

ELETRÔNICA II

Karina de Oliveira Alves de Moura



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS



Somadores e diferenciadores

Objetivos de aprendizagem

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

- Analisar circuitos somadores.
- Descrever circuitos subtratores.
- Explicar circuito diferenciador.

Introdução

O amplificador operacional (AmpOp ou AOP) é um elemento de circuito ativo de fundamental importância por ser um componente básico dos circuitos. O AmpOp é capaz de adicionar, subtrair, amplificar, integrar, diferenciar sinais, entre muitas outras funções. Existem três modos de operação para o AmpOp: sem realimentação, realimentação positiva e realimentação negativa. O modo de realimentação negativa é o mais utilizado. Duas aplicações são o amplificador somador e diferenciador. De forma geral, o amplificador somador tem a finalidade de somar dois ou mais sinais de entradas analógicas ou digitais. O amplificador diferenciador realiza a operação matemática da diferenciação. Ele produz uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada.

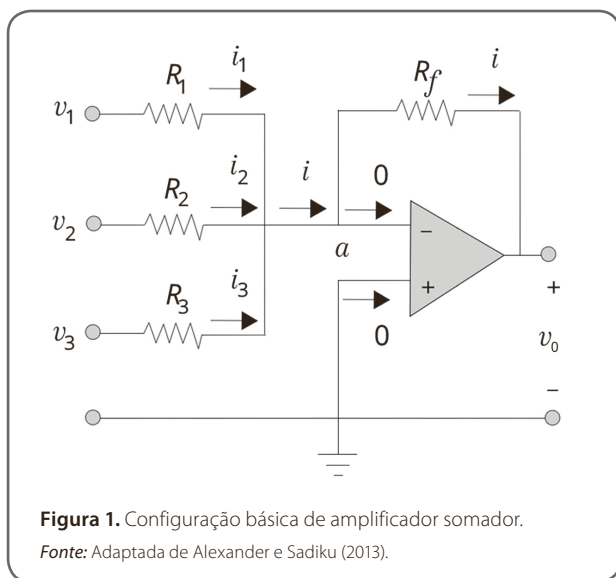
Neste capítulo, você vai estudar como analisar e reconhecer circuitos com amplificadores em configuração somador, subtrator e diferenciador. Além de conhecer algumas de suas aplicações, você vai estudar a importância dos amplificadores diferenciadores.

Somando sinais com amplificador operacional

Um amplificador somador é um circuito com AmpOp que combina várias entradas e produz uma saída que é a soma ponderada das entradas. O amplificador somador é uma variação do amplificador inversor, a qual possibilita manipular diversas entradas ao mesmo tempo. Os amplificadores somadores nos permitem somar n diferentes tensões obtendo na sua saída o resultado da operação. A extremidade oposta do resistor conectado à entrada inversora é mantida em terra virtual pela realimentação, portanto, adicionar novas entradas não afeta a resposta das entradas existentes.

A configuração básica do AmpOp somador é mostrada na Figura 1. Considerando que a corrente que entra em cada entrada é zero em um AmpOp ideal, aplica-se a lei de Kirchhoff de corrente no nó a (equação 1) (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (1)$$



E pode-se dizer que as correntes dos circuitos são encontradas por meio da equação 2:

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{v_a - v_o}{R_f} \\
 i_1 &= \frac{v_1 - v_a}{R_1} \\
 i_2 &= \frac{v_2 - v_a}{R_2} \\
 i_3 &= \frac{v_3 - v_a}{R_3}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Como $v_a = 0$ e substituindo a equação 2 na equação 1, obtém-se (equação 3):

$$v_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 \right) \tag{3}$$

A equação 3 indica que a tensão de saída é uma soma ponderada e invertida das entradas de sinal. Por essa razão, a denominação de circuito somador. A tensão de saída desse circuito é a soma algébrica das tensões aplicadas às entradas, multiplicada pelo ganho que é dado pela relação das resistências.

Caso todos os resistores das entradas sejam selecionados com o mesmo valor de resistência, é obtida uma equação simplificada (equação 4):

$$v_o = - \frac{R_f}{R} (v_1 + v_2 + v_3) \tag{4}$$



Exemplo

Considere a Figura 1, onde $R_f = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ e $R_3 = 12 \text{ k}\Omega$. Qual seria a tensão de saída para a entrada das tensões $v_1 = 5 \text{ V}$, $v_2 = 2 \text{ V}$ e $v_3 = 1 \text{ V}$?

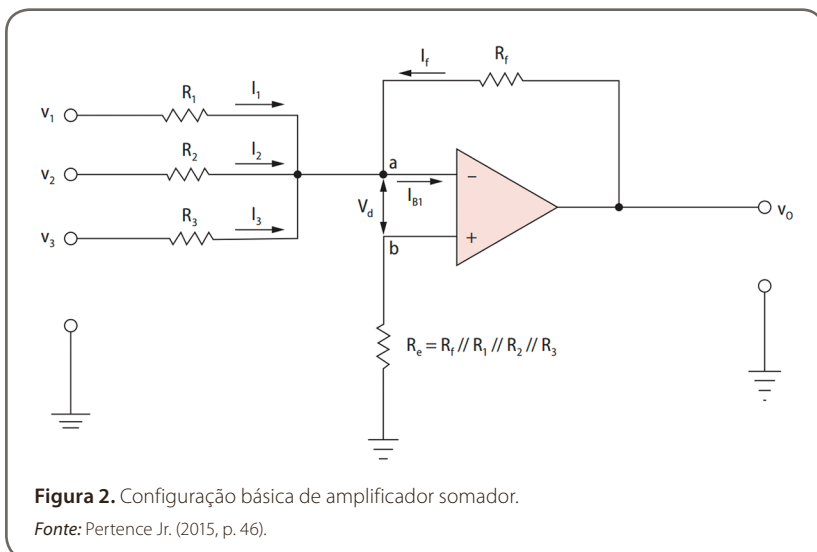
A tensão de saída conforme a equação 3 é:

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3\right) = -\left(\frac{10}{5} 5 + \frac{10}{10} 2 + \frac{10}{12} 1\right) \cong 12,8 \text{ V}$$

Assim, o amplificador somador pode ser expandido, de forma a considerar mais entradas que o exemplo de três tensões na Figura 1. Podem ser somadas duas, três, quatro ou mais entradas. É possível ajustar, individualmente, cada entrada de forma ponderada, selecionando os resistores de entrada e o resistor de realimentação, ou trabalhar com todas com o mesmo peso.

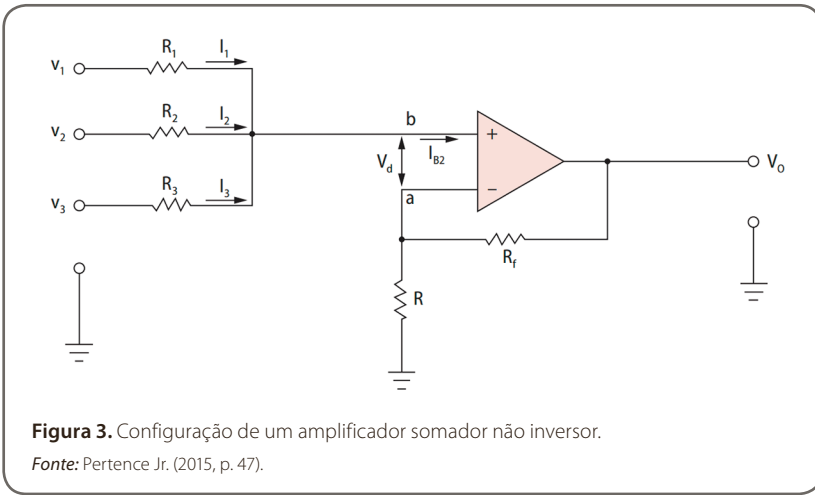
Para minimizar a tensão de *offset*, pode ser utilizado um resistor de equalização R_e , demonstrado na Figura 2. O valor ideal dessa resistência é obtido pelo valor das resistências em paralelo, conforme a equação 5:

$$R_e = R_f // R_1 // R_2 // R_3 \quad (5)$$



Ainda pode ser utilizado um caso de amplificador somador especial, em que a tensão de saída não sofre inversão. Na Figura 3, é apresentado um amplificador somador não inversor. Aplicando a lei de Kirchhoff de corrente no nó b , é obtida a seguinte relação (equação 6) (PERTENCE JR., 2015):

$$\frac{v_1 - v_b}{R_1} + \frac{v_2 - v_b}{R_2} + \frac{v_3 - v_b}{R_3} = 0 \quad (6)$$



Isolando v_b , é obtida a equação 7:

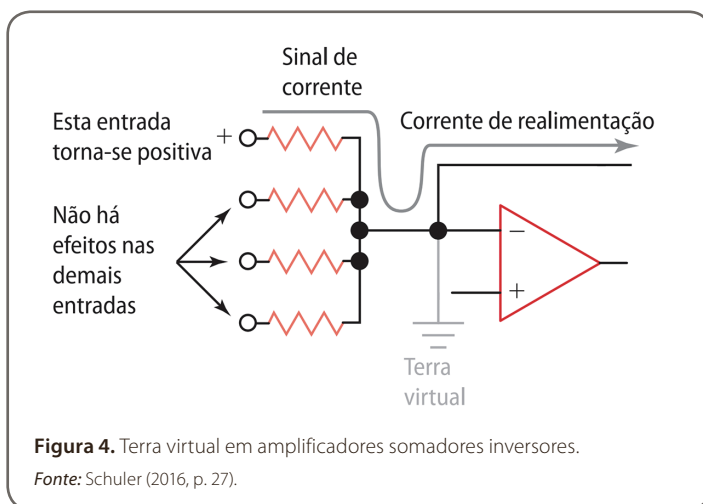
$$v_b = \frac{\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad (7)$$

A tensão de saída v_o do amplificador não inversor se relaciona com os resistores R e R_f e a tensão v_b , conforme a equação 8:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) v_b \quad (8)$$

Para os sinais alternados, como sinais senoidais, são apresentadas variações de amplitudes em função do tempo. Para encontrar a forma de onda na saída, é necessário calcular a tensão em cada instante de tempo. Nesses casos, o uso de ferramentas computacionais na simulação dos circuitos torna-se um grande aliado aos projetistas, principalmente se as frequências dos sinais somados forem diferentes.

Os amplificadores somadores também podem ser chamados de *mixers* (misturadores) (SCHULER, 2016). Um exemplo de utilização é a soma da saída de quatro microfones durante uma sessão de gravação. A ausência de interação entre as entradas é uma vantagem dos *mixers* de áudio inversores, a qual evita que um determinado sinal de entrada apareça nas demais. Essa característica de isolamento é devida ao terra virtual dos amplificadores inversores, como ilustrado na Figura 4.



O conversor digital-analógico (DAC) é uma aplicação do amplificador somador inversor. Esse circuito tem como objetivo transformar sinais digitais na forma analógica. É também conhecido como escala binária ponderada, em que os *bits* são ponderados de acordo a sua posição ocupada (ALEXANDER; SADIKU, 2013).



Fique atento

Para os DACs, cada *bit* menos significativo deve ter a metade do peso do *bit* mais significativo seguinte pelo valor decrescente de R_f/R_n .

Operação de subtração

Subtração é uma operação matemática da remoção de um valor numérico por outro valor numérico, em outras palavras, uma ou mais quantidades são retiradas de outra, e o valor restante é o resultado dessa operação. O amplificador em configuração subtrator tem como finalidade amplificar a diferença entre dois sinais ou entre um e outros sinais. Os amplificadores subtratores podem ser usados quando se deseja remover um sinal indesejado de outro, como um ruído ambiente ou até uma correção de *offset* para que o centro da faixa dinâmica do sinal amplificado coincida com o centro da faixa dinâmica de entrada do DAC. Esses amplificadores são uma combinação do amplificador inversor com o amplificador não inversor. A configuração básica do amplificador subtrator é apresentada na Figura 5.

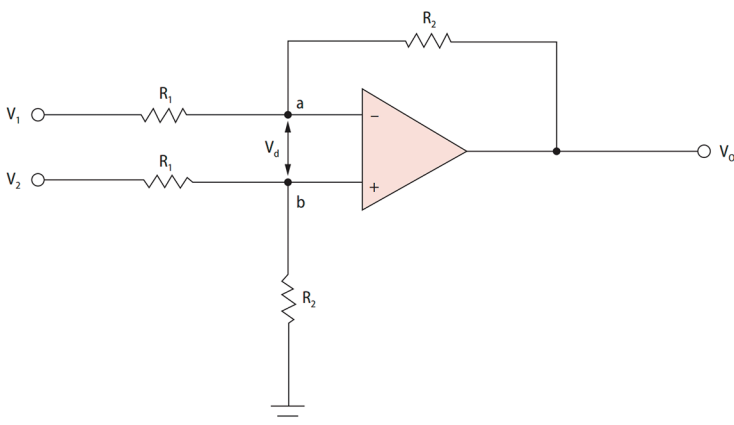


Figura 5. Configuração básica de um amplificador subtrator.

Fonte: Pertence Jr. (2015, p. 48).

Considerando que, idealmente, as correntes de entrada no amplificador são nulas, aplica-se a lei de Kirchhoff de corrente no nó a (equação 9) (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$\frac{v_1 - v_a}{R_1} = \frac{v_a - v_o}{R_2} \quad (9)$$

Isolando a tensão de saída na equação 9, é obtida a seguinte equação 10:

$$v_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) v_a - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (10)$$

Analisando o nó b com a lei de Kirchhoff de corrente, obtém-se (equação 11):

$$\frac{v_2 - v_b}{R_1} = \frac{v_b - 0}{R_2} \quad (11)$$

Isolando a tensão v_b na equação 11, é obtido (equação 12):

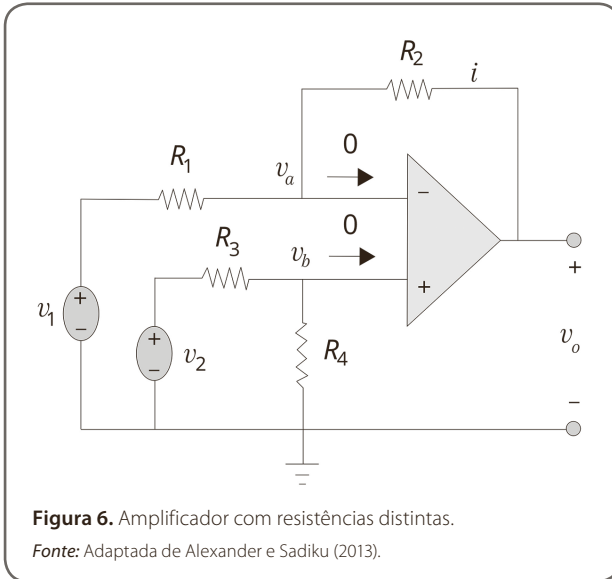
$$v_b = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_2 \quad (12)$$

Como $v_a = v_b$ pela propriedade de curto-circuito virtual, substitui-se a equação 12 na equação 10, obtendo (equação 13) (PERTENCE, 2015):

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (13)$$

Para o amplificador subtrator, as resistências relacionadas a cada entrada podem ser distintas, como na Figura 6, nesse caso, a tensão de saída seria obtida por meio da equação 14 (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$v_o = \frac{R_2(1 + R_1/R_2)}{R_1(1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (14)$$



É possível adicionar mais entradas na parte inversora do amplificador subtrator, como no amplificador somador. Entretanto, pode haver apenas uma entrada não inversora. Se for necessário somar várias entradas não inversoras com várias entradas inversoras, utiliza-se dois estágios inversores, um para somar as entradas não inversoras e outro para subtrair esse sinal com as entradas inversoras.

Outro cuidado necessário quanto ao projeto do circuito é não causar a saturação do AmpOp, ou seja, a tensão de entrada tem que ser elevada o suficiente para que a tensão de saída seja limitada pela tensão de alimentação. Existe outra maneira interessante de analisar essa configuração, que é por meio do teorema de superposição. Esse teorema pode ser usado para resolver circuitos com arranjos adversos.



Saiba mais

Aprofunde o seu estudo em AmpOps por meio do teorema de superposição no capítulo 4 de *Análise e projeto de circuitos elétricos lineares* (THOMAS; ROSA; TOUSSAINT, 2011)

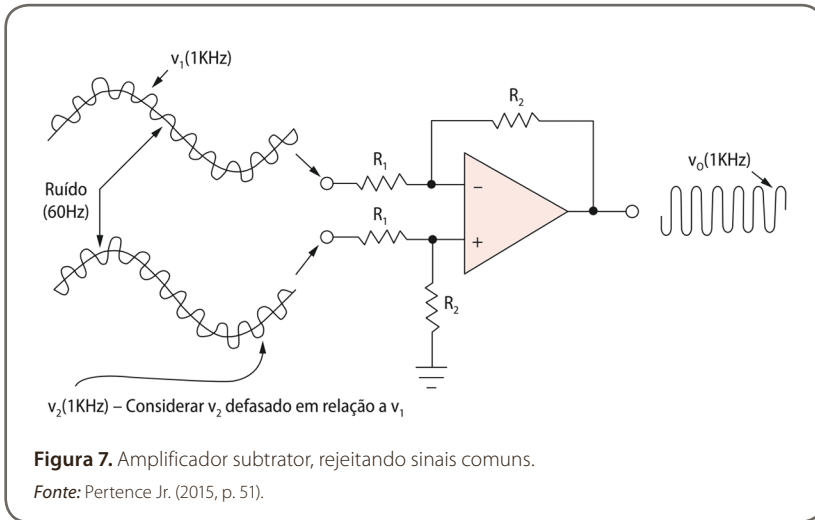
Outra variação especial dessa configuração é a aplicação quando há a necessidade de amplificar apenas a diferença entre dois sinais de entrada. A principal característica de interesse para essa configuração é rejeitar os sinais comuns das duas entradas, ou seja, a rejeição de sinais que estejam presentes em ambas as entradas do AmpOp. Diferentemente do que foi visto anteriormente com amplificador subtrator, o caso especial de rejeição de sinais comuns entre duas entradas deve apresentar $v_o = 0$ quando as entradas forem iguais ($v_1 = v_2$), ou seja, deve ser obedecida a seguinte relação para as resistências de entrada, como visto na Figura 6 (equação 15):

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (15)$$

Assim, a resposta em tensão é sempre dada pela equação 13. O amplificador subtrator nessa configuração nada mais é que a base do amplificador de instrumentação, os quais possibilitam aplicações mais restritas. No entanto, os amplificadores de instrumentação têm a capacidade de desempenhar sua função com resultados superiores em comparação a um amplificador subtrator. De forma geral, o amplificador subtrator é para aplicações gerais e flexíveis. Já o amplificador de instrumentação atua somente como amplificador em faixas específicas e bem delimitadas de ganho.

Como exemplo de aplicação, quando temos um circuito próximo a uma fonte de ruído qualquer, os sinais de entrada são afetados por estes, tendo o ruído sobreposto ao sinal. A rejeição desse ruído é devida à característica de configuração de rejeição a sinais de modo comum (*common mode rejection* – CMR) da configuração. No entanto, não confunda com a taxa de rejeição de modo comum (*common mode rejection ratio* – CMRR), este é um parâmetro que representa a habilidade de um modelo de AmpOp em apresentar tensão de saída nula quando aplicada a mesma tensão nos dois terminais de entrada. Na prática, um AmpOp de alta qualidade apresenta o CMRR de 100 dB no mínimo, podendo citar como exemplo o LM725 e o LH0036 da National Semiconductors, amplificadores de instrumentação. Para amplificador subtrator, em razão da utilização de componentes discretos externos, a rejeição a sinais de modo comum não funciona tão bem quanto os amplificadores de instrumentação, o qual já inclui internamente os quatro resistores.

Os sinais em modo comum são sinais ditos em modo comum quando aparece em duas linhas de um sistema em fase referidos a um valor de terra. A Figura 7 ilustra um exemplo de rejeição de sinal comum por um AmpOp, que rejeita o ruído de 60 Hz.



Diversos sistemas de comunicações por meio de fio utilizam sinais em modo comum. Com a utilização da configuração subtratora, problemas como de blindagens, terra e outros que podem causar a deterioração dos sinais são contornados. É uma técnica utilizada em sistemas de áudio por meio dos cabos balanceados, a qual visa a minimizar os ruídos captados por eles. O ruído tende a ter amplitudes e fases semelhantes em ambos os condutores, assim, é possível atenuá-los de maneira bem efetiva. O mesmo conceito é adotado no mundo digital, por exemplo, os cabos de rede ou outras conexões de alta velocidade que utilizam vias balanceadas. As USB 3.0 (barramento serial universal 3.0) proporcionam fluxos de dados de alta velocidade utilizando fios emparelhados. Esses são chamados de pares diferenciais complementares. Os sinais de dados passam por amplificadores diferenciais, os quais rejeitam ou atenuam ruídos em modo comum e produzem a saída desejada (MALVINO; BATES, 2016).

Outro exemplo de aplicação é no condicionamento de sinais, os quais são compostos por um processo de aquisição de dados, amplificação do sinal e digitalização. A digitalização consiste em converter um tipo de sinal elétrico ou mecânico (sinal de entrada) em outro (sinal de saída). Durante esse processo, se amplifica e converte este sinal em uma forma compatível com sistemas de leitura ou controle de máquina. O condicionamento de sinal utiliza diferentes amplificadores para diferentes utilidades, incluindo amplificadores de instrumentação ou subtratores, e amplificadores de isolamento (seguidores de tensão). Os amplificadores para essa função são caracterizados por alta impedância de entrada, alta CMRR e alto ganho.

O amplificador diferenciador

O amplificador diferenciador tem como resposta a derivada do sinal de entrada, ou seja, tem como resposta uma saída proporcional à taxa de variação do sinal de entrada. Muito similar ao amplificador integrador, modificando apenas as posições do resistor e do capacitor. As aplicações desse amplificador podem ser para a detecção das bordas dianteiras e posteriores de um pulso retangular ou apenas para a produção de *spikes* estreitos e, ainda, para produzir uma saída retangular a partir de uma entrada rampa. A Figura 8 ilustra um amplificador diferenciador básico.

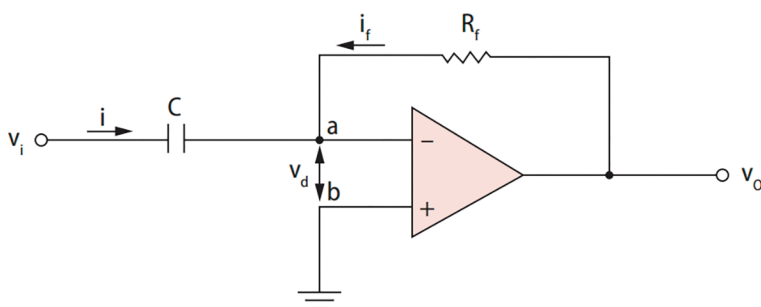


Figura 8. Amplificador diferenciador fundamental.

Fonte: Pertence Jr. (2015, p. 62).

Ao aplicar a lei de Kirchhoff no nó a , a corrente que passa pelo resistor mais a corrente do capacitor são igual a zero (equação 16) (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$i + i_f = 0 \quad (16)$$

As correntes podem ser calculas por (equação 17):

$$i = C \frac{dv_i}{dt}, \quad i_f = \frac{v_o}{R_f} \quad (17)$$

Substituindo a equação 17 na 16 (equação 18):

$$C \frac{dv_i}{dt} + \frac{v_o}{R_f} = 0 \quad (18)$$

Isolando a tensão de saída v_o (equação 19):

$$v_o = -R_f C \frac{dv_i}{dt} \quad (19)$$

As consequências dessa configuração são uma alta susceptibilidade a ruídos de alta frequência, instabilidade de ganho e processo de saturação muito rápido. Na prática, essa configuração é raramente utilizada, já que amplifica qualquer ruído elétrico, sendo sensível às variações de frequência, tornando-se eletronicamente instável.

Para evitar a tendência de oscilação do amplificador diferenciador básico e o processo de saturação rápido à medida que a frequência aumenta, geralmente é incluído alguma resistência R_1 em série com o capacitor, tipicamente, de $0,01R_f$ a $0,1R_f$ (MALVINO; BATES, 2016). Essa configuração é conhecida como amplificador diferenciador prático, no qual o resistor adicionado tem como objetivo limitar o ganho de tensão em malha fechada para altas frequências, dando estabilidade a ele. Até uma determinada frequência f_L , o circuito se comportará como amplificador diferenciador. Após essa frequência, se comportará como um amplificador inversor de ganho $-R_f/R_1$. Quanto mais

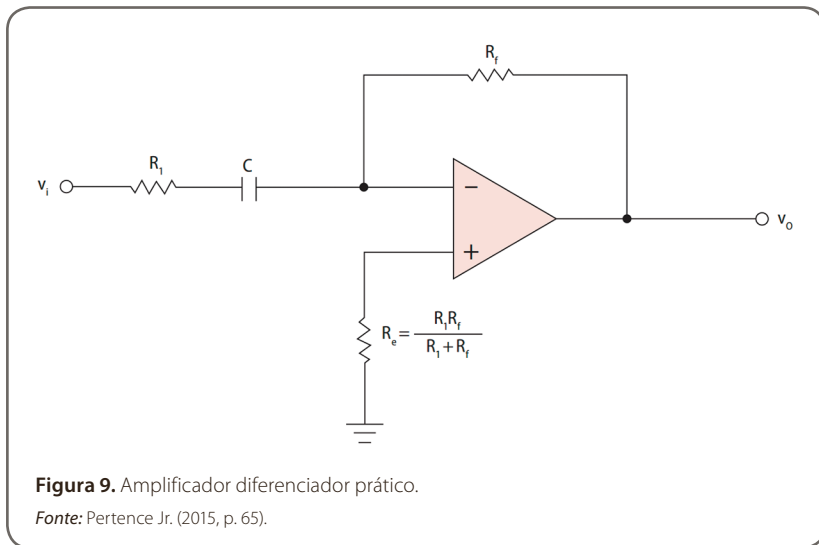
afastado dessa frequência nos dois sentidos, mais verdadeiras serão essas relações. A frequência f_L é dada por (equação 20):

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C} \quad (20)$$

A Figura 9 ilustra como é o amplificador diferenciador prático e também que pode ser adicionado um resistor de equalização R_e para minimizar a tensão de *offset*. Outra medida para apresentar uma saída mais precisa, que deve ser imposta como mais uma condição ao projeto (equação 21), é:

$$R_1 C \leq T/10 \quad (21)$$

onde T é o período do sinal aplicado na entrada.



O diferenciador é largamente utilizado na implementação de filtros ativos, porém com menos frequência que os integradores. Outra aplicação são os controladores eletrônicos analógicos, os quais têm como função avaliar os erros ou os desvios das variáveis controladas em um processo industrial, enviando um sinal elétrico para que outros dispositivos atuem, no processo, corrigindo os erros ou desvios detectados. Existem três tipos de ações que

também identificam os tipos de controladores: ação proporcional, ação integral e ação derivativa, sendo que estas podem ser combinadas entre si, formando as ações como proporcional + integral (PI) e proporcional + integral + derivativa (PID). O amplificador diferenciador, como o nome já diz, é relacionado com as ações derivativas, as quais nunca são utilizadas de forma isolada, sendo sempre associada com a proporcional, a integral, ou com ambas.



Link

Conheça a opção de *software* Eagle para simulação de circuitos e confecção de placas de circuito impresso, consultando o *link* a seguir.

<https://qrgo.page.link/8k8Xj>



Referências

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de circuitos elétricos com aplicações*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. *Eletrônica*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. v. 2.

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

SCHULER, C. A. *Eletrônica II*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. (Série Tekne).

THOMAS, R. E.; ROSA, A. J.; TOUSSAINT, G. J. *Análise e projeto de circuitos elétricos lineares*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

Leituras recomendadas

FRANCO, S. *Projetos de circuitos analógicos: discretos e integrados*. Porto Alegre: AMGH, 2016.

HAYT JR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. *Análise de circuitos em engenharia*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

SADIKU, M.; MUSA, S.; ALEXANDER, C. *Análise de circuitos elétricos com aplicações*. Porto Alegre: AMGH, 2014.

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