

5ª PRÁTICA DE LABORATÓRIO

Introdução

Neste laboratório, projetaremos e testaremos um filtro ativo passa-alta Butterworth de 4ª ordem, analisando e medindo o comportamento da magnitude de sua resposta em frequência.

Esta prática está dividida em duas partes. A primeira parte é o projeto e a análise teórica do circuito em questão. Na segunda parte, faremos a montagem física do circuito em protoboard e mediremos a tensão de saída para verificarmos os resultados teóricos.

Na primeira parte, aplicaremos o procedimento para o projeto de um filtro. Como visto em sala de aula, o projeto de um filtro inicia-se com a determinação de seus requisitos. Baseado nestes requisitos, realizamos os seguintes passos:

- Escolha do tipo de filtro e sua ordem.
- Determinação da função de transferência do filtro.
- Cálculo dos valores dos elementos do circuito para a implementação do filtro.

Nesta prática, o primeiro passo já está feito, visto que o filtro é um filtro passa-alta Butterworth de 4ª ordem. Realizaremos os outros dois passos. Usando o procedimento visto em aula, determinaremos a função de transferência do filtro-protótipo Butterworth e os valores dos elementos do circuito associado. Em seguida, aplicaremos os procedimentos de escalonamento de frequência e de magnitude para obter os valores de elementos para o filtro final. Por último, faremos a análise teórica dos circuitos através da aplicação da transformada de Laplace, obtendo daí a função de transferência e seu gráfico de Bode de magnitude. Manualmente, e com o conhecimento do que foi visto em sala de aula, você precisa apenas determinar as equações a serem solucionadas, deixando a sua resolução para o computador. O sistema de computação simbólica a ser utilizado é o SymPy. Neste laboratório usaremos principalmente as funcionalidades de resolução de sistemas de equações algébricas, substituição de expressões do SymPy, transformada de Laplace e gráficos de Bode.

Para a parte prática, usaremos os equipamentos do nosso Laboratório Didático de Eletrônica. Aplicaremos um sinal senoidal de frequência e amplitude fixa na entrada do filtro e mediremos a amplitude do sinal de saída. Variaremos a frequência do sinal senoidal de entrada para observar o comportamento do filtro sob análise na frequência.

Objetivos

- Projetar um filtro-protótipo ativo passa-alta Butterworth.
- Aplicar os procedimentos de escalonamento de frequência e de magnitude.
- Aplicar a transformada de Laplace na análise de circuitos.

- Medir as grandezas elétricas em um circuito usando um osciloscópio.
- Medir o comportamento na frequência de circuitos de filtros para comparação com o comportamento esperado.
- Usar o SymPy para resolver equações algébricas aplicando-o na resolução de circuitos elétricos.

Equipamentos necessários

Para esta prática, usaremos os seguintes *softwares* e equipamentos:

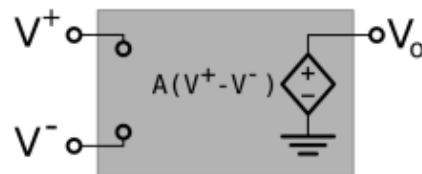
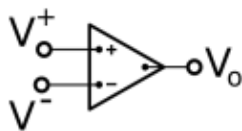
- jupyter notebook
- LTSpice
- Multímetro
- Osciloscópio
- Fonte de tensão
- Gerador de sinais

Material necessário

- Resistores e capacitores de acordo com o seu projeto.
- Ampops de acordo com o seu projeto.

Prólogo

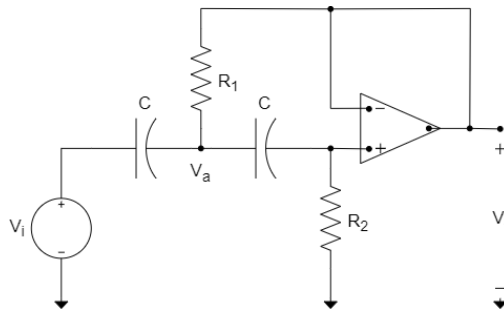
Um *amplificador operacional* é um dispositivo eletrônico versátil, embora complexo, que será estudado em detalhes na disciplina de Eletrônica 1. Para os propósitos desta disciplina, iremos assumir o modelo simplificado, porém próximo o suficiente da realidade, do amplificador operacional ideal, que consiste de um amplificador diferencial (i.e., a amplificação é feita em cima da diferença das duas entradas) com resistência de entrada infinita e ganho também infinito. Na figura abaixo, temos à esquerda a representação gráfica deste amplificador ideal com suas duas entradas e, à direita, o modelo de circuito que representa o seu comportamento. No modelo, assumimos que $A \rightarrow \infty$.



Há duas características principais de um ampop ideal. A primeira é que sua resistência de entrada é infinita (i.e., a entrada se comporta como a de um voltímetro ideal), e portanto não há corrente entrando ou saindo dos terminais V^+ e V^- . A segunda é que, como o ganho A é muito grande, se a tensão de saída for finita, a diferença de tensão $\Delta V = V^+ - V^-$ é muito pequena (idealmente, 0).

Circuito

Para a implementação do filtro passa-alta ativo Butterworth desejado, usaremos o circuito abaixo para cada módulo de duplo polo usado no projeto de filtros Butterworth passa-alta.



Assumindo que a tensão de entrada é v_i e a tensão de saída é v_o , precisamos determinar a função de transferência $H_m(s)$ do circuito acima para estabelecer as relações entre os parâmetros da função de transferência e os elementos do circuito.

Na primeira parte desta prática faremos a análise e projeto teórico do filtro desejado, e na segunda parte, na próxima semana, iremos ao laboratório fazer as medições e comprovar os resultados teóricos obtidos.

1ª parte - análise teórica

Iremos analisar, projetar e testar um filtro passa-alta ativo Butterworth de 4ª ordem, considerando as características de sua função de transferência na frequência. O filtro deve ter como frequência de corte $f_c = 100$ Hz.

O conhecimento teórico é importante para você poder analisar qualquer problema encontrado em laboratório. Realize as atividades abaixo e use os resultados obtidos para comparar com as curvas que você medirá na segunda parte. **Nunca entre no laboratório sem saber o que você estará medindo.** Em particular, você precisará dos resultados das questões abaixo marcadas com “(LAB)” para comparar com os resultados obtidos em laboratório. Lembre-se portanto de anotar e registrar esses resultados em um relatório preliminar, além de levá-los para a prática em laboratório.

O projeto do filtro ativo passa-alta Butterworth desejado é dividido em três etapas:

- Projeto do filtro-protótipo.
- Aplicação de escalonamento de frequência e magnitude.
- Ajuste para valores comerciais de resistor e capacitor.

Projeto do filtro-protótipo

Na primeira etapa, devemos realizar os seguintes passos:

- Determinação da função de transferência do filtro-protótipo.
- Cálculo dos elementos dos circuitos ativos que comporão o filtro a partir da expressão para a função de transferência acima.

Para a realização do segundo passo, contudo, temos que usar o circuito dado na seção “Prólogo”, e por isso vamos precisar achar as expressões para C , R_1 e R_2 que façam com que a função de transferência satisfaça a

$$H_m(s) = \frac{s^2}{s^2 + bs + 1}, \quad (1)$$

onde b é uma constante real. Assim, execute as atividades abaixo.

- **Converta** o circuito dado na seção “Prólogo” para a frequência e **determine** as equações que o regem.
- **Resolva** as equações e **determine** a sua função de transferência $H_m(s) = V_o(s)/V_i(s)$ em função de C , R_1 e R_2 .
- **Ache** as expressões relacionando C , R_1 , R_2 e b que satisfaçam a equação (1) para qualquer s .

Com as expressões acima, podemos projetar o filtro-protótipo seguindo o procedimento visto em sala de aula. Realize então as atividades a seguir.

- **Calcule** os valores dos elementos do(s) circuito(s) necessários.
- **Ache** a função de transferência do filtro-protótipo passa-alta ativo Butterworth de 4ª ordem como produto de funções racionais com denominador de 2º grau.

Isto conclui a primeira etapa acima.

Escalonamentos e ajustes

Para as duas etapas restantes, realize as atividades abaixo.

- **Aplique** os procedimentos de escalonamento de frequência e magnitude para obter um filtro com frequência de corte $f_c = 100$ Hz e uma capacitância máxima de 100 nF.
- **(LAB) Ajuste** os valores dos elementos do(s) circuito(s) para os valores comerciais mais próximos.
- **Determine** a função de transferência do filtro com os elementos ajustados.
- **(LAB) Ache** o gráfico de Bode de magnitude do filtro com os elementos ajustados.
- **(LAB)** Usando o LTSpice, represente o circuito. Utilize os passos da configuração da análise AC. Simule o circuito. Salve os diagramas de Bode da resposta em frequência do sistema.

2ª parte - medições em laboratório

Para a segunda parte da prática, montaremos o circuito acima em uma protoboard e faremos as medições do sinal de saída, comparando-os com a entrada para determinar a magnitude da função de transferência. *Não nos preocuparemos aqui com a fase do sinal.* Usaremos o que aprendemos

em sala de aula a respeito da relação entre a função de transferência $H(s)$ de um circuito e a sua resposta $v_o(t)$ em regime permanente senoidal, ou seja, se a entrada é $v_i(t) = A \cos \omega t$, então a saída é

$$v_o(t) = A |H(j\omega)| \cos(\omega t + \angle H(j\omega)).$$

Assim, podemos determinar a magnitude de $H(j\omega)$ simplesmente comparando as amplitudes da entrada e saída.

Salve (ou tire fotos) de todas as curvas obtidas abaixo. As imagens devem ser de boa qualidade para permitir a leitura dos dados e sua correção. Idealmente, os dados devem ser salvos em um pendrive diretamente do osciloscópio.

Antes de montar os circuitos, é preciso verificar os reais valores das resistências e capacitâncias. Assim, realize o passo a seguir.

- Usando o multímetro, **meça e registre** os valores de todos os resistores e capacitores que for usar. Lembre-se de que para a medição os componentes não devem estar conectados a nada.

Após o laboratório, você irá usar estes valores para recalculer o gráfico de Bode, a frequência de corte e o ganho do filtro. Faremos agora a medição do gráfico de Bode de magnitude do filtro.

Comportamento na frequência

Você deve então montar o filtro na protoboard usando os valores de resistências e capacitâncias determinados na primeira parte. Conecte o gerador de sinal do osciloscópio na entrada $v_i(t)$ do circuito. Configure o gerador para gerar uma onda senoidal de amplitude de 5 V pico a pico. A frequência será dada nos passos abaixo. Com a entrada do circuito no canal 1 e a saída no canal 2 do osciloscópio, ligue a fonte de tensão e o gerador de sinais. Realize então as atividades a seguir.

- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para uma frequência de 1 KHz. Você deverá usar estes valores para determinar o ganho do filtro para frequências altas.
- Variando a frequência da senoide de entrada, **ache** a frequência de corte f_c do circuito.
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_c : 0.15, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2.

Atividades pós-laboratoriais

Para o relatório, você deve realizar algumas atividades. A primeira delas é a seguinte:

- Para cada conjunto de medições realizadas acima, **monte** uma tabela com os valores medidos.

Além disso, usando os valores medidos de resistências e capacitâncias, realize as atividades abaixo para cada circuito.

- **Calcule** a função de transferência $H(s)$ do circuito usando a expressão achada na análise teórica da primeira parte.
- A partir desta função de transferência, **determine** a frequência de corte e o ganho do filtro, comparando-os com os valores medidos em laboratório.
- A partir dos valores de tensão de entrada e saída medidos, **calcule** a correspondente magnitude da função de transferência. Monte uma tabela com estes valores calculados.
- **Plote** em escala log-log a magnitude da função $H(j\omega)$ e os pontos que você calculou acima. Você pode usar o script do Python disponibilizado no Google Sala de Aula.

Inclua todas as informações acima no relatório.

Escrita do relatório

Para escrever o relatório, siga as instruções contidas no modelo de relatório disponível no Google sala de aula no arquivo `relatorio_Circuitos_Eletricos_2.pdf`. O link para o projeto do modelo de relatório no Overleaf é:

<https://www.overleaf.com/read/zghrpjzhqypp?authuser=0>

Se desejar, considere o exemplo de relatório disponível no Google sala de aula no arquivo `exemplo_relatorio_Circuitos_Eletricos_2.pdf`.

O relatório deve estar no formato pdf. Não envie no formato doc ou outro qualquer. Qualquer imagem ou foto deve ter uma resolução suficiente para ser possível obter as informações importantes da imagem.

Envie o relatório em pdf pelo Google Sala de Aula para o professor.

Simuladores

Você pode conferir os resultados que você obteve neste laboratório com um simulador computacional. Três simuladores que podem ser usados são:

- LTSpice IV: <http://www.linear.com/designtools/software/>
- Simulador on-line EasyEDA: <http://easyeda.com/>
- Simulador on-line Circuit Lab: <https://www.circuitlab.com/>