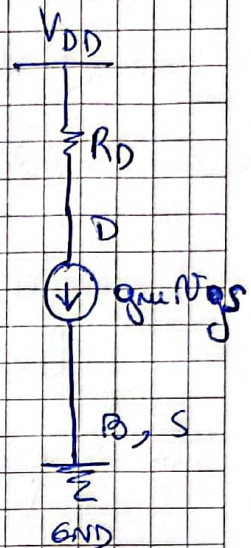
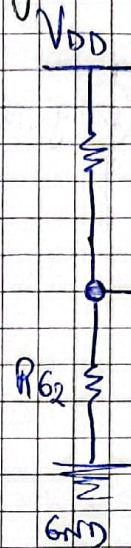
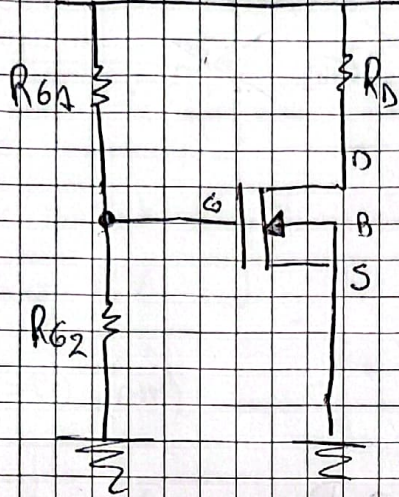
$$V_{gs} < |0,2 (V_{ds} - V_T)|$$

Dado que

$$\left. \begin{array}{l} V_{ds} = 2V \\ V_T = 1V \end{array} \right\} \Rightarrow V_{gs} < 0,2 |2V - 1V|$$

$$\boxed{V_{gs} < 0,2V}$$

Por lo que: (para bajas frecuencias) (frecuencias)



(9) Este caso es similar, pero el transistor es un P-MOS.

$$I_{Dsat} = -6,534 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

$$V_{DS} = -2,8438 \text{ V}$$

$$V_{GD} = 0,8438 \text{ V}$$

$$V_{GS} = -2 \text{ V}$$

$$g_m = 2 \sqrt{-k I_{Dsat}} = 2 \sqrt{-\frac{1}{2} \cdot 36 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{V}^2} \cdot \frac{150 \mu\text{A}}{5 \mu\text{m}}} \cdot (6,534 \cdot 10^{-5})$$

$$g_m = 3,7568 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

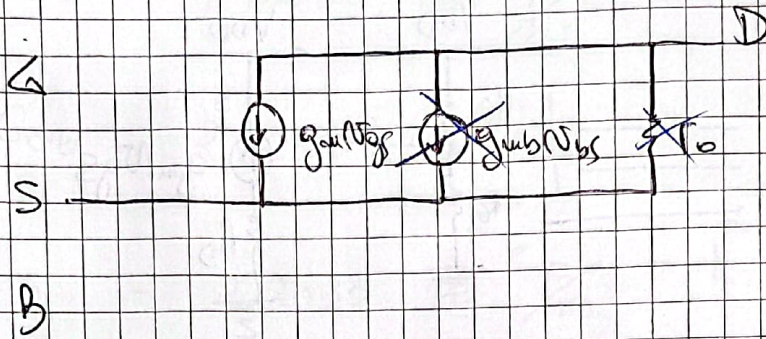
$$g_o = 0 \Rightarrow r_o \rightarrow \infty$$

$$g_{mb} \cdot \frac{V_{GS}}{V_{GS}} = 0$$

$V_{GS} = 0$ ya que están conectados a los mismos terminales (ojo $V_G = V_S = -V_{DD}$)

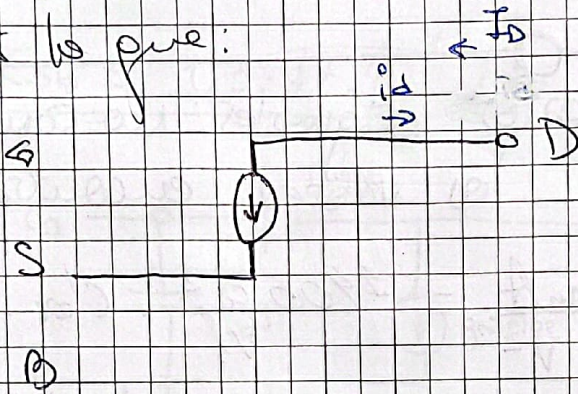
$V_{GS} = 0$, pero g_{mb} existe

entonces:



P-MOS
(es "igual",
pero cuando
al conectarse
en el circuito)

por lo que:



el rango de voltajes es:

$$V_T = -0,8V$$

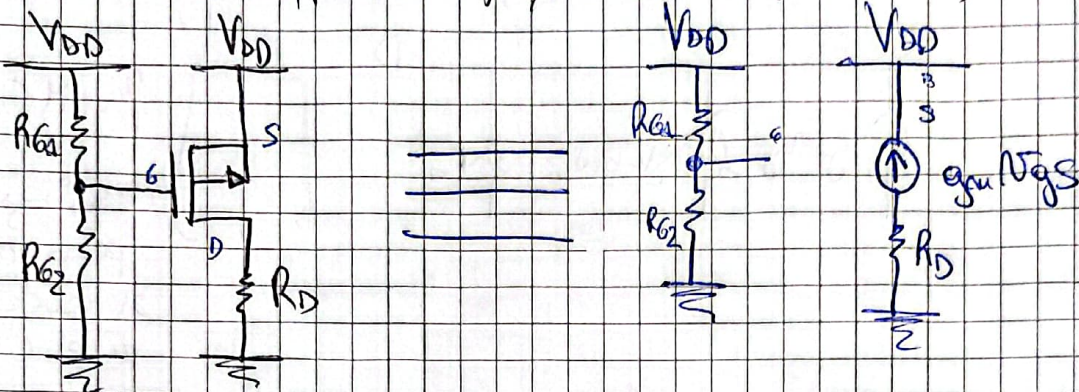
$$V_{gs} < 0,2 (V_{ds} - V_T)$$

$$V_{gs} < 0,2 (-2V + 0,8V)$$

$$V_{gs} < 0,2 \cdot 1,2V$$

$$V_{gs} < 0,24V$$

Entonces. (para bajas y medias frecuencias)



15. Dado que los datos originales no cambian, siguen siendo válidos los valores encontrados.

$$I_{DQ} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \frac{V_{GS}^2}{2} = 2 \text{ mA} = \frac{1400 \text{ cm}^2}{V_{GS}^2} \cdot C_{ox} \cdot \frac{2 \text{ V}^2}{2}$$

$$10^{-3} \text{ A} = \frac{1400 \text{ cm}^2}{V_{GS}^2} \cdot C_{ox} \cdot 2$$

$$3,5714 \cdot 10^{-7} = C_{ox}$$

Entonces:

$$C_{gs} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 3,5714 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,3 \cdot 10^{-21}}{10^{-4} \text{ cm}}$$

$$C_{gs} = 5,3619 \cdot 10^{-15} \text{ F}$$

$$C_{gd} = W C_{ov} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \frac{0,3 \cdot 10^{-21} \text{ F}}{10^{-4} \text{ cm}}$$

$$C_{gd} = 6 \cdot 10^{-16} \text{ F}$$

$$C_{db} = c_j' \cdot A_D = \sqrt{\frac{q \epsilon_{Si} N_A N_D}{2(\phi_B - V) (n_A + N_D)}} \cdot (10^{-4} \text{ cm})^2$$

$$\approx \sqrt{\frac{q \epsilon_{Si} N_A}{2(0,91 \text{ V})}} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 (\text{vols.}) \cdot 0,85 \text{ V} + 0,42 \text{ V}$$

$$C_{db} = 2,7033 \cdot 10^{-8} \frac{F}{\text{cm}^2} \cdot 10^{-8} \text{cm}^2$$

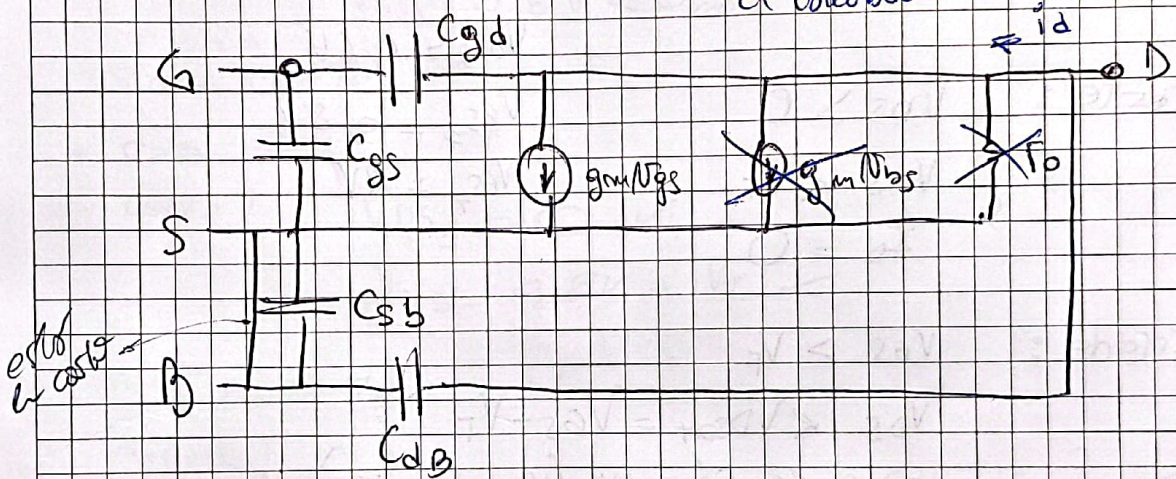
$$C_{db} = 2,7033 \cdot 10^{-16} F$$

$$= 0,5 \cdot 10^{-8} \text{cm}^2$$

$$C_{gs} = 2,2033 \cdot 10^{-8} \frac{F}{\text{cm}^2} \cdot A_d$$

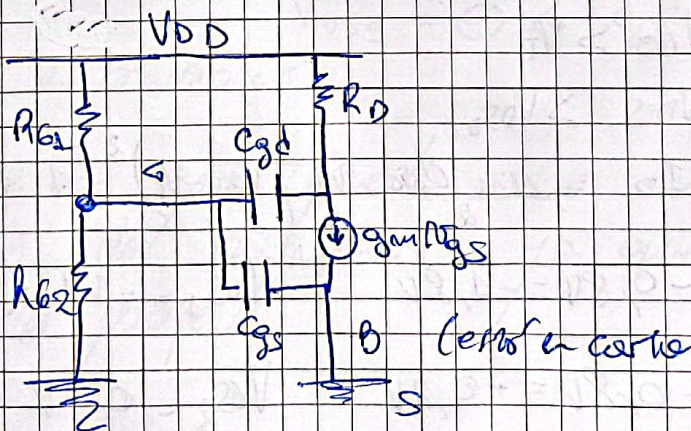
$$C_{sb} = 1,3517 \cdot 10^{-16} F$$

El rango de voltajes es el mismo que el obtenido anteriormente



esto a corte

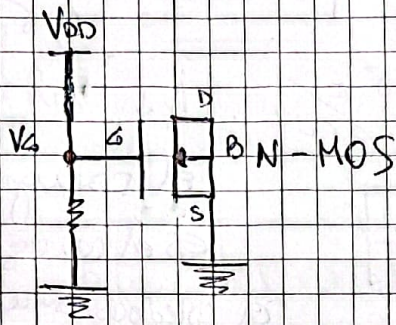
Entonces:



esto a corte

● PARTE V: Integradores

16. a) $V_D = V_S = V_B = 0V \Rightarrow V_{DS} = 0V \quad \left\{ \begin{aligned} V_{DS1} &= V_{DS2} = V_{DS3} = V_{DS4} = 0V \\ V_{GS} &= V_G \quad \left\{ \begin{aligned} V_{GS1} &= V_{GS2} = V_{GS3} = V_{GS4} = 0V \\ V_{BS} &= 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \right.$



$$V_T = 0,8V$$

$$V_{GS1} = -1V$$

$$V_{GS2} = 0,6V$$

$$V_{GS3} = 0,8V$$

$$V_{GS4} = 2V$$

Corte: $V_{DS} > 0$
 $V_{GS} < V_T$
 $I_D = 0$

Triodo: $V_{GS} > V_T$
 $V_{DS} < V_{DSat} = V_{GS} - V_T$
 $I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$

Saturación: $V_{GS} > V_T$
 $V_{DS} > V_{DSat}$
 $I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 [1 + \lambda (V_{GS} - V_{DSat})]$

$$V_{DSat1} = -1V - 0,8V = -1,8V$$

$$V_{GS1} = -1V < V_T = 0,8V$$

$$V_{DSat2} = 0,6V - 0,8V = -0,2V$$

$$V_{GS2} = 0,6V < V_T = 0,8V$$

$$V_{DSat3} = 0,8V - 0,8V = 0V$$

$$V_{GS3} = 0,8V = V_T = 0,8V$$

$$V_{DSat4} = 2V - 0,8V = 1,2V$$

$$V_{GS4} = 2V > V_T = 0,8V$$

Entonces, comparando con las condiciones,

- Caso 1:

Corte?

$$V_{DS1} = 0 \quad \checkmark$$

$$V_{GS1} = -1V < 0,8V \quad \checkmark$$

Está en corte

- Caso 2

Corte?

$$V_{DS2} = 0 \quad \checkmark$$

$$V_{GS2} = 0,6V < 0,8V \quad \checkmark$$

Está en corte

- Caso 3:

Corte?

$$V_{DS3} = 0 \quad \checkmark$$

$$V_{GS3} = 0,8V = V_T \quad \checkmark$$

Está en corte

Tirodo!

$$V_{GS3} = 0,8V \geq 0,8V = V_T \quad \checkmark$$

$$V_{DS3} = 0 \leq 0,8V - 0,8V = 0V \quad \checkmark$$

Está en saturación

Entiendo que puede estar en cualquiera de los dos regímenes ya que está justo en el borde.

- Caso 4:

Tirodo!

$$V_{DS4} = 2V > 0,8V = V_T$$

$$V_{GS4} = 0V < 2V - 0,8V = 1,2V$$

Está en modo.

b) $V_{FB} = -\phi_B$

V_{G1} y V_{G2} son menores a V_T

y V_{G4} es mayor a V_T

Recomiendo ver los gráficos del ejercicio 2. de la Guía y de futura MOS.

c) V_{G4} es mayor a V_T , ver gráficos del ejercicio 2 de la Guía y de futura MOS.

d)
$$I_{D_{sat}} = \frac{275 \mu A}{V_T} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3,9 \cdot 8,80 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}^2 \cdot 10 (2V - 0,8V)^2}{30 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2}$$

$$I_{D_{sat}} = 0,2782 \text{ mA}$$

$$V_{DS} > V_{D_{sat}} = V_{GS} - V_T = 2V - 0,8V$$

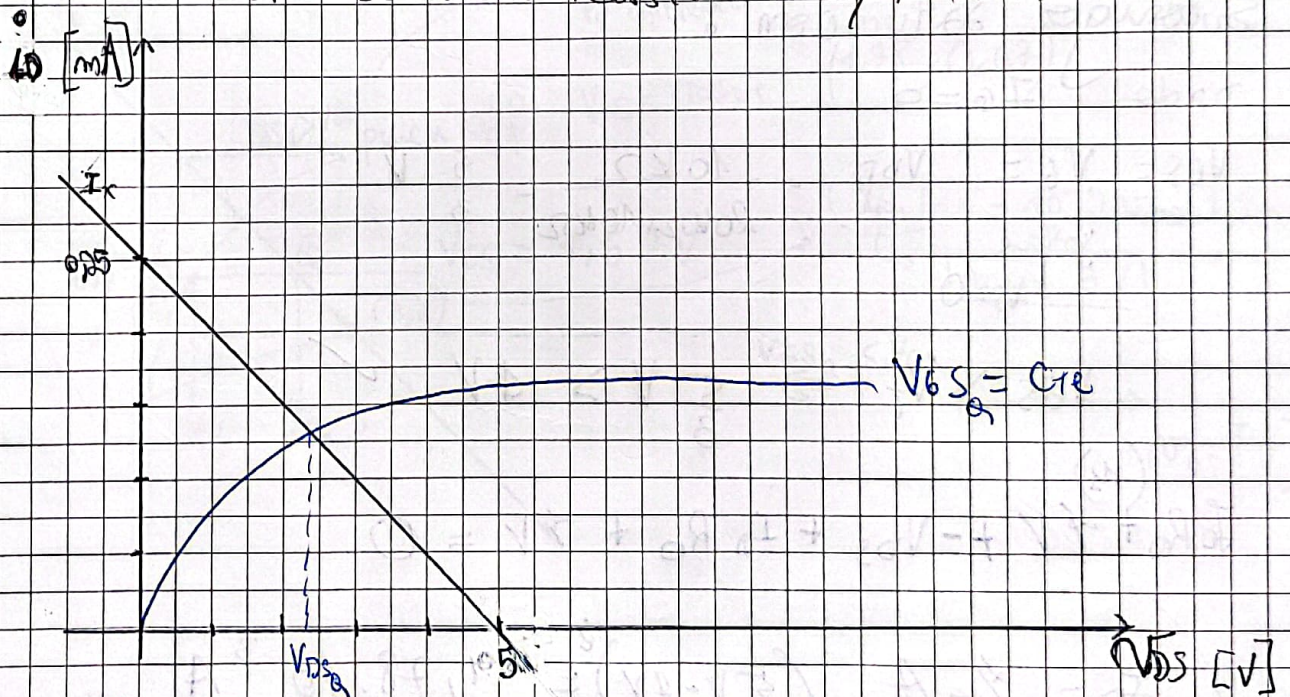
$$V_{DS} > 1,2V \Rightarrow V_{D_{sat}} > 1,2V$$

Como que $V_S = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_D$ $V_{GS} > V_T$
 $2V > 0,8V \checkmark$

17. a) Para encontrar el punto de polarización lo mejor es obtener la recta de balance y encontrar el punto que intersecciona con la curva V_{GS} .

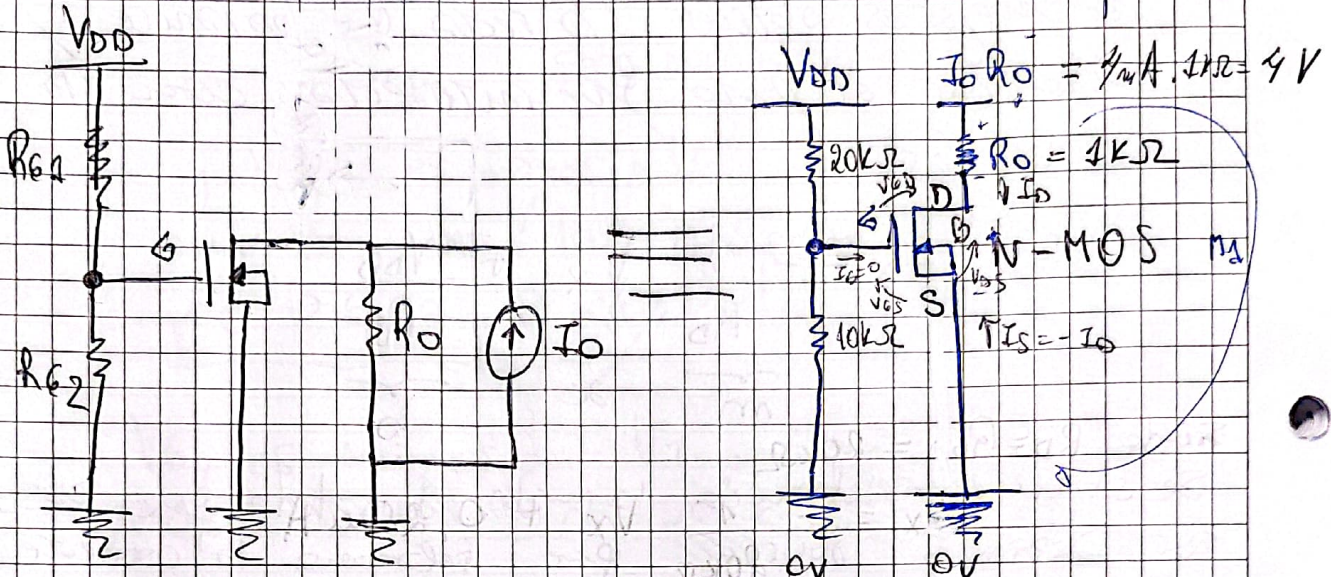
$$I_x = - \frac{1}{R_D} V_x + \frac{V_{DD}}{R_D}$$

Se obtiene resolviendo la malla de salida que pasa por Drain y Source que relaciona la corriente del drain con la resistencia y la tensión de salida.



La idea es obtener V_{GS0} y, a partir de dicho valor, reemplazarlo por V_x en la recta de balance y obtener I_q .

El circuito puede resolverse de forma equivalente:



Suponemos saturación:

Dado $I_G = 0$

$$V_{GS} = V_G = V_{DD} \cdot \frac{10k\Omega}{20k\Omega + 10k\Omega} = \frac{5}{3} V$$

y por que $V_S = 0$

$$V_{GS} > V_T \Rightarrow \frac{5}{3} V > 1V \quad \checkmark$$

(M)

$$-V_{DS} - I_D R_O + 4V = 0$$

$$I_D = \frac{4mA}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{3} V - 1V \right)^2 = 1,78 \cdot 10^{-3} A$$

$$+V_{DS} + 1,78V - 4V = 0 \Rightarrow V_{DS} = 2,22V$$

$$\checkmark V_{DS} > V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_T = \frac{5}{3} V - 1V = \frac{2}{3} V = 0,66V$$

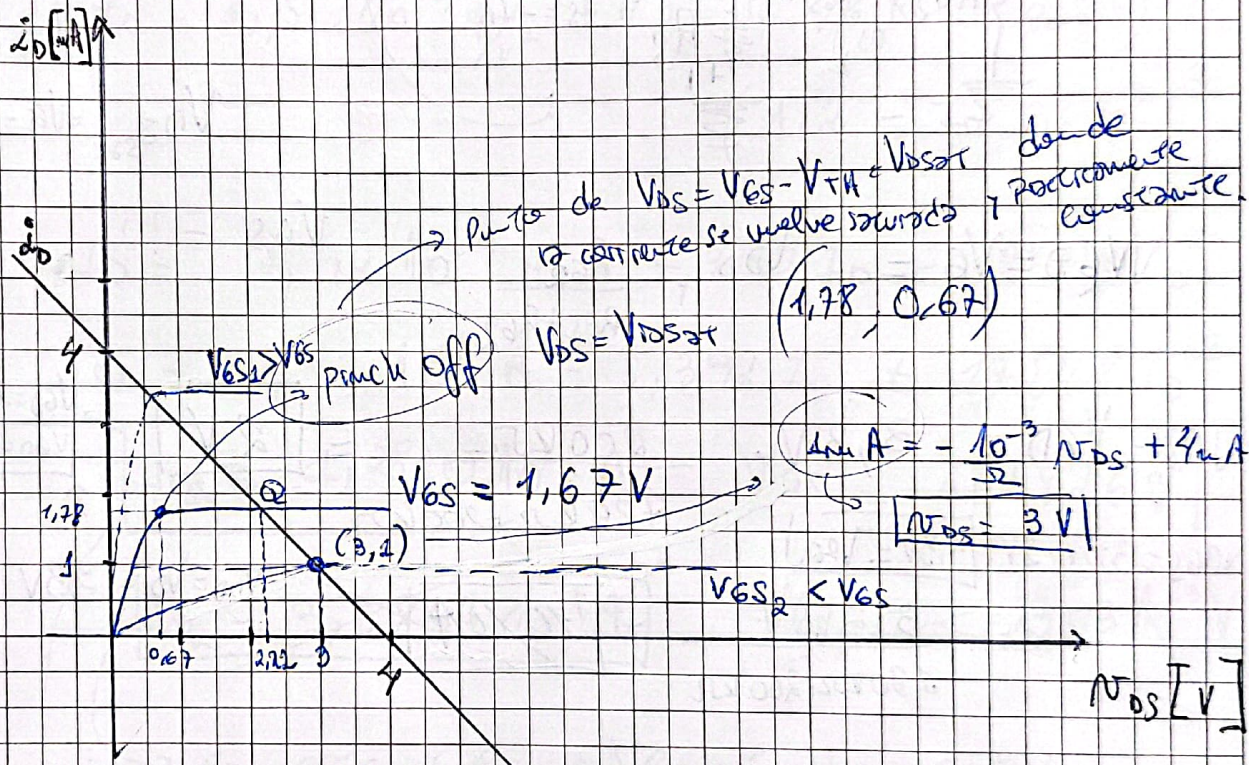
esto es saturación $2,22V > 0,66V$

$$V_{DSQ} = 2,22 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = I_D = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$b) \quad i_D = -\frac{1}{1 \text{ k}\Omega} v_{DS} + \frac{4 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} \Rightarrow$$

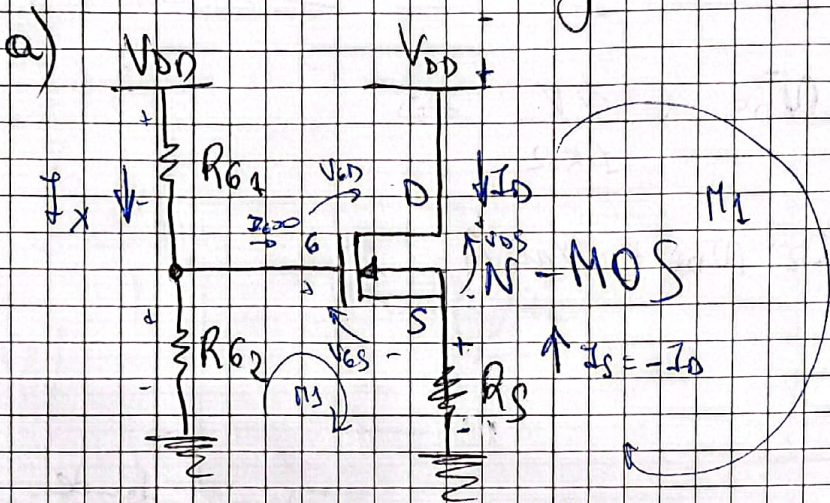
$$I_D = -10^{-3} \Omega^{-1} v_{DS} + 4 \mu\text{A}$$



$$V_{DSat} = \frac{5}{3} \text{ V} - 1 \text{ V} = 0,67 \text{ V}$$

18.

Es handelt sich um ein $2I_0$ und $2I_0$.



Systeme Schaltung:

$$V_T = 0,8V$$

$$V_{D_{SAT}} = V_{GS} - V_T$$

$$V_{GS} = !?$$

$$V_{R62} = V_G = V_{DD} \cdot \frac{R_{60}}{R_{61} + R_{62}}$$

$$V_{R62} = V_G = 3,3V \cdot \frac{200k\Omega}{130k\Omega + 200k\Omega} = \boxed{2V}$$

$$\begin{aligned} V_{G0} &= 2V - 3,3V \\ V_{G0} &= -1,3V \end{aligned}$$

$$V_{R61} = 3,3V - 2V = \boxed{1,3V = V_{G0}}$$

$$V_{DD} = V_D = 3,3V$$

$$I_x = \frac{3,3V}{130k\Omega + 200k\Omega} = \boxed{10\mu A}$$

$$M_1) V_{DS} + I_S R_S - V_{DD} = V_{DS} - I_D R_S - V_{DD} \Rightarrow$$

$$3,3V + I_D \cdot 5,6k\Omega = V_{DS}$$

$$I_D = \frac{100 \cdot 10^{-6} A/V^2}{2} \cdot \frac{50}{5} \left(V_{GS} - V_T \right)^2$$

↓ Systeme $g_{m0} \rightarrow 0$

$$= 0,8V$$

$$12) + I_x R_{G2} - V_{GS} - I_D \overset{5,6k\Omega}{R_S} = 0$$

$$10\mu A \cdot 200k\Omega - V_{GS} - I_D \cdot 5,6k\Omega = 0$$

$$\boxed{2 - I_D \cdot 5,6 \cdot 10^3 \Omega = V_{GS}}$$

reemplazo en la ec. de I_D :

$$I_D = 15,5 \cdot 10^{-4} A_{1/2} \cdot \frac{(2 - I_D \cdot 5,6 \cdot 10^3 - 0,8)^2}{(1,2 - I_D \cdot 5,6 \cdot 10^3)^2}$$

$$I_D = 7,92 \cdot 10^{-4} A - 7,392 I_D + 17248 I_D^2$$

$$0 = 7,92 \cdot 10^{-4} A - 8,392 I_D + 17248 I_D^2$$

$$\boxed{I_{D1} = 1,2810 \cdot 10^{-4} A}$$

$$\boxed{V_{GS1} = 1,2826 V}$$

$$\boxed{I_{D2} = 3,5844 \cdot 10^{-4} A}$$

$$\boxed{V_{GS2} = 7,1903 \cdot 10^{-3} V}$$

→ En este caso $V_{GS} < V_T = 0,8 V$

por lo que $I_D = 0$ en N-MOS
por lo que es absurdo el resultado

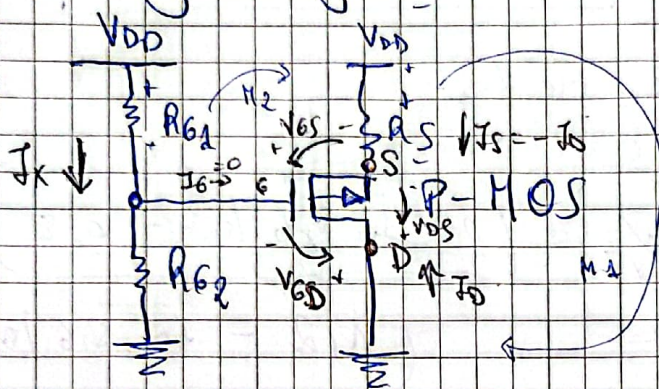
→ En este caso $V_{GS} > 0,8 V$ ✓

$$\boxed{V_{DS2} = 4,0174 V}$$

$$\boxed{I_{S1} = -I_{D2} = -1,2810 \cdot 10^{-4} A}$$

b) De forma similar, pero para un transistor P-MOS.

Su punto de régimen de saturación



$$V_{R62} = V_G = V_{GD} \quad \text{puesto que } V_D = 0$$

$$V_{GD} = V_{DD} \frac{R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = 5V \frac{200k\Omega}{300k\Omega + 200k\Omega} = \boxed{2V}$$

$$\boxed{V_{GD} = 2V} = V_{R62} = V_G$$

$$I_x = \frac{5V}{(300+200)k\Omega} = 10\mu A$$

$$M2) \quad I_x R_{61} - I_D R_S + V_{GS} = 0$$

$$10\mu A \cdot 300k\Omega + I_D \cdot 1,5k\Omega + V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} = -3V - I_D \cdot 1,5k\Omega$$

$$I_D = -\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \lambda \rightarrow 0$$

$$I_D = -\frac{36 \cdot 10^{-6} A}{2} \cdot \frac{150}{5} (V_{GS} + 0,9)^2$$

$$I_D = -5,4 \cdot 10^{-4} \left(-3V - I_D \cdot 1,5k\Omega + 0,9V \right)^2$$

$$I_D = -5,4 \cdot 10^{-4} \left(-2,1 - I_D \cdot 1,5 \cdot 10^3 \right)^2$$

$$I_{D1} = -6,6191 \cdot 10^{-4} A \Rightarrow V_{GS1} = -2,0071 V$$

$$I_{D2} = -2,9611 \cdot 10^{-4} A \Rightarrow V_{GS2} = -1,4417 V$$

Si $V_{GS2} > V_T = -0,9V \Rightarrow I_D = 0$ por lo que es obvia

$$V_{GS1} = -2,0071 V < -0,9V = V_T \quad \checkmark$$

$$V_{DSat} = V_{GS} - V_T = -2,0071 V + 0,9V = -1,1071 V$$

$$M1) -V_{DS} - \overbrace{\overbrace{-6,6191 \cdot 10^{-4}}^{1,8k\Omega}}^{=5V}}{I_D \cdot R_S} - V_{DD} = 0$$

$$V_{DS} = -4,0071 V$$

$$V_{DS} < V_{DSat} \quad \checkmark$$

esto es régimen de saturación

$$I_S = -I_D = 6,6191 \cdot 10^{-4} A$$

19. a) $V_{T0} \approx V_T = 1V$ ($V_{BS} = 0$)

Dado que es NMOS

$$V_{DS} > 0 \quad \checkmark$$

$$V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_T = 1,5V - 1V = 0,5V$$

$$V_{DS} > 0,5V ? \quad 1,8V > 0,5V \quad \checkmark$$

$$V_{GS} > V_T ? \quad 1,8V > 0,8V \quad \checkmark$$

ESTO E REGIMEN DE SATURACION.

$$b) \quad V_T(V_{BS}) = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_p - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_p} \right)$$

$$V_T(0V) = V_{T0} = 1V$$

$$I_D = \frac{\mu_n C'_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \sqrt{1 + \lambda(V_{DS} - V_{DS_{sat}})}$$

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \frac{45 \text{ cm}^2}{V_s} \cdot \frac{39,88 \cdot 10^{-14} \text{ A/cm}^2}{150 \cdot 10^{-8} \text{ cm}} \cdot \frac{30 \mu\text{m}}{2 \mu\text{m}} \cdot (1,5V - 1V)^2$$

$$\left[1 + 0,05V^{-1} (1,5V - 0,5V) \right]$$

$$I_D \approx 9,5078 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

$$c) \quad V_{DS} = 1,5V$$

$$V_{GS} = 1V$$

$$V_{GS} > 1V$$

$$1,5V > V_{GS} - 1V$$

$$2,5V > V_{GS}$$

$$\boxed{1V < V_{GS} < 2,5V}$$

para que se mantenha
no regime de saturação

d)

$$g_m = \mu \sqrt{\frac{2 \mu_n C_{ox}}{L} \cdot \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}^2}{2} \cdot \frac{30 \mu\text{m}}{2 \mu\text{m}} \cdot 9,5078 \cdot 10^{-5} \text{ A}}$$

$$\cdot [1 - 0,05 (1,5V - 0,5V)]$$

$$\boxed{g_m = 3,5686 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}}$$

$$g_{amb} = g_m \cdot \frac{1}{2 \sqrt{1 - 2\phi_p - V_{DS}}}$$

$$m_1 = 6,822 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_p = -367,72 \text{ mV}$$

$$\phi_p = -25,9 \text{ mV} = k_B \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

$$\delta = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2 \mu_n q N_A}$$

$$\delta = \frac{150 \cdot 10^{-8} \text{ cm}}{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}^2} \sqrt{2 \cdot 11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{14} \text{ F/cm}^2} = 1,602 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\boxed{\delta = 0,2503} \Rightarrow \boxed{g_{amb} = 5,2082 \cdot 10^{-5} \text{ A/V}}$$

$$g_0 = 0,05 \text{ V}^{-2} \cdot 9,5078 \cdot 10^{-7} = 4,7539 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}$$

$$\boxed{r_0 = 2,10353 \cdot 10^5 \Omega}$$

$$C_{gs} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}^2}{480 \cdot 10^{-8} \text{ cm}}$$

$$+ 30 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \frac{0,8 \cdot 10^{-18} \text{ F/cm}}{10^{-4} \text{ cm}}$$

$$\boxed{C_{gs} = 1,0704 \cdot 10^{-13} \text{ F}}$$

$$C_{gd} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \frac{0,8 \cdot 10^{-18} \text{ F/cm}}{10^{-4} \text{ cm}}$$

$$\boxed{C_{gd} = 4,8 \cdot 10^{-14} \text{ F}}$$

$$C_{sb} = C_j' \cdot A_s$$

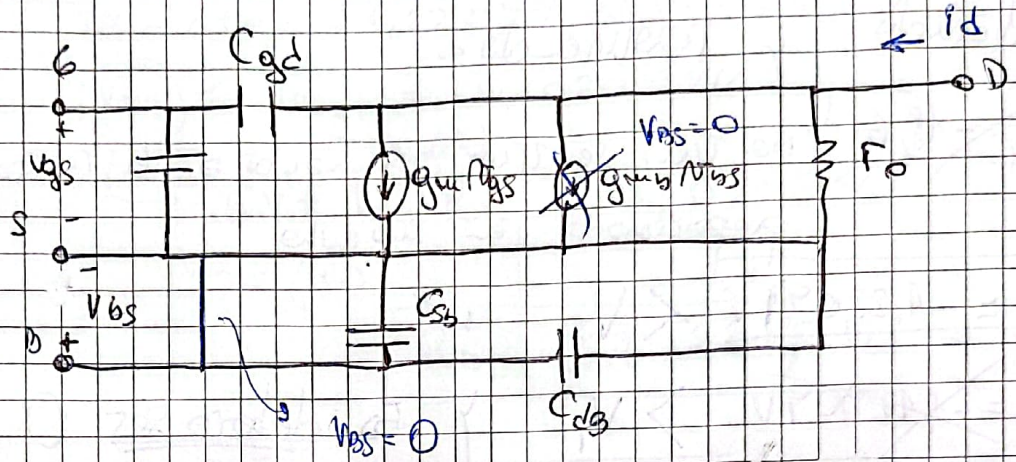
$$C_{sd} = C_j' \cdot A_d$$

$\left. \begin{array}{l} \text{No \&} \\ \text{then} \\ \text{ur} \\ \text{As ur} \\ \text{Ad.} \end{array} \right\}$

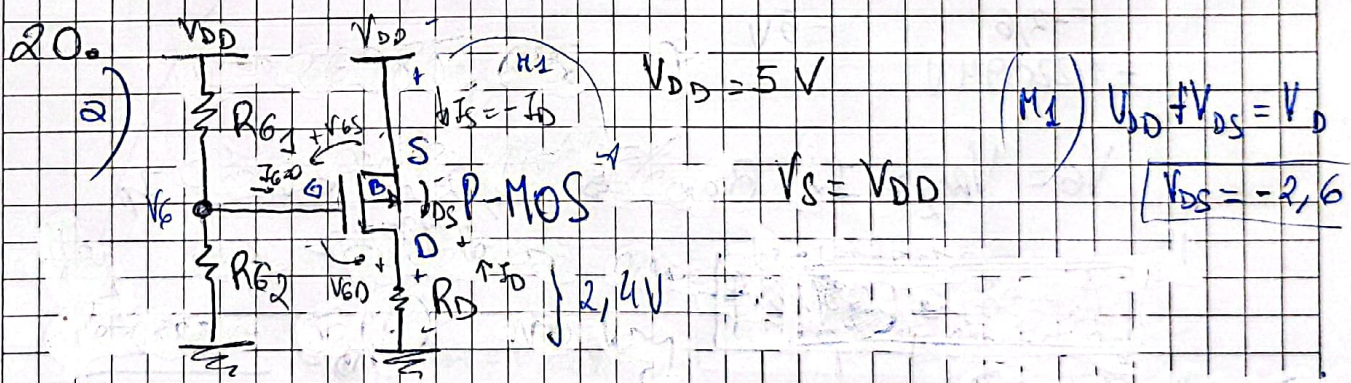
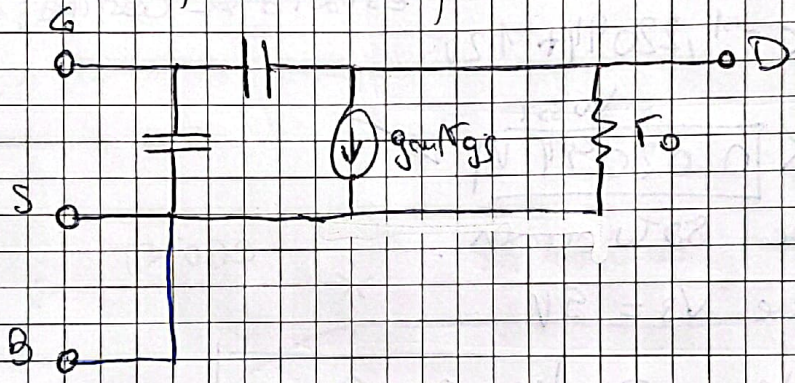
$$C_j' = \sqrt{\frac{q \cdot G_{ss} \cdot N_a}{2(\phi_B - V_s)}}$$

$\left. \begin{array}{l} \text{sera } V_{DS} \text{ (crec)} \end{array} \right\}$

e)



Por lo que es equivalente a



Suponemos régimen de saturación

$$-80 \mu A = I_D = -\frac{\mu_p C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \cdot \left[1 + \lambda (V_{DS} - V_{DSAT}) \right]$$

$$\frac{1}{2625} = \frac{1}{(V_{GS} + 1,2V)^2 + (V_{GS} + 1,2V)^2} \cdot 0,05V^2 \cdot (-2,6 - V_{GS} + 1,2)$$

$$\frac{1}{2625} = (V_{GS} + 1,2)^2 + (V_{GS} + 1,2)^2 \cdot 0,05 (-1,4 + V_{GS})$$

desarrollando y resolviendo...

~~$V_{GS1} = -18,6$~~ y no tiene sentido es mayor a la tensión preparada en módulo

$$V_{GS2} = -1,22094 \text{ V} < V_T \quad \checkmark$$

~~$V_{GS3} = -1,77906 \text{ V}$~~ $> V_T$ } no debería ser 0
no tiene sentido de estar en corte

$$V_{DS} = -2,6 < -1,22094 + 1,2 \text{ V}$$

$$V_{DS} = -2,6 < \overset{= V_{DSAT}}{0,02094 \text{ V}} \quad \checkmark$$

esto en régimen de saturación.

Sabiendo que $V_S = 5 \text{ V}$

$$\underset{= -1,22094 \text{ V}}{V_{GS}} = \underset{= 5 \text{ V}}{V_G} - \underset{= 5 \text{ V}}{V_S} \Rightarrow \boxed{V_G = 3,77906 \text{ V}}$$

$$V_G = V_{R62} = I_x \cdot R_{62} \Rightarrow \frac{3,77906 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = I_x$$

$$\boxed{I_x = 8,0405 \mu\text{A}}$$

$$R_D = \frac{8,4 \text{ V}}{80 \cdot 10^{-6} \text{ A}}$$

$$1,22094 = V_{R61} = 8,0405 \mu\text{A} \cdot R_{61}$$

$$\boxed{R_{61} = 151,8477 \Omega}$$

$$\boxed{R_D = 30.000 \Omega}$$

b) Para que opere en saturación, Suponemos de

$$V_{GS} = \text{cte} = -1,22094 < V_T = -1,2 \text{ V} \checkmark$$

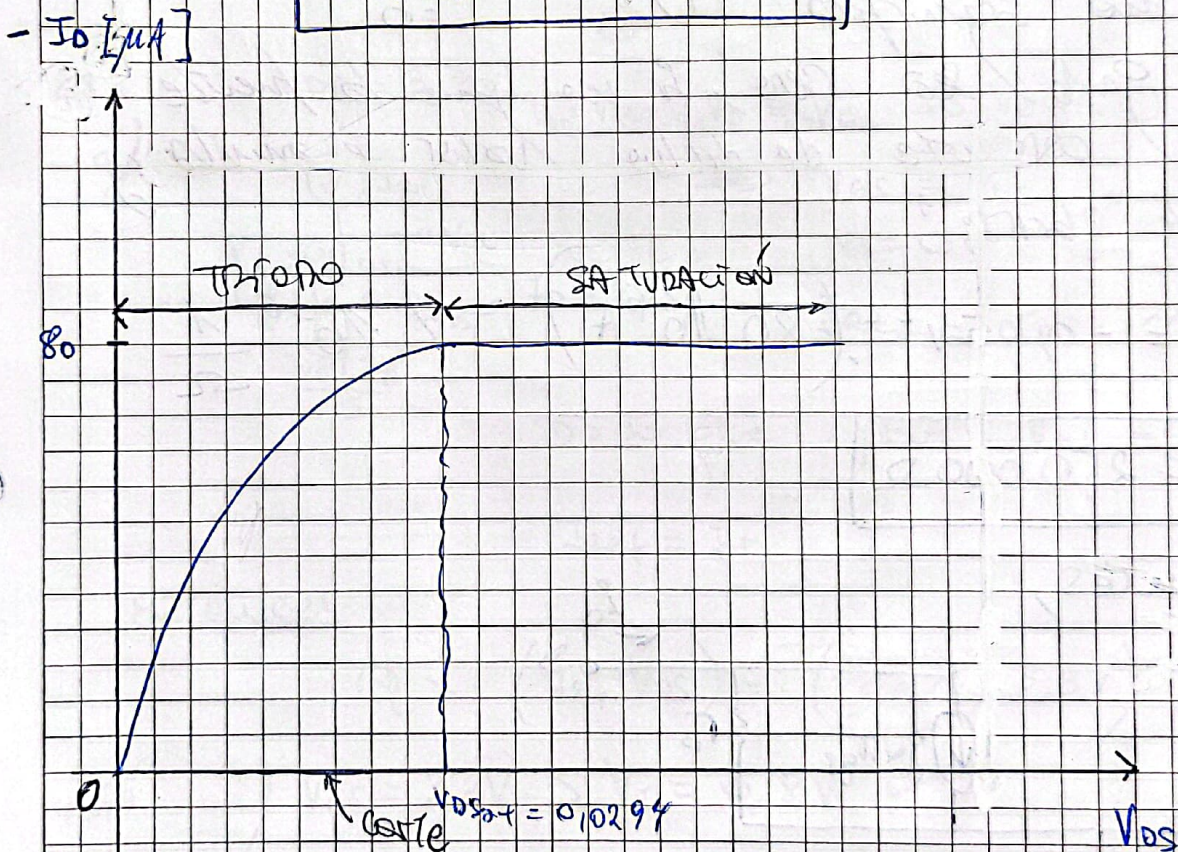
$$V_{DS} < V_{DS_{sat}} = 0,02094 \text{ V}$$

$$5 \text{ V} + \overset{-80 \mu\text{A}}{I_D} R_D < 0,02094$$

por (14)

$$R_D < 62,2385 \Omega \Rightarrow$$

$$0 < R_D < 62,2385 \Omega$$



$$c) g_m = 2 \sqrt{-k I_{Dsat}}$$

$$g_m = 2 \sqrt{-\frac{70 \mu A/V^2}{2} \cdot \frac{30 \mu m}{5 \mu m} \cdot (80 \cdot 10^{-6} A)}$$

$$g_m = 8,1975 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V}$$

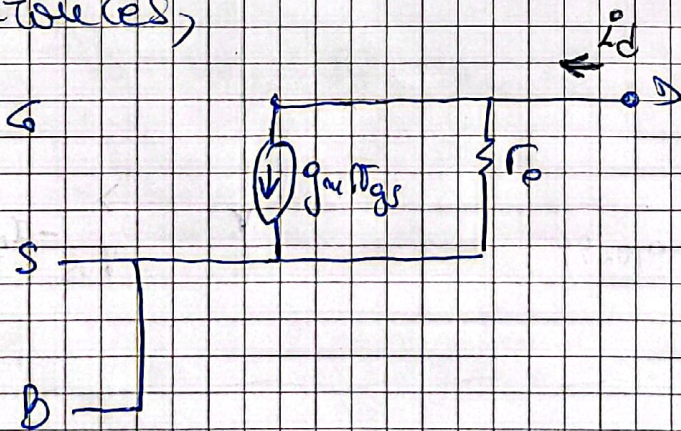
Dado que $V_{DS} = 0$, $g_{mbs} = \frac{\partial I_{Dsat}}{\partial V_{DS}} = 0$,
 esto no significa

que g_{mbs} sea cero, si no que la fuente
 de corriente de drenas está a 0 voltios y
 puede "abrirse"

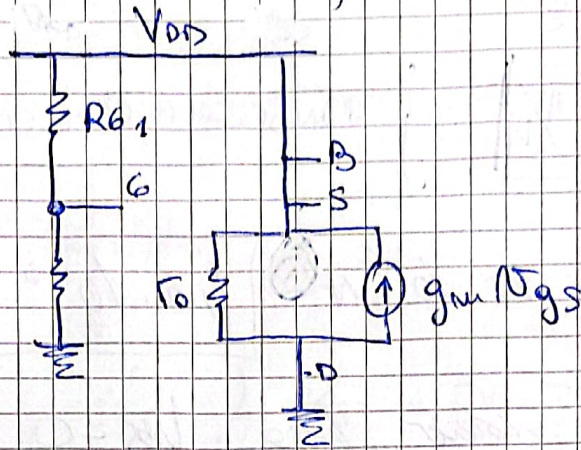
$$g_o = -0,05 V^{-1} \cdot (-80 \cdot 10^{-6} A) = 4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\Omega}$$

$$r_o = 250.000 \Omega$$

Entonces,

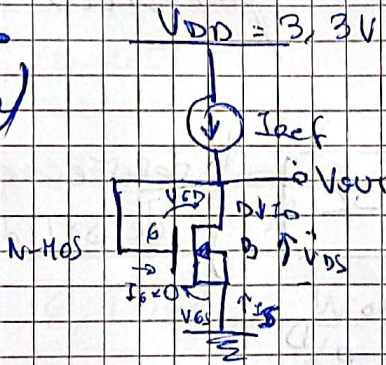


que en el circuito que barra:



21.

a)



$$V_{DD} = V_{GS} = V_D = V_G \Rightarrow V_{DS} = 0$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_{DS}$$

$$V_S = 0V$$

$$I_D = -I_S$$

$$I_{ref} = I_D = 40 \cdot 10^{-6} A$$

Dado que $V_{DS} = V_{DS} = 3,3V$

$$I_{ref} = I_D$$

Entonces

$$Q = (I_D, V_{DS}) = (40 \mu A, 3,3V)$$

esto
en
régimen
de
saturación

$$V_{GS} = 3,3V > V_T = 0,8V \checkmark$$

$$V_{DS} = 3,3V > 3,3V - 0,8V = 2,5V \checkmark$$

Si, de por sí de I_{ref} , que fija I_D . y por lo tanto, el punto de trabajo Q .

$$b) \quad g_m = 2 \sqrt{\frac{126 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}}{2} \cdot 2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} A}$$

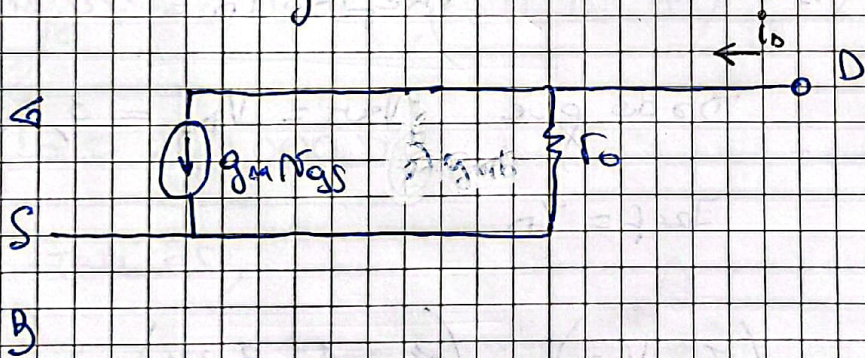
$$g_m = 0,1362 \text{ A/V} \quad \left. \vphantom{g_m} \right\} \text{ transconductancia}$$

$$g_o = 0,04 \text{ V}^{-1} \cdot 40 \cdot 10^{-6} A = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}$$

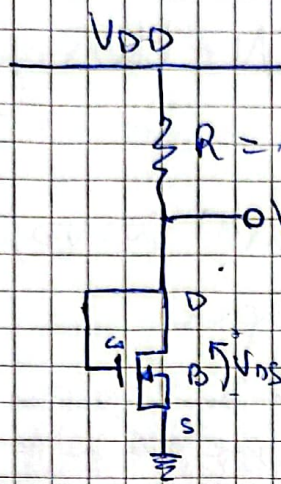
g_{mb} me lo pide obtener pero $V_{bs} = 0$, por lo que se suma en términos prácticos al multiplicar por V_{bs} .

Transconductancia de escape

$$r_o \rightarrow \frac{1}{g_o} = \left[r_o = 625000 \Omega \right] \quad \left. \vphantom{r_o} \right\} \text{ resistencia de salida}$$



c)



$$V_{DD} - 1,5V = 1,8V$$

$\left. \begin{array}{l} 3,3V \\ V_{DD} - 1,5V = 1,8V \end{array} \right\}$

$V_{out} = V_D = V_S = 1,5V = V_{GS}$
 porque $V_S = 0V$

$$I_D = (10k\Omega)^{-1} \cdot 1,8V$$

$$I_D = 1,8 \cdot 10^{-9} A$$

esto
 es el
 régimen
 de saturación

$$V_{GS} = 1,5V > 0,8V \quad \checkmark$$

$$V_{DS} = 1,5V > 1,5 - 0,8V = 0,7V \quad \checkmark$$

Entrances:

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_t = 0,7V$$

$$1,8 \cdot 10^{-9} A = I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (1,5V - 0,8V)^2 \left[1 + 0,04 (1,5 - 0,7) \right]$$

$$\boxed{0,137 \mu = \frac{W}{L}}$$

2do El transistor es de tipo N-MOS ya que $I_D > 0$

a) $V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_T$ } tome cualquier curva,
 $1,55V = 2V - V_T$ } Ver frecas que

$V_T = 0,45V$

tome un punto de cualquiera de las curvas que pase por la curva que pasa por los $V_{DS_{sat}}$ de trabajo.

$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 [1 + \lambda (V_{DS} - V_{DS_{sat}})]$

tome los distintos puntos que pasen por $V_{DS_{sat}}$ para los distintos V_{GS} .

$0,33 \cdot 10^{-3} A = k (2 - 0,45)^2 [1 + \lambda (1,55 - 1,55)]$

$1,3735 \cdot 10^{-4} = k$

y se como el punto cuando esto es solución se anula dicha parte

tome un punto del final, por ejemplo $(3,3, 0,369)$

$0,369 \cdot 10^{-3} A = 1,3735 \cdot 10^{-4} (2 - 0,45)^2 [1 + \lambda (3,3 - 1,55)]$

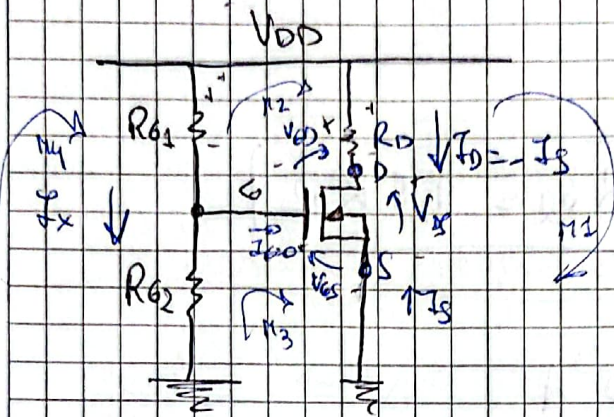
$0,0675 V^{-1} = \lambda$

y tome un punto alejado cuando el régimen esto es solución

$$b) I_D = 1 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = \frac{V_{DD}}{2} = 2,5 \text{ V}$$

$$V_{DD} = 5 \text{ V}$$



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

$$I_S = -1 \text{ mA}$$

$$V_B = V_S = 0$$

$V_{BS} = 0$ } en cortocircuito

$$V_{DS} = 2,5 \text{ V}$$

$$M1) V_{DD} - I_D R_D - V_{DS} = 0$$

$$R_D = 2500 \Omega$$

$$V_D = V_{DS}$$

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} = 2,5 \text{ V} - 2,5 \text{ V} = 0$$

$M2) I_x R_{G1} - I_D R_D + V_{GD} = 0$ es signo contrario (creo que es al revés en realidad)

$$M3) I_x R_{G2} = V_{GS} \Rightarrow$$

$$(M4) V_{DD} = I_x (R_{G1} + R_{G2})$$

Además, del gráfico (a)

$$V_G = V_{GS} = 3 \text{ V} \quad \text{si } I_D = 1 \text{ mA}$$

$$\text{y } V_{DS} = 2,5 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{GD} = 3 \text{ V} - 2,5 \text{ V} = 0,5 \text{ V}$$

reemplazo en M2

$$3 \text{ V} \frac{R_{G1}}{R_{G2}} - 1 \text{ mA} \cdot 2500 \Omega - 0,5 \text{ V} = 0$$

$$R_{G1} = R_{G2} \Rightarrow \text{M4}$$

Este circuito es válido para ambas

$$\frac{3}{2} R_{G1} = R_{G2}$$

Por ejemplo para

$$R_{G1} = 1 \text{ k}\Omega \quad \text{y} \quad R_{G2} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

c)
$$g_m = 2 \sqrt{1,3735 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3}} \text{ A/V}$$

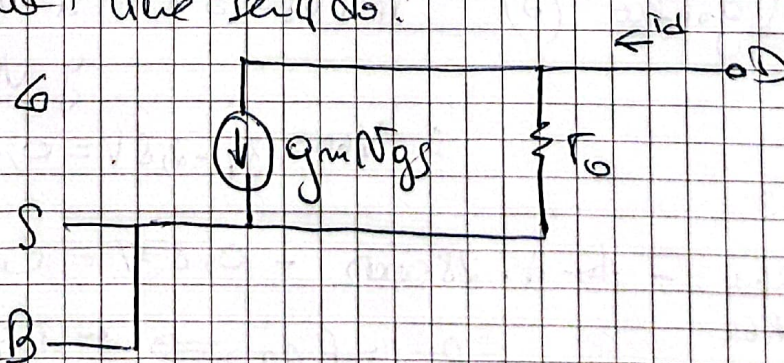
$$g_m = 2,4122 \text{ A/V}$$

$$g_o = \lambda I_{DQ} = 0,0628 \text{ V}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

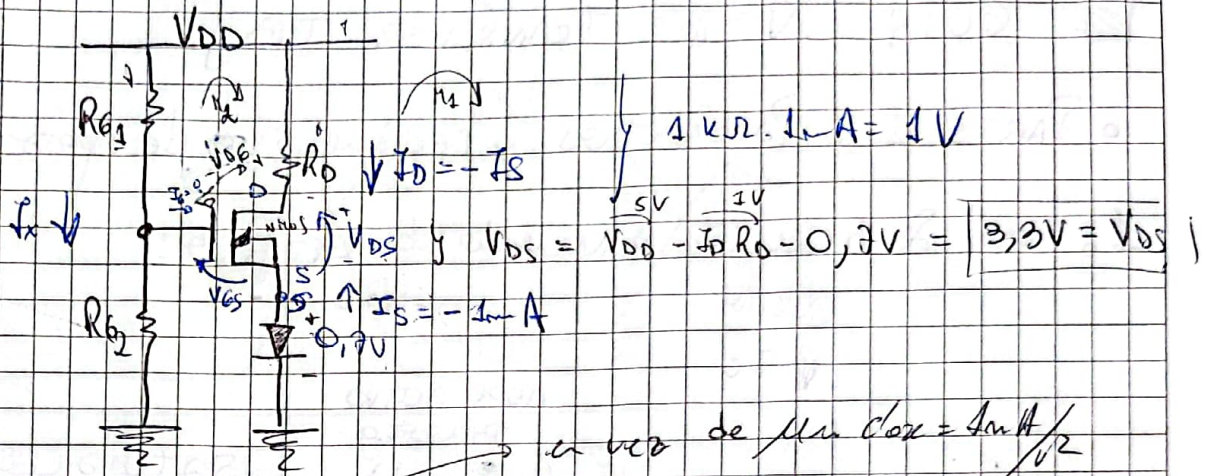
$$g_o = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{ A/V} \Rightarrow r_o = 14814,81 \Omega$$

g_{mb} no puede calcularse pero dado que $V_{bs} = 0$ a efectos prácticos

no tiene sentido:



23.



Supongo régimen en saturación:

$$1 \text{ mA} = \frac{4 \text{ mA/V}^2}{2} (V_{GS} - 1 \text{ V})^2$$

$$V_{GS} = 2 \text{ V} > V_T = 1 \text{ V}$$

esto es en saturación

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

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T = 1 \text{ V}$$

$$3.3 \text{ V} > 1 \text{ V}$$

régimen en saturación

$$V_{DS} = V_{DS} - V_{GS} = 3.3 \text{ V} - 2 \text{ V} = 1.3 \text{ V}$$

$$I_x R_{G1} - 1 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega - V_{DS} = 0$$

$$I_x \cdot 2 \text{ k}\Omega = 2.3 \text{ V}$$

$$I_x = 1.15 \text{ mA}$$

$$V_G = 2 \text{ V} = 1.15 \text{ mA} \cdot R_{G2} \Rightarrow R_{G2} = 1739.130 \Omega$$

para que esté en saturación.

$$I_T = I_x + I_D = 1.15 \text{ mA} + 1 \text{ mA} = 2.15 \text{ mA}$$

$$P_{OT} = V_{DD} \cdot I_T = 5 \text{ V} \cdot 2.15 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.01075 \text{ W}$$