

4ª PRÁTICA DE LABORATÓRIO

Introdução

Neste laboratório projetaremos e implementaremos um filtro passivo RC passa-baixa, medindo em seguida grandezas elétricas para analisarmos o comportamento na frequência, com e sem carga, da magnitude de sua resposta em frequência. Compararemos os resultados teóricos com os práticos. Veremos também como usar um *buffer* para diminuir o impacto de uma carga no comportamento do circuito.

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

Na primeira parte, iremos fazer a análise teórica dos circuitos através da aplicação da transformada de Laplace, obtendo daí a função de transferência e o seu diagrama de Bode de magnitude. Da função de transferência extrairemos a relação entre os elementos do circuito e os parâmetros do filtro, o que usaremos para projetar o filtro.

Para isso, você deve determinar, com o conhecimento do que foi visto em sala de aula, as equações a serem solucionadas, deixando a sua resolução, entretanto, para o computador. O sistema de computação simbólica a ser utilizado é o SymPy. Neste laboratório iremos usar principalmente as funcionalidades de resolução de sistemas de equações algébricas, substituição de expressões do SymPy, transformada de Laplace e diagramas de Bode.

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

Objetivos

- Conhecer as características de um circuito RC que se comporta como um filtro passa-baixa.
- Treinar a análise de circuitos com carga e com fontes não-ideais.
- Aplicar a transformada de Laplace na análise de circuitos.
- Usar um ampop como buffer.
- Medir as grandezas elétricas em um circuito usando um osciloscópio.
- Medir o comportamento na frequência de circuitos de filtros para comparar 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:

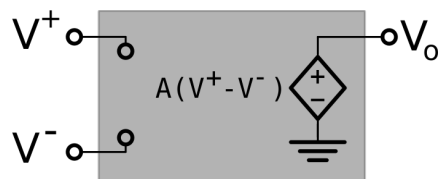
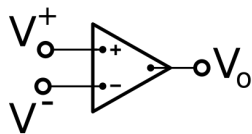
- jupyter notebook
- LTSpice
- Multímetro
- Osciloscópio
- Fonte de tensão
- Gerador de sinais

Material necessário

- 1 resistor de $22\text{ k}\Omega$
- 1 resistor de acordo com seu projeto
- 1 capacitor de 100 nF
- 1 ampop

Prólogo

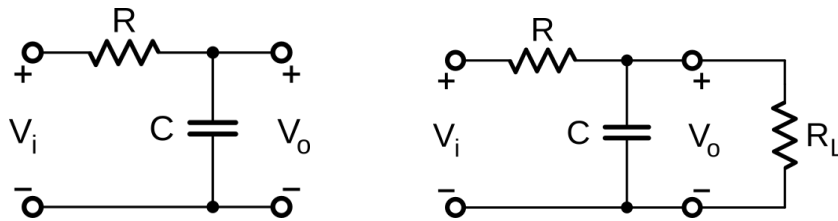
Um *amplificador operacional* é um dispositivo eletrônico versátil, embora complexo, que será estudado em detalhes na disciplina de Eletrônica 1. Para os propósitos desta disciplina, iremos assumir o modelo simplificado, porém próximo o suficiente da realidade, do amplificador operacional ideal, que 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

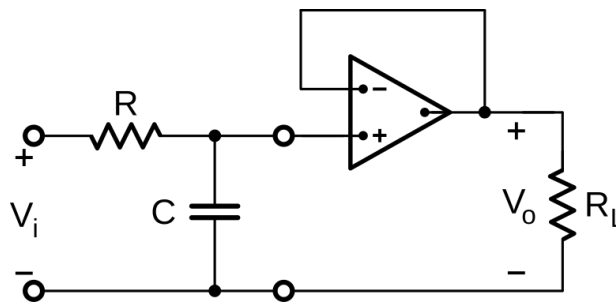
Nesta prática analisaremos e implementaremos três circuitos relacionados entre si. O primeiro circuito é um filtro passa-baixa RC passivo, apresentado abaixo à esquerda e estudado nas aulas teóricas da disciplina. Ele é um circuito bem simples, consistindo de um resistor e um capacitor em série. A saída é a tensão medida sobre o capacitor.



Assumindo que a tensão de entrada é $v_i(t)$ e a tensão de saída é $v_o(t)$, queremos determinar a função de transferência do circuito acima, juntamente com seu diagrama de Bode de magnitude.

Além desse filtro sem carga, também analisaremos o filtro quando uma carga R_L é conectada à sua saída, como apresentado acima à direita. Vocês viram em sala de aula que a carga altera as características do filtro, em particular, seu ganho e sua frequência de corte. Iremos verificar essas alterações nesta prática.

Por último, iremos analisar o circuito abaixo, consistindo do filtro RC acima seguido de um *buffer* implementado por meio de um ampop.



Na primeira parte desta prática faremos a análise teórica dos circuitos acima usando a função de transferência, e na segunda parte, na próxima semana, iremos ao laboratório fazer as medições e comprovar os resultados teóricos obtidos.

1ª parte - análise teórica

Iremos projetar e implementar um filtro passa-baixa RC passivo, medindo as características de sua função de transferência e seu comportamento com e sem carga. Em seguida, conectaremos um *buffer* à sua saída para ver o impacto na resposta do filtro com carga.

Este conhecimento prévio é importante para você poder analisar qualquer problema encontrado. 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.

Primeiro circuito

Consideraremos primeiro o filtro RC sem carga. Realize as atividades abaixo.

- **Converta** o circuito para a frequência e **determine** as equações que o regem.
- **Resolva** as equações e **determine** a função de transferência $H_1(s) = V_o(s)/V_i(s)$ em função de R e C .
- A partir desta função de transferência, **determine** a frequência de corte e o ganho do filtro.
- **(LAB) Projete** o filtro (i.e., **determine** os valores de R e C) para que ele tenha ganho unitário e frequência de corte $f_c = 50$ Hz. Use um capacitor de 100 nF. Escolha um resistor de valor comercial (isso provavelmente modificará um pouco a frequência de corte).
- **(LAB) Determine** o diagrama de Bode de magnitude do filtro.
- **(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.

Segundo circuito

Considere agora o filtro projetado acima com um resistor de carga $R_L = 22\text{ k}\Omega$. Realize as atividades abaixo.

- **Converta** o circuito para a frequência e **determine** as equações que o regem.
- **Resolva** as equações e **determine** a função de transferência $H_2(s) = V_o(s)/V_i(s)$ em função de R , C e R_L .
- A partir desta função de transferência, **determine** a frequência de corte e o ganho do circuito, comparando-os com o do filtro sem carga.
- **(LAB) Determine** o diagrama de Bode de magnitude do filtro.
- **(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.

Terceiro circuito

Por último, considere o circuito consistindo do filtro com um *buffer* entre o filtro e a carga. Realize as atividades abaixo.

- Usando o modelo de ampop dado, **converta** o circuito para a frequência e **determine** as equações que o regem.
- **Resolva** as equações e **determine** a função de transferência $H_3(s) = V_o(s)/V_i(s)$ em função de R , C e R_L .
- A partir desta função de transferência, **determine** a frequência de corte e o ganho do circuito, comparando-os com o do filtro sem carga.
- **(LAB) Determine** o diagrama de Bode de magnitude do filtro.
- **(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 os circuitos acima em uma *protoboard* e faremos as medições dos sinais de saída, comparando-os com a entrada para determinar a magnitude da função de transferência. *Não nos preocuparemos aqui com a fase dos sinais.* 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 de 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 a frequência de corte e o ganho de todos os circuitos.

Primeiro circuito

Você deve então montar o filtro RC sem carga na *protoboard* usando os valores de R e C projetados 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 Hz. Você deverá usar estes valores para determinar o ganho do filtro para frequências baixas.
- Variando a frequência da senóide de entrada, **ache** a frequência de corte f_{c1} do circuito.
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_{c1} : 0.02, 0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.6, 2.5, 3.5, 5, 10, 20.

No relatório, você deve colocar uma tabela com os valores acima medidos.

Segundo circuito

Após terminar as medições para o primeiro circuito, desligue todos os equipamentos e monte o segundo circuito colocando uma carga $R_L = 22\text{ k}\Omega$ na saída do filtro RC. Conecte o gerador de sinal do osciloscópio na entrada $v_i(t)$ do circuito e configure-o para gerar uma onda senoidal de amplitude de 5 V pico a pico. A frequência será dada abaixo. Conecte o canal 1 do osciloscópio na entrada do circuito e o canal 2, na saída. Realize então os passos a seguir.

- Variando a frequência da senóide de entrada, **ache** a frequência de corte f_{c2} do circuito. Esta é a mesma do primeiro circuito?
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_{c2} : 0.02, 0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.6, 2.5, 3.5, 5, 10, 20.

No relatório, você deve colocar uma tabela com os valores acima medidos.

Terceiro circuito

Por último, desconecte a carga do filtro e coloque um ampop na configuração de *buffer* na saída do filtro, conectando a carga R_L na saída do ampop. Novamente, conecte o gerador de sinal do osciloscópio na entrada $v_i(t)$ do circuito e configure-o para gerar uma onda senoidal de amplitude de 5 V pico a pico. A frequência será dada abaixo. Conecte o canal 1 do osciloscópio na entrada do circuito e o canal 2, na saída. Realize então os passos a seguir.

- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para uma frequência de 1 Hz. Você deverá usar estes valores para determinar o ganho do filtro para frequências baixas.
- Variando a frequência da senóide de entrada, **ache** a frequência de corte f_{c3} do circuito.
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_{c3} : 0.02, 0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.6, 2.5, 3.5, 5, 10, 20.

No relatório, você deve colocar uma tabela com os valores acima medidos.

Atividades pós-laboratoriais

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

- Para cada conjunto de medições, **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 $H(s)$ de cada 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 de cada circuito, comparando-os com os valores medidos em laboratório.
- **Plote** em escala log-log a magnitude da função $H(j\omega)$ e os pontos que você mediu. 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/>