

MEDIDAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Sidney Cerqueira Bispo dos Santos



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS



Amplificadores operacionais

Objetivos de aprendizagem

Ao final deste capítulo, você deve apresentar os seguintes aprendizados:

- Descrever as características dos retificadores e amplificadores operacionais.
- Diferenciar conversores analógicos de tensão/corrente dos de corrente/tensão.
- Compreender as técnicas de medição.

Introdução

A maioria dos circuitos integrados consiste primariamente de circuitos básicos conectados de forma a executarem uma determinada função desejada. Enquanto a quantidade desses circuitos é extremamente extensa e as aplicações limitadas, existem alguns circuitos padrão que possuem aplicações bastantes extensas. Os amplificadores operacionais fazem parte desse tipo de circuitos. A quantidade de aplicações utilizando esses amplificadores é imensa, passando por amplificadores inversores, diferenciais, seguidores de tensão, integradores e diferenciadores, entre outros.

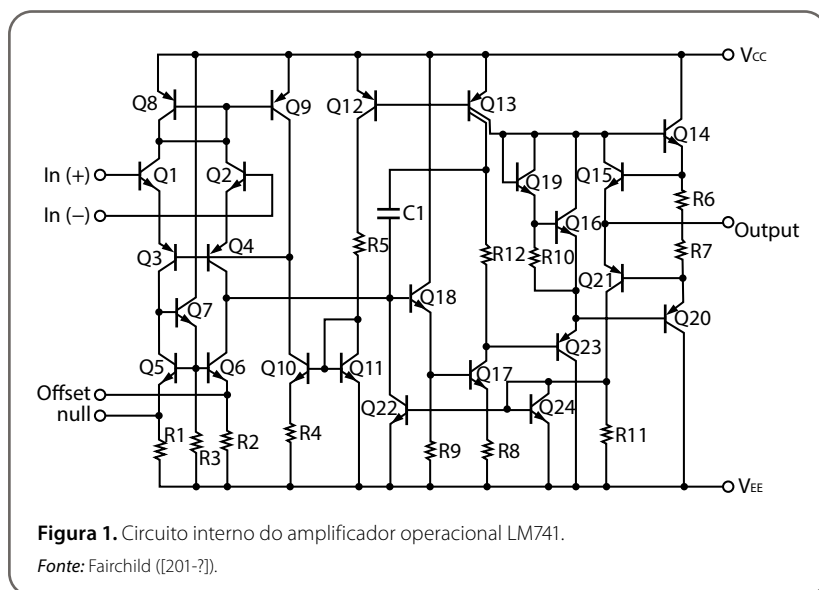
Devido às suas características e aplicações, as medidas dos parâmetros elétricos desses dispositivos exigem o conhecimento do seu funcionamento e dos cuidados necessários à realização das mesmas.

Neste capítulo, você vai aprender a descrever as características dos amplificadores operacionais e retificadores, a diferenciar conversores analógicos de tensão/corrente dos de corrente/tensão e explicar as técnicas de medição que estão envolvidas nos amplificadores operacionais.

Amplificadores operacionais

Os amplificadores operacionais (Amp Op) são componentes muito úteis no projeto de uma infinidade de equipamentos eletrônicos e elétricos. O seu entendimento completo exige a compreensão e o conhecimento de diversos dispositivos, como diodos e transistores. Entretanto, podemos analisar o funcionamento e o emprego desses amplificadores como um bloco construtivo, analisando apenas os seus terminais de entrada e saída e combinando-se, em seguida, com outros elementos para obter a função desejada: multiplicador, somador, subtrator, inversor, integrador, diferenciador e retificador, dentre outras.

Para efeito de entendimento do que está por dentro do amplificador operacional, mostramos na Figura 1 os componentes de um Amp Op (LM741 – Fairchild Semiconductor Datasheet).



A abordagem do bloco construtivo considera o Amp Op como uma caixa preta e permite analisar apenas as tensões e correntes em seus terminais, satisfazendo-se determinadas restrições. Nessa abordagem, não interessam a estrutura interna do amplificador, nem as correntes, nem as tensões existentes nelas.

No final da década de 1960, foi apresentado pela Fairchild Semiconductor um amplificador operacional que se tornou o mais aceito pelo mercado, o $\mu A741$, onde o μ significa microcircuito. Esse Amp Op pode vir em encapsulamentos diversos, tais como *Maetal Can Package*, *Ceramic Dual-In-Line Package*, *Dual-In-Line* ou *S. O. Package* ou *Ceramic Flatpak*. Em nossa abordagem, apresentaremos o encapsulamento DIP de oito terminais.



Saiba mais

DIP significa *Dual In-Line Package*, que é um tipo de encapsulamento retangular em que o número de terminais em ambos os lados é igual e eles estão alinhados.

A Figura 2 mostra como os terminais estão dispostos. Os mais importantes são os pinos 2 (entrada inversora), 3 (entrada não inversora), 4 (negativo da fonte de alimentação), 6 (saída) e 7 (positivo da fonte de alimentação).

Os terminais 1 e 5 são utilizados para indicação de desvio nulo (*offset*) e só são utilizados quando necessário (isso será abordado mais à frente) e o pino 8 não está conectado internamente a nenhuma parte do circuito, ou seja, ele não é utilizado.

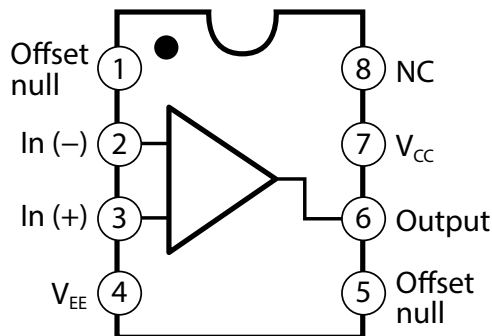
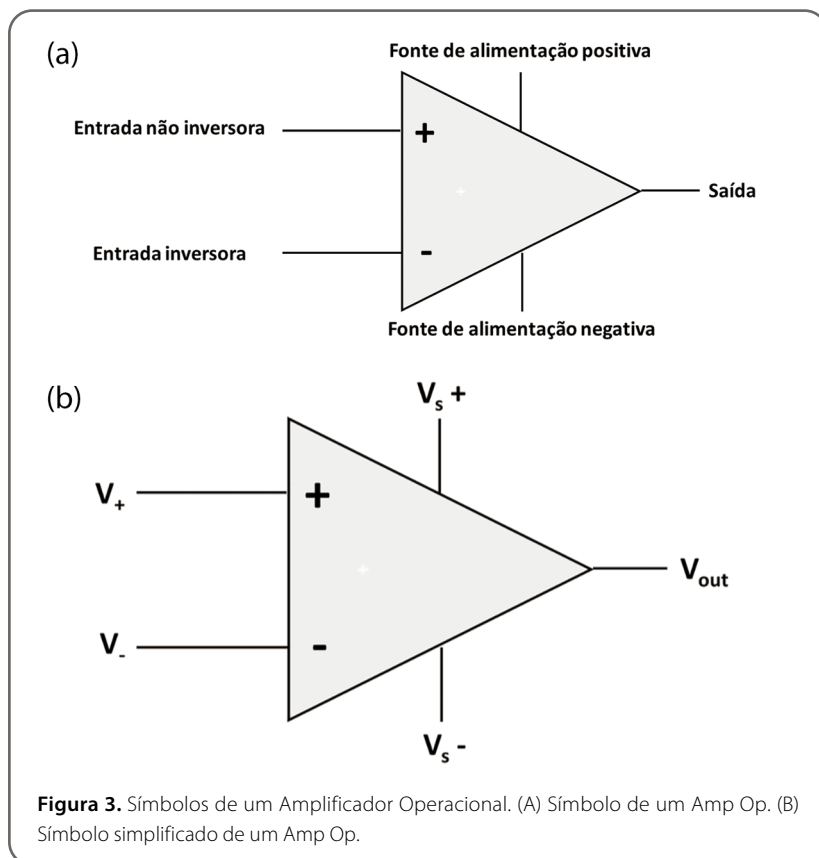


Figura 2. Encapsulamento DIP do amplificador operacional LM741.

Fonte: Fairchild ([201-?]).

Os Amp Op são analisados utilizando o diagrama esquemático mostrado na Figura 3. A Figura 3a mostra o símbolo de um Amp Op com a identificação das alimentações, das entradas e da saída. A Figura 3b mostra o símbolo simplificado mostrando os pinos de maior interesse. Na grande maioria das vezes, simplifica-se mais ainda, mostrando os terminais referentes às fontes de alimentação (V_s^+ e V_s^-) somente quando necessário.



A Figura 4 mostra as tensões e correntes nos terminais do Amp Op com seus sinais e sentidos de referência. Note que todas as correntes entram no amplificador. V_p , V_n e V_o são as tensões entre os terminais e o nó de referência. V_+ e V_- são as tensões positiva e negativa fornecidas pelas fontes. V_{CC} , I_p , I_n , I_o , I_{C+} e I_{C-} são as correntes nos cinco terminais mostrados.

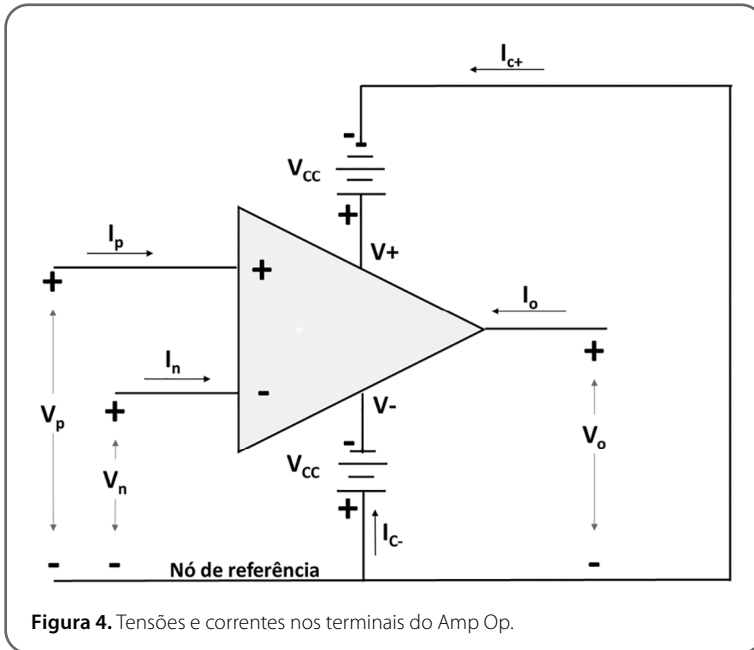


Figura 4. Tensões e correntes nos terminais do Amp Op.

No amplificador operacional, a saída V_o varia de acordo com as tensões nos terminais da entrada, V_p e V_n . Entretanto, existem algumas restrições que regulam o seu comportamento. Se o módulo de $V_p - V_n$ é pequeno, V_o será uma função linear das tensões de entrada. Se o módulo de V_p for grande, a saída ficará saturada e o relacionamento entre a entrada e a saída será não linear.



Fique atento

Quando o amplificador operacional funcionar linearmente, sua tensão de saída V_o será igual à uma constante de multiplicação A , chamada de ganho, vezes a diferença entre suas tensões de entrada.

A maioria dos Amp Op possui a restrição de que o módulo da diferença entre os terminais das entradas seja menor que 2 mV (NILSSON; RIDEL, 2016, p. 161). Como as tensões de trabalho, normalmente, são bem maiores que essa tensão, na prática, significa exigir, para um amplificador operacional ideal, que

$$V_p = V_n \quad (1)$$

Na prática, isso é conseguido utilizando-se uma realimentação entre a saída e a entrada inversora, chamada de realimentação negativa devido ao fato de que o sinal proveniente da saída será subtraído do sinal da entrada inversora.



Fique atento

Se um circuito contendo um amplificador operacional não fornecer um caminho para a realimentação negativa, geralmente irá funcionar saturado.

Outra restrição existente com relação aos Amp Op é com relação às correntes de entrada. Em um amplificador ideal, a resistência vista dos terminais de entrada é infinita. Na prática, ela é muito grande, da ordem de $1 \text{ M}\Omega$ ou maior. Isso nos permite considerar que as correntes de entrada sejam quase zero, ou seja,

$$i_p = i_n = 0 \quad (2)$$

Considerando o Amp Op um nó, pelas leis de Kirchhoff sabemos que a soma das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem de um nó, assim:

$$i_p + i_n + i_0 + i_{c+} + i_{c-} = 0$$

Utilizando o resultado da equação (2), temos que

$$i_0 = -(i_{c+} + i_{c-}) \quad (3)$$

Vamos agora analisar algumas configurações básicas em que os Amp Op são utilizados.

Circuito Amplificador Inversor

A Figura 5 apresenta um circuito amplificador inversor. Esse circuito utiliza um Amp Op, os resistores R_s e R_f e uma fonte de tensão V_s . A entrada não inversora é curto-circuitada com o nó de referência.

Para analisar esse circuito, consideramos um amplificador ideal. Utilizando a lei das correntes de Kirchhoff no nó de entrada, temos

$$i_s + i_f = i_n \quad (4)$$

Como V_p está aterrado e consequentemente possui tensão igual a zero, pela equação (1), concluímos que $V_n = 0$.

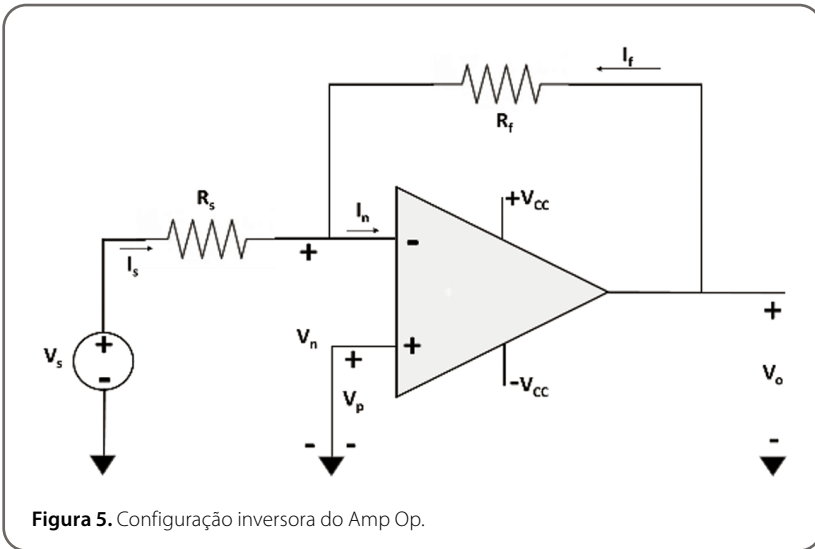


Figura 5. Configuração inversora do Amp Op.

Desse modo, $V_s = R_s \cdot i_s$, e

$$i_s = \frac{V_s}{R_s} \quad (5)$$

E, do mesmo modo,

$$i_f = \frac{V_o}{R_f} \quad (6)$$

Da equação (2) verificamos que $i_n = 0$, assim, substituindo as equações (5) e (6) na equação (4), temos

$$V_o = \frac{-R_f}{R_s} V_s \quad (7)$$

Que é a equação básica do amplificador inversor.

Podemos verificar que a saída do Amp Op será uma versão da entrada, invertida e multiplicada por uma constante (R_f/R_s), que é chamada de ganho.



Fique atento

Essas expressões foram deduzidas considerando-se a hipótese de um amplificador operacional ideal, ou seja, com ganho infinito e resistência de entrada infinita. Contudo, considerando a maioria das aplicações de um amplificador real, elas são aproximações muito boas e são importantes porque indicam que, considerando um ganho muito grande, pode-se especificar o ganho do amplificador operacional inversor escolhendo os valores dos resistores R_f e R_s .

Para que esse Amp Op trabalhe na região linear, será necessário estabelecer as seguintes restrições (NILSSON; RIDEL, 2016, pg. 165):

$$|V_o| \leq V_{cc}, \quad \left| \frac{R_f}{R_s} V_s \right| \leq V_{cc}, \quad \frac{R_f}{R_s} \leq \left| \frac{V_{cc}}{V_s} \right| \quad (8)$$



Exemplo

Vamos, como exemplo, apresentar um projeto de um amplificador operacional inversor usando fontes de 12 V, com um ganho de 10 e utilizando, como referência, a Figura 5.

Como o ganho é 10, temos que escolher resistores cuja razão R_f/R_s seja 10, assim, escolhemos arbitrariamente os valores $R_s = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_f = 10 \text{ k}\Omega$.

Vamos, agora, utilizar a equação (7) como a equação do projeto, ou seja

$$V_o = \frac{-R_f}{R_s} V_s = -10 \cdot V_s$$

Para verificarmos em que faixa de tensão de entrada esse amplificador diferencial trabalhará na região linear, utilizamos os valores de V_{cc} e $-V_{cc}$ do seguinte modo:

$$\begin{aligned} 12 &= -10 V_s & V_s &= -1,2 \text{ V} \\ -12 &= -10 V_s & V_s &= 1,2 \text{ V} \end{aligned}$$

Desse modo, se a tensão de entrada variar entre os limites $-1,2 \text{ V} \leq V_s \leq 1,2 \text{ V}$, o amplificador operacional trabalhará em sua região linear de operação.

Circuito amplificador não inversor

A Figura 6 apresenta um circuito amplificador não inversor. Esse circuito é semelhante ao amplificador inversor, onde a fonte de entrada, em série com um resistor, é ligada no pino não inversor do Amp Op. Considerando o Amp Op um amplificador ideal e trabalhando em sua região linear, podemos utilizar as mesmas hipóteses anteriores, ou seja,

$$V_p = V_s, \quad V_n = V_s \quad \text{e} \quad i_n = i_p = 0 \quad (9)$$

Porque as correntes que entram no Amp OP são nulas.

Assim, podemos utilizar o divisor de tensão para relacionar a tensão de saída com a tensão de entrada.

$$V_n = V_s = \frac{R_s}{R_s + R_f} V_o \quad (10)$$

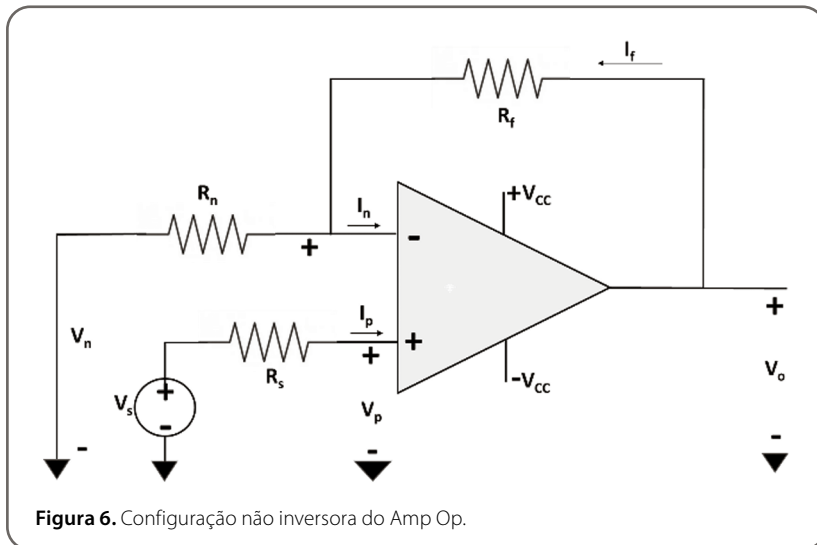


Figura 6. Configuração não inversora do Amp Op.

Colocando V_o em função de V_s , temos

$$V_o = \frac{R_s + R_f}{R_s} V_s \quad (11)$$

Que é a equação do amplificador não inversor. Para que ele trabalhe na região linear, será necessária a seguinte restrição:

$$\frac{R_s + R_f}{R_s} < \left| \frac{V_{CC}}{V_s} \right| \quad (12)$$



Link

Existem muitas outras configurações de Amp Op. Algumas interessantes podem ser vistas em:

<https://goo.gl/k3HiEQ>

Conversores analógicos: tensão/corrente e corrente/tensão

Os Amp Op são muito úteis na construção de uma série de dispositivos em circuitos de instrumentação, como voltímetros AC ou DC, conversores DA ou AD ou de foto conversão, entre outros. Nesta seção abordaremos os conversores.

Muitas vezes, o sinal de entrada que se quer medir está na forma de corrente ou deseja-se que a saída seja em forma de corrente. Nesses casos, conversores de tensão para corrente ou de corrente para tensão devem ser utilizados.

Outra aplicação dos Amp Op como conversores é a sua utilização para gerar fontes controladas. Pode-se utilizar uma tensão na entrada para controlar uma corrente ou uma tensão na saída, ou usar uma corrente na entrada para controlar uma corrente ou tensão na saída. Vamos analisar, a seguir, dois tipos de conversores, o conversor tensão/corrente e o conversor corrente/tensão.

Conversor tensão/corrente

Existem diversos dispositivos de automação em que a aquisição de dados é efetuada no modo corrente. Entretanto, diversos dispositivos entregam, nas suas saídas, tensões. Assim, haverá a necessidade utilizar um circuito para fazer a transformação das tensões entregues em correntes. Em outros casos, queremos que uma corrente na saída seja controlada por uma tensão na entrada.

A Figura 7 apresenta o circuito que fará a conversão. Efetuando as mesmas considerações anteriores sobre funcionamento na região linear e amplificador ideal, temos que $V_n = V_s$; assim, utilizando o divisor de tensão, temos:

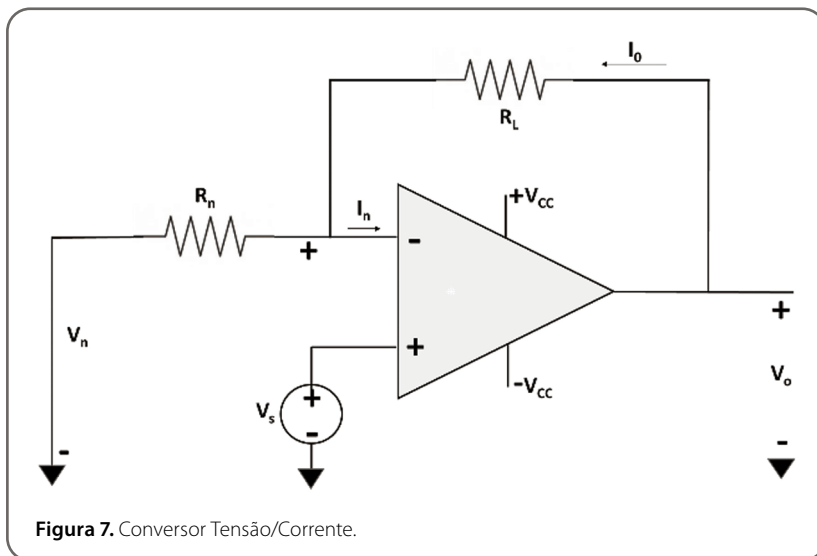
$$V_n = V_s = \frac{R_n}{R_n + R_L} V_o \quad (13)$$

Colocando V_o em função de V_s , temos:

$$V_o = \frac{R_n + R_L}{R_n} V_s \quad (14)$$

Como $i_o = -\frac{V_o}{R_n + R_L}$, temos que:

$$V_o = -(R_n + R_L) i_o \quad (15)$$



Substituindo (15) em (14), obtemos

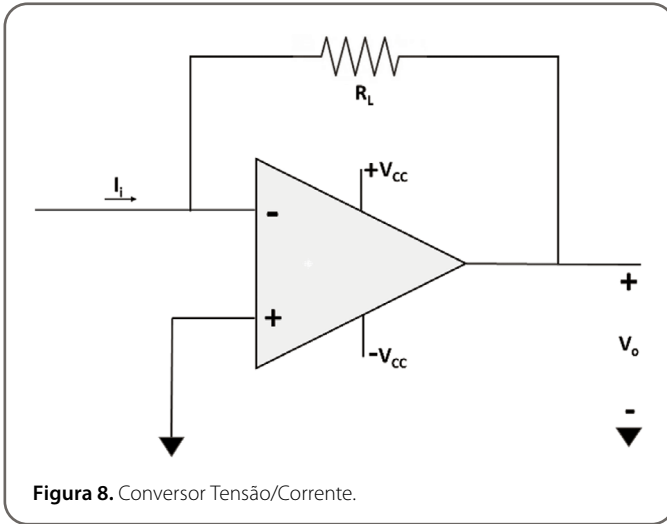
$$i_o = -\frac{V_s}{R_n}$$

Assim, a corrente de saída i_o , no resistor de carga R_L , é controlada pela tensão de entrada V_s .

Conversor corrente/tensão

Da mesma forma que existem diversos dispositivos cuja aquisição de dados é efetuada no modo corrente, existem aqueles que efetuam no modo tensão. Entretanto, diversos dispositivos entregam, nas suas saídas, correntes. Assim, haverá a necessidade utilizar um circuito para fazer a transformação das correntes entregues em tensões. Em outros casos, queremos que uma tensão na saída seja controlada por uma corrente na entrada.

A Figura 8 apresenta o circuito que fará a conversão. Efetuando as mesmas considerações anteriores sobre funcionamento na região linear e amplificador ideal, aplicando as leis das malhas, temos



$$V_o = -R_L \cdot I_i \quad (15)$$

Assim, a tensão de saída V_o , no resistor de carga R_L , será controlado pela corrente de entrada I_i .

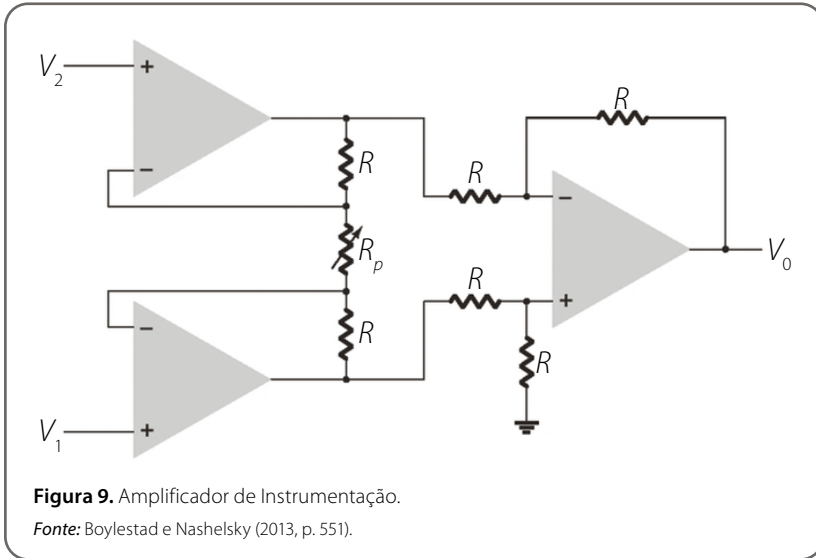
Amplificadores operacionais utilizados em técnicas de medição

O amplificador operacional é um dos circuitos integrados mais flexíveis, com uma enorme quantidade de empregos. Nos dispositivos de medição, eles são encontrados em multímetros, conversores, geradores de sinais, retificadores, filtros e numa série de equipamentos de laboratório.

Vamos, a seguir, examinar três arquiteturas muito importantes.

Amplificador de instrumentação

Uma configuração que é muito utilizada e bastante importante na amplificação de pequenos sinais é o amplificador de instrumentação, mostrado na Figura 9. Ele garante, nas duas entradas não inversoras V_1 e V_2 , uma impedância muito grande e também, nas entradas inversoras. O resistor R_p controla o ganho do circuito.



Pode ser mostrado (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010, p. 117) que a tensão de saída dessa configuração é dada por:

$$V_0 = \left(1 + \frac{2R}{R_p}\right) (V_1 - V_2) = k (V_1 - V_2) \quad (16)$$

Onde o k é o ganho que pode ser obtido pela escolha do valor de R e regulado pelo resistor variável R_p .

Esse tipo de configuração, por ser bastante utilizado, é comumente encontrado em encapsulamentos integrados, como por exemplo, o AD620. Entretanto, existem diversos outros tipos, com características e encapsulamentos diferentes, que podem ser empregados nas variadas aplicações.

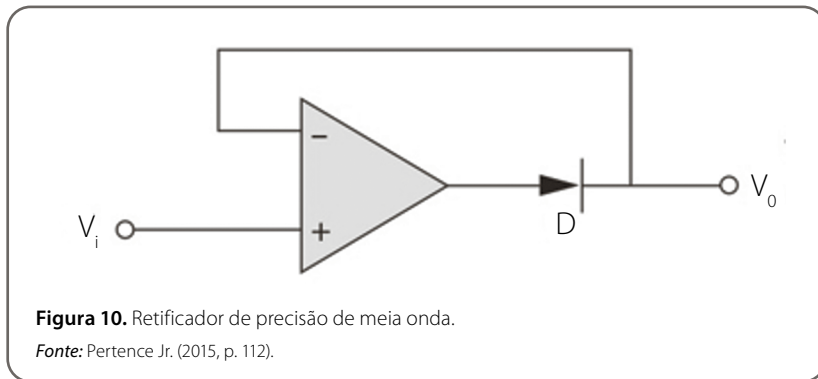
Retificador de precisão de meia onda

Fontes de alimentação CC normalmente utilizam circuitos de retificação para transformar a entrada CA em saída CC. Essas fontes, geralmente, trabalham com tensões em que se pode desprezar a queda de tensão nos diodos.

Quando se precisa de retificação em circuitos de instrumentação, a maioria das vezes, existe a impossibilidade da utilização dos circuitos convencionais devido à baixa amplitude dos sinais, além da necessidade de precisão nas medidas. Por exemplo, um diodo possui tensão de polarização em torno de 0,7 V, ou seja, abaixo dessa tensão, ele não conduz. Então, como retificar sinais muito pequenos, da ordem de milivolts?

A solução é a utilização de uma combinação de diodos com Amp Op para se implementar diversos retificadores de precisão.

A Figura 10 apresenta um tipo de retificador de precisão de meia onda, chamado de superdiodo.



Quando V_i é negativo, o diodo não conduz e a alta resistência de entrada do Amp Op torna a entrada isolada da saída. Quando V_i é positivo, o diodo conduz e uma carga na saída apresentará uma tensão V_o . Isso porque a realimentação negativa provoca um curto-circuito na entrada e a tensão no terminal negativo, que é a tensão de saída, será também V_i , assim, $V_o = V_i$ durante todo o ciclo positivo, com uma pequena diferença de milivolts ou microvolts, dependendo da qualidade do Amp Op utilizado.

Esse retificador possui uma fragilidade no ciclo negativo, pois toda a tensão estará entre os dois terminais de entrada. Então, é importante a colocação de um circuito de proteção de excesso de tensão.

Existem outros retificadores de meia onda que não possuem essa desvantagem e que podem ser encontrados na literatura. Entretanto, um dos retificadores mais utilizados é o retificador de precisão de onda completa, que será apresentado a seguir.

Retificador de precisão de onda completa

A Figura 11 apresenta um dos tipos de circuito retificador de precisão de onda completa. Pode-se notar que ele é bem mais complexo do que o retificador de precisão de meia onda.

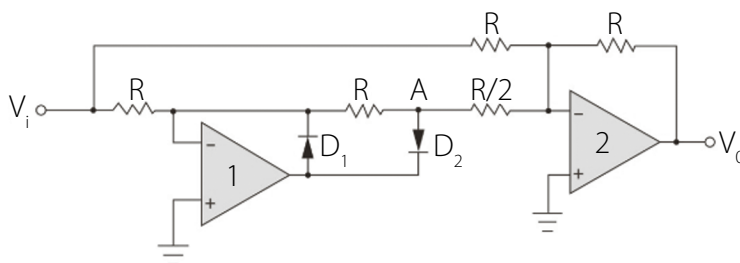


Figura 11. Retificador de precisão de meia onda.

Fonte: Pertence Jr. (2015, p. 113).

Uma análise mais detalhada desse circuito mostrará que ele é uma combinação de um retificador de meia onda (Amp Op 1) seguido de um circuito somador (Amp Op 2) (PERTENCE, 2015, p. 46 e 113). Se for colocada uma ponta de prova de um osciloscópio no ponto A, será verificado um sinal de meia onda. Esse sinal, somado com a entrada, no Amp Op 2, mostrará um sinal de onda completa na saída, já que no semiciclo negativo da entrada, o sinal no ponto A será nulo.

Existem diversos outros circuitos bastante interessantes e com uma enorme possibilidade de aplicações práticas que devem ser exploradas e podem ser encontradas nas bibliografias indicadas nesta unidade.



Referências

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e fundamentos de medidas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v. 1.

BOYLESTAD, R. L.; NASHIELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

FAIRCHILD. *Fairchild semiconductor*. [201-?]. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/53589/FAIRCHILD/LM741.html>>. Acesso em: 28 maio 2018.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos elétricos*. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

PERTENCE JR., A. *Amplificadores operacionais e filtros ativos*. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. (Série Tekne).

Leituras recomendadas

AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de instrumentação*. São Paulo: Pearson, 2013.

DUNN, W. C. *Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos*. Porto Alegre: Bookman, 2007.

FRANCHI, C. M. *Instrumentação de processos industriais: princípios e aplicações*. São Paulo: Érica; Saraiva, 2015.

MALVINO, A. *Eletrônica: diodos, transistores e amplificadores*. 7. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2011. (Série Tekne).

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.

Conteúdo:



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS