• *Resposta em freqüência de amplificadores.*

Considerações gerais

As figuras abaixo mostram gráficos típicos do ganho versus freqüência de um amplificador. Note que há uma faixa de freqüência na qual o valor do ganho é igual ou próximo ao valor nas freqüências médias. Para escolhermos os limites de freqüência em que temos um ganho relativo, $0{,}707A_{vméd}$ é o ganho escolhido para especificar as freqüências que delimitam esta faixa (freqüências de corte). As freqüências f_1 e f_2 são chamadas freqüências de cortes, inferior e superior respectivamente e f_2 - f_1 é a largura de banda ou faixa de passagem –3dB do amplificador.

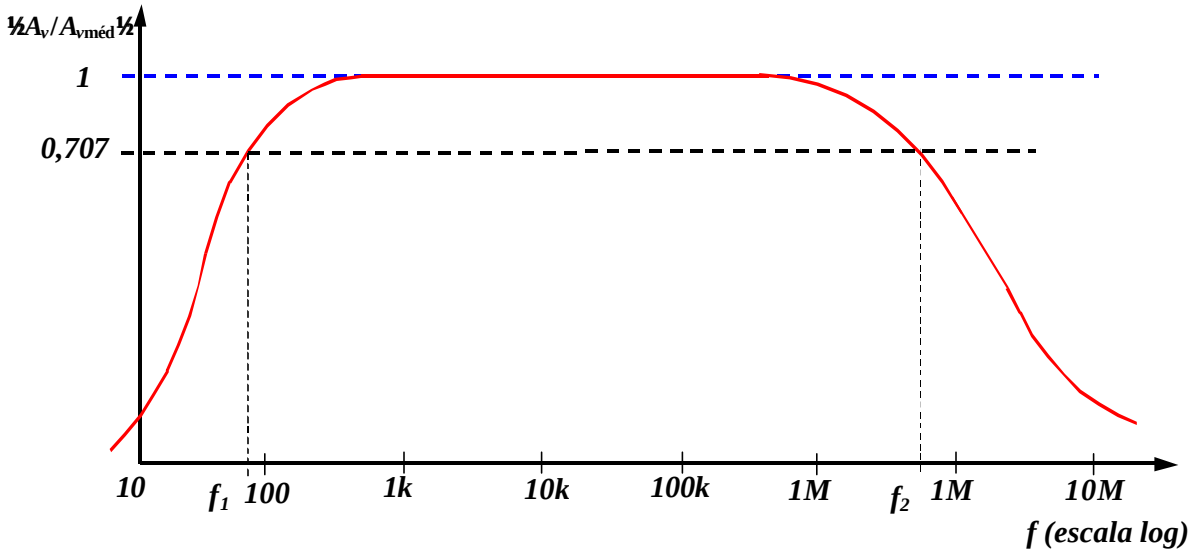


Gráfico do ganho normalizado versus freqüência

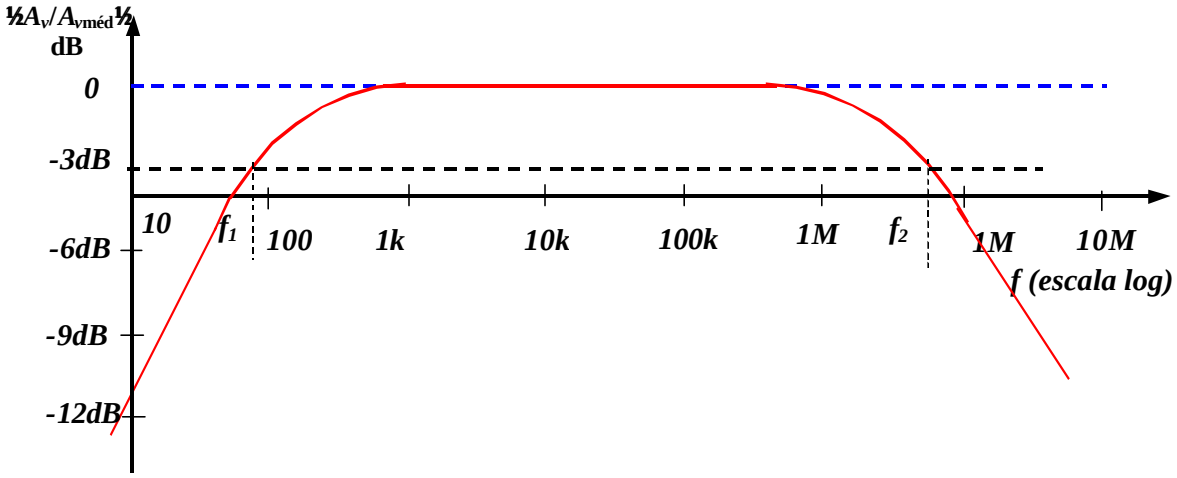
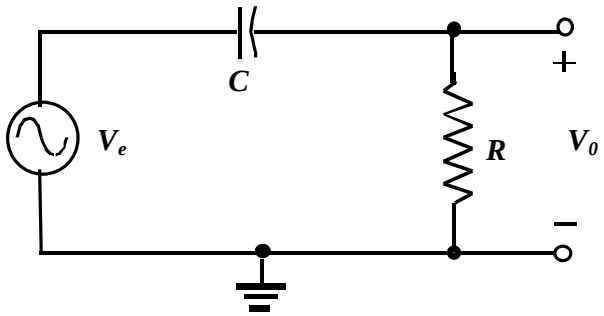


Gráfico do ganho normalizado em dB versus freqüência

- ***Análise para baixa freqüência – Diagrama de Bode***

Para o Amplificador a transistor Bipolar de único estágio, nas baixas freqüências, quem determina a freqüência de corte inferior é a combinação de R-C formada pelos capacitores de bloqueio DC, desaclopamento de emissor e os parâmetros resistivos. Na verdade, pode-se estabelecer para cada elemento capacitivo um circuito RC semelhante ao da figura abaixo, e determinar a freqüência na qual o ganho de tensão cai a 0,707 (Ö2) do seu valor máximo. Uma vez determinadas as freqüências de corte para cada capacitor, a freqüência de corte inferior pode ser levantada.



$X_C = 1/j2\pi fC$

Combinação RC que derteminará a frequência de corte inferior (Passa altas)

As tensões de entrada e saída são relacionadas pelas regra do divisor de tensão:

$V_0 = R/(R+X_C).V_e$

com a amplitude de V_0 (módulo) determinada por:

$|V_0| = \{[R/(R+X_C)].[R/(R+X^*_C)]\}^{1/2} . |V_e|$

onde X^*_C é o complexo comjugado de X_C, assim

$|V_0| = R/(R^2+X^2_C)^{1/2}|V_e|$

Para o caso especial em que R = $|X_C|$

$|V_0| = 1/(2)^{1/2}|V_e|$ ***e***

$|A_v|_{R=X_C} = |V_0/V_e| = 0,707$

Em logarítmo,

$G_v = 20\log A_v = 20\log(0{,}707) = -3dB$

Portanto a frequencia de corte inferior é determinada de

$X_C = 1/2pf_1C = R \Rightarrow \boxed{f_1 = 1/2pRC}$

Em freqüências muito altas,

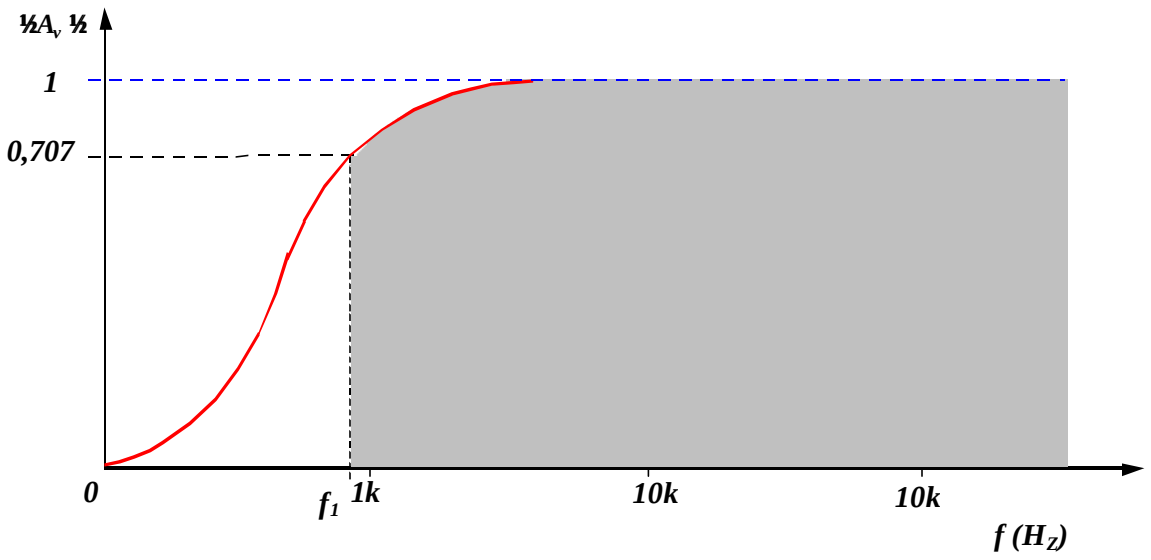
$|X_C| = 1/2pfC \gg 0$

e o capacitor pode ser substituido por um curto cirtuito equivamente. O resultado é que $V_0 \gg V_e$ *para altas freqüências . Em* $f = 0H_Z$,

$|X_C| = 1/2pfC$ ® ¥ W

e o resultado é $V_0 \gg 0V$.

Entre os dois resultados, a razão $½A_v½ = ½V_0 / V_e ½$ *irá variar de forma mostrada na figura abaixo. A medida que a freqüência aumenta, a reatância capacitiva diminui, e maior é a porção de entrada que aparece entre os terminais de saída.*



Resposta em frequencia do circuito RC (passa altas)

Diagrama de Bode

A equação do ganho A_v pode ser escrita na forma

$$A_v = V_0/V_e = R/(R-j/wC) = R/(R-j/2pfC)$$

e considerando a freqüência definida acima,

$$A_v = 1/(1-jf/f_1)$$

Na forma de amplitude e fase,

$$A_v = |A_v| \angle A_v = \underbrace{1/(1+(f_1/f)^2)^{1/2}}_{\text{Amplitude de } V_0} \underbrace{\text{arctang } f_1/f}_{\text{Diferença de fase entre de } V_0 \text{ e } V_e}$$

A amplitude quando $f = f_1$,

$$|A_v| = 1/(1+1)^{1/2} = 1/Ö2 \text{ » } 0{,}707 \rightarrow -3 \text{ dB}$$

e a fase entre $\mathbf{V_0}$ *e* $\mathbf{V_e}$*,*

$$\angle A_v = \text{arctang } 1 = 45°$$

Em logaritmo, o ganho em B é

$$A_{v(dB)} = 20\log[1/(1+(f_1/f)^2)^{1/2}] = -20\log(1+(f_1/f)^2)^{1/2}$$

$$A_{v(dB)} = -10\log(1+(f_1/f)^2)$$

e para $f << f_1$

$$\boxed{A_{v(dB)} \text{ » } -20\log(f_1/f)^2 = -20\log f_1/f} \quad \text{(assíntota)} \qquad (175)$$

E para $f >> f_1$

$$\boxed{A_{v(dB)} \text{ » } -10\log(1) = 0\text{dB}} \quad \text{(assíntota)} \qquad (176)$$

O gráfico das equações (175) e (176) produzirá em uma escala log de freqüência resultados muito utilizados em futuros gráficos em decibel.

O gráfico de assíntotas com os pontos de quebra associados é chamado de ***diagrama de Bode****.*

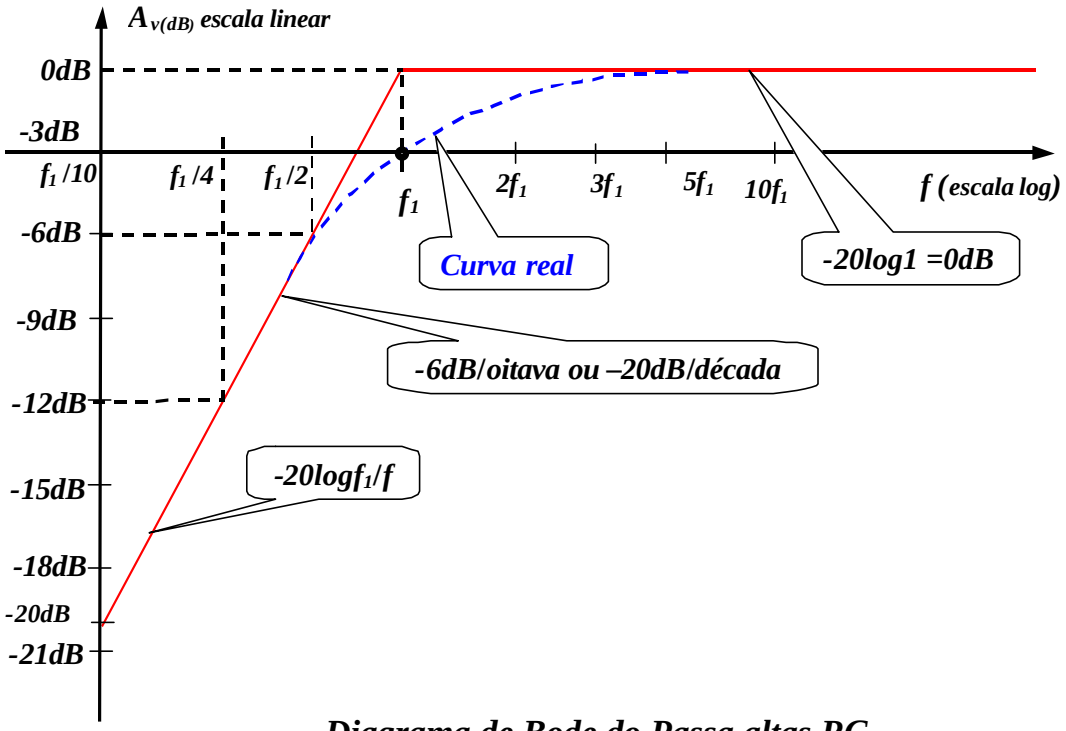
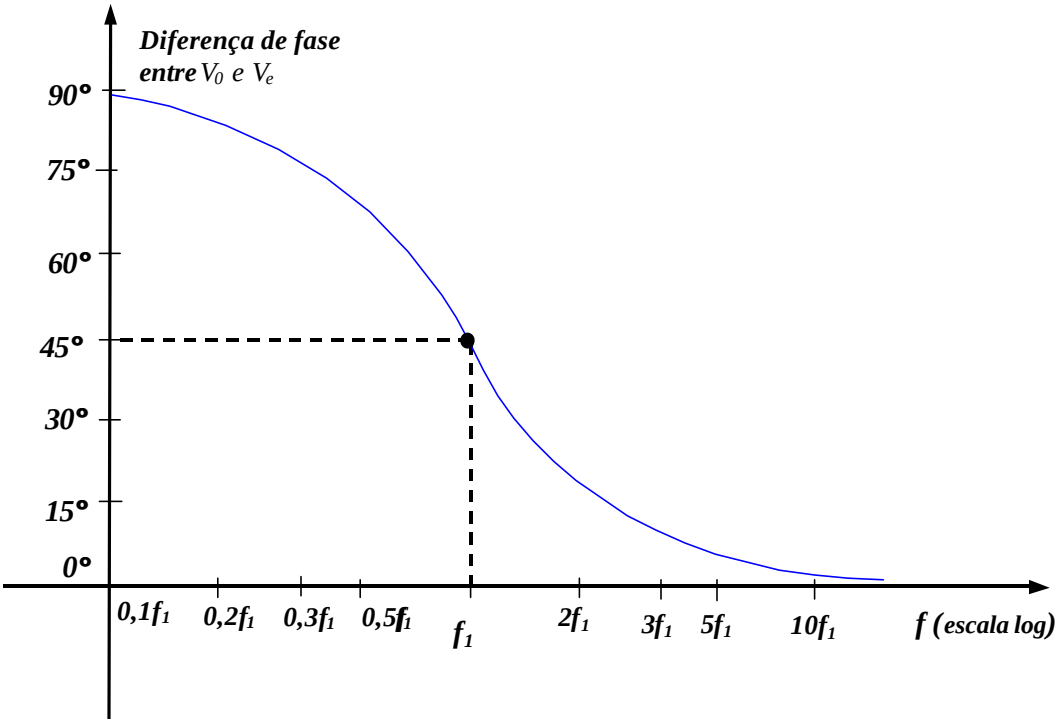


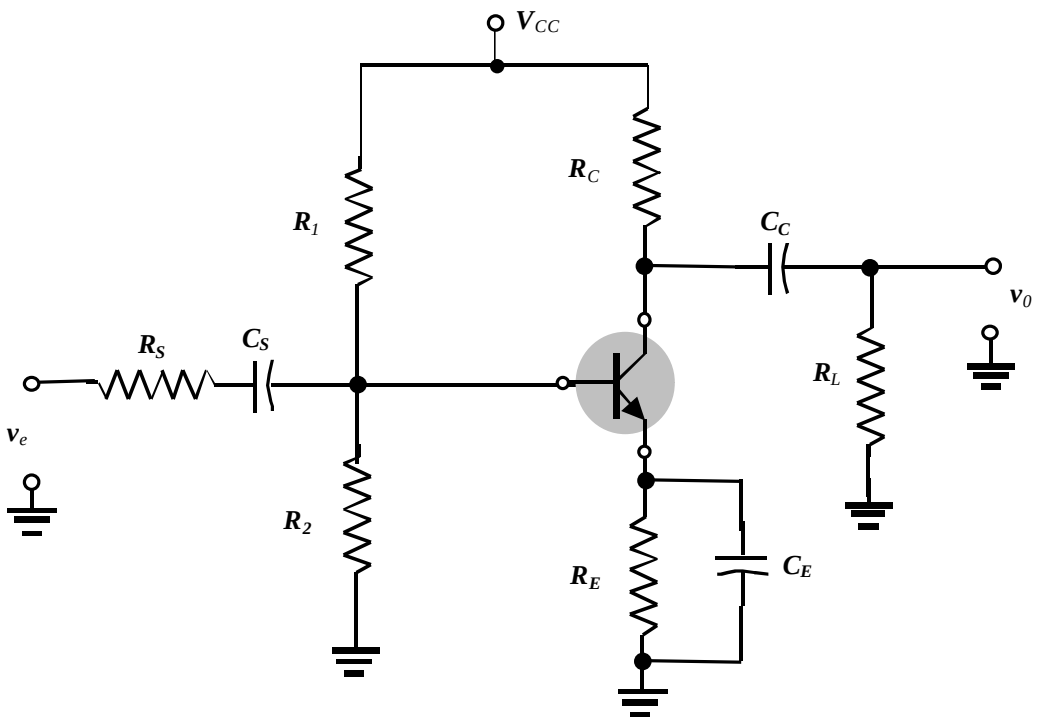
Diagrama de Bode do Passa altas RC



Resposta de fase do Passa altas RC

✓ *Resposta em baixas freqüências - Amplificador a TBJ (Bipolar)*

Análise a ser realizada empregará a configuração de polarização por divisor de tensão com resistor de carga R_L e de fonte R_S, mas os resultados obtidos podem ser aplicados a qualquer configuração do TBJ. Será necessário apenas encontrar a resistência equivalente apropriada para a combinação R-C. Para o circuito da figura abaixo, os capacitores C_S ,C_C e C_E determinarão a resposta em baixas freqüências. Examinaremos agora, o efeito de cada um, independentemente, na ordem listada.

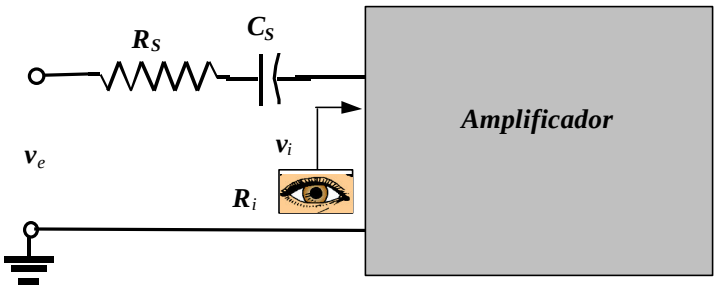


Amplificador com capacitores que afetam a resposta em baixas freqüências

Efeito de C_S

Como C_S está normalmente conectado entre a fonte aplicada e o dispositivo ativo, a forma geral da configuração R-C é estabelecida pelo circuito da figura abaixo. A resistência total é agora $R_S + R_i$ e a freqüência de corte determinada utilizando o procedimento descrito anteriormente é

$$f_{sL} = 1/[2p\,(R_S + R_i)C_s] \qquad (177)$$



Determinando o efeito de C_s na resposta em baixas freqüências

Nas freqüências médias e altas, a reatância capacitiva será pequena o suficiente para considerarmos o elemento um curto circuito. A relação entre v_i e v_e será, portanto,

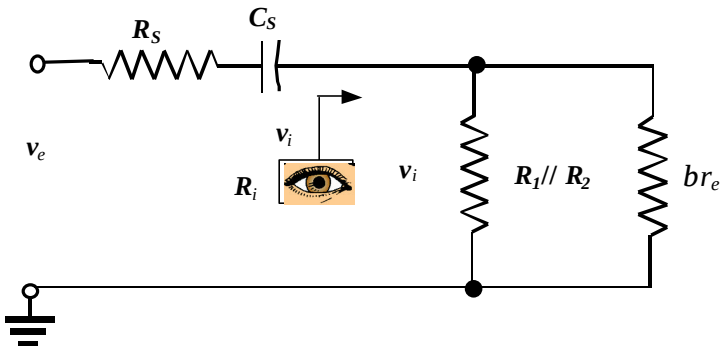
$$V_i = R_i V_s/(R_i + R_s) \qquad (178)$$

Em f_{sL} a tensão será 70,7% do valor determinado pela equação (178), assumindo que C_S é o único elemento capacitivo controlando a resposta em baixas freqüências.

Quando analisamos os efeitos de C_S no circuito do amplificador em questão devemos considerar que C_E e C_C estão operando de modo esperando, pois do contrário a análise torna-se impraticável. Ou seja, consideramos que os valores das reatâncias permitem o emprego de curto circuito equivalente, quando comparado as outras impedâncias em série.Utilizando esta hipótese o circuito equivalente AC para entrada é da forma mostrada abaixo.

O valor de R_i é dado por

$$R_i = R_1//R_2//br_e$$

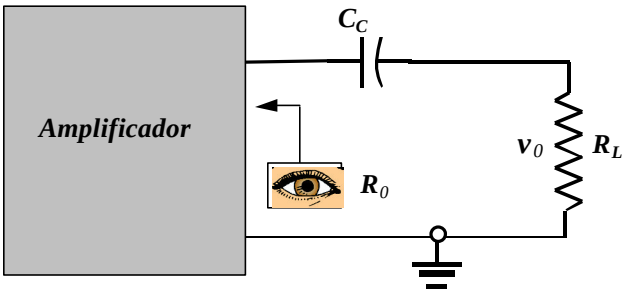


Circuito equivalente de entrada

Efeito de C_C

Como o capacitor de acoplamento está normalmente conectado entre a saída do dispositivo ativo e a carga aplicada, a configuração R-C que determina a freqüência de corte inferior devido a C_C aparece na figura abaixo. Da figura temos que a resistência total em série com o capacitor é agora $R_0 + R_L$ e a freqüência de corte inferior devido a C_C é determinada por

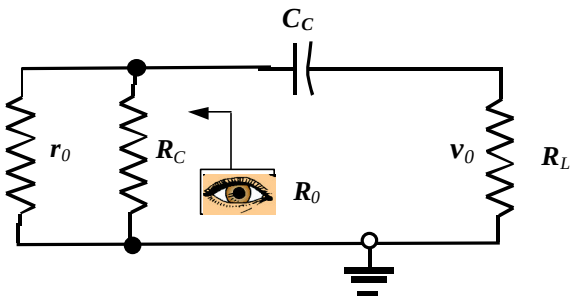
$$f_{Lc} = 1/[2p\,(R_0 + R_L)C_C] \qquad (179)$$



Determinando o efeito de C_C na resposta em baixas freqüências

Ignorando os efeitos de C_S e C_E, a tensão de saída v_0 em f_{Lc} será 70,7% do seu valor no meio da faixa. Para o circuito em questão a circuito equivalente AC para saída, com $v_e = 0$, aparece na figura abaixo. Portanto, o valor resultante para R_0 na equação (179) é simplesmente,

$$R_0 = R_C // r_0$$

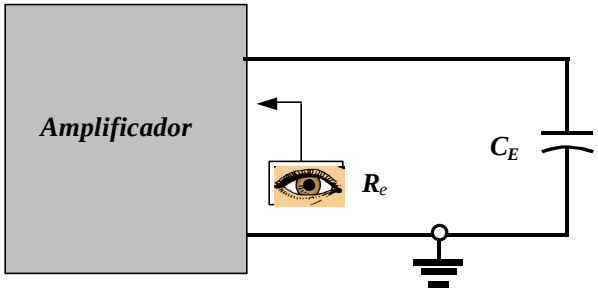


Circuito equivalente de saída com $v_e = 0$

Efeito de C_E

Para determinar f_{Le} ,a impedância (resistência) vista pelo capacitor deve der determinada como mostra a figura abaixo. Uma vez estabelecido o valor de R_e ,a freqüência de corte devido a C_E pode ser determinada utilizando-se a seguinte equação:

$$f_{Le} = 1/[2p\ R_e C_E \qquad (180)$$

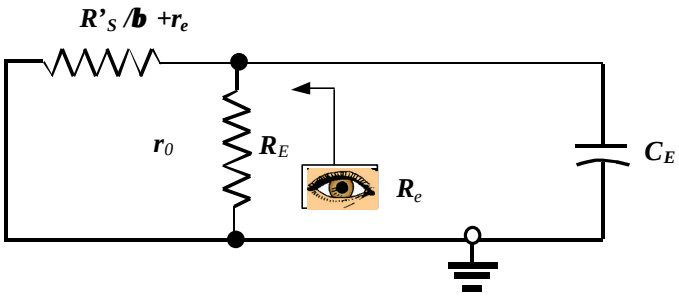


Determinando o efeito de C_E na resposta em baixas freqüências

Para o circuito em questão, a impedância vista por C_E aparece na figura abaixo. Portanto, o valor de R_e é determinado por

$$R_e = R_E\ //(R'_S/b+r_e)$$

onde $R'_S = R_S//R_1//R_2$.

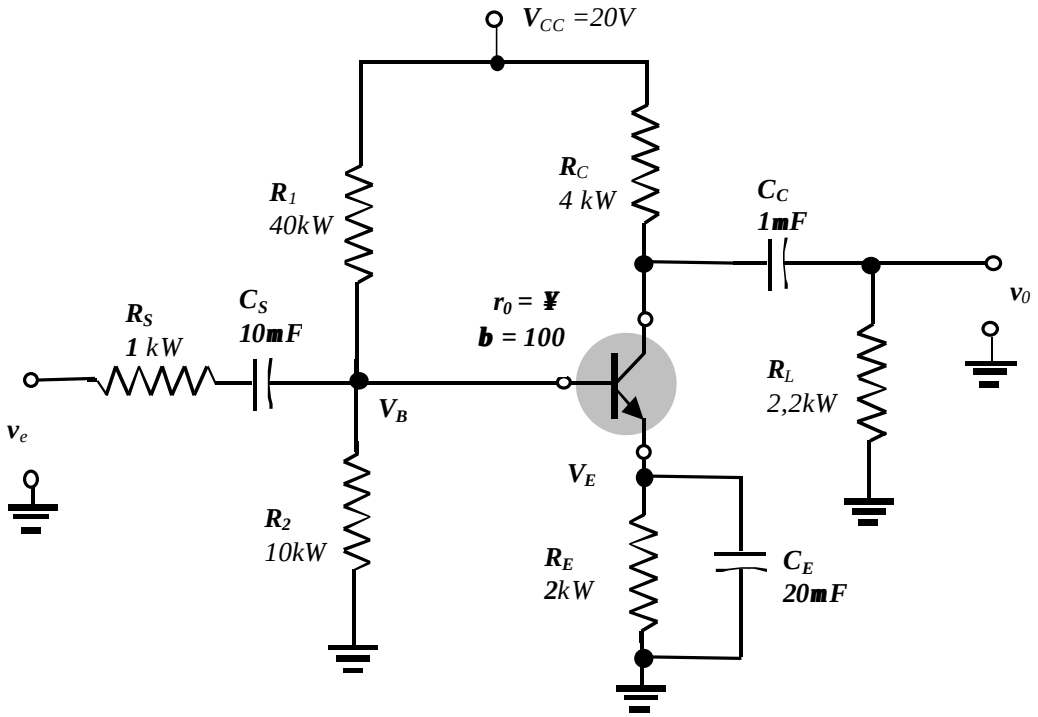


Circuito equivalente visto por C_E com $v_e = 0$

Antes de prosseguir, não esqueça que C_S, C_C e C_E afetarão a resposta apenas em baixa freqüências. Para as freqüências no meio do faixa, os capacitores serão considerados como curto circuito. Embora os capacitores afetem o ganho em faixa de freqüências semelhantes, a freqüência de corte inferior mais altas determinadas por C_S, C_C ou C_E terá o maior impacto sobre a resposta do amplificador. Isto porque é a última freqüência de corte antes do meio da faixa. Se as freqüências estão relativamente distantes entre si, a freqüência de corte mais alta determinar a freqüência de corte inferior do amplificador. Se houver duas ou mais freqüências de corte "altas", o resultado será o aumento o aumento da freqüência de corte inferior e a redução da banda passante do amplificador. Em outra palavras, há uma interação entre os elementos capacitivos que podem afetar a freqüência de ocrte inferior. Entretanto, se as freqüências de corte estabelecidas por cada capacitor diferirem suficientemente (10X) entre si, o efeito de uma sobre as outra pode ser desprezado. Como demonstrará o seguinte exercício.

Exercício:

a) Determine a freqüência de corte inferior para o circuito da figura abaixo.
b) Esboce a resposta em freqüência utilizando um diagrama de Bode.



a) Análise DC (para determinar r_e)

*Note que bR_E =100*2kW >> R_1 //R_2 = 40kW//10kW*

Então

V_B R_2 /(R_2+R_1) V_{CC} = 10kW /(10kW +40kW)20V = 4,0V

e

V_E = V_B - V_{BE} = 4,0V –0,7V =3,3V

I_C » I_E = V_E /R_E =3,3V/2kW» 1,65mA

r_e =V_T /I_C = 26mV/1,65mA =**15,76W**

e

b r_e =100*15,76 =**1,576kW**

b) Análise AC(ganho no meio da faixa)

1) A impedância de entrada

Z_i = R_i = R_1//R_2//*b* r_e =40kW//10kW//1,576kW » **1,32kW**

2) Ganho no meio da faixa

A_{v1} = v_0 /v_i = - R_C //R_L /r_e . = -(4kW //2,2kW)/15,76W » - 90

Mas

v_i /v_e = R_i /(R_i +R_S) =1,32kW /(1,32kW +1kW) **» 0,57**

então

A_v = v_0 /v_e = v_0 /v_i v_i /v_e =- 90 * **0,57 » -51,2**

b) Freqüências de corte

1) C_S

f_{Ls} =1/(2p(R_i+R_S)C_S = 1/(2p(1,32kW +1 kW)10mF **» 6,9H_Z**

2) C_C

$f_{Lc} = 1/(2p(R_C+R_L)C_S = 1/(2p(4kW + 2{,}2kW)1mF$ » **25,7Hz**

3) C_E

$R'_S = R_S // R_1 // R_2 = 1kW//40kW//10kW$ » $0{,}89kW$

$R_e = R_E//(R_S/b + r_e) = 2kW//(0{,}89/100 + 15{,}76W)$ » $24{,}3W$

$f_{Lc} = 1/2pR_eC_E = 1/2p(24{,}3W)(20mF)$ » **327Hz**

c) Esboço do diagrama de Bode

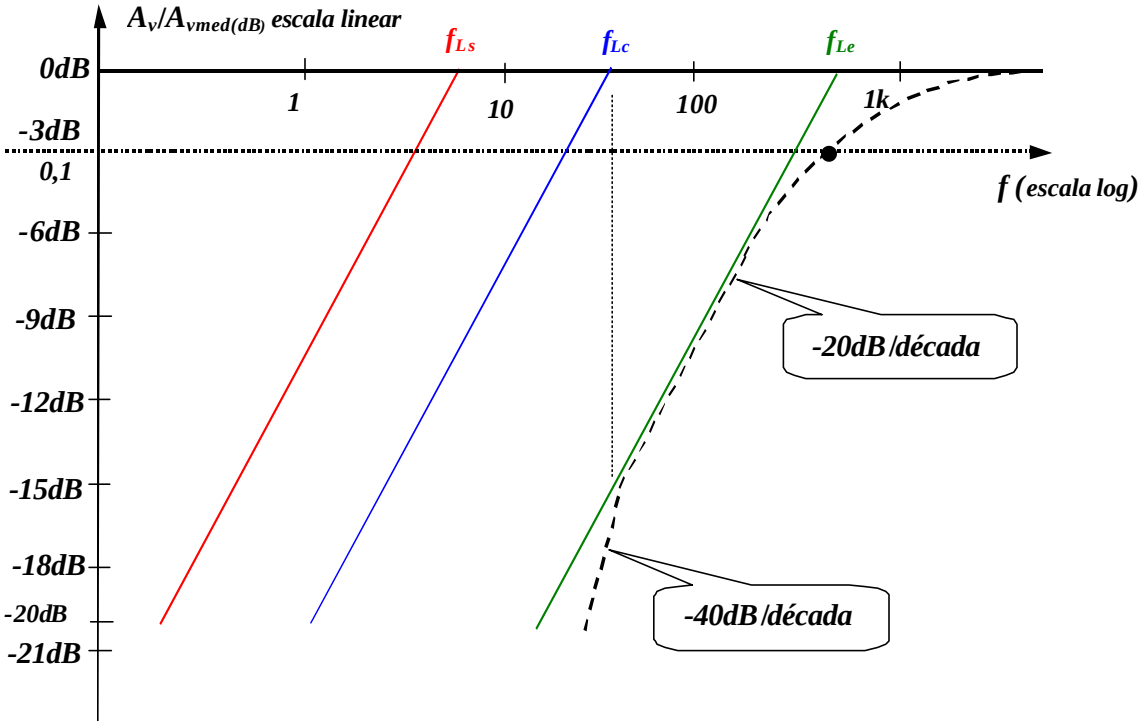
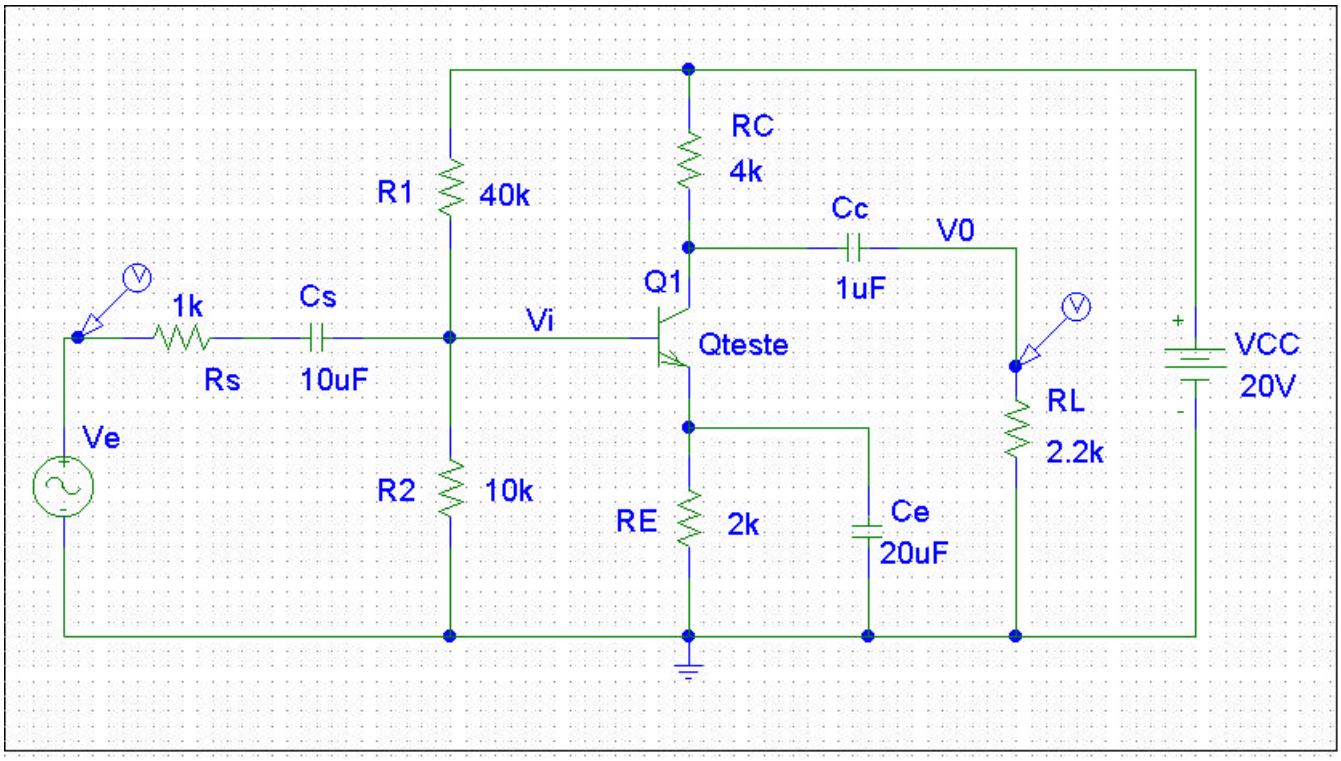


Diagrama de Bode

Simulação


RC
4k
R1
40k
Cc
V0
1uF
Q1
1k
Cs
Vi
Qteste
VCC
20V
Rs
10uF
RL
2.2k
Ve
R2
10k
RE
2k
Ce
20uF