

EXAMEN DE ELECTRÓNICA FUNDAMENTAL
04/08/2021

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas. En todas las partes se deberá fundamentar claramente la deducción que conduce al resultado para que el mismo sea considerado.

La prueba es **sin** material.

Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

PROBLEMA 1 (40 puntos)

El circuito de la figura 1 muestra lo que se conoce como un inductor activo, es decir, un circuito que a partir de un capacitor genera, en otro punto, una impedancia vista en señal que es inductiva.

- a) Calcule las tensiones de continua v_1 y v_2 .
- b) Muestre que la impedancia vista (en señal) entre el nodo v_1 y tierra, indicada como Z_v en la figura 1, se puede modelar como la serie de un inductor y una resistencia, que llamaremos L_{ind} y R_{ind} , respectivamente. Calcule sus valores.

Ahora el circuito conformado por M1, M2 y C_1 , analizado en las partes a) y b), se utiliza para implementar el circuito mostrado en la figura 2.

- c) Calcule el W_3/L_3 necesario para que los transistores M1 y M2 se encuentren en el mismo punto de operación que en el caso anterior.
- d) Sustituya M1, M2 y C_1 por el circuito equivalente hallado en la parte b). Calcule el valor de C_2 para que el polo impuesto por ese capacitor se encuentre a la frecuencia de 1 kHz.
- e) Bosqueje el diagrama de Bode de amplitud de la transferencia v_o/v_i .

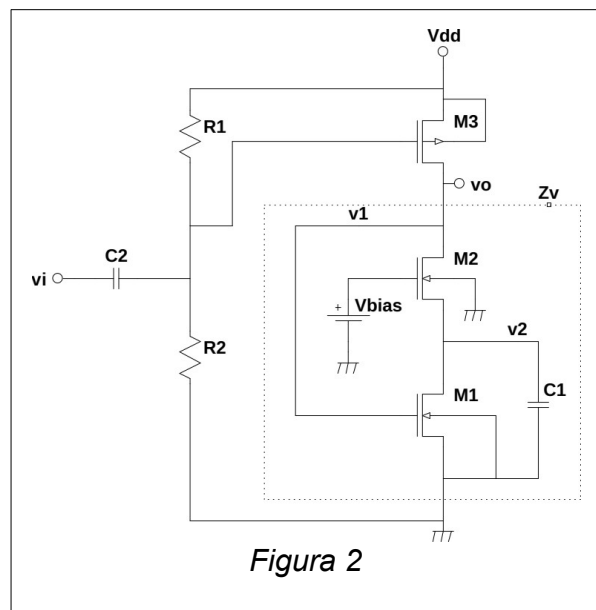
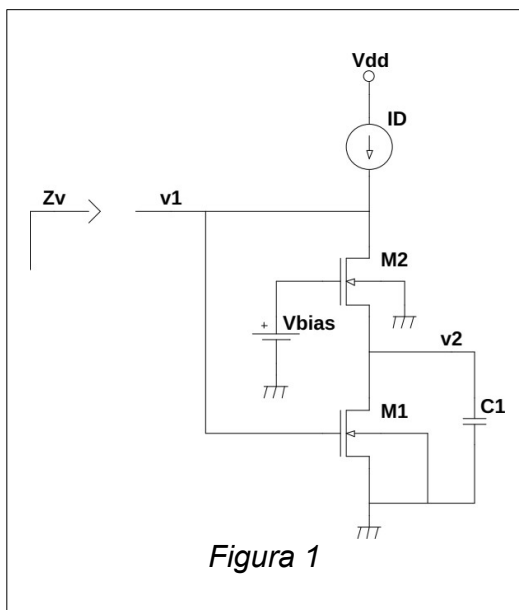
Datos:

$C_1 = 1 \text{ nF}$, $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$

M1, M2 y M3: $\mu C_{ox} = 200 \mu\text{A/V}^2$, $|V_{t0}| = 1 \text{ V}$, $\delta = 0.1$, V_A infinito

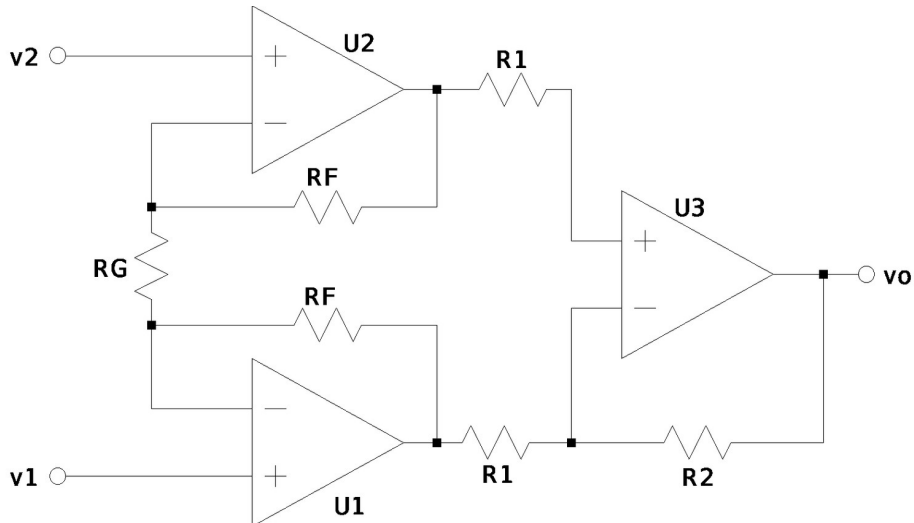
$W_1/L_1 = 11$, $W_2/L_2 = 44$

$I_D = 1 \text{ mA}$, $V_{dd} = 5 \text{ V}$, $V_{bias} = 2.6 \text{ V}$



PROBLEMA 2 (40 puntos)

Al fabricar un amplificador de instrumentación basado en tres amplificadores operacionales una resistencia quedó desconectada, resultando en el circuito que se muestra en la figura.



Los amplificadores operacionales se supondrán ideales salvo donde se indique lo contrario, en cuyo caso se supondrá siempre que los tres amplificadores operacionales son del mismo modelo.

- a) Determinar la ganancia diferencial del circuito.
- b) Determinar la ganancia en modo común del circuito y la relación de rechazo al modo común. ¿Qué relación tiene que haber entre la amplitud de una señal de modo común a la entrada y la amplitud de una señal diferencial a la entrada para que las amplitudes de la señales correspondientes a la salida sean iguales ?
- c) Si se desea poder amplificar adecuadamente una señal diferencial sinusoidal a la entrada con amplitud v_{idp} superpuesta a una señal en modo común a la entrada que puede variar entre $[v_{icmin}, v_{icmax}]$, indicar qué debe cumplir el rango de entrada de modo común del modelo de amplificador a elegir y qué debe cumplir la excursión de salida. Indicar en cada caso qué amplificador o amplificadores entre U1, U2 y U3 impone cada una de las condiciones indicadas.
- d) Si el modelo de amplificador operacional elegido tiene tensión de offset máxima $V_{offsetmax}$, corrientes de polarización y offset que se pueden considerar despreciables, en qué rango puede variar el nivel de continua en la salida v_o para entrada nula.

Datos:

$R_F = 10.R_G$, $R_2 = 5.R_1$, $R_G = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$
 $v_{idp} = 20 \text{ mV}$, $v_{icmin} = -1\text{V}$, $v_{icmax} = +1 \text{ V}$, $V_{offsetmax} = 5 \text{ mV}$

PREGUNTA (20 puntos)

Se tiene una juntura p-n con los datos indicados abajo.

En todos los casos al utilizar una ecuación para llegar al resultado solicitado explique brevemente en que se basa la misma.

- Determinar para la juntura en circuito abierto el ancho de la zona de deplexión (o vaciamiento) del lado p y el ancho total de la zona de deplexión.
- Determinar para la juntura en circuito abierto la carga total en la zona de deplexión del lado p y del lado n.
- Recordando que para una juntura p-n con tensión inversa V_R el ancho total de la zona de deplexión está dado por:

$$W_{depl} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot (V_0 + V_R)}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

i) deducir la expresión de la capacidad de deplexión en función del ancho total de la zona de deplexión

ii) evaluar dicha capacidad para $V_R = 0$ V.

Datos juntura p-n:

$N_A = 1.5 \times 10^{22} \text{ at/m}^3$, $N_D = 3 \times 10^{22} \text{ at/m}^3$, $x_n = 0.104 \text{ } \mu\text{m}$, $V_0 = 0.74 \text{ V}$, $A = 0.1 \text{ mm}^2$

Constantes físicas:

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $k_{Si} = 11.9$

Problema 1

Examen de Electrónica Fundamental

a) En DC, $I_D = I_{D1} = I_{D2}$

Asumo M_1 y M_2 en zona de saturación:

$$\begin{cases} I_D = I_{D1} = \frac{\mu_{Cox} W_1/L_1}{2(1+\delta)} (V_1 - V_{to})^2 \\ I_D = I_{D2} = \frac{\mu_{Cox} W_2/L_2}{2(1+\delta)} (V_{bias} - V_{to} - (1+\delta)V_2)^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_1 = \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_D}{\mu_{Cox} W_1/L_1}} + V_{to} = \boxed{2V}$$

$$\Rightarrow V_2 = \frac{V_{bias} - V_{to}}{1+\delta} - \sqrt{\frac{2I_D}{(1+\delta)\mu_{Cox} W_2/L_2}} = \boxed{1V}$$

Verifico zona de saturación de M_1 :

* No corte: $V_{SB} < V_P \Leftrightarrow 0 < \frac{V_1 - V_{to}}{1+\delta} \Leftrightarrow V_1 > V_{to} \Leftrightarrow 2V > 1V \checkmark$

* No zona lineal: $V_{DB} > V_P \Leftrightarrow V_2 > \frac{V_1 - V_{to}}{1+\delta} \Leftrightarrow 1V > 0,91V \checkmark$

Verifico zona de saturación de M_2 :

* No corte: $V_{SB} < V_P \Leftrightarrow V_2 < \frac{V_{bias} - V_{to}}{1+\delta} \Leftrightarrow 1V < 1,45V \checkmark$

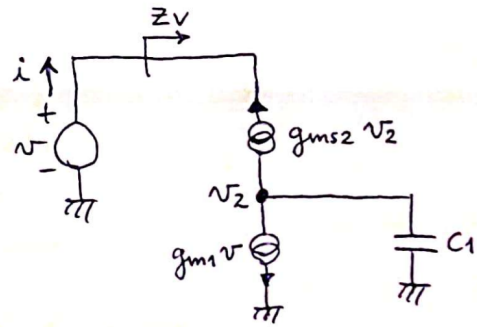
* No zona lineal: $V_{DB} > V_P \Leftrightarrow V_1 > \frac{V_{bias} - V_{to}}{1+\delta} \Leftrightarrow 2V > 1,45V \checkmark$

b) $g_{ms2} v_2 + g_{m1} v + v_2 s C_1 = 0$

$$\Rightarrow \frac{v_2}{v} = \frac{-g_{m1}}{g_{ms2} + s C_1}$$

$$Z_v = \frac{v}{i} = \frac{v}{-g_{ms2} v_2} = \frac{g_{ms2} + s C_1}{g_{ms2} g_{m1}}$$

$$Z_v = \frac{1}{g_{m1}} + s \left(\frac{C_1}{g_{m1} g_{ms2}} \right) = R_{ind} + s L_{ind}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} R_{ind} = \frac{1}{g_{m1}} = \sqrt{\frac{1+\delta}{2I_D \mu_{Cox} W_1/L_1}} = \boxed{500 \Omega} \\ L_{ind} = \frac{C_1}{g_{m1} g_{ms2}} = C_1 \sqrt{\frac{1+\delta}{2I_D \mu_{Cox} W_1/L_1}} \cdot \frac{1}{(1+\delta)} \sqrt{\frac{1+\delta}{2I_D \mu_{Cox} W_2/L_2}} \\ = \frac{C_1}{2I_D \mu_{Cox}} \sqrt{\frac{L_1 L_2}{W_1 W_2}} = \boxed{114 \mu H} \end{cases}$$

Examen de Electrónica Fundamental

c) Asumo M_3 en zona de saturación: $I_{D3} = I_D = 1 \text{ mA}$

$$I_D = I_{D3} = \frac{\mu C_{ox} W_3 / L_3}{2(1+\delta)} \left(V_{DD} - \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{DD} - V_{to} \right)^2$$

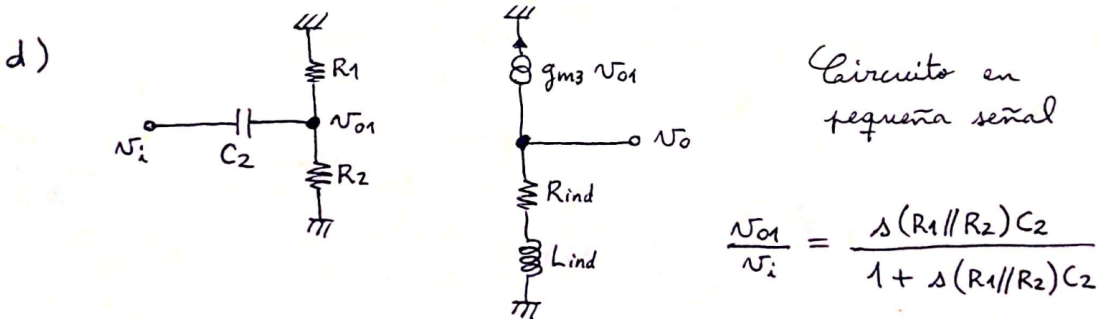
$$\Rightarrow \frac{W_3}{L_3} = \frac{2(1+\delta) I_D}{\mu C_{ox} \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} V_{DD} - V_{to} \right)^2} = \boxed{2,75}$$

Verifico zona de saturación de M_3 :

* No corte: $V_{BS} < V_P \Leftrightarrow 0 < \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{DD} - V_{to} \Leftrightarrow \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{DD} > V_{to}$

$$\Leftrightarrow 3V > 1V \checkmark$$

* No zona lineal: $V_{BD} > V_P \Leftrightarrow V_{DD} - V_1 > \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{DD} - V_{to} \Leftrightarrow 3V > 1,82V \checkmark$

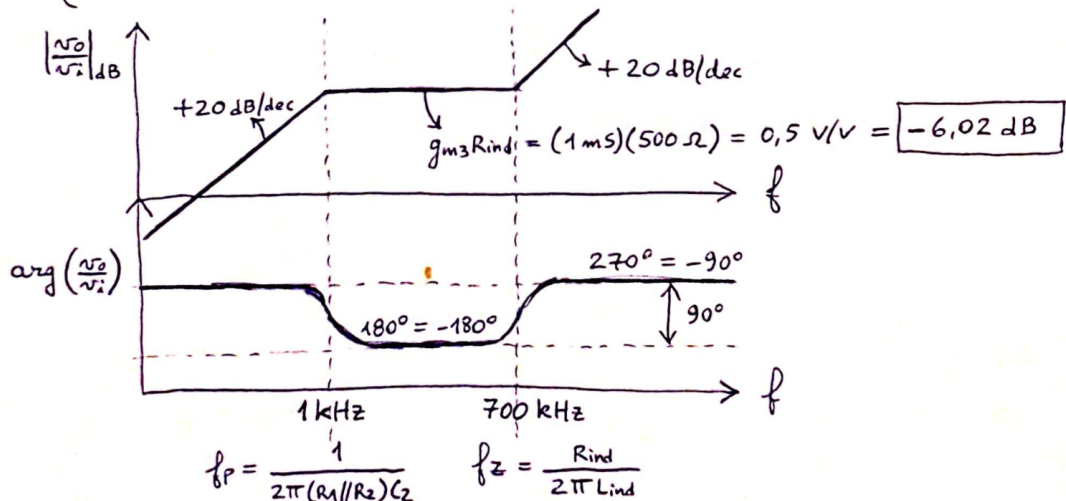


$$\Rightarrow f_{pc2} = \frac{1}{2\pi(R_1 \parallel R_2)C_2} \Rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi(R_1 \parallel R_2)f_{pc2}} = \boxed{133 \text{ nF}}$$

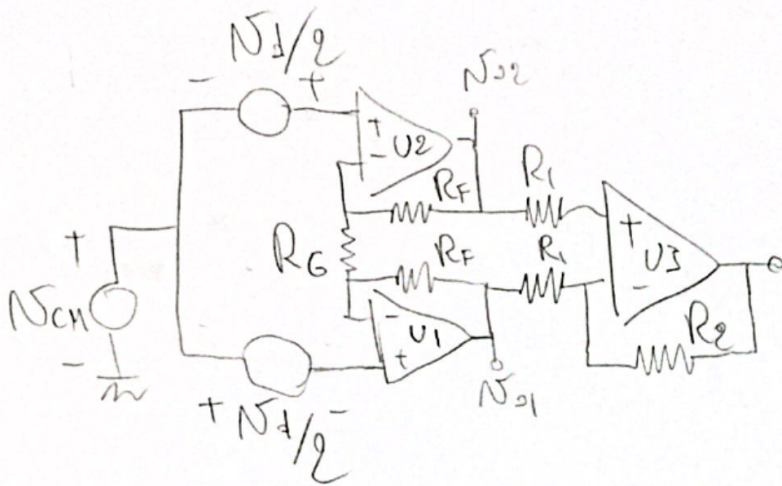
e) $\frac{v_o}{v_{o1}} = -g_{m3}(R_{ind} + sL_{ind})$

$$\Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = \left(\frac{v_o}{v_{o1}} \right) \left(\frac{v_{o1}}{v_i} \right) = \frac{-g_{m3}(R_{ind} + sL_{ind}) s(R_1 \parallel R_2)C_2}{1 + s(R_1 \parallel R_2)C_2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{un polo en } \frac{1}{2\pi(R_1 \parallel R_2)C_2} = \boxed{1 \text{ kHz}} \\ \text{un cero en } \boxed{0 \text{ Hz}} \text{ y un cero en } \frac{R_{ind}}{2\pi L_{ind}} = \boxed{700 \text{ kHz}} \end{cases}$$



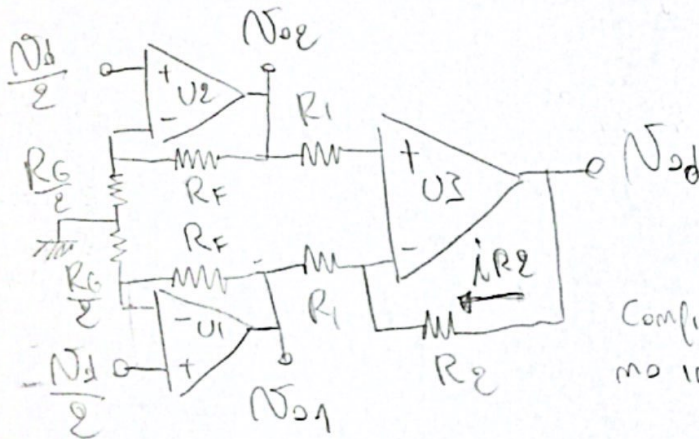
Problema 2



$$N_d = N_2 - N_1$$

$$N_{CM} = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

2) Solo diferencial



$$N_{o2} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G/2}\right) \frac{N_d}{2}$$

Configuración no inversora $N_{o1} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G/2}\right) \left(\frac{-N_d}{2}\right)$

$e^+ \neq N_{o2}$
No hay corriente

$$\Rightarrow i_{R_2} = \frac{N_{o2} - N_{o1}}{R_1}$$

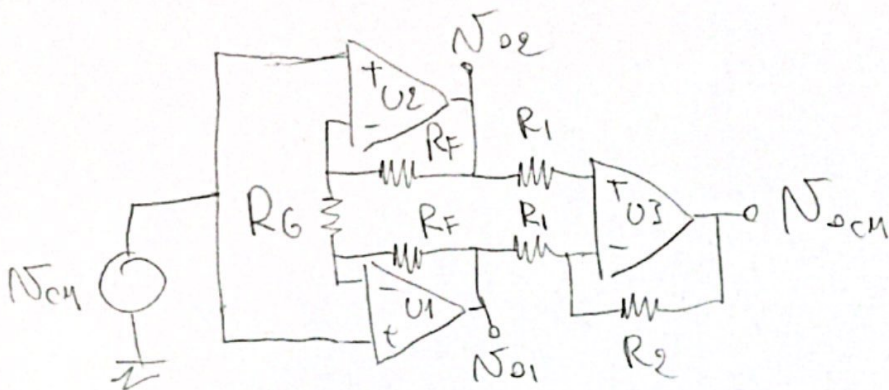
$$\Rightarrow N_{od} = N_{o2} + R_2 \frac{(N_{o2} - N_{o1})}{R_1}$$

$$N_{od} = N_{o2} + R_2 i_2$$

$$N_{od} = \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \frac{N_d}{2} + \frac{R_2}{R_1} \left[\left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \frac{N_d}{2} - \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left(\frac{-N_d}{2}\right) \right]$$

$$N_{od} = \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left[\frac{N_d}{2} + \frac{R_2 N_d}{R_1} \right] \Rightarrow \boxed{\frac{N_{od}}{N_d} = \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{R_2}{R_1}\right) = G_d}$$

b) Solo modo común



$$\left. \begin{aligned} i_{R_G} = \phi &\Rightarrow N_{o2} = N_{o1} = N_{cm} \\ e^+ = N_{o2} = N_{cm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_{R_2} = \frac{N_{o1} - e^-}{R_1} = \phi$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{N_{dcm}}{N_{cm}} = 1 = G_{cm}}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \Rightarrow$$

$$\boxed{CMRR = \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

$$N_{dcm} = N_{od} \Rightarrow \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{R_2}{R_1}\right) N_d = N_{cm}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{N_d}{N_{cm}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{R_2}{R_1}\right)}}$$

$$\begin{aligned} G_d &= 115,5 \text{ V/V} \\ G_{cm} &= 1 \text{ V/V} \\ CMRR &= 115,5 \text{ V/V} \end{aligned}$$

c) Para U_1 y U_2

$$\left. \begin{aligned} N_{iMAX} &= N_{iCM_{MAX}} + \frac{N_{idp}}{2} \\ N_{iMIN} &= N_{iCM_{MIN}} - \frac{N_{idp}}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_{CMR_{12}} = [-1,01V ; +1,01V]$$

$$\left. \begin{aligned} N_{oMAX} &= N_{iCM_{MAX}} + \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \frac{N_{idp}}{2} \\ N_{oMIN} &= N_{iCM_{MIN}} - \left(1 + \frac{2R_F}{R_G}\right) \frac{N_{idp}}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow OSW_{12} = [-1,21V ; 1,21V]$$

Para U_3

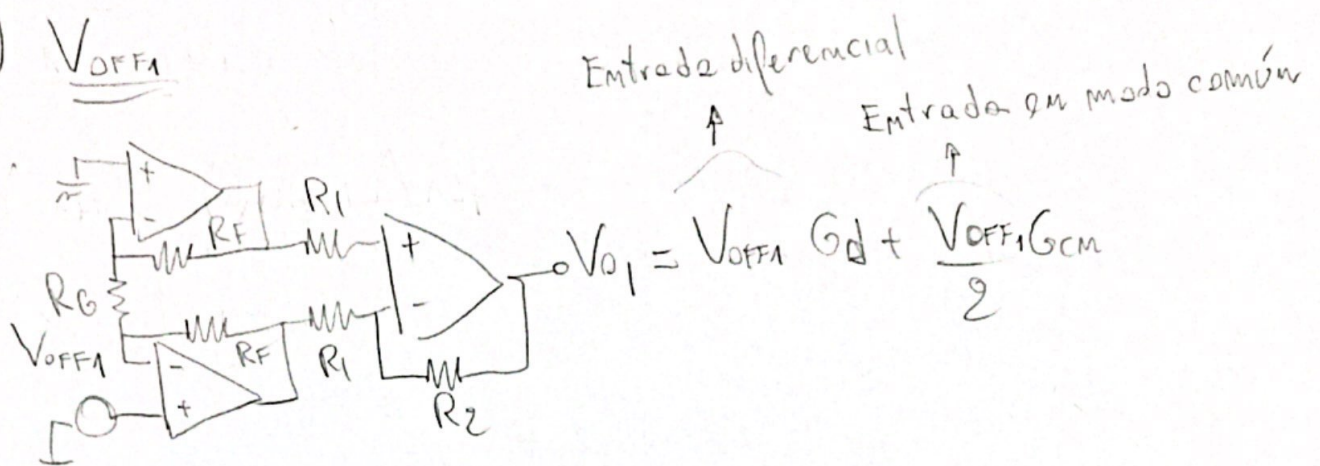
$$I_{CMR_3} = OSW_{12}$$

$$\left. \begin{aligned} N_{oMAX} &= N_{iCM_{MAX}} + G_d N_{idp} \\ N_{oMIN} &= N_{iCM_{MIN}} - G_d N_{idp} \end{aligned} \right\} \Rightarrow OSW_3 = [-3,3V ; 3,3V]$$

Para los tres amplificadores

$$\begin{aligned} I_{CMR} &= [-1,21V ; 1,21V] \\ OSW &= [-3,3V ; 3,3V] \end{aligned}$$

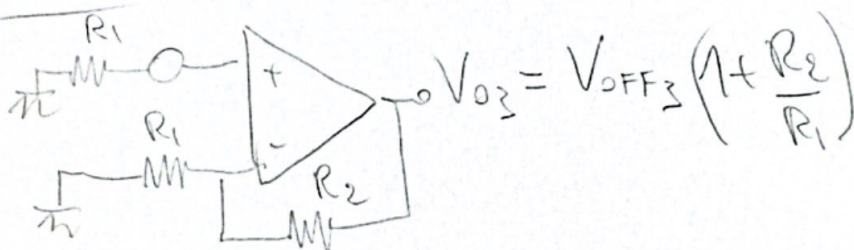
d) V_{OFF1}



V_{OFF2}

Mismo análisis que $V_{OFF1} \Rightarrow V_{O2} = V_{OFF2} G_d + \frac{V_{OFF2} G_{CM}}{2}$

V_{OFF3}



$$V_O^{OFF} = V_{O1} + V_{O2} + V_{O3} = (V_{OFF1} + V_{OFF2}) G_d + (V_{OFF1} + V_{OFF2}) \frac{G_{CM}}{2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{OFF3}$$

$$V_O^{OFF} = (V_{OFF1} + V_{OFF2}) \left(G_d + \frac{G_{CM}}{2}\right) + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{OFF3}$$

$$\Rightarrow V_{O_{MAX}}^{OFF} = \left[2 \left(G_d + \frac{G_{CM}}{2}\right) + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \right] V_{OFF_{MAX}} \Rightarrow V_{O_{MAX}}^{OFF} = 1,17V$$