

Circuitos Eletrônicos

Aula 08 - Amplificadores Operacionais

Apresentação

Nesta aula, nós estudaremos o amplificador operacional, aprendendo o que é, suas características, para que serve e como funciona.

Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

- Identificar um amplificador operacional.
- Identificar as funcionalidades de um amplificador operacional.
- Caracterizar um amplificador real.
- Identificar os modos de operação do amplificador operacional.

Introdução

Dando continuidade ao nosso estudo de circuitos eletrônicos, chegamos hoje a um importante componente chamado amplificador operacional.

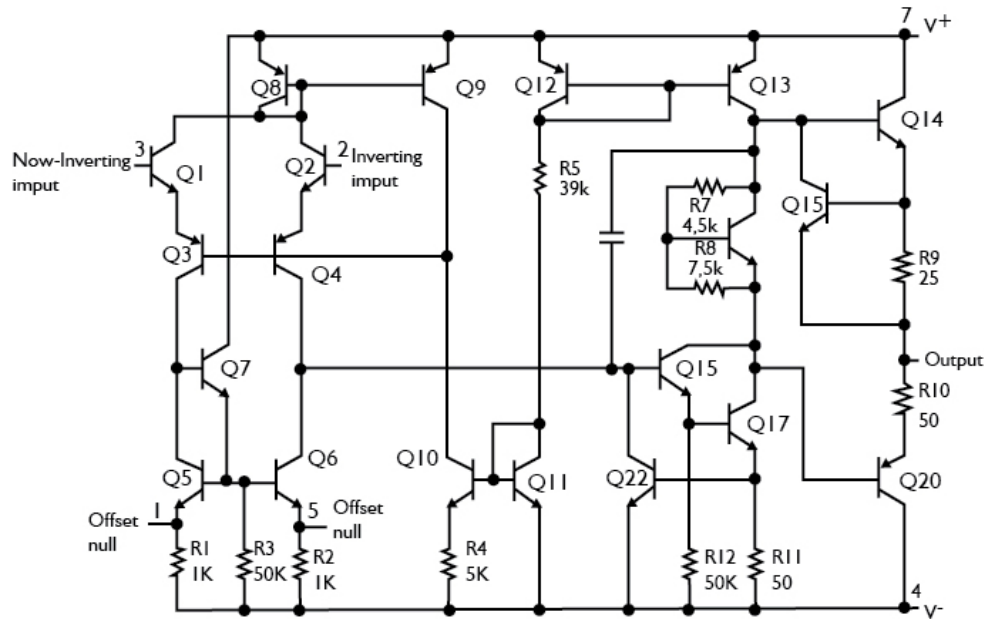
Um amplificador operacional (ou simplesmente amp-op) é um componente que possui a propriedade de amplificar o sinal de entrada. Além disso, duas características importantes do amp-op são a alta impedância de entrada e a baixa impedância de saída.

Atualmente, podemos encontrar um amp-op para quase todas as aplicações analógicas como em controle de processos industriais, instrumentação, telecomunicações, equipamentos de áudio e muitos outros.

Os amp-ops são alguns dos componentes ativos mais básicos em sistemas analógicos. Por exemplo, conectando dois resistores externos, podemos obter conversores de formas de onda, osciladores, filtros ativos e outros circuitos úteis.

Os amplificadores operacionais são, na verdade, um bloco funcional. Eles são construídos a partir de um arranjo de transistores, resistores, diodos e capacitores. A Figura 1 a seguir mostra o circuito simplificado de um popular amplificador operacional que pode ser encontrado no mercado, o LM741.

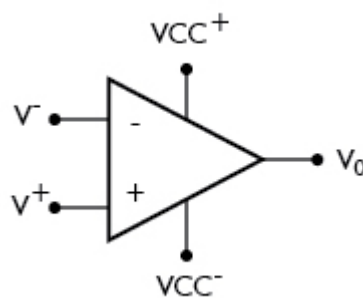
Figura 01 - Esquemático do LM741 feito pela Texas Instruments.



Amplificador operacional

Um amp-op contém alguns estágios amplificadores diferenciais com transistores para atingir um ganho de tensão muito alto. A Figura 2 mostra um amp-op básico.

Figura 02 - Amplificador operacional.



Na figura anterior é possível perceber que o amp-op possui duas entradas: uma inversora (V_-) e a outra não-inversora (V_+). Os valores de V_{CC}^+ e V_{CC}^- são a alimentação do componente e limitam, respectivamente, os valores de tensão máxima positiva e negativa que o amp-op poderá fornecer. A ideia básica do amp-op é amplificar a diferença de tensão entre as duas entradas. Por isso a tensão de saída é:

$$V_0 = A \cdot (V^+ - V^-)$$

Na equação acima, o A representa a amplificação do sinal, chamado de ganho de tensão. Ele será explicado mais adiante.

Quer um exemplo prático para o uso deste componente? Ao dedilhar uma guitarra elétrica é produzido um sinal de alguns milivolts. A amplitude desse sinal de tensão é tão pequena que seria impossível ouvir o som se ligássemos a guitarra diretamente a uma caixa de som. Antes disso, é necessário amplificar o sinal e utilizando um circuito amplificador com amp-op.

Amplificador operacional ideal

O amplificador operacional ideal é o modelo teórico do qual os componentes reais tentam se aproximar ao máximo. Suas propriedades são:

- ganho de tensão infinito em malha aberta;
- resposta de frequência infinita;
- impedância de entrada infinita;
- impedância de saída nula;
- insensibilidade à temperatura.

Para que você possa compreender melhor essas características, explicaremos cada termo citado acima. O primeiro deles é o **ganho**. Trata-se da relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Pode ser positivo ou negativo. Um ganho de 2, por exemplo, significa que a tensão do sinal de saída é duas vezes maior que a tensão do sinal de entrada. Já um ganho de 0,5 indica que a tensão de saída é a metade da tensão de entrada. O ganho infinito garante que a saída do amplificador ideal nunca sature.

Outro termo importante é a **resposta de frequência**, que pode ser definida como o ganho do componente para cada frequência de sinal. O amp-op ideal mantém o ganho constante para todas as frequências, por isso o termo infinito.

Outra característica importante é a **impedância**, que se refere à capacidade de um dispositivo se opor ao fluxo de energia quando submetido a uma diferença de potencial. Com a impedância de entrada infinita o componente não consome nem fornece corrente através de suas entradas. Já a impedância nula de saída garante que ele funcione como uma fonte de tensão ideal, indiferente à corrente drenada pelo circuito conectado à saída.

Por último, a **insensibilidade à temperatura** garante que o componente não altere suas características quando houver mudança na temperatura à que está submetido. O aumento de temperatura do componente é muito comum já que quando está em operação tem-se a transformação de energia elétrica em calor, conhecida também como Efeito Joule.

Amplificador operacional real

Devido a limitações no processo de produção do amplificador operacional não é possível encontrar comercialmente um amplificador operacional ideal. O que se encontra é o amplificador operacional real que apresenta características próximas ao ideal. Mas e quais as diferenças entre os dois? Nenhuma das características ideais é atingida completamente. Ao invés disso, os componentes apresentam características como:

- ganho de tensão elevado;
- resposta de frequência com espectro abrangente;
- impedância de entrada grande;
- impedância de saída baixa;
- características se alteram com a mudança de temperatura.

Essas imperfeições geram valores de ganho, tensões e correntes de desequilíbrio além de outras características como *slew rate* e *overshoot*, que são fornecidos pelo fabricante e devem ser consideradas quando o componente for utilizado em um circuito. Essas características serão estudadas com maior detalhe em outra aula.

Atividade 01

1. Conceitue amp-op e diferencie o amp-op ideal do amp-op real.

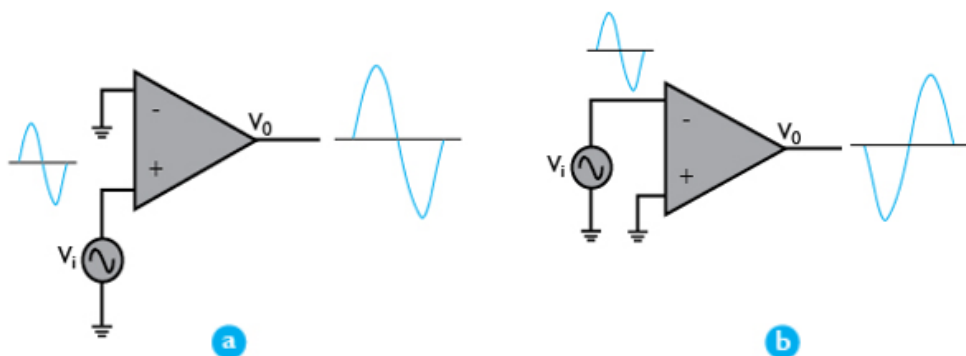
Funcionamento do amp-op

O próximo passo é entendermos o funcionamento do amp-op através da relação entre suas entradas e saídas. Veremos que dependendo de qual entrada, sinal aplicado e/ou saída é utilizado teremos comportamentos distintos. Nesta análise, focaremos na polaridade dos sinais já que os ganhos serão detalhados futuramente.

Entrada com terminação única

A entrada com terminação única é caracterizada pela aplicação do sinal de entrada em apenas uma das entradas do componente com a outra ligada ao terra. Obtemos na saída um sinal de mesma polaridade caso a entrada utilizada tenha sido a não-inversora e com polaridade invertida quando aplicado à entrada inversora. A Figura 3 demonstra um sinal de entrada aplicado em cada uma das entradas com terminação única e as saídas obtidas.

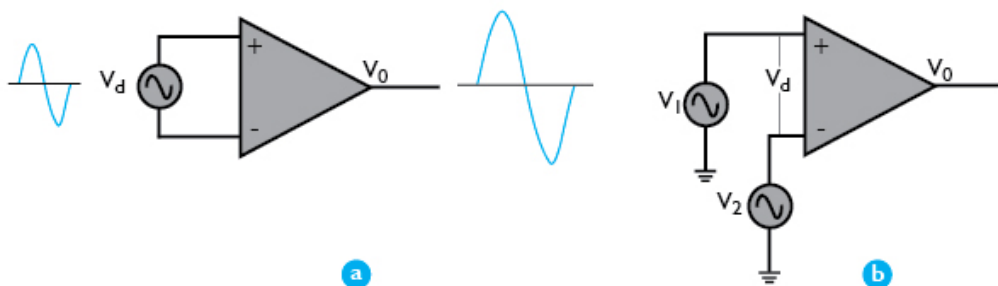
Figura 03 - Amp-ops em operação com terminação única. (a) Entrada positiva (b) entrada negativa.



Entrada (diferencial) com terminação dupla

Agora se aplica sinal de entrada em ambas as entradas do amp-op. A saída obtida estará em fase com o sinal utilizado. Observe na Figura 4 que neste caso pode ser aplicado tanto o mesmo sinal para ambas as entradas como sinais distintos. Neste último, o sinal de saída seguirá a diferença entre os dois sinais de entrada, por isso chamado de diferencial. Podemos obter o sinal diferencial pela subtração de sinais: $V_d = V_1 - V_2$.

Figura 04 - Amp-ops em operação com terminação única. (a) Mesmo sinal nas duas entradas (b) Sinais distintos.

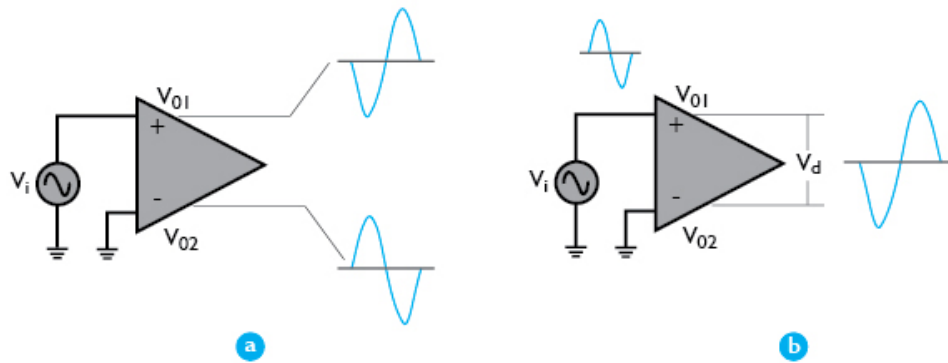


Quando o mesmo sinal é aplicado a ambas as entradas (modo comum), a saída é, em um componente ideal, nula, já que cada entrada gera o mesmo sinal, mas de polaridade oposta, e estes se cancelam. Na prática, a saída ainda apresenta um pequeno sinal. Essa característica é conhecida como **rejeição de modo comum** e é muito utilizada para a eliminação de ruídos.

Saída com terminação dupla

Os amp-ops também geram duas saídas de polaridades opostas. Observe que na Figura 5 estão presentes dois terminais de saída. No caso (a), está ilustrado o sinal oposto gerado em cada uma delas; enquanto no caso (b), utiliza-se ambos os sinais para gerar uma saída diferencial que, por ter mesma amplitude, mas polaridade oposta, tem o dobro da amplitude de uma das saídas.

Figura 05 - Saída com terminação dupla. (a) Saídas opostas (b) saída diferencial



Atividade 02

1. Quais são as opções de entradas e saídas de um amp-op e como podem ser utilizadas simultaneamente?

Modos de Polarização

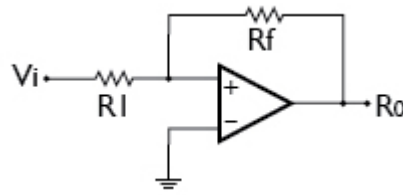
O amp-op pode ser utilizado em três modos de operação: sem realimentação, com realimentação positiva e com realimentação negativa. Vamos aprender como identificá-los e suas utilidades.

Com realimentação positiva

A operação do circuito, neste modo, é em malha fechada, já que há a realimentação da saída na entrada. Esse modo é caracterizado pela presença de um sinal de saída sendo jogado novamente na entrada. Na figura abaixo, podemos ver um fio sair de V_o e se ligar a V_+ , acoplado ao resistor R_f . Veja que um sinal da saída retorna para a entrada. Por isso chama-se realimentação.

No entanto, a realimentação positiva conduz o circuito à instabilidade. Por este motivo temos como aplicação prática os circuitos osciladores. Perceba na Figura 6 que a saída é realimentada na entrada positiva, característica única deste modo.

Figura 06 - Amplificador operacional com realimentação positiva

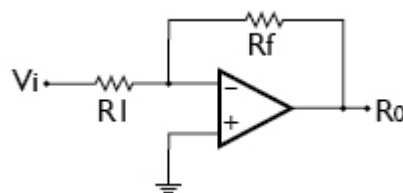


Voltemos a falar mais uma vez na guitarra elétrica para explicar a instabilidade inserida numa realimentação positiva. Quando os captadores da guitarra estão posicionados de frente para a saída do amplificador, se o músico soar as cordas, elas serão captadas pelo captador, amplificadas pelo amplificador e jogadas no ar pelos alto-falantes da caixa de som. Essa onda sonora vai ser novamente captada pelos captadores da guitarra e reintroduzida ao amplificador gerando um círculo vicioso que resulta num alto ruído conhecido no meio musical como microfonia. Quem já presenciou sabe o quão desagradável pode ser!

Com realimentação negativa

Semelhante ao modo anterior, este opera em malha fechada já que também conta com a realimentação. Porém, como pode ser visto na Figura 7, a realimentação é negativa. Por esse motivo, o circuito apresenta comportamento linear e seu ganho pode ser controlado através dos resistores utilizados nas conexões. Este é o modo mais importante e utilizado na prática.

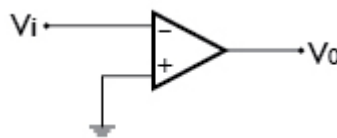
Figura 07 - Amplificador operacional com realimentação negativa.



Sem realimentação

Neste modo, dizemos que o circuito está operando em malha aberta, pois não há realimentação da saída na entrada. O valor do ganho de tensão do componente será o fornecido pelo fabricante em seu manual. É um modo bastante empregado em circuitos comparadores, que serão estudados em uma próxima aula. A Figura 8 ilustra o modo apresentado.

Figura 08 - Amplificador operacional sem realimentação



Atividade 03

1. O que deve ser observado em um circuito com amplificador operacional para identificar qual o seu modo de operação?

Resumo

Nesta aula, aprendemos o que é um amplificador operacional, qual sua função e como ele funciona. Conhecemos também as características de um amp-op ideal e real e os modos de operação deste componente.

Autoavaliação

1. O que é o amplificador operacional? De que ele é constituído?
2. Quais são as opções de entrada e saída de um amp-op?
3. Quais são os possíveis modos de operação?
4. O que significa realimentação?
5. Diferencie realimentação positiva da negativa.

Referências

AMPLIFICADORES operacionais. Disponível em:
<<http://www.camacho.eng.br/Amp%20Ops.htm>>. Acesso em: 17 jul. 2013.

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

MANUAL Texas Instruments LM741. 2012.