Problema 3. Dado el siguiente amplificador basado en un transistor FET calcular:

a) Su ganancia de tensión a frecuencias medias.
b) La repuesta en baja frecuencia.
c) La respuesta en alta frecuencia.
d) Dibujar el diagrama de bode.

Datos: g_m= 0.0102 S, C_{GS}= 11.8 pF, C_{GD}= 5.42 pF.

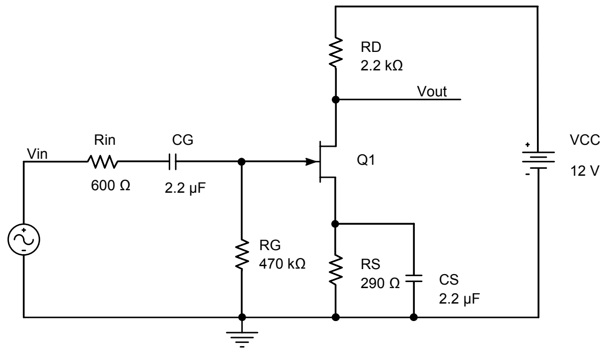


Figura 1.1. Circuito amplificador basado en FET en surtidor común.

a) A frecuencias medias se cortocircuitan los condensadores CG y CS. Las capacidades parásitas del transistor no se tienen en cuenta. El circuito equivalente de pequeña señal para frecuencias medias es el siguiente:

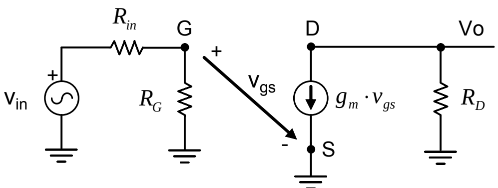


Figura 1.2. Circuito equivalente a frecuencias medias.

$$v_{gs} = v_g = v_{in} \cdot \frac{R_G}{R_G + R_{in}} \tag{1.1}$$

$$v_o = -g_m \cdot v_{gs} \cdot R_D \tag{1.2}$$

$$A_{vm} = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{-g_m \cdot v_{gs} \cdot R_D}{v_{gs} \cdot \frac{R_G + R_{in}}{R_G}} = -g_m \cdot R_D \cdot \frac{R_G}{R_G + R_{in}} = \tag{1.3}$$

$$= -0.010\,2 \cdot 2\,200 \cdot \frac{470\,000}{470\,600} = -22.41$$

Que en decibelios es: $|A_{vm}| = 20 \cdot \log|-22.41| = 27\text{ dB}$ (1.4)

b) Para calcular la respuesta en baja frecuencia no se tienen en cuenta las capacidades parásitas del transistor, de forma que la respuesta a bajas frecuencias viene dada por los condensadores CG y CS. CG introduce un cero en el origen y un polo dado por (1.5). CS introduce un cero en (1.6) y un polo en (1.7).

$$f_{pCG} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_G \cdot (R_{in} + R_G)} = \tag{1.5}$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \cdot 470\,600} = 0.153\text{ Hz}$$

$$f_{zCS} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_S \cdot R_S} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \cdot 290} = 249.5\text{ Hz} \tag{1.6}$$

$$f_{pCS} = \frac{g_m \cdot R_S + 1}{2 \cdot \pi \cdot C_S \cdot R_S} = \frac{0.0102 \cdot 290 + 1}{2 \cdot \pi \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \cdot 290} = 987.36\text{ Hz} \tag{1.7}$$

Como el polo introducido por CS es el de mayor frecuencia es el que fija la frecuencia de corte inferior, es decir, f_L= 987 Hz. Sin embargo, como el cero está a una frecuencia de 249 Hz, que no está muy lejos de 987, esta solución es aproximada. Como se comprueba en la gráfica del resultado de la simulación, la frecuencia exacta sería 912 Hz, que es ligeramente inferior.

Para obtener la respuesta en frecuencia a bajas frecuencias, se puede partir de la siguiente figura.

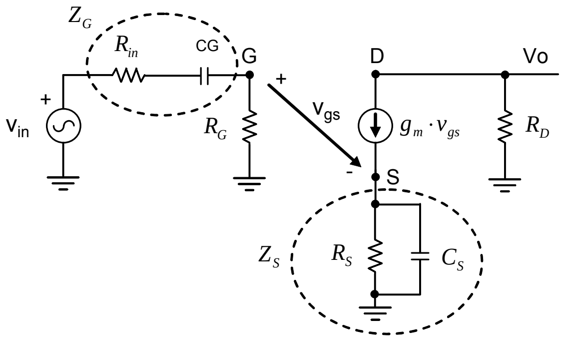


Figura 1.3. Circuito equivalente a baja frecuencia

Las tensiones en el surtidor y en la puerta vienen dados, respectivamente, por (1.8) y (1.9). Por tanto, la tensión puerta-surtidor se corresponde con (1.10), de la que se puede despejar la tensión de entrada. A continuación se sustituye en la expresión de la ganancia (1.12), en la que, además, también se sustituyen las expresiones (1.13) y (1.14) de las impedancias de entrada y de surtidor. Finalmente se obtiene la expresión general para bajas frecuencias (1.15).

$$v_S = g_m \cdot v_{gs} \cdot Z_S \quad (1.8) \quad ; \quad v_g = v_{in} \cdot \frac{R_G}{R_G + Z_{in}} \tag{1.9}$$

$$v_{gs} = v_g - v_S = v_{in} \cdot \frac{R_G}{R_G + Z_{in}} - g_m \cdot v_{gs} \cdot Z_S \tag{1.10}$$

$$v_{in} = v_{gs} \cdot (1 + g_m \cdot Z_S) \cdot \frac{R_G + Z_{in}}{R_G} \tag{1.11}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{-g_m \cdot v_{gs} \cdot R_D}{v_{gs} \cdot (1 + g_m \cdot Z_S) \cdot \frac{R_G + Z_{in}}{R_G}} = \tag{1.12}$$

$$= -\frac{g_m \cdot R_D}{1 + g_m \cdot Z_S} \cdot \frac{R_G}{R_G + Z_{in}}$$

$$Z_S = \frac{1}{C_S \cdot s} // R_S = \frac{R_S}{1 + R_S \cdot C_S \cdot s} \tag{1.13}$$

$$Z_{in} = \frac{1}{C_G \cdot s} + R_{in} = \frac{1 + R_{in} \cdot C_G \cdot s}{C_G \cdot s} \tag{1.14}$$

$$A_v = -\frac{g_m \cdot R_D}{1 + g_m \cdot \frac{R_S}{1 + R_S \cdot C_S \cdot s}} \cdot \frac{R_G}{R_G + \frac{1 + R_{in} \cdot C_G \cdot s}{C_G \cdot s}} =$$

$$= -\frac{g_m \cdot R_D \cdot (1 + R_S \cdot C_S \cdot s)}{1 + R_S \cdot C_S \cdot s + g_m \cdot R_S} \cdot \frac{R_G \cdot C_G \cdot s}{R_G \cdot C_G \cdot s + 1 + R_{in} \cdot C_G \cdot s} = \tag{1.15}$$

$$-\frac{g_m \cdot R_D \cdot R_G \cdot C_G}{1 + g_m \cdot R_S} \cdot \frac{1 + R_S \cdot C_S \cdot s}{\frac{R_S \cdot C_S}{1 + g_m \cdot R_S} \cdot s + 1} \cdot \frac{s}{(R_G + R_{in}) \cdot C_G \cdot s + 1} =$$

$$= -5.86 \cdot \frac{1 + 6.038 \cdot 10^{-4} \cdot s}{1.6119 \cdot 10^{-4} \cdot s + 1} \cdot \frac{s}{1.035 \cdot s + 1}$$

$$k_p = 20 \cdot \log\left|-5.86\right| = 15.36\,\text{dB} \qquad (1.16)$$

c) Para calcular la respuesta en alta frecuencia se consideran cortocircuitos los capacitares CS y CG y se añaden las capacidades parásitas del transistor, pasando la capacidad puerta-drenador a la entrada y la salida aplicando el teorema de Miller. Los polos que aparecen a altas frecuencias son:

$$f_{p1} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot(R_{in}//R_G)\cdot\left[C_{gs}+C_{gd}\cdot(1-(-g_m\cdot R_D))\right]} = 1.9\,\text{MHz}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot R_D\cdot\left[C_{gd}\cdot\left(1-\frac{1}{-g_m\cdot R_D}\right)\right]} = 12.78\,\text{MHz}$$

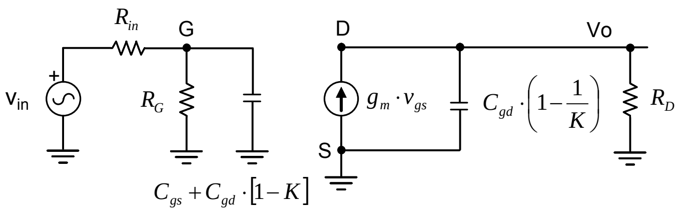


Figura 1.4. Circuito equivalente de pequeña señal a altas frecuencias.

Resultado de la simulación:

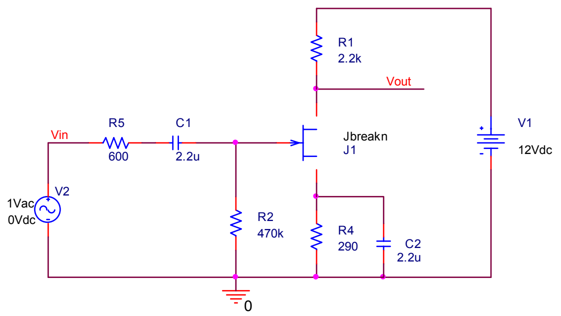


Figura 1.5. Esquema del circuito de OrCAD.

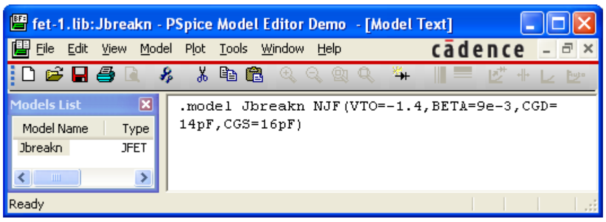


Figura 1.6. Modelo del transistor.

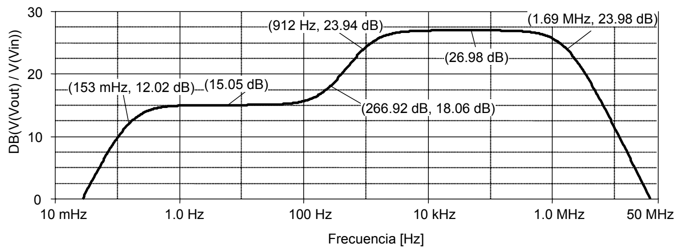


Figura 1.7. Respuesta en frecuencia resultado de la simulación con PSpice.

Parámetros del transistor en el punto de polarización:

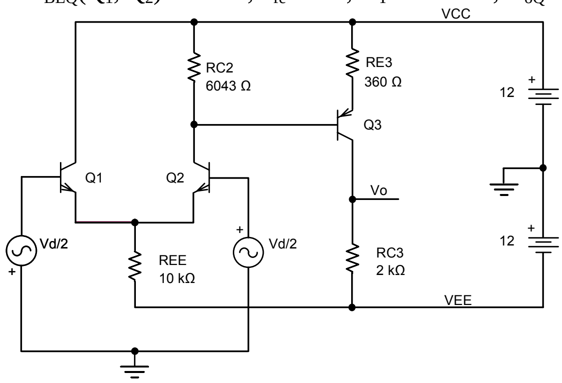
NAME	J_J1		
MODEL	Jbreakn		
ID	2.88E-03		
VGS	-8.35E-01		
VDS	4.83E+00		
GM	1.02E-02		
GDS	0.00E+00		
CGD	5.42E-12	CGS	1.18E-11

Problema 2. Dado el siguiente circuito, calcular:

a) La ganancia de pequeña señal de tensión diferencial, $A_v = V_o/V_d$.

b) La capacidad de un condensador C_{bc} tal que, si se añade al circuito conectado entre los terminales de base y colector de Q3, haga que la frecuencia de corte superior del amplificador sea de 200 Hz.

Datos: $V_{BEQ}(Q_1, Q_2)=0.76$ V, $h_{fe}= 100$, $V_T=25.8$ mV, $V_{oQ}= 0$ V.



a)

$$I_{E2} = \frac{1}{2}\cdot I_{EE} = \frac{1}{2}\cdot\frac{\left|V_{EE}\right|-V_{BEQ2}}{R_{EE}} = \qquad (2.1)$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{12\,V - 0.76\,V}{10\,k\Omega} = 562\,\mu A$$

$$I_{C2} = I_{E2}\cdot\frac{\beta}{\beta+1} = 562\,\mu A\cdot\frac{100}{101} = 556.4\,\mu A \qquad (2.2)$$

$$I_{C3} = \frac{V_o - V_{EE}}{R_{C3}} = \frac{0\,V-(-12\,V)}{2\,k\Omega} = 6\,mA \qquad (2.3)$$

$$V_p = -\frac{V_d}{2} - i_{b1}\cdot h_{ie1} \quad (2.4) \quad ; \quad V_p = \frac{V_d}{2} - i_{b2}\cdot h_{ie2} \quad (2.5)$$

Sumando (2.4) y (2.5), y considerando que las resistencias de entrada de Q1 y Q2 son iguales, se obtiene (2.6):

$$2\cdot V_p = -\left(i_{b1}+i_{b2}\right)\cdot h_{ie} \qquad (2.6)$$

$$\left(i_{b1}+i_{b2}\right)\cdot\left(1+h_{fe}\right) = \frac{V_p}{R_{EE}} \quad (2.7); \quad \left(i_{b1}+i_{b2}\right) = \frac{V_p}{R_{EE}\cdot\left(1+h_{fe}\right)} \quad (2.8)$$

Ahora, sustituyendo (2.8) en (2.6), se obtiene la expresión (2.9), que sólo puede ser cierta si la tensión Vp es nula.

$$2\cdot V_p = -\frac{V_p}{R_{EE}\cdot\left(1+h_{fe}\right)}\cdot h_{ie} \qquad (2.9)$$

Como V_p=0 V, entonces:

$$i_{b2} = \frac{V_d}{2\cdot h_{ie2}} \qquad (2.10)$$

$$i_{c2} = i_{b2}\cdot h_{fe} = \frac{V_d}{2\cdot h_{ie2}}\cdot h_{fe} \qquad (2.11)$$

$$v_{b3} = -i_{c2}\cdot\left(R_{C2}//R_{eq3}\right) \overset{(11)}{=} \qquad (2.12)$$

$$= -\frac{V_d}{2\cdot h_{ie2}}\cdot h_{fe}\cdot\frac{R_{C2}\cdot\left[h_{ie3}+R_{E3}\cdot\left(1+h_{fe}\right)\right]}{R_{C2}+h_{ie3}+R_{E3}\cdot\left(1+h_{fe}\right)}$$

$$h_{ie2} = \frac{h_{fe}\cdot V_T}{I_{C2Q}} = \frac{100\cdot 25.8}{0.56} = 4\,607\,\Omega \qquad (2.13)$$

$$h_{ie3} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{C3Q}} = \frac{100 \cdot 25.8}{6} = 430\,\Omega \tag{2.14}$$

$$A_{v1} = \frac{V_{b3}}{V_d} = \tag{2.15}$$
$$= -\frac{100}{2 \cdot 4\,607} \cdot \frac{6\,043 \cdot [430 + (360 \cdot 101)]}{6\,043 + 430 + (360 \cdot 101)} = -56.3$$

$$A_{v2} = \frac{V_o}{V_{b3}} = \frac{-R_{C3} \cdot h_{fe} \cdot i_{b3}}{i_{b3} \cdot h_{ie3} + i_{b3} \cdot (h_{fe} + 1) \cdot R_{E3}} =$$
$$= \frac{-2\,000 \cdot 100}{430 + 101 \cdot 360} = -5.44 \tag{2.16}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{V_{b3}}{V_d} \cdot \frac{V_o}{V_{b3}} =$$
$$= A_{v1} \cdot A_{v2} = (-56.3) \cdot (-5.44) = 306.27 \tag{2.17}$$

c) El condensador C_{bc} tendrá su mayor efecto en la entrada, por el teorema de Miller. Por lo que queda en paralelo con R_{C2} y la resistencia que ve es $R_3 = R_{C2} // R_{eq3}$. Además, la ganancia de Miller es $A_{v2} = -5.44$, por tanto:

$$C_{bc} \cdot (1 - A_{v2}) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot f_H} \tag{2.18}$$

$$C_{bc} = \frac{1}{[1 - (-5.44)] \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5190.436 \cdot 200} = 23.8\,nF \tag{2.19}$$