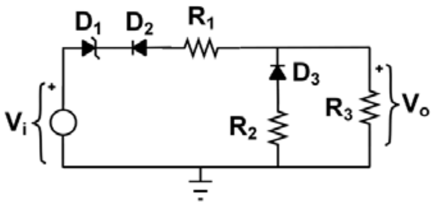
EJERCICIO 1

Dado el siguiente circuito, calcule el valor del voltaje V_0 para una V_i que varía entre $(-\infty, \infty)$. **(1.25 puntos)**

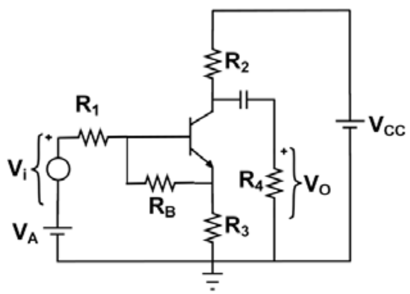
Suponga el siguiente modelo lineal para los diodos:

- La tensión en directa de **todos** los diodos es V_γ = 0.7V.
- El diodo zener tiene una tensión de ruptura de $|V_z|$ = 3.3V.
- Considere $R_1 = R_2 = R_3$



EJERCICIO 2

Sea el siguiente circuito basado en un transistor bipolar NPN donde todos los condensadores son de desacoplo.

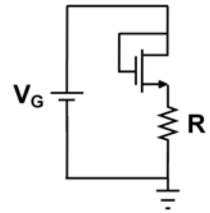


β_f = 200, V_{CC} = 12V, V_A=10V, R_B = 2kΩ, R_1 = 15kΩ, R_2 = 1kΩ, R_3 =0.5kΩ, R_4 = 5kΩ

a) Calcular el punto de polarización. Considere V_{BE} = 0,8 V. Resolver sin despreciar la corriente de base. **(0.75 puntos)**
b) Representar el modelo de pequeña señal del circuito. **(0.25 puntos)**
c) Obtener la ganancia ($A = V_0/V_i$) del circuito en pequeña señal.
Suponga V_T = 25,8 mV, $g_m = Ic_Q / V_T$ y $r_\pi = \beta/g_m$. **(0.5 puntos)**
d) Calcule el valor mínimo de R_B para que el transistor opere en activa.
(0.5 puntos)

EJERCICIO 3

Sea el siguiente circuito.

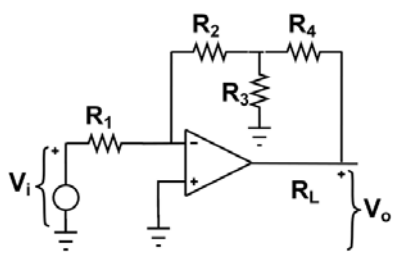


R=3KΩ, V_T = 1V, W/L = 60, K = 20μA/V^2

a) ¿En qué región está trabajando este Mosfet de canal n en función de V_G? Justifique la respuesta.
(0.5 puntos)
b) Exprese, como ecuación de segundo grado, la corriente I_D en función de la tensión V_G. Calcúlela para una V_G de 2V.
(0.5 puntos)

EJERCICIO 4

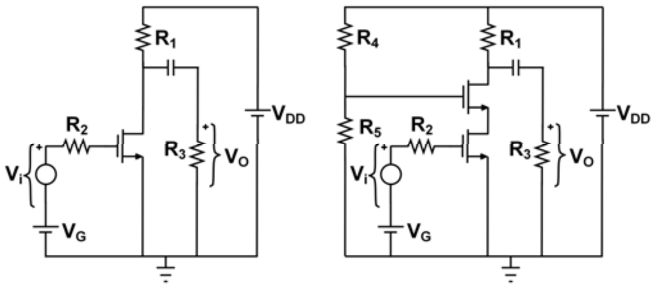
Para el circuito mostrado a continuación determinar la ganancia en tensión V_o/V_i. Considerando la alimentación del amplificador operacional entre +12V y -12V, calcule los límites de V_i para que opere en la región lineal.
(1.25 puntos)



R_1 = 2kΩ, R_2 = 1kΩ, R_3 = 15kΩ, R_4 = 6kΩ

EJERCICIO 5

La configuración de fuente común basada en un MOSFET de canal N de la figura (a) ofrece una ganancia $|V_o/V_i| = 9.6$ sin tener en cuenta el efecto Early, mientras que si lo tenemos en cuenta con V_A=10V, la ganancia se reduce a 4.9.



(a) (b)

V_{DD} = 24V, V_G= 3V, R_1 = 5kΩ, R_2 = 1kΩ, R_3 = 20kΩ, R_4 = 7kΩ, R_5 = 5kΩ
V_T = 1V, W/L = 60, K = 20μA/V^2

Para minimizar la reducción de la ganancia debida al efecto Early, se propone la etapa amplificadora de la figura (b) formada por dos transistores idénticos. Demostrar que la ganancia de la etapa amplificadora de la figura (b), teniendo en cuenta el efecto Early con V_A=10V para ambos transistores, es superior a la de la figura (a). Para ello:

a) Calcule el punto de polarización considerando ambas tensiones umbrales iguales y sin tener en cuenta el efecto Early. **(0.75 puntos)**
b) Represente el modelo de pequeña señal, incluyendo el efecto Early. **(0.75 puntos)**
c) Siendo $g_m = \sqrt{2k\frac{W}{L}I_{DQ}}$ y $r_o = \frac{V_A}{I_{DQ}}$, calcule la ganancia en tensión A = V_o/V_i, teniendo en cuenta el efecto Early. **(1 punto)**

CUESTIÓN 1

En el circuito de la figura (b) del Ejercicio 4 se ha considerado la tensión umbral de ambos transistores igual a 1V. Si los transistores NMOS fueran fabricados en un mismo substrato, ¿cómo afectaría a su tensión umbral? Justifique su respuesta y describa el fenómeno que lo causa.

(1 punto)

CUESTIÓN 2

Dado un material semiconductor base de Germanio, calcule la concentración de portadores mayoritarios y minoritarios y la conductividad para:

a) Caso intrínseco
b) Un dopaje homogéneo con mezcla de impurezas donadoras $N_D = 10^{17}$ cm^{-3} e impurezas aceptadoras $N_A = 10^{15}$ cm^{-3}.

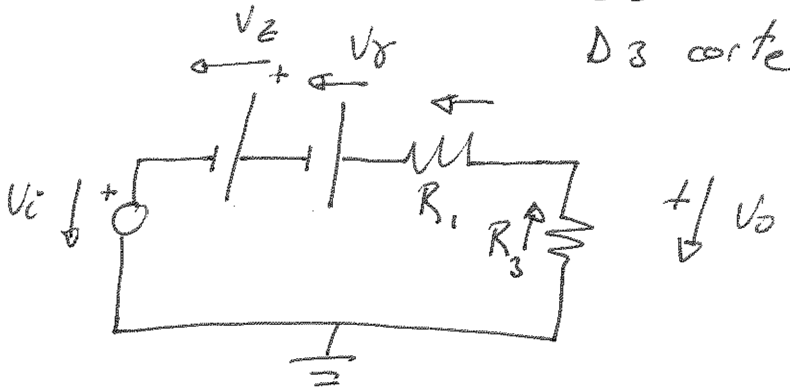
Calcule la concentración de portadores que nos proporciona la mínima conductividad del material semiconductor.

Datos: $n_i = 2.36\ 10^{13}$ cm^{-3}, μ_n = 3900 cm^2/(Vs), μ_p = 1820 cm^2/(Vs), q = 1.6 10^{-19} C, T=300 K

(1 punto)

EJERCICIO 1

$V_i \leq -(V_z + V_\gamma)$ D1 ruptura
D2 directa
D3 corte



$$V_i + V_z + V_\gamma + I(R_1 + R_3) = 0$$

$$V_0 + I R_3 = 0 \Rightarrow I = -\frac{V_0}{R_3}$$

$$V_i + V_z + V_\gamma - V_0 \frac{2\cancel{R}}{\cancel{R}} = 0$$

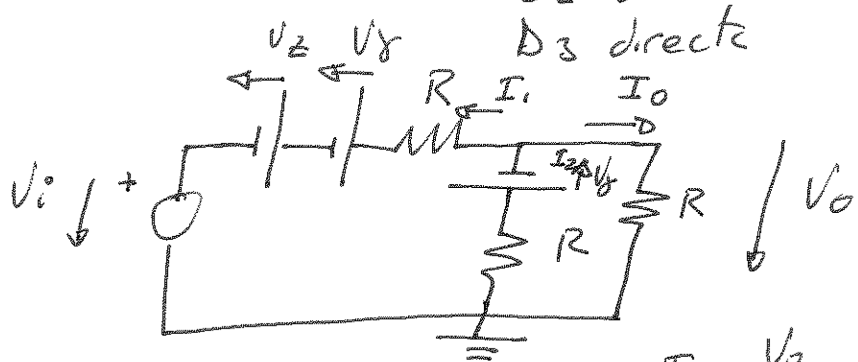
$$V_0 = \frac{V_i + V_z + V_\gamma}{2} = \frac{V_i}{2} + 2$$

Cuando $V_0 \leq -V_\gamma \Rightarrow$ D3 directa

$\Downarrow$

$$\frac{V_i}{2} + 2 \leq -V_\gamma \Rightarrow V_i \leq -(V_\gamma + 2) \times 2 = -5{,}4$$

$V_i \leq -5{,}4\,V$ D1 ruptura
D2 directa
D3 directa



$I_0 = \frac{V_0}{R}$

$$I_2 = I_1 + I_0$$

$$V_i + V_z + V_\gamma + I_1 R = V_0$$

$$I_1 = \frac{V_0 - V_i - V_z - V_\gamma}{R}$$

$$V_0 + V_\gamma + I_2 R = 0$$

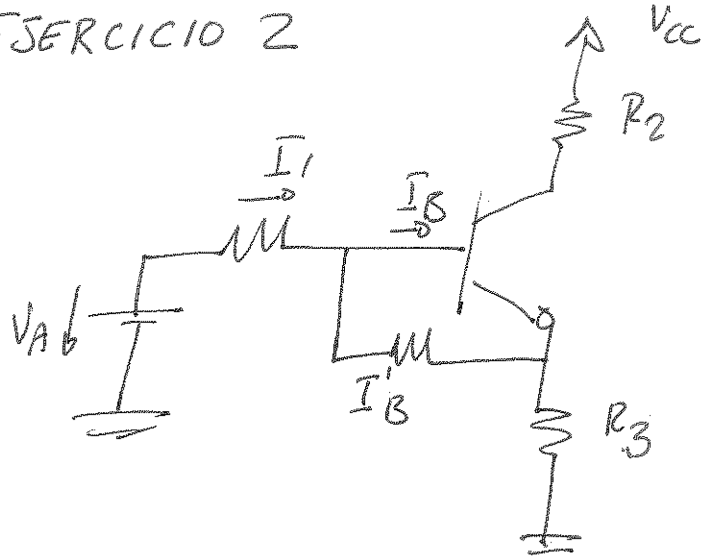
$$I_2 = -\frac{V_0 + V_\gamma}{R}$$

$$-\frac{V_0 + V_\gamma}{\cancel{R}} = \frac{V_0 - V_i - V_z - V_\gamma}{\cancel{R}} + \frac{V_0}{\cancel{R}}$$

$$V_0 = \frac{V_i + V_z}{3} = \frac{V_i}{3} + 1{,}1$$

$$V_i > -(V_z + V_\gamma) \Rightarrow V_0 = 0$$

EJERCICIO 2



$$V_A = I_1 \cdot R_1 + V_{BE} + (I'_B + (1+\beta) I_B) R_E$$

$$I_1 = I_B + I'_B$$

$$I'_B = \frac{V_{BE}}{R_B}$$

$$V_A = I_B \cdot R_1 + \frac{R_1}{R_B} V_{BE} + V_{BE} \frac{R_3}{R_B} + (1+\beta) I_B R_3 + V_{BE}$$

$$\cancel{V_A} = I_B (R_1 + (1+\beta) R_3) = V_A - V_{BE} \left(\frac{R_1 + R_3}{R_B} \right) - V_{BE}$$

$$I_B = 0{,}025 \text{ mA}$$

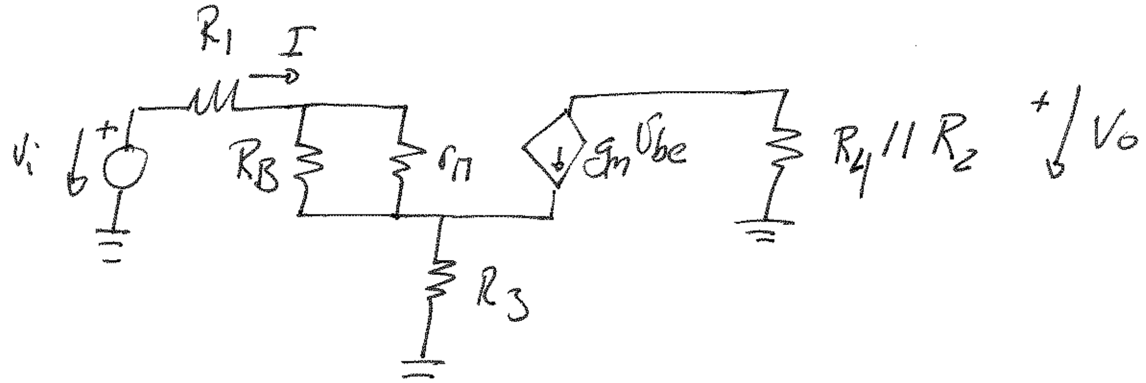
$$I_C = 5{,}19 \text{ mA}$$

$$I_E = 5{,}22 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_2 + V_{CE} + (I'_B + (1+\beta) I_B) R_3$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_2 - \left(\frac{V_{BE}}{R_B} + (1+\beta) I_B \right) R_3$$

$$V_{CE} = 3{,}99 \text{ V}$$



$$V_i = I \cdot R_1 + I\,(r_\pi // R_B) + (I + g_m v_{be})\,R_3$$

$$V_{be} = I\,(r_\pi // R_B) \quad \Rightarrow \quad I = \frac{V_{be}}{r_\pi // R_B}$$

$$V_o = -g_m V_{be}\, R_4 // R_2$$

$$V_i = V_{be}\left[\frac{R_1 + r_\pi // R_B + R_3 + g_m r_\pi // R_B \cdot R_3}{r_\pi // R_B}\right]$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{g_m (R_4 // R_2)(r_\pi // R_B)}{R_1 + R_3(1 + g_m r_\pi // R_B) + r_\pi // R_B} = 1{,}34$$

$$I_B = 0 \Rightarrow \text{corte} \Rightarrow I_E = I_C = 0$$

$$V_A = I_1 \cdot R_1 + V_{BE} + (\underbrace{\cancel{I_E}}_{0} + I_{B'}) \cdot R_3$$

$$I_1 = \underbrace{\cancel{I_B}}_{0} + I_{B'} = I_{B'} = \frac{V_{BE}}{R_B}$$

$$V_A - V_{BE} = I_{B'}\,(R_1 + R_3) = \frac{V_{BE}}{R_B}\,(R_1 + R_3)$$

$$R_B = \frac{V_{BE}}{V_A - V_{BE}}\,(R_1 + R_3) = 1{,}35\ k\Omega$$

EJERCICIO 3

a)

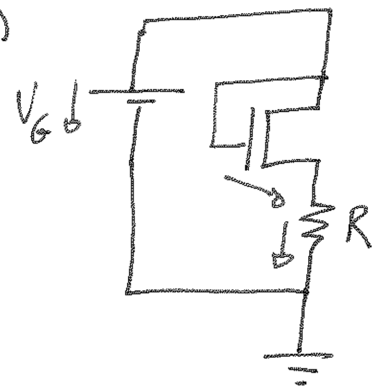
$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ Saturación

$V_G = V_D \Rightarrow V_{DS} = V_{GS} \Rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ saturación

Si $V_{GS} < V_t$ corte $\Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow V_{GS} = V_G$

Para $V_G < V_t \Rightarrow$ corte

b)



$V_G = V_{GS} + I_D R \Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D R$

$I_D = \frac{1}{2} \frac{kW}{L} (V_{GS} - V_t)^2$ saturación

$I_D = \frac{1}{2} \frac{kW}{L} (V_G - I_D R - V_t)^2$

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{kW}{L} \left[(V_G - V_t)^2 + I_D^2 R^2 - 2(V_G - V_t) I_D R \right]$$

$$0 = \frac{1}{2} \frac{kW}{L} R^2 I_D^2 - \left(\frac{kW}{L} (V_G - V_t) R + 1 \right) I_D + \frac{1}{2} \frac{kW}{L} (V_G - V_t)^2$$

$$0 = 5{,}4\, I_D^2 - 4{,}6\, I_D + 0{,}6$$

$$I_D = \frac{4{,}6 \pm 2{,}86}{10{,}8}$$

$\rightarrow \cancel{I_D = 0{,}69} \Rightarrow V_{GS} = V_G - I_D R$

$\Downarrow$

$\cancel{V_{GS} = -0{,}7\,V}$ ~~corte~~

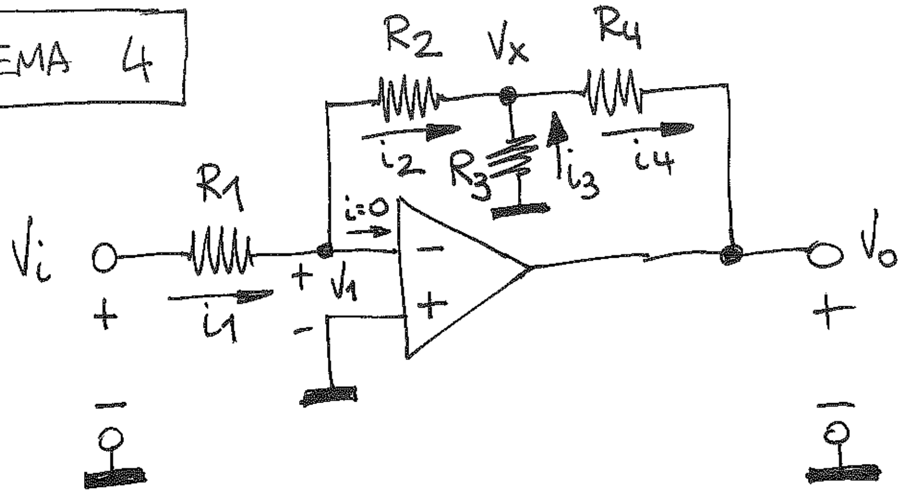
$\downarrow$

$I_D = 0{,}16\,mA$

$\Downarrow$

$V_{GS} = V_G - I_D R = \boxed{1{,}52\,V \text{ saturación}}$

PROBLEMA 4



$R_1 = 2K$
$R_2 = 1K$
$R_3 = 15K$
$R_4 = 6K$
$V_{cc} = 12V$
$-V_{cc} = -12V$

$$V_1 = 0$$

$$i_1 = i_2 = \frac{V_i}{R_1}$$

$$V_X = V_1 - i_2 R_2 = 0 - \frac{V_i}{R_1} R_2 = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

$$i_3 = \frac{0 - V_X}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} V_i$$

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{V_i}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} V_i$$

$$V_0 = V_X - i_4 R_4 = -\frac{R_2}{R_1} V_i - \left(\frac{V_i}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} V_i\right) R_4$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -\left[\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_1}\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\right]$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{1}{2}\left(1 + \frac{6}{1} + \frac{6}{15}\right) = -\frac{1}{2}\left(7 + \frac{6}{15}\right) = \boxed{-3.7}$$

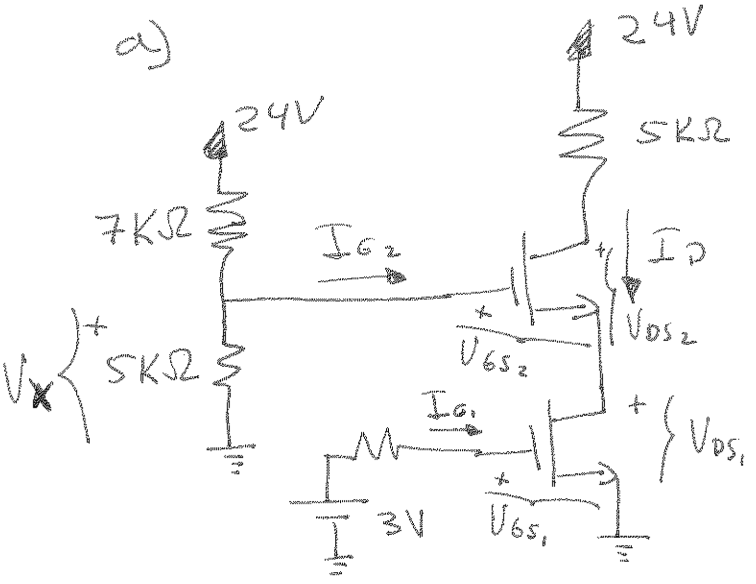
$$\boxed{A = -3.7}$$

$$\frac{-V_{cc}}{A} < V_i < \frac{+V_{cc}}{A}$$

$$\boxed{-3.24 < V_i < +3.24}$$

Ejercicio 5

a)



$I_{G_1} = 0 \Rightarrow V_{GS_1} = 3V$

$I_{G_2} = 0 \Rightarrow V_X = \frac{5K\Omega}{5K\Omega + 7K\Omega} \cdot 24 = 10V$

Supongo saturación para ambos transistores

$$I_{DS} = \frac{K}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

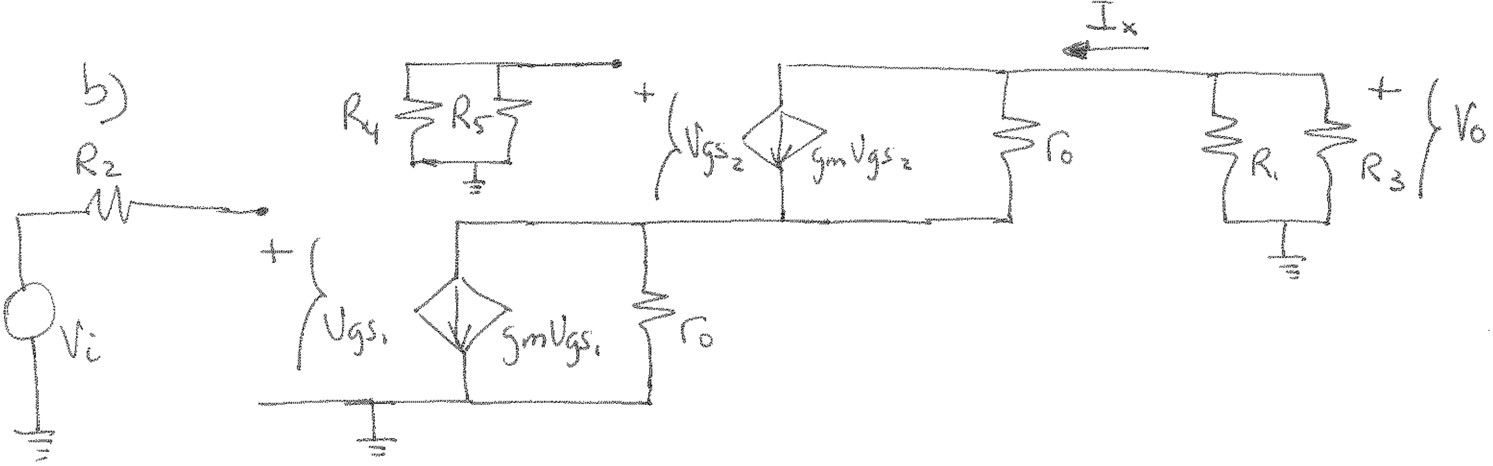
$$I_{DS_1} = I_{DS_2} \Rightarrow V_{GS_1} = V_{GS_2} = 3V \longrightarrow I_{DS} = 2'4mA$$

$$V_X = V_{GS_2} + V_{DS_1} \longrightarrow V_{DS_1} = 7V$$

$$24V = I_D \cdot 5K\Omega + V_{DS_2} + V_{DS_1} \Rightarrow V_{DS_2} = 5V$$

Comprobamos
$\begin{cases} V_{GS_1} > V_T \checkmark & V_{DS_1} > V_{GS_1} - V_T \checkmark \\ V_{GS_2} > V_T \checkmark & V_{DS_2} > V_{GS_2} - V_T \checkmark \end{cases}$

b)



c) $g_m = 2'4 \ mA/V \qquad r_o = 4'16 \ K\Omega$

$V_i = V_{gs_1}$

$$I_x = \underbrace{\frac{-V_o}{R_1 // R_3} = g_m V_{gs_2} + \frac{V_o + V_{gs_2}}{r_o}}_{} = g_m V_{gs_1} - \frac{V_{gs_2}}{r_o} \Rightarrow$$

$$-\frac{V_o}{R_1 // R_3} - \frac{V_o}{r_o} = g_m V_{gs_2} + \frac{V_{gs_2}}{r_o} \Rightarrow V_{gs_2} = -V_o \left[\frac{\frac{1}{R_1 // R_3} + \frac{1}{r_o}}{g_m + \frac{1}{r_o}} \right]$$

$$\Rightarrow -\frac{V_o}{R_1 // R_3} = g_m V_i + \frac{V_o}{r_o} \frac{\frac{1}{R_1 // R_3} + \frac{1}{r_o}}{g_m + \frac{1}{r_o}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m}{\frac{1}{R_1 // R_3} + \frac{1}{r_o} \frac{\frac{1}{R_1 // R_3} + \frac{1}{r_o}}{g_m + \frac{1}{r_o}}} = -8'14$$

Cuestión 1

Aparece el efecto body ya que ambos transistores no comparten la misma fuente.

Este efecto consiste en un aumento de la tensión umbral del transistor MOS debida a un voltaje $V_{SB} > 0$ que genera una mayor zona de deplexión, debido a que la unión PN está más en inversa, por lo que es más dificil generar el canal de conducción.

Si el substrato estuviera conectado a 0V, el efecto body solo afectaría al transistor 2 [que no tiene la fuente conectada a 0V].

$V_{T1} = 1V$ $\quad$ $V_{T2} > 1V$

Si estuviera conectada a un voltaje inferior, el efecto body afectaría a ambos, pero siempre más al 2.

$V_{T1} > 1V$ $\quad$ $V_{T2} > V_{T1} > 1V$

Cuestión 2

a) $n_0 = p_0 = n_i = 2'36 \cdot 10^{13} \ cm^{-3}$

$$\sigma = q\,(\mu_n + \mu_p)\, n_i = 2'16 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\Omega \, cm}$$

b) $N_D > N_A \longrightarrow$ tipo N $\Rightarrow \; n \simeq N_D - N_A = 9'9 \cdot 10^{16} \ cm^{-3}$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = 5'6 \cdot 10^{9} \ cm^{-3}$$

$$\sigma \simeq q\,\mu_n\, n = 61'8 \frac{1}{\Omega \, cm}$$

c) $\sigma = q\left(\mu_n n + \mu_p p\right) \qquad p = \dfrac{n_i^2}{n}$

$$\Rightarrow \sigma(n) = q\left(\mu_n n + \mu_p \frac{n_i^2}{n}\right)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial n} = q\left(\mu_n + \mu_p \frac{n_i^2}{(-n^2)}\right) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mu_n = \mu_p \frac{n_i^2}{n^2} \Rightarrow n = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}\, n_i = 1'61 \cdot 10^{13} \ cm^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}}\, n_i = 3'45 \cdot 10^{13} \ cm^{-3}$$

$p > n \Rightarrow$ ligero dopaje P $\left[N_A = p - n = 1'84 \cdot 10^{13} \ cm^{-3} \right]$

$$\sigma_{min} = 2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\Omega \, cm}$$