

EXAMEN DE ELECTRÓNICA FUNDAMENTAL
18/12/2021

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 es un cargador de baterías, donde la corriente de carga, I_{bat} , se controla con la tensión en V_{in} . Para las partes a), b), y c) puede asumir que los transistores se encuentran en zona de saturación.

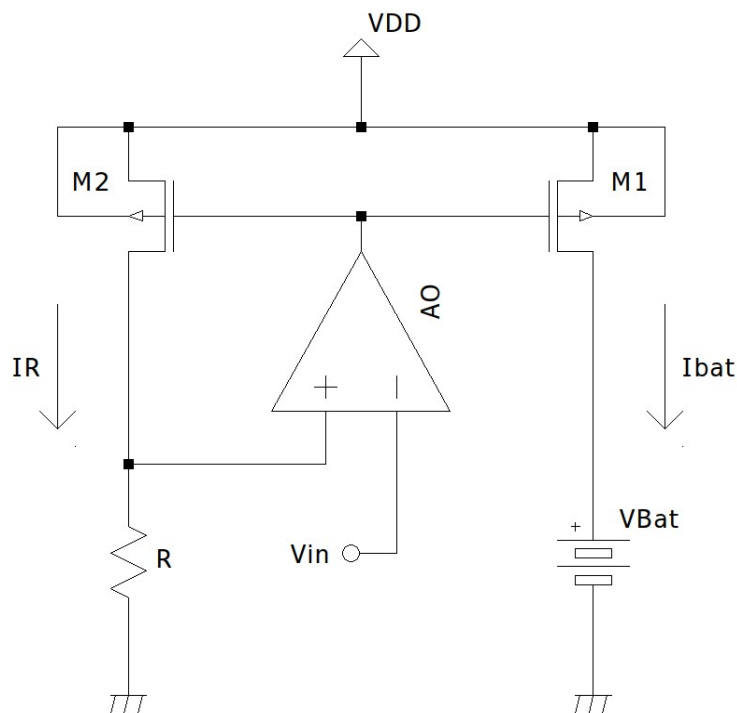
- Calcular I_{bat} en función de I_R
- Calcular I_{bat} en función de V_{in}
- Calcular cuánto puede variar I_{bat} , en un peor caso, debido a las no idealidades dc del amplificador operacional (tensión de offset y corrientes de polarización).
- ¿Qué rango de corrientes I_{bat} es capaz de entregar este circuito manteniendo los transistores en zona de saturación y respetando los rangos de entrada y salida del amplificador operacional?
¿En qué rango tiene que variar V_{in} para que I_{bat} varíe en el rango hallado?

Datos: $R=180\text{ k}\Omega$, $V_{bat}=3.7\text{ V}$, $V_{DD}=5\text{ V}$

$W_1=100\text{ }\mu\text{m}$, $W_2=1\text{ }\mu\text{m}$, $L_1=1\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=10\text{ }\mu\text{m}$, donde W_1 , L_1 , W_2 y L_2 son los anchos y largos de los transistores M1 y M2 respectivamente.

Para ambos transistores: $|V_{t0}|=1\text{ V}$, $\mu C_{ox}=100\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $V_A=\text{infinito}$, $\delta=0$.

AO: $V_{off}=5\text{ mV}$, $I_{Bias}=100\text{ nA}$ (entrante), $I_{off}=20\text{ nA}$, Output voltage swing = $[0.1, 4.8]\text{ V}$, Common-mode voltage range = $[0.2, 5.1]\text{ V}$



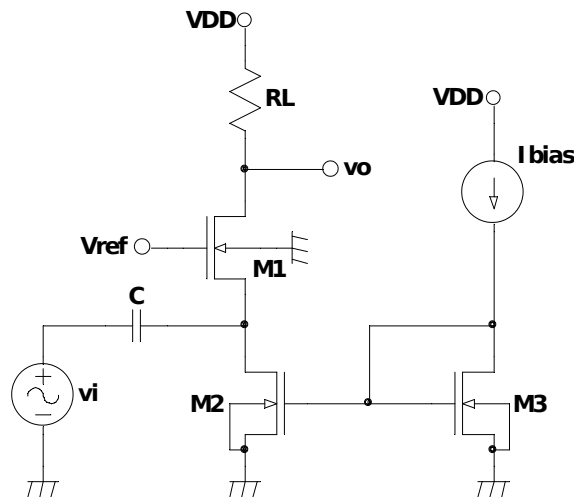
Sugerencia: Notar que el amplificador AO está realimentado negativamente.

PROBLEMA 2 (40 puntos)

El circuito de la Figura es una etapa de amplificación en gate común.

- a) Determine qué debe cumplir V_{ref} para que en el punto de polarización todos los transistores estén en saturación. En lo que sigue se supondrá que V_{ref} cumple esta condición.
- b) Determine la ganancia v_o/v_i en banda pasante.
- c) Determine la resistencia de entrada en banda pasante.
- d) Determinar C para que la frecuencia de corte inferior sea 100 Hz. Si el condensador a utilizar es polarizado, considerando que la fuente de señal v_i tiene nivel dc igual a 0, indicar de qué lado se debe colocar el terminal + del condensador (en la salida de la fuente v_i o en el drain de $M2$). Fundamente su respuesta.

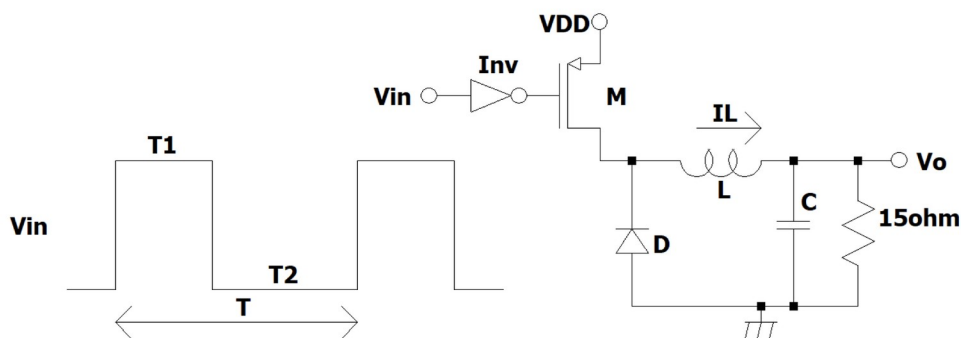
Datos: $V_{DD} = 9\text{ V}$, $R_L = 3.3\text{ k}\Omega$, $I_{BIAS} = 1\text{ mA}$.
 $M1$: $\beta = 2.6\text{ mA/V}^2$, $\delta = 0.3$, $V_{t0} = 1\text{ V}$, $V_A = \text{infinito}$.
 $M2, M3$: $\beta = 2.6\text{ mA/V}^2$, $\delta = 0.3$, $V_{t0} = 1\text{ V}$, $V_A = 30\text{ V}$.



PREGUNTA (20 puntos)

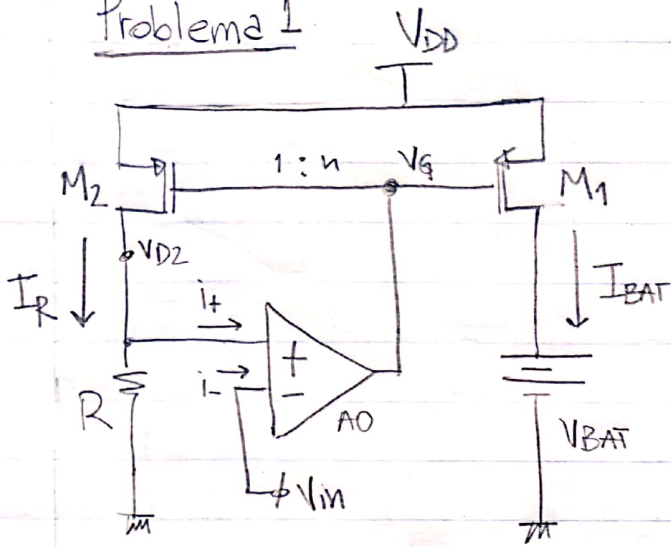
El circuito de la Figura es un tipo sencillo de convertidor DC-DC del tipo Step-Down. Con éste se obtiene una tensión DC regulada a la salida de valor inferior a la de entrada. Justificando, calcule el ciclo de trabajo $D=T1/T$ para que la salida tenga un valor de $V_{DD}/4$. Se supone que la inductancia es ideal y que el transistor funciona como llave.

Datos: M : $R_{DS(on)}=0\ \Omega$, $R_{DS(off)}=\text{inf}$.
 D : $V_\gamma=0.7\text{ V}$, $T=4\ \mu\text{s}$, $C=\text{inf}$, $V_{DD}=12\text{ V}$



Sugerencia: Asuma que la bobina siempre tiene una corriente positiva entre sus bornes.

Problema 1



(a) M1 y M2 espejo de corriente
factor de copia $n = \frac{W_1/L_1}{W_2/L_2} = 1000$

$$\Rightarrow I_{BAT} = n I_R$$

(b) AO Realimentado negativamente

$$\Rightarrow V_+ = V_- \Rightarrow I_R = V_{in}/R$$

$$\Rightarrow I_{BAT} = n V_{in}/R$$

(c) Variaciones en I_{BAT}
debido a imperfecciones DC

$$\left(n/R = 556 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \right)$$

(i) V_{offset} : $\Delta I_R = \pm \frac{V_{offset}}{R} \Rightarrow \Delta I_{BAT} = \pm n V_{offset}/R$

(ii) i_+ : $\Delta I_R = i_+ \Rightarrow \Delta I_{BAT} = n \left(I_{BIAS} + \frac{I_{off}}{2} \right)$

(iii) i_- : $\Delta I_R = 0$

Peor caso (wc) $\rightarrow \Delta I_{BAT} = n V_{off}/R + n \left(I_{BIAS} + \frac{I_{off}}{2} \right)$

$$\Delta I_{BAT} = +138 \mu\text{A}$$

(d) (i) corriente mínima
en I_{BAT} : $I_{BAT_{min}}$

$$I_{BAT_{min}} = \max \{ I_{BAT_{min}_i} \}$$

- M1, M2 NO CORTE: $I_{BAT_{min}_1} > 0$

- AO OSW: $V_{BG} < |V_{to}| \Rightarrow I_{BAT_{min}_2} = 0$

- AO ICMR: $I_{BAT} = \frac{n I_{CMR_{min}}}{R} \Rightarrow$

$$I_{BAT_{min}_3} = 1,1 \text{ mA}$$

↓
más restrictiva.

d) (ii) Corriente máxima en I_{BAT} : I_{BATmax} .

- M_1 SATURADO $\rightarrow V_p < V_{BD}$ $V_p = \sqrt{\frac{2I_D}{(1+\beta)}} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}}$ ($\beta=0$)

$V_p = \sqrt{2I_{BAT}/\beta_1} < V_{DD} - V_{BAT} = V_{BD}$ $\rightarrow I_{BATmax_1} = \beta_1 \frac{(V_{DD} - V_{BAT})^2}{2}$

$I_{BATmax_1} = 8,45 \text{ MA}$ @ $V_{Gmin_1} = 2,7 \text{ V}$

- M_2 SATURADO $\rightarrow V_p = \sqrt{2I_R/\beta_2} < V_{DD} - R I_R = V_{BD}$

$\rightarrow I_{Rmax} / R^2 I_{Rmax}^2 - 2(V_{DD} R + 1/\beta_2) I_{Rmax} + V_{DD} = 0$

$I_{Rmax} = \begin{cases} I_{Rmax} = 17,4 \mu\text{A} \text{ (@ } V_{D_2} = 3,13 \text{ V OK!) } \checkmark \\ I_{Rmax}^+ = 44,3 \mu\text{A} \text{ (@ } V_{D_2} = 7,9 \text{ V X NO SAT.) } \times \end{cases}$

$I_{Rmax} = 17,4 \mu\text{A} \rightarrow I_{BATmax_2} = 17,4 \mu\text{A}$ (@ $V_{Dmax} = 3,13 \text{ V}$)

- AO SW $V_G = OSWmin = 0,1 \text{ V} < V_{Gmin_1} \rightarrow M_1$ NO SATURADO

- AO ICMR $V_{in} = ICMRmax = 4,8 \text{ V} = V_{D2} > V_{D2max} \Rightarrow M_2$ NO SATURADO

$I_{BATmax} = \min \{ I_{BATmax_i} \} = 8,45 \text{ MA}$

$V_{in} = \{ 200 \text{ mV}, 1,52 \text{ V} \} \leftarrow I_{BAT} = \{ 1,11 \text{ MA}, 8,45 \text{ MA} \}$

Examen de Electrónica Fundamental

a) No entra corriente por los gates de M_2 y $M_3 \Rightarrow I_{D3} = I_{BIAS} = 1 \text{ mA}$
 Si M_2 está saturado, entonces:

$$I_{D2} = \frac{\beta}{2(1+\delta)} (V_{G2} - V_{to})^2 = \frac{\beta}{2(1+\delta)} (V_{G3} - V_{to})^2 = I_{D3} = I_{BIAS} = 1 \text{ mA}$$

$V_{G2} = V_{G3}$

En DC no circula corriente por el capacitor C, entonces:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{BIAS} = 1 \text{ mA}$$

$$I_{D3} = I_{BIAS} = \frac{\beta}{2(1+\delta)} (V_{G3} - V_{to})^2 \Rightarrow V_{G3} = V_{to} \oplus \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}} = 2 \text{ V}$$

no corte de M_3

$$I_{D1} = I_{BIAS} = \frac{\beta}{2(1+\delta)} (V_{ref} - V_{to} - (1+\delta)V_{S1})^2$$

$$\Rightarrow V_{S1} = \frac{V_{ref} - V_{to} \ominus \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}}}{1+\delta}$$

no corte de M_1

* No corte de M_3 : trivial ya que $I_{D3} = I_{BIAS} > 0$

$$V_{S3} < V_{P3} \Rightarrow 0 < \frac{V_{G3} - V_{to}}{1+\delta} \Rightarrow V_{G3} > V_{to} \Rightarrow 2 \text{ V} > 1 \text{ V} \checkmark$$

* No zona lineal de M_3 : trivial ya que G_3 y D_3 están conectados

$$V_{D3} > V_{P3} \Rightarrow V_{G3} > \frac{V_{G3} - V_{to}}{1+\delta} \Rightarrow \delta V_{G3} + V_{to} > 0 \Rightarrow 1,6 \text{ V} > 0 \text{ V} \checkmark$$

* No corte de M_2 : trivial (misma condición que no corte de M_3)

$$V_{S2} < V_{P2} \Rightarrow 0 < \frac{V_{G3} - V_{to}}{1+\delta} \Rightarrow V_{G3} > V_{to} \Rightarrow 2 \text{ V} > 1 \text{ V} \checkmark$$

* No zona lineal de M_2 :

$$V_{D2} > V_{P2} \Rightarrow V_{S1} > \frac{V_{G3} - V_{to}}{1+\delta} \Rightarrow \frac{V_{ref} - V_{to} - \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}}}{1+\delta} > \frac{V_{G3} - V_{to}}{1+\delta}$$

$$V_{ref} > V_{to} + 2 \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}} = 3 \text{ V}$$

* No corte de M_1 :

$$V_{S1} < V_{P1} \Rightarrow \frac{V_{ref} - V_{to} - \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}}}{1+\delta} < \frac{V_{ref} - V_{to}}{1+\delta} \Rightarrow \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}} > 0 \checkmark$$

* No zona lineal de M_1 :

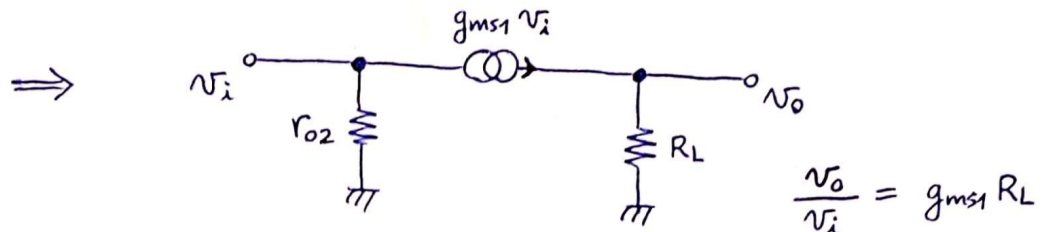
$$V_{D1} > V_{P1} \Rightarrow V_{DD} - R_L I_{BIAS} > \frac{V_{ref} - V_{to}}{1+\delta}$$

$$\Rightarrow V_{ref} < (1+\delta)(V_{DD} - R_L I_{BIAS}) + V_{to} = 8,41 \text{ V}$$

$$\Rightarrow 3 \text{ V} < V_{ref} < 8,41 \text{ V}$$

Examen de Electrónica Fundamental

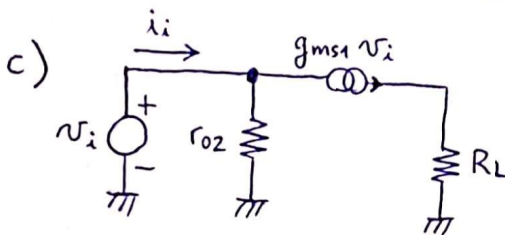
- b) En banda pasante, el C es un cortocircuito.
En señal $v_{g3} = 0$



$$\frac{v_o}{v_i} = g_{ms1} R_L$$

$$g_{ms1} = (1+\delta) g_{m1} = (1+\delta) \sqrt{\frac{2\beta I_{BIAS}}{1+\delta}} = \sqrt{2\beta I_D (1+\delta)} = 2,6 \text{ mS}$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_i} = g_{ms1} R_L = (2,6 \text{ mS})(3,3 \text{ k}\Omega) = 8,58 \text{ V/V}}$$



$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{\frac{v_i}{r_{o2}} + g_{ms1} v_i} = r_{o2} \parallel \left(\frac{1}{g_{ms1}} \right)$$

$$\begin{cases} r_{o2} = \frac{V_A}{I_{BIAS}} = 30 \text{ k}\Omega \\ \frac{1}{g_{ms1}} = \frac{1}{2,6 \text{ mS}} = 385 \Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{g_{ms1}} \ll r_{o2}$$

$$\Rightarrow \boxed{R_{in} \approx \frac{1}{g_{ms1}} = 385 \Omega}$$

d)

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_{in} C} \Rightarrow \boxed{C = \frac{1}{2\pi R_{in} f_{-3dB}} = 4,14 \mu\text{F}}$$

$$V_{D2} = V_{S1} = \frac{V_{ref} - V_{t0} - \sqrt{\frac{2(1+\delta)I_{BIAS}}{\beta}}}{1+\delta}$$

$$V_{ref} \in (3\text{V}; 8,41\text{V}) \Rightarrow \boxed{V_{D2} \in (0,769\text{V}; 4,93\text{V})}$$

Como $V_{D2} > 0\text{V}$, el terminal + del condensador se debe colocar en el drain de M_2 .