



Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – 2017/02

Experiência N° 02: Amplificadores operacionais – Resposta em frequência

I - Objetivos

O objetivo deste experimento é examinar experimentalmente as características de frequência de um amplificador operacional.

Maiores informações acerca dos amplificadores operacionais a serem utilizados neste experimento, assim como de sua resposta em frequência, podem ser encontradas em:

- Datasheet do quádruplo amplificador operacional TL074:
http://www.ece.usu.edu/ece_store/spec/TL074CN.pdf
- Apostila preparada pelo prof. Humberto Gamba sobre amplificadores operacionais para o curso de eletrônica básica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná:
http://paginapessoal.utfpr.edu.br/humberto/atividade-de-ensino/labeltronica/inicio/lab-notes/Op_Amp_Parte_1.pdf →Veja em particular a página 9, “Gain-bandwidth product (GB e Phase margin”. Os termos estão em inglês, mas o texto está em português.
- Apostila de laboratório da University of North Carolina at Charlotte com explicação detalhada dos parâmetros “gain-bandwidth product” e “slew-rate” de um amplificador operacional, disponível em:
<http://ece.uncc.edu/sites/ece.uncc.edu/files/media/labs/3156/5-GBPandSlew.pdf>.
- Apostila sobre Amplificadores Operacionais para o curso EE 3305 do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Michigan Tech:
<http://www.ece.mtu.edu/labs/EElabs/EE3305/OpAmp%20Lab%20I.pdf>
- Livro “Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos”, 11ª Edição, de Robert L. Boylestad e Louis Nashelsky, da editora Pearson, 2013.
- Livro texto do curso.

II – Preparação para o laboratório

Sugestão de leitura prévia: Para responder às perguntas propostas, consulte as leituras sugeridas acima. O resumo a seguir foi elaborado a partir do capítulo 10 da 11ª edição do livro do Boylestad e Nashelsky (em particular, da seção 10.7 – Especificações do amp-op – parâmetros de frequência), além dos datasheets e das apostilas sugeridas acima. No livro do Sedra e Smith, a resposta em frequência de um amp-op com realimentação é tratado no capítulo 8 (quarta edição), “Realimentação”, em particular no item “8.9 – O efeito da realimentação sobre os pólos do amplificador”.

Pré-relatório - INDIVIDUAL

O pré-relatório consistirá na resposta às perguntas propostas. Suas respostas serão baseadas na leitura do livro texto, das apostilas sugeridas e de outras fontes que encontrarem, **mas não devem ser diretamente copiadas de nenhuma fonte e deve ser feito individualmente.**

Idealmente, um amplificador operacional possui elevados ganho e largura de banda (idealmente infinitos), além de impedância de entrada infinita e impedância de saída nula. No entanto, há limites para os parâmetros reais de um amplificador operacional. Neste experimento, estamos interessados no estudo da largura de banda de um amplificador operacional real. A largura de banda é o intervalo de frequências em que o dispositivo pode operar sem que haja distorção na tensão de saída. Em muitos casos a largura de banda é listada no *datasheet* do dispositivo.

Os amplificadores operacionais possuem por construção circuitos de compensação internos para garantir uma operação estável. Esses circuitos internos fazem com que o elevado **ganho em malha aberta** diminua à medida que se aumenta a frequência do sinal de entrada. O *datasheet* do amplificador operacional costuma mostrar um gráfico de *ganho vs. frequência*, como mostrado na figura A (figura 10.47 do livro do Boylestad e Nashelsky). Como explicado no livro texto, para valores baixos de frequência (abaixo da frequência de corte f_c) e até a operação em corrente contínua (CC), o ganho é listado pela especificação de ganho de tensão diferencial A_{VD} , um valor normalmente bastante elevado. Na frequência de corte, o ganho cai em 3 dB, ou $0,707$ (ou $1/\sqrt{2}$) de seu valor CC. A frequência f_1 para o qual o ganho em malha aberta torna-se unitário é definida como a *largura de banda de ganho unitário*, B_1 . Essas frequências estão relacionadas pela equação $f_1 = A_{VD}f_c$. A frequência de ganho unitário é também chamada de *produto ganho-largura de banda* do amplificador operacional. Observe que a frequência máxima do sinal em que um amplificador operacional pode operar depende tanto dos parâmetros de largura de banda (*band-width*, BW) quanto da taxa de inclinação (*slew rate* - SR).

1. (1,0 pt) Consulte o *datasheet* do amplificador operacional TL074 e determine (a) a largura de banda (*bandwidth*) e (b) a taxa de variação (*slew rate*) listadas.

Essa redução no ganho com a frequência é chamada de *roll-off*, que costuma ocorrer a uma taxa de 20 dB/década. Para determinar a largura de banda experimentalmente, são realizadas medições da tensão de entrada e saída para diferentes valores de frequência.

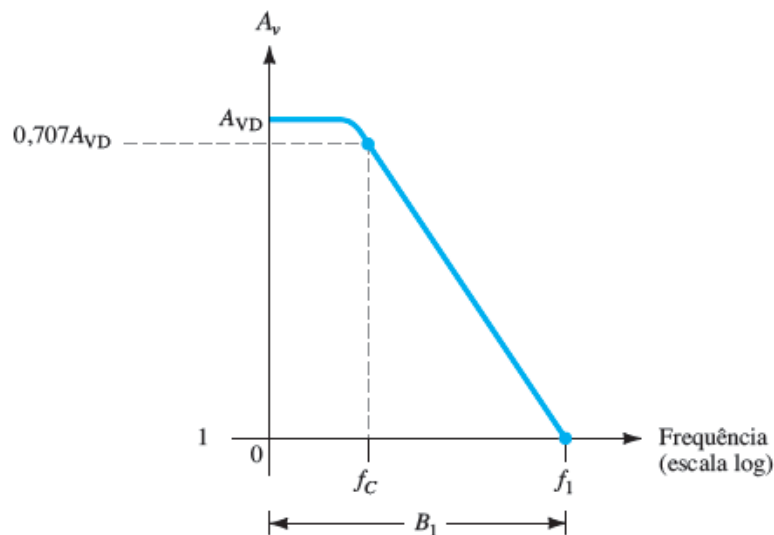


Figura A: Gráfico do ganho vs. frequência de um amp-op (FONTE: Boylestad e Nashelsky, 2013, figura 10.47)

Suponha que se deseje determinar um intervalo de frequências útil para um amplificador em particular que possui um **ganho em malha fechada** determinado pelos resistores de entrada R_1 e de realimentação R_2 , respectivamente, como no circuito amplificador não-inversor ilustrado na figura 1 da Parte Experimental. Aplica-se uma tensão de entrada senoidal a partir de um gerador de funções, começando-se de uma frequência baixa, abaixo da frequência de corte esperada, e com uma amplitude pequena o suficiente para evitar a limitação de *slew-rate* da tensão de saída.

Observe a tensão de saída, e ajuste a amplitude do gerador de sinais e a escala do osciloscópio de modo que a curva da tensão de saída ocupe toda a tela do osciloscópio (cubra todas as divisões da tela, para melhor visualização). Por exemplo, a figura B mostra um sinal senoidal de baixa frequência ocupando toda a tela do osciloscópio. Se a escala vertical for de 100 mV/div, a senóide possui uma amplitude de 800 mV_{p-p}. Observe que na figura mostrada o eixo horizontal também foi modificado de modo a mostrar apenas um ciclo da onda de saída.

Na frequência de corte, a amplitude da tensão de saída deve cair em 3 dB, ou 0,707 de seu valor de ganho CC. Para o exemplo da figura B, utilizando-se 8 divisões como o valor do ganho CC, a frequência de corte será a frequência da senoidal de entrada que resulta em uma amplitude da tensão de saída de $0,707 \times 8$ divisões, ou 5.66 divisões. Assim, deve-se lentamente aumentar a frequência da senóide de entrada (sem modificar sua amplitude) até que atinja 5.66 divisões, ou 566 mV_{p-p} na escala citada. No exemplo apresentado, a frequência mudou de modo que a tela do osciloscópio passou a mostrar oito ciclos da senóide de saída (ou seja, a frequência aumentou por um fator de oito). Basta medir o período da nova onda de saída e determinar a frequência de corte ($f = 1 / T$). No caso do osciloscópio do laboratório, esse valor da frequência pode ser visualizado a partir da opção “Measure” do canal apropriado.

Deve-se tomar o cuidado de que a queda da tensão não ocorreu devido à limitação de *slew-rate*. Se a

diminuição da amplitude com o aumento da frequência for devido à limitação de *slew-rate*, uma diminuição da amplitude do gerador de funções irá produzir um resultado diferente.

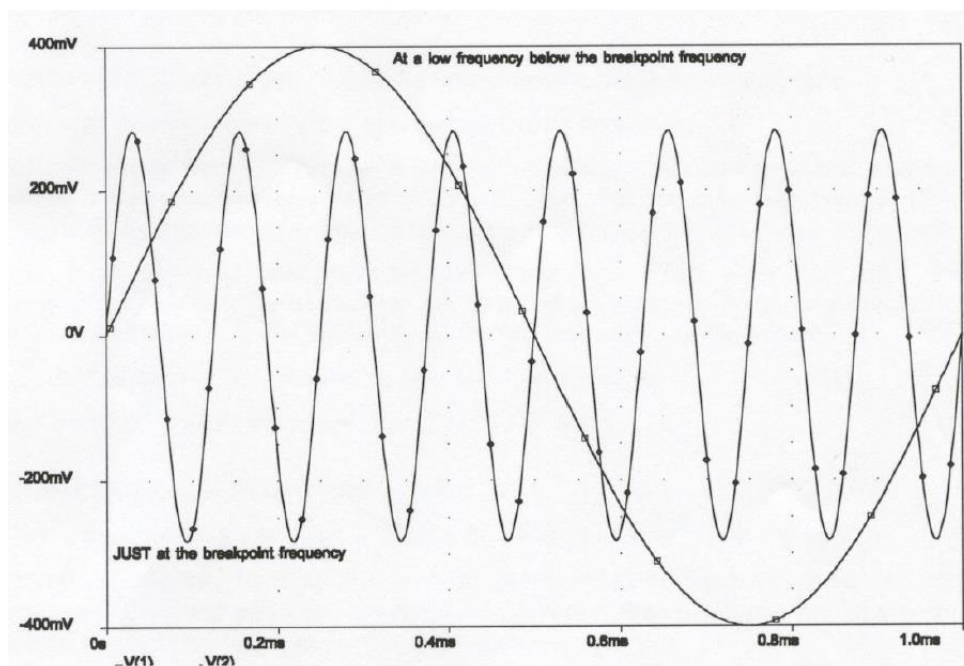


Figura B: Determinação experimental da largura de banda (frequência de corte) de um amp-op.

2. (3,0 pts) Para o circuito ilustrado na figura 1 da Parte Experimental, determine analiticamente a função de transferência do ganho em malha fechada $V_o(s) / V_i(s)$. Considere que o amplificador operacional possui modelo de primeira ordem para o ganho em malha aberta: $A(s) = A_0 / (1 + s / \omega_b)$, onde A_0 é o ganho diferencial CC do amplificador operacional ($A_0 = A_{VD}$ na figura A), cujo valor é bastante elevado, e $\omega_b = 2\pi f_1$ a frequência de corte em malha aberta (em rd/s). Considere que $1 / A_0 \approx 0$. Utilize também seguinte aproximação: $\omega_t = A_0 \omega_b$, com ω_t sendo a frequência de transição, ou a banda passante de ganho unitário. (Veja maiores detalhes nas transparências 12 e 13 de https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1622487/mod_resource/content/0/Apostila%20ampop.pdf e no manual do fabricante do dispositivo, para obter o valor de f_1 para o dispositivo utilizado em laboratório.)
3. (2,0 pts) Determine a fórmula da frequência de corte do circuito em malha fechada, em função da frequência de transição $f_t = \omega_t / 2\pi$ e das resistências R_1 e R_2 .
4. (3,5 pts) Esboce os diagramas de Bode (módulo e fase) de $H(j\omega) = V_o(j\omega) / V_i(j\omega)$. Que atenuação é observada na frequência de corte do circuito?
5. (0,5 pt) Inclua as referências bibliográficas utilizadas para responder as perguntas acima, incluindo o livro texto, e quaisquer outras fontes utilizadas, incluindo outros livros consultados e fontes pesquisadas na internet, sempre seguindo as normas da ABNT. A biblioteca possui as normas impressas para consulta.

Lembrem-se: o pré-relatório é individual. Questões respondidas “em grupo” terão sua pontuação devidamente descontadas.

As respostas a estas perguntas devem ser enviadas ao professor de laboratório por email, em arquivo **pdf**, com nome, matrícula, data, e título do experimento, com o enunciado das perguntas, além de suas respostas, **até as 23:59 do dia imediatamente anterior ao primeiro dia deste experimento**.

Pré-relatórios não recebidos até este prazo não serão considerados.

Laboratório de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**Experiência Nº 02: Amplificadores operacionais – Resposta em frequência – 2017/02**

Turma: _____ Data: _____

Alunos: _____ Matrícula: _____

_____ Matrícula: _____

_____ Matrícula: _____

III - Procedimento Experimental**Material necessário**

1 amplificador operacional quádruplo TL074/TL084.

2 resistores $1\text{ k}\Omega$ / 0,25W1 resistor $10\text{ k}\Omega$ / 0,25W1 resistor $100\text{ k}\Omega$ / 0,25W

Equipamentos: osciloscópio de dois canais, fonte de alimentação, gerador de sinais

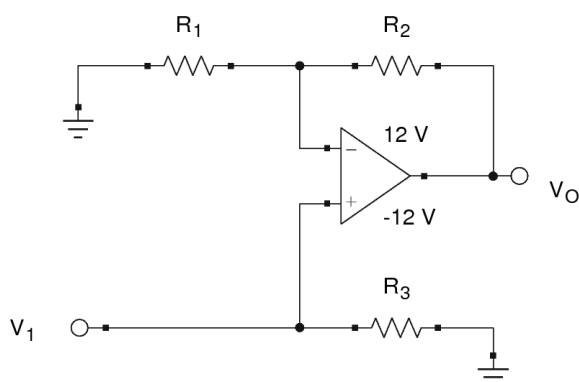
Experiências

Figura 1. Circuito amplificador não-inversor com compensação para efeito da corrente de polarização.

Experiência 1 (5,0 pts)

- (a) Monte o circuito da figura 1 com $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ e $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, usando um dos amplificadores operacionais do TL074. Utilize um valor de resistência em R_3 de modo a minimizar a tensão de offset do AmpOp. Justifique sua escolha no relatório.
- (b) Sendo $V_1(t)$ uma senóide de amplitude 500 mV, varie sua frequência de modo a determinar a frequência de corte do circuito.

Lembre-se de inicialmente ajustar visualização da onda de saída no osciloscópio de modo que

preencha completamente a tela do osciloscópio, como explicado nos passos descritos no roteiro do pré-relatório.

(c) Descreva o procedimento para determinar a frequência de corte.

(d) Na frequência de corte, qual é a diferença de fase medida entre $V_0(t)$ e $V_1(t)$?

Cálculos, anotações e comentários:

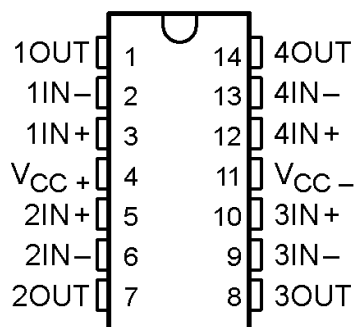
Experiência 2. (5,0 pts) Neste experimento será verificado na prática a redução da banda passante do amplificador devido ao aumento do ganho.

- (a) Monte o circuito da figura 1 utilizando $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. Lembre-se de atualizar o valor do resistor R_3 de acordo. Com o aumento do ganho, faz-se necessário usar uma amplitude menor para a senóide $V_1(t)$, de modo a evitar a saturação da saída. Sugere-se utilizar uma amplitude de 50 mV para $V_1(t)$.
- (b) Determine experimentalmente a nova frequência de corte do amplificador.
- (c) Com relação ao experimento anterior, esta nova frequência de corte é maior ou menor? Por que? Isso seria esperado? Discuta com base na teoria estudada.
- (d) Compare este novo valor experimental da frequência de corte com o que seria esperado. Para determinar o valor esperado, pode-se usar a fórmula do pré-relatório. Mas pode-se também utilizar o conceito de “*gain-bandwidth product*”, dado no datasheet do ampop. Neste caso, pode-se utilizar a relação $f_1 = G_x f_x \rightarrow 3 \text{ MHz} = G_x f_x$. Em outras palavras, o produto do ganho G_x pela frequência de corte f_x em qualquer ponto é sempre 3 MHz, aproximadamente. Existe muita diferença entre os valores experimental e teórico da frequência de corte?

Cálculos, anotações e comentários:

Anotações e comentários:

5. Encapsulamento



TL074 (quádruplo amplificador operacional)