

**Examen de Electrónica Avanzada 2**  
**23/02/2023**

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas.

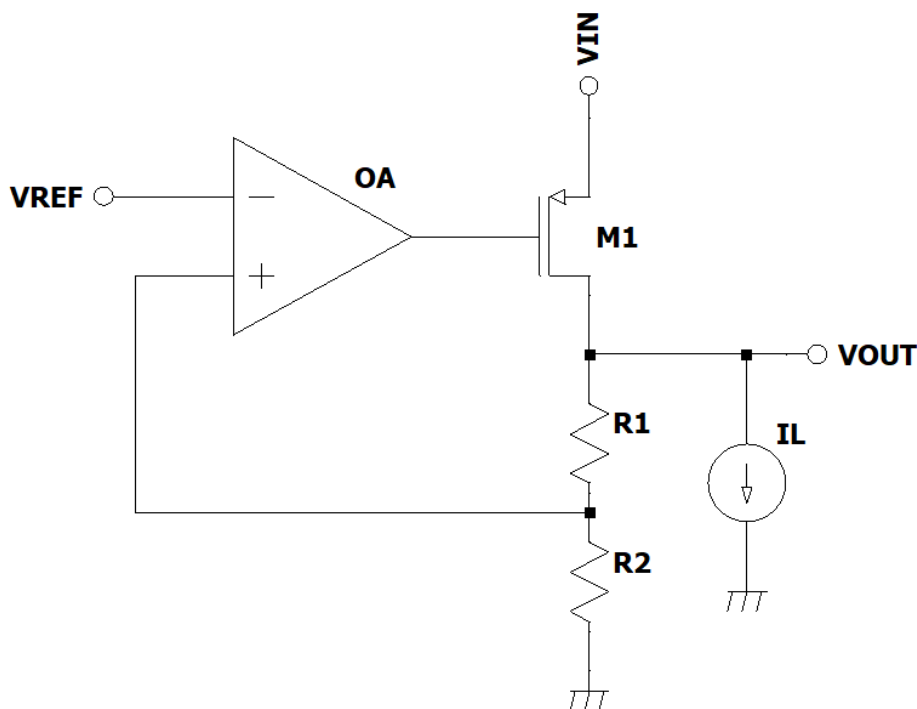
La prueba es **sin** material.

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

**Problema 1: (37 puntos)**

Se considera el regulador lineal con transistor de paso pMOS de la figura, donde  $V_{ref}=1.2V$ ,  $V_{out}=1.8V$  y la máxima corriente que se debe entregar a la carga es  $I_{L\text{ máx}}=80\text{ mA}$ .

- Dimensionar el ancho  $W$  del transistor de paso para tener una mínima tensión de *dropout* de  $0.15\text{ V}$ . El transistor es tal que  $L=1\mu\text{m}$ ,  $V_{t0}=0.8\text{ V}$  y  $\mu C_{ox}=160\mu\text{A/V}^2$ .
- Calcular  $R1$  y  $R2$  para obtener el  $V_{out}$  deseado. Considere que la corriente por  $R1$  es 100 veces menor a  $I_{L\text{ máx}}$  y la ganancia del amplificador  $A_0$  es arbitrariamente grande.
- Obtener la expresión analítica de la ganancia de lazo cerrado  $G_{CL}=V_{out}/V_{ref}$  y verificar que para los valores de  $R1$  y  $R2$  calculados en b), si  $I_L=0\text{ mA}$  y  $A_0=100\text{ V/V}$  la aproximación utilizada en la parte b) sigue siendo válida.
- Obtener la expresión analítica de la regulación de carga  $\frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L}$  y calcule su valor cuando  $I_L=30\text{mA}$ . Estime el error en  $V_{out}$  cuando ocurre un escalón de carga  $\Delta I_L=50\text{mA}$ .
- Si la constante de tiempo del lazo es  $\Delta t_R=50\text{ ns}$  y a la salida se tiene un condensador  $C_o=47\text{ nF}$ , ¿cuánto disminuye la tensión  $V_{out}$  durante el transitorio del escalón de carga de la parte d)?



**Problema 2: (37 puntos)**

Se considera el amplificador de la Figura 1.

- a) Calcular
  - i. la ganancia  $v_o/(v_2-v_1)$  en bajas frecuencias,
  - ii. el producto de ganancia por ancho de banda,
  - iii. la frecuencia del polo no dominante considerando que su posición relativa al producto ganancia por ancho de banda se puede aproximar como:
 
$$NDP = \frac{gm_6}{gm_1} \cdot \frac{C_C^2}{C_1 C_2 + C_C(C_1 + C_2)}$$
- b) Hallar el margen de fase despreciando la influencia del cero en el RHP debido al condensador  $C_c$ .

Se considera el amplificador de la Figura 2, donde U1 es el amplificador de la Figura 1. Asuma que  $R_1$  y  $R_2$  son tales que  $R_1 + R_2 \ll R_{out}$  de U1.

- c) Encontrar qué condición se debe cumplir, en función de los parámetros de los circuitos de las Figuras 1 y 2, para que la ganancia del circuito de la Figura 2 se pueda aproximar por  $1 + R_2/R_1$ .
- d) Utilizando la condición hallada en c), determine el ancho de banda del circuito de la Figura 2.

Datos:

- $V_{DD} = -V_{SS} = 5V$
- $I_{BIAS} = 12.6\mu A$
- $V_{tn} = |V_{tp}| = 0.8V$ ,  $n_n = n_p = 1.4$
- $\mu_n C_{ox} = 125\mu A/V^2$ ,  $\mu_p C_{ox} = 60\mu A/V^2$
- $V'_{An} = 12.5V/\mu m$ ,  $V'_{Ap} = 25V/\mu m$
- $L = 1\mu m$  para todos los transistores
- $W_1 = W_2 = 7.33\mu m$ ,  $W_3 = W_4 = 1.8\mu m$ ,  $W_5 = W_8 = 7.48\mu m$ ,  $W_6 = 18\mu m$ ,  $W_7 = 37.4\mu m$
- $C_C = 1pF$ ,  $C_1 = 0.4pF$ ,  $C_2 = 3pF$ .  $C_1$  y  $C_2$  incluyen las capacidades parásitas en los nodos respectivos.

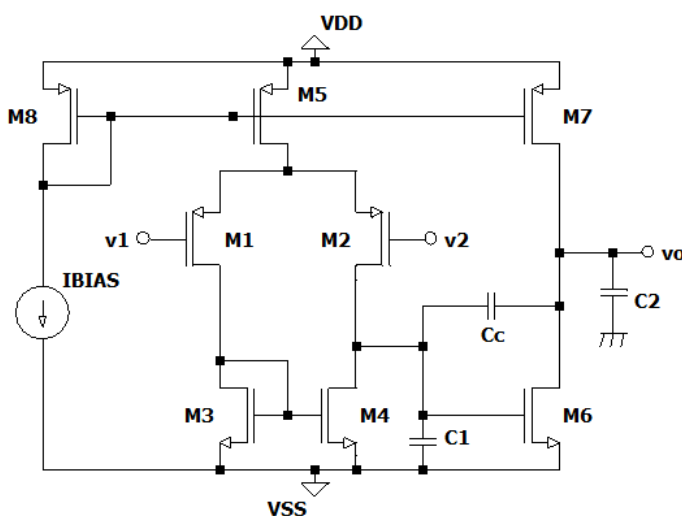


Figura 1

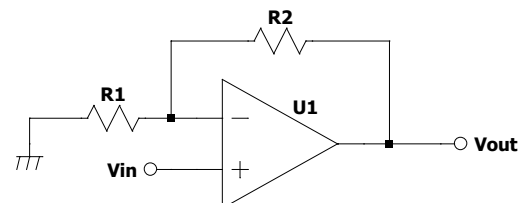


Figura 2

**Pregunta: (26 puntos)**

Para el oscilador clase C de la Figura 1:

- a) Definir la transconductancia  $G_m$  que se utiliza para modelar el transistor y analizar el oscilador.
- b) Obtener la condición y la frecuencia de oscilación considerando que los condensadores indicados como C son condensadores de desacople y que la impedancia de  $C_2$  a la frecuencia de oscilación es mucho menor que la resistencia vista en paralelo con  $C_2$  hacia el emisor de  $Q_1$  y  $R_E$ .
- c) Explicar como funciona el control de amplitud considerando que  $G_m/g_{mQ}$  está relacionado con  $x = E_x/V_T$  como se muestra en la Figura 2.

Basándose en la Figura 2, ¿qué ocurre con la amplitud de salida si aumenta la corriente de polarización? Justifique claramente.

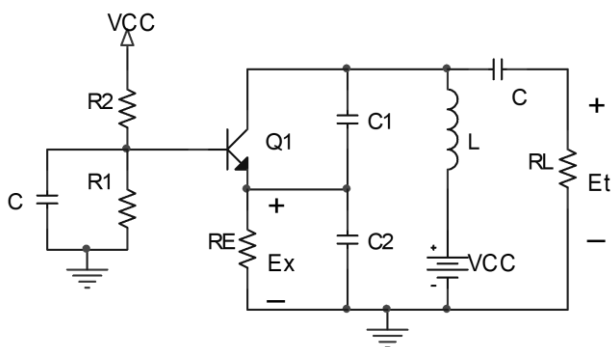


Figura 1

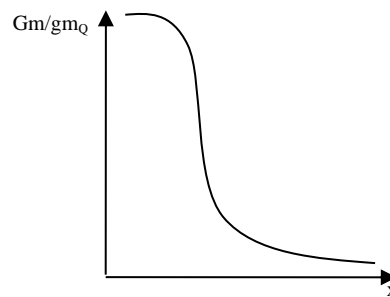


Figura 2

Problema

a)  $\frac{W}{L} \gg \frac{I_L^{max}}{\mu C_{ox} (V_{in\ min} - |V_{to}|) \cdot V_{D0}}$

$I_L^{max} = 80\ \mu A$ ;  $\mu C_{ox} = 160\ \mu A/V^2$ ;  $|V_{to}| = 0,8V$ ;  $V_{D0} = 0,15V$

$V_{in\ min} = 0,95V_{out} + V_{D0} = 0,95 \times 1,8V + 0,15V = 1,86V$

$\frac{W}{L} \gg \frac{80\ \mu A}{160\ \frac{\mu A}{V^2} \cdot (1,86V - 0,8V) \cdot 0,15V} = 3145$  }  $\Rightarrow W = 3145\ \mu m$   
 $L = 1\ \mu m$

b)  $\frac{V_{out}}{V_{ref}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$  }  $\Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 0,5$  (\*)  
 $V_{ref} = 1,2V$ ;  $V_{out} = 1,8V$

$I_{R_1} = \frac{I_L^{max}}{100} = 800\ \mu A$  }  $\Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{1,8V}{800\ \mu A} = 2,25\ k\Omega$  (\*)  
 Cuando  $I_L^{max}$ ,  $I_{R_1}(R_1 + R_2) = V_{out}$

$\Rightarrow R_2(1 + 0,5) = 2,25\ k\Omega \Rightarrow R_2 = 1,5\ k\Omega \Rightarrow R_1 = 2,25\ k\Omega - 1,5\ k\Omega \Rightarrow R_1 = 750\ \Omega$

c)  $\frac{V_{out}}{V_{outAO}} = -g_m R_{out}$ ;  $R_{out} = R_L \parallel (R_1 + R_2)$

$V_{outAO} = A_o (V_{fb} - V_{ref})$  con  $V_{fb} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{out} = \beta V_{out}$

$\Rightarrow V_{out} = -g_m R_{out} \cdot A_o \cdot (\beta V_{out} - V_{ref}) \Rightarrow G_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{g_m R_{out} \cdot A_o}{1 + g_m R_{out} A_o \beta}$

$G_{CL} = \frac{1}{\beta}$  si  $g_m R_{out} A_o \beta \gg 1$  (\*\*)

$R_{out} = R_L \parallel (R_1 + R_2) = R_1 + R_2 \Rightarrow R_{out} \cdot \beta = (R_1 + R_2) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = R_2 \Rightarrow$

$\Rightarrow$  la condición (\*\*) se simplifica a  $g_m A_o \cdot R_2 \gg 1$  }  $\Rightarrow$   
 $g_m = \sqrt{2\ \mu C_{ox} \frac{W}{L} \cdot I_D} = \sqrt{2 \times 160\ \frac{\mu A}{V^2} \times 3145 \times 800\ \mu A} = 28,4\ mS$

$I_D = I_L + I_{R_1} = 0\ \mu A + \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} = 800\ \mu A$

$\Rightarrow$  verificamos  $g_m A_o R_L \gg 1$  si  $28,4\ mS \times 100\ \frac{V}{V} \times 1,5\ k\Omega \gg 1$  si  $4260 \gg 1$  ✓

$$d) \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L} = \frac{1 + R_1/R_2}{g_m A_0} \quad (***)$$

$$I_D = I_L + I_{Q1} = 30 \text{ mA} + 800 \mu\text{A} = 30,8 \text{ mA} \Rightarrow g_m = \sqrt{2 \mu C_0 \times \frac{W}{L} \times I_D} =$$

$$= \sqrt{2 \times 160 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} \cdot 3145 \cdot 30,8 \text{ mA}} = 176 \text{ mS} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L} = \frac{1,5}{176 \text{ mS} \cdot 100 \text{ V/V}} = 85,2 \text{ m}\Omega \rightarrow \boxed{\frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L} = 85,2 \text{ m}\Omega}$$

$$\text{Si } \Delta I_L = 50 \text{ mA} \Rightarrow \Delta V_{out} = 85,2 \text{ m}\Omega \cdot 50 \text{ mA} = 4,26 \text{ mV} \rightarrow \boxed{\Delta V_{out} = 4,26 \text{ mV}}$$

$$e) \Delta t_r = 50 \text{ ns} ; C_0 = 4 \text{ nF}$$

$$\Delta I_L = C_0 \cdot \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t_r} \Rightarrow \Delta V_{out} = \frac{50 \text{ mA} \cdot 50 \text{ ns}}{4 \text{ nF}} = 53,2 \text{ mV} \rightarrow \boxed{\Delta V_{out} = 53,2 \text{ mV}}$$



2

(a) DC:  $I_{D8} = I_{D5} = I_{BIAS} = 12,6 \mu A$   
 $I_{D7} = 5 I_{BIAS} = I_{D6}$   
 $I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{I_{BIAS}}{2}$

Parámetros req. señal

$\beta_1 = \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_1 = 0,44 \text{ mA/V}^2$

$\beta_6 = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_6 = 2,25 \text{ mA/V}^2$

$g_{m1} = \sqrt{\frac{2 I_{D1} \beta_1}{n}} = 62,9 \mu A/V$

$g_{m6} = \sqrt{\frac{2 I_{D6} \beta_6}{n}} = 450 \mu A/V$

$r_{o7} = \frac{V_{Ap} \cdot L}{I_{D7}} = 397 \text{ k}\Omega$

$r_{o6} = \frac{V_{An} \cdot L}{I_{D6}} = 398 \text{ k}\Omega$

$r_{o2} = \frac{V_{Ap} \cdot L}{I_{D2}} = 3,97 \text{ M}\Omega$

$r_{o4} = \frac{V_{An} \cdot L}{I_{D4}} = 1,98 \text{ M}\Omega$

AC

(i)  $\frac{N_0}{N_2 - N_1} = g_{m1} \cdot R_{o1} \cdot g_{m6} \cdot R_{o2}$

$R_{o1} = r_{o2} \parallel r_{o4} = 1,32 \text{ M}\Omega$

$R_{o2} = r_{o6} \parallel r_{o7} = 1,32 \text{ k}\Omega$

$\Rightarrow \frac{N_0}{N_2 - N_1} = |A_0| = 4952 \text{ V/V} = 73,9 \text{ dB}$

(ii)  $GBW = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m1}}{C_c} \Rightarrow GBW = 10 \text{ MHz}$

(iii)  $NDP = \frac{g_{m6}}{g_{m1}} \cdot \frac{C_c^2}{C_1 C_2 + C_c(C_1 + C_2)} = \frac{f_{NDP}}{GBW} = 1,56$

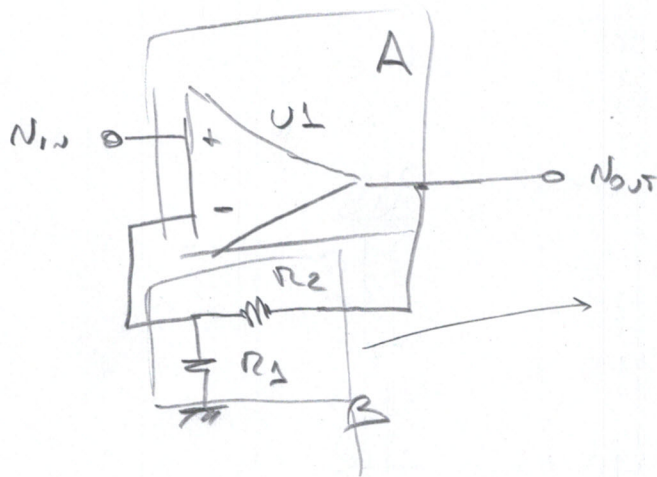
$\Rightarrow f_{NDP} = 15,6 \text{ MHz}$

(b)  $\phi M = 180 - \phi(\omega = \omega_T)$  ← fase de la transferencia de amp. evaluada a  $\omega_T$

ASUMO que tengo  $\phi M$  suficiente para  $\omega_T \approx GBW$  ok ✓

$\Rightarrow \phi M = 180 - \underbrace{\Delta \tan^{-1}\left(\frac{GBW}{\omega_{D1}}\right)}_{\approx 90^\circ} - \underbrace{\Delta \tan^{-1}\left(\frac{GBW}{\omega_{NDP}}\right)}_{32,7^\circ} \Rightarrow \phi M = 57,3^\circ$  ✓

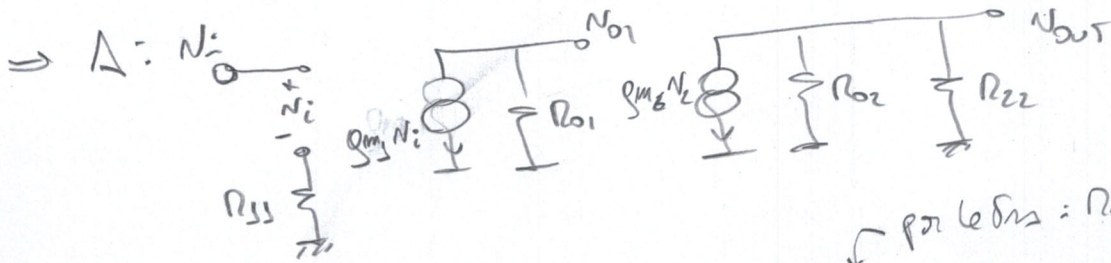
2 (c)



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$R_{11} = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{22} = R_1 + R_2$$



par le cas :  $R_{02} \gg R_1 + R_2$

$$A = g_{m3} R_{01} \cdot g_{m6} R_{02} \parallel (R_1 + R_2) \approx g_{m3} R_{01} g_{m6} (R_1 + R_2)$$

$$\frac{N_{out}}{N_i} = \frac{A}{1 + A\beta} \approx \frac{1}{\beta} \iff A\beta \gg 1$$

$$\iff g_{m3} R_{01} g_{m6} (R_1 + R_2) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \gg 1$$

$$\iff g_{m3} R_{01} g_{m6} R_1 \gg 1$$

$$\iff \boxed{R_1 \gg 26,8 \Omega} \checkmark$$

(d) como  $G_1 \approx \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

$$\Rightarrow \boxed{BW = \frac{GBW}{G} = \frac{f_T}{1 + R_2/R_1}}$$