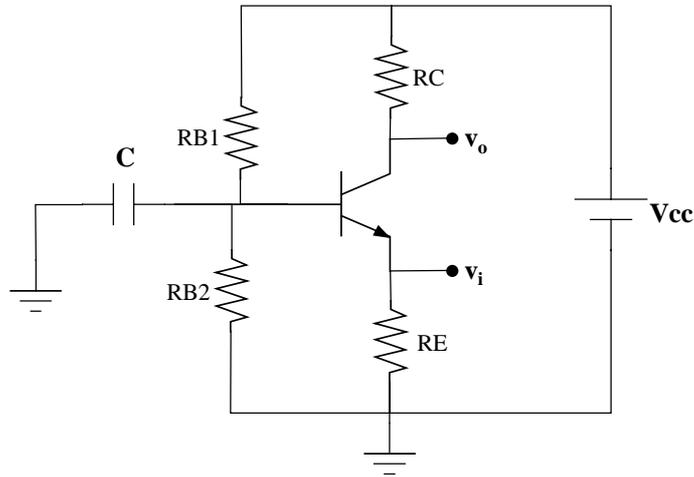


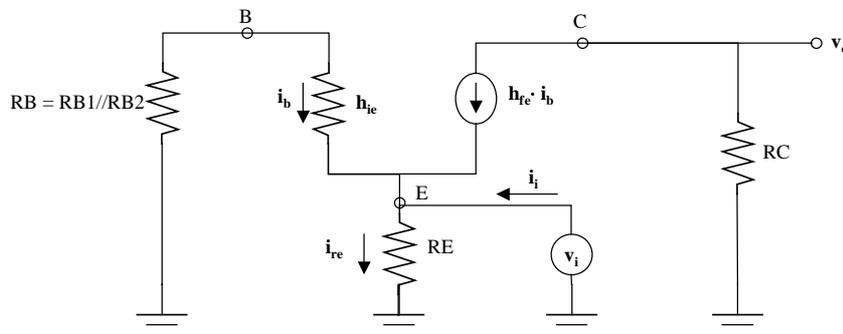
**PROBLEMA 1 (2 puntos)**

Dado el siguiente amplificador en configuración base común, calcular:

- a) La ganancia de tensión ( $A_V = v_o/v_i$ ) a frecuencia cero. (0,5 puntos)
- b) La ganancia de tensión ( $A_V = v_o/v_i$ ) a frecuencias medias. (1 punto)
- c) La resistencia de entrada a frecuencias medias. (0,5 puntos)



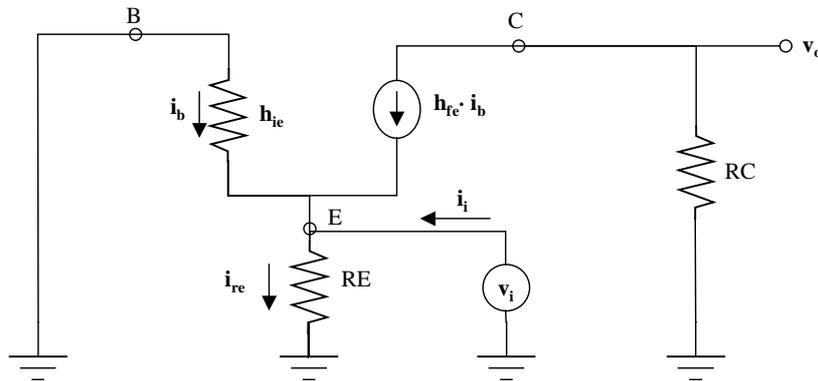
a) A frecuencia cero el condensador es un circuito abierto y el circuito equivalente de pequeña señal sería el siguiente:



$$\left. \begin{aligned} v_i &= -i_b \cdot (h_{ie} + RB) \\ v_o &= -i_b \cdot h_{fe} \cdot RC \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{h_{fe} \cdot RC}{h_{ie} + RB}$$

$$A_V = \frac{h_{fe} \cdot RC}{h_{ie} + RB}$$

b) A frecuencias medias se considera que el condensador es un cortocircuito y el circuito equivalente de pequeña señal sería el siguiente:



La diferencia con el apartado anterior es que  $R_B$  queda cortocircuitada y el circuito sería el mismo pero con  $R_B = 0$ . Por lo tanto la ganancia de tensión tendría la misma expresión que la del apartado a) sustituyendo  $R_B$  por cero.

$$A_V = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{h_{ie}}$$

c) Para obtener la resistencia de entrada  $R_i$  a frecuencias medias hay que analizar el circuito del apartado b) resolviendo el nudo de emisor (E).

$$\left. \begin{aligned} i_{re} &= i_b + h_{fe} \cdot i_b + i_i = (1 + h_{fe}) \cdot i_b + i_i \\ i_{re} &= \frac{v_i}{R_E} \\ v_i &= -i_b \cdot h_{ie} \Rightarrow i_b = -\frac{v_i}{h_{ie}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_i}{R_E} = -\frac{v_i}{h_{ie}} \cdot (1 + h_{fe}) + i_i \Rightarrow v_i \cdot \left( \frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{fe})}{h_{ie}} \right) = i_i$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{fe})}{h_{ie}}} = \frac{R_E \cdot h_{ie}}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

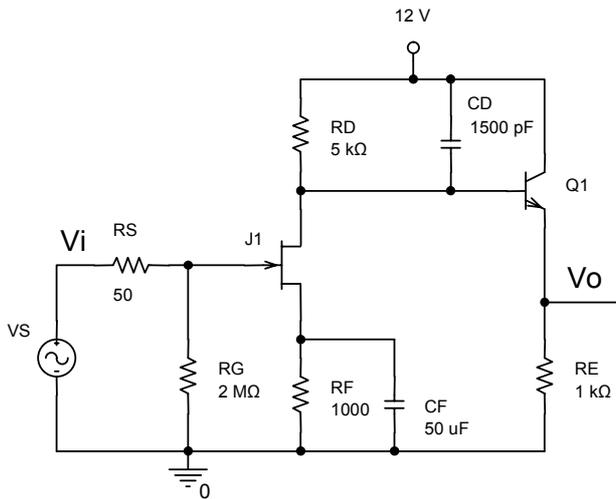
$$R_i = \frac{R_E \cdot h_{ie}}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

**PROBLEMA 2 (3 puntos)**

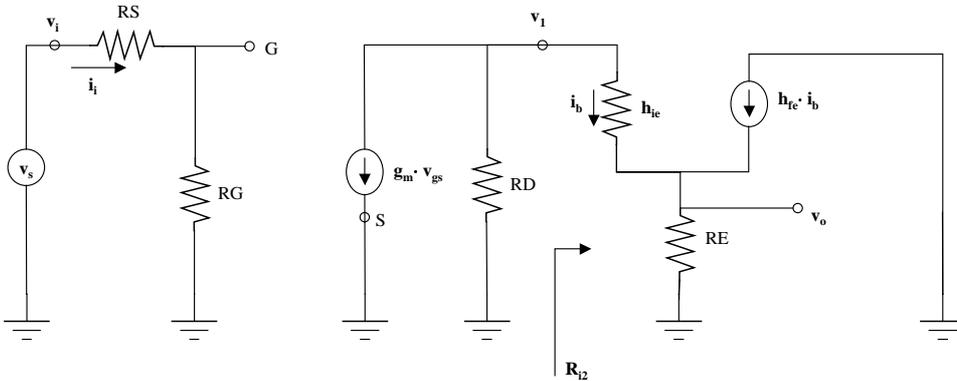
Dado el siguiente amplificador, del que solo se consideran las capacidades CF y CD, se pide:

- Dibujar el circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias medias y calcular la ganancia de tensión. (1 punto)
- Dibujar el circuito equivalente a frecuencias bajas y calcular la frecuencia de corte inferior. (0.75 puntos)
- Dibujar el circuito equivalente a frecuencias altas y calcular la frecuencia de corte superior. (0.75 puntos)
- Dibujar el diagrama de bode del módulo de la ganancia de tensión. (0.5 puntos)

Datos:  $h_{fe}=180$ ,  $g_m=6.28 \text{ mS}$ ,  $I_{CQ} = 5.713 \text{ mA}$ ,  $V_T = 25.8 \text{ mV}$ .



a) A frecuencias medias CF se puede considerar un cortocircuito y CD un circuito abierto. El circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias medias es el siguiente:



$$h_{ie} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{CQ}} = \frac{180 \cdot 25,8 \text{ mV}}{5,713 \text{ mA}} = 812,88 \Omega$$

$$\left. \begin{aligned} A_{V1} &= \frac{v_1}{v_i} \\ A_{V2} &= \frac{v_o}{v_1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$v_1 = -g_m \cdot v_{gs} \cdot (RD // R_{i2})$$

$$R_{i2} = \frac{v_1}{i_b} = \frac{i_b \cdot h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot RE}{i_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot RE = 812,88\Omega + 181 \cdot 1000\Omega = 181,81K$$

$$RD // R_{i2} = \frac{5K \cdot 181,81K}{5K + 181,81K} = 4,866K$$

$$v_{gs} = v_i \cdot \frac{RG}{RS + RG} \Rightarrow v_i = v_{gs} \cdot \frac{RS + RG}{RG} \approx v_{gs}$$

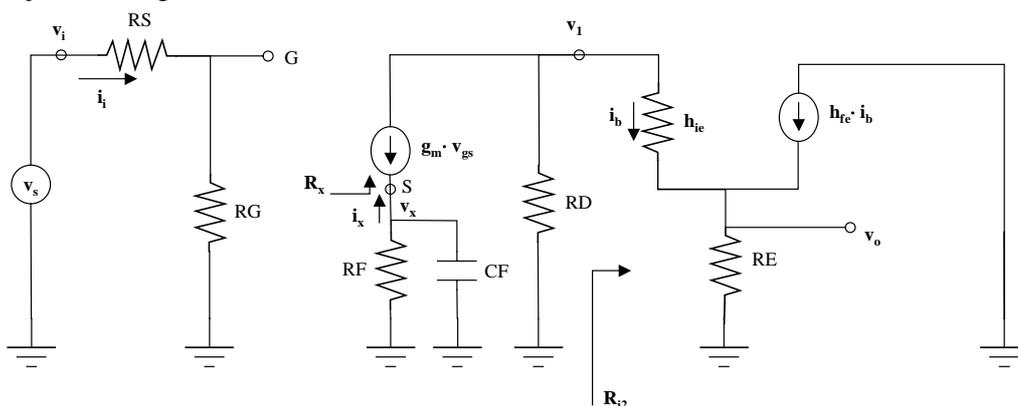
$$A_{V1} = -\frac{g_m \cdot v_{gs} \cdot (RD // R_{i2})}{v_{gs}} = -g_m \cdot (RD // R_{i2}) = -6,28 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V} \cdot 4866\Omega = -30,55$$

$$A_{V2} = \frac{v_o}{v_1} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot RE}{i_b \cdot h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot RE} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot RE}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot RE} = \frac{181 \cdot 1K}{0,81288K + 181 \cdot 1K} = 0,99$$

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} = -30,55 \cdot 0,99 = -30,24$$

$$A_V = -30,24$$

b) A frecuencias bajas hay que considerar el efecto de CF que introducirá un cero y un polo al sistema. El condensador CD se puede considerar un circuito abierto. El circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias bajas es el siguiente:



CF introduce un cero en la frecuencia:

$$f_z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RF \cdot CF} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000\Omega \cdot 50 \cdot 10^{-6} F} = 3,18Hz$$

CF introduce un polo en:

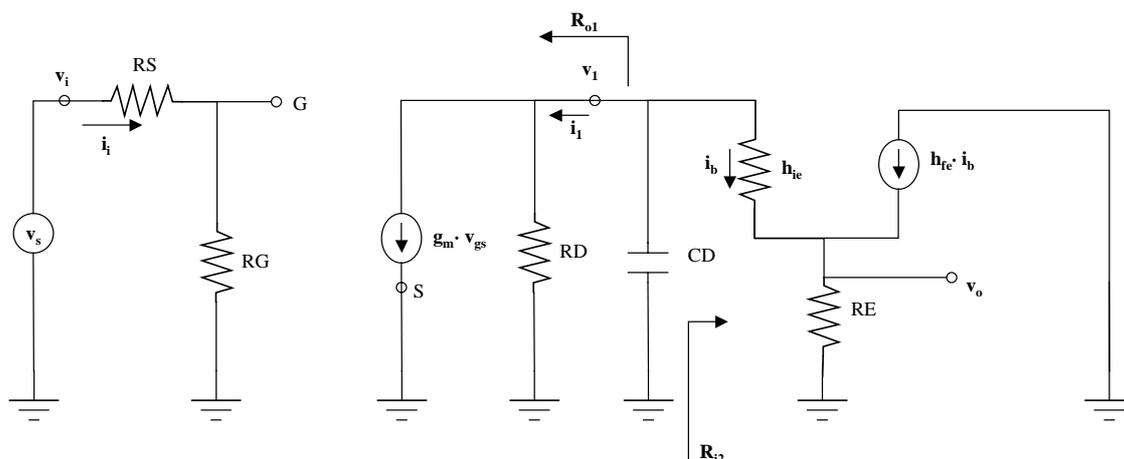
$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{CF} \cdot CF} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 137,35\Omega \cdot 50 \cdot 10^{-6} F} = 23,17Hz$$

$$R_{CF} = RF // R_x = \frac{1000\Omega \cdot 159,23\Omega}{1000\Omega + 159,23\Omega} = 137,35\Omega$$

$$R_x = \frac{v_x}{i_x} = \frac{-v_{gs}}{-g_m \cdot v_{gs}} = \frac{1}{g_m} = 159,23\Omega$$

$$f_L = 23,17 Hz$$

c) A frecuencias altas hay que considerar el efecto de CD que introducirá un polo al sistema. El condensador CF se puede considerar un cortocircuito. El circuito equivalente de pequeña señal a frecuencias altas es el siguiente:



CD introduce un polo en:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{CD} \cdot CD}$$

$$R_{CD} = R_{i2} // R_{o1}$$

$$R_{o1} = \frac{v_1}{i_1}$$

Con  $v_s$  cortocircuitada (para medir la resistencia  $R_{o1}$ ),  $v_{gs} = 0 \Rightarrow$

$$R_{o1} = \frac{v_1}{i_1} = RD = 5K$$

$$R_{CD} = R_{i2} // R_{o1} = R_{i2} // RD = 4,866K$$

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{CD} \cdot CD} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4866\Omega \cdot 1500 \cdot 10^{-12} F} = 21,805kHz$$

$$f_H = 21,805 \text{ kHz}$$

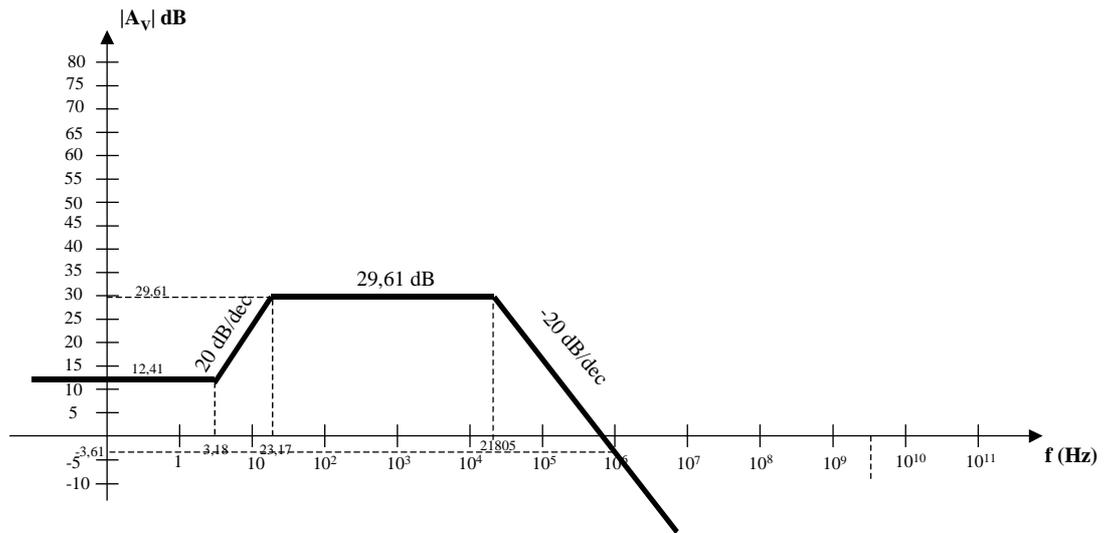
d) Para dibujar el diagrama de Bode del módulo de la ganancia de tensión, partimos de la ganancia de tensión a frecuencias medias que es  $-30,24$ , que en dB sería  $29,61$  dB.

A partir de  $23,17$  Hz la ganancia disminuye  $20$  dB/dec hasta los  $3,18$  Hz. Entre  $23,17$  Hz y  $3,18$  Hz hay  $0,86$  décadas, por lo que a frecuencia  $3,18$  Hz la ganancia sería  $29,61$  dB  $- 20$  dB/dec  $\cdot 0,86$  dec =  $12,41$  dB.

Para frecuencias por debajo de  $3,18$  Hz la ganancia permanece constante a  $12,41$  dB ya que el cero anula la disminución de ganancia del polo.

Para frecuencias altas, a partir de  $21,805$  kHz la ganancia disminuye  $20$  dB/dec. Esto daría una ganancia de  $16,38$  dB a una frecuencia de  $10^5$  Hz y de  $-3,61$  dB a  $10^6$  Hz.

Dibujando lo anterior quedaría el siguiente diagrama de Bode:

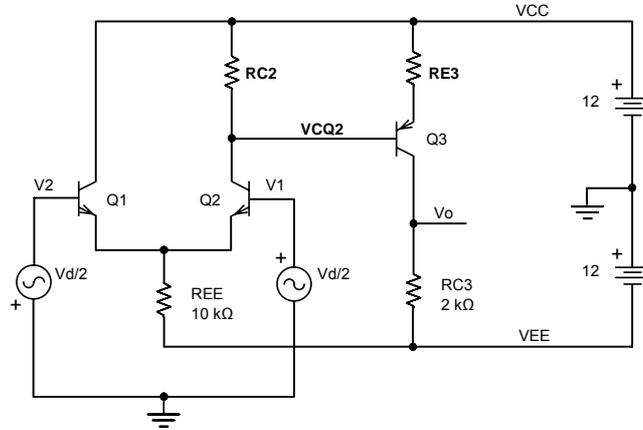


### PROBLEMA 3 (2 puntos)

Dado el circuito de la figura calcular:

- Las resistencias  $R_{C2}$  y  $R_{E3}$  para que en el punto de polarización del circuito la tensión en  $V_o$  sea nula.
- La ganancia de pequeña señal de tensión diferencial,  $A_v = V_o / (V_1 - V_2)$ .

Datos:  $V_{BE}(Q1, Q2) = 0.76\text{ V}$ ,  $V_{BE}(Q3) = -0.82\text{ V}$ ,  $h_{fe}(Q1, Q2, Q3) = 100$ ,  $V_{C2} = 9\text{ V}$ ,  $V_o = 0\text{ V}$ ,  
 $V_T = 25.8\text{ mV}$



a) Análisis del circuito en el punto de polarización (corriente continua).

$$I_{E2} = \frac{1}{2} \cdot I_{EE} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|V_{EE}| - V_{BEQ2}}{R_{EE}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{12\text{ V} - 0.76\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 562\ \mu\text{A} \quad (1)$$

$$I_{C2} = I_{E2} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} = 562\ \mu\text{A} \cdot \frac{100}{101} = 556.4\ \mu\text{A} \quad (2)$$

$$I_{C3} = \frac{V_o - V_{EE}}{R_{C3}} = \frac{0\text{ V} - (-12\text{ V})}{2\text{ k}\Omega} = 6\text{ mA} \quad (3)$$

$$I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta} = 0.06\text{ mA} = 60\ \mu\text{A} \quad (4)$$

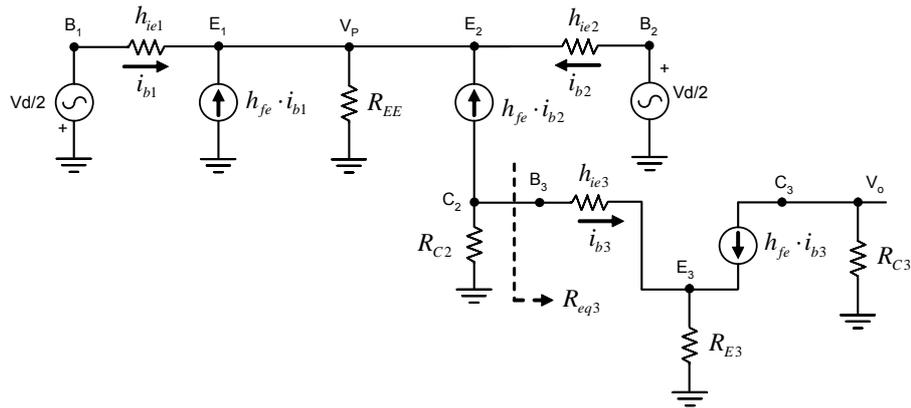
$$I_{E3} = I_{C3} + I_{B3} = 6.06\text{ mA} = \frac{V_{CC} - V_{EBQ3} - V_{CQ2}}{R_{E3}} = \frac{12\text{ V} - 0.82\text{ V} - 9\text{ V}}{R_{E3}} \quad (5)$$

$$R_{E3} = \frac{12\text{ V} - 0.82\text{ V} - 9\text{ V}}{6.06\text{ mA}} = 360\ \Omega \quad (6)$$

$$I_{RC2} = I_{C2} - I_{B3} = 556.4\ \mu\text{A} - 60\ \mu\text{A} = 496.4\ \mu\text{A} \quad (7)$$

$$R_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{CQ2}}{I_{RC2}} = \frac{12\text{ V} - 9\text{ V}}{496.4\ \mu\text{A}} = 6043\ \Omega \quad (8)$$

b) Análisis de pequeña señal del circuito amplificador.



$$V_p = -\frac{V_d}{2} - i_{b1} \cdot h_{ie1} \quad (1)$$

$$V_p = \frac{V_d}{2} - i_{b2} \cdot h_{ie2} \quad (2)$$

Sumando (1) y (2), y considerando que las resistencias de entrada de Q1 y Q2 son iguales, se obtiene (3):

$$2 \cdot V_p = -(i_{b1} + i_{b2}) \cdot h_{ie} \quad (3)$$

$$(i_{b1} + i_{b2}) \cdot (1 + h_{ie}) = \frac{V_p}{R_{EE}} \quad (4)$$

$$(i_{b1} + i_{b2}) = \frac{V_p}{R_{EE} \cdot (1 + h_{ie})} \quad (5)$$

Ahora, sustituyendo (5) en (3), se obtiene la expresión (6), que sólo puede ser cierta si la tensión  $V_p$  es nula.

$$2 \cdot V_p = -\frac{V_p}{R_{EE} \cdot (1 + h_{ie})} \cdot h_{ie} \quad (6)$$

Como  $V_p = 0$  V, entonces:

$$i_{b2} = \frac{V_d}{2 \cdot h_{ie2}} \quad (7)$$

$$i_{c2} = i_{b2} \cdot h_{fe} = \frac{V_d}{2 \cdot h_{ie2}} \cdot h_{fe} \quad (8)$$

$$v_{b3} = -i_{c2} \cdot (R_{C2} // R_{eq3}) \stackrel{(6)}{=} -\frac{V_d}{2 \cdot h_{ie2}} \cdot h_{fe} \cdot \frac{R_{C2} \cdot [h_{ie3} + R_{E3} \cdot (1 + h_{fe})]}{R_{C2} + h_{ie3} + R_{E3} \cdot (1 + h_{fe})} \quad (9)$$

$$h_{ie2} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{C2Q}} = \frac{100 \cdot 25.8}{0.56} = 4607 \Omega \quad (10)$$

$$h_{ie3} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{C3Q}} = \frac{100 \cdot 25.8}{6} = 430 \Omega \quad (11)$$

$$A_{v1} = \frac{V_{b3}}{V_d} \stackrel{(9)}{=} -\frac{100}{2 \cdot 4607} \cdot \frac{6043 \cdot [430 + (360 \cdot 101)]}{6043 + 430 + (360 \cdot 101)} = -56.3 \quad (12)$$

$$A_{v2} = \frac{V_o}{V_{b3}} = \frac{-R_{C3} \cdot h_{fe} \cdot i_{b3}}{i_{b3} \cdot h_{ie3} + i_{b3} \cdot (h_{fe} + 1) \cdot R_{E3}} = \frac{-2000 \cdot 100}{430 + 101 \cdot 360} = -5.44 \quad (13)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{V_{b3}}{V_d} \cdot \frac{V_o}{V_{b3}} = A_{v1} \cdot A_{v2} = (-56.3) \cdot (-5.44) = 306.27 \quad (14)$$

