



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



## **SISTEMAS DE CONTROLE**

### **Roteiro 03b – Amplificadores Operacionais**

Aluno: Pedro Gomes Dias

Matrícula: 11821ECP007

Uberlândia – 05/09/2023

## Questão 01)

### a) Características de um Amplificador Operacional Ideal:

Um amplificador operacional ideal é um modelo teórico que serve como referência para projetos e análises de circuitos eletrônicos. Embora os amplificadores operacionais reais não possam atingir todas essas características na prática, um amplificador operacional ideal apresenta as seguintes características:

- 1 - Ganho de tensão infinito ( $A_v = \infty$ ), indica que amplifica o sinal de entrada sem limitações, resultando em um ganho de tensão infinito.
- 2 - Impedância de entrada infinita ( $Z_{in} = \infty$ ), o que significa que não há corrente de entrada para perturbar o circuito que está sendo alimentado pelo amplificador. Isso garante que o amplificador não carregue a fonte de sinal.
- 3 - Impedância de saída zero ( $Z_{out} = 0$ ), indica que o amplificador operacional pode fornecer qualquer corrente necessária à carga sem criar uma queda significativa de tensão.
- 4 - Não adiciona ruído ao sinal de saída.
- 5 - Não consome energia elétrica.
- 6 - Resposta transitória instantânea, o que indica uma resposta a mudanças no sinal de entrada instantânea, não havendo atrasos nem distorções.
- 7 - Sinal de saída exatamente igual a zero quando as entradas são iguais ( $V_{out} = 0$  quando  $V_{in+} = V_{in-}$ ), o que indica que a tensão de saída é zero. Isso é fundamental para muitos circuitos de feedback e aplicações de amplificação de sinal.
- 8 - Possui uma largura de banda infinita, o que significa que ele pode amplificar sinais de frequência extremamente baixa a frequências muito altas sem atenuação.

### b) Funcionamento do Seguidor de Tensão e suas possíveis aplicações:

Um seguidor de tensão, também conhecido como "buffer de tensão", é um circuito eletrônico que tem a principal função de reproduzir o sinal de entrada na saída com uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída. Em outras palavras, ele replica o sinal de entrada sem alterá-lo significativamente e sem sobrecarregar a fonte de sinal. O funcionamento básico de um seguidor de tensão pode ser explicado da seguinte forma:

1 - Possui uma alta impedância de entrada, o que significa que ele não consome corrente da fonte de sinal. Isso é importante para garantir que o circuito de entrada não seja carregado e que não haja queda significativa de tensão na fonte.

2 - Baixa impedância de saída, o que permite que ele forneça corrente suficiente para alimentar cargas subsequentes sem degradar o sinal.

3 - Ganho de tensão unitário ( $A_v = 1$ ), o que significa que o sinal de saída é idêntico ao sinal de entrada em magnitude e fase. Isso é útil quando você precisa isolar uma carga de uma fonte de sinal, garantindo que o sinal não seja atenuado ou distorcido.

É frequentemente usado para isolar a fonte de sinal de cargas subsequentes que podem ter uma impedância de entrada significativamente menor. Isso evita que o sinal seja degradado devido à carga.

Em alguns casos, é necessário isolar eletricamente um circuito de outro. Um seguidor de tensão pode ser usado como parte de um isolador de sinal para garantir que os circuitos não compartilhem uma conexão elétrica direta.

Em resumo, um seguidor de tensão é um bloco de construção fundamental em eletrônica que preserva a integridade do sinal, isolando a fonte de sinal da carga, e é amplamente utilizado em várias aplicações para garantir que os sinais não sejam degradados ou distorcidos ao passar por diferentes estágios de um sistema eletrônico.

c) Características de um Amplificador Subtrator:

É um circuito eletrônico que realiza uma operação de subtração entre dois sinais de entrada. Frequentemente construído usando um op-amp e resistores. Sua principal função é calcular a diferença entre dois sinais de entrada, multiplicando um dos sinais por um fator de ganho negativo antes de realizar a subtração.

O circuito básico de um amplificador subtrator consiste em um amplificador operacional e dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ . O sinal de entrada ( $V_{in1}$ ) que você deseja subtrair é conectado à entrada positiva do amplificador operacional, enquanto o outro sinal de entrada ( $V_{in2}$ ) é conectado à entrada negativa/inversora através de  $R_1$ . O resistor  $R_2$  é conectado da saída do amplificador de volta à entrada negativa/inversora.

A equação para o cálculo da saída ( $V_{out}$ ) em um amplificador subtrator é a seguinte:

$$V_{out} = -(V_{in1} - V_{in2}) * (R_2 / R_1)$$

A principal função é subtrair o sinal de entrada  $V_{in2}$  do sinal  $V_{in1}$ . O resultado é amplificado pelo fator de ganho negativo determinado pela relação entre  $R_2$  e  $R_1$ . O valor do ganho negativo é ajustado pela escolha dos valores dos resistores. Ele também inverte a polaridade do sinal de saída em relação à diferença dos sinais de entrada. Isso significa que, se  $V_{in1}$  for maior que  $V_{in2}$ , a saída será negativa, e vice-versa.

Em resumo, um amplificador subtrator é um circuito eletrônico que realiza uma operação de subtração entre dois sinais de entrada e é útil em uma variedade de aplicações onde é necessário calcular a diferença entre esses sinais, com a possibilidade de amplificá-la ou atenuá-la conforme necessário.

Questão 2)

Exemplo 1) Videoaula 08

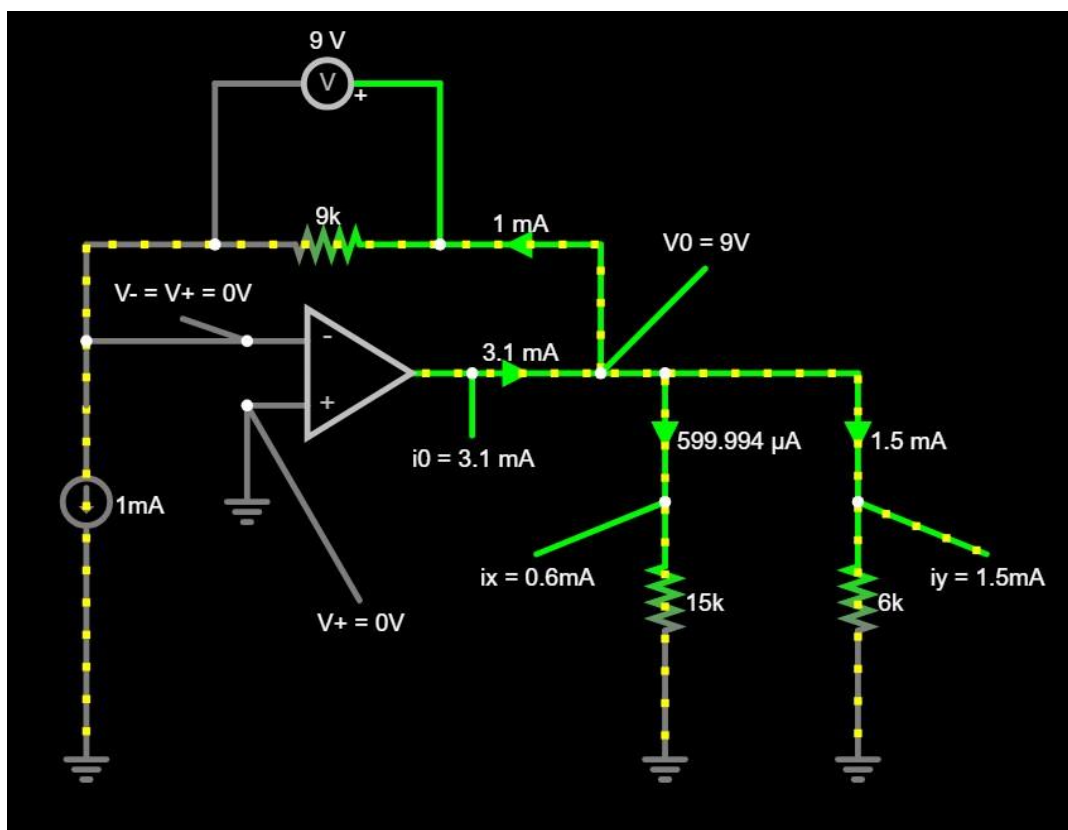


Imagem 01: Exemplo 01 videoaula 08

OBS: A simulação destes exercícios foram feitas no simulador gratuito online <https://www.falstad.com/circuit/>, pois a simulação no SimulIDE não estava coerente com os resultados esperados com minha montagem.

Resolução matemática, encontrar  $i_0$ :

Inicialmente tem-se que, a fonte de corrente fornece 1mA, temos 3 resistores,  $R_1 = 9k\ \Omega$ ,  $R_2 = 15k\ \Omega$  e  $R_3 = 6k\ \Omega$ . Como o terminal positivo do OpAmp está ligado ao terra, tem-se que  $V_+ = 0$ , e como  $V_- = V_+$ , logo  $V_- = 0$ . Com isso, conseguimos deduzir que a corrente que passa pelo terminal negativo do OpAmp é 0, logo o 1mA da fonte de corrente está passando em  $R_1$ , e conseguimos calcular a queda em  $R_1$  ( $V_{R1}$ ) como  $V_{R1} = 9k\ \Omega \cdot 1mA = 9V$ .

O terminal denominado  $V_0$  como mostra na imagem do circuito, na saída do OpAmp, se encontra com o mesmo valor de  $V_{R1}$ , logo  $V_0 = 9V$ . Com esse dado, conseguimos calcular as correntes  $i_x$  que passa em  $R_2$  e  $i_y$  que passa em  $R_3$ , sendo  $i_x = 9V/15k\ \Omega = 0,6mA$  e  $i_y = 9V/6k\ \Omega = 1,5mA$ .

Com essas correntes em mãos, através da Lei de Kirchhoff dos nós, conseguimos calcular  $i_0 = i_{R1} + i_x + i_y = 1mA + 0,6mA + 1,5mA$ , assim, temos nossa resposta como  $i_0 = 3,1mA$ .

Exemplo 2) Videoaula 09

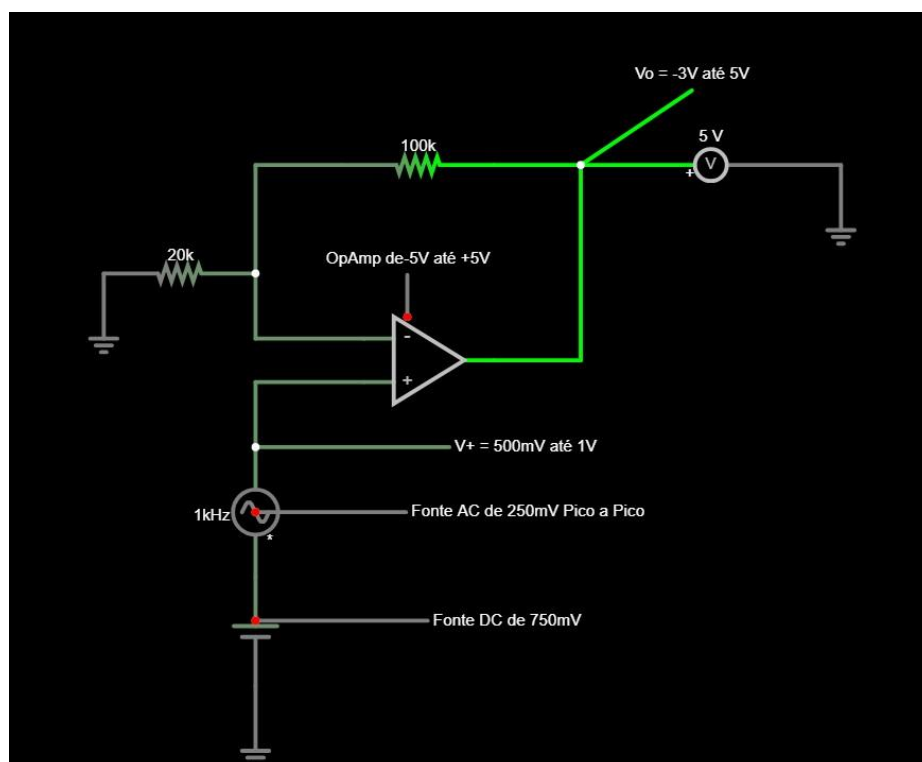


Imagem 02: Exemplo 02 videoaula 09

Resolução matemática, desenhar o sinal senoidal de  $V_o$ :

Inicialmente temos 2 resistores  $R_1=20k\ \Omega$  e  $R_2 = 100k\ \Omega$ , também temos 2 fontes, uma senoidal com sinal de 250mV pico a pico, e outra fonte DC com 750mV. Inicialmente, sabe-se que  $V_+=V_-$ , e considerando o momento em que a fonte alternada se encontra em 0V, tem-se que  $V_+$  possui o valor da fonte DC, assim  $V_-=V_+=750mV$ .

Com esses valores, calculamos  $(V_-/20k\ \Omega) = ((V_o-V_-)/100)$ , e ao isolar  $V_o$ , temos que  $V_o=6*V_-$ . Com essa relação em mãos, como  $V_-=V_+$ , qualquer valor em  $V_+$ , temos o reflexo disso na saída  $V_o$ . Fazendo os mesmos cálculos para os valores superiores e inferiores da senoide, sendo eles +250mV e -250mV, em conjunto com a fonte DC de 750mV, o sinal de saída se encontra na faixa de 1V e 1/2V (ou 500mV), com média de 750mV.

Caso 1)  $V_+ = 750mV$ :

$V_o=6*V_+ = 6*750mV$ , assim  $V_o=4,5V$ .

Caso 2)  $V_+ = 1V$ :

$V_o=6*V_+ = 6*1V$ , assim  $V_o=6V$ .

Caso 3)  $V_+ = 500mV$ :

$V_o=6*V_+ = 6*500mV$ , assim  $V_o=3V$ .

Porém como o OpAmp está sendo alimentado de -5V até +5V, o seu sinal de saída vai de +3V até +5V, como mostra a imagem abaixo:

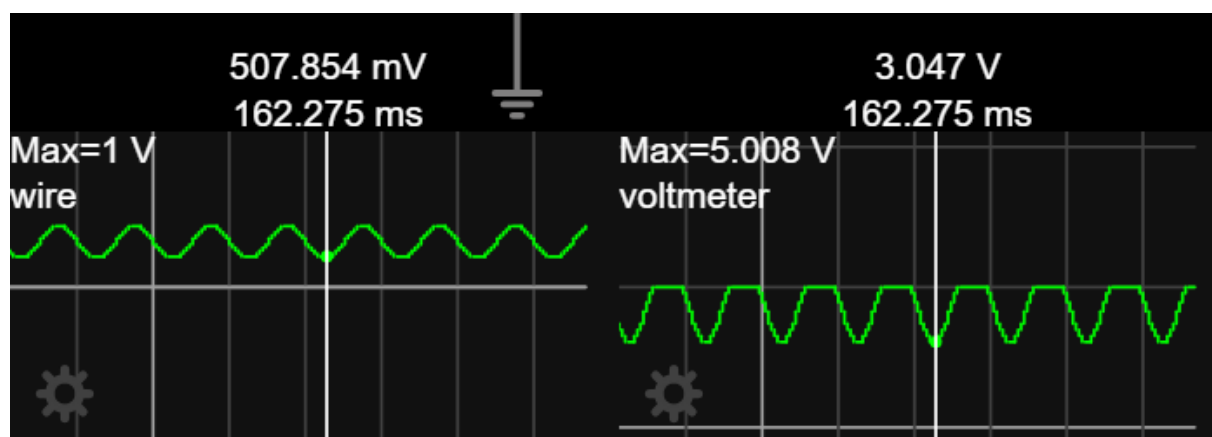


Imagem 03: Exemplo 02 videoaula 09 – Sinal de Entrada e Sinal  $V_o$  de saída lado a lado.  $V_{in}$  variando de 500mV até 1V e  $V_o$  variando de 3V até 5V.

### Exemplo 3) Videoaula 10

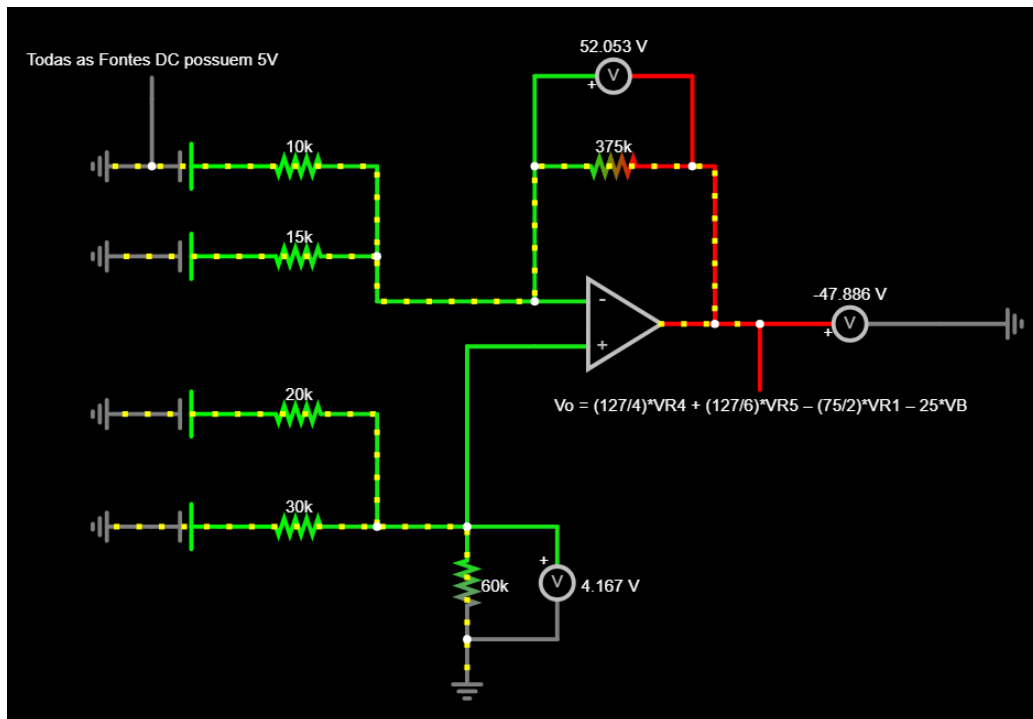


Imagem 04: Exemplo 03 videoaula 10 – Relação de Vo com as entradas no somador e redutor

Resolução matemática, calcule Vo em função das tensões de entrada:

Inicialmente temos 6 Resistores,  $R_1 = 10k$ ,  $R_2 = 15k$ ,  $R_3 = 375k$ ,  $R_4 = 20k$ ,  $R_5 = 30k$ ,  $R_6 = 60k$ . Iniciamos a análise com o terminal positivo  $V_+$  do OpAmp, no qual sabe-se que a corrente é 0. Assim, as correntes em  $R_4$  e  $R_5$  somadas, são iguais a corrente em  $R_6$ :

$$\left(\frac{V_{R4}-V_+}{R_4}\right) + \left(\frac{V_{R5}-V_+}{R_5}\right) = V_+/R_6$$

Substituindo os valores dos resistores e isolando  $V_+$ :

$$V_+ \cdot \left(\left(\frac{1}{6}\right) + \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{3}\right)\right) = V_{R4}/2 + V_{R5}/3$$

Calculando a soma das frações:

$$V_+ = V_{R4}/2 + V_{R5}/3$$

De maneira análoga fazemos o mesmo com o terminal negativo e as correntes em  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ :

$$\left(\frac{V_{R1}-V_-}{R_1}\right) + \left(\frac{V_{R2}-V_-}{R_2}\right) = \left(\frac{V_- - V_o}{R_3}\right)$$

Substituindo os valores dos resistores e isolando  $V_+$ :

$$V_- = (75/127)*VR_1 + (50/127)*VR_2 + (2/127)*V_o$$

E como  $V_+ = V_-$ , igualando as duas equações que encontramos:

$$VR_4/2 + VR_5/3 = (75/127)*VR_1 + (50/127)*VR_2 + (2/127)*V_o$$

Aqui isolamos  $V_o$ , que é nossa variável de interesse:

$$V_o = (127/4)*VR_4 + (127/6)*VR_5 - (75/2)*VR_1 - 25*V_B$$

Como pode ser visto na imagem 04 acima, utilizando o valor de 5V para todas as entradas, obtive o valor de  $V_o = -47.886$ , que é muito próximo do valor analítico de  $V_o = -47.916$ , demonstrando que a relação encontrada condiz com o comportamento do circuito.

#### Exemplo 4) Videoaula 11

Resolução matemática, demonstrando que  $V_{out} = V_{in}$ :

Como temos um OpAmp,  $V_- = V_+$ , e como  $V_{in} = V_- = V_+$ , a tensão sobre a carga  $R_L$  será de  $V_{in}$ , logo,  $V_{in} = V_{out}$  como mostrado na simulação abaixo:

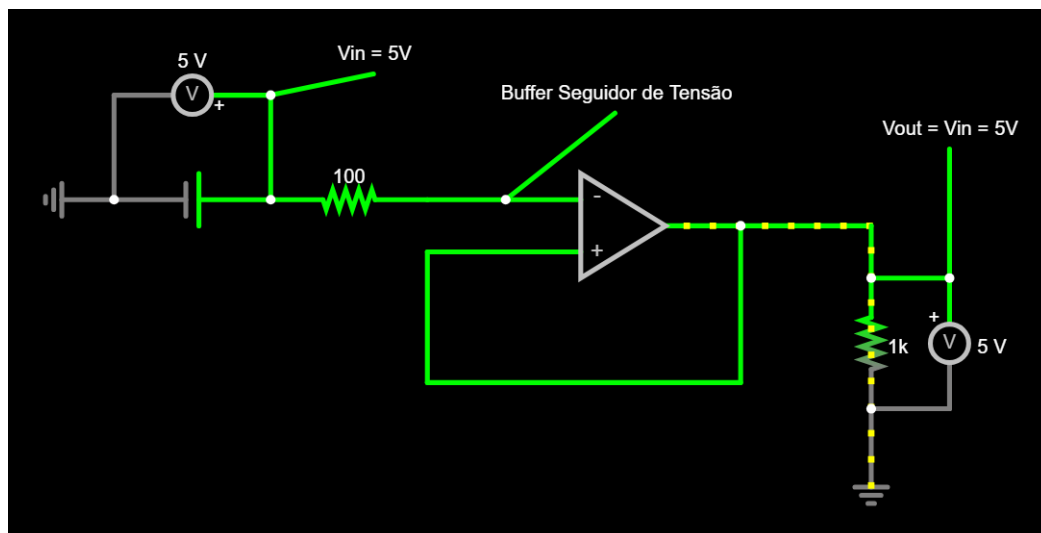


Imagem 05: Exemplo 04 videoaula 11 – Buffer Seguidor de Tensão –  $V_{out} = V_{in}$



### Questão 3)

Diferenças entre OpAmps ideais e não ideais:

Diferente de como já discutido anteriormente na Questão 01, os amplificadores operacionais reais:

1 - Têm ganhos finitos, que são altos, mas não infinitos. O ganho pode variar com a frequência.

2 - A impedância de entrada real não é infinita e pode variar dependendo do tipo de op-amp. Geralmente, é alta, mas não infinita.

3 - A impedância de saída real não é zero, e a magnitude varia entre diferentes modelos. Geralmente, é baixa, mas não nula.

4 - Op-amps reais têm uma largura de banda limitada, o que significa que eles não podem amplificar eficazmente sinais em frequências muito baixas ou muito altas.

5 - Os op-amps reais têm pequenos desvios (offset) de tensão nas entradas e saídas que podem afetar a precisão do circuito.

6 - Op-amps reais adicionam algum nível de ruído ao sinal de saída devido a limitações físicas. Isso pode ser importante em aplicações sensíveis.

7 - Consumo de Energia: Ao contrário do modelo ideal, que não consome energia, os op-amps reais consomem uma pequena quantidade de energia elétrica.

Em resumo, enquanto os op-amps ideais são um modelo teórico com características ideais, muito úteis para facilitar a análise de circuitos, os op-amps reais têm limitações que incluem ganhos finitos, impedâncias de entrada e saída não ideais, resposta em frequência limitada e outros fatores que precisam ser considerados em projetos de circuitos eletrônicos do mundo real.