

Circuitos Eletrônicos

Aula 09 - Amplificadores Operacionais - Aplicações

Apresentação

Nesta aula, nós estudaremos alguns circuitos práticos que podem ser utilizados com os amplificadores operacionais.

Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

- Projetar um comparador de tensões.
- Especificar um amplificador inversor.
- Especificar um amplificador não inversor.
- Projetar um oscilador.

Introdução

Como vimos na aula passada, o amplificador operacional é um componente largamente utilizado em circuitos eletrônicos devido às diferentes funcionalidades que certos circuitos que o utilizam podem desempenhar.

Nesta aula, começaremos a aprender alguns desses circuitos explicando suas funcionalidades e como são montados.

Circuitos práticos com amp-op

Na aula passada aprendemos que o amplificador operacional é um bloco funcional construído com diversos outros componentes, tais como diodos, transistores, capacitores etc. Ele tem como objetivo a amplificação de um sinal de entrada. Para isso, vimos que os componentes reais buscam um comportamento próximo do modelo ideal, mas que apresentam limitações.

Em seguida exploramos o funcionamento do amp-op através de suas entradas e saídas para diferentes combinações. Por fim, vimos os três modos de operação possíveis que estarão presentes nos próximos circuitos que serão estudados. Ao se deparar com um circuito novo, lembre-se destes conceitos e tente identificá-los, pois facilitará o seu entendimento.

Normalmente os amp-ops são ligados em conjunto com resistores. A funcionalidade do amp-op vai variar de acordo com a forma em que a ligação dos resistores foi feita.

Agora que já vimos alguns conceitos introdutórios sobre amp-op e seus modos de operação, vamos mostrar e discutir alguns circuitos práticos.

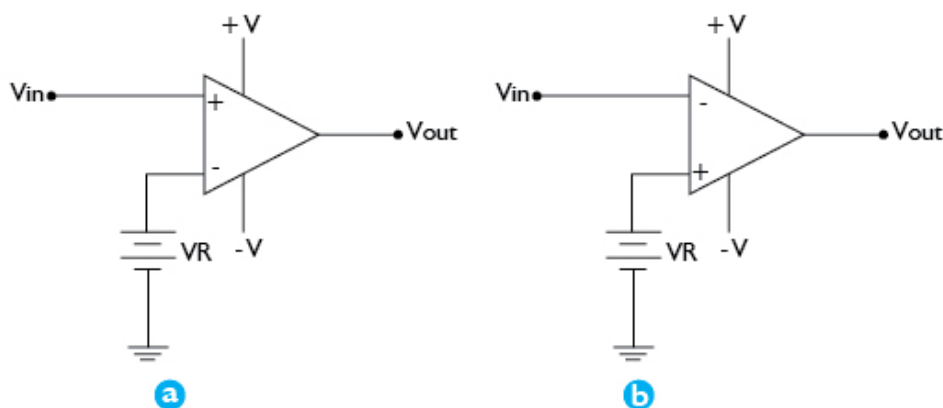
Comparadores de tensão

Os comparadores de tensão são utilizados para comparar dois sinais distintos, em que um deles pode ser utilizado como valor de referência (V_R).

Conforme vimos anteriormente, em malha aberta (sem realimentação), o ganho do amp-op é muito elevado (idealmente infinito), então a saída V_{out} será saturada pela alimentação $+V$ ou $-V$.

A figura (a) ilustra um comparador não-inversor à esquerda e um comparador inversor à direita (b). V_{in} representa o sinal de entrada. Essa nomenclatura vem da palavra *in*, entrada em inglês, da mesma forma que V_{out} , representa a saída, *out*. Repare que no circuito “a”, a entrada está ligada no terminal $+$. Já no circuito “b”, ele está ligado na entrada inversora, $-$.

Figura 01 - (a) comparador não inversor, (b) comparador inversor.



Utilizando a entrada V_+ para o sinal que queremos comparar V_{in} e a entrada V_- para o sinal de referência V_R , temos um comparador não inversor, que terá comportamento descrito pelas regras a seguir:

$$se \begin{cases} V_{in} > V_R \rightarrow V_{out} = +V \\ V_{in} < V_R \rightarrow V_{out} = -V \end{cases}$$

De forma contrária, no comparador inversor o sinal V_{in} é aplicado à entrada V_- e o sinal de referência V_R à V_+ . Para esta configuração, teremos assim:

$$se \begin{cases} V_{in} > V_R \rightarrow V_{out} = -V \\ V_{in} < V_R \rightarrow V_{out} = +V \end{cases}$$

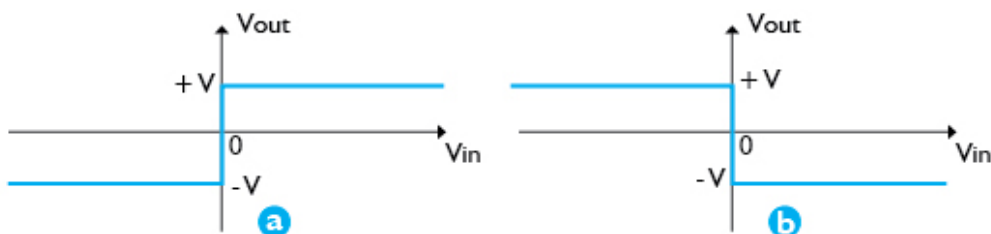
Esse poder de comparação entre dois sinais é extremamente útil em circuitos eletrônicos. Imagine por exemplo que o sinal V_R é uma tensão de referência de 5V. Quando ligamos um sensor na entrada, podemos comparar o valor daquele sensor a um nível de tensão específico.

Por exemplo: estamos trabalhando com um sensor de pressão. Imagine que para cada 1Kg colocado em cima do sensor, temos um aumento de 0,5V. Uma tensão de 5V vai representar quantos quilos? 10, não é verdade?

Utilizando o circuito acima, podemos fazer com que uma sirene seja acionada caso a massa sob o sensor seja maior do que 10 quilos!

Um caso especial muito utilizado é a comparação com $V_R = 0$, em que se deseja descobrir se um dado sinal é positivo ou negativo. Neste caso, liga-se a entrada de V_R ao terra, que idealmente tem tensão 0V. A Figura 2 ilustra como é a função de saída do circuito para o caso não inversor (a) e o inversor (b).

Figura 02 - (a) comparador não inversor, (b) comparador inversor.



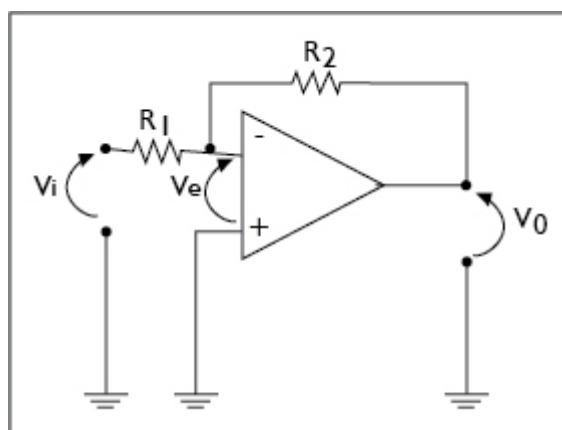
Atividade 01

1. Esboce o diagrama de dois circuitos comparadores, um inversor e um não inversor, para descobrir se um sinal V_{in} é maior ou menor que um sinal constante de 5 V. Escreva as equações de comportamento do sistema e esboce o gráfico da função de saída V_{out} . Considere $+V = 10\text{ V}$ e $-V = -10\text{ V}$.

Amplificador inversor

O amplificador de ganho constante mais amplamente utilizado é o amplificador inversor. Este tem a entrada de sinal ligada ao terminal inversor por meio de um resistor R_1 , enquanto o terminal não inversor fica aterrado. Entre os terminais de saída e inversor, há um resistor R_2 . Este último é normalmente chamado **resistor de realimentação**, tendo em vista que liga a saída à entrada. O circuito pode ser visto na Figura 3. Note o resistor R_2 ligando a saída do amplificador operacional de volta a sua entrada.

Figura 03 - Amplificador inversor



Como já foi dito anteriormente, o amp-op possui alta impedância de entrada, de modo que a corrente que flui por R_1 é desviada diretamente para R_2 . Aplicando a lei de Ohm, temos:

$$\frac{V_i - V_e}{R_1} = \frac{-(V_0 - V_e)}{R_2} \rightarrow -\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_0 - V_e}{V_i - V_e}$$

Entretanto, a tensão V_e é o resultado da amplificação da tensão diferencial de entrada, representada por V_i , ou seja:

$$V_0 = A_0 \cdot V_e \rightarrow V_e = \frac{V_0}{A_0}$$

Agora, vamos analisar a equação acima. Como o amplificador operacional possui um ganho de tensão muito elevado, temos que o valor de V_0 será muito maior do que o valor de V_e . O que acontecerá com V_0 ? Um número pequeno dividido por um número muito maior nos dá um número menor ainda, correto? Os cientistas conseguem provar que V_e é tão pequeno que se aproxima de 0!

Agora acompanhe o raciocínio, se $V_e = 0$, é como se ambas as entradas (inversora e não inversora) estivessem aterradas. Quando isso ocorre, dizemos que a entrada não inversora comporta-se como um **terra virtual**.

Voltando à expressão, temos:

$$-\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_0 - V_e}{V_i - V_e} = \frac{V_0 - 0}{V_i - 0} \rightarrow -\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_0}{V_i}$$

A relação

$$\frac{V_0}{V_i}$$

reflete a amplificação do sinal efetivamente aplicado na entrada do circuito (V_i). Por ser um circuito composto por um resistor de realimentação entre a saída e a entrada (R_2), essa relação é denominada **ganho de tensão de malha fechada**, que representamos por A_v .

Dessa forma, o ganho do amplificador inversor é dado por:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

O sinal negativo na fórmula do ganho reflete a inversão de fase que ocorre no sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Veja que agora podemos amplificar um sinal utilizando apenas dois resistores e um amplificador operacional! Veja o exemplo que se segue:

Dado o circuito da Figura 3, determine o ganho e a tensão de saída. Dados:

$$R_1 = 1k\Omega, R_2 = 15k\Omega, R_L = 10k\Omega, V_{cc} = \pm 12V, V_i = 200mV$$

Trata-se de um amplificador inversor, cujo ganho de tensão é:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \rightarrow A_v = -\frac{15 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \rightarrow A_v = -15$$

A tensão de saída, nesse caso, vale:

$$V_0 = A_v \cdot V_i \rightarrow V_0 = -15 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \rightarrow V_0 = -3V$$

Atividade 02

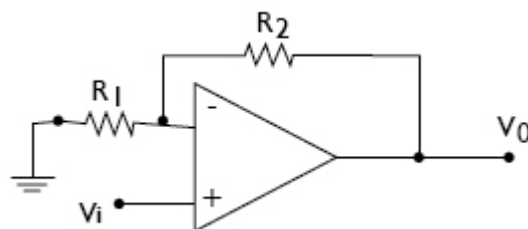
1. Repita o exemplo anterior para os seguintes dados:

$$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 15k\Omega, R_L = 10k\Omega, V_{cc} = \pm 6V, V_i = 400mV$$

Amplificador não inversor

Outra configuração bastante comum do amp-op é o amplificador não inversor, mostrado na Figura 4.

Figura 04 - Amplificador não inversor.



Neste, o resistor da entrada inversora

$$R_1$$

está aterrado e há também um resistor de realimentação

$$R_2$$

que liga a saída à entrada inversora. O sinal de entrada

$$V_i$$

é ligado diretamente ao terminal não inversor, de modo que o sinal amplificado não terá fase invertida.

Nessa configuração, o ganho de tensão é dado por:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Exercício resolvido: dado o circuito da Figura 4, determine o ganho e a tensão de saída. Dados:

$$R_1 = 1\text{k}\Omega, R_2 = 15\text{k}\Omega, R_L = 10\text{k}\Omega, V_{cc} = \pm 12\text{V}, V_i = 200\text{mV}$$

Trata-se de um amplificador não inversor, cujo ganho de tensão é:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \rightarrow A_v = 1 + \frac{15 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \rightarrow A_v = 16$$

A tensão de saída vale:

$$V_o = A_v \cdot V_i \rightarrow V_o = 16 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \rightarrow V_o = 3,2\text{V}$$

Atividade 03

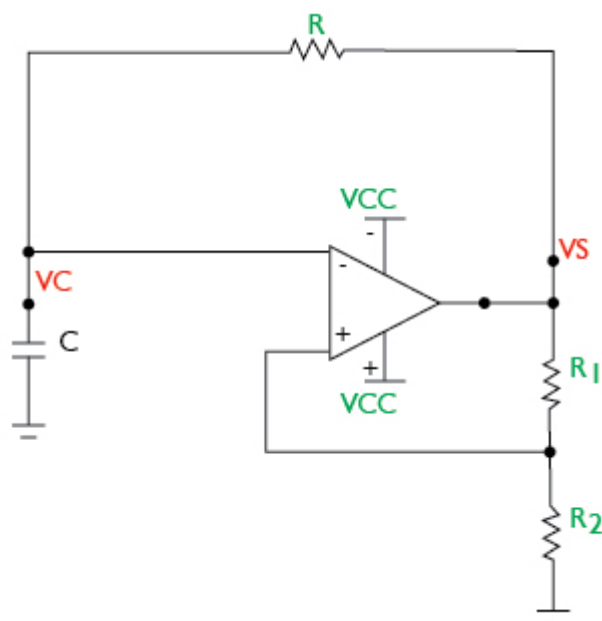
1. Repita o exemplo anterior para os seguintes dados:

$$R_1 = 10\text{k}\Omega, R_2 = 15\text{k}\Omega, R_L = 10\text{k}\Omega, V_{cc} = \pm 6\text{V}, V_i = 400\text{mV}$$

Oscilador

Conforme mencionamos na aula passada, a realimentação positiva é instável, mas pode ser utilizada em circuitos osciladores. Estudaremos agora um oscilador que gera uma onda quadrada ao alternar a sua saída entre a saturação V_+ e V_- . Este circuito, ilustrado na Figura 5, também é chamado de **astável**, pois oscila entre duas saídas instáveis.

Figura 05 - Oscilador ou astável.

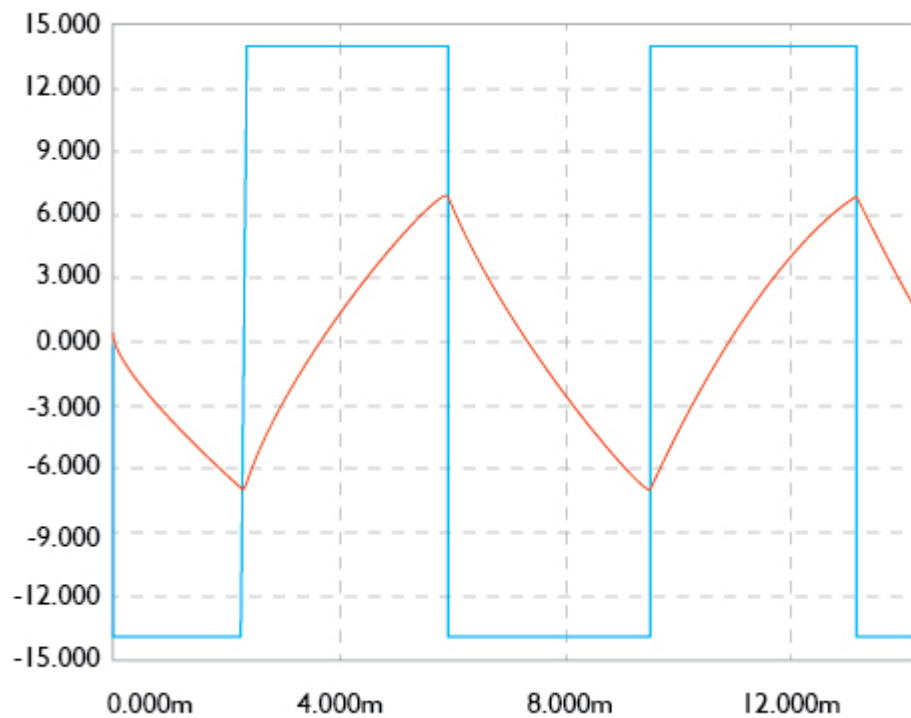


Neste circuito, estamos utilizando o amplificador operacional como um comparador, que já foi apresentado no início desta aula. Neste caso, se $V_+ > V_-$, a saída $V_S = +V_{CC}$ e do contrário será $-V_{CC}$. Com a saída em $+V_{CC}$ o capacitor C começa a se carregar tendendo à tensão V_S . No entanto, quando:

$$V_C = V_- > V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

A saída passará para $-V_{CC}$ e o capacitor começará a carregar-se tendendo à nova saída, que tem polaridade oposta à anterior. A tensão no capacitor se tornará mais negativa que a entrada V_+ , fazendo com que a saída inverta novamente e o ciclo se reinicie. Para ficar mais claro, a Figura 6 mostra os sinais de tensão de saída V_S em azul e do capacitor V_C em vermelho.

Figura 06 - Sinais de tensão V_s em azul e V_c em vermelho



Neste exemplo, as ondas são simétricas, pois foi utilizada uma fonte simétrica para alimentar o amp-op. Além disso, o tempo que a saída permanece em cada um dos estados é igual, pois a carga do capacitor passa pelo mesmo resistor em ambos os sentidos. Podemos calcular o período da onda pela equação:

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right)$$

Não se assuste com a fórmula! Ela parece complexa mas é bastante simples! “Ln” é uma função específica chamada logaritmo natural. Se você nunca a estudou antes, poderá encontrar mais informações sobre ela na próxima sessão, leituras complementares. R é o valor da resistência R, C o valor da capacitância do capacitor utilizado e

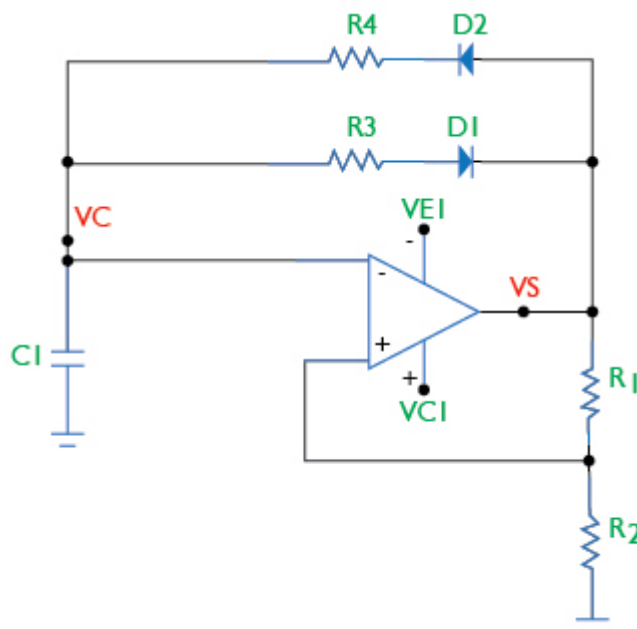
$$\beta$$

é apenas uma razão entre os resistores 1 e 2:

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Com um simples ajuste podemos alterar o tempo de permanência da saída em cada estado (semiperíodo) individualmente. Para isso, fazemos com que a corrente passe por resistores diferentes em cada situação, como mostrado na Figura 7.

Figura 07 - Amplificador operacional com realimentação positiva



Neste circuito, os diodos garantem que a corrente elétrica só passe pelo resistor ligado a ele quando a corrente estiver no sentido de condução do diodo. Portanto, quando $V_S = +V_{CC}$ o capacitor carregará pelo R_4 e no outro caso pelo R_3 . O cálculo do semiperíodo de cada estado será $T/2$, com o respectivo resistor em que a corrente está sendo conduzida.

Leitura Complementar

Informações sobre logaritmos naturais. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/matematica/logaritmo-natural/>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

Resumo

Nesta aula, começamos a estudar alguns circuitos em que são utilizados os amplificadores operacionais. O primeiro deles foi o comparador de tensão, que lhe permite comparar dois sinais distintos ou um sinal em relação a uma referência. Em seguida, vimos os amplificadores, que são muito empregados para elevar sinais da ordem de mV para V, podendo assim ser utilizados pela maioria dos outros circuitos e transformados em outras formas de energia. Nesta categoria, observamos as diferenças entre os inversores e os não inversores. Por fim, vimos os osciladores que são capazes de gerar ondas quadradas ao alternar as saídas saturadas do amp-op.

Autoavaliação

1. O que é um circuito comparador de tensão? Como ele pode ser utilizado na prática?
2. Qual a diferença entre o comparador inversor e não inversor em relação ao circuito e às equações de saída?
3. Como funciona o circuito amplificador? Qual a sua principal função?
4. Diferencie o amplificador inversor do não inversor em relação ao circuito e às equações de saída.
5. Qual a função de um circuito oscilador? Cite uma aplicação prática.

Referências

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

FERREIRA, Aitan Póvoas. **Curso Básico de Eletrônica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca técnica Freitas Bastos, 1987.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. 2. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 1997.

MARQUES, Angelo Eduardo B.; CHOURERI JUNIOR, Salomao; CRUZ, Eduarod Cesar Alves. **Dispositivos semicondutores: Diodos e Transistores**. 13. ed. rev. São Paulo: editora Érica, 2012.