



Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Eletrônica IV  
Amplificadores Realimentados

# Amplificadores Realimentados

Alunos:  
Adriano Martins Moutinho  
Marcos Vinícius

Renata Mercante

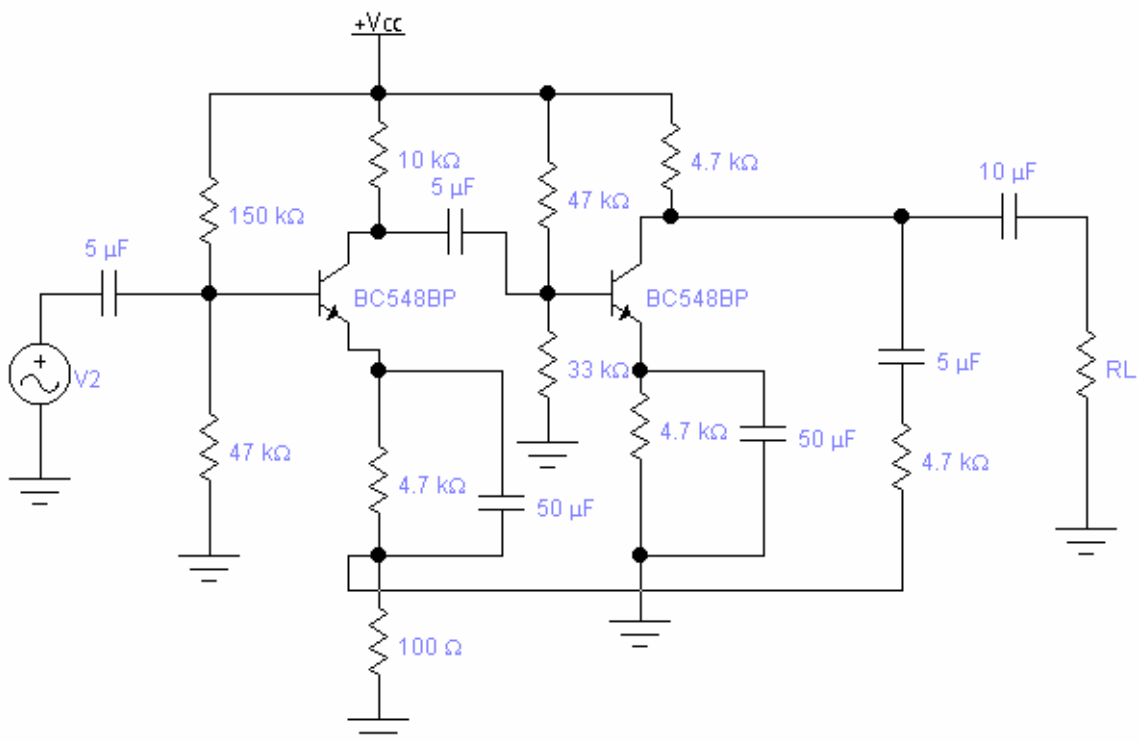
## Trabalho de eletrônica IV Amplificadores Realimentados

### 1) Descrição:

Para o circuito da pág93 do livro “Eletrônica vol2”, Millman, desenvolver os enunciados abaixo:

### 2) Calculo de $A_1$ , $A_2$ e $A_F$ :

O circuito a ser analisado é o abaixo apresentado:



Circuito da página 493 do livro eletrônica vol2, Millman.

Para calcularmos o ganho em malha aberta  $A_1$  de  $Q_1$ , inicialmente calcularemos a carga  $R_{L1}$  que é vista pelo transistor:

$$R_{L1} = 10 // 47 // 33 // 1,1 \text{ K}\Omega = 942\Omega$$

Note que existe uma impedância refletida no emissor de  $Q_1$  devido à realimentação. Essa impedância é igual ao paralelo dos dois resistores que formam a malha de realimentação, ou seja:

$$R_E = 100\Omega // 4,7\text{K} = 98\Omega$$

Dessa forma, o ganho  $A_1$  é:

$$A_{V1} = \frac{-H_{FE} R_{L1}}{H_{IE} + (1 + H_{FE}) R_E} = \frac{-50 \cdot 0,942}{1,1 + (1 + 50) \cdot 0,098} = -7,72$$

O ganho de tensão  $A_{V2}$  pode ser calculado tendo-se a impedância de saída, já considerando a impedância adicional causada pela malha de realimentação. A impedância de saída é:

$$R_{L2} = 4,7\text{K} // (4,7\text{K} + 100\Omega) = 2,37\text{K}\Omega$$

O ganho  $A_{V2}$  é simplesmente:

$$A_{V1} = \frac{-H_{FE} R_{L2}}{H_{IE}} = \frac{-50 \cdot 2,37 \cdot 10^3}{1,1 \cdot 10^3} = -108$$

Assim, o ganho em malha aberta, ou seja, sem realimentação é o produto dos dois ganhos:

$$AV = A_{V1} \cdot A_{V1} = (-7,72) \cdot (-108) = 834$$

A malha de realimentação é formada pelos resistores de  $4,7\text{K}\Omega$  e  $100\Omega$ , assim, analisando a quantidade realimentada:

$$\beta = \frac{100}{100 + 4700} = \frac{1}{48}$$

Dessa maneira, o ganho em malha fechada pode ser facilmente obtido pela expressão abaixo:

$$A_{VF} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V} = \frac{834}{1 + \frac{834}{48}} = 45.4$$

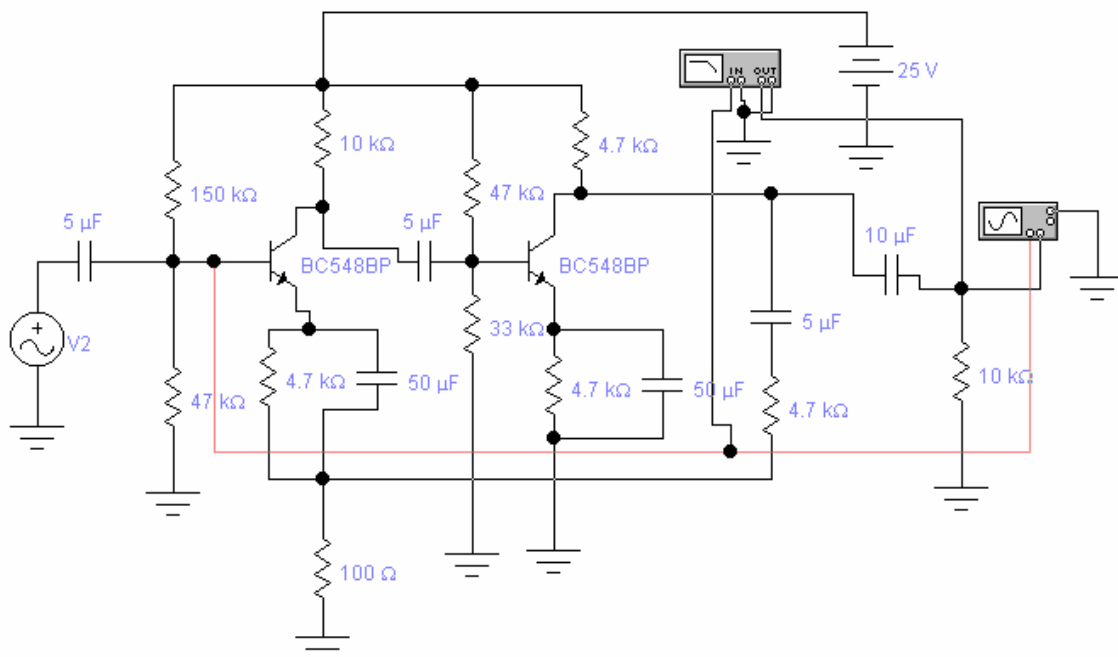
Assim, os resultados obtidos foram:

$$A_{V1} = -7.72 \quad A_{V2} = -108 \quad A_{V \text{ EM MALHA ABERTA}} = 834$$

$$A_{VF} = 45.4$$

3) Levantar a curva  $A_F \times f$  do amplificador em questão:

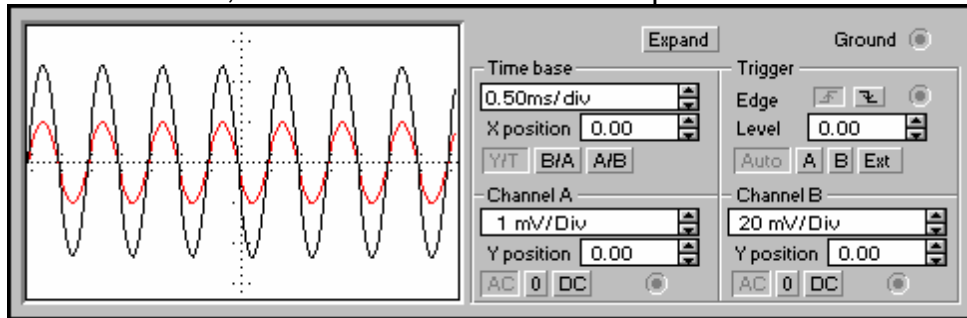
Colocando o circuito em simulação no software Workbench 5.0, obtemos os seguintes resultados:



Circuito simulado no Workbench 5.0, usando-se um Scope e um bode plotter.

Aproximadamente  $0^\circ$  de diferença entre saída e entrada, com ganho de

aproximadamente 48, conforme mostra o osciloscópio abaixo:



Osciloscópio do Workbench mostrando Entrada, senóide menor, e Saída.

A freqüência utilizada para esta medição foi de 1KHz. Uma maior precisão de leitura pode ser obtida no gráfico abaixo, também exportado do software Workbench 5.0.

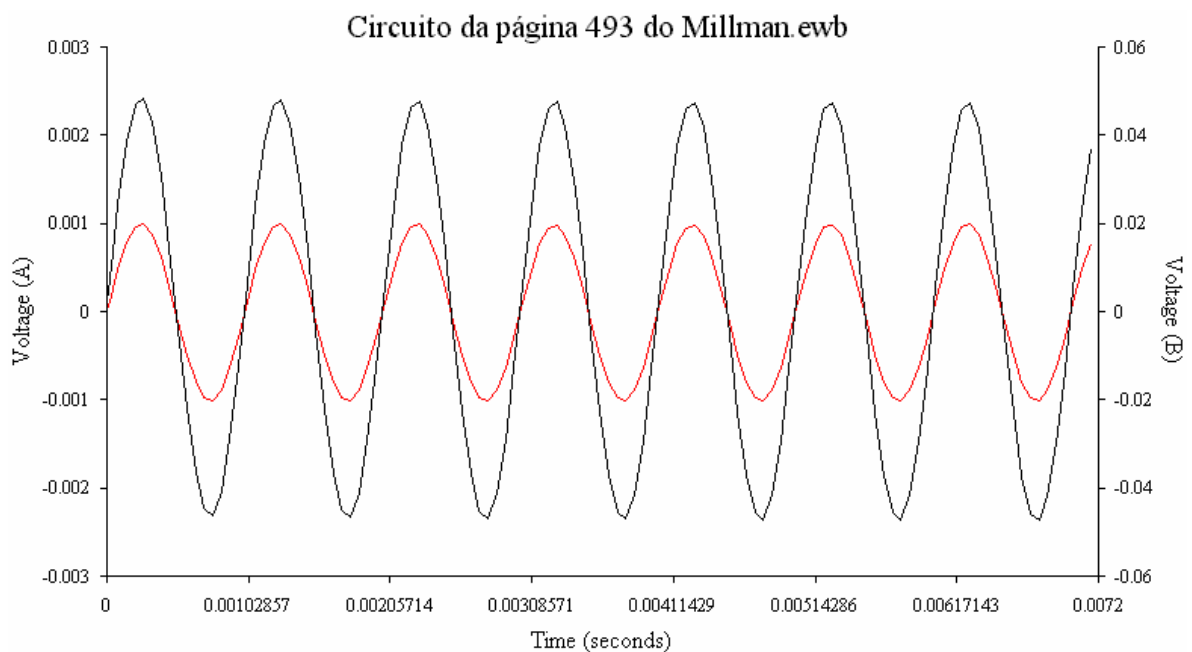
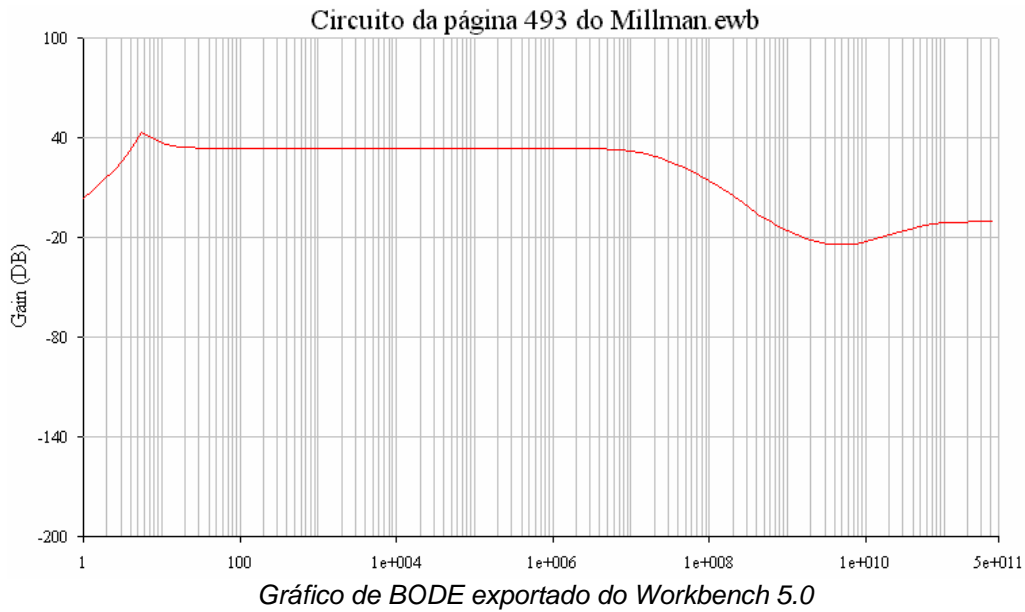
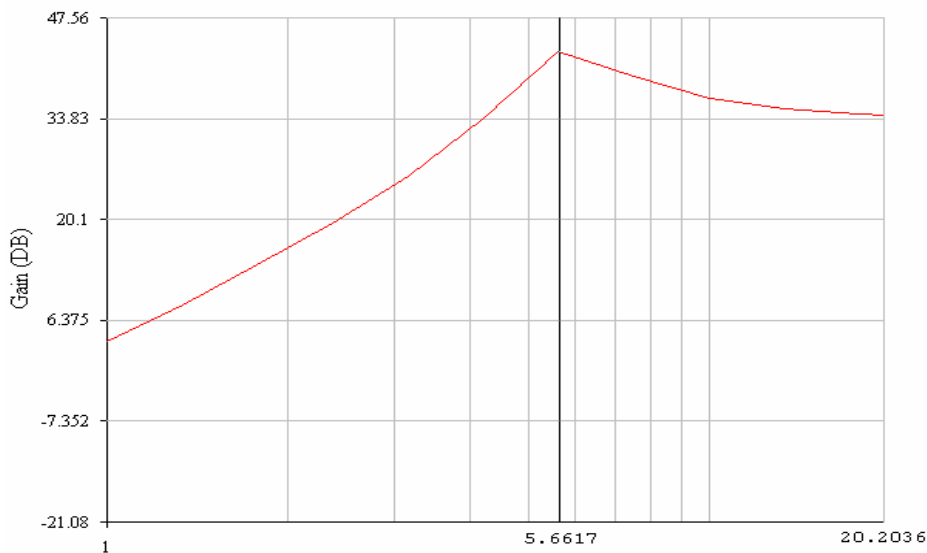


Gráfico de tensão de entrada, senóide menor, e saída pelo tempo.

Para traçar o gráfico do ganho realimentado pela freqüência usamos a ferramenta bode plotter, do Workbench 5.0. O resultado é mostrado abaixo:



Podemos identificar os pólos e zeros da função através da análise de alguns pontos específicos do gráfico acima. No gráfico expandido abaixo, podemos visualizar o primeiro ponto de quebra do gráfico, o “bico” que existe em aproximadamente 5.7Hz:



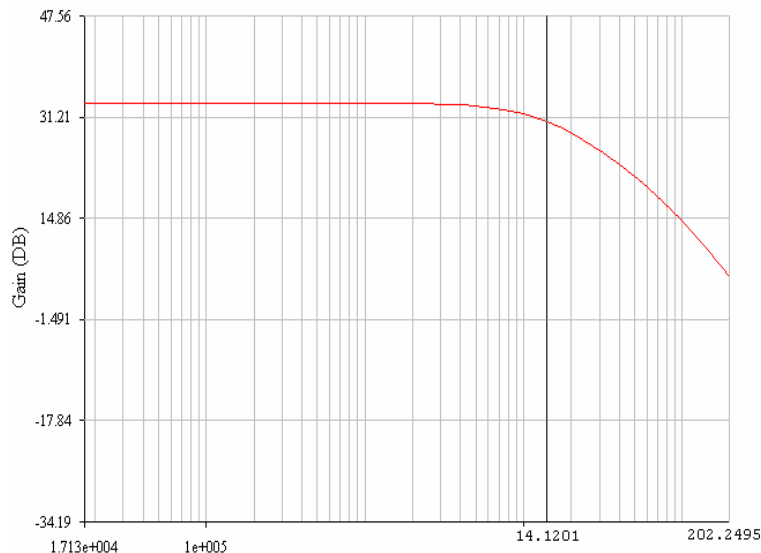
Zoom do gráfico de BODE, mostrando um pólo complexo em  $F_p = 5.6617\text{Hz}$ .

Aparentemente, como a inclinação da reta anterior a esse ponto de quebra assemelha-se a um +20dB/Dec, existe um zero em  $f=0$ .

Como após o ponto de quebra existe uma estabilização, possivelmente um pólo compensa o zero em  $f=0$ . Como existe um certo ganho adicional antes da estabilização, este pólo deverá ser complexo, e seu valor de  $f_p=5.6617\text{Hz}$ . Esse pólo é causado pelos capacitores de acoplamento e bypass.

Após todo o período onde o ganho é uma constante, ocorre, como já era de se esperar, uma atenuação devido às próprias capacitâncias internas dos transistores. De acordo com o Workbench 5.0, a capacitância Base-Emissor é de 13pF e a capacitância Base-Coletor é de 4pF para o transistor BC548BP (Zetec).

A parte do gráfico mostrando este ponto de quebra é mostrada em zoom na figura abaixo:



*Zoom do gráfico de BODE, mostrando um pólo real simples em  $F_p = 14.12\text{MHz}$ .*

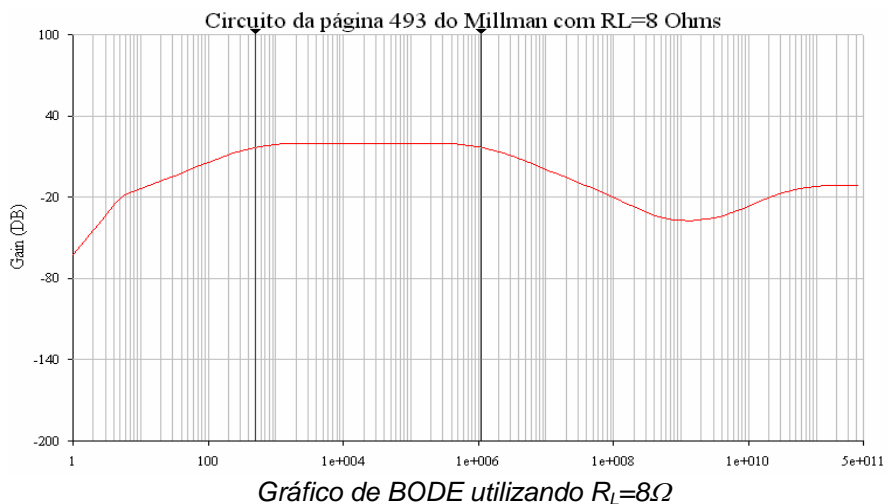
Analisando o gráfico acima, podemos concluir que existe um pólo neste ponto. Um pólo simples, pois a inclinação subsequente é de  $-20\text{dB/dec}$ . O ponto de 14.12MHz é um ponto de  $-3\text{dB}$ . Portanto o ponto de quebra do pólo real simples.

Observando a parte mais a direita do primeiro gráfico de bode, podemos notar um novo zero em aproximadamente 5GHz, provavelmente um zero complexo com parâmetro  $Q_p$  bem pequeno. Porém, este circuito na prática não será, em condições normais, submetido a frequências maiores que 100MHz.

4) Simular o circuito para três valores de carga:

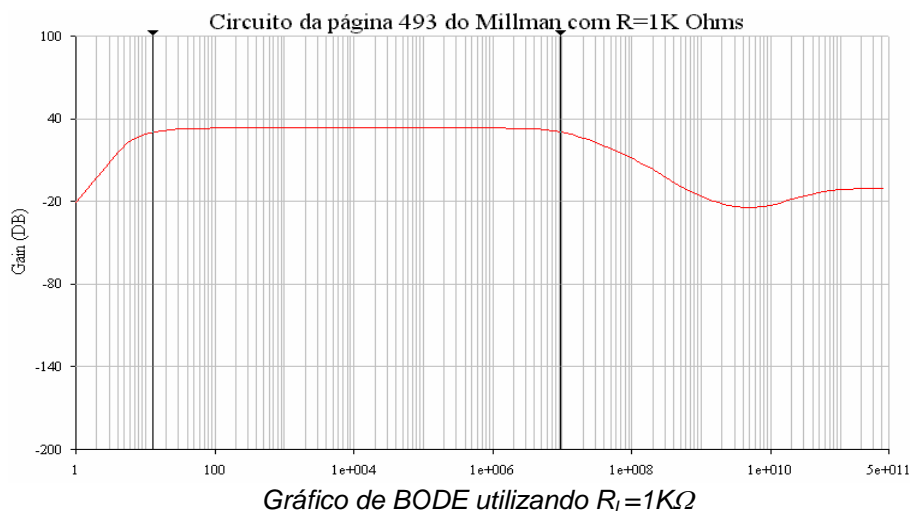
- $R_L=8\Omega$  (alto falante):

Utilizando-se um resistor de  $8\Omega$  como carga, simulando um alto falante, o ganho passa a ser 18.90dB em 1KHz. A resposta de frequência se modifica um pouco, estreitando a faixa de passagem. Os pontos de -3dB são 500Hz e 1,1MHz. A curva de bode é mostrada abaixo:



- $R_L=1K\Omega$ :

Utilizando-se esta carga o gráfico de Bode fica bastante plano em uma longa faixa de frequências. O ganho na faixa de passagem é de 33,24dB e os pontos de -3dB são 13Hz e 9,5MHz, como mostra o gráfico abaixo:





- $R_L=10K\Omega$ :

Utilizando-se esta carga o gráfico de Bode fica mais plano ainda em uma faixa ainda maior de frequências. O ganho na faixa de passagem é de 33,48dB e os pontos de  $-3dB$  são 4Hz e 13MHz. Com esta carga aparece novamente o polo complexo em 6Hz, nas outras resistências o mesmo havia desaparecido. O gráfico de bode é mostrado abaixo:

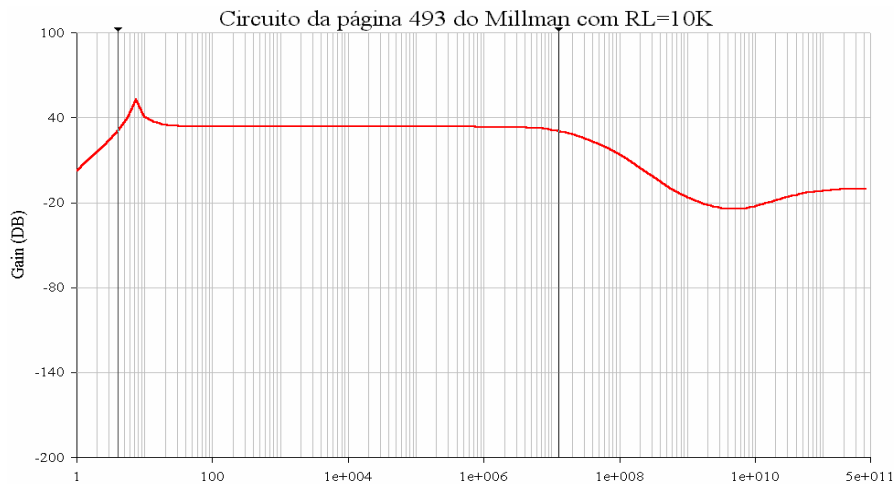


Gráfico de BODE utilizando  $R_L=10K\Omega$