



## Guía de Ejercicios N<sup>o</sup> 8: circuitos analógicos

### Parte I: Amplificadores con TBJ

- Se tiene el amplificador emisor común de la Fig. 1. Los datos del circuito son:  $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $R_B = 172\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 500\ \Omega$ ,  $v_s = 12\text{ mV} \cdot \sin(2\pi \cdot f_s)$ ,  $f_s = 1\text{ kHz}$ ,  $R_s = 500\ \Omega$ ,  $R_L = 950\text{ k}\Omega$  y  $C_{in} = C_{out} = 50\ \mu\text{F}$ . Los parámetros del transistor son:  $\beta = 200$  y  $V_A = 130\text{ V}$ .
  - Calcular el punto de polarización del circuito ¿Cual es el propósito de  $C_{in}$  y  $C_{out}$ ?
  - Hallar los parámetros de pequeña señal y dibujar el circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias medias. ¿A qué nos referimos con frecuencias medias?
  - Calcular los parámetros del amplificador  $A_{v0}$ ,  $A_v$ ,  $A_{vs}$ ,  $R_{IN}$  y  $R_{OUT}$ .
  - En un mismo gráfico dibujar  $v_s$ ,  $v_{in}$  y  $v_{out}$ . ¿Distorsiona este amplificador?

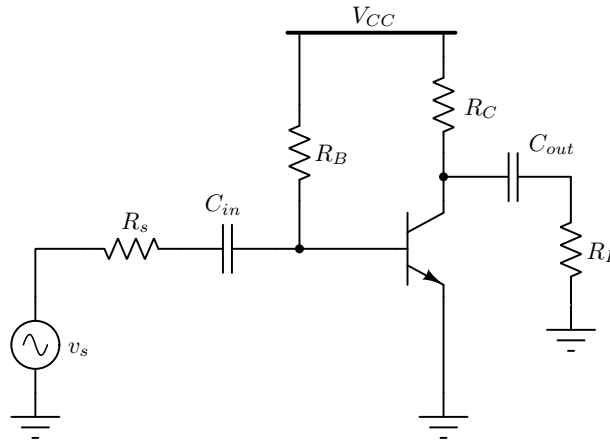


Figura 1

- En el circuito de la Fig. 2,
  - Calcule  $I_C$  y  $V_{BB}$  en términos de  $R_C$  y  $V_{CC}$ , tal que se verifique  $V_{CEQ} = V_{CC}/2$ .
  - Calcule  $g_m$  y  $r_\pi$  en términos de  $R_C$  y  $V_{CC}$ .
  - Demuestre que la única forma de aumentar  $A_v$  es aumentando  $V_{CC}$ . Para ello verifique que es cierta la relación  $A_v = \frac{q V_{CC}}{2 k T}$ .

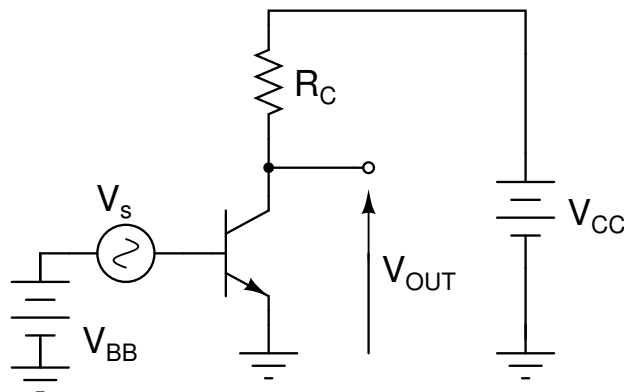


Figura 2



3. Dado el circuito de la Fig. 3, se quiere implementar un amplificador emisor común que permita obtener una señal de  $\hat{v} = 0,75 \text{ V}$  a la salida. Considerando que la señal de entrada está caracterizada por  $\hat{v}_s = 30 \text{ mV}$ ,  $R_s = 1 \text{ k}\Omega$ , que se desea el mínimo consumo posible, y teniendo en cuenta que  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ,  $\beta = 600$  y  $V_A = 75 \text{ V}$ , calcule  $I_C$ ,  $R_B$  y  $R_C$  que cumplan las especificaciones.

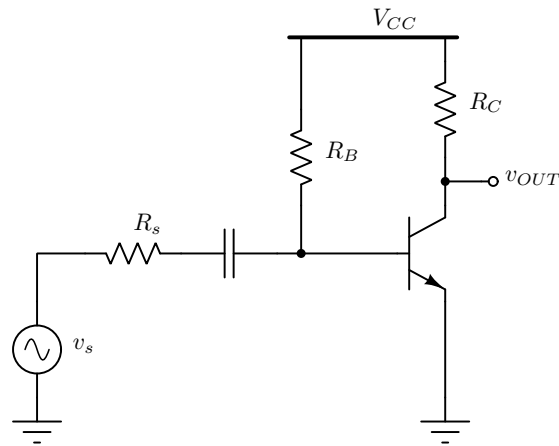


Figura 3

4. Se desea que el amplificador de la Fig. 4 cumpla con los siguientes requerimientos:  $A_{v0} = 100$  y  $P < 5 \text{ mW}$ , donde  $P$  es la potencia total consumida por el circuito. Las características del transistor son:  $V_{BE\text{ on}} = -0,7 \text{ V}$ ,  $\beta = 200$  y  $V_A \rightarrow \infty$ . La tensión de alimentación es  $V_{CC} = 5 \text{ V}$  y la resistencia  $R_s$  del generador vale  $50 \Omega$ .
- Elegir un valor de  $R_B$  y uno de  $R_C$  tal que se cumplan ambas condiciones.
  - Determinar el rango admisible de  $R_C$  para que se cumplan los requerimientos y el transistor se mantenga en MAD.
  - Calcular  $R_{in}$  y  $R_{out}$ .
  - Si ahora se conecta una carga  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$  **sin estar desacoplada por un capacitor**, calcular la ganancia en funcionamiento  $A_{vs}$ . ¿Se sigue cumpliendo con los requerimientos iniciales? ¿La ganancia en funcionamiento cumple con el mismo requerimiento que la ganancia intrínseca  $A_{v0}$ ?

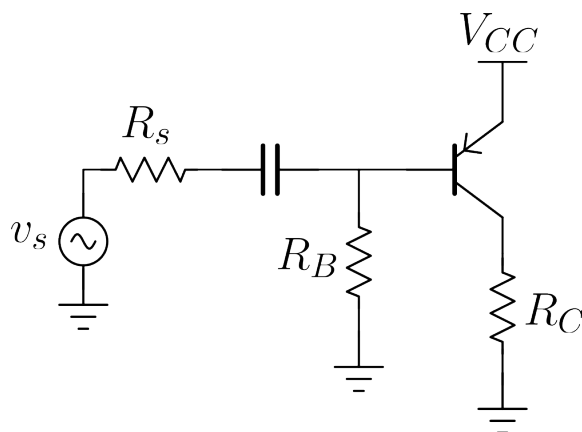


Figura 4

5. Se desea diseñar un amplificador emisor común tal que, para una señal de entrada de  $\hat{v} = 20 \text{ mV}$  y  $R_s = 500 \Omega$ , se obtenga una señal de salida de al menos  $\hat{v} = 1 \text{ V}$ . Como restricciones, se tienen que la



tensión de alimentación sea  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , y que la tensión de continua en el nodo de salida sea  $V_{CC}/2$ . La Fig. 3 muestra una implementación donde se buscó una ganancia de aproximadamente 100 veces respecto de la fuente de señal, donde  $R_C = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_B = 860\text{ k}\Omega$ , y para el transistor  $\beta = 500$  y  $V_A = 25\text{ V}$ . La Fig. 5 muestra la señal de salida del amplificador donde se observa que se produce distorsión.

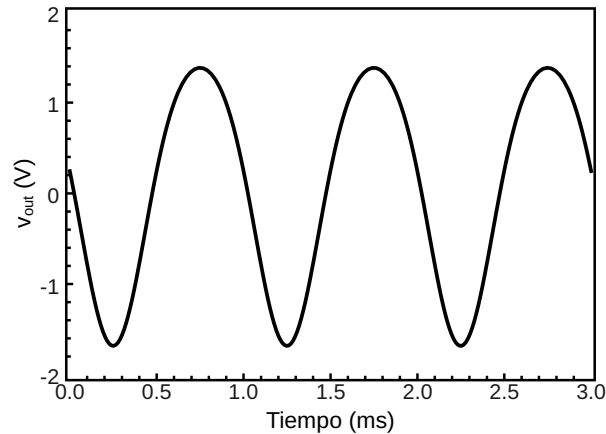


Figura 5

- a) Identifique qué tipo de distorsión se produce, justificando a partir de la forma de onda de la señal de salida de la figura 5.
  - b) Explique qué nuevos valores de  $R_B$  y  $R_C$  son necesarios para eliminar la distorsión, manteniendo los requerimientos de ganancia y polarización.
6. Se desea diseñar un amplificador emisor común sin carga, alimentado por una fuente de  $5\text{ V}$ , con ganancia  $A_{vo} = 150$  y  $R_{IN} = 1\text{ k}\Omega$ .
- a) Calcule  $I_{CQ}$  y  $R_C$  que cumplen con el diseño. Considere para el TBJ:  $V_{BE\text{ on}} = 0,7\text{ V}$ ,  $V_{CE\text{ sat}} = 0,2\text{ V}$ ,  $\beta = 100$  y  $V_A \rightarrow \infty$ .
  - b) Si se conecta a la entrada una señal con amplitud  $v_s$  y resistencia serie de  $R_s = 500\ \Omega$ . Si se aumenta la amplitud de la señal gradualmente, ¿cuál es el motivo por el cual distorsiona primero? Indicar la opción correcta fundamentado todas las opciones.
    - Por alinealidad.
    - Por saturación.
    - Por corte.
    - Simultáneamente por alinealidad y saturación.
    - Simultáneamente por alinealidad, saturación y corte.
    - Ninguna de las opciones anteriores es correcta.
  - c) Si se cambia el transistor por otro idéntico salvo que  $V_A = 26\text{ V}$ , ¿Cómo cambian los parámetros para los cuales fue diseñado? Indicar la opción correcta fundamentado todas las opciones.
    - $A_{vo}$  y  $R_{IN}$  aumentan.
    - $A_{vo}$  y  $R_{IN}$  disminuyen.
    - $A_{vo}$  y  $R_{IN}$  se mantienen constantes.
    - $A_{vo}$  disminuye y  $R_{IN}$  se mantiene constante.
    - $A_{vo}$  se mantiene constante y  $R_{IN}$  disminuye.
    - Ninguna de las respuestas anteriores es correcta.
7. Dado el amplificador TBJ de la Fig. 6, con  $V_{CC} = 2,5\text{ V}$ ,  $R_s = 100\ \Omega$ ,  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 100$  e  $I_s = 10\text{ fA}$  y sabiendo que puede considerarse  $r_o$  infinita para el TBJ,
- a) Calcule los valores de  $R_C$  y  $V_{BB}$  tal que se obtenga  $I_{CQ} = 500\ \mu\text{A}$  y  $V_{OUT} = 0\text{ V}$ .



- b) Dibuje la recta de carga estática.
- c) Calcule los parámetros  $R_{IN}$  (vista desde el generador) y  $R_{OUT}$  (desde la carga),  $A_v$  y  $A_{v0}$ .
- d) Repita los puntos anteriores para  $I_{CQ} = 50 \mu\text{A}$  y  $V_{OUT} = 0 \text{V}$ , y compare los resultados.

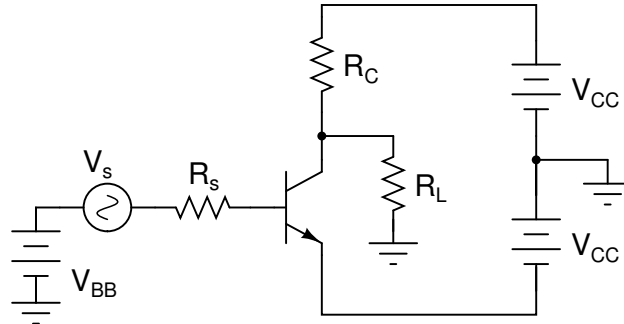


Figura 6

## Parte II: Amplificadores con MOSFET

8. Se tiene el amplificador source común implementando con un transistor NMOS de la Fig. 7. Los datos del circuito son:  $V_{DD} = 12 \text{V}$ ,  $R_{G1} = 251 \text{k}\Omega$ ,  $R_{G2} = 180 \text{k}\Omega$ ,  $R_D = 1,2 \text{k}\Omega$ ,  $R_L = 1,2 \text{M}\Omega$ ,  $v_s = 250 \text{mV} \cdot \sin(2\pi \cdot f_s)$ ,  $f_s = 1 \text{kHz}$ ,  $R_s = 10 \text{k}\Omega$  y  $C_{in} = C_{out} = 50 \mu\text{F}$ . Los parámetros del transistor son:  $k = \frac{\mu_n C'_{ox} W}{2L} = 405 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_T = 1,5 \text{V}$ ,  $\lambda = 0,01 \text{V}^{-1}$
- a) Calcular el punto de polarización del circuito.
  - b) Hallar los parámetros de pequeña señal y dibujar el circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias medias.
  - c) Calcular los parámetros del amplificador  $A_{v0}$ ,  $A_v$ ,  $A_{vs}$ ,  $R_{IN}$  y  $R_{OUT}$ .
  - d) En un mismo gráfico dibujar  $v_s$ ,  $v_{in}$  y  $v_{out}$ . ¿Distorsiona este amplificador?
  - e) ¿Por qué la ganancia de este source común es más baja que la del emisor común del ejercicio 1 a pesar de que ambos transistores están polarizados con corrientes similares?
  - f) ¿Por qué, en general, un source común admite valores de  $v_s$  más grandes que un emisor común? Comparar con el emisor común del ejercicio 1.

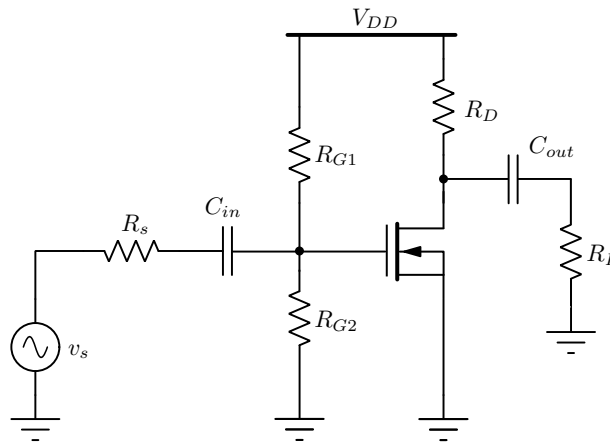


Figura 7



9. Dado el circuito amplificador de la Fig. 8, calcule  $A_v$ ,  $A_{vs}$ ,  $R_{IN}$  y  $R_{OUT}$ .  
 Datos:  $V_T = -1,5\text{ V}$ ,  $\mu_p C'_{ox} = 500\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $W = 100\ \mu\text{m}$ ,  $L = 1\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 0,05\ \text{V}^{-1}$ ,  $V_{DD} = 5\ \text{V}$ ,  $\hat{v}_s = 50\ \text{mV}$ ,  $R_s = 1\ \text{k}\Omega$ ,  $R_{G1} = R_{G2} = 10\ \text{k}\Omega$ ,  $R_D = 100\ \Omega$ .

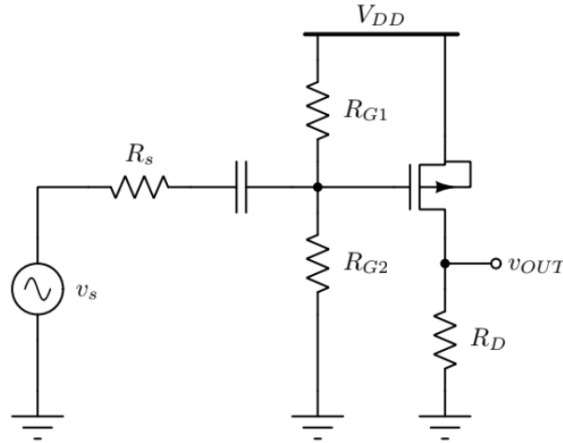


Figura 8

10. Se tiene un amplificador source común sin carga, alimentado por una fuente de  $3,3\ \text{V}$  con  $I_{DQ} = -500\ \mu\text{A}$  y  $R_D = 5\ \text{k}\Omega$ . Hallar la máxima señal a la salida ( $v_{out}$ ) sin distorsión siendo un MOSFET tipo P con:  $V_T = -0,8\ \text{V}$ ,  $\mu_p C'_{ox} = 120\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $W/L = 25$ ,  $\lambda = 0\ \text{V}^{-1}$ .
11. Dado el amplificador de la Fig. 9, con  $V_{DD} = 2,5\ \text{V}$ ,  $R_s = 100\ \Omega$ ,  $R_L = 10\ \text{M}\Omega$ ,  $V_T = 1\ \text{V}$ ,  $\mu_n C'_{ox} = 50\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\lambda = 0\ \text{V}^{-1}$ , y  $W/L = 10$ :
- Calcule los valores de  $R_D$  y  $V_G$  tal que  $V_{OUT} = 0\ \text{V}$  e  $I_D = 500\ \mu\text{A}$ .
  - Dibuje la recta de carga estática.
  - Calcule  $g_m$ ,  $R_{IN}$ ,  $R_{OUT}$ ,  $A_v$  y  $A_{vo}$  del modelo de pequeña señal.
  - Repita para  $I_D = 50\ \mu\text{A}$  y compare los valores de  $g_m$ ,  $R_{IN}$ ,  $R_{OUT}$ ,  $A_v$  y  $A_{vo}$ .

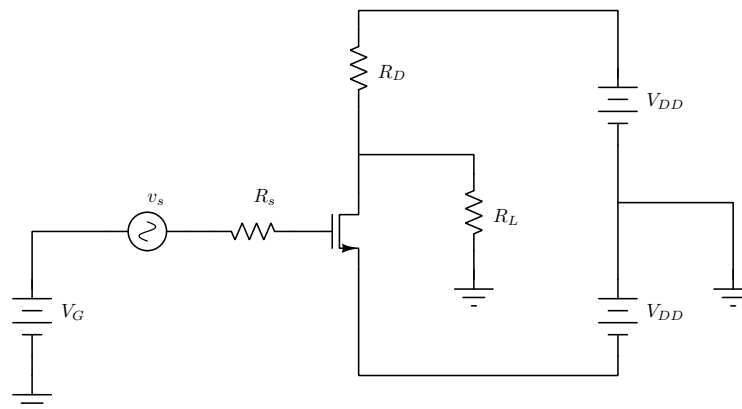


Figura 9

### Parte III: Copia espejo de corriente

12. En la figura 10 se muestra un circuito elemental muy utilizado en diseños CMOS analógicos para generar una tensión de referencia. Asumiendo  $I_{REF} = 40\ \mu\text{A}$ ,  $V_{DD} = 3,3\ \text{V}$ ,  $\mu_n C'_{ox} = 116\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_T = 0,8\ \text{V}$ ,  $\lambda = 0,04\ \text{V}^{-1}$ ,  $W/L = 2$ .



- a) Calcular el punto de trabajo del transistor. ¿En qué región de operación se encuentra? ¿Depende de  $I_{REF}$ ?
- b) Suponer que ahora se reemplaza la fuente  $I_{REF}$  por una resistencia  $R = 10\text{ k}\Omega$ . Diseñar el transistor, es decir hallar  $W/L$ , para que  $V_{OUT} = 1,5\text{ V}$ .

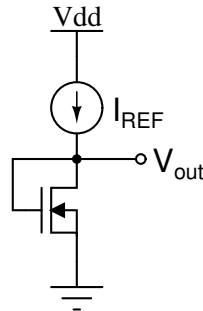


Figura 10

13. Siendo el circuito de la Fig. 11 donde  $V_{DD} = 5\text{ V}$ ,  $I_{REF} = 1\text{ mA}$ ,  $(W/L)_1 = 1$ ,  $(W/L)_2 = 2$ ,  $\frac{\mu_n C'_{ox}}{2} = 1\text{ mA/V}^2$ ,  $V_T = 0,6\text{ V}$   $\lambda \rightarrow 0$ .

- a) ¿Cuál es la corriente de salida cuando ambos transistores están en saturación? ¿Cuál es el rango de  $R_L$  admitido para que M2 permanezca saturado?
- b) Si ahora  $\lambda = 0,05\text{ V}^{-1}$  en M2, determinar  $I_D$  cuando  $R_L = 1\text{ k}\Omega$ .

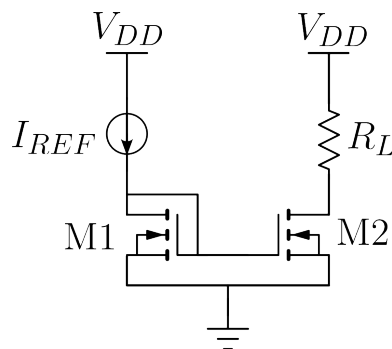


Figura 11

14. Se tiene el circuito de la Fig. 12, donde  $V_{DD} = 3,3\text{ V}$  e  $I_{REF} = 2\text{ mA}$ . todos los NMOS comparten los siguientes valores:  $V_T = 0,4\text{ V}$ ,  $\frac{\mu_n C'_{ox}}{2} = 0,9\text{ mA/V}^2$  y  $\lambda \rightarrow 0$ ; mientras que todos los PMOS comparten  $V_T = -0,5\text{ V}$ ,  $\frac{\mu_p C'_{ox}}{2} = 0,5\text{ mA/V}^2$  y  $\lambda \rightarrow 0$ . Asegurarse de que todos los transistores estén saturados y calcular las corrientes ...

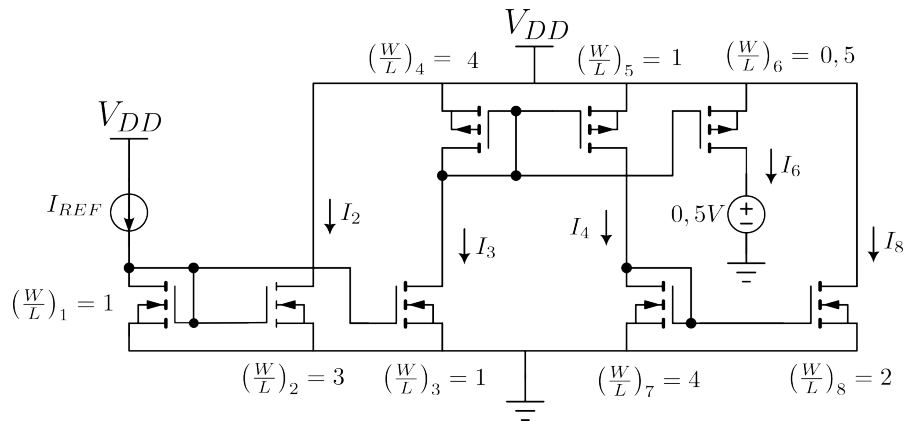


Figura 12

15. Dado el circuito de la Fig. 13 y sabiendo que  $V_T = 0,6\text{ V}$ ,  $V_{DD} = 3,3\text{ V}$ ,  $(W/L)_1 = 10$ ,  $\mu_n C'_{ox} = 80\ \mu\text{A}/\text{V}^2$  y asumiendo  $\lambda = 0\ \text{V}^{-1}$ .
- ¿Puede  $M_1$  estar polarizado en régimen de triodo?
  - Describa el funcionamiento del circuito y explique para qué sirve.
  - Hallar  $R_{REF}$  tal que  $I_{OUT} = 100\ \mu\text{A}$ .
  - Si  $(W/L)_2 = 50$ , encuentre el rango de valores de  $R_L$  para los cuales el circuito funciona correctamente.
  - Suponiendo que  $\lambda \neq 0$ , realice un gráfico de  $I_{OUT}$  vs.  $V_{OUT}$ . Explique cómo afecta la modulación del largo del canal a la corriente de salida.
  - ¿Qué criterio de diseño aplicaría a  $M_2$  para reducir este efecto?

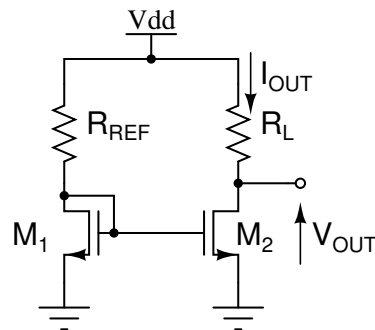


Figura 13

16. En la Fig. 14 se muestra una fuente de corriente donde  $V_{T_o} = -0,9\text{ V}$ ,  $\mu_p C'_{ox} = 25\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\lambda_p = 0,02\ \text{V}^{-1}$ ,  $V_{DD} = 5\text{ V}$  y  $R_{REF} = 36\ \text{k}\Omega$ .
- Explique por qué  $M_1$  nunca puede estar en régimen de triodo.
  - Halle  $(W/L)_1$  para que  $I_{REF} = 100\ \mu\text{A}$ . ¿Cuánto vale  $V_{REF}$  en ese caso?
  - ¿Cuánto debe valer  $(W/L)_2$  para que  $I_{OUT} = 500\ \mu\text{A}$ ?
  - Realice el gráfico exacto de  $I_{OUT} = f(V_{OUT})$  para  $0 < V_{OUT} < 5\text{ V}$ .
  - ¿A qué valores debe acotarse  $R_L$  para que el circuito funcione correctamente?

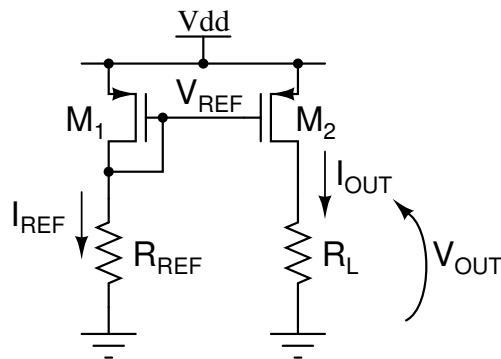


Figura 14

17. El circuito de la Fig. 15 representa una referencia de tensión y de corriente simultáneamente. Considere  $V_{DD} = 3,3\text{ V}$ ,  $V_{Tn} = 0,7\text{ V}$ ,  $V_{Tp} = -0,9\text{ V}$ ,  $\mu_n C'_{ox} = 3\ \mu\text{pA}/\text{V}^2$ ,  $\lambda_{n,p} = 0$  y  $(W/L)_{N1,N2,N3} = 3$ .
- Explique cualitativamente cómo funciona el circuito.
  - Encuentre el valor de  $R$  tal que  $I_{OUT} = 50\ \mu\text{A}$ .
  - Dimensione el transistor  $P_1$  de forma tal que  $V_{REF} = 2\text{ V}$ .
  - ¿Cómo se modifica este valor si se conecta una resistencia de  $100\text{ k}\Omega$  entre  $V_{REF}$  y  $GND$ ?
  - Si se conecta una carga resistiva entre  $V_{DD}$  y  $V_{OUT}$ , ¿cuál es el valor máximo que puede adoptar esta carga sin modificar el funcionamiento del circuito?

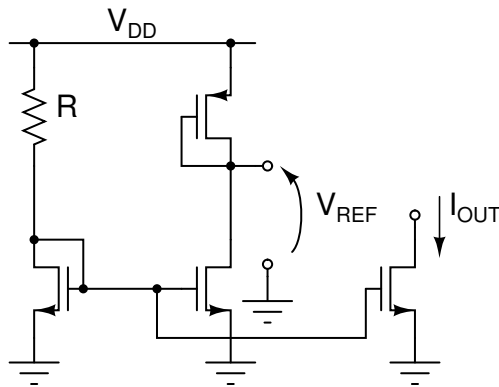


Figura 15

#### Parte IV: Integradores

18. Dado el amplificador MOSFET de la Fig. 16, con  $V_{DD} = 2,5\text{ V}$ ,  $R_s = 50\ \Omega$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $V_T = 1\text{ V}$ ,  $\mu_n C'_{ox} = 50\ \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\lambda = 0,1\text{ V}^{-1}$ ,  $L = 2\ \mu\text{m}$ , y sabiendo que puede considerarse infinita la  $r_{oc}$  de la fuente de corriente, calcule los valores de  $V_G$ ,  $I_{SUP}$ , y  $W$ , tal de obtener  $g_m \geq 2\text{ mS}$  y  $A_v \geq |-20|$ , considerando  $V_{OUT} = 0$ .



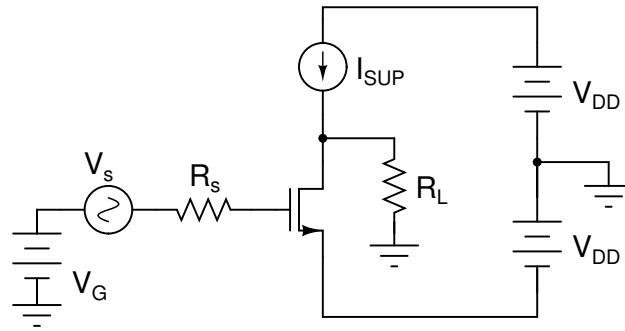


Figura 16

19. El amplificador de la Fig. 17 posee los siguientes parámetros:  $V_{DD} = 3,3\text{ V}$ ,  $I_{ref} = 5\text{ mA}$ ,  $R_{G1} = 3\text{ k}\Omega$ ,  $R_{G2} = 7\text{ k}\Omega$ ,  $R_s = 50\ \Omega$  y  $R_L = 1\text{ k}\Omega$ . La propiedades del NMOS son:  $V_T = 0,8\text{ V}$ ,  $\frac{\mu_n C'_{ox}}{2} = 1,2\text{ mA/V}^2$ ,  $W/L = 1$  y  $\lambda = 0,01\text{ V}^{-1}$ ; y las del PMOS:  $V_T = -0,8\text{ V}$ ,  $\frac{\mu_p C'_{ox}}{2} = 0,5\text{ mA/V}^2$ ,  $W/L = 5$  y  $\lambda = 0,01\text{ V}^{-1}$ . Ambos PMOS son idénticos.

- Determinar el punto de polarización.
- Calcular  $A_{v0}$ ,  $A_{vs}$ ,  $R_{in}$  y  $R_{out}$ .
- Responda: ¿Qué ventaja tiene reemplazar la resistencia de drain por un PMOS?

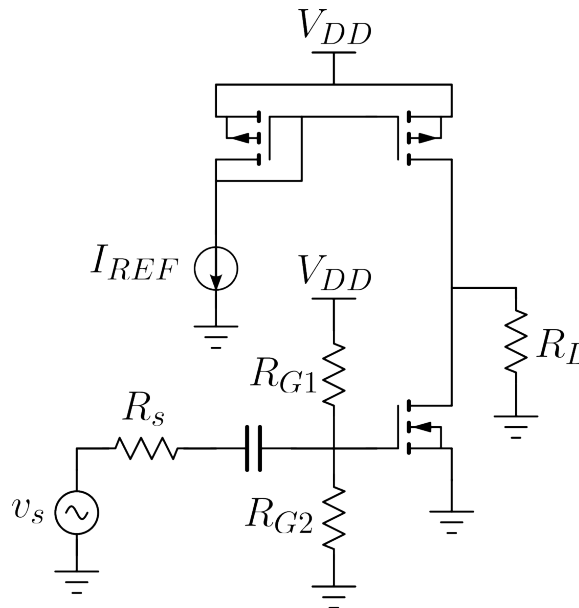


Figura 17