

Experimento 9: Circuitos com Amplificador Operacional

1) Questões pré-laboratoriais

Considere os circuitos com amplificador operacional mostrados na Figura ??.

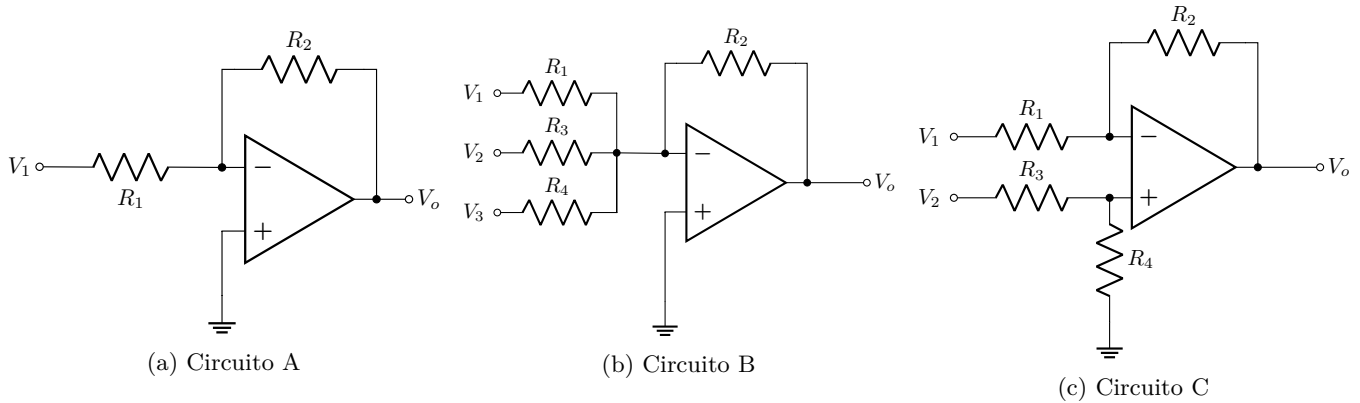


Figura 1: Circuitos com Amplificador Operacional

1.1) Expressões Matemáticas

Obtenha as expressões matemáticas da saída $V_o(t)$ em função das entradas e dos valores (literais) dos resistores para os circuitos A, B e C da Figura 2.1. Quais os nomes dados a cada uma destas configurações de Amp Op?

1.1.1) Circuito A

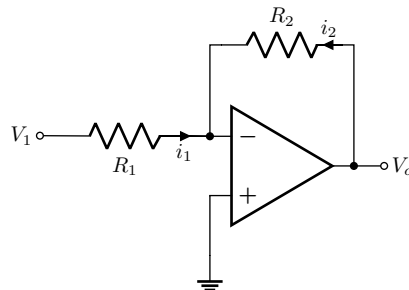


Figura 2: Amplificador Inversor

Devemos notar que as entradas do Amplificador Operacional são nulas. Dessa forma, podemos escrever a seguinte relação:

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{0 - V_1}{R_1} = \frac{V_o - 0}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{R_2} = \frac{-V_1}{R_1}$$

Esse circuito é conhecido como Amplificador inversor, pois

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (1)$$

1.1.2) Circuito B

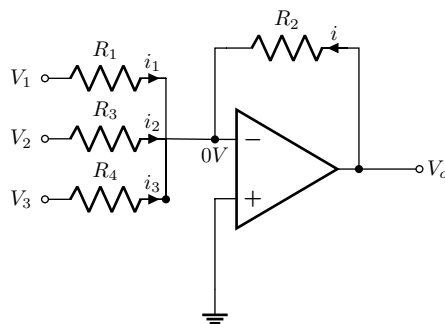


Figura 3: Amplificador Somador Inversor

De mesma forma que o anterior, considerando o modelo ideal, as entradas são nulas e o ganho, infinito. Assim podemos aplicar a lei de Kirchhoff:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$\frac{V_o - 0}{R_2} = \frac{0 - V_1}{R_1} + \frac{0 - V_2}{R_3} + \frac{0 - V_3}{R_3}$$

$$V_o = - \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_3} + \frac{V_3}{R_3} \right) R_2 \quad (2)$$

Esta última explicita a propriedade soma e inversão do circuito.

1.1.3) Circuito C

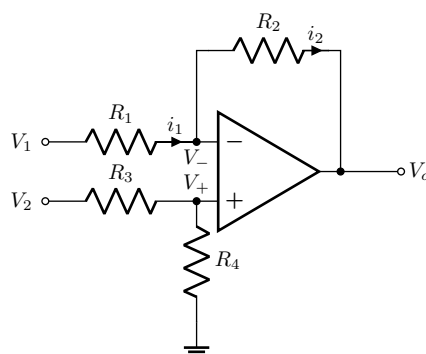


Figura 4: Circuito Subtrator

Considerando as condições ideais, construa a lei de Kirchhoff para as tensões referente ao nó da entrada inversora e da entrada não inversora:

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{V_- - V_1}{R_1} = \frac{V_o - V_-}{R_2} \Rightarrow \frac{V_-}{R_1} + \frac{V_-}{R_2} = \frac{V_o}{R_2} + \frac{V_1}{R_1}$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) V_- = \frac{V_o}{R_2} + \frac{V_1}{R_1} \quad (3)$$

Nesse ponto, necessitamos encontrar um valor que relacione os resistores R_3 e R_4 . Notando que $V_- = V_+$, calcularemos a expressão para o nó V_+ :

$$V_- = V_+$$

$$\frac{V_+ - V_2}{R_3} + \frac{V_+ - 0}{R_4} = 0 \Rightarrow \frac{V_+}{R_3} + \frac{V_+}{R_4} = \frac{V_2}{R_3} \Rightarrow \left(\frac{1}{R_3 + R_4} \right) V_+ = \frac{V_2}{R_3}$$

$$V_+ = \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \frac{V_2}{R_3} \quad (4)$$

Substituindo ?? em ??, temos

$$\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \frac{V_2}{R_3} = \frac{V_o}{R_2} + \frac{V_1}{R_1}$$

Isolando o $\frac{V_o}{R_2}$, obtemos

$$\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \frac{V_2}{R_3} - \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_o}{R_2}$$

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_2}{R_3} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (5)$$

2) Circuitos Integrados com Amplificadores Operacionais

Temos disponíveis no repositório 3 modelos de CI portador de amplificador operacional: uA741, LM358 e LM324. As peculiaridades de cada um serão descritas no fio abaixo, respectivamente:

1. O CI uA741 possui apenas um amplificador operacional. Possui entradas de ajuste de offset, para eliminar as variações de tensão entre as entradas inversora e não inversora do amplificador operacional. A alimentação é feita a partir de uma alimentação V_{cc+} e V_{cc-} , onde ambos os valores devem ser iguais, com o sinal oposto. A disposição dos pinos do CI estão na figura ??.

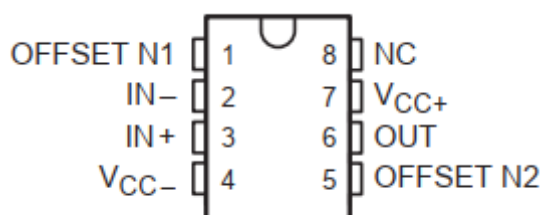


Figura 5: Pinagem do CI uA741

2. O LM358 possui dois amplificadores operacionais, A e B. Eles não possuem ajuste de offset. A alimentação é feita de dois modos: alimentando V^+ com 3V até 32V e GND aterrado, ou alimentando V^+ com +1.5V até +16V e GND com -1.5V até -16V, ambas as alimentações das entradas devem ser idênticas com sinais opostos. O arranjo dos pinos está disposto na figura ??.

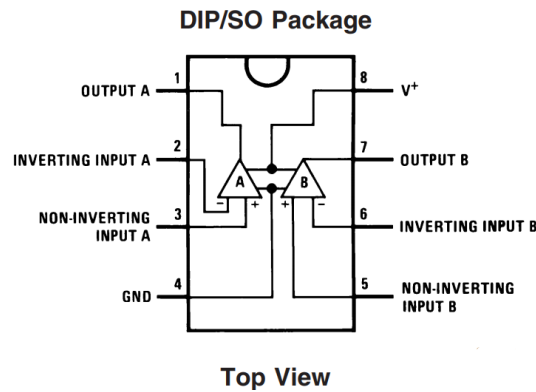


Figura 6: Pinagem do CI LM358

3. O terceiro CI, LM324, se dispõe de quatro amplificadores operacionais. Também não possui ajuste de offset. A alimentação é feita da mesma forma que o CI LM 358. A pinagem utilizada é mostrada na figura ??.

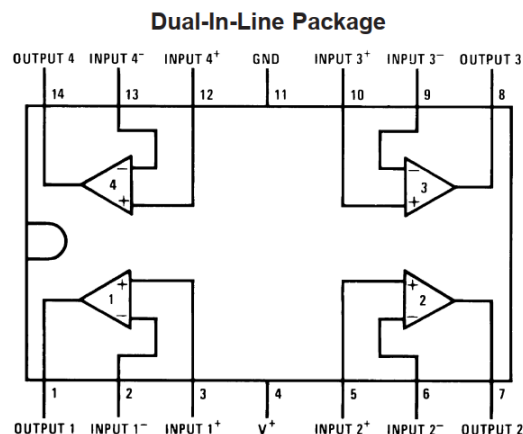


Figura 7: Pinagem do CI LM324

3) Efeitos limitadores dos amplificadores operacionais

O conhecimento de uma série de parâmetros dos amplificadores operacionais reais são determinísticos para a compreensão do seu desempenho. O fio abaixo mostra os principais deles:

- **Ganho Finito:** é a relação do ganho de tensão na saída em relação a entrada, a partir da variação de tensão nos terminais positivo e negativo do amplificador operacional. Desse modo, nós obtemos a relação $A(V^+ - V^-) = V_o$, onde A caracteriza o ganho, podendo chegar a casa de dezenas de milhares de unidades.
- **Impedância de entrada finita:** o modelo ideal de amplificador operacional assume que temos corrente zero passando pelos terminais. Entretanto, essa impedância de entrada é limitada quando medido a resistência de um dos terminais com o outro aterrado, ainda que esta seja na casa dos milhões de Ohms.
- **Tensão de offset de entrada:** devido as diferenças mínimas de fabricação de cada componente do amplificador operacional, a saída do amplificador operacional não obedecerá o modelo ideal, i.e., terá sua saída com tensão diferente de zero. Pode-se perceber esse efeito ao aterrar ambas as entradas do amplificador operacional e medir a sua saída. Geralmente, esse offset é ignorado por ser quase insignificante em alguns casos.
- **Lagura de banda finita:** os amplificadores operacionais possuem uma resposta em frequência do tipo passa-baixa. O efeito é causado principalmente por conta dos capacitores envolvidos no circuito do amplificador, fazendo com que a amplitude do sinal de saída diminua a partir das faixas mais altas de frequência.
- **Capacitância de entrada:** é a capacitância oferecida pelo amplificador operacional real, diferindo do modelo ideal que é zero. Ela é a responsável pelo comportamento do circuito em frequências altas.
- **Saturação:** A tensão de saída é limitada inferior e superiormente por um limiar de saturação, que é atingido um pouco antes dos valores de alimentação do amplificador operacional. Esse limiar é definido no projeto quando configurado as tensões de alimentação [?].
- **Slew-rate:** é a taxa em que a tensão de saída consegue variar em μs em relação a entrada. A imperfeição se deve aos condensadores presentes no componentes, uma vez que a resposta em frequência da tensão dos capacitores

não é imediata.

4) Impedâncias

4.1) Circuito A

A figura ?? retrata o modelo de impedância de entrada para o circuito Amplificador Operacional Inversor.

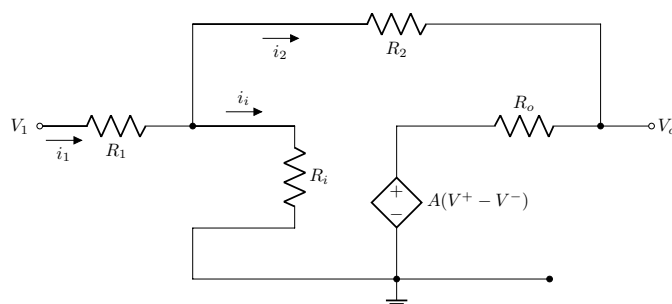


Figura 8: Circuito A

Podemos aplicar a Lei de Kirchhoff no nó de entrada para observar o comportamento da resistência de entrada:

$$i_1 = i_2 + i_i$$

$$\frac{V_- - V_1}{R_1} = \frac{V_o - V_-}{R_2} + \frac{V_+ - V_-}{R_i} \Rightarrow \frac{V_+ - V_-}{R_i} = \frac{V_- - V_1}{R_1} - \frac{V_o - V_-}{R_2}$$

$$\frac{V_+ - V_-}{R_i} = \frac{(V_- - V_1)R_2 - (V_o - V_-)R_1}{R_1 R_2}$$

$$R_i = \frac{(V_+ - V_-)R_1 R_2}{(V_- - V_1)R_2 - (V_o - V_-)R_1} \quad (6)$$

Para a resistência de saída, aplicamos a Lei de Kirchhoff no nó de saída, donde obtemos

$$\frac{V_o - V_-}{R_2} = \frac{A(V_+ - V_-) - V_o}{R_o}$$

$$R_o = \frac{(AV_+ - AV_- - V_o)R_2}{V_o - V_-} \quad (7)$$

4.2) Circuito B

O circuito da figura ?? retrata o modelo de circuito Amplificador Operacional Somador Inverso.

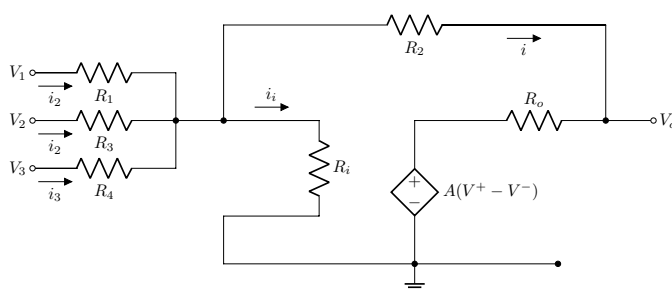


Figura 9: Circuito B

Podemos observar o comportamento da impedância de entrada analisando o nó de entrada com a Lei de Kirchhoff:

$$i + i_i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$\begin{aligned} \frac{V_o - V_-}{R_2} + \frac{V_+ - V_-}{R_i} &= \frac{V_- - V_1}{R_1} + \frac{V_- - V_2}{R_3} + \frac{V_- - V_3}{R_4} \\ \frac{V_+ - V_-}{R_i} &= \frac{V_- - V_1}{R_1} + \frac{V_- - V_2}{R_3} + \frac{V_- - V_3}{R_4} - \frac{V_o - V_-}{R_2} \\ \frac{V_+ - V_-}{R_i} &= \frac{(V_- - V_1)R_2R_3R_4 - (V_o - V_-)R_1R_3R_4 + (V_- - V_2)R_1R_2R_4 + (V_- - V_3)R_1R_2R_3}{R_1R_2R_3R_4} \\ R_i &= \frac{R_1R_2R_3R_4(V_+ - V_-)}{(V_- - V_1)R_2R_3R_4 - (V_o - V_-)R_1R_3R_4 + (V_- - V_2)R_1R_2R_4 + (V_- - V_3)R_1R_2R_3} \end{aligned}$$

Podemos analisar a impedância de saída a partir do nó de saída do circuito, donde temos

$$\begin{aligned} \frac{V_o - V_-}{R_2} &= \frac{A(V_+ - V_-) - V_o}{R_o} \\ R_o &= \frac{(AV_+ - AV_- - V_o)R_2}{V_o - V_-} \end{aligned}$$

4.3) Circuito C

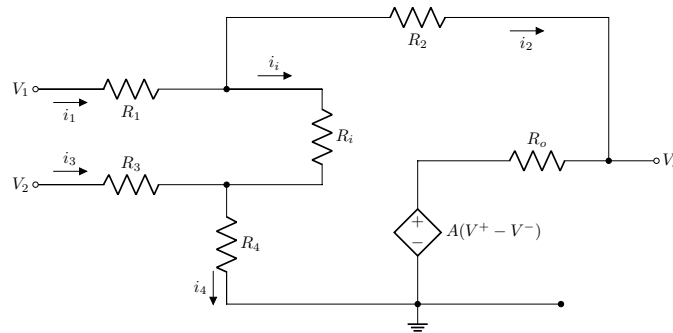


Figura 10: Circuito C

O circuito da figura ?? é uma abstração do funcionamento do amplificador operacional arranjado na configuração de Subtrator.

Analisando o nó de entrada, podemos obter a impedância de entrada. Desse modo,

$$i_i = i_2 - i_1$$

$$\begin{aligned} \frac{V_+ - V_-}{R_i} &= \frac{V_o - V_-}{R_2} - \frac{V_- - V_1}{R_1} \\ R_i &= \frac{(V_+ - V_-)R_1R_2}{(V_o - V_-)R_1 - (V_- - V_1)R_2} \end{aligned} \quad (8)$$

ou

$$i_i = i_4 - i_3$$

$$\begin{aligned} \frac{V_+ - V_-}{R_i} &= \frac{V_o - V_-}{R_4} - \frac{V_- - V_2}{R_3} \\ R_i &= \frac{(V_+ - V_-)R_3R_4}{V_+R_3 - (V_- - V_2)R_4} \end{aligned} \quad (9)$$

Agora, analisando o nó de saída, temos:

$$\frac{V_o - V_-}{R_2} = \frac{A(V_+ - V_-) - V_o}{R_o}$$
$$R_o = \frac{(AV_+ - AV_- - V_o)R_2}{V_o - V_-}$$

5) Simulações

Para senóides com $f = 100\text{Hz}$ e resistores (em Ohms), respectivamente, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 560\Omega$, $R_3 = 220\Omega$ e $R_4 = 330\Omega$, simule os circuitos A, B e C para todas as combinações de V1, V2 e V3 apresentadas na Tabela 1 da Folha de Dados.

5.1) Circuito A

- Inicialmente, abra o QUCS, vá em Main Dock e crie uma nova pasta de projeto.
- Na aba Componentes (Components), vá em componentes não lineares (non linear components) e clique em um Amplificador Operacional (OpAmp). Em componentes agrupados (lumped components) e clique em dois resistores. Vá em Fontes (sources) e coloque uma fonte de tensão AC (AC voltage Source).

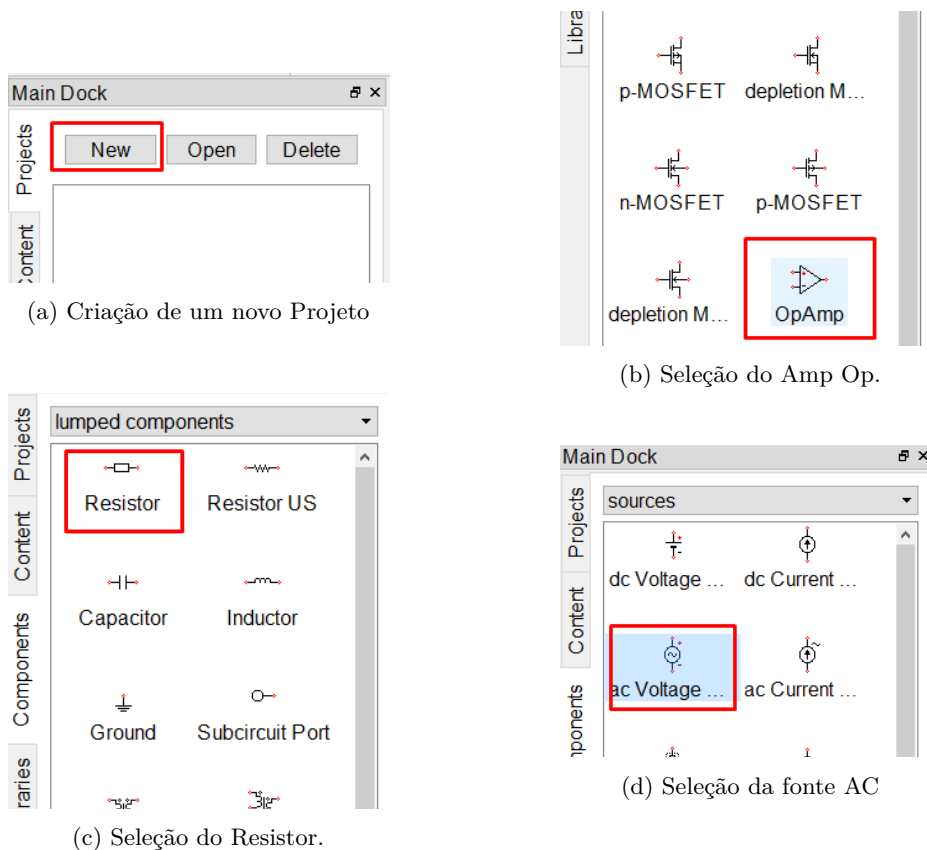


Figura 11: Abertura do projeto e seleção dos componentes

- Conecte os componentes como a figura ???. Não se esqueça da referência e ajustar os valores dos resistores.
- É importante salientar que para essa simulação, necessitaremos de uma simulação AC e outra DC. A simulação AC é necessária para a fonte de voltagem AC, enquanto a fonte DC tem sua utilidade na ligação DC do Amplificador Operacional, i.e., tem seu efeito na energização do V_{dd} e V_{ss} do Amp Op.
- Configure a Simulação AC para observar o valor da saída para a frequência desejada. Salve e simule.
- Vá em Diagramas e insira uma tabela. Coloque o valor da tensão $V_o.v$. O resultado final deve ser igual ao representado na Figura ??.

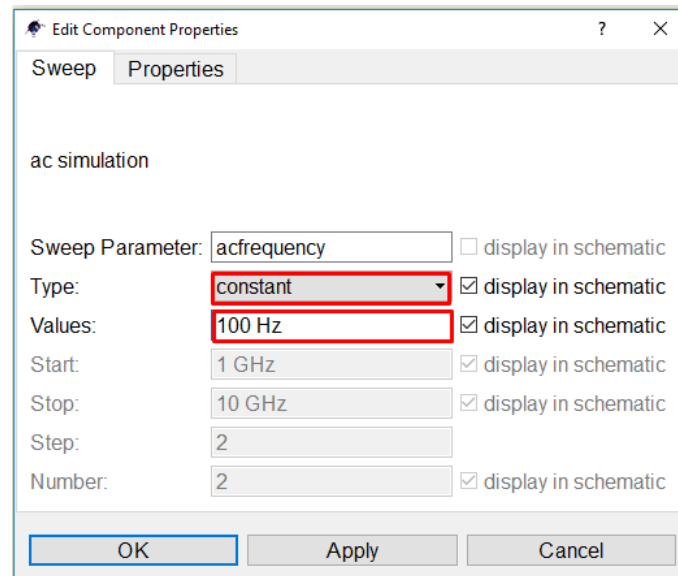


Figura 12: Parâmetros de Simulação AC.

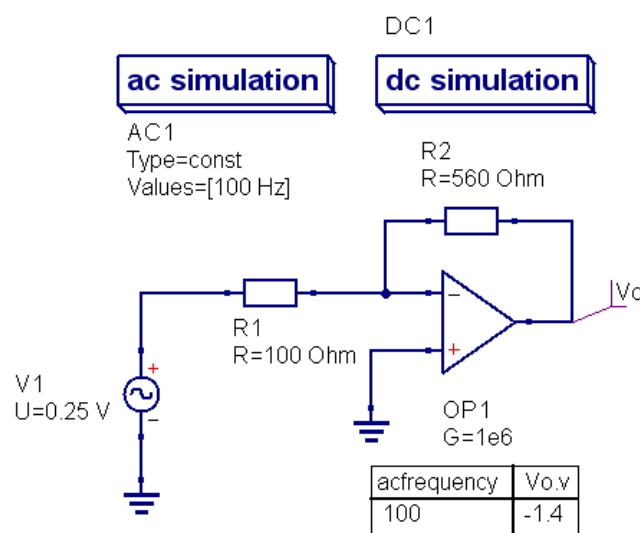
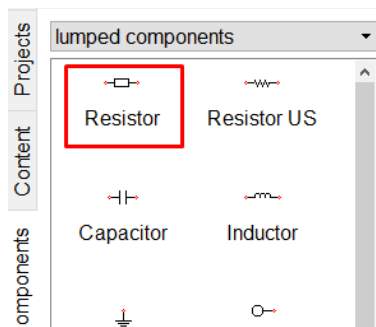


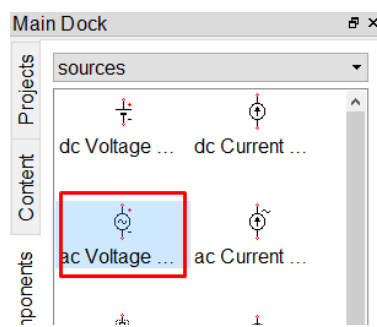
Figura 13: Arranjo do Circuito A no QUCS.

5.2) Circuito B

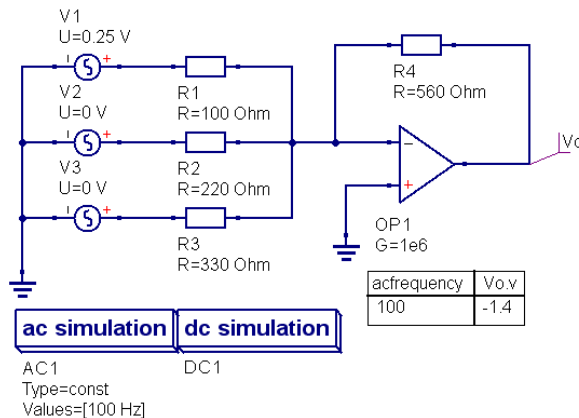
- Vá em arquivo e clique em Salvar como e mude o nome do arquivo para utilizar o esquemático já montado para o próximo circuito.
- Na aba Componentes, vá em componentes agrupados e coloque mais dois resistores. Vá em Fontes e coloque mais duas fontes de tensão AC.
- Há duas formas de gerar os circuitos: gerar um por vez, cada qual com seu arquivo; gerar todos de uma só vez, num único arquivo (recomendado).
- Nesse tutorial, foi feito todas as variações da tabela 1 da folha de dados em um esquemáticos distintos, como ilustrado nas figuras ??, ?? e ??.



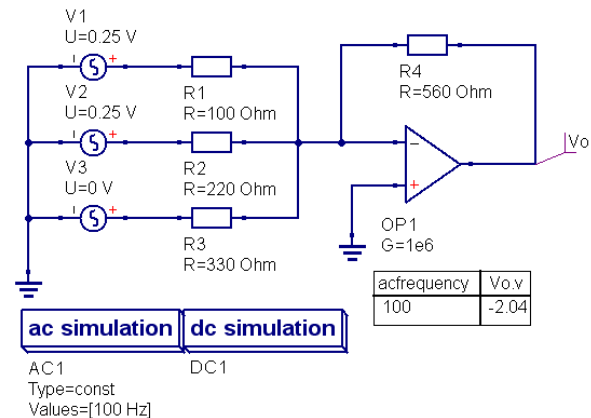
(a) Seleção dos Resistores



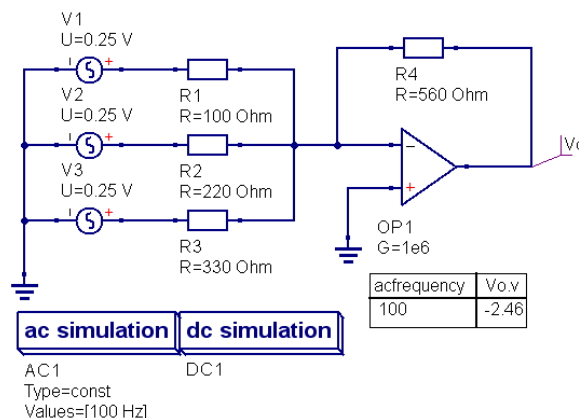
(b) Seleção fonte AC



(c) Uma fonte desativada



(d) Apenas uma fonte desativada



(e) Todas as fontes Ativas

5.3) Circuito C

- Vá em Arquivo e depois em Salvar como... e mude o nome do arquivo para utilizar o esquemático já montado para a o próximo circuito. Exclua a Fonte V_3 e conecte os componentes sem esquecer da referência do terra.
- Copie e cole o circuito e modifique os valores das fontes para $V_1 = 0,5V_{pp}$ e $V_2 = 0V_{pp}$.
- Copie e cole em outro espaço, novamente, e modifique os valores das fontes para $V_1 = 0V_{pp}$ e $V_2 = 0,5V_{pp}$.
- Salve e simule.
- Vá em Diagramas e insira uma tabela. Coloque o valor das tensões.
- Nesse ponto do tutorial, foi colocado todos os circuitos em um único esquemático.
- O resultado obtido deve ser semelhante ao apresentado na figura ??.

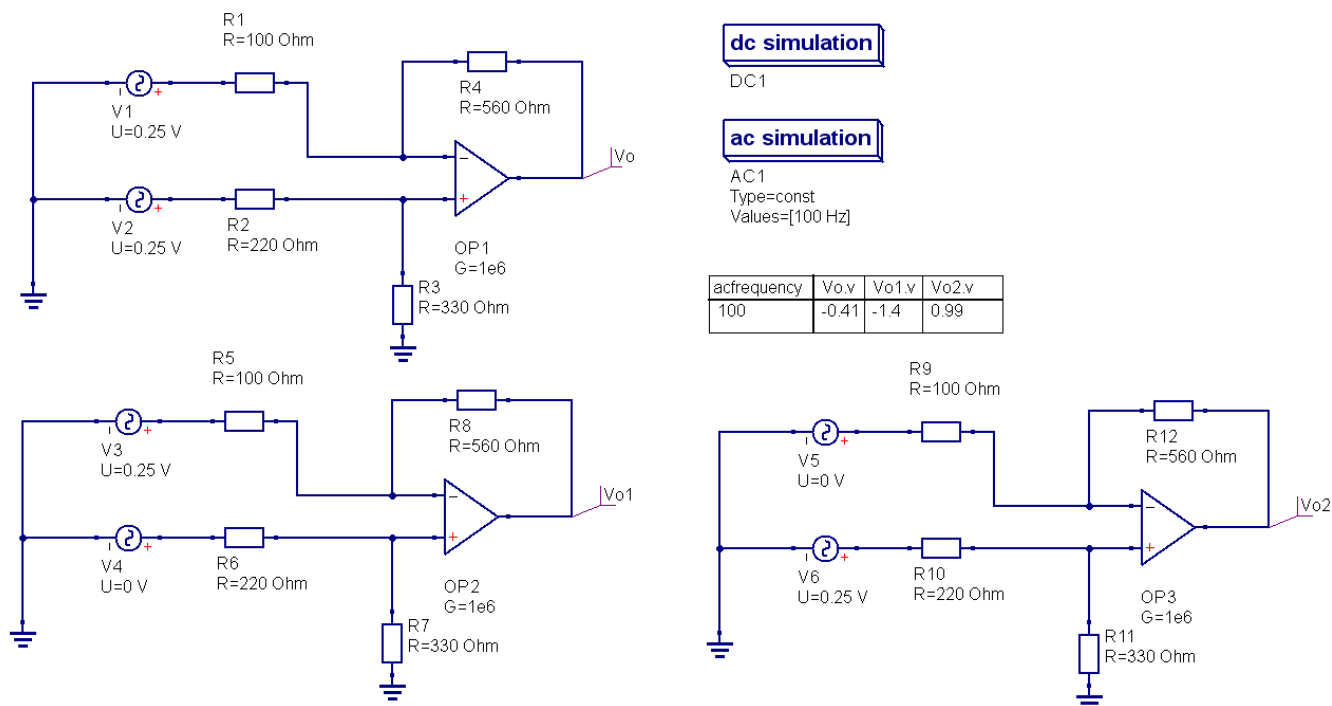


Figura 15: Esquemático do circuito montado

6) Experimento

6.1) Caracterização de circuitos com resistores e Amplificador Operacional

Monte cada um dos circuitos das figuras A, B e C, com tensões de alimentação $V_{ss} = -10V$ e $V_{dd} = +10V$. Utilize os valores definidos pelo professor para R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . Estabeleça experimentalmente a relação entre as amplitudes pico-a-pico dos sinais de entrada $V_1(t)$, $V_2(t)$ e $V_3(t)$ e a amplitude pico-a-pico do sinal de saída $V_o(t)$ observados no osciloscópio. Use o gerador de funções nas entradas, com sinais senoidais de amplitudes definidas segundo a Tabela 1 da Folha de Dados, e com a frequência arbitrada pelo professor.

Meça com precisão os valores das resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 com um multímetro e substitua estes valores nas expressões obtidas no item 2.1. Compare os resultados experimentais com os valores teóricos para o ganho de tensão de cada circuito e de cada configuração mostrados na Tabela 1 da Folha de Dados.

6.2) Efeitos não-lineares

- Slew-rate: Determine a maior taxa de variação da tensão por unidade de tempo ($\delta V(t)/dt$) na saída do circuito A. Utilize uma entrada quadrada com grande amplitude e frequência.
- Saturação: Verifique qual é a amplitude máxima de excursão da tensão de saída $V_o(t)$ do circuito A. Que fatores limitam na prática a excursão da tensão de saída? Use uma grande amplitude de entrada, em baixa-frequência ($f < 1 \text{ kHz}$).

6.3) Resposta em frequência

Usando a configuração do circuito A, aumente gradativamente a frequência do sinal de entrada até o limite do gerador (circuito A) e anote os valores correspondentes de ganho. Explique o comportamento do ganho em função da frequência. Use uma entrada com pequena amplitude, para que não ocorra influência significativa do slew-rate.

119148 – Prática de Circuitos Eletrônicos 1 – Folha de Dados

Turma: _____ Bancada: _____ Data: ____/____/____

Nome: _____ Matrícula: ____/____/____

Experimento 09: Circuitos com Amplificador Operacional

Resistores usados:

$$R_1 = \text{_____} \pm \text{_____} [\Omega] \quad R_2 = \text{_____} \pm \text{_____} [\Omega]$$
$$R_3 = \text{_____} \pm \text{_____} [\Omega] \quad R_4 = \text{_____} \pm \text{_____} [\Omega]$$

Procedimento 6.1: Caracterização - Tabela 1

Circuito	Configuração das Entradas Senoide com $f = \text{_____}$ Hz	Saída V_{opp}	Ganho Experim.	Ganho Teórico	Ganho %Erro
A	$V_1 = 0,5V_{pp}$				
B	$V_1 = V_2 = V_3 = 0,5V_{pp}$				
	$V_1 = V_2 = 0,5V_{pp}$ e $V_3 = 0V_{pp}$				
	$V_1 = 0,5V_{pp}$ e $V_2 = V_3 = 0V_{pp}$				
C	$V_1 = V_2 = 0,5V_{pp}$				
	$V_1 = 0,5V_{pp}$ e $V_2 = 0V_{pp}$				
	$V_1 = 0V_{pp}$ e $V_2 = 0,5V_{pp}$				

Tabela 1 - Avaliação das características de circuitos com amplificador operacional

Procedimento 6.2 a): Slew-rate

Entrada: Onda quadrada com amplitude $V = \text{_____}$ V_{pp} e $f = \text{_____}$ Hz

$$\frac{\delta V(t)}{dt} = \text{_____} \frac{V}{\mu s}$$

Procedimento 3.2 b): Saturação

Entrada: Onda senoidal com amplitude $V = \text{_____}$ V_{pp} e $f = \text{_____}$ Hz

$$V_o(t)_{\max} = \text{_____} V \quad V_o(t)_{\min} = \text{_____} V$$

Procedimento 6.3): Resposta em frequência - Tabela 2

Senoide com $V_1(t) = \text{_____} V_{pp}$	Saída V_{opp}	Ganho Expe- rimental
10 Hz		
100 Hz		
500 Hz		
1 kHz		
10 kHz		
20 kHz		
30 kHz		
40 kHz		
50 kHz		
75 kHz		
100 kHz		
500 kHz		
1 MHz		
5 MHz		
10 MHz		
20 MHz		

Tabela 6.1: Tabela 2 - Resposta em frequência do amplificador operacional.