

3ª PRÁTICA DE LABORATÓRIO

Introdução

Neste laboratório iremos analisar o comportamento transiente e permanente de um circuito de segunda ordem implementado através de um ampop. Para a análise em regime permanente, usaremos a ferramenta de gráficos de Bode.

Sistemas de segunda ordem aparecem frequentemente na prática, seja de forma isolada ou como parte de um sistema maior, e por isso seu estudo é importante. O caso que analisaremos aqui se comporta como um filtro passa-baixa.

Esta prática será dividida em duas partes. Na primeira, analisaremos teoricamente o circuito usando as ferramentas vistas em aula com modelos lineares dos componentes. Com isso, encontraremos os resultados que esperamos teoricamente. Na segunda parte, iremos ao laboratório implementar o circuito e realizar medições para corroborar os resultados teóricos.

Para a primeira parte, utilizaremos o SymPy, um sistema de computação simbólica que reúne uma vasta biblioteca de operadores matemáticos que vão desde os mais simples, como diferenciação e integração simbólicas, até os mais complexos. Neste laboratório iremos usar as funcionalidades de resolução de sistemas de equações algébricas, transformada de Laplace e análise de gráfico de Bode.

Objetivos

- Calcular os gráficos de Bode de um circuito eletrônico de segunda ordem;
- analisar a resposta transitória de um circuito eletrônico de segunda ordem;
- praticar a análise de circuitos com ampops;
- medir as características do gráfico de Bode de um circuito usando um osciloscópio;
- medir as características da resposta no tempo em regime transitório de um circuito usando um osciloscópio.

Equipamentos necessários

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

- jupyter notebook
- LTSpice
- Fonte de tensão
- Multímetro

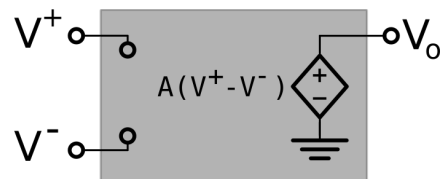
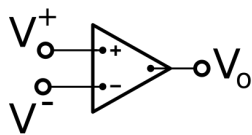
- Osciloscópio
- Gerador de sinais

Material necessário

- 1 amplificador operacional (modelo 741, OP007, LM324, LM358, NE5532, ou outro equivalente)
- 1 resistor de $47\text{ k}\Omega$
- 2 resistores de $470\text{ k}\Omega$
- 1 capacitor de 100 nF
- 1 capacitor de 10 nF

Prólogo

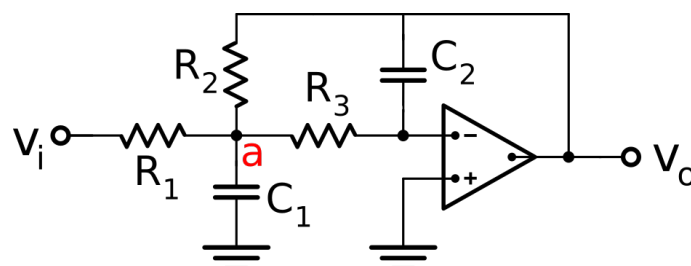
Um *amplificador operacional* é um dispositivo eletrônico versátil, embora complexo, que será estudado em detalhes na disciplina de Eletrônica 1. Para os propósitos desta disciplina, iremos assumir o modelo simplificado, porém próximo o suficiente da realidade, do amplificador operacional ideal, que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

O circuito a ser analisado e implementado, mostrado abaixo, consiste de um circuito com ampop e dois capacitores, além de três resistores.



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 seus gráficos de Bode de magnitude e fase. Na primeira parte desta prática faremos a análise teórica 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

Vocês viram em sala de aula que os gráficos de Bode de um circuito linear são calculados a partir da sua função de transferência. A 1ª etapa, portanto, é achar esta função. Vocês devem então fazer os seguintes passos:

- **Converta** o circuito acima para a frequência e **determine** as equações que o regem.
- **Resolva** as equações e **determine** a função de transferência $H(s) = V_o(s)/V_i(s)$ em função de R_1 , R_2 , R_3 , C_1 e C_2 .

Vamos agora estudar o comportamento de dois circuitos particulares do tipo acima.

Para realizar a segunda parte em laboratório descrita em uma seção posterior, 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 agora o circuito onde $R_1 = 47\text{ k}\Omega$, $R_2 = 470\text{ k}\Omega$, $R_3 = 470\text{ k}\Omega$, $C_1 = 100\text{ nF}$ e $C_2 = 10\text{ nF}$. Realize então os passos a seguir.

- Usando a função `subs()` do SymPy com os valores acima, **ache** a função de transferência numérica $H(s) = V_o(s)/V_i(s)$.
- Usando a função `denom()` e a função `solve()`, **calcule** os polos desta função de transferência.
- **(LAB)** Usando as funções `bode_magnitude_plot()` e `bode_phase_plot()`, **trace** os gráficos de bode de magnitude e fase, respectivamente, desta função de transferência para valores de f de 0,01Hz a 100000Hz. Use a opção `freq_unit='Hz'`.

Em seguida, realize os passos a seguir.

- Usando a função `inverse_laplace_transform()` para calcular a transformada inversa, **determine** a resposta do circuito a um degrau de amplitude 0,8 V.
- **(LAB)** Usando a função `plot()`, **plote** a resposta ao degrau para $0 \leq t \leq 0,5$ s.
- **(LAB)** **Determine** o valor de regime permanente para o qual a resposta ao degrau converge quando $t \rightarrow \infty$.
- **(LAB)** Por meio do seguinte código, **determine** os valores de tempo em que a resposta ao degrau atinge 10% e 90% do valor de regime permanente que você determinou anteriormente. Substitua no código `valor` pelo valor numérico que corresponde ao valores de tempo que se deseja encontrar.

```
lam_Vo_t = lambdify(t, Vo_t)
t_vals = np.linspace(0, 0.5, 1000)
Vo_vals = lam_Vo_t(t_vals)
t_vals[np.where(np.isclose(valor, Vo_vals))]
```

Monte uma tabela com os valores que você achar acima e coloque no relatório.
Usando o LTSpice, realize os passos a seguir.

- Represente o circuito. Conecte uma fonte de tensão simétrica no ampop e configure-a para ter uma tensão de ± 10 V. Conecte à entrada $v_i(t)$ do circuito uma fonte de tensão. Clique com o botão direito do mouse nesta fonte e configure-a com a função “none”. Na caixa “Small signal AC analysis (AC)”, insira:
 - “AC Amplitude”: 1
 - “AC Phase”: 0
- Clique no menu “Simulate” / “Edit Simulation Cmd”. Escolha a aba “AC Analysis”, e insira
 - Type of sweep: Decade
 - Number of points per octave: 20
 - Start frequency: 0,01
 - Stop frequency: 100000
- Clique no botão OK. Simule o circuito.
- Salve os diagramas de Bode da resposta em frequência do sistema.
- Configure a entrada $v_i(t)$ do circuito como uma onda quadrada de amplitude 0,8 V e frequência de 1Hz. Simule o circuito e salve a resposta transitória do circuito ao degrau de amplitude 0,8V.

Segundo circuito

Considere agora o circuito onde $R_1 = 470 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 47 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 100 \text{ nF}$ e $C_2 = 10 \text{ nF}$ (basicamente estamos trocando os valores de R_1 e R_3). Realize então os passos abaixo.

- Usando a função `subs()`, **determine** a função de transferência numérica $H(s) = V_o(s)/V_i(s)$.
- Usando a função `denom()` e a função `solve()`, **calcule** os polos desta função de transferência.
- **(LAB)** Usando as funções `bode_magnitude_plot()` e `bode_phase_plot()`, **trace** os gráficos de bode de magnitude e fase, respectivamente, desta função de transferência para valores de f de 0,01Hz a 100000Hz. Use a opção `freq_unit='Hz'`.
- **(LAB)** Por meio da função `bode_magnitude_numerical_data()`, obtenha os dados de frequência e magnitude (`arrayf`, `arrayAbsHj2pif`) do gráfico de bode. Use a opção `freq_unit='Hz'`.
- **(LAB)** Por meio da função `argmax()`, do NumPy **determine** a frequência para a qual a magnitude é máxima. Por exemplo: `arrayf[np.argmax(arrayAbsHj2pif)]`

Em seguida, realize os passos a seguir.

- Usando a função `inverse_laplace_transform()` para calcular a transformada inversa, **determine** a resposta do circuito a um degrau de amplitude 5 V.
- **(LAB) Determine** o valor de regime permanente para o qual a resposta ao degrau converge quando $t \rightarrow \infty$.
- **(LAB)** Usando a função `plot()`, **plote** a resposta ao degrau para $0 \leq t \leq 0,1$ s.
- **(LAB)** Por meio da função `solve()`, **determine** os valores de tempo em que a resposta ao degrau primeiro atinge 10% e 90% do valor final que você determinou acima.
- **(LAB) Determine** também o valor de tempo a partir do qual a resposta ao degrau está integralmente dentro da faixa de valores entre 99% e 101% do valor final que você determinou acima.

Usando o LTSpice, represente o circuito. Utilize os passos da configuração da análise AC apresentados para o primeiro circuito. Simule o circuito. Salve os diagramas de Bode da resposta em frequência do sistema. Configure a entrada $v_i(t)$ do circuito como uma onda quadrada de amplitude 5 V e frequência de 5Hz. Simule o circuito e salve a resposta transitória do circuito ao degrau de amplitude 5V.

2ª parte - medições em laboratório

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

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. Os valores medidos acima devem ser colocados em uma tabela no relatório.

Primeiro circuito

Você deve então montar o primeiro circuito na protoboard, conectando a fonte de tensão simétrica no ampop e configurando-a para ter uma tensão de ± 10 V. Para este passo, **chame o professor para que ele acompanhe o procedimento**.

Caso esteja tudo certo, desligue a fonte e 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 0,8 V. 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 e **varie** a frequência do sinal senoidal de entrada até achar a frequência f_1 para a qual a saída está 3 dB abaixo da amplitude de saída a baixas frequências (0,5 Hz, por exemplo).
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_1 : 0.15, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.8, 2.5, 4, 6, 10.

Para o relatório, você deve colocar uma tabela com os valores acima medidos. Além disso, faça a atividade a seguir e inclua o gráfico gerado.

- Com os valores medidos das resistências e capacitâncias, **calcule** a função de transferência $H(s)$ do circuito usando a expressão achada na análise teórica da primeira parte.
- A partir das tensões de entrada e saída medidas, **calcule** as estimativas da magnitude da função de transferência do circuito.
- **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.

Configure o gerador para gerar uma onda quadrada de amplitude de 0,8 V.

- 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 e **varie** a frequência da onda quadrada até que a saída chegue em regime permanente.
- **Meça e registre** a amplitude do valor de regime permanente da saída e **meça** os valores de tempo em que a resposta ao degrau atinge 10% e 90% do valor de regime permanente que você determinou anteriormente.

Segundo circuito

Após terminar as medições para o primeiro circuito, desligue todos os equipamentos e monte o segundo circuito. 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 1 V. A frequência será dada abaixo. Realize então os passos a seguir.

- Com a entrada do circuito no canal 1 e a saída no canal 2 do osciloscópio, **varie** a frequência do sinal senoidal de entrada até achar a frequência f_{\max} que dá a maior amplitude de saída.
- **Meça e registre** as amplitudes das tensões de entrada e de saída para os seguintes múltiplos de f_{\max} : 0.15, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.8, 2.5, 4, 6, 10.

Para o relatório, você deve colocar uma tabela com os valores acima medidos. Além disso, faça a atividade a seguir e inclua o gráfico gerado.

- Com os valores medidos das resistências e capacitâncias, **calcule** a função de transferência $H(s)$ do circuito usando a expressão achada na análise teórica da primeira parte.
- A partir das tensões de entrada e saída medidas, **calcule** as estimativas da magnitude da função de transferência do circuito.
- **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.

Configure o gerador para gerar uma onda quadrada de amplitude de 5 V.

- 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 e **varie** a frequência da onda quadrada até que a saída chegue em regime permanente.
- **Meça e registre** a amplitude do valor de regime permanente da saída.
- **Meça** os valores de tempo em que a resposta ao degrau primeiro atinge 10% e 90% do valor de regime permanente que você determinou acima.
- **Meça** o valor de tempo a partir do qual a resposta ao degrau está integralmente dentro da faixa de valores entre 99% e 101% do valor de regime permanente que você determinou.

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/>