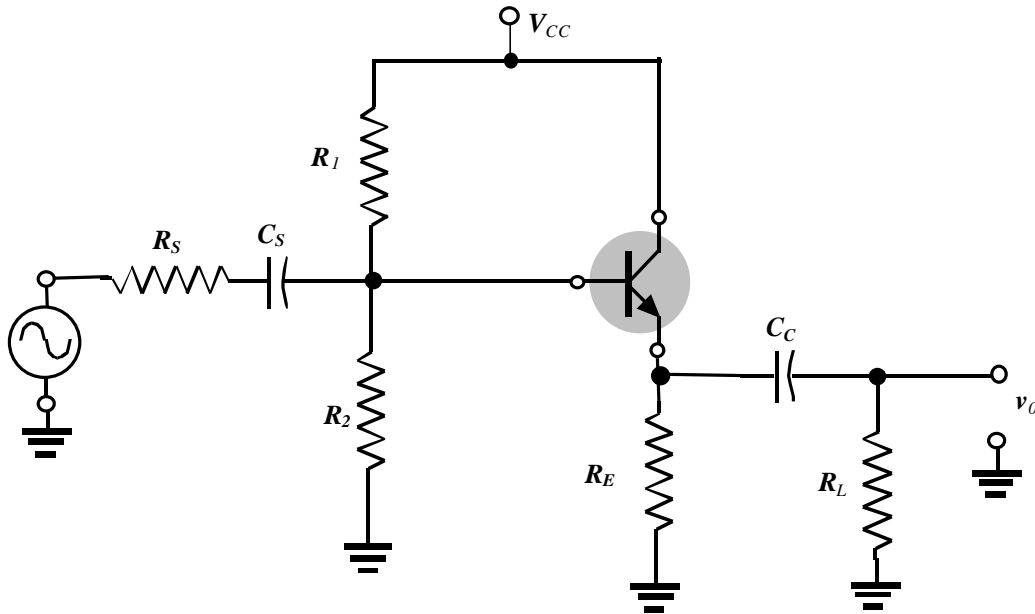


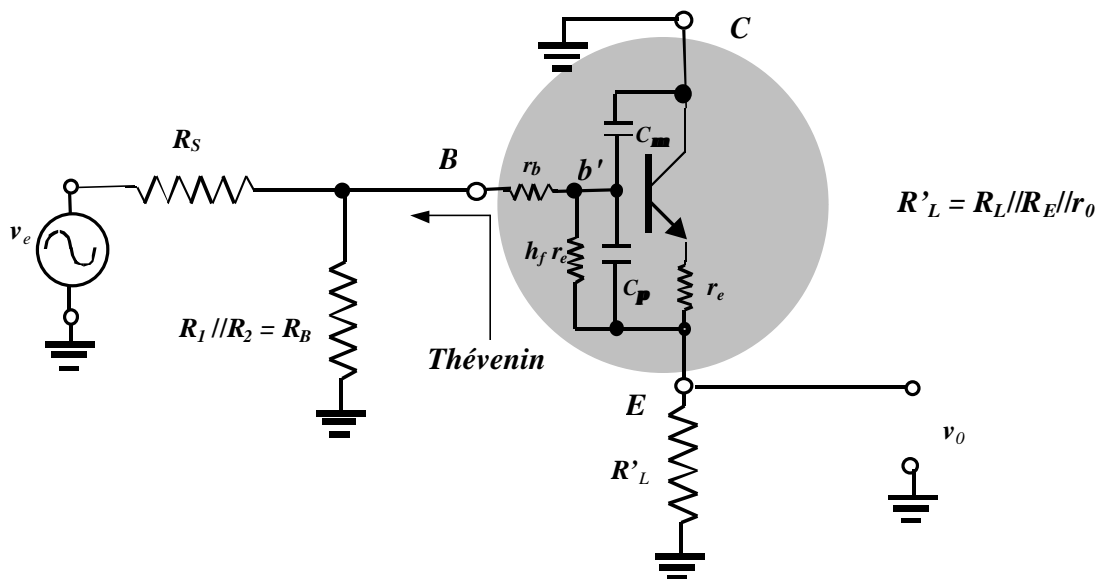
- **Amplificador seguidor de emissor (coletor comum).**

O amplificador seguidor de emissor é largamente utilizado como estágio de buffer, deslocador de nível ou estágio de saída e assim, a sua resposta em frequência é de grande interesse. Considere o circuito seguidor de emissor mostrado abaixo. A configuração utilizada para polarização DC é a do divisor de tensão, mas esta análise se aplica para qualquer tipo de configuração.



Amplificador seguidor de emissor - Análise em altas frequências

A figura abaixo mostra o circuito equivalente deste amplificador para altas frequências.



Circuito equivalente

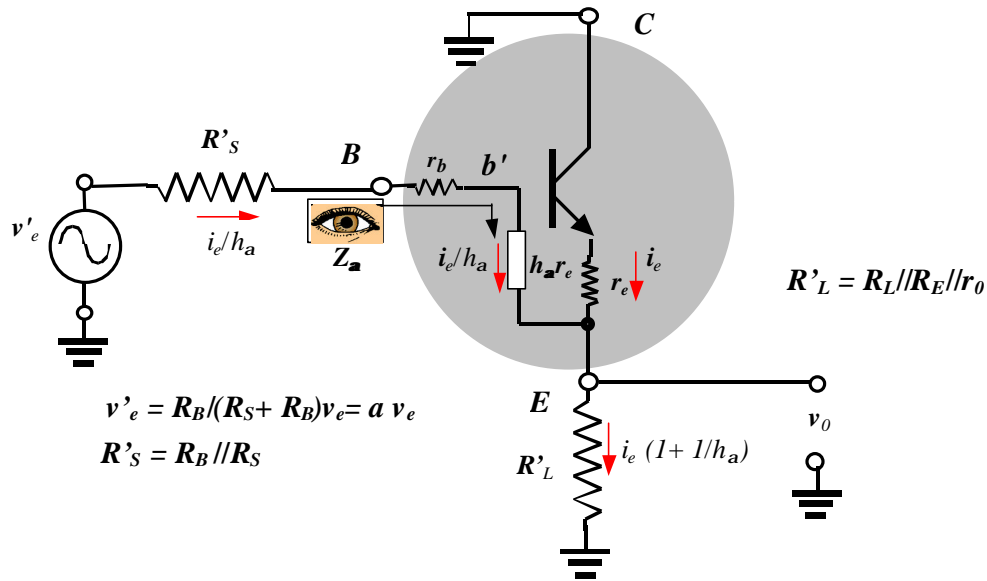
Primeiramente, vamos **desprezar o efeito do capacitor C_m** , o que é sempre razoável se a impedância de fonte (R_S), for pequena, assim o filtro passa baixas formador por $R_S + r_b$ e C_m apresenta um pólo em frequência muito elevada ($\gg f_T$).

Novamente, é conveniente desenhar o circuito acima (como já fizemos) com a impedância entre a base b' e o emissor E na forma

$$h_f r_e // 1/s r_e C_p = h_a r_e \quad \text{onde}$$

$$h_a = h_f / (1 + s h_f r_e C_p) \quad (199)$$

Substituindo a impedância e aplicando Thévenin na entrada do circuito equivalente acima resulta



Circuito equivalente com h_a desprezando-se C_m

A impedância Z_a , por inspeção, é dada por:

$$Z_a = h_a r_e + (h_a + 1) R'_L = h_a R_a \quad (200)$$

onde

$$R_a = r_e + (1 + 1/h_a) R'_L$$

$$R_a = r_e + (1 + 1/h_f + s r_e C_p) R'_L \gg r_e + (1 + s r_e C_p) R'_L \quad (201)$$

Da malha base emissor, temos

$$v'_e = (R'_S + r_b) i_e / h_a + Z_a / h_a i_e$$

$$v'_e = (R'_S + r_b) i_e / h_a + R_a i_e$$

Substituindo h_a e R_a , resulta

$$v'_e = [(R'_S + r_b)(1/h_f + s r_e C_p) + r_e + (1 + s r_e C_p)R'_L] i_e \quad (202)$$

Por outro lado

$$v_0 = R'_L (1 + 1/h_a) i_e = R'_L (1 + 1/h_f + s r_e C_p) i_e$$

$$v_0 \gg R'_L (1 + s r_e C_p) i_e \quad (203)$$

Eliminando i_e em (202) e (203), resulta

$$\begin{aligned} v_0/v'_e &= R'_L (1 + s r_e C_p) / [(R'_S + r_b)(1/h_f + s r_e C_p) + r_e + (1 + s r_e C_p)R'_L] \\ v_0/v'_e &= R'_L / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L] \cdot (1 - s/z_1) / (1 - s/p_1) \end{aligned} \quad (204)$$

onde

$$z_1 = -1/r_e C_p \gg -w_T$$

$$p_1 = -1/k r_e C_p$$

$$k = (R'_S + r_b + R'_L) / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L] \quad (205)$$

Note que v'_e está relacionado com o sinal de entrada v_e de forma puramente resistiva (parâmetro a na figura), de maneira que z_1 e p_1 , são, respectivamente, o zero e o pólo do amplificador.

A equação (204) mostra que o ganho em altas frequências é controlado pela presença do pólo p_1 e do zero z_1 . Para sistemas com baixa impedância de fonte ($R_S \ll R'_L$) o valor de k na equação (205) é próximo da unidade e o pólo p_1 é muito próximo de $-w_T$. Por outro lado se $R_S \gg R'_L$, o pólo $|p_1|$ será muito menor que w_T .

Para frequência média frequências ($s \ll |p_1|$), a equação (205) torna-se

$$v_0/v'_e \big|_{s \ll |p_1|} = R'_L / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L]$$

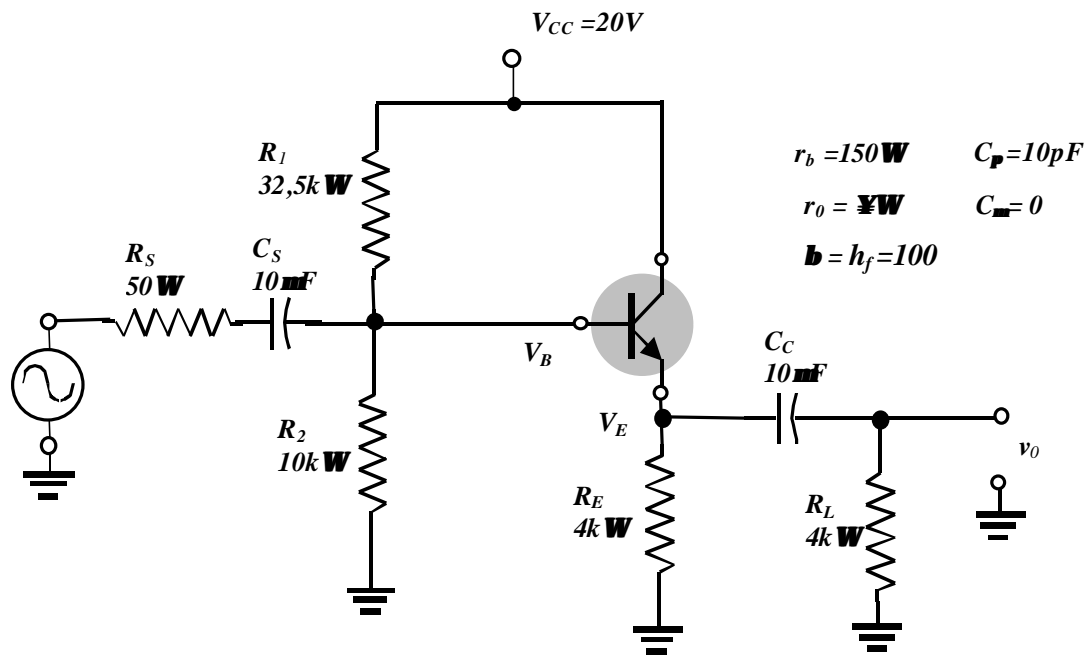
E para frequências muito altas frequências ($s \gg |z_1|$), a equação (205) tende para

$$v_0/v'_e \big|_{s \gg |z_1|} \approx R'_L / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L] \cdot (p_1/z_1) = R'_L / (R'_S + r_b + R'_L)$$

Até aqui não consideramos nenhuma influência de C_m . De fato o efeito de C_m fará uma mudança considerável na resposta em frequência do amplificador como veremos mais adiante. Por enquanto vamos desprezar o seu efeito e realizarmos o exercício abaixo.

Exercício:

Calcule o pólo e zero do amplificador seguidor de emissor mostrado abaixo e esboce a sua resposta em alta frequência. Despreze o efeito de C_m



Solução:

a) Análise DC

Temos que $(\beta + 1)R_E = 400k\Omega \gg R_2 > R_2 // R_1$, portanto

$$V_B \approx R_2 / (R_1 + R_2) V_{CC} = 10k\Omega / (10k\Omega + 32,5k\Omega) 20V \approx 4,7V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 4,7V - 0,7V = 4V$$

$$I_C \approx I_E = 4V / 4k\Omega = 1mA$$

$$r_e = V_T / I_C = 26mV / 1mA = 26\Omega$$

b) Análise AC (altas frequências)

temos

$$z_I = -1/r_e C_p \gg -w_T$$

$$p_I = -1/k r_e C_p$$

$$k = (R'_S + r_b + R'_L) / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L]$$

onde

$$R'_S = R_1 // R_2 // R_S \quad \text{da figura } R'_S \gg R_S = 50W \quad e$$

$$R'_L = R_L // R_E // r_o = R_L // R_E = 4kW // 4kW = 2kW \quad \text{logo}$$

$$k = (50W + 150W + 2kW) / [(50W + 150W)/100 + 26W + 2kW]$$

$$k = (2200W) / (2028W) = 1,08$$

Assim

$$z_I = -1/r_e C_p = -1/(26W)(10pF) = -3,85 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

ou

$$f_{zI}(\text{Hz}) = |z_I| / 2\pi \gg \mathbf{612MHz}$$

$$p_I = -1/k r_e C_p = z_I / k = 3,56 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

$$f_{pI}(\text{Hz}) = |p_I| / 2\pi k = \mathbf{566MHz}$$

• **Valores limites**

Ganho em média frequências ($v_o/v'_e \big|_{\text{média}}$)

$$v_o/v'_e \big|_{s \ll |p_I|} = R'_L / [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L] = (2kW) / [(50W + 150W)/100 + 26W + 2kW]$$

$$v_o/v'_e \big|_{s \ll |p_I|} = (2kW) / (2,028kW) \gg \mathbf{0,986}$$

Ganho em muito altas frequências ($v_o/v'_e \big|_{s \gg z_I}$)

$$v_o/v'_e \big|_{s \gg |z_I|} = R'_L / (R'_S + r_b + R'_L) = (2kW) / [50W + 150W + 2kW]$$

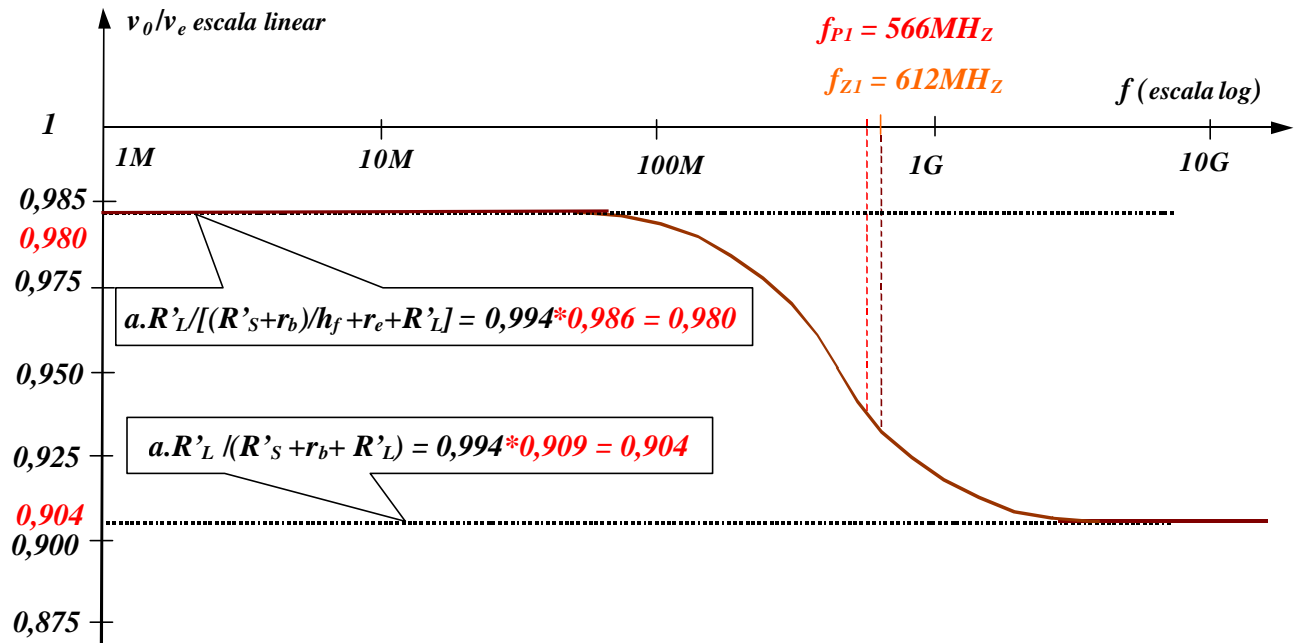
$$v_o/v'_e \big|_{s \gg |z_I|} = (2kW) / (2,2kW) \gg \mathbf{0,909}$$

Além disso

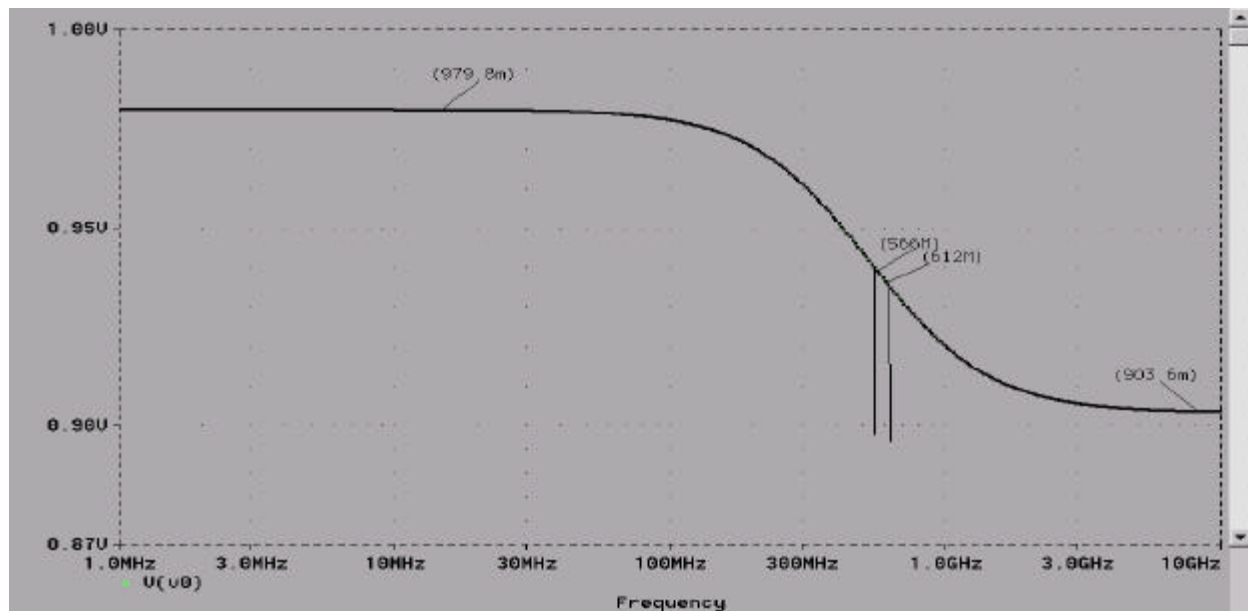
$$a = R_B / (R_S + R_B) = 10 \text{ k}\Omega / [50 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega / 32,5 \text{ k}\Omega]$$

$$a = 0,994 \quad \text{portanto}$$

$$v_e = 0,994 v'_e$$



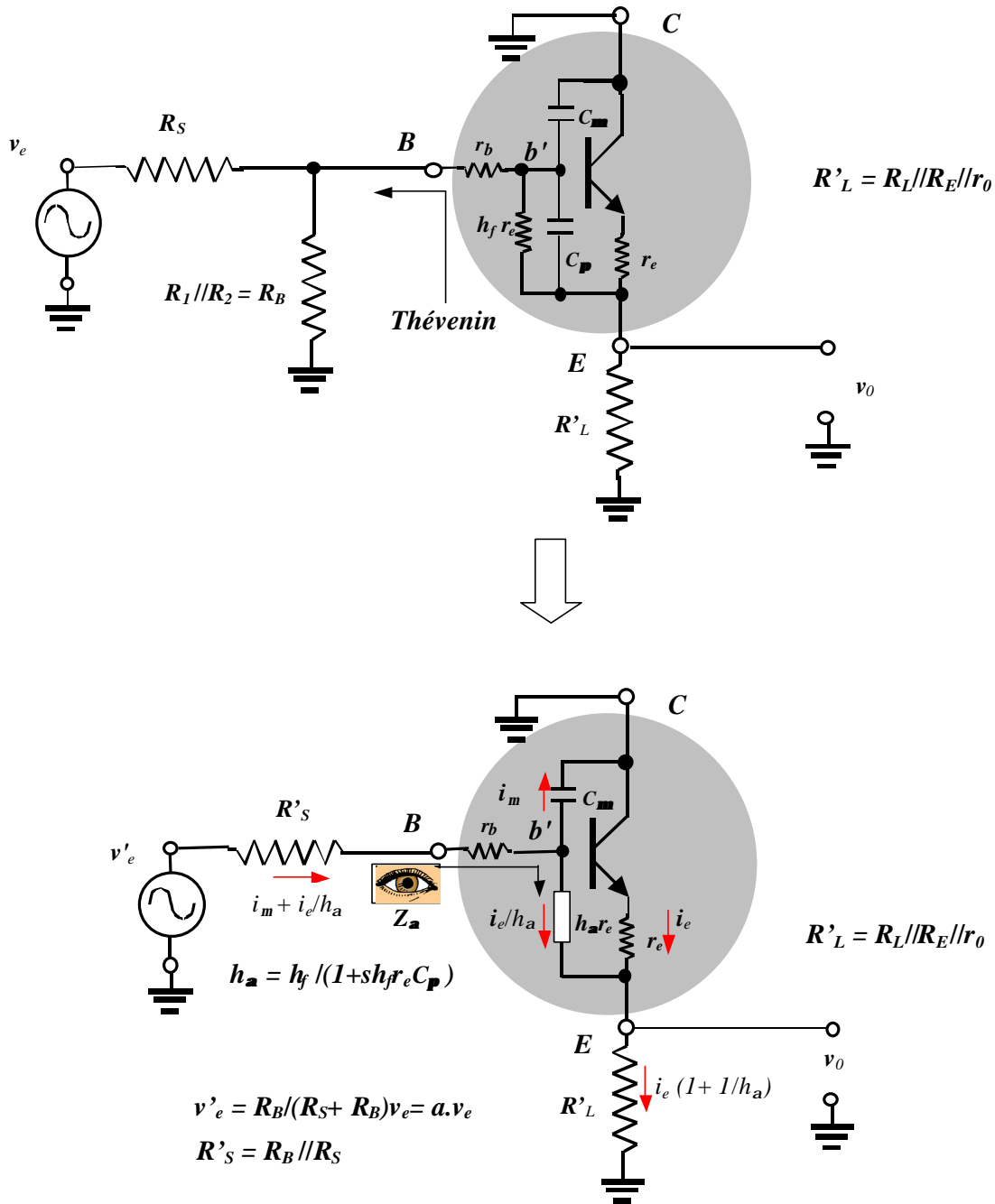
Resposta em alta frequência de um seguidor de emissor com $C_{\mu} = 0$



Simulação

Agora, vamos **levar em conta o efeito do capacitor C_{μ}** . Novamente, é conveniente desenhar o circuito acima com a impedância, h_a , entre a base b' e o emissor.

Substituindo a impedância h_a e aplicando Thévenin na entrada do circuito abaixo, resulta



Circuito equivalente com C_{μ}

A tensão no ponto b' é dada por:

$$v_{b'} = i_m / sC_m = Z_a i_e / h_a \quad \text{isto é,}$$

$$i_m = (sC_m Z_a) i_e / h_a \quad (206)$$

Substituindo (200) em (206), resulta

$$i_m = sC_m \underbrace{[r_e + (1 + 1/h_a)R'_L]}_{R_a} i_e = sC_m R_a i_e \quad (207)$$

Da malha base coletor, temos

$$v'_e = (R'_S + r_b)(i_m + i_e/h_a) + i_m/sC_m \quad (208)$$

Substituindo (206) em (208), resulta

$$v'_e = [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + R_a] i_e$$

Portanto

$$i_e = v'_e / [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + R_a] \quad (209)$$

Da malha base emissor, temos

$$v'_e = (R'_S + r_b)(i_m + i_e/h_a) + r_e i_e + v_0 \quad (210)$$

Substituindo (206) em (210), resulta

$$v'_e = [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + r_e] i_e + v_0 \quad (211)$$

Substituindo (209) em (211), resulta

$$v'_e = [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + r_e] / [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + R_a] v'_e + v_0$$

ou

$$v_0 / v'_e = (1 + 1/h_a)R'_L / [(R'_S + r_b)(sC_m R_a + 1/h_a) + R_a] \quad (212)$$

A relação entre v'_e e v_e é ($v'_e = a.v_e$) puramente resistiva de maneira

Substituindo h_a e R_a na equação (212), resulta

$$v_0 / v'_e = k.N(s)/D(s)$$

onde

$$k = R'_L/R$$

$$R = [(R'_S + r_b)/h_f + r_e + R'_L]$$

$$N(s) = 1 + 1/h_f + s r_e C_p \gg 1 + s r_e C_p = 1 - s/z_1 \quad (213)$$

$$D(s) = 1 + s(k_1 C_p + k_2 C_m)/R + s^2 k_3/R$$

$$k_1 = r_e R'_L [(R'_S + r_b)/R'_L + 1]$$

$$k_2 = (R'_S + r_b)[r_e + (1 + 1/h_f)R'_L] \gg (R'_S + r_b)(r_e + R'_L)$$

$$k_3 = (R'_S + r_b)r_e R'_L$$

Para baixa impedância de fonte ($R_S \ll R'_L$) as aproximações abaixo podem ser feitas.

$$R \gg R'_L + r_e$$

$$k_1 \gg r_e R'_L$$

então

$$k_3/R = (R'_S + r_b)r_e R'_L/(R'_L + r_e) = k_1 k_2/R = (R'_S + r_b)(r_e R'_L)/(R'_L + r_e)$$

$$D(s) = 1 + s(k_1 C_p + k_2 C_m)/R + s^2 k_1 k_2/R C_p C_m \quad (214)$$

Se p_1 e p_2 são os pólos de $D(s)$ então este pode ser escrito na forma

$$D(s) = (1 - s/p_1)(1 - s/p_2) = 1 - s(1/p_1 + 1/p_2) + s^2/p_1 p_2 \quad (215)$$

Comparando os coeficientes s e s^2 nas equações (214) e (215) podemos identificar

$$p_1 = -1/k_1/R C_p = -r_e R'_L/(R'_L + r_e) C_p = -1/R'_L/r_e C_p$$

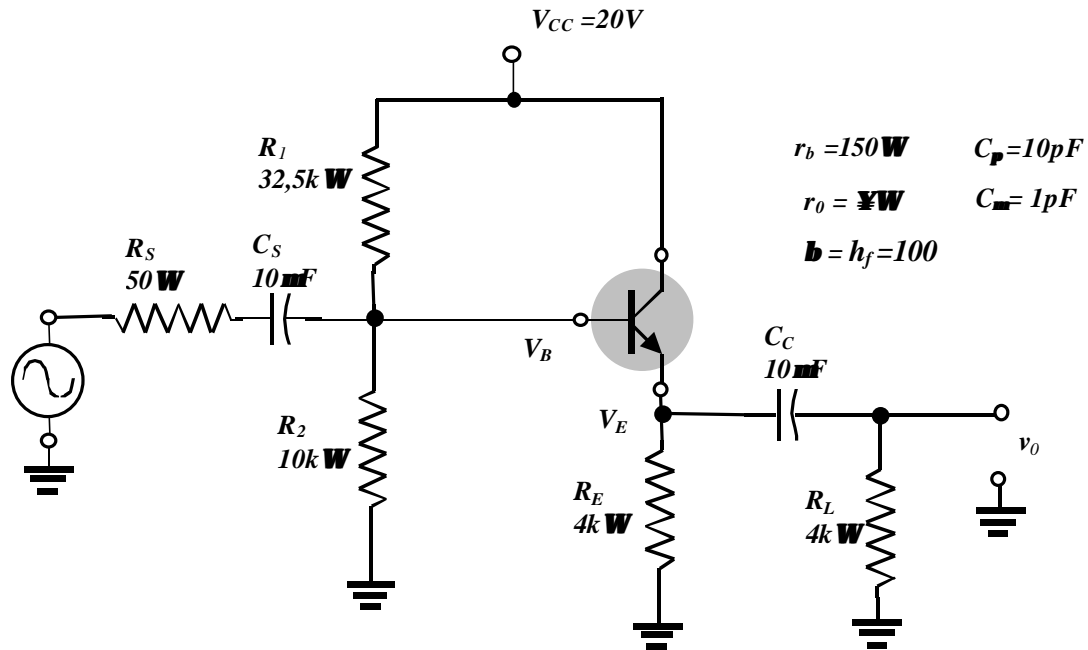
e

$$p_2 = -1/k_2/R C_u = -1/(R'_S + r_b)(r_e + R'_L)/(R'_L + r_e) C_u = -1/(R'_S + r_b) C_u$$

A equação (213) mostra que o amplificador apresenta um zero em $-1/r_e C_p$ (como antes). Além disso, que o efeito de C_u é de adicionar além do pólo p_1 (como antes) um pólo em $p_2 = -(R'_S + r_b)C_u$, ou seja, formado pela filtro de combinação de $(R'_S + r_b)$ e C_u como já comentado anteriormente. Estes parâmetros foram encontrados para baixa impedância de fonte.

• **Exercício:**

Calcule os pólos e zero do amplificador seguidor de emissor (o mesmo do exercício anterior) mostrado abaixo e esboce a sua resposta em alta frequência levando em conta o efeito de C_m



Solução:

a) *Análise DC (igual ao exercício anterior)*

$$I_C \approx I_E = 4V / 4\ k\Omega = 1mA$$

$$r_e = V_T / I_C = 26mV / 1mA = 26\ \Omega$$

b) *Análise AC (altas frequências)*

$$z_1 = -1/r_e C_p \gg -\omega_T$$

$$p_1 = -1/R'_L / r_e C_p \quad e$$

$$p_2 = -1/(R'_S + r_b) C_u \quad \text{onde}$$

$$R'_L / r_e = R_E // R_L / r_e = 4k\Omega // 4k\Omega // 26\Omega \gg 26\ \Omega$$

$$R'_S + r_b = R_1 // R_2 / R_S + r_b \gg R_S + r_b = 200\ \Omega \quad \text{então}$$

$$z_1 = -1/r_e C_p = -1/(26W)(10pF) = -3,85 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

ou

$$f_{z1}(Hz) = |z_1|/2\pi \gg 612MHz$$

$$p_1 = -1/R'_L/r_e C_p = -1/(26W)(10pF) = -3,85 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

$$f_{p1}(Hz) = |p_1|/2\pi \gg 612MHz$$

$$p_2 = -1/(R'_S + r_b)C_u = -1/(200W)(1pF) = -5,0 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

$$f_{p2}(Hz) = |p_2|/2\pi \gg 796MHz$$

- **Valores limites**

Ganho em média frequências ($v_o/v'_e \big|_{s \ll |p_1|}$) (igual ao exercício anterior)

$$v_o/v'_e \big|_{s \ll |p_1|} = k = R'_L/R = R'_L/(R'_L + r_e) = 2kW/[26W + 2kW]$$

$$v_o/v'_e \big|_{s \ll |p_1|} = (2kW)/(2,026kW) \gg 0,987$$

Ganho em muito altas frequências ($v_o/v'_e \big|_{s \gg p_2}$)

$$v_o/v'_e \big|_{s \gg |p_2|} = k.N(s)/D(s) = R'_L/(R'_L + r_e) \cdot (1-s/z_1)/(1-s/p_1)(1-s/p_2)$$

com $z_1 = p_1$ (o pólo p_1 é cancelado com o zero z_1)

$$v_o/v'_e \big|_{s \gg |p_2|} = R'_L/(R'_L + r_e) \cdot 1/(1-s/p_2)$$

que é um sistema com um simples pólo em p_2 .

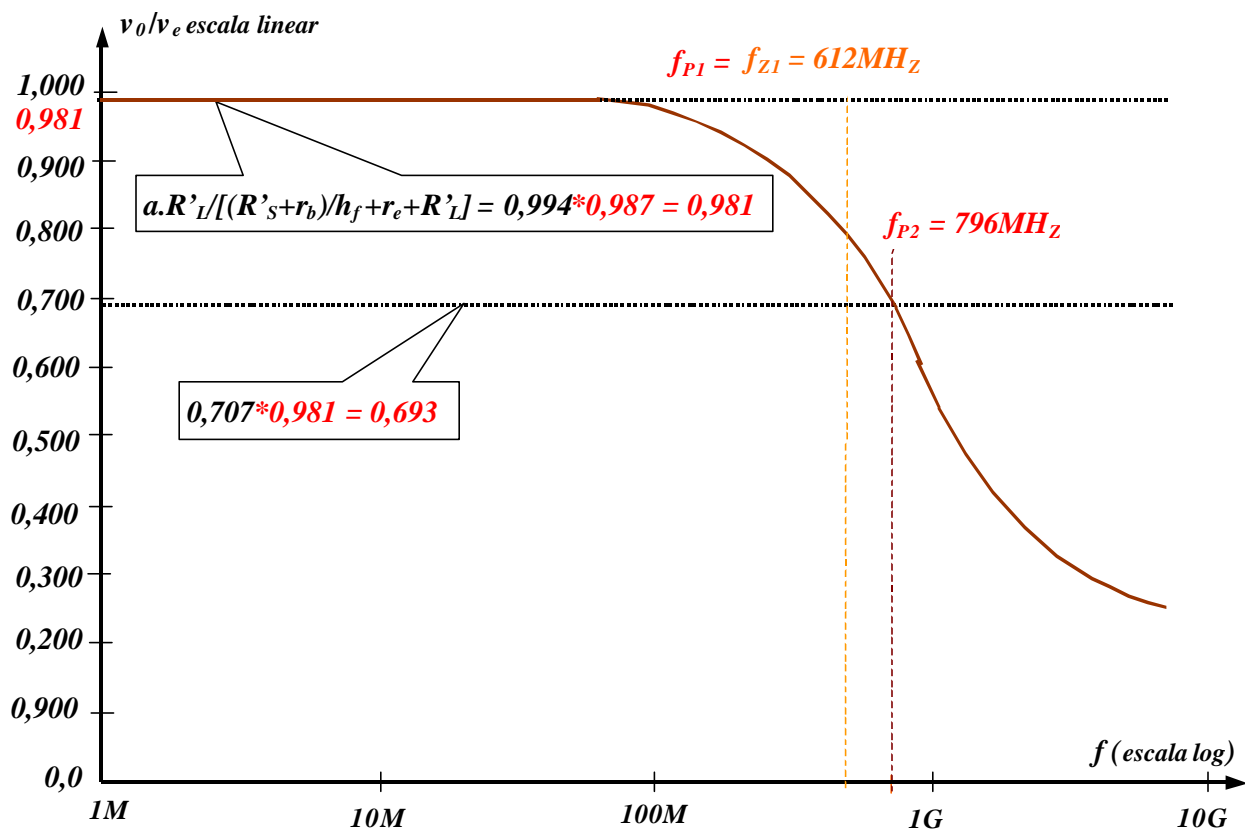
Temos ainda,

$$a = R_B/(R_S + R_B) = 10kW//32,5kW/[50W + 10kW//32,5kW]$$

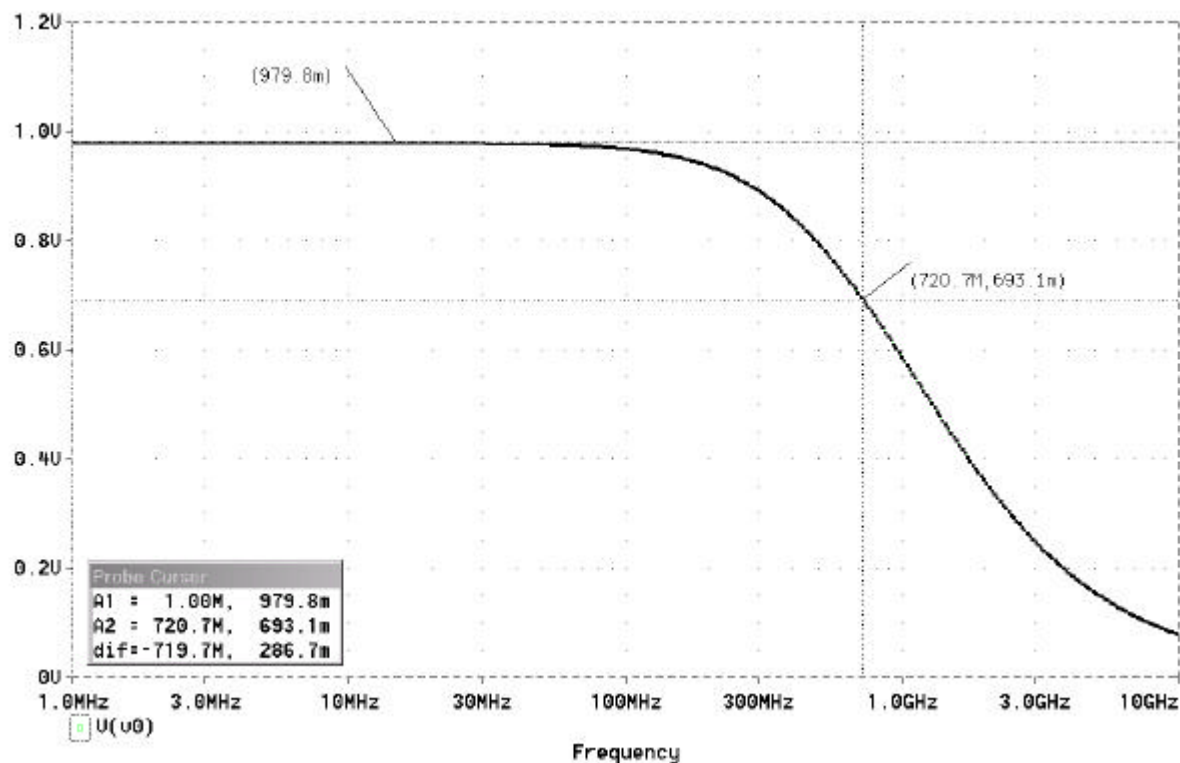
$$a = 0,994 \quad \text{portanto}$$

$$v_e = 0,994 v'_e$$

A figura abaixo mostra o gráfico da resposta em alta frequência com e sem o efeito de C_u .



Resposta em alta frequência de um seguidor de emissor com $C_{\pi} = 1\text{pF}$



Simulação