

Circuitos Eletr nicos

Aula 10 - Amplificadores Operacionais - Aplica es II

Apresentação

Nesta aula, continuaremos a estudar alguns circuitos práticos que podem ser utilizados com os amplificadores operacionais. Ainda continuaremos a aprender alguns circuitos largamente utilizados com amplificadores operacionais explicando suas funcionalidades e como são montados. O primeiro deles será o buffer ou seguidor unitário. Depois, apresentaremos o amplificador somador, capaz de amplificar e adicionar vários sinais de entrada. Em seguida, veremos o amplificador diferencial ou subtrator que tem como objetivo amplificar a diferença entre sinais. Estudaremos ainda, a aplicação de um circuito amplificador somador em um conversor D/A. Para finalizar, vamos discutir as especificações de um amplificador operacional e seu manual.

Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

- Projetar um buffer ou seguidor unitário;
- Especificar um amplificador somador;
- Especificar um amplificador diferencial ou subtrator;
- Projetar um conversor D/A;
- Entender as características do amp-op real;
- Utilizar as informações adquiridas em manuais;
- Entender a curva característica de tensão-corrente do diodo real;

Relembrando a aula passada

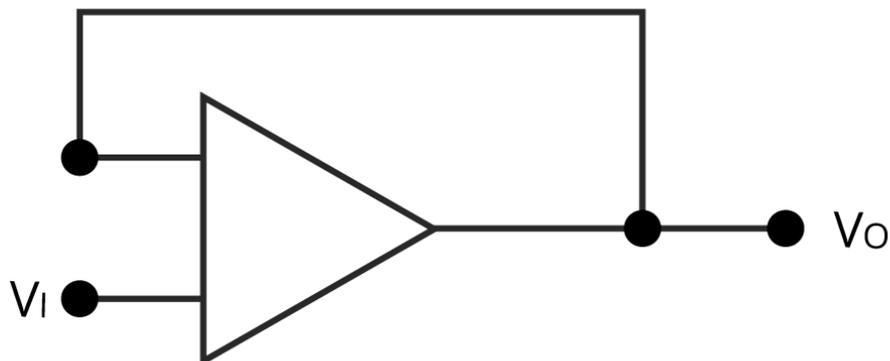
Na aula passada, começamos a estudar aplicações dos amplificadores operacionais através de alguns circuitos comumente utilizados. Aprendemos como funciona e como é montado o comparador de tensão, que utiliza dois sinais (um podendo ser a referência) e compara se um é maior que o outro. Depois, vimos o amplificador inversor, que é o mais utilizado, pois tem equações de ganho mais simples de serem utilizadas. Em seguida, estudamos o amplificador não inversor, cuja saída tem a mesma polaridade do sinal de entrada. Finalmente, detalhamos o oscilador de onda quadrada, no qual o amp-op oscila entre dois estados instáveis e tem como saída tensões saturadas de acordo com sua alimentação.

Circuitos práticos com amp-op

Agora, daremos continuidade aos nossos estudos e veremos mais quatro circuitos com amplificadores operacionais.

Buffer ou seguidor unitário

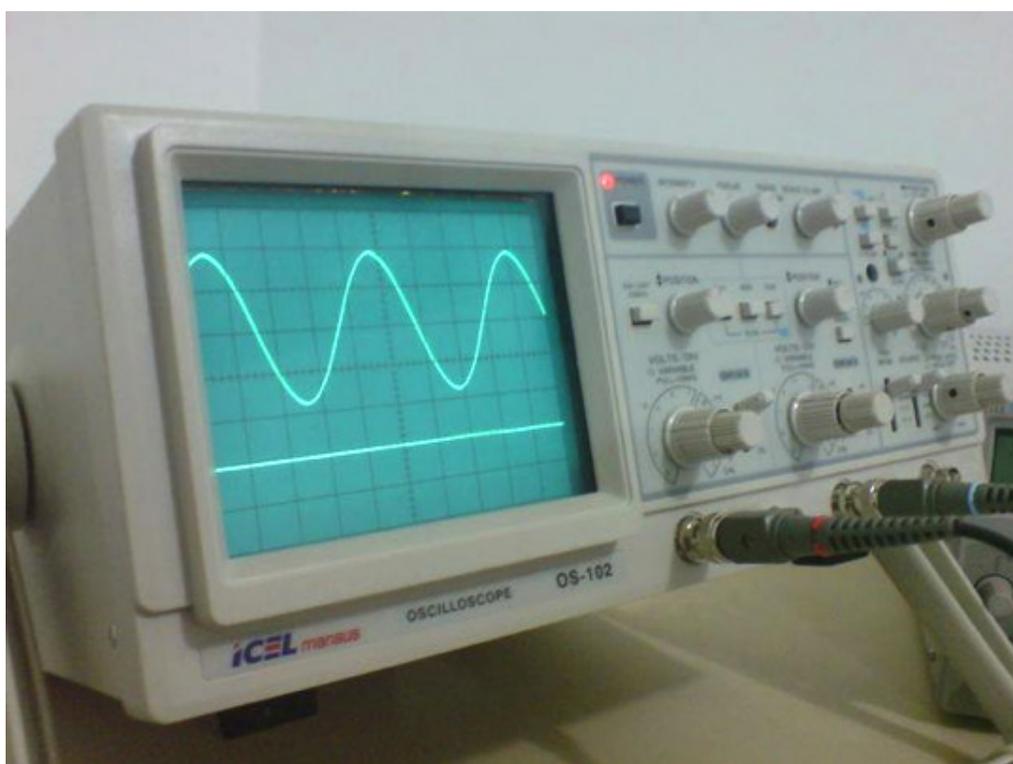
Figura 01 - Amplificador Operacional sendo utilizado com Buffer.



Outro circuito que emprega amp-op é o **buffer**, ou, seguidor unitário. Nessa configuração, mostrada na figura 1, a saída é ligada diretamente à entrada inversora. Veja que, diferente do exemplo da aula passada, o amplificador operacional não tem resistores ligados, sendo assim, não há amplificação. Por essa característica, dizemos que o circuito possui ganho com valor unitário, ou seja, 1.

Mas se esse circuito tem ganho unitário, então para que ele é usado? Ele é usado em aplicações em que se deseja isolar o sinal de entrada do sinal de saída. Um exemplo disso é o osciloscópio.

Figura 02 - Osciloscópio.



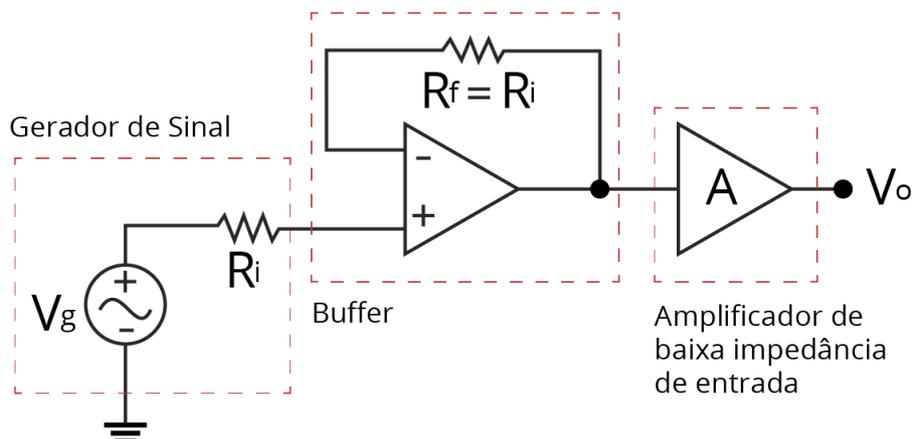
Fonte: <http://eletronicarfs.blogspot.com.br/2010/07/osciloscopio-e-book-pdf.html>. Acesso em: 2 fev. 2016.

Esse instrumento é utilizado para medir tensão e exibir graficamente. Sendo assim, é interessante que a medição não interfira no circuito que está sendo medido. Ao utilizar um buffer a amplitude do sinal, não é alterada e consegue-se isolar o circuito do osciloscópio.

Outra aplicação para este circuito é chamada de casamento de impedância. Se você não lembra o que é a impedância, é só voltar à aula três, definimos esse conceito lá!

Para maior eficiência na transferência de energia, é necessário que dois circuitos ao serem conectados tenham impedância de saída (para o circuito que está gerando o sinal) e de entrada (para o que receberá o sinal) o mais próximo possível. Por isso, o buffer pode ser utilizado para fornecer um sinal de baixa impedância na saída, como podemos ver na Figura a seguir.

Figura 03 - Circuito com buffer para casamento de impedância.

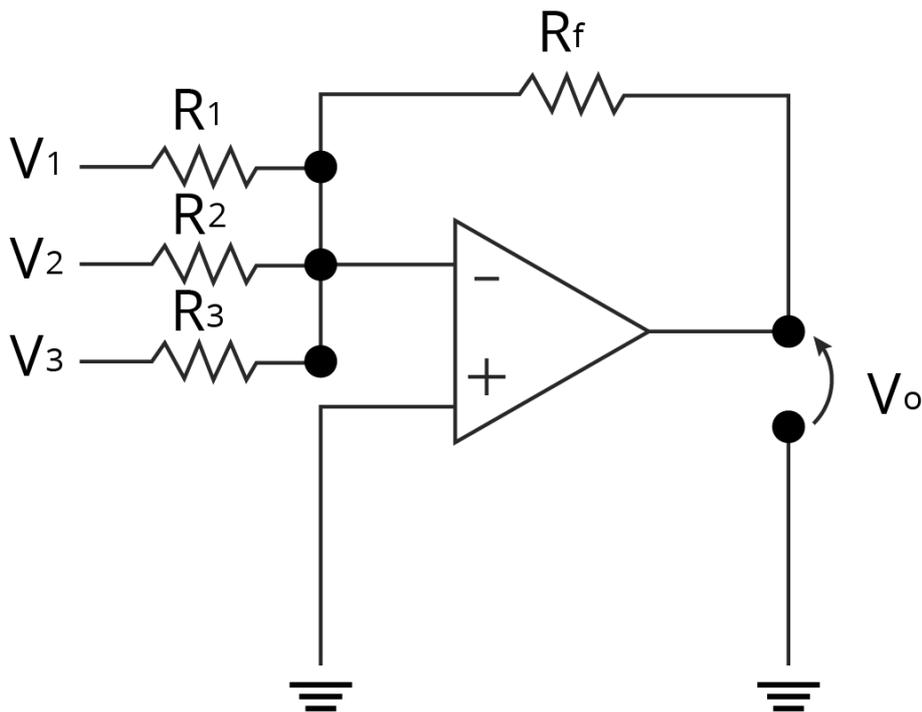


Nesse caso, se inclui uma resistência ligada na realimentação do amp-op de mesmo valor da impedância da entrada. As resistências precisam “casar”, serem iguais, por isso esse circuito tem esse nome.

Amplificador somador

Provavelmente, o mais utilizado dos circuitos amp-ops é o circuito amplificador somador, mostrado na Figura 4. Trata-se de um circuito amplificador somador de duas ou mais entradas que fornece um meio de somar algebricamente as tensões, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante que é definido pelas resistências acopladas.

Figura 04 - Amplificador somador.



Para esse circuito, temos três entradas, V_1 , V_2 e V_3 . A realimentação funciona como o circuito amplificador, visto na aula passada. Entretanto, a saída será uma soma das entradas amplificadas.

$$V_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right)$$

O circuito anterior tem três entradas. Se desejarmos adicionar mais entradas, basta incluir uma nova resistência e ligá-la em paralelo.

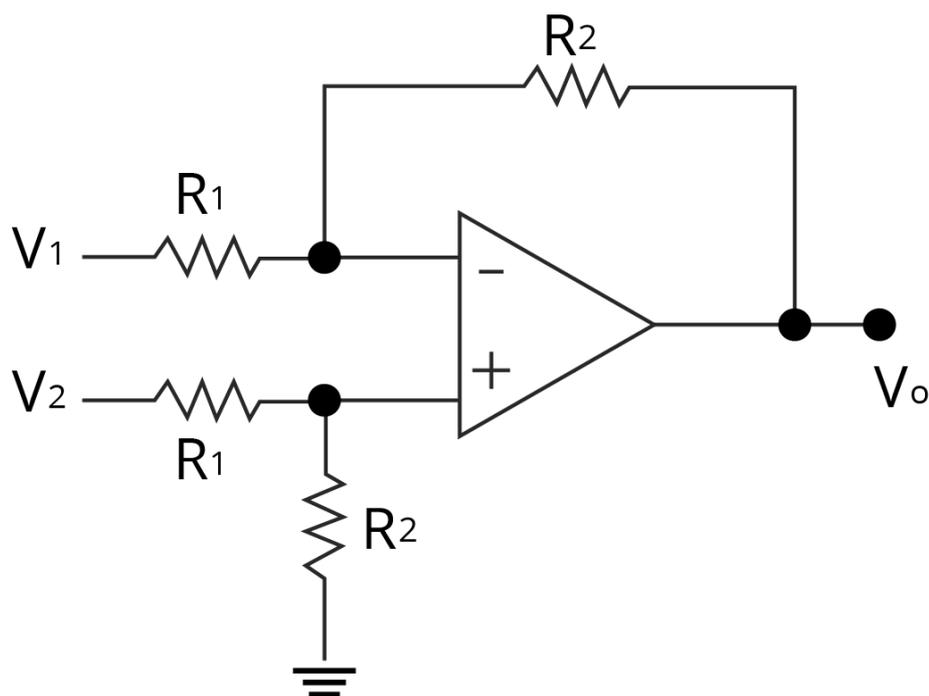
Atividade 01

1. Esboce o diagrama do amplificador somador com cinco tensões de entrada. Escreva também a fórmula da tensão de saída.

Amplificador diferencial ou subtrator

Este circuito, ilustrado na Figura 5, tem como objetivo a amplificação da diferença de tensão entre as entradas.

Figura 05 - Amplificador diferencial ou subtrator.



Imagine que você quer passar um sinal de amplitude 5V através de um cabo e depois amplificá-lo. Se você enviar esse sinal diretamente pelo cabo, pela presença de ruídos no meio, o valor que chegará à outra extremidade do cabo não será mais 5V. Além disso, haverá uma queda de tensão pela própria resistência do cabo. A técnica utilizada nesses casos é transmitir dois sinais, onde a diferença entre eles é realmente a informação que você transmitir. Isso porque, quando sinais transitam em cabos perto um do outro e são submetidos a ruídos de natureza aditiva, ambos os sinais tem seus valores acrescidos de ruídos. Assim a diferença se preserva.

Assim, para transmitir 5V, utilizamos dois cabos, um com 12V e outro com 7V, por exemplo. Na outra extremidade do cabo, ao medirmos as tensões, podemos encontrar, por exemplo, 11,44V e 6,423V. A diferença entre eles será 5,017V, um valor muito mais próximo do original do que 5,26V, por exemplo.

A utilização do circuito anterior possibilita a redução da presença de ruídos nos sinais amplificados já que, como eles estão presentes em ambas as entradas, não serão amplificados, “passando” apenas a diferença entre os sinais puros. Esta propriedade é chamada de rejeição de modo-comum.

A saída V_0 é calculada por:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

Conversor D/A

Atualmente, observamos cada vez mais a presença de aparelhos digitais ao nosso redor, desde aparelhos pessoais até máquinas industriais. Eles são ditos digitais porque funcionam com sinais digitais, ou seja, níveis descontínuos de tensão. Os famosos bits, zeros e uns. Eles são representados por níveis de tensão, geralmente 5V para 1 e 0V para 0.

No entanto, o nosso mundo é analógico, ou seja, não temos níveis predefinidos para representar a temperatura, por exemplo. Os computadores trabalham com a lógica digital, sendo assim, precisamos de circuitos dedicados a transformar sinais analógicos para digitais e vice-versa. Nas leituras complementares desta aula, você encontrará fontes com mais informações tanto sobre grandezas analógicas quanto digitais.

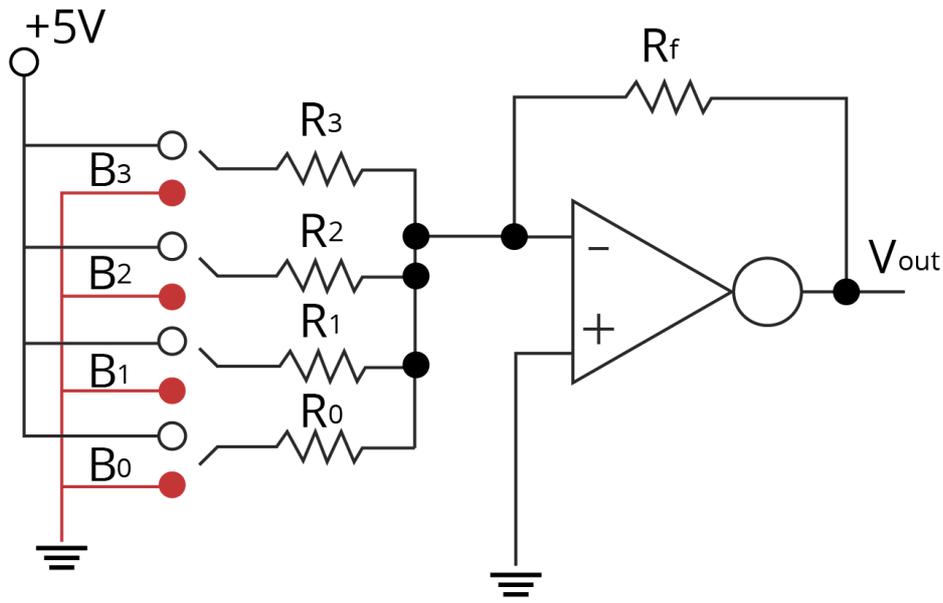
Utilizando um circuito de amplificador somador, já apresentado anteriormente, estudaremos um conversor D/A (digital para analógico) com sinal de entrada de 4 bits. Para isso, cada bit será ligado à entrada do amp-op, através de um resistor com valor de resistência único e de forma que ao somarmos todas as tensões o resultado tenha apenas uma combinação de bits possível.

O bit menos significativo (B_0) terá peso 1, o segundo (B_1) 2, o terceiro (B_2) 4 e o quarto (B_3) 8.

Para que tenhamos os pesos mencionados no circuito, deveremos atribuir a maior resistência ao bit menos significativo, e progredir dividindo o valor da resistência pela metade para os bits seguintes. Dessa forma, podemos atribuir os

seguintes resistores para cada bit: $R_0=8K\Omega$, $R_1=4K\Omega$, $R_2=2K\Omega$ e $R_3=1K\Omega$. Com isso, o bit B_0 , quando ativo, contribuirá com uma corrente de $1/8$ quando comparada com a do bit B_3 , exatamente como foi especificado. O circuito completo está ilustrado na Figura 6.

Figura 06 - Conversor D/A de 4 bits.



O valor de resistência do R_f é tipicamente igual ao do resistor ligado ao bit mais significativo, nesse caso o $R_3 = R_f = 1K\Omega$. Com esse valor, obtemos uma curva de tensão de entrada com uma boa linearidade e ganho, facilitando a determinação de quais bits estavam ativos e minimizando a possibilidade de erros. A saída V_{out} pode ser obtida pela equação:

$$V_{out} = \frac{R_f \cdot V_{in}}{R_{eq}} = - \left(\frac{R_f}{R_0} + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2} + \frac{R_f}{R_3} \right) \cdot V_{in}$$

Onde, neste exemplo, $V_{in} = 5V$. É importante notar que quando um bit de entrada for nulo a tensão naquele resistor será zero. Por isso, a componente do R_{eq} referente àquele bit não estará presente no cálculo. Para esclarecer, calcularemos a saída V_{out} para a entrada do número 3.

O primeiro passo é transformar o número para binário, que nesse caso é 0011. Observe então que apenas os resistores R_0 e R_1 estarão alimentados pela tensão de 5V e, portanto, presentes no cálculo do R_{eq} . Calculamos, então, a resistência equivalente:

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{R_0 \cdot R_1}{R_1 + R_0} = \frac{8 \cdot 4}{8 + 4} = 2,667K\Omega$$

Lembre-se de que esse cálculo de R_{eq} para resistores em paralelo, através da divisão do produto pela soma só é válida para o caso de dois resistores. A partir de 3, é necessário resolver o somatório do inverso das resistências. Ao invés de calcular o valor de R_{eq} separadamente, poderíamos ter calculado o somatório já na fórmula do V_{out} , a escolha do procedimento de resolução fica a seu critério.

Agora, substituímos o valor calculado de R_{eq} na equação do V_{out} :

$$V_{out} = -\frac{R_f \cdot V_{in}}{R_{eq}} = -\frac{1 \cdot 5}{2,667} = 1,875V$$

Então, agora sabemos que a tensão de 1,875V na saída desse circuito representa o número 7 da entrada digital. Durante o cálculo atente para as unidades dos valores utilizados.

Atividade 02

1. Calcule, para o circuito anterior, a saída V_{out} para os seguintes valores: 5, 9 e 15.

Dica: Lembre-se de transformar os números em binário antes.

Algumas considerações

Conforme vimos até agora, os amplificadores operacionais reais têm limitações e características diferentes do modelo ideal. Essas diferenças devem ser levadas em conta quando se utiliza o componente. Mas como saber as características de cada amp-op? Poderíamos medi-las para cada modelo que fôssemos utilizar? Sim, isso

seria possível. No entanto, esse é um procedimento que requer equipamentos específicos e demanda tempo para que todas as medições sejam realizadas. Por isso, os fabricantes eletrônicos realizam as medições e as apresentam nos respectivos manuais. Cabe a nós, então, apenas consultar e entender o que são e como devemos utilizá-las.

Especificações de um CI amp-op

Até agora vimos o que é um amp-op ideal e real, como funcionam e também alguns circuitos e aplicações que utilizam esse componente. Nesta aula, iremos discutir alguns parâmetros de um CI amp-op.

O CI amp-op mais comumente utilizado é o 741. Existem várias empresas no mercado que fabricam esse componente, por isso é importante saber exatamente qual modelo está sendo usado para que se possa buscar informações no manual correto. Apesar de serem o mesmo CI, seus parâmetros podem variar de um fabricante para o outro, consequentemente, cada fabricante disponibiliza ao usuário o seu próprio manual (datasheet, em inglês). Além de quadros e gráficos contendo diversos parâmetros relacionados ao amp-op, esses manuais normalmente trazem exemplos de circuitos em que ele pode ser empregado. Vale salientar que normalmente essas informações estão disponíveis no site do fabricante e costumam estar apenas em inglês. A lista das principais fabricantes e o código de cada uma encontra-se no Quadro Quadro 1.

Fabricantes	Códigos
Fairchild	μ A741
National	LM741
Motorola	MC1741
RCA	CA741

Fabricantes	Códigos
Texas	SN741
Signetics	SA741
Siemens	TBA221 (741)

Quadro 1 - Fabricante e códigos dos CIs 741.

Fonte: Autoria própria (2014)

Característica	Min.	Tip.	Max.	Unidade
Tensão de offset de entrada (VIO)		1	6	mV
Faixa de tensão de entrada de modo-comum (VLCR)	±12	±13		V
Pico máximo de oscilação da tensão de saída (VOM)	±12	±14		V
Amplificação de tensão diferencial para grandes sinais (AVD)	20	200		V/mV
Fonte de corrente (ICC)		1,7	2,8	mA
Largura de banda de ganho unitário (B1)			1,2	MHz
Dissipação total de potência (PD)		50	85	mW
Fator de overshoot (Tr)		5%		
Taxa de subida em ganho unitário (SR)		0,5		V/μs

Quadro 2 - Características elétricas do CI LM741.

Fonte: Manual do Fabricante (2000, p. 2).

Disponível em: <http://web.mit.edu/6.301/www/LM741.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2016.

Primeiramente, é necessário citar que os parâmetros do Quadro acima foram obtidos a partir de testes feitos pelo fabricante utilizando $VCC = \pm 15V$, $TA = 25^{\circ}C$. Ao variar a tensão de alimentação do CI e/ou a temperatura ambiente à qual o CI está submetido, é possível que os valores exibidos no Quadro sofram alguma variação (para mais ou para menos).

Existem ainda outras características elétricas que não estão no Quadro 2, mas que podem ser relevantes para aplicações, por isso é importante conhecer todas elas ao projetar um circuito com esse componente. Agora vamos à explicação sobre cada um dos termos utilizados no último Quadro.

Tensão de offset, ou desequilíbrio, de entrada

Idealmente, a saída de um amp-op deve ser nula quando suas entradas estiverem em curto circuito. No entanto, em componentes reais encontramos a tensão de *offset* de entrada, que geralmente está na faixa de 1 a 100 mV. Nesse componente, ela é normalmente 1 mV, mas pode assumir valores maiores do que 6 mV. Ou seja, se as duas entradas forem conectadas ao terra do circuito aparecerá na saída um valor entre 1 mV e 6 mV, segundo dado fornecido pelo fabricante. A tensão de offset de saída é calculada com base no circuito utilizado. Se a pior condição possível for a de interesse, o máximo valor deve ser usado. Vale salientar que para efeito de cálculo de projeto, utiliza-se o valor típico.

Faixa de tensão de entrada de modo-comum

A Faixa de tensão de entrada de modo-comum indica o valor máximo em que a tensão de entrada pode variar para que não haja distorção na saída. Nesse caso, para uma alimentação de $\pm 15 V$ temos que este parâmetro é tipicamente $\pm 13 V$ e seu mínimo $\pm 12 V$. Convém frisar que tensões superiores a este valor devem ser evitadas.

Máxima oscilação de saída

A máxima oscilação de saída, ou pico máximo da oscilação de saída, representa uma limitação similar à anterior, mas, neste caso, em relação à tensão de saída. Portanto, indica o valor máximo que a tensão de saída pode assumir para uma alimentação de ± 15 V. Nesse caso, a limitação é, no pior caso, de ± 12 V e tipicamente ± 14 V. Por esse motivo, a tensão de entrada deve ser limitada, levando em conta também o ganho do circuito, para que esses valores não sejam extrapolados.

Amplificação de tensão diferencial para grandes sinais

A amplificação de tensão diferencial para grandes sinais nada mais é que o ganho de tensão de malha aberta do amp-op, uma de suas características já estudada e entre as mais importantes já que a amplificação é a função primária deste componente. O valor máximo é de 20 V/mV ou 20.000 V/V, e o valor típico é de 200 V/mV ou 200.000 V/V.

Fonte de corrente

O parâmetro fonte de corrente especifica a quantidade necessária de corrente para o CI funcionar. Ou seja, esse CI tipicamente exige 1,7mA para seu funcionamento e, no pior caso, 2,8mA. Esse parâmetro é extremamente importante quando o projetista do circuito precisa dimensionar a fonte que alimentará o circuito.

Largura de banda de ganho unitário

A largura de banda de ganho unitário é uma medida convencional para representar a resposta em frequência do CI. Ela determina até em qual frequência o componente apresenta um ganho de tensão maior ou igual a 1. A partir dessa

frequência, os ganhos são inferiores a 1, sendo assim, não têm utilidade. Nesse Quadro em questão, observa-se que o valor é de 1,2 MHz.

Outro conceito importante e muito utilizado na prática é a frequência de corte f_c , em que o ganho cai 3 dB, ou aproximadamente $0,707 \cdot A_{VD}$. Podemos relacionar os dois parâmetros de frequência pela equação:

$$B_1 = A_{VD} \cdot f_c$$

Atividade 03

1. Determine a frequência de corte do amp-op do Quadro 2.

Dissipação total de potência

A dissipação total de potência nos diz que esse CI normalmente dissipa 50 mW, mas pode chegar a 85 mW, no pior caso. É importante notar que esse valor é para uma alimentação de ± 15 V e que para valores inferiores a dissipação também deve ser menor.

Atividade 04

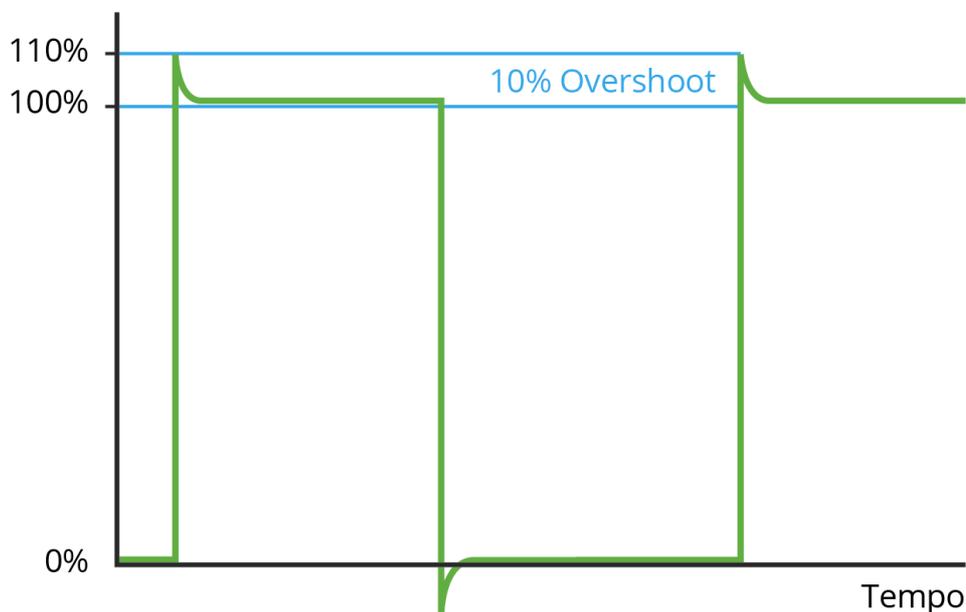
1. Determine a corrente drenada de uma fonte de ± 15 V que alimenta o LM741, considerando, para tanto, os valores típico e máximo.

Fator de overshoot

O *overshoot* em português geralmente é traduzido por sobrepassagem ou sobredisparo. Ele indica, em porcentagem, quanto o valor de tensão de saída foi ultrapassado durante o regime transitório até atingir seu valor de regime

permanente. Este efeito é prejudicial ao circuito. Portanto, valores menores representam componentes melhores. Podemos observar na Figura 7 o exemplo de um sinal com *overshoot* de 10% (SILVA, [20--]).

Figura 07 - *Overshoot* de 10%.

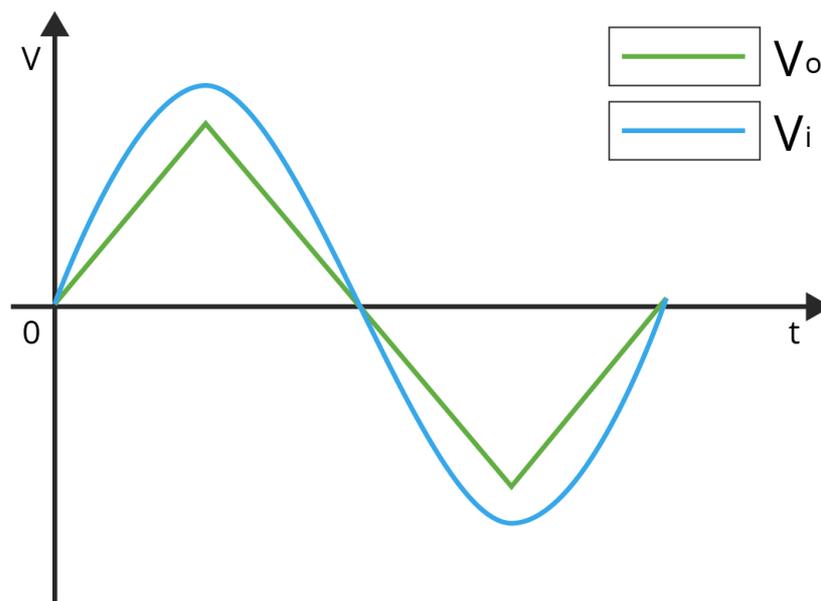


No caso observado no Quadro 2 podemos ver que esse parâmetro é de 5% para o CI que está sendo estudado.

Taxa de subida em ganho unitário (*slew rate*)

A taxa de subida, ou *slew rate* em inglês, é a variação máxima da saída por unidade de tempo. Podemos pensar nesse parâmetro como a “velocidade” de resposta do CI, geralmente fornecida na unidade $V/\mu s$. Por isso, valores mais altos representam um melhor amp-op já que a variação da saída pode ser limitada por este parâmetro. Podemos ver um exemplo dessa limitação na Figura 8.

Figura 08 - Saída V_0 limitada pela taxa de subida.



Admitindo um ganho unitário, a saída V_0 deveria ser igual à entrada V_i . No entanto, devido à limitação da taxa de subida, a saída é deformada e apresenta a forma ilustrada na imagem acima.

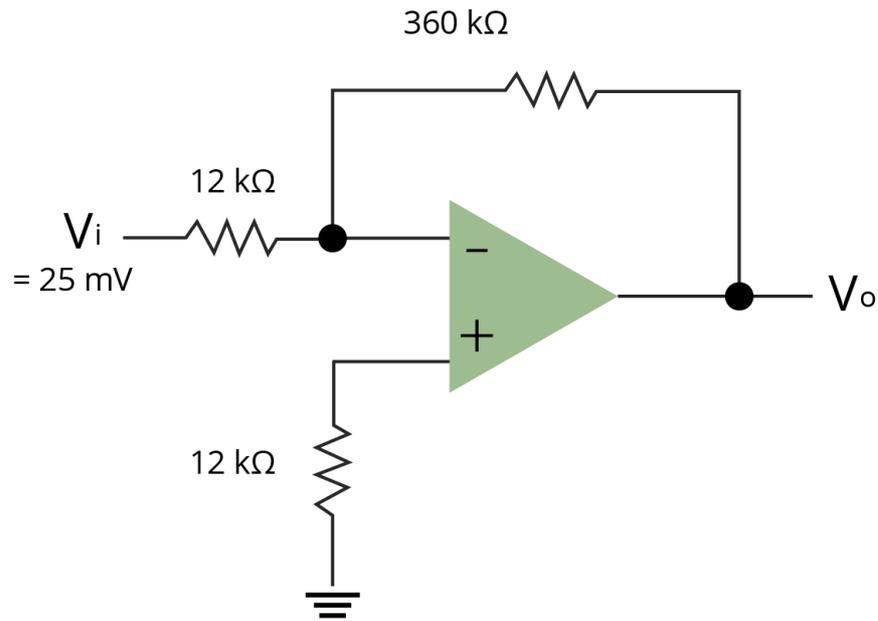
Atividade 05

1. Utilizando o dado da taxa de subida fornecido no Quadro 2, calcule qual o máximo ganho de malha fechada que pode ser utilizado para que não haja deformação da saída, dada uma entrada com variação de 1 V em 40 μ s.

Determinando características de um circuito

Para exemplificar o cálculo de alguns parâmetros de um circuito com amp-op real, utilizaremos o circuito ilustrado pela Figura 9 e as características apresentadas no Quadro 2.

Figura 09 - Circuito amp-op.



Ganho de malha fechada A_{CL} :

$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{360k\Omega}{12k\Omega} = -30 \cong \frac{1}{\beta}$$

Impedância de entrada Z_i :

$$Z_i = R_1 = 12k\Omega$$

Máxima frequência permitida para o sinal de entrada $V_i = 25\text{mV}$. Primeiro, calcula-se o fator de ganho da saída:

$$K = |A_{CL} \cdot V_i| = 30 \cdot (25\text{mV}) = 750\text{mV} = 0,75\text{V}$$

Agora, utiliza-se o fator K calculado na equação:

$$f_{max} = \frac{SR}{2 \cdot \pi \cdot K} = \frac{0,5/\mu s}{2 \cdot \pi \cdot (0,75V)} = 106kHz$$

Comentários adicionais

Além de quadros, é comum encontrar no manual de um amp-op alguns gráficos contendo curvas de desempenho típicas comparando várias características em função da fonte de tensão.

Curiosidade: você deve estar se perguntando por que, em várias partes do texto, a tensão aparece com o símbolo \pm . Trata-se de tensão simétrica. Ou seja, a fonte de tensão possui três fios: um positivo, um GND (neutro ou 0 V) e outro negativo. Quando dizemos ± 12 V, por exemplo, estamos dizendo que a fonte possui um fio de +12 V, outro de 0 V e outro de -12 V.

E será que sempre que formos utilizar um amp-op é necessário utilizar uma fonte simétrica? Não. Nem sempre. Acontece que algumas configurações do amp-op invertem a polaridade da tensão (amplificador inversor, por exemplo) e, para que isso aconteça, é necessário utilizar uma fonte simétrica para obter a tensão negativa.

Via de regra deve-se alimentar um amp-op com fonte simétrica sempre que o circuito exigir tensão negativa, todavia, se esse não for o caso, é suficiente alimentar com uma fonte simples. De qualquer forma, antes de utilizar o CI é sempre bom ler o manual, pois ele possui as informações necessárias à utilização do CI.

Nesta aula, finalizamos o estudo dos amplificadores operacionais conhecendo as especificações desse componente. Aprendemos que essas informações encontram-se nos manuais dos fabricantes, assim como as observações sobre quais são as mais importantes, o que significam e como devemos utilizá-las em nossos projetos.

Leitura Complementar

Sinais analógicos

http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal_anal%C3%B3gico

Encontra-se neste site a definição de sinais analógicos, dispositivos analógicos, e exemplos reais de aparelhos e aplicações que utilizam estes sinais.

Sinais digitais

<http://www.cgrbrasil.com.br/artigos/diferenca-entre-sinal-digital-e-analogico/>

Apresenta a definição de sinal digital e sua diferenciação em relação ao sinal analógico.

Conversão entre sistemas numéricos

http://pt.wikipedia.org/wiki/Convers%C3%A3o_entre_sistemas_num%C3%A9ricos

Explica os cálculos necessários para converter números entre os sistemas binários, decimal, octal e hexadecimal.

<http://eltiger.wordpress.com/2011/10/08/macete-dos-alunos-conversao-binaria-para-decimal-e-vice-versa-sem-o-uso-de-muitos-calculos-matematicos/>

Ensina procedimentos mais simples para conversão de números entre o sistema decimal e binário.

Resumo

Nesta aula, concluímos o estudo de alguns circuitos, nos quais são utilizados os amplificadores operacionais. Iniciamos apresentando o buffer, ou seguidor unitário, ilustrando seu circuito e explicando suas características. O mesmo foi realizado com os amplificadores somador, capaz de somar sinais de entrada diferentes, e o diferencial ou subtrator, que realiza a subtração das entradas. Estudamos ainda, a aplicação de um circuito amplificador somador em um conversor D/A.

Também vimos nesta aula, o estudo dos amplificadores operacionais conhecendo as especificações desse componente. Aprendemos que essas informações encontram-se nos manuais dos fabricantes, assim como as observações sobre quais são as mais importantes, o que significam e como devemos utilizá-las em nossos projetos.

Autoavaliação

1. Qual o papel da faixa de tensão de entrada de modo-comum em um amplificador operacional?
2. Defina *overshoot*.
3. Consulte a tabela e determine qual o *overshoot* para o CI LM741.
4. Explique o uso do símbolo \pm nos manuais dos amplificadores operacionais.
5. Qual o papel do parâmetro **fonte de corrente**? Explique sua importância em relação ao projeto, utilizando, para isso, amplificadores operacionais.
6. O que é um circuito buffer? Explique sua função e seu circuito.
7. Como funciona o amplificador somador?
8. Descreva o amplificador subtrator.
9. O que é um conversor D/A e pra que ele serve?

10. Explique qual circuito apresentado nesta aula foi utilizado no conversor D/A.

Referências

AMPLIFICADORES Operacionais (Amp Ops). Disponível em: . Acesso em: 20 jun. 2014.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

MANUAL do Fabricante. 2000. Disponível em: . Acesso em: 25 jul. 2014.

SILVA, Fabiano da. **Eletrônica 2 - amplificador operacional 1**. [20--]. Disponível em: . Acesso em: 25 jul. 2014.

WENDLING, Marcelo. **Amplificadores Operacionais**. Guaratinguetá: UNESP, 2010. Disponível em: . Acesso em: 20 jun. 2014.