



Guía de Ejercicios N^o 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

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

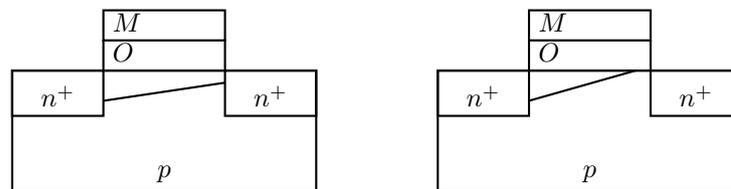


Figura 1

- 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.
 - Indique rango de valores posibles para V_G , V_D y V_S en cada caso (considerar siempre $V_{\text{BS}} = 0$).
 - Seleccione una polarización adecuada para que el dispositivo funcione en zona de saturación sabiendo que $\mu_n = 215 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $t_{\text{ox}} = 150 \text{ \AA}$, $V_T = 1 \text{ V}$, $L = 1,5 \mu\text{m}$, $W = 30 \mu\text{m}$ y $\lambda = 0$.
- 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 $W = L = 1 \mu\text{m}$ y $t_{\text{ox}} = 200 \text{ \AA}$.

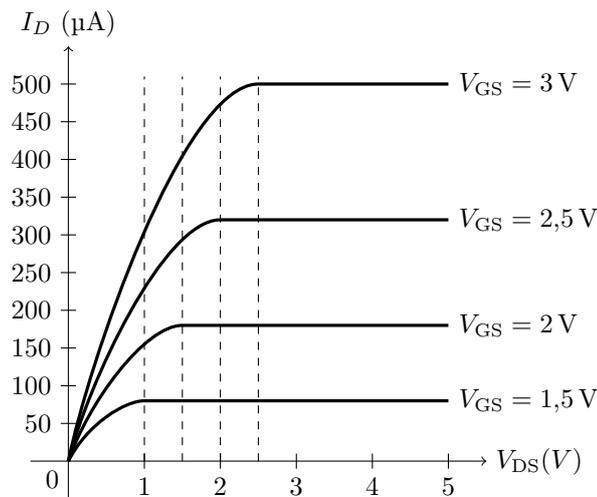


Figura 2

- 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 $W = 30 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $C'_{\text{ox}} = 6 \times 10^{-7} \text{F/cm}^2$, $N_A = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $V_{T0} = 1 \text{V}$ y $V_{BS} = 0 \text{V}$,
- a) Sabiendo que para $V_{GS} = 1,5 \text{V}$, $V_{DS} = V_{DS\text{sat}}$, 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 $V_{T0} = 1 \text{V}$, $N_A = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, y con una tensión aplicada $V_{DS} = 100 \text{mV}$:

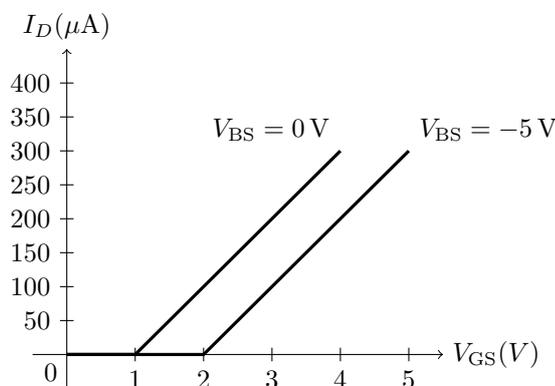


Figura 3

- 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 $\mu_p = 400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $t_{ox} = 100 \text{ \AA}$, $V_{T0} = -0,7 \text{ V}$, $L = 0,5 \mu\text{m}$, $W = 10 \mu\text{m}$, 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 $V_{BS} = 0 \text{ V}$.

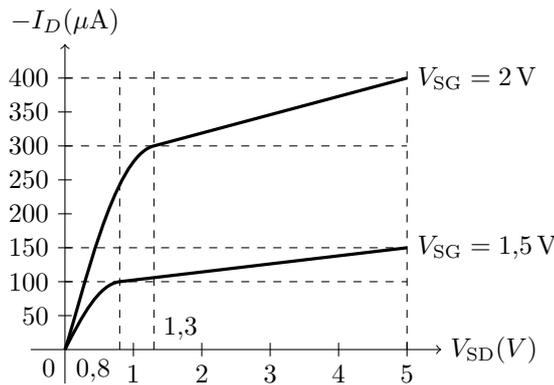


Figura 4

- 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.

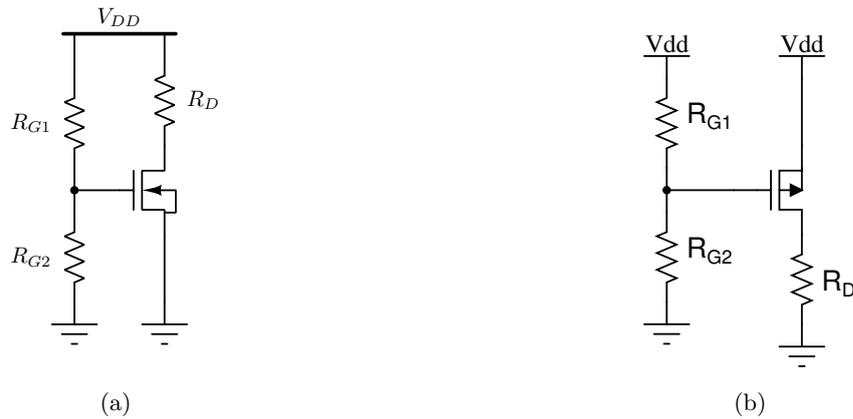


Figura 5

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.

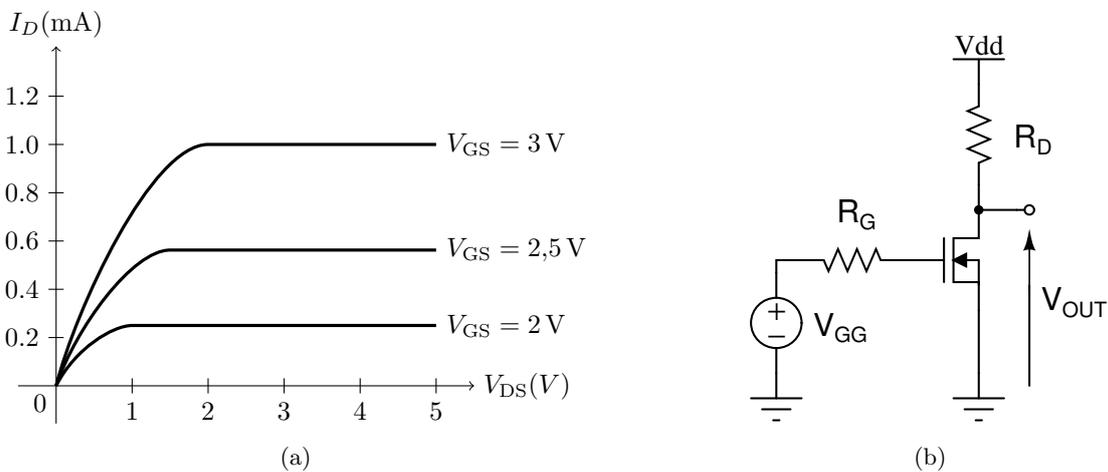


Figura 6

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 .

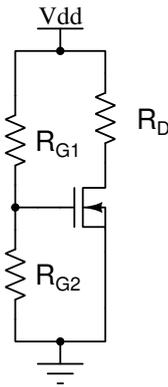


Figura 7

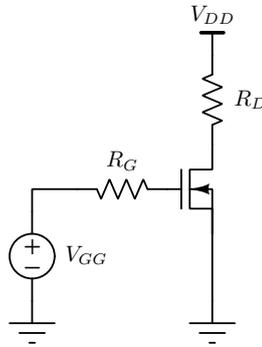


Figura 8

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 $\mu_p C'_{ox} = 70 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_T = -0,5 \text{ V}$, $W/L = 2000$ y $\lambda = 0,01 \text{ V}^{-1}$.

- ¿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?

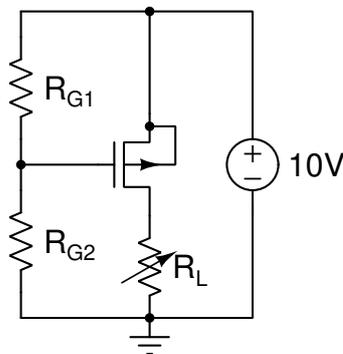


Figura 9



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: $W = 2 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $C_{ov} = 0,3 \text{ fF}/\mu\text{m}$, $A_S = 1 \mu\text{m}^2$ 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 $\mu_n = 215 \text{ cm}^2/(\text{V s})$ 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 $k = \frac{\mu C'_{ox} W}{2L} = 4 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 1 \text{ V}$, $\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$, $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $I_0 = 4 \text{ mA}$, $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ 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 $I_D = 1 \text{ mA}$.

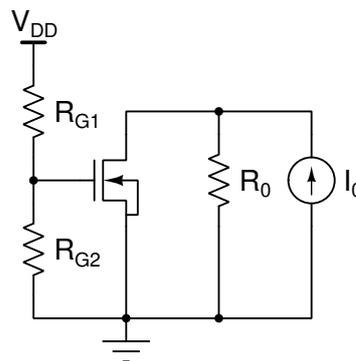


Figura 10

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 $V_T = 0,8 \text{ V}$, $\mu_n C'_{ox} = 110 \mu\text{A/V}^2$, $L = 5 \mu\text{m}$ 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 $V_T = -0,9\text{ V}$, $\mu_p C'_{ox} = 36\text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L = 5\text{ }\mu\text{m}$ y $W = 150\text{ }\mu\text{m}$.



Figura 11

19. Dado un transistor NMOS con parámetros $\mu_n = 215\text{ cm}^2/(\text{V s})$, $t_{ox} = 150\text{ \AA}$, $L = 2\text{ }\mu\text{m}$, $W = 30\text{ }\mu\text{m}$, $L_{diff} = 6\text{ }\mu\text{m}$, $C_{ov} = 0,5\text{ fF}/\mu\text{m}$, $\lambda = 0,05\text{ V}^{-1}$, $N_A = 10^{16}\text{ 1}/\text{cm}^3$ para el sustrato, $N_D = 10^{18}\text{ 1}/\text{cm}^3$ para las difusiones de drain y source, $V_{T0} = 1\text{ V}$, y , en la condición de operación $V_{GS} = 1,5\text{ V}$, $V_{DS} = 1,5\text{ V}$, $V_{BS} = 0,5\text{ V}$.
- ¿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 $\mu_p C'_{ox} = 70\text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_T = -1,2\text{ V}$, $W = 30\text{ }\mu\text{m}$, $L = 5\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 0,05\text{ V}^{-1}$, $R_{G2} = 470\text{ k}\Omega$ 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. 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*.
 - 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.
22. A partir del circuito de la figura 13 ($V_{DD} = 5\text{ V}$; $R_{G1} = 2\text{ k}\Omega$; $R_D = 1\text{ k}\Omega$, $T = 300\text{ K}$), obtener la potencia entregada por la fuente cuando el transistor MOS ($\mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} = 1\text{ mA}/\text{V}^2$; $V_T = 1\text{ V}$; $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$) 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.

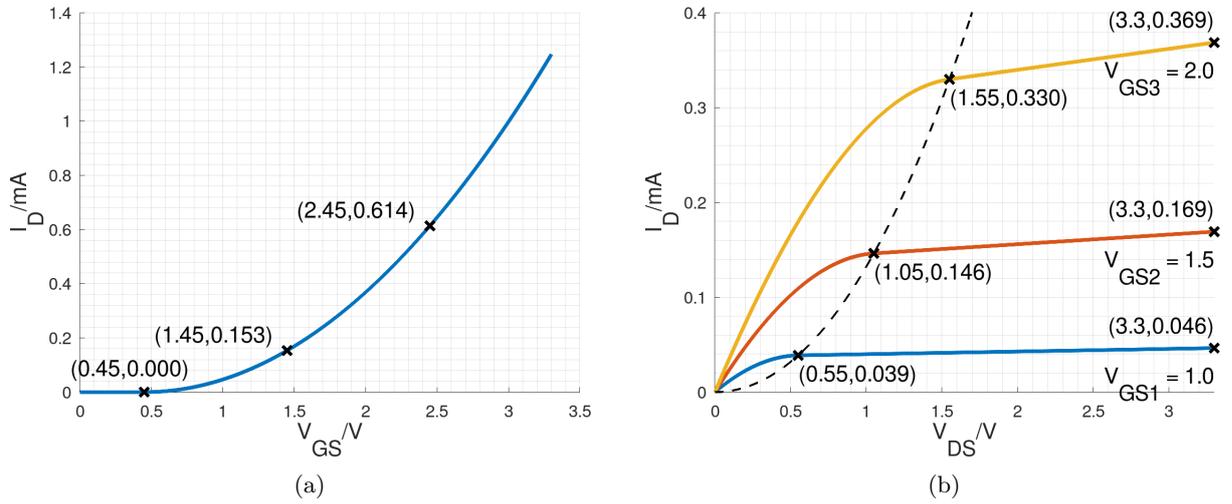


Figura 12

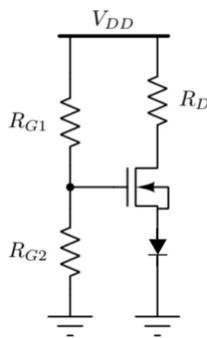


Figura 13