UTN FRBB Dto. de Electrónica - Electrónica Aplicada II

Respuesta en Frecuencia

Trabajo de Laboratorio III

N. Cantallops, G. García & A. Riedinger

26 de agosto de 2021

Ing. R. Frachi & Ing. J. P. Marcos

Índice general

OBJETIVOS Y RESÚMEN:

Este laboratorio tiene como finalidad medir la respuesta en frecuencia de las tres configuraciones amplificadoras básicas con BJT: Emisor Común, Colector Común, Base Común. Luego se efectuará, para cada una de ellas, una simulación con OrCAD PSPICE y un cálculo teórico, para finalmente armar una tabla comparativa de la frecuencia de corte superior de cada configuración.

1 Emisor común:

En la Fig. 1.1 se puede observar el circuito a calcular según los siguientes parámetros de diseño:

- $h_{fe} = h_{FE} = 253$
- $I_C = 1\ [mA]$
- $V_{CC} = 12\ [V]$
- $V_{BE} = 0{,}7\ [V]$
- $V_t = 26\ [mA]$
- $R_s = 50\ [\Omega]$
- $R_L = 10\ [k\Omega]$

1.1. Cálculo de la polarización:

Para lograr una máxima excursión de señal se supondrá como criterio de buen diseño el punto de trabajo del amplificador según:

- $V_{RC} = 0{,}45\ V_{CC}$
- $V_{CE} = 0{,}45\ V_{CC}$

Entonces, con los datos de V_{RC} e I_C, según la Ley de Ohm es posible calcular el valor del resistor de colector:

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{0{,}45\ V_{CC}}{I_C} = \frac{0{,}45 \times 12}{1 \times 10^{-3}} = 5{,}4\ [k\Omega] \tag{1.1}$$

Ahora, planteando la malla de salida y teniendo en cuenta que $V_{CE} = 0{,}45\ V_{CC}$, se puede calcular el resistor de emisor:

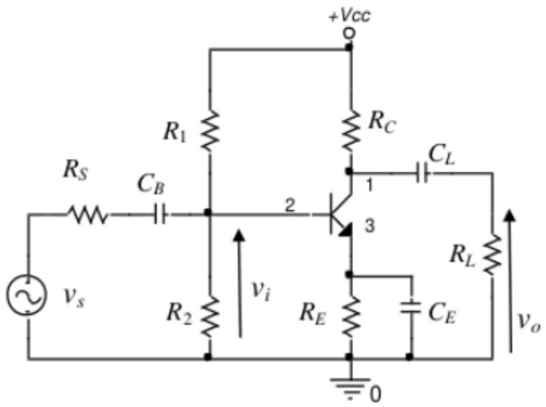

Figura 1.1: Circuito esquemático de un amplificador en configuración de emisor común

$$V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - I_E R_E = V_{CC} - 0{,}45\ V_{CC} - 0{,}45\ V_{CC} - \frac{h_{FE}+1}{h_{FE}} I_C R_E = 0$$

$$R_E = \frac{V_{CC}(1 - 0{,}45 - 0{,}45)}{\frac{h_{FE}+1}{h_{FE}} I_C} = \frac{12 \times 0{,}10}{0{,}99 \times 1 \times 10^{-3}} \simeq 1195\ [\Omega] \tag{1.2}$$

Teniendo en cuenta que para garantizar la máxima excursión de señal se debe cumplir que:

$$R_E \geq 10 \frac{R_B}{h_{FE}} \tag{1.3}$$

Según la Ec. 1.3, se puede calcular el resitor de base:

$$R_B = \frac{h_{FE} R_E}{10} = \frac{253 \times 1195}{10} = 30{,}2\ [k\Omega] \tag{1.4}$$

Donde el resistor de base será según el Teorema de Thevenin (luego de abrir la base del transitor) equivalente al resistor de Thevenin:

$$R_B = R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{1.5}$$

Y la fuente equivalente de Thevenin:

$$V_{th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{1.6}$$

Entonces, planteando la malla de entrada según el circuito equivalente de Thevenin se puede encontrar que:

$$V_{th} = I_B R_{th} + V_{BE} + I_E R_E = 3{,}45 \times 10^{-6} \times 30{,}2 \times 10^3 + 0{,}7 + 1 \times 10^{-3} \times 1195 \simeq 2{,}02\ [V] \tag{1.7}$$

De esta forma, aplicando el valor hallado de V_{th} en la Ec. 1.6, es posible calcular el valor del resitor R_1 como una función del resistor R_2:

$$V_{th} R_1 + V_{th} R_2 = V_{CC} R_2 \ \therefore\ R_1 = \frac{R_2 \left(V_{CC} - V_{th}\right)}{V_{th}}$$

$$R_1 = \frac{12 - 2{,}02}{2{,}02} R_2 \simeq 4{,}94\ R_2 \tag{1.8}$$

Reemplazando el valor de R_1 ahora en la Ec. 1.5:

$$R_B = \frac{4{,}94\ R_2^2}{4{,}94\ R_2 + R_2} = \frac{4{,}94\ R_2^2}{R_2 \left(4{,}94 + 1\right)} = \frac{4{,}94\ R_2}{4{,}94 + 1} \ \therefore\ R_B = 0{,}83\ R_2$$

$$R_2 = \frac{R_B}{0{,}83} = \frac{30{,}2 \times 10^3}{0{,}83} = 36\ [k\Omega] \tag{1.9}$$

Finalmente, substituyendo la Ec. 1.9 en la Ec. 1.8:

$$R_1 = 4{,}94 \times 36 = 180\ [k\Omega]$$

En resúmen, la polarización terminará siendo dada por:

- $R_1 = 180\ [k\Omega]$
- $R_2 = 36\ [k\Omega]$

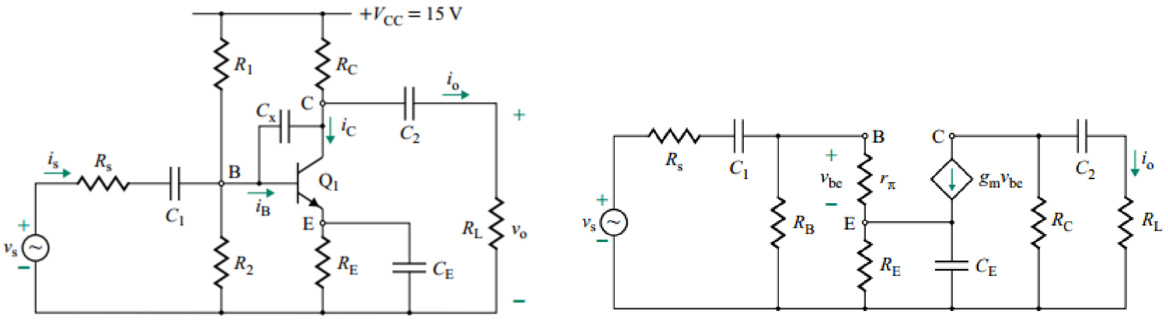

Figura 1.2: Circuito emisor común completo y modelo equivalente de señal para el análisis de la frecuencia de corte inferior

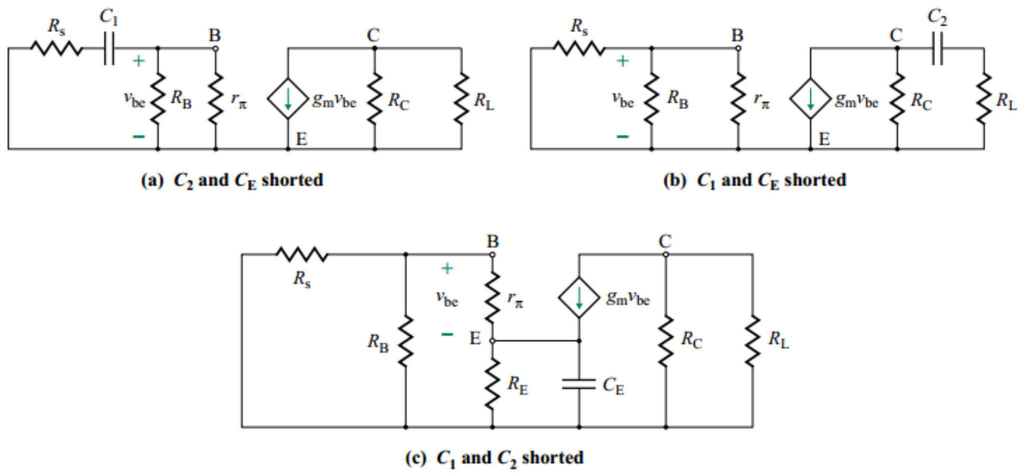

Figura 1.3: Circuito equivalente de señal para (a) C_2 y C_E en corto, (b) C_1 y C_E en corto y (c) C_1 y C_2en corto

- $R_C = 5{,}4$ $[k\Omega]$
- $R_E = 1195$ $[\Omega]$

1.2. Cálculo de la respuesta en frecuencia:

Para el cálculo de la respuesta en frecuencia, se obtuvieron los siguientes parámetros a partir del modelo de PSpice del transistor $BC548$ a utilizar:

- $C_{je} = 11{,}5$ $[pF]$
- $C_{\mu 0} = 0{,}5$ $[pF]$
- $\tau_F = 409{,}5$ $[ns]$
- $V_{je} = 0{,}5$ $[V]$
- $V_{jc} = 0{,}57$ $[V]$

1.2.1. Cálculo de la frecuencia de corte inferior:

En la Fig. 1.2 se puede ver el circuito equivalente para el análisis de la frecuencia de corte inferior.

Para considerar el efecto de C_1 sobre la f_L, se deben cortocircuitar C_2 y C_E tal y como se muestra en la Fig. 1.3(a). Entonces, la impedancia vista por C_1 será:

$$R_{C1} = R_s + R_B \parallel r_\pi \tag{1.10}$$

donde $r_\pi = h_{fe} {}^{V_t}/_{I_C}$.

Por tanto, la frecuencia de corte inferior debida a C_1 será:

$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi R_{C1} C_1} \tag{1.11}$$

Ahora, la frecuencia equivalente a C_2 se dará cortocircuitando C_1 y C_E como se ve en la Fig. 1.3(b). La impedancia vista por C_2:

$$R_{C2} = R_C + R_L \tag{1.12}$$

Y la frecuencia de corte debida a C_2:

$$f_{C2} = \frac{1}{2\pi R_{C2} C_2} \tag{1.13}$$

Y el mismo criterio se aplica para el cálculo de la frecuencia debida a C_E, cortocuircuitando C_1 y C_2 como se ve en la Fig. 1.3(c):

$$R_{CE} = R_E \parallel \frac{r_\pi + (R_s \parallel R_B)}{1 + \beta_f} \tag{1.14}$$

$$f_{CE} = \frac{1}{2\pi R_{CE} C_E} \tag{1.15}$$

Entonces, la frecuencia de corte inferior estará dada por la mayor frecuencia entre f_{C1}, f_{C2} y f_{CE} (dependiendo de cuál es el capacitor más dominante):

- $f_{C1} = 29{,}19\ [Hz]$
- $f_{C2} = 24{,}53\ [Hz]$
- $f_{CE} = 24{,}53\ [Hz]$

Finalmente, se nota que $f_L = f_{C1} = 29{,}19\ [Hz]$.

1.2.2. Cálculo de la frecuencia de corte superior:

En la Fig. 1.4(sup.) se puede observar el circuito equivalente a analizar.

Teniendo en cuenta la definición de transconductancia interna del transistor $g_m = {}^{I_C}/_{V_t}$, se puede calcular la capacitancia equivalente en la base:

$$C_b = \tau_F g_m = \tau_F \frac{I_C}{V_t} = 409{,}5 \times 10^{-9} \frac{1 \times 10^{-3}}{26 \times 10^{-3}} = 15{,}75\ [nF] \tag{1.16}$$

Entonces, a partir de C_b, la capacitancia C_π será:

$$C_\pi = C_b + C_{je} = 15{,}75 \times 10^{-9} + 11{,}5 \times 10^{-12} = 15{,}76\ [nF] \tag{1.17}$$

Luego, la capacitancia C_μ estará dada según:

$$C_\mu = \frac{C_{\mu 0}}{\left[1 + {}^{V_{CB}}/_{V_{je}}\right]^{1/3}} \tag{1.18}$$

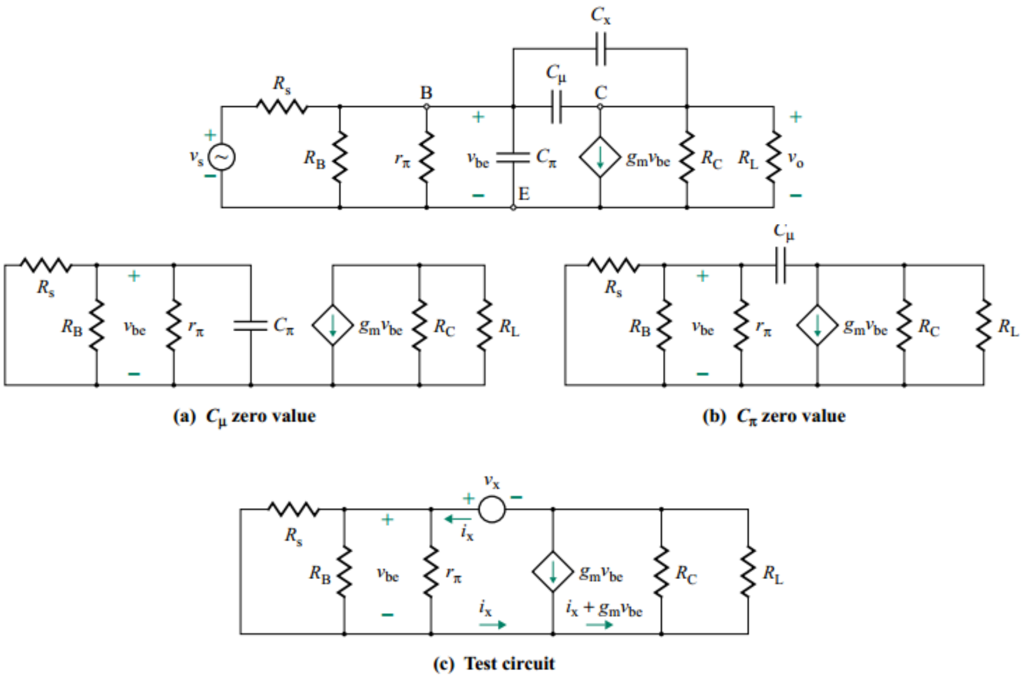

Figura 1.4: Circuito equivalente de señal para el análisis de la frecuencia de corte superior (figura superior) y circuitos equivalentes para la aplicación del método del valor cero (figura inferior)

Observando el circuito de polarización, se pueden calcular los voltajes en los puntos de colector y base según:

$$V_C = V_{CE} + I_E R_E = V_{CE} + \frac{h_{FE}+1}{h_{FE}} I_C R_E = 5{,}4 + 1 \times 10^{-3} \times 1195 \ \therefore \ V_C = 6{,}59 \ [V]$$

$$V_B = V_{BE} + I_E R_E = V_{BE} + \frac{h_{FE}+1}{h_{FE}} I_C R_E = 0{,}7 + 1 \times 10^{-3} \times 1195 \ \therefore \ V_B = 1{,}89 \ [V]$$

Por tanto, el voltaje colector-base estará definido como:

$$V_{CB} = V_C - V_B = 6{,}59 - 1{,}89 = 4{,}69 \ [V]$$

Finalmente, la capacitancia C_μ será:

$$C_\mu = \frac{0{,}5 \times 10^{-9}}{\left[1 + {}^{4{,}69}/_{0{,}5}\right]^{1/3}} = 0{,}23 \ [nF] \tag{1.19}$$

Ahora, aplicando el método de valor cero al abrir C_μ como se ve en la Fig. 1.4(a), se puede calcular la resistencia vista desde C_π:

$$R_{C\pi} = r_\pi \parallel (R_s \parallel R_B) \tag{1.20}$$

Luego, el equivalente con $C_\pi$abierto se puede ver en la Fig. 1.4(b). Si se reemplaza C_μ por una fuente de voltaje v_x como se ve en la Fig. 1.4(c), según la Ley de Voltajes de Kirchhoff (LVK), se puede obtener:

$$v_x = v_{be} + (R_L \parallel R_C)(i_x + g_m v_{be}) = R_i i_x + (R_L \parallel R_C)(i_x + g_m R_i i_x)$$

donde $R_i = r_\pi \parallel R_s \parallel R_B$.

Por tanto:

$$v_x = i_x \left[(R_L \parallel R_C) + R_i \left(1 + g_m R_L \parallel R_C \right) \right]$$

$$R_{C\mu} = \frac{v_x}{i_x} = R_L \parallel R_C + R_i \left[1 + g_m \left(R_L \parallel R_C \right) \right] \tag{1.21}$$

De esta forma, la frecuencia de corte superior estará dada según:

$$f_H = \frac{1}{2\pi \left[R_{C\pi} C_\pi + R_{C\mu} C_\mu \right]} = 43 \ [kHz]$$