



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

PSI 3212 - LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS



GUIA DE EXPERIMENTOS

EXPERIÊNCIA 06 - SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS E LEIS DE KIRCHHOFF

PROFA. ARIANA SERRANO/PROF. VITOR NASCIMENTO

1º Semestre de 2016

Objetivos: *Aprender a usar um simulador de circuitos; usar o simulador para entender o funcionamento de um amplificador operacional ideal; aplicar leis de Kirchhoff para resolver circuitos com operacionais ideais e reais.*

Lista de equipamentos e materiais necessários:

- Osciloscópio;
- Gerador de Funções;
- Multímetro;
- Fonte DC ± 15 V
- 2 x resistor 10 k Ω /0,25W
- 1 x resistor 100 k Ω /0,25W
- 1 x resistor 470 k Ω /0,25W
- 1 x resistor 47 k Ω /0,25W
- 2 x capacitor 1,5 nF
- 1 amplificador operacional 741 (pode ser OP741, LM741 ou qualquer outra variação)

Instruções para instalação do simulador em seu computador e sobre sua operação básica podem ser encontradas na apostila teórica “Simulador de Circuitos Elétricos com Multisim”.

Nesta experiência, usaremos a versão Multisim 14.0, no sistema operacional Windows.

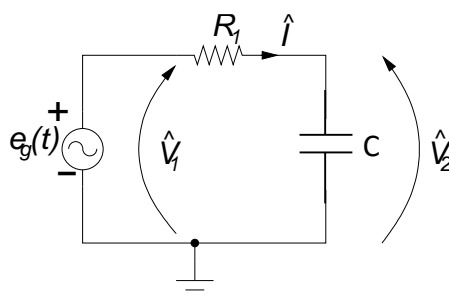
PARTE EXPERIMENTAL

1. Simulações

- Para medir o ganho e a defasagem, você tem algumas opções no Multisim, mas nesta experiência, utilize as pontas de prova e o osciloscópio Tektronix nas simulações.

Você verá que usar as pontas de prova em pontos estratégicos do circuito torna a análise e os cálculos da simulação muito rápidos. Já o uso do osciloscópio torna a visualização dos sinais, especialmente a defasagem entre eles, muito rápida.

- 1.1 Simule inicialmente o circuito abaixo. Use como entrada um sinal senoidal qualquer, por exemplo, com 2 V_{pp} e 200 Hz de frequência. Utilize R₁ igual a 1 kΩ e C₁ igual a 0,16 μF (cuidado: o simulador aceita apenas "." para indicar números não inteiros; o uso de "," gera erro).



- a) Qual é o ganho $|\hat{V}_2|/|\hat{V}_1|$ e a defasagem entre essas duas tensões na simulação? Anote os dados no relatório, explicando o procedimento para determiná-los.
- b) Repita para $|\hat{I}|/|\hat{V}_1|$ e a defasagem entre a corrente e a tensão de entrada na simulação? Anote os dados no relatório, explicando o procedimento para determiná-los.
- c) Qual é o ganho e a defasagem teóricos nos dois casos (fasores!)? Compare-os com os valores obtidos pela simulação e, caso os valores não estejam coerentes, analise a causa da divergência.
- 1.2 Neste item, vamos estudar através do simulador o comportamento de um circuito amplificador com gerador de tensão vinculado, ou seja, um gerador de tensão controlado por tensão¹.

Um gerador de tensão controlado por tensão é apenas um modelo de um amplificador ideal que gera em sua saída (v_2) uma tensão proporcional à tensão de entrada (v_1): $v_2(t) = A v_1(t)$. Esse circuito não puxa corrente em sua entrada ($i_{in} = 0$) e não depende de R_2 , conforme apresentado na Figura 1. A é o *ganho de malha aberta* do amplificador, na figura com valor de 1V/V.

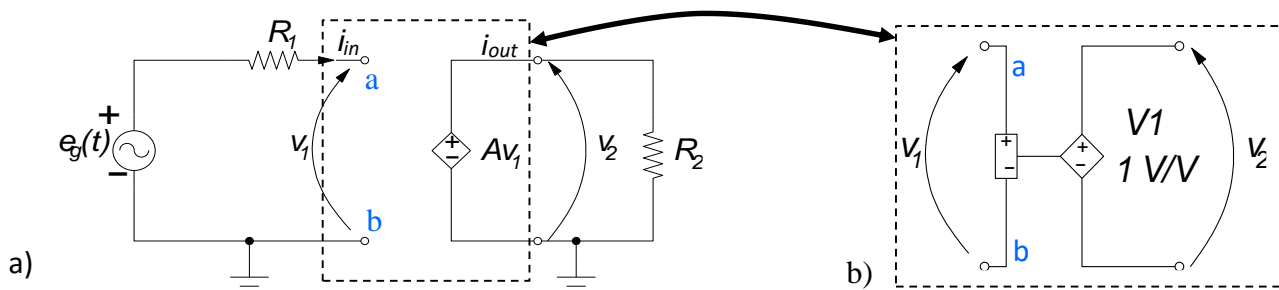


Figura 1: a) Esquema elétrico de um circuito utilizando o gerador de tensão controlado por tensão; b) Símbolo do gerador de tensão controlado por tensão no Multisim.

¹ O gerador de tensão controlado por tensão pode ser encontrado no Multisim no menu "Sources -> Controlled_Voltage_Sources -> Voltage_Controlled_Voltage_Source".

Simule o circuito da Figura 1 (os valores dos resistores você pode escolher à vontade) e verifique:

- a) O ganho A é realmente aquele determinado pelo gerador de tensão controlado por tensão (use dois valores diferentes de ganho A , por exemplo, um valor baixo em torno de unidades e um bem elevado >10.000)? A corrente i_{in} é realmente nula? E i_{out} ?

1.3 Vamos introduzir uma realimentação entre a tensão de saída v_2 e o terminal *negativo* (ponto “b”) da tensão de entrada v_1 do gerador controlado. O resistor R_f funciona como tal realimentação, apresentado na Figura 2. Repare que na Figura 2, a seta de v_1 está invertida, pois é uma realimentação negativa e o circuito da sua simulação deverá refletir essa inversão.

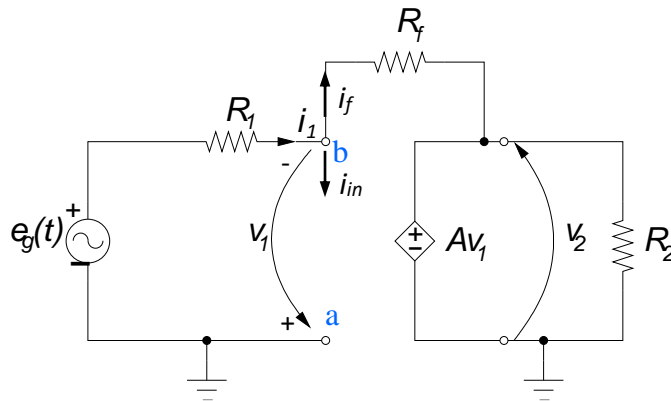


Figura 2: Esquema elétrico de um amplificador com realimentação negativa.

O ganho G_2 entre a tensão de saída e a tensão do gerador independente do circuito *realimentado* é determinado por:

$$G_2 = \frac{v_2}{e_g} = -\frac{R_f}{R_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)} \right) \quad (eq. 1)$$

- a) Você vai ver que quando o ganho A é bem elevado (>10.000), essa realimentação vai limitar o valor do ganho G_2 do circuito realimentado. Olhando a eq.1 – como o G_2 fica limitado?

Monte e simule o circuito da Figura 2 prestando atenção na polaridade de v_1 , com $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ e R_2 você pode escolher à vontade. Em todos os casos abaixo, anote os dados nas tabelas, mostrando seus cálculos e explicando o que foi pedido.

- b) O ganho G_2 na simulação é realmente aquele determinado teoricamente pela eq. 1 (use dois valores diferentes de ganho A , por exemplo, um valor baixo em torno de unidades e um bem elevado >10.000)? E a defasagem entre v_2 e e_g , qual é? Qual a relação da defasagem com a eq. 1?
- c) Qual é o ganho entre a tensão de saída e a tensão de entrada do gerador controlado ($G_1 = v_2/v_1$) na simulação? Esse ganho G_1 é relacionado com o ganho A ?
- d) Meça também na simulação as três correntes: a do circuito de entrada i_1 , a de realimentação i_f e a de entrada no gerador controlado i_{in} .
- e) O que acontece com i_{in} , v_1 , G_1 e G_2 quando se aumenta bastante o ganho A ?

2. Montagens experimentais

De maneira bem simplificada, um amplificador operacional é um circuito que se aproxima de um gerador de tensão controlado por tensão, com o ganho A bem elevado – da ordem de 10^4 a 10^6 . A impedância de entrada também é bastante alta, logo a corrente na sua entrada tende a zero. Sua impedância de saída é razoavelmente baixa.

O amplificador operacional que usaremos para verificar esses fatos, o 741, tem ganho elevado em malha aberta apenas numa faixa de frequências de uma centena de Hz, segundo seu *datasheet*. Baixe esse *datasheet* para referência. Verifique que sua saída tem uma excursão máxima, ou seja, existem limites para a tensão de saída positiva e negativa, de acordo com sua alimentação.

Monte o circuito da Figura 3, que é o mesmo da Figura 2, mas com um amplificador real (atenção para não se esquecer das alimentações!). Utilize o *datasheet* para fazer as conexões.

Note que os sinais “-” e “+” do 741 correspondem aos sinais “-” e “+” da entrada do gerador de tensão controlado por tensão. Utilize os mesmos valores de resistores usados na simulação ($R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$, e $R_f = 100\text{ k}\Omega$). Chame o professor assim que terminar a montagem SEM LIGAR NENHUM EQUIPAMENTO.

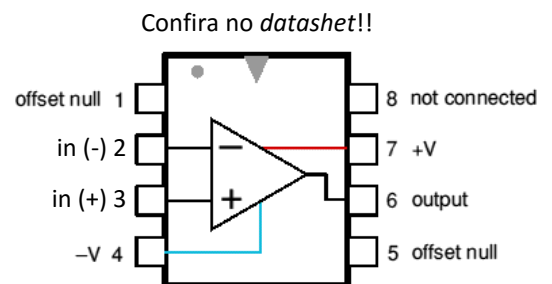
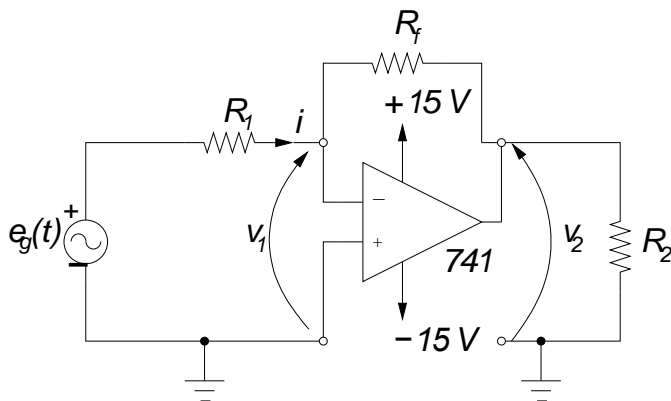


Figura 3: Amplificador inversor com operacional.

2.1 Ajuste e_g adequadamente:

- Com amplitude tal que não sature o amplificador operacional, considerando que um circuito não pode produzir uma tensão maior que sua alimentação;
- Com frequência tal que seu ganho A seja bem alto (>10.000) – consulte o *datasheet*.

- a) Meça o que for necessário para determinar v_1 , G_1 e G_2 , colocando os dados no relatório.
- b) Os valores de v_1 , G_1 e G_2 medidos e simulados estão coerentes?

2.2 No item 1.3 a) você determinou o ganho do amplificador operacional quando A é muito alto. Agora, através de análise de circuitos, com auxílio das leis de Kirchhoff, encontre a equação do ganho G_2 em função dos resistores utilizados - para isso, aproxime a tensão v_1 para o valor para o qual ela tende quando A é muito grande (conforme você viu na simulação do item 1.3 b) e mediu no item 2) e considere que a impedância de entrada do amplificador operacional seja infinita.

Compare seu resultado com a eq.1 reduzida para alto A . Resolva sua equação para os valores de resistores utilizados na simulação e na montagem experimental e compare os resultados com os ganhos obtidos nesses casos.

2.3 **Desafio:** Use a mesma aproximação do item 2.2 para calcular o ganho teórico $|\hat{V}_2|/|\hat{E}_g|$ do circuito com um capacitor $C_f = 1,5 \text{ nF}$ em paralelo com $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ para DC, $f = 1 \text{ kHz}$ e $f = 1 \text{ MHz}$. Calcule também a defasagem entre essas tensões nessas três frequências.

2.4 **Desafio:** Agora monte o circuito com o capacitor citado no item 2.3. Meça o ganho e a defasagem entre $v_2(t)$ e $e_g(t)$ para DC, $f = 1 \text{ kHz}$ e $f = 1 \text{ MHz}$, e compare com os valores obtidos no item anterior.

3. Os próximos itens você deve fazer no simulador, em casa:

3.1 Simule o circuito completo da Figura 3, usando o componente amplificador operacional utilizado na experiência, com os valores de resistência indicados no item 2.2.

3.2 Simule também, usando o modelo de amplificador operacional utilizado na experiência, o circuito com um capacitor $C_f = 1,5 \text{ nF}$ em paralelo com $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ para DC, $f = 1 \text{ kHz}$ e $f = 1 \text{ MHz}$.