8. CONVOCATORIA FEBRERO 2010

8.1. Problema 2. Amlificador en emisor común

Dado el siguiente amplificador en emisor común calcular:

a) La ganancia a frecuencias medias.

b) La respuesta en alta frecuencia.

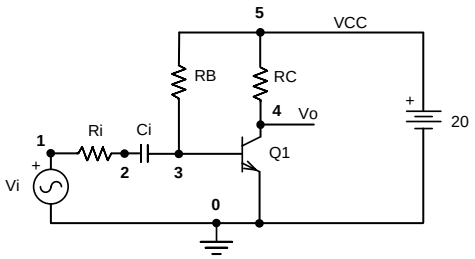


Figura 8.1

Datos: hfe= 120, hoe= 50 μS, C_{BC}= 10.5 pF, C_{BE}= 121.2 pF, V_{BEQ}=611 mV, R_i= 600 Ω, R_C= 4 700 Ω, V_{CEQ}= 10 V.

8.1.1. Solución apartado a. Respuesta a frecuencias medias

Primero se calculan las corrientes de polarización con (8.1) y (8.2). Luego, con la tensión de polarización base-emisor y con (8.3) se calcula la resistencia de polarización de base RB, que es el componente que falta por calcular. No hay que olvidar que para calcular el punto de polarización (en dc) el condensador Ci se considera un circuito abierto.

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C} = \frac{20 - 10}{4\,700} = 2.127\,\text{mA} \tag{8.1}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{h_{fe}} = \frac{2.127}{120} = 17.73\,\mu\text{A} \tag{8.2}$$

$$RB = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{I_{BQ}} = \frac{20 - 0.61}{17.73 \cdot 10^{-6}} = 1\,093\,626\,\Omega \tag{8.3}$$

Ahora, se calculan los valores que faltan para completar el modelo de pequeña señal, que se muestra en la siguiente figura.

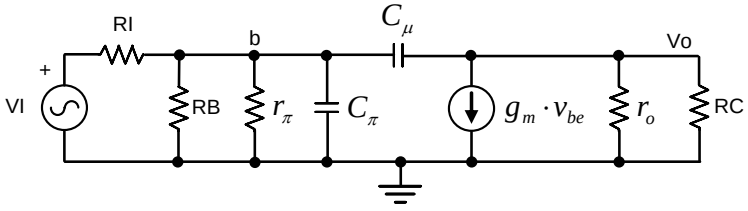


Figura 8.2. Circuito equivalente de pequeña señal para alta frecuencia del amplificador basado en BJT.

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{2.127 \cdot 10^{-3}\ \text{A}}{0.025691\,\text{V}} = 0.082\,8\,\text{S} \tag{8.4}$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_{BQ}} = \frac{0.025691\,\text{V}}{17.73\cdot 10^{-6}\,\text{A}} = 1\,449\,\Omega \tag{8.5}$$

$$r_o = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{50\cdot 10^{-6}\,S} = 20\,000\,\Omega \tag{8.6}$$

$$C_\mu = C_{BC} = 10.5\,\text{pF} \tag{8.7}$$

$$C_\pi = C_{BE} = 121.2\,\text{pF} \tag{8.8}$$

La ganancia de tensión a frecuencias medias es:

$$A_{vm} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m \cdot v_{be} \cdot \left(r_o \,//\, R_C\right)}{v_{be} \cdot \dfrac{\left(r_\pi \,//\, R_B\right) + R_i}{\left(r_\pi \,//\, R_B\right)}} = -222.74 \tag{8.9}$$

8.1.2. Solución apartado b. Respuesta en alta frecuencia

Para calcular la respuesta en alta frecuencia se aplica el teorema de Miller, quedando el circuito de pequeña señal como muestra la Figura 8.3. Aplicando la ecuación (8.10) se calcula la ganancia de Miller, y con (8.11) y (8.12) las capacidades equivalentes, respectivamente, de entrada y de salida.

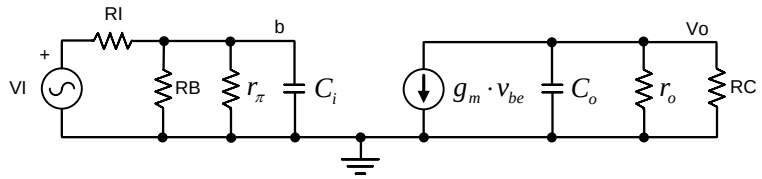


Figura 8.3. Circuito de pequeña señal después de aplicar el teorema de Miller.

$$A_{Miller} = k = \frac{v_o}{v_{be}} = -\frac{g_m \cdot v_{be} \cdot \left(r_o \,//\, R_C\right)}{v_{be}} = -315.1 \tag{8.10}$$

$$C_i = C_\pi + C_\mu \cdot \left(1 - k\right) = 121.2 + 10.5 \cdot \left(1 + 315.1\right) = 3\,440\,\text{pF} \tag{8.11}$$

$$C_o = C_\mu \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) = 10.5 \cdot \left(1 - \frac{1}{-315.1}\right) = 10.53\,\text{pF} \tag{8.12}$$

La capacidad de entrada introduce un polo determinado por (8.13) y la de salida otro dado por (8.14). Como hay más de una década de distancia entre las dos frecuencias a las que están los polos, se concluye que la frecuencia de corte superior f_H viene dada por el primer polo, que está a 109 kHz.

$$f_{p1} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot C_i \cdot (R_i \,//\, R_B \,//\, r_\pi)} = 109.117\,\text{kHz} \tag{8.13}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot C_o \cdot (r_o \,//\, R_C)} = 3.97\,\text{MHz} \tag{8.14}$$

Una vez se ha resuelto el problema, se presenta la respuesta en frecuencia obtenida de la simulación del circuito con PSpice A/D demo. En Figura 8.4 se muestra el fichero con la descripción

del circuito, el modelo del transistor y las especificaciones del tipo de análisis. En la Figura 8.5 se presenta el diagrama de bode de la respuesta del amplificador.

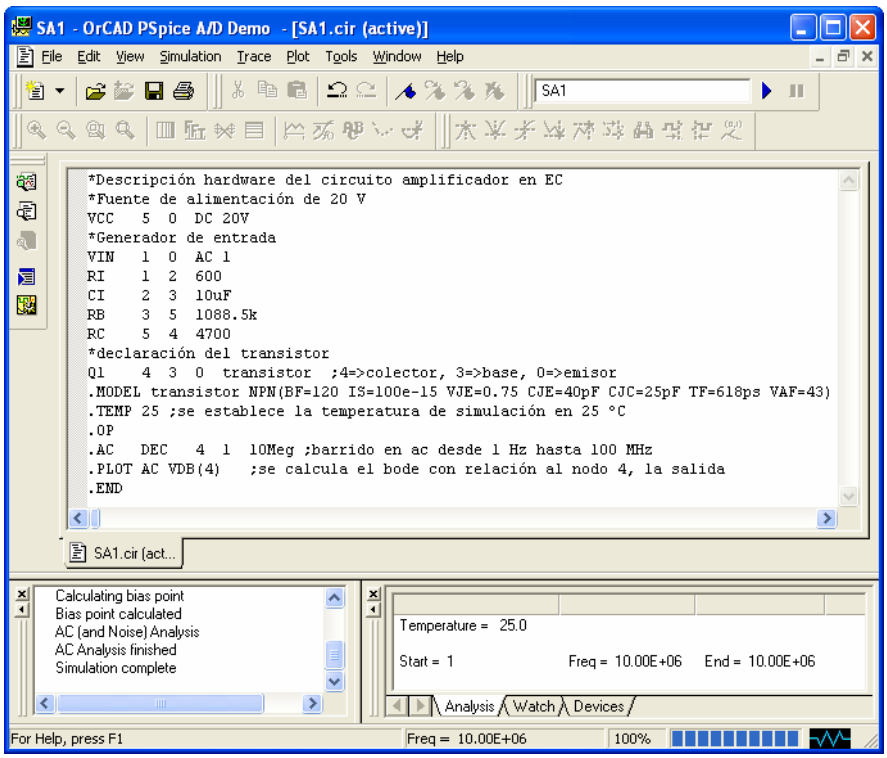


Figura 8.4. Ventana del programa PSpice con el fichero de texto de descripción, o netlist, del circuito amplificador.

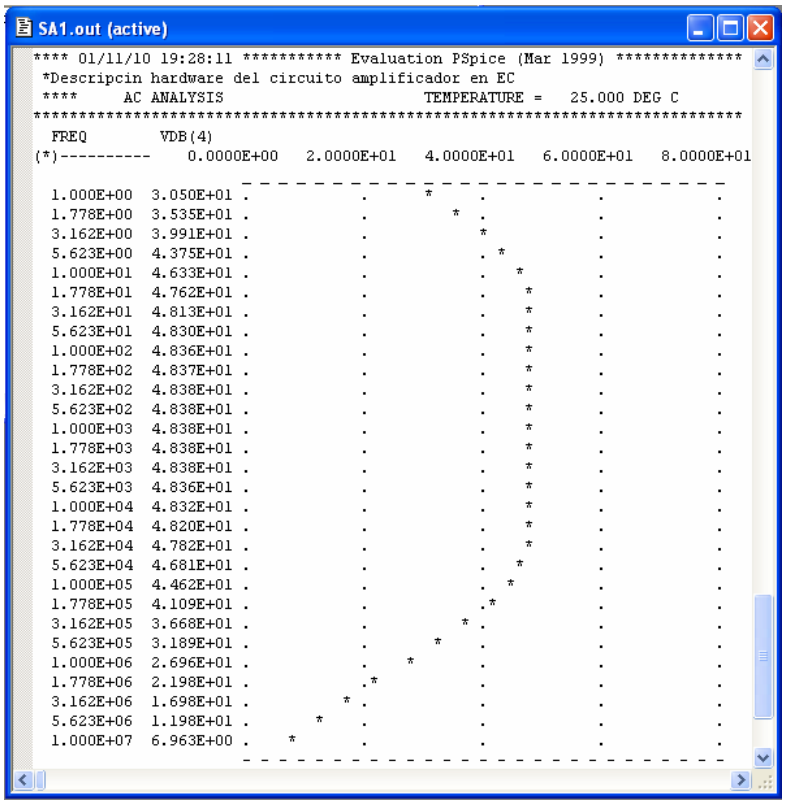


Figura 8.5. Gráfica de la respuesta en frecuencia incluida en el fichero de salida de la simulación del amplificador. A frecuencias medias la ganancia es de 48 dB y en torno a los 100 kHz es de unos 3 dB menos (44.62 dB), tal y como era de esperar coincide con la frecuencia de corte calculada.

8.2. Problema 3. Amplificador diferencial basado en transistores MOSFET

Dado el amplificador diferencial de la figura y considerando que todos los transistores son idénticos, calcular:

a) La ganancia diferencial (2 puntos)
b) La ganancia en modo común si la g_m del transistor Q2 fuese un 10% mayor que la calculada en el apartado anterior y la resistencia de salida R_O de Q3 es de 4 MΩ (1 punto)
Datos: KP= $0.1 \cdot 10^{-3}$, L= 0.35 µm, W= 0.5 µm, V_{TH} = 0.5 V

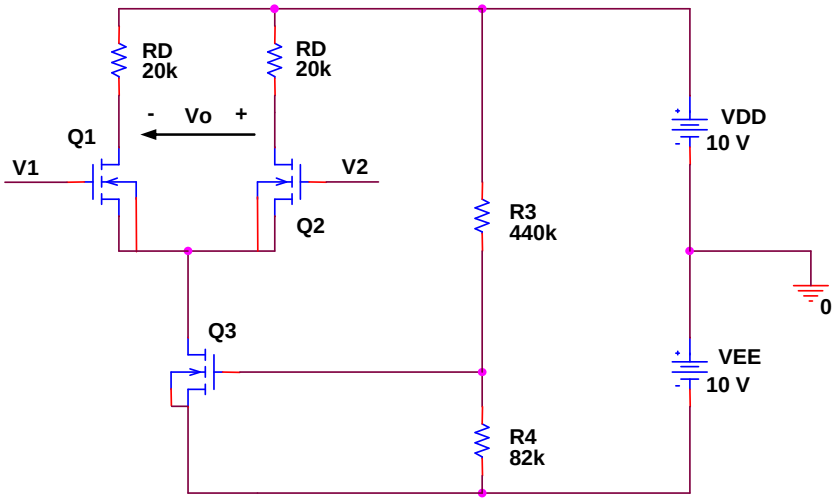


Figura 8.6. Amplificador diferencial MOSFET.

8.2.1. Solución apartado a. Cálculo de la ganancia diferencial

Primero hay que comenzar por calcular el punto de polarización de los transistores para, luego, obtener la trasconductancia. La tensión puerta-surtidor de Q3 está dada por el divisor de tensión constituido por R3 y R4, y que obedece a la expresión (8.15). Después de obtener la tensión de puerta de Q3 se calcula su corriente de drenador con la ecuación del transistor en saturación (8.17), sabiendo que la constante K está dada por (8.16).

$$V_{GSQ3} = \frac{VDD - VEE}{R_3 + R_4} \cdot R_4 = \frac{10 - (-10)}{440 + 82} \cdot 82 = 3.142 \text{ V} \tag{8.15}$$

$$K = \frac{W}{L} \cdot \frac{KP}{2} = \frac{0.5}{0.35} \cdot \frac{0.1 \cdot 10^{-3}}{2} = 0.071 \cdot 10^{-3} \tag{8.16}$$

$$I_{DQ3} = K \cdot \left(V_{GSQ3} - V_{TH}\right)^2 = 0.071 \cdot 10^{-3} \cdot (3.142 - 0.5)^2 = 0.495 \cdot 10^{-3} \text{ A} \tag{8.17}$$

Por la simetría del par diferencial, las corrientes de drenador de Q1 y Q2 son la mitad de la de Q3, es decir, 248 µA. Con este valor de corriente y (8.18) se decude la ganancia g_m. Además, con (8.19) y (8.20) se comprueba que los transistores estén en la zona de saturación para que funcionen como amplificadores.

$$g_{m1,2} = 2 \cdot \sqrt{K \cdot I_{DQ}} = 2 \cdot \sqrt{0.071 \cdot 10^{-3} \cdot 248 \cdot 10^{-6}} = 0.264 \cdot 10^{-3} \text{ S} \tag{8.18}$$

$$V_{DQ1,2} = VDD - I_{DQ1,2} \cdot RD = 5.04 \text{ V} \tag{8.19}$$

$$Vp = -V_{GSQ1,2} = -\left(\sqrt{\frac{I_{DQ1,2}}{K}} + V_{TH} \right) = -2.37 \text{ V} \tag{8.20}$$

Ahora, a partir del modelo de pequeña señal del circuito (Figura 8.7) se deduce la expresión de la ganancia diferencial. Primero se ponen las dos tensiónes de entrada en función de Vp y , luego, se restan como se indica en (8.21).

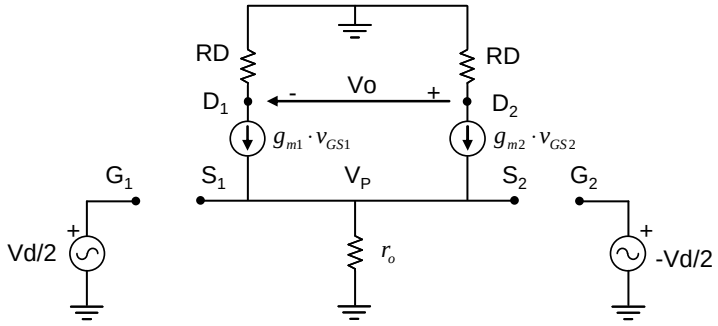


Figura 8.7. Modelo de pequeña señal del amplificador diferencial.

$$\frac{Vd}{2} - \left(-\frac{Vd}{2} \right) = \left(v_{GS1} + V_P \right) - \left(v_{GS2} + V_P \right) \Rightarrow Vd = v_{GS1} - v_{GS2} \tag{8.21}$$

Por otro lado, de la salida se tiene que:

$$\begin{aligned} &Vo = V_{D2} - V_{D1} = -g_m \cdot v_{GS2} \cdot RD - \left(-g_m \cdot v_{GS1} \cdot RD \right) = \\ &= -g_m \cdot \left(v_{GS2} - v_{GS1} \right) \cdot RD = g_m \cdot Vd \cdot RD \end{aligned} \tag{8.22}$$

Finalmente, sustituyendo (8.21) en (8.22) se obtiene la expresión de la ganancia diferencial Ad:

$$Ad = \frac{Vo}{Vd} = g_m \cdot RD = 0.265 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 5.3 \tag{8.23}$$

8.2.2. Solución apartado a. Cálculo de la ganancia en modo común

Se recalcula la trasconductancia del transistor Q2 (8.24), y se obtiene la expresión de la tensión de entrada (8.25) y de la de salida (8.26) para, dividiendiolas, obtener la ganancia en modo común (8.27).

$$g_{m1} = 265 \cdot 10^{-6} \text{ S} \quad \Rightarrow \quad g_{m2} = 1.1 \cdot 265 \cdot 10^{-6} \text{ S} = 291.5 \cdot 10^{-6} \text{ S} \tag{8.24}$$

$$v_{GS1} = v_{GS2} = v_{GS} \Rightarrow Vc = v_{GS} + r_o \left(g_{m1} \cdot v_{GS} + g_{m2} \cdot v_{GS} \right) \tag{8.25}$$

$$v_o = v_{D2} - v_{D1} = -v_{GS} \cdot g_{m2} \cdot RD - \left(-v_{GS} \cdot g_{m1} \cdot RD \right) = v_{GS} \cdot \left(g_{m1} - g_{m2} \right) \cdot RD \tag{8.26}$$

$$\begin{aligned} &Ac = \frac{Vo}{Vc} = \frac{v_{GS} \cdot \left(g_{m1} - g_{m2} \right) \cdot RD}{v_{GS} + r_o \left(g_{m1} \cdot v_{GS} + g_{m2} \cdot v_{GS} \right)} = \\ &= \frac{\left(g_{m1} - g_{m2} \right) \cdot RD}{1 + r_o \cdot \left(g_{m1} + g_{m2} \right)} = \frac{(265 - 291) \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3}{1 + 4 \cdot 10^6 \cdot 556.5 \cdot 10^{-6}} = -238 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \tag{8.27}$$