



Anexo

Amplificadores Operacionais

Meta deste capítulo

Relembrar os principais conceitos e circuitos envolvendo amplificadores operacionais.

objetivos

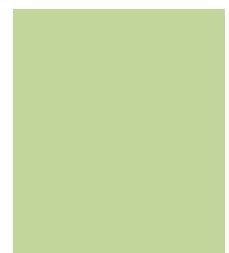
- Identificar as principais características dos amplificadores operacionais;
- Analisar circuitos e aplicações de amplificadores operacionais;
- Resolver exercícios envolvendo circuitos com amplificadores operacionais;
- Iniciar o contato com circuitos osciladores e multivibradores.

Pré-requisitos

Não há pré-requisitos para este capítulo.

Continuidade

A partir da revisão de circuitos de polarização de transistores bipolares de junção e de amplificadores operacionais, pode-se iniciar o estudo de osciladores e multivibradores.



1 Introdução

Amplificadores operacionais são circuitos eletrônicos amplamente utilizados nas mais diversas aplicações, desde um simples amplificador de áudio de baixa potência até eletrônica embarcada em satélites, aeronaves, equipamentos médico-hospitalares, veículos elétricos, dentre outras aplicações.

Nos primeiros estágios de desenvolvimento de circuitos integrados, o desenho de amplificadores operacionais passou a incorporar o dia a dia das equipes de projeto e das empresas de fabricação e comercialização destes componentes.

Do mesmo modo, circuitos osciladores e multivibradores podem ser implementados facilmente com o emprego de amplificadores operacionais convencionais e de baixo custo.

Assim, este capítulo pretende lembrar ao estudante os principais conceitos envolvendo amplificadores operacionais, suas características, principais aplicações e alguns osciladores empregando estes componentes.

2 Considerações Iniciais

O circuito elétrico de um amplificador operacional possui dezenas de componentes, dentre transistores, resistores e capacitores. Neste trabalho não tem-se o objetivo de estudar o interior de um amplificador operacional, mas por outro lado, entender seu comportamento e aplicação considerando-o um circuito integrado, com terminais de entrada, saída e alimentação, conforme mostrado na Figura 1.

Os terminais de alimentação do amplificador operacional (AmpOp) costumam não ser representados nos desenhos esquemáticos, a não ser em esquemáticos completos visando a implementação ou o desenho de placas de circuito impresso. Vale lembrar também que, dependendo da aplicação, a alimentação do AmpOp deverá ser simétrica, por exemplo, $\pm 12\text{ V}$.

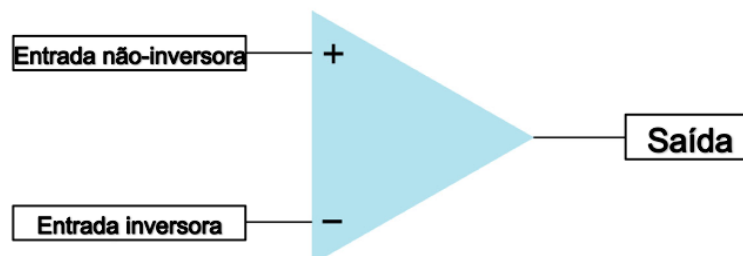


Figura 1 - Principais terminais de um amplificador operacional.

Conectando a entrada inversora no potencial zero (terra do circuito) e a entrada não-

inversora em uma fonte de sinal se obtêm o circuito mostrado na Figura 2 ao lado esquerdo. Do contrário, conectando a entrada inversora na fonte de sinal, ocorre o mostrado na Figura 2, lado direito. Note que no primeiro caso o sinal de saída está em fase com o sinal de entrada, já no segundo caso ocorre a inversão de fase. Daí a denominação de entrada inversora e não-inversora.

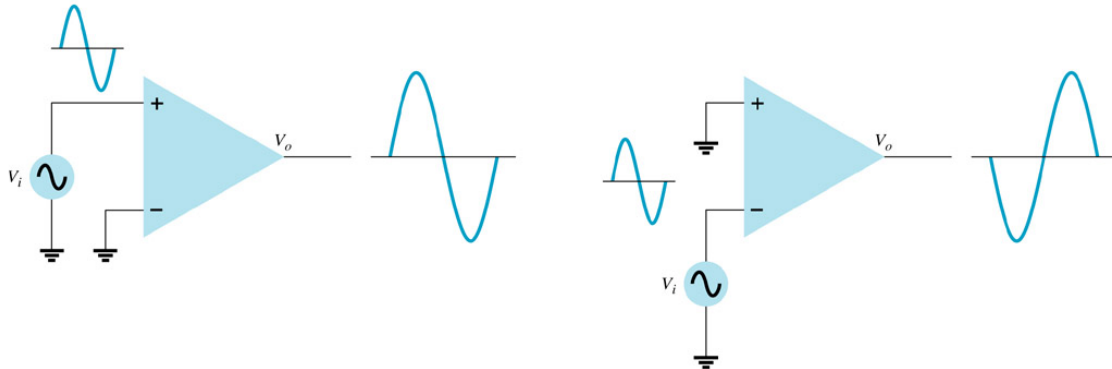


Figura 2 - Operação do AmpOp com entradas simples.

Os amplificadores operacionais podem estar integrados em encapsulamentos variados, mas é comum se encontrar os mesmos em componentes de 6 ou 8 pinos, como se pode ver na Figura 3.

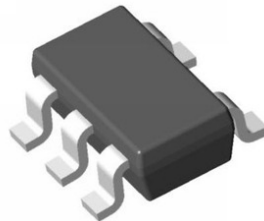


Figura 3 - Encapsulamento comum de amplificador operacional.

Algumas considerações importantes, que devem ser lembradas e utilizadas na análise de circuitos com amplificadores operacionais:

- $I_+ = I_- = 0$ - A corrente de entrada nos terminais inversor e não-inversor pode ser considerada zero, devido a alta impedância de entrada do AmpOp;
- $V_+ = V_-$ - A tensão nas entradas inversora e não-inversora é igual, ou seja, há um curto-circuito virtual entre estes dois terminais.

Para reforçar estas considerações mostram-se as mesmas na Figura 4.

Na Figura 5 mostra o modelo equivalente para análise de circuitos com amplificadores operacionais. Após alguns exercícios, não será necessário utilizar o modelo equivalente, pois a familiaridade com a análise das variáveis e cálculo das grandezas de interesse poderá ser feita diretamente considerando o símbolo convencional de AmpOp.

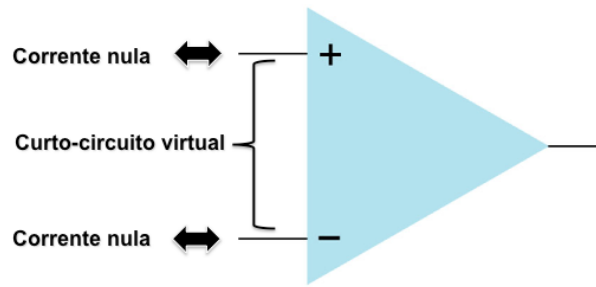


Figura 4 - Considerações sobre os terminais de entrada do AmpOp.

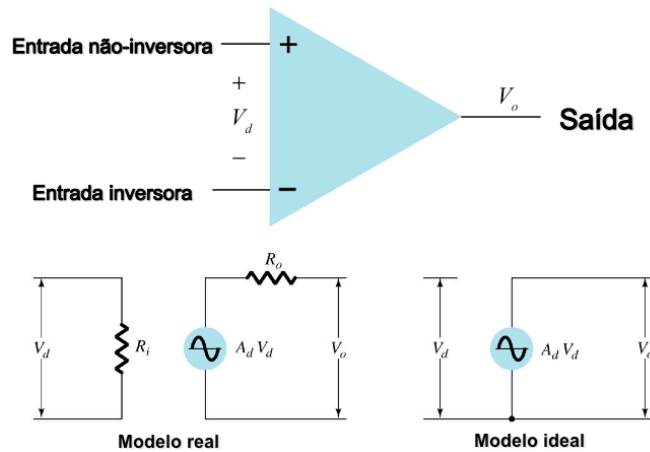


Figura 5 - Modelos do AmpOp.

3 Operação Básica

Inicialmente será feita uma análise de um circuito simples com AmpOp, conforme mostrado na Figura 6. Visando facilitar a análise do circuito, considere a utilização do modelo equivalente do AmpOp real, como está mostrado na Figura 7.

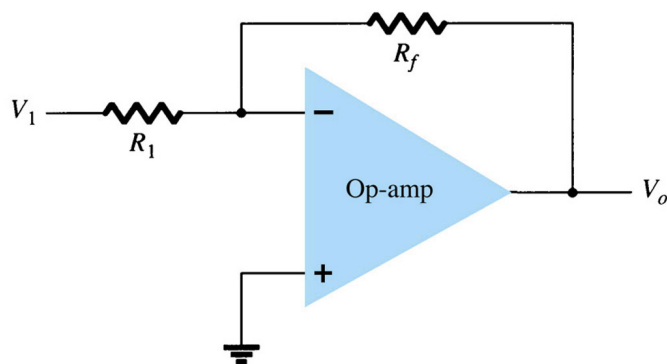


Figura 6 - Operação básica do AmpOp.

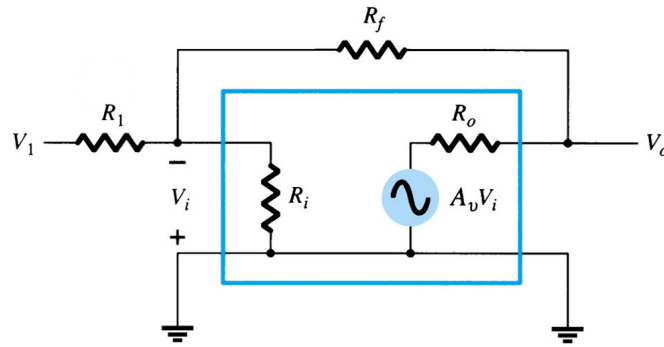


Figura 7 - Operação básica considerando circuito equivalente real.

Considerando que o AmpOp seja ideal, ter-se-á:

$$R_i = \infty \Omega ;$$

$$R_o = 0$$

Assim, a tensão de entrada V_i poderá ser determinada a seguir, aplicando superposição:

$$V_{i1} \Big|_{V_o=0} = \frac{R_f}{R_1 + R_f} \cdot V_1 ;$$

$$V_{i2} \Big|_{V_1=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot (-A_v \cdot V_i) ;$$

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} = \frac{R_f}{R_1 + R_f} \cdot V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot (-A_v \cdot V_i) ;$$

$$V_i = \frac{R_f}{R_f + (1 + A_v) \cdot R_1} \cdot V_1 .$$

O ganho normalmente é muito maior que a unidade ($A_v \gg 1$), o que leva a:

$$A_v \cdot R_1 \gg R_f ;$$

$$V_i = \frac{R_f}{A_v \cdot R_1} \cdot V_1 .$$

Assim, pode-se obter a relação entre a tensão de saída e a entrada:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-A_v \cdot V_i}{V_i} = \frac{-A_v \cdot R_f \cdot V_1}{V_i \cdot A_v \cdot R_1} = -\frac{R_f}{R_1} \frac{V_1}{V_i} ;$$

$$\frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1} .$$

Conclui-se então que, desde que o ganho A_v do AmpOp seja elevado, a relação entre a

tensão de saída e entrada do circuito depende apenas dos componentes externos.

4 Amplificador Inversor

A análise do circuito da Figura 6 pode ser realizada de forma simples e direta, considerando que a corrente nas entradas dos terminais do AmpOp é nula e que a tensão entre os terminais inversor e não-inversor é igual.

$$V_- = V_+ = 0;$$

$$I_{R1} = \frac{V_1}{R_1};$$

$$I_{Rf} = \frac{0 - V_o}{R_f} = \frac{-V_o}{R_f};$$

$$I_{R1} = I_{Rf};$$

$$\frac{V_1}{R_1} = \frac{-V_o}{R_f};$$

$$\frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}.$$

Exercícios Específicos

Exercício 01:

Determine o ganho (relação entre a tensão de saída e entrada) do circuito mostrado na Figura 8.

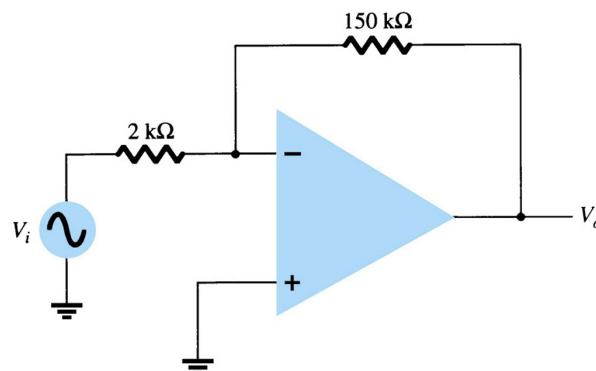


Figura 8 - Circuito do exercício 01.

5 Amplificador Não-Inversor

Seja o circuito com amplificador operacional mostrado na Figura 9. A relação V_o/V_1 pode ser determinada conforme segue.

$$V_{R1} = V_1;$$

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{V_1}{R_1};$$

$$I_{Rf} = \frac{V_o - V_{R1}}{R_f} = \frac{V_o - V_1}{R_f};$$

$$I_{R1} = I_{Rf} = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_o - V_1}{R_f};$$

$$\frac{V_o}{V_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}.$$

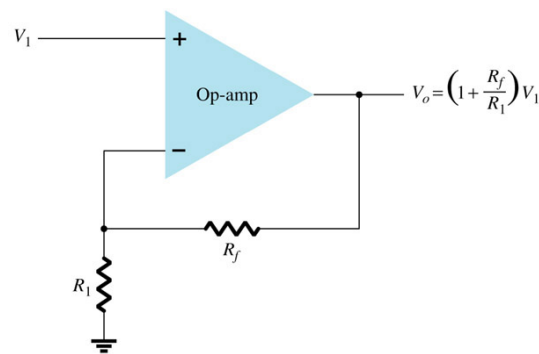


Figura 9 - Amplificador não-inversor.

Exercícios Específicos

Exercício 02:

Determine o ganho (relação entre a tensão de saída e entrada) do circuito mostrado na Figura 10.

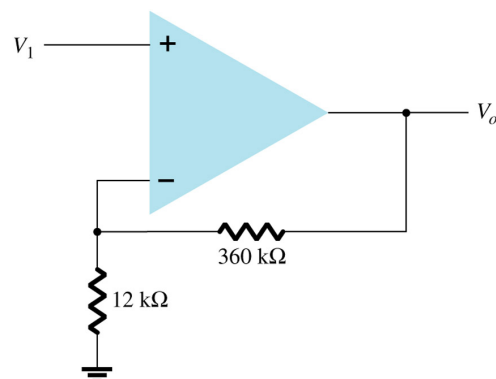


Figura 10 - Circuito para exercício com amplificador não-inversor.

6 Seguidor de Tensão

Um circuito muito utilizado em instrumentação eletrônica é o seguidor de tensão, no qual a tensão de saída é igual a tensão de entrada, com a particularidade de que a impedância na entrada é muito alta e na saída é muito baixa. Este circuito é mostrado na Figura 11. Verifica-se facilmente que:

$$V_- = V_o = V_1;$$

$$V_o = V_1.$$

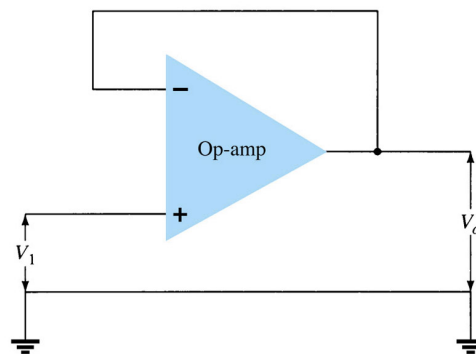


Figura 11 - Seguidor de tensão.

7 Amplificador Somador

Os amplificadores operacionais são muito utilizados para se efetuar operações matemáticas com circuitos analógicos. Um exemplo disso é o amplificador somador, mostrado na Figura 12.

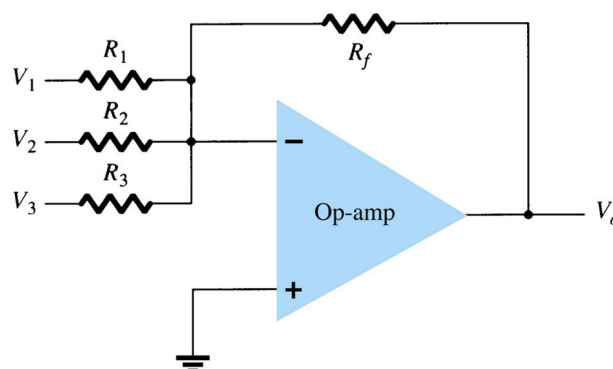


Figura 12 - Amplificador somador.

Considerando a contribuição de cada tensão para a corrente na junção que conecta R_1 , R_2 e R_3 com R_f :

$$I_{R1} = \frac{V_1}{R_1}, I_{R2} = \frac{V_2}{R_2}, I_{R3} = \frac{V_3}{R_3};$$

$$I_{Rf} = \frac{0 - V_o}{R_f};$$

$$I_{Rf} = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3};$$

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

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_f}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_f}{R_3} \cdot V_3\right).$$

Exercícios Específicos

Exercício 03:

Considerando um resistor de realimentação de $R_f=100 \text{ } \Omega\text{k}$, determine a tensão de saída para o circuito da Figura 13.

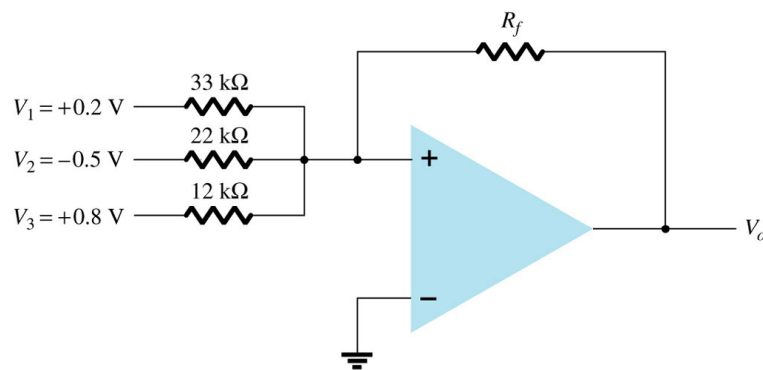


Figura 13 - Amplificador somador.

8 Integrador

Um circuito muito utilizado em circuitos de controle é o integrador, que carrega um capacitor eletrolítico conforme a tensão de entrada, representando um efeito de memória. Na Figura 14 mostra-se um exemplo de integrador com amplificador operacional.

Considerando que este circuito é um amplificador inversor, pode-se considerar a impedância de entrada e a impedância no ramo de realimentação, simplificando sobremaneira a análise do mesmo:

$$Z_i = R;$$

$$Z_f = X_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{s \cdot C} \text{ onde } s = j \cdot \omega \text{ da Transformada de Laplace.}$$

Assim:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{1}{s \cdot C \cdot R};$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{s \cdot R \cdot C}.$$

Esta expressão no domínio do tempo pode ser escrita por:

$$v_o(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int v_i(t) \cdot dt.$$

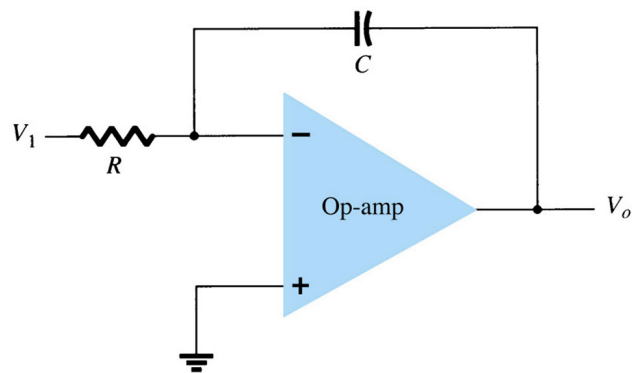


Figura 14 - Integrador com AmpOp.

Exercícios Específicos

Exercício 04:

Determine a tensão na saída do integrador da Figura 15 após transcorrido um tempo de 1 segundo.

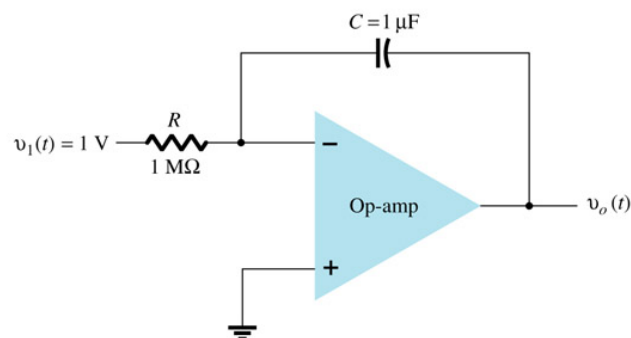


Figura 15 - Circuito para exercício de integrador.

9 Diferenciador

Analogamente ao que foi desenvolvido com o integrador, pode-se obter um circuito diferenciador (derivador), como está mostrado na Figura 16.

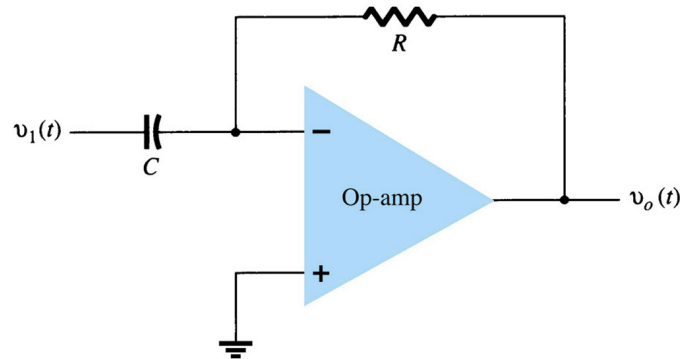


Figura 16 - Diferenciador.

A tensão de saída pode ser obtida por:

$$Z_i = X_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{s \cdot C} \text{ onde } s = j \cdot \omega \text{ da Transformada de Laplace;}$$

$$Z_f = R;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{R}{\frac{1}{s \cdot C}};$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -s \cdot R \cdot C.$$

Esta expressão no domínio do tempo pode ser escrita por:

$$v_o(t) = -R \cdot C \frac{d(v_i(t))}{dt}.$$

Exercícios Gerais

Para resolver os exercícios a seguir, considere encontrar a relação entre v_o e v_i no domínio da frequência. Para tal, considere:

$$Z_C = X_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{s \cdot C} [\Omega], \text{ impedância para um capacitor;}$$

$$Z_L = X_L = j \cdot \omega \cdot L = s \cdot L [\Omega], \text{ impedância para um indutor;}$$

$$Z_R = R[\Omega], \text{ impedância para um resistor.}$$

Exercício 05:

Determine a relação entre a tensão de saída e de entrada do circuito da Figura 17.

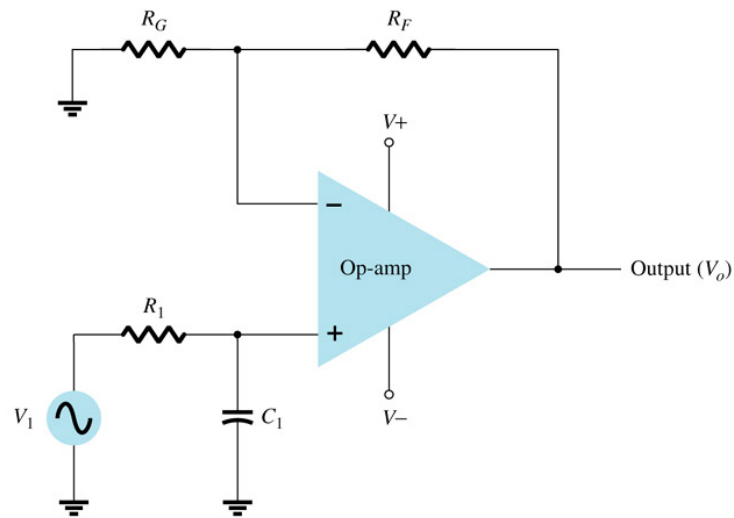


Figura 17 - Aplicação com AmpOp.

Exercício 06:

Determine a relação entre a tensão de saída e de entrada do circuito da Figura 18.

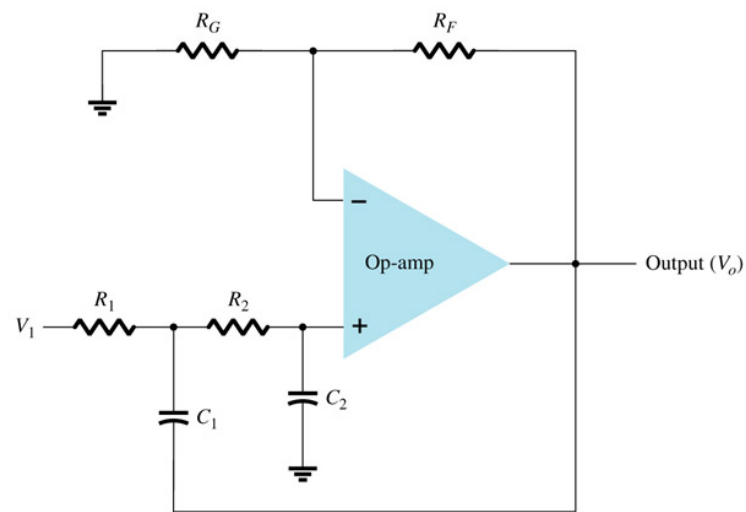


Figura 18 - Circuito com AmpOp para exercício 06.

Exercício 07:

Determine a relação entre a tensão de saída e de entrada do circuito da Figura 19.

Exercício 08:

Determine a relação entre a tensão de saída e de entrada do circuito da Figura 20.

Exercício 09:

Determine a relação entre a tensão de saída e de entrada do circuito da Figura 21.

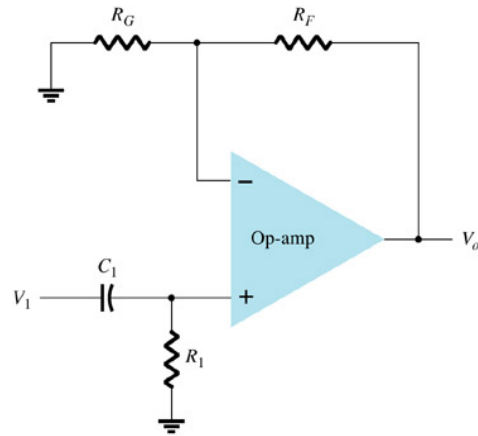


Figura 19 - Aplicação com AmpOp para exercício 07.

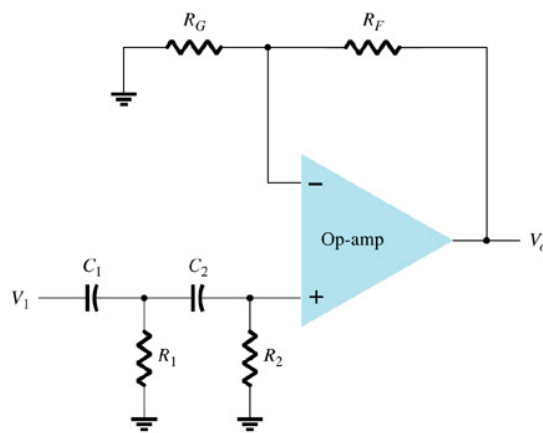


Figura 20 - Circuito para exercício 08.

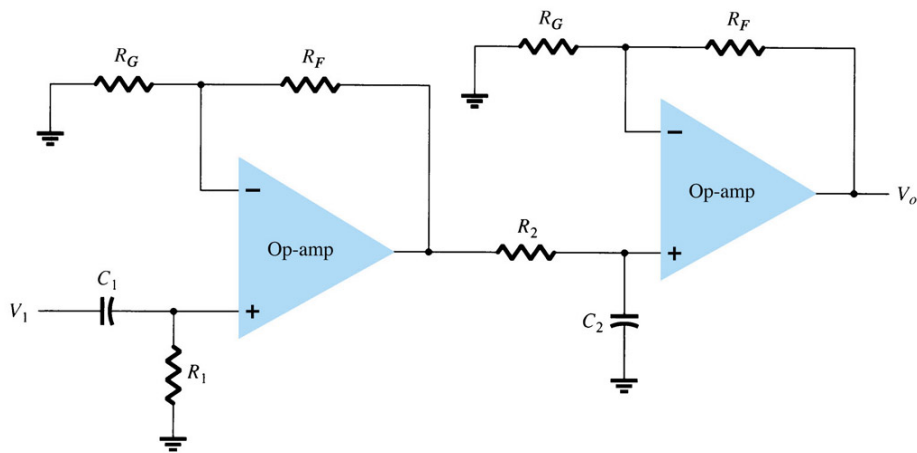


Figura 21 - Aplicação com AmpOps para o exercício 09.

10 Referências

- [1] BOYLESTAD, R. L. e NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8ª ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1984.
- [2] A. P. MALVINO. Eletrônica. Volumes 1 e 2. Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1987.
- [3] LALOND, David E.; Ross, John A. Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. São Paulo, 1999.
- [4] BOGART JR, Theodore F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. 3ª ed, São Paulo, 2001.
- [5] PERTENCE JUNIOR, A. Eletrônica Analógica: Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório. Porto Alegre: Bookman, 2003.