

Examen de Electrónica Avanzada 2
28/07/2022

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas.

La prueba es **sin** material.

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

Problema 1: (37 puntos)

El circuito de la Figura 1 es una referencia de tensión bandgap tipo Brokaw.

- a) Calcule el valor de la resistencia R1 para que el circuito funcione correctamente.
¿Cuál es el valor de tensión VREF a la salida?
- b) Si el amplificador tiene una tensión offset equivalente a la entrada VOFF
 - i. Demuestre que, si se desprecia el efecto del offset en la pendiente de VREF, el offset a la salida es igual a $\frac{R1}{R} V_{OFF}$
 - ii. Calcule el error en la tensión VREF con respecto al valor calculado en a) si VOFF=5mV.
- c) El amplificador tiene una tensión de ruido equivalente a la entrada de $10 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$. Calcule la densidad de potencia de ruido en la salida VREF debido al ruido del amplificador.
- d) Para reducir la tensión de ruido de la referencia, se agrega un filtro RC a la salida como se muestra en la Figura 2. Teniendo en cuenta el ruido del amplificador (parte c) y que la contribución de las resistencias R, R1 y R2 y los transistores Q1 y Q2 a la tensión de ruido en VREF es $12 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$, determine el ruido RMS en la salida VREF_FIL.

Datos:

- R=220 Ω , R2=56 Ω , RF= 1 k Ω , C=25 nF
- Q1 y Q2 son tales que
 - IS2=8 x IS1
 - VBE1=VG0 - a.T, tal que VG0=1.2V y a=2mV/K
- El amplificador es ideal excepto donde se indica lo contrario. En particular puede considerar que el ancho de banda del amplificador no afecta el resultado.
- Todas las cuentas de ruido se deben realizar a T=300K

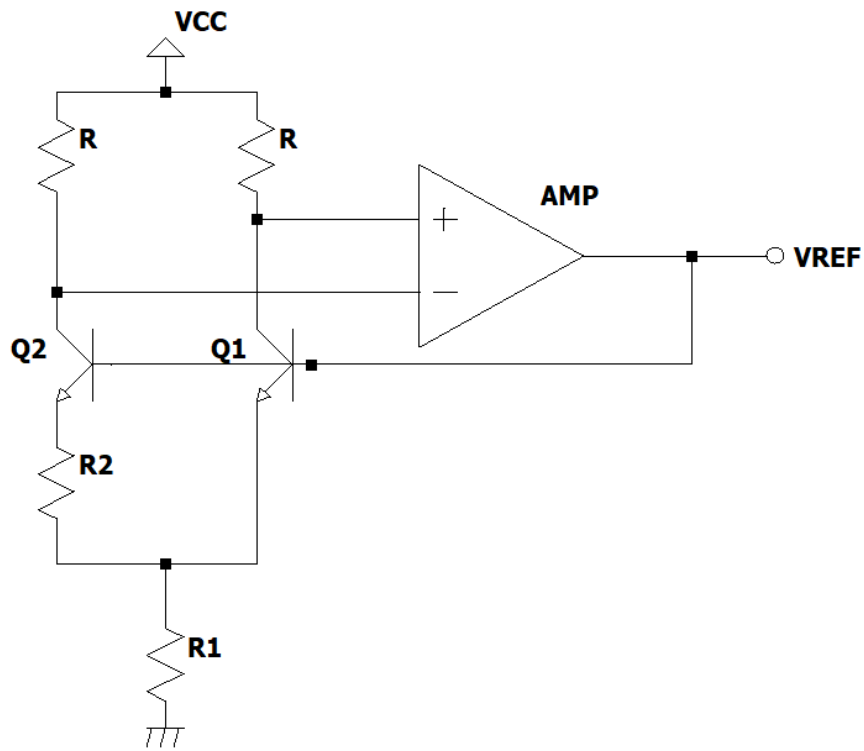


Figura 1

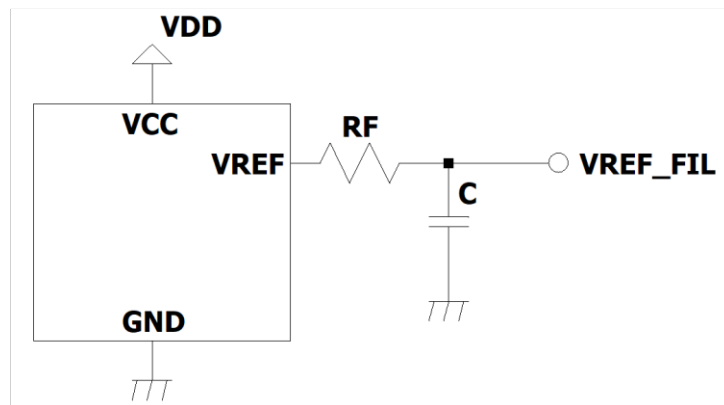


Figura 2

Problema 2: (37 puntos)

Se considera el amplificador de la Figura 1.

- Hallar una expresión analítica de la ganancia del amplificador $v_{o1}/(v_2-v_1)$.
- Calcular W_{12} , el ancho de los transistores idénticos M_1 y M_2 , para que $v_{o1}/(v_2-v_1)=400$ V/V.

Se considera el regulador lineal de la Figura 2, que utiliza el amplificador de la Figura 1.

- Calcular el rango en que puede variar v_{o1} con el circuito funcionando correctamente.
- Calcular el ancho del transistor M_5 para que la tensión de Dropout sea 0.15 V.
- Calcular los mínimos valores de R_1 y R_2 tales que el consumo de R_1 y R_2 sumado al del amplificador sea mucho menor a la corriente I_L entregada a la carga.
- Calcular el rango de entrada en modo común del amplificador y verificar que V_{REF} está incluido.

Datos:

- $V_{DD}=3.8$ V, $V_{SS}=-3.8$ V, $V_{REF}=1.2$ V, $V_{OUT}=2.0$ V, 60 mA $< I_L < 120$ mA.
- La fuente $I_B=5$ mA y requiere una tensión mínima de funcionamiento $V_{minIB}=0.6$ V.
- $V_{i0n}=|V_{i0p}|=0.3$ V, $\mu_n C_{ox}=300$ μ A/V², $\mu_p C_{ox}=100$ μ A/V², $L=350$ nm, $W_3=W_4=9$ μ m, $r_{on}=r_{op}=500$ k Ω .

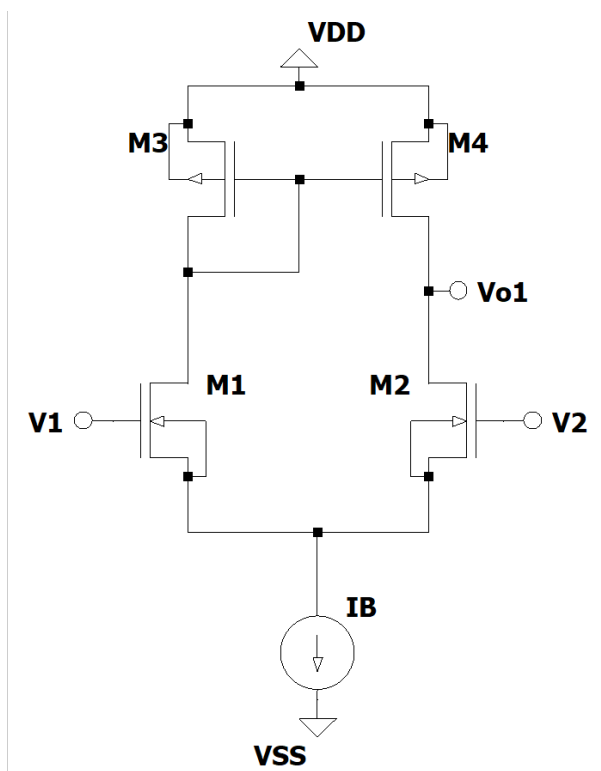


Figura 1

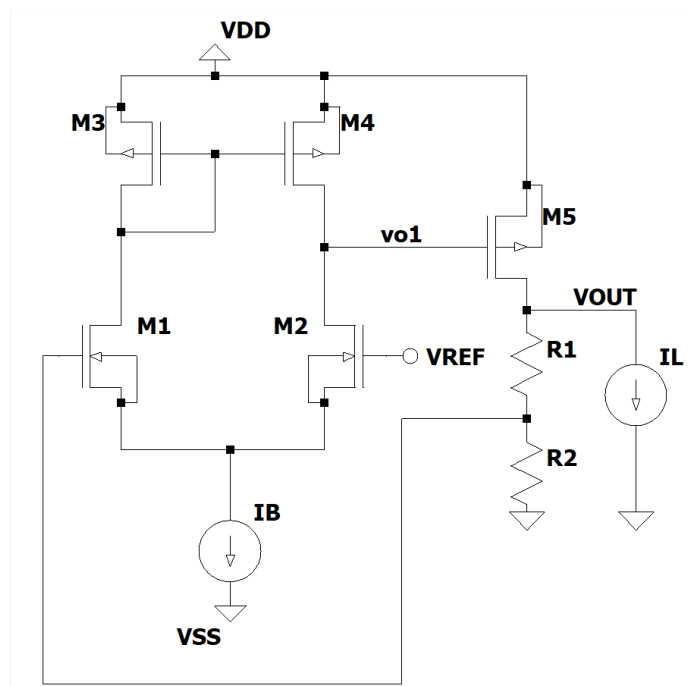


Figura 2

Pregunta: (26 puntos)

- a) En un sistema con realimentación negativa, como el que se representa en la Figura 1, demuestre que las variaciones relativas de la ganancia de lazo cerrado $\left(\frac{dG_{CL}}{G_{CL}}\right)$ son $(1 + A\beta)$ veces más chicas que las variaciones relativas de la ganancia del bloque A $\left(\frac{dA}{A}\right)$.
- b) Para el circuito de la Figura 2, donde la polarización DC sólo se detalla parcialmente, determine la ganancia de lazo cerrado $G_{CL} = \frac{v_o}{v_s}$. ¿Cuánto varía G_{CL} si RD1 cambia 50%?

Datos:

- $R1=1\text{ k}\Omega$, $R2=9\text{ k}\Omega$, $RD1=20\text{ k}\Omega$, $RD2=10\text{ k}\Omega$
- Parámetros pequeña señal M1 y M2:
 - $gm1=10\text{ mA/V}$, $gm2=4\text{ mA/V}$
 - Se puede despreciar las resistencias de drain de ambos transistores.

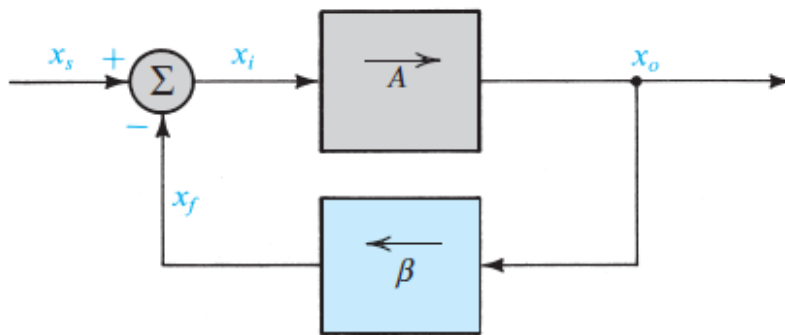


Figura 1

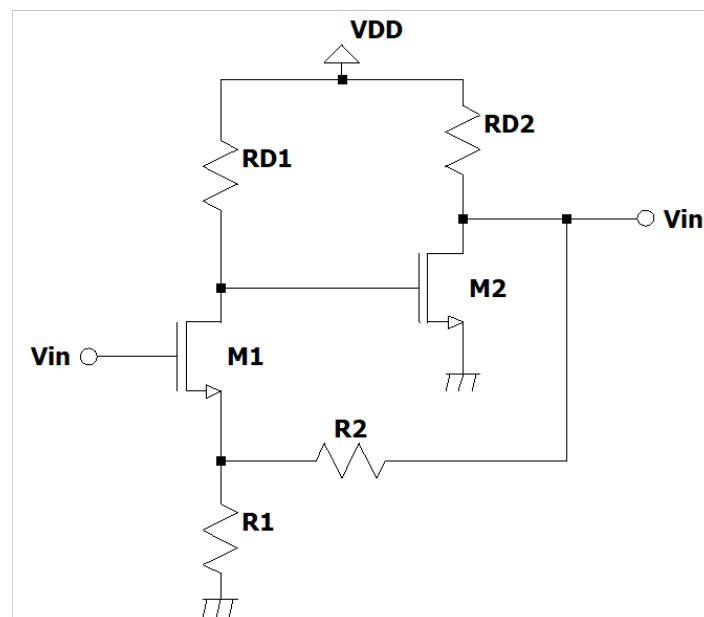
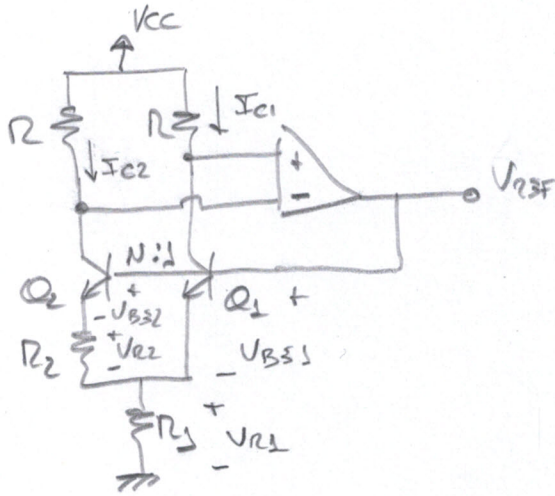


Figura 2

2



(a) V_{NSF} NO DEBE DEPENDER DE T

• Halla: $V_{R2} + V_{BE2} = V_{BE1}$
 $\Rightarrow I_2 \cdot R_2 = \Delta V_{BE} = V_T L \left(\frac{I_{C1}}{I_{S1}} \cdot \frac{I_{S2}}{I_{C2}} \right)$

• ANP $\rightarrow V_{C1} = V_{C2} \Rightarrow I_1 = I_2$
 $\frac{I_{S2}}{I_{S1}} = N$
 \downarrow
 $V_{R2} = 2 I_2 R_2$

$\Rightarrow I_2 R_2 = V_T L(N) \Rightarrow V_{R2} = \frac{2 R_2}{R_1} V_T L(N)$

$V_{NSF} = V_{ES} + V_{BE1} \Rightarrow \boxed{V_{NSF} = V_{BE1} + \frac{2 R_2}{R_1} V_T L(N)}$

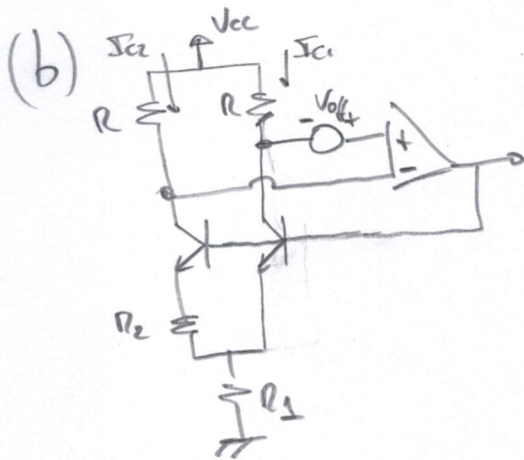
$V_{BE1} = V_{G0} - \alpha \cdot T$

V_{NSF} no depende de $T \Leftrightarrow \alpha \cdot T = \frac{2 R_2}{R_1} \frac{k_B T}{q} L(N)$

$\Rightarrow \boxed{R_1 = \frac{\alpha \cdot R_2 \cdot q}{2 k_B L(N)}}$

$\Rightarrow \boxed{R_1 = 313 \Omega}$

$\boxed{V_{NSF} = V_{G0} = 1,2V}$



valb ANP: $I_{C1} R = I_{C2} R + V_{OFF}$

$\Rightarrow I_{C1} = I_{C2} + \frac{V_{OFF}}{R} \Rightarrow \begin{cases} (1) \\ (2) \end{cases}$

(1) $\Delta V_{BE} = V_T L \left(N \left(1 + \frac{V_{OFF}}{I_{C2} R} \right) \right)$ ← error de redondeo
 por lo tanto: $\Delta V_{BE} \approx V_T L(N) + b$ especie

(2) $V_{ES} = R_3 \cdot (I_{C1} + I_{C2}) = \frac{2 R_3 \Delta V_{BE}}{R_2} + \frac{R_3}{R} V_{OFF}$

$\Rightarrow \boxed{V_{NSF} = V_{G0} + \frac{R_3}{R} V_{OFF}}$

si $V_{OFF} = 5 mV \Rightarrow \boxed{\Delta V_{NSF} = 7,1 mV}$

- (2) (c) Para calcular la potencia de ruido en V_{REF} debo calcular la transferencia entre V_m^{AMP} y V_{REF} .

→ es la misma que la del OFFSET: $\frac{R_1}{R}$

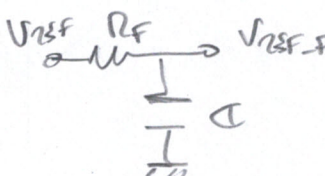
$$\Rightarrow S_m^{REF} = (V_m^{AMP})^2 \cdot \left(\frac{R_1}{R}\right)^2 \Rightarrow \boxed{S_m^{REF} = 202 \times 10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}}$$

- (d) Ahora a S_m^{REF} le debo sumar la contribución de R 's y Q 's de la referencia

$$\Rightarrow \text{NUEVO } S_m^{REF} = S_m^{REF, AMP} + S_m^{REF, R/Q}$$

↑ parte (c) ↑ $(12 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}})^2$

$$\Rightarrow S_m^{REF} = 346 \times 10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$$

• Filtro RC:  $B = \frac{1}{4RC} = 10 \text{ kHz}$

$N_m^{RC} = \sqrt{\frac{kT}{C}} = 0,41 \mu\text{V}_{\text{rms}}$

• Ruido RMS de la Ref.: $N_m^{REF} = \sqrt{S_m^{REF} \cdot B} = 1,86 \mu\text{V}_{\text{rms}}$

$$\Rightarrow \text{RUIDO RMS en } V_{REF-FIL} : N_m^{TOT} = \sqrt{(N_m^{REF})^2 + (N_m^{RC})^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{N_m^{TOT} = 1,90 \mu\text{V}_{\text{rms}}}$$

Problema 2

a) $\frac{v_{b1}}{v_2 - v_1} = g_{m12} \cdot \frac{r_o}{2} = \sqrt{\frac{I_B \mu_n C_{ox} W_{12}}{L}} \cdot \frac{r_o}{2}$

b) $W_{12} = \left(\frac{2A_0}{r_o}\right)^2 \cdot \frac{L}{I_B \mu_n C_{ox}} = \left(\frac{2 \cdot 400}{500 \cdot 10^3}\right)^2 \cdot \frac{350 \text{ nm}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 597 \text{ nm} \Rightarrow \boxed{W_{12} = 597 \text{ nm}}$

c) M2 saturación: $\underbrace{v_{G5}}_{v_{o1}} - v_{\beta 1} > \underbrace{v_2}_{v_{REF}} - v_{\beta 1} - V_{ton} \Rightarrow v_{o1} > v_{REF} - V_{ton} = 1.2V - 0.3V = 0.9V$
 $\boxed{v_{o1} > 0.9V}$

M4 saturación: $v_{DD} - \underbrace{v_{G5}}_{v_{o1}} > v_{DD} - v_{G3} - |V_{top1}| \Rightarrow v_{o1} < |V_{top1}| + v_{G3}$ (1)

$I_{D3} = \frac{I_B}{2}$; $I_{D3} = \frac{\mu_p C_{ox}}{2} \cdot \frac{W_3}{L} (v_{S3} - v_{G3} - |V_{top1}|)^2 \Rightarrow v_{G3} = -\sqrt{\frac{I_B L}{\mu_p C_{ox} W_3}} + v_{DD} - |V_{top1}| \Rightarrow$
 $\Rightarrow v_{G3} = -\sqrt{\frac{350 \cdot 10^{-9}}{9 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{5 \text{ mA}}{100 \mu A / \sqrt{2}}} + 3.8V - 0.3V = 2.1V \Rightarrow \boxed{v_{G3} = 2.1V}$ (2)

De (1) y (2): $v_{o1} < 0.3V + 2.1V \Rightarrow \boxed{v_{o1} < 2.4V}$

$\boxed{0.9V < v_{o1} < 2.4V}$

d) $v_{S65} = v_{SS} - v_{G5} = v_{DD} + 0.95V_{ovt} - \underbrace{v_{o1}^{\min}}_{v_{o1}^{\min}} = 0.15V + 0.95 \cdot 2.0V - 0.9V = 1.15V \Rightarrow \boxed{v_{S65} = 1.15V}$ (3)

$R_{on}^{\min} = \frac{v_{DD}}{I_L^{\max}} = \frac{0.15V}{120 \mu A} = 1.25 \Omega$ (4)

$R_{on} = \frac{1}{\mu_p C_{ox} \frac{W_5}{L} \cdot (v_{S65} - |V_{top1}|)} \Rightarrow W_5 = \frac{1}{\mu_p C_{ox} \frac{R_{on}}{L} (v_{S65} - |V_{top1}|)}$ (3)(4)

$\Rightarrow W_5 = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1.25}{0.35 \mu m} (1.15 - 0.3)} = 3294 \mu m \Rightarrow \boxed{W_5 = 3295 \mu m}$

e) $\frac{v_{out}}{v_{ref}} = \frac{g_m R_{out} A_0}{1 + g_m R_{out} A_0 \beta}$; $\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$; $\frac{v_{ovt}}{v_{ref}} = \frac{2.0V}{1.2V} = 1.67 \frac{V}{V} \Rightarrow \frac{1}{\beta} = 1.67 \frac{V}{V}$

Si $g_m R_{out} A_0 \beta \gg 1 \Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{ref}} \approx \frac{1}{\beta}$

Si $R_{out} \approx R_L \Rightarrow g_m R_{out} A_0 \beta \approx \sqrt{\frac{2 \mu_p C_{ox} W_5}{L}} \cdot \frac{v_{ovt}}{I_L} \cdot A_0 \cdot \beta = \sqrt{\frac{2 \mu_p C_{ox} W_5}{L} \cdot \frac{v_{ovt} A_0 \beta}{I_L}}$

$= \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 3295 \cdot 10^{-6}}{350 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}} \cdot \frac{0.95 \cdot 2 \cdot 400}{1.67} = 1802 \gg 1$ se verifica hipotesis.

$$\Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{ref}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1,67 \Rightarrow \boxed{R_1 = 0,67R_2} \quad (5)$$

$$I_{enr} + I_B \ll I_L \Rightarrow \frac{v_{out}}{R_1 + R_2} + I_B \ll I_L^{min} \Rightarrow \frac{v_{out}}{R_1 + R_2} + 5mA \ll 60mA \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out}}{R_1 + R_2} = 1mA \text{ para que } R_1 \text{ y } R_2 \text{ sean los m\u00ednimos}$$

$$\Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{2,0V}{1mA} = 2k\Omega \Rightarrow \boxed{R_1 + R_2 = 2k\Omega} \quad (6)$$

De (5) y (6): $R_1 = 804\Omega$ y $R_2 = 1,2k\Omega$

$r_{out} = r_{op} \parallel R_L \parallel (R_1 + R_2) \approx R_L$ pues $r_{op} = 500k\Omega$ y $R_1 + R_2 = 2k\Omega$, con $R_L^{min} = 16,7k\Omega$

f) $v_{S1} > v_{min IB} + v_{SS}$ (*) para que la fuente I_B funcione correctamente

$$I_{D1} = \frac{I_B}{2}; \quad I_{D1} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \cdot \frac{W_{12}}{L} (v_{GS1} - v_{thn})^2 \Rightarrow v_{GS1} = \sqrt{\frac{I_B L}{\mu_n C_{ox} W_{12}}} + v_{thn} \Rightarrow$$

$$v_{GS1} = v_{G1} - v_{S1} \Rightarrow v_{S1} = v_{G1} - v_{GS1} = v_{CM} - v_{GS1} \Rightarrow v_{S1} = v_{CM} - v_{GS1}$$

$$\Rightarrow v_{S1} = v_{CM} - \left[\sqrt{\frac{I_B L}{\mu_n C_{ox} W_{12}}} + v_{thn} \right] \Rightarrow v_{CM} > v_{min IB} + v_{SS} + \sqrt{\frac{I_B L}{\mu_n C_{ox} W_{12}}} + v_{thn} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{CM} > 0,6V - 3,8V + \sqrt{\frac{5mA \cdot 350 \cdot 10^{-9}}{300\mu A/V^2 \cdot 597 \cdot 10^{-9}}} + 0,3V = 0,23V \Rightarrow \boxed{v_{CM} > 0,23V}$$

Saturaci\u00f3n M1: $v_{G3} - v_{S1} > v_{G1} - v_{S1} - v_{thn} \Rightarrow v_{CM} < v_{G3} + v_{thn} = 2,1V + 0,3V \Rightarrow$

$$\Rightarrow v_{CM} < 2,4V \Rightarrow \boxed{0,23V < v_{CM} < 2,4V} \leftarrow \text{ICMR}$$

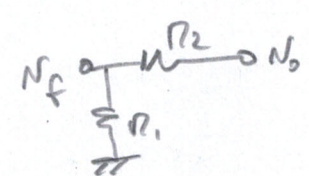
$v_{REF} = 1,2V$ est\u00e1 en el ICMR.

Problema

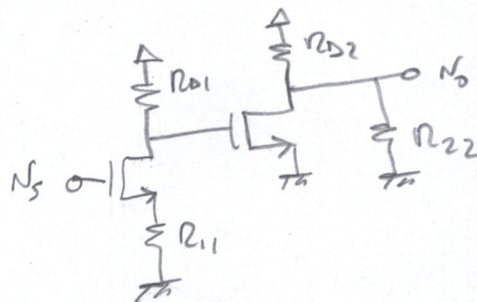
(a) $G_{cl} = \frac{A}{1+A\beta}$

$\rightarrow \frac{\Delta G_{cl}}{\Delta A} = \frac{(\Delta + A\beta) - A\beta}{(\Delta + A\beta)^2} = \frac{1}{(\Delta + A\beta)^2}$

$\Rightarrow \frac{\Delta G_{cl}}{G_{cl}} = \frac{\Delta A}{(\Delta + A\beta)^2} \cdot \frac{(\Delta + A\beta)}{A} \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta G_{cl}}{G_{cl}} = \frac{1}{1+A\beta} \cdot \frac{\Delta A}{A}}$

(b) Feedback:  $\rightarrow \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,14 \text{ V/V}$
 $\rightarrow R_{11} = R_1 \parallel R_2 = 0,9 \text{ k}\Omega$
 $\rightarrow R_{22} = R_1 + R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

Blockeo Δ



$A = \frac{g_{m3} R_{01}}{1 + g_{m1} R_{11}} \cdot g_{m2} (R_{02} \parallel R_{22}) = 400 \text{ V/V}$

$\Rightarrow A\beta = 40 \text{ V/V} \gg 1 \Rightarrow \boxed{G_{cl} \approx \frac{1}{\beta} = 10 \text{ V/V}}$

$\frac{\Delta A}{\Delta R_{01}} = \frac{A}{R_{01}} \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta R_{01}}{R_{01}} \Rightarrow \frac{\Delta G_{cl}}{G_{cl}} = \frac{1}{1+A\beta} \cdot \frac{\Delta R_{01}}{R_{01}}$

$\Rightarrow \boxed{\frac{\Delta G_{cl}}{G_{cl}} = \frac{50\%}{41} = 1,22\%}$