3 Circuitos com AmpOps

As montagens inversora e não - inversora são utilizadas numa infinidade de aplicações de processamento de sinal, designadamente de amplificação, filtragem, retificação de sinais, conversão e simulação de impedâncias, conversão tensão - corrente e corrente - tensão, etc. A seguir, estudam-se algumas aplicações que permitem ilustrar o enorme potencial prático do amplificador operacional de tensão.

3.1 Seguidor de Tensão

O circuito seguidor de tensão constitui uma das aplicações mais comuns do amplificador operacional (Figura 6; na literatura inglesa este circuito é designado por *buffer*, cuja tradução para a Língua Portuguesa é circuito amortecedor ou tampão).

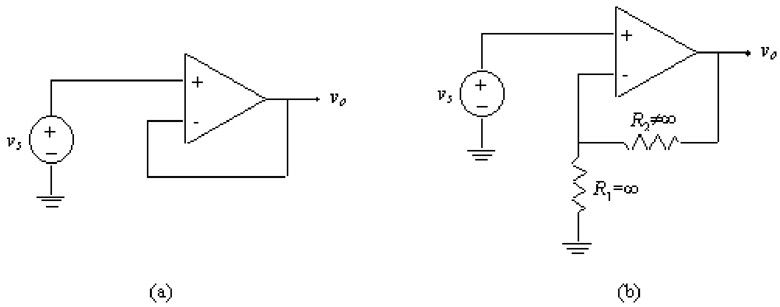

Figura 6 Circuito seguidor de tensão

O seguidor de tensão implementa um ganho unitário

$$\frac{v_o}{v_s} = 1 \qquad (14)$$

entre a entrada e a saída, resultado que à primeira vista poderia parecer destituído de aplicação prática.

Na Figura 7 apresentam-se dois circuitos que ilustram a utilidade prática do seguidor de tensão: em (a) a carga encontra-se ligada diretamente à fonte, cuja resistência interna introduz um divisor resistivo, ao passo que em (b) a fonte e a carga são intercaladas de um seguidor de tensão.

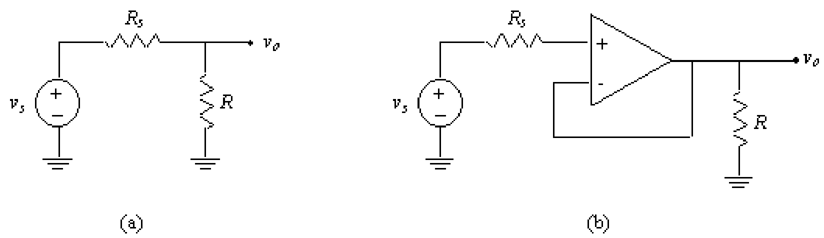

Figura 7 Aplicações do circuito seguidor de tensão

Identificam-se as seguintes diferenças entre estes dois circuitos: no primeiro caso a tensão na carga é inferior àquela disponibilizada pela fonte,

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{R}{R + R_s} < 1 \qquad (15)$$

e é a fonte de sinal quem fornece a potência à carga. Pelo contrário, no caso do circuito em (b) verifica-se a igualdade

$$v_o = v_s \qquad (16)$$

designadamente como resultado do ganho infinito e das impedâncias de entrada infinita e de saída nula do amplificador operacional. Para além do mais, neste caso é o amplificador operacional e não a fonte de sinal quem fornece potência à carga. Estas características justificam os títulos de circuito seguidor de tensão, isolador ou tampão.

O circuito seguidor de tensão pode ser encarado como caso limite da montagem não - inversora estudada anteriormente. Com efeito, e como se indica na Figura 6.b, os dois circuitos coincidem quando a resistência R_1 é feita tender para infinito, situação durante a qual o valor da resistência R_2 é irrelevante, exceto quando infinito, dado ser nula a corrente respectiva.

3.2 Somador Inversor

A montagem inversora pode ser utilizada para implementar a soma pesada de sinais elétricos (Figura 8).

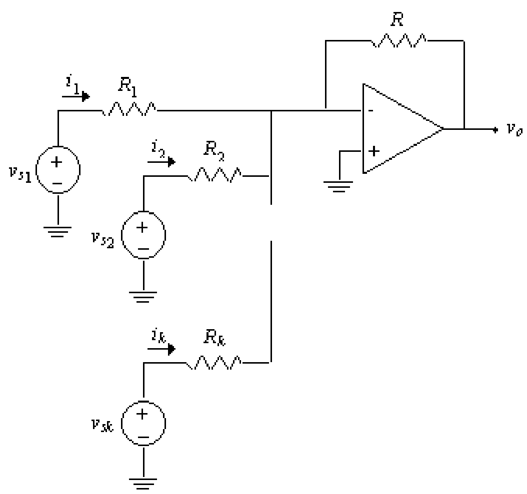

Figura 8 Somador inversor

A massa virtual do AmpOp implementa a soma das correntes fornecidas por cada uma das fontes de sinal,

$$i_i = \frac{v_{si}}{R_i} \qquad (17)$$

e a resistência R converte-as na tensão

$$v_o = -R\sum_{i=1}^{k} i_i = -(\frac{R}{R_1}v_{s1} + \frac{R}{R_2}v_{s2} + \ldots + \frac{R}{R_k}v_{sk}) \qquad (18)$$

Uma das aplicações mais interessantes do somador na Figura 8 é a realização de um conversor digital-analógico. Com efeito, se se admitir que as fontes de sinal v_i valem 1 V ou 0 V consoante o valor lógico dos *bit* de uma palavra digital, e as resistências R_i se encontram pesadas binariamente em função da ordem do *bit* na palavra, por exemplo $R_1=R$, $R_2=R/2$, $R_3=R/4$... $R_k=R/2^{k-1}$, então a expressão da tensão na saída do AmpOp é

$$v_o = -(2^{k-1}b_k + \ldots + 8b_4 + 4b_3 + 2b_2 + b_1) \qquad (19)$$

Por exemplo, as palavras digitais 10011 e 00001 (em decimal 19 e 1, respectivamente) conduzem aos valores da tensão na saída

$$v_o = -(16 + 0 + 0 + 2 + 1) = -19 \qquad (20)$$

e

$$v_o = -(0 + 0 + 0 + 0 + 1) = -1 \qquad (21)$$

respectivamente. Naturalmente que se pode sempre dimensionar o valor da resistência R de modo a redefinir a escala de amplitudes da tensão na saída.

3.3 Amplificador Inversor

Uma das limitações da montagem inversora simples é a dificuldade de na prática construir amplificadores com, simultaneamente, elevados ganho e resistência de entrada (reveja-se a Figura 15.4). Na montagem inversora simples, a especificação de um ganho de tensão elevado, -R_2/R_1, convida a estabelecer um valor nominal relativamente pequeno para a resistência R_1, ao passo que a exigência de uma elevada resistência de entrada, dada por

$$R_i = \frac{v_s}{i_1} = R_1 \qquad (22)$$

recomenda exatamente o oposto. Um modo de obviar a esta limitação é a utilização do circuito representado na Figura 15.9, cuja análise se pode efetuar nos seguintes passos:

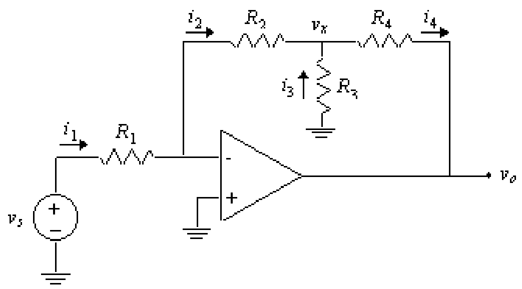

Figura 15.9 Amplificador inversor de elevados ganho e resistência de entrada

determinação da corrente que incide na massa virtual

$$i_1 = \frac{v_s}{R_1} = i_2 \qquad (23)$$

determinação da tensão v_x

$$v_x = 0 - R_2 i_2 = -\frac{R_2}{R_1} v_s \qquad (24)$$

obtenção da expressão da corrente nas resistências R_3 e R_4,

$$i_3 = -\frac{v_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}\frac{1}{R_3} v_s \qquad (25)$$

e

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{v_s}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\frac{1}{R_3} v_s \qquad (26)$$

respectivamente, e, finalmente, determinação da tensão no nó de saída do AmpOp

$$v_o = v_x - R_4 i_4 = -\frac{R_2}{R_1} v_s - \left(\frac{R_4}{R_1} v_s + \frac{R_2}{R_1}\frac{R_4}{R_3} v_s\right) \qquad (27)$$

Da relação (15.27) resulta a expressão do ganho da montagem

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3}\right) \qquad (28)$$

na qual se inscreve a possibilidade de obter, simultaneamente, ganho e resistência de entrada elevados.

3.4 Amplificador da Diferença

A utilização conjunta das montagens inversora e não-inversora permite realizar um circuito que implementa a amplificação da diferença entre dois sinais (Figura 10.a).

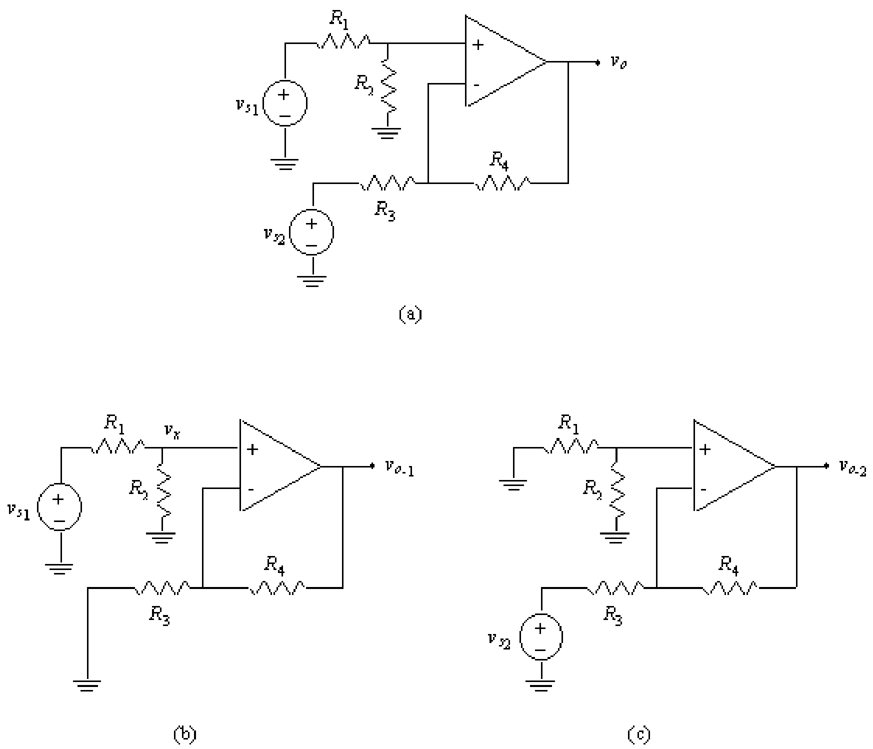

Figura 10 Amplificador da diferença

A aplicação do teorema da sobreposição das fontes permite identificar as seguintes duas contribuições para a tensão na saída do AmpOp (Figuras 10.b e 10.c): a parcela

$$v_{o-1} = (1+\frac{R_4}{R_3})v_x = (1+\frac{R_4}{R_3})(\frac{R_2}{R_1+R_2})v_{s1} = \frac{(1+\frac{R_4}{R_3})}{(1+\frac{R_1}{R_2})}v_{s1} \qquad (28)$$

a qual basicamente coincide com a expressão da montagem não - inversora afetada do divisor resistivo implementado pelas resistências R_1 e R_2 na entrada, e a parcela

$$v_{o-2} = -\frac{R_4}{R_3}v_{s2} \qquad (28)$$

relativa à montagem inversora implementada pelas resistências R_3 e R_4 sobre o sinal v_2 (note-se que, neste caso, as resistências ligadas ao nó positivo do AmpOp não alteram em nada o funcionamento da montagem inversora).

De acordo com as expressões (29) e (30), a tensão na saída é

$$v_o = \frac{(1+\frac{R_4}{R_3})}{(1+\frac{R_1}{R_2})} v_{s1} - \frac{R_4}{R_3} v_{s2} \qquad (31)$$

que no caso particular em que se verifica a igualdade entre os cocientes R_4/R_3 e R_2/R_1 se simplifica para

$$v_o = \frac{R_4}{R_3}(v_{s1} - v_{s2}) \qquad (32)$$

3.5 Amplificador de Instrumentação

O principal inconveniente do amplificador diferença é o compromisso necessário entre o ganho de tensão e a resistência de entrada vista por cada uma das fontes de sinal. Uma alternativa a este circuito é o amplificador de instrumentação representado na Figura 11, neste caso constituído por dois amplificadores não inversores (AmpOps-1 e -2) e um amplificador diferença (AmpOp-3). Neste caso, a resistência de entrada vista por cada uma das duas fontes é infinita (coincidem ambas com a resistência de entrada dos terminais positivos dos AmpOps-1 e -2), ao passo que, como se verá de seguida, o ganho de tensão é dado pelo produto de dois cocientes entre resistências.

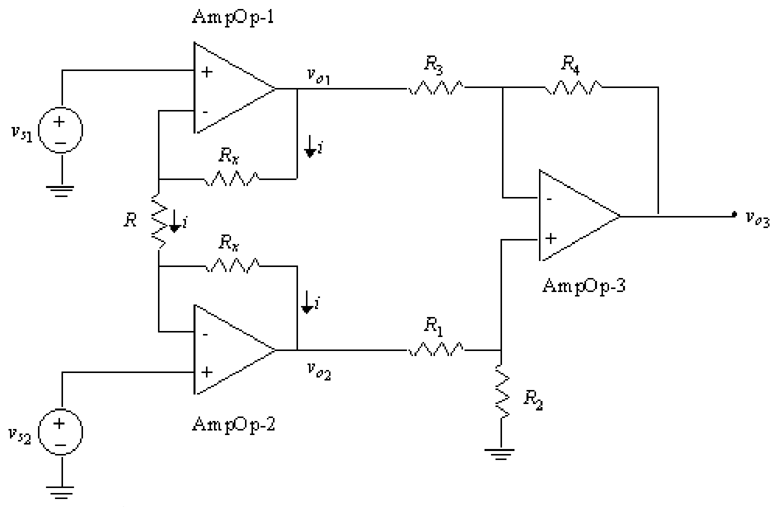

Figura 11 Amplificador de instrumentação

A análise deste circuito pode ser efetuada em três passos:

(i) determinação das tensões nos nós negativos dos AmpOps-1 e -2;

(ii) obtenção das expressões das tensões nos respectivos nós de saída;

(iii) aplicação da expressão do amplificador diferença para determinar a tensão na saída da montagem.

Assim, verifica-se que:

$$v_1^- = v_1^+ = v_{s1} \qquad (33)$$

nos terminais negativo e positivo do AmpOp-1;

$$v_2^- = v_2^+ = v_{s2} \qquad (34)$$

nos terminais negativo e positivo do AmpOp-2; as correntes nas resistência R e R_x são, nos sentidos indicados,

$$i = \frac{v_{s1} - v_{s2}}{R} \qquad (35)$$

a corrente nas resistências R_x conduz às tensões nas saídas dos AmpOps-1 e -2

$$v_{o1} = v_1^- + R_x i = v_{s1} + \frac{R_x}{R}(v_{s1} - v_{s2}) \qquad (36)$$

e

$$v_{o2} = v_2^- - R_x i = v_{s2} - \frac{R_x}{R}(v_{s1} - v_{s2}) \qquad (37)$$

respectivamente, cuja diferença

$$v_{o1} - v_{o2} = (v_{s1} - v_{s2})(1 + 2\frac{R_x}{R}) \qquad (38)$$

é aplicada ao amplificador implementado pelo AmpOp-3. Assim, admitindo que as resistências no amplificador diferença verificam a igualdade $R_4/R_3=R_2/R_1$ (ver as expressões derivadas anteriormente para o amplificador diferença), obtém-se

$$v_{o3} = \frac{R_4}{R_3}(v_{o1} - v_{o2}) = (v_{s1} - v_{s2})(1 + 2\frac{R_x}{R})\frac{R_4}{R_3} \qquad (39)$$

relação na qual se inscreve o ganho diferencial

$$\frac{v_{o3}}{(v_{s1} - v_{s2})} = (1 + 2\frac{R_x}{R})\frac{R_4}{R_3} \qquad (40)$$

3.6 Filtros Ativos

O princípio de funcionamento das montagens inversora e não inversora é generalizável aos circuitos com impedâncias, em lugar de apenas resistências. Considere-se a título de exemplo a montagem inversora representada na Figura 12, neste caso constituída por um AmpOp e por duas impedâncias, Z_1 e Z_2 (admite-se a representação das impedâncias na notação de Laplace).

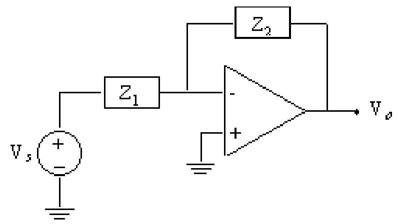

Figura 12 Montagem inversora

A função de transferência entre a fonte de sinal e a saída do AmpOp é neste caso

$$H(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} \qquad (41)$$

cuja particularização para $s=jw$ conduz à resposta em frequência do ganho de tensão da montagem.
Dois casos particulares da montagem inversora são os circuitos integrador e diferenciador representados nas Figuras 13.

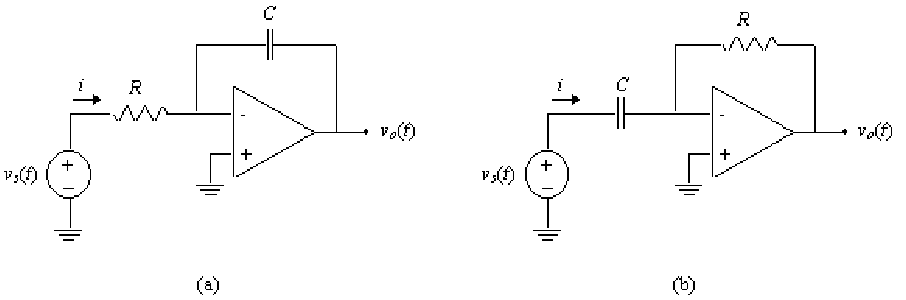

Figura 13 Circuitos integrador (a) e diferenciador (b)

O circuito em (a), designado por integrador de Miller, caracteriza-se pela função de transferência

$$\mathrm{H}(s) = -\frac{1}{sRC} \qquad (42)$$

à qual, no domínio do tempo, corresponde a relação

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_s(\tau)d\tau + v_o(0) \qquad (43)$$

Na realidade, uma vez que a corrente fornecida pela fonte de sinal

$$i(t) = \frac{v_s(t)}{R} \qquad (44)$$

é integrada pelo condensador, a tensão aos terminais deste é

$$v_o(t) = -v_C(t) = -\frac{1}{C}\int_0^t i(\tau)d\tau + v_C(0) = -\frac{1}{RC}\int_0^t v_s(\tau)d\tau + v_o(0) \qquad (45)$$

No que respeita ao circuito diferenciador representado na Figura 13.b, a função de transferência é

$$\mathrm{H}(s) = -sRC \qquad (46)$$

à qual no domínio do tempo corresponde a relação

$$v_o(t) = -RC\frac{dv_s(t)}{dt} \qquad (47)$$

Em geral, os amplificadores operacionais em conjunto com resistências e condensadores permitem implementar funções de transferência que na prática constituem filtros. Esta alternativa de construção de filtros é vulgarmente designada por técnica RC - Ativa, devido ao fato de se utilizarem apenas resistências, condensadores e amplificadores operacionais, e nunca bobinas. Na Figura 14 apresentam-se dois filtros *RC*-activos.

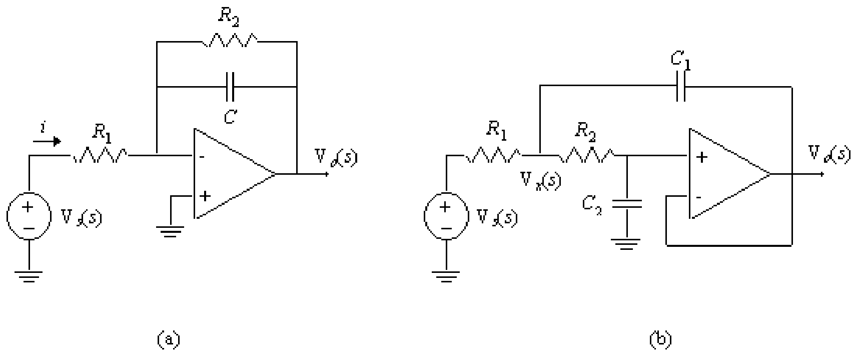

Figura 14 Integrador com limitação do ganho em d.c. (a) e filtro passa-baixo de 2ªordem de Sallen & Key (b)

No primeiro caso trata-se de um circuito integrador com limitação do ganho em *d.c.*, cuja função de transferência é

$$\mathrm{H}(s) = -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{1+sR_2C_2} \qquad (48)$$

enquanto no segundo estamos em presença de um filtro passa - baixa de 2.ª ordem, vulgarmente designado por biquadrática de Sallen & Key. Neste último caso, a função de transferência obtém-se a partir do sistema de equações

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{V}_s - \mathrm{V}_x}{R_1} + \dfrac{\mathrm{V}^+ - \mathrm{V}_x}{R_2} + sC_1(\mathrm{V}_o - \mathrm{V}_x) = 0 \\ \mathrm{V}^+ = \dfrac{\mathrm{V}_x}{1+sC_2R_2} = \mathrm{V}_o \end{cases} \qquad (49)$$

cuja primeira equação resulta da aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes ao nó - X, e a segunda do divisor de impedâncias e do seguidor de tensão implementados pela resistência R_2, pelo condensador C_2 e pelo AmpOp. O cociente entre as tensões na saída do AmpOp e da fonte de sinal é

$$\mathrm{H}(s) = \frac{1}{s^2C_1C_2R_1R_2 + sC_2(R_2 + R_1) + 1} \qquad (50)$$

ou ainda

$$\mathrm{H}(s) = \frac{\frac{1}{C_1C_2R_1R_2}}{s^2 + \frac{R_1+R_2}{C_1R_1R_2}s + \frac{1}{C_1C_2R_1R_2}} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2} \qquad (51)$$

em que

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad (52)$$

e

$$Q = \frac{1}{R_1+R_2}\sqrt{\frac{R_1R_2C_1}{C_2}} \qquad (53)$$

3.7 Conversores de Impedâncias e de Tensão-Corrente

Na Figura 15 representa-se um circuito que implementa uma resistência negativa. De acordo com o teorema de Miller, o valor nominal de uma resistência pode ser alterado através do recurso a fontes dependentes, em particular através do recurso a amplificadores de tensão.

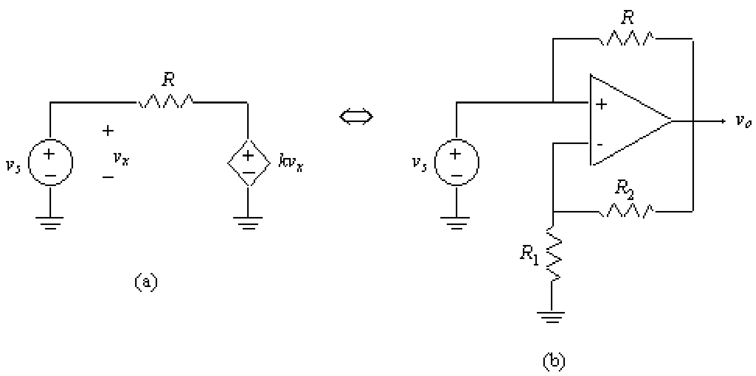

Figura 15 Conversor de impedâncias

Como se ilustra na Figura 15.a, a resistência à direita da fonte de sinal é dada por R_M=R/(1-k), em que k é o ganho de tensão da fonte controlada. Referindo agora ao circuito representado na Figura 15.b, verifica-se que a resistência R se encontra ligada entre a entrada e a saída do amplificador não-inversor, portanto que o seu valor aparente é

$$R_M = \frac{R}{\left[1-(1+\frac{R_2}{R_1})\right]} = -\frac{R_1}{R_2}R \qquad (54)$$

No caso em que R_2=R_1, (54) simplifica-se para

$$R_M = -R \qquad (55)$$

Para finalizar a gama de aplicações ilustrativas das potencialidades do AmpOp, na Figura 16.c apresenta-se um circuito que implementa um conversor tensão-corrente. O objectivo é implementar uma fonte de corrente a partir de uma fonte de tensão, ou seja, construir um circuito que impõe a corrente numa carga independentemente do valor nominal respectivo.

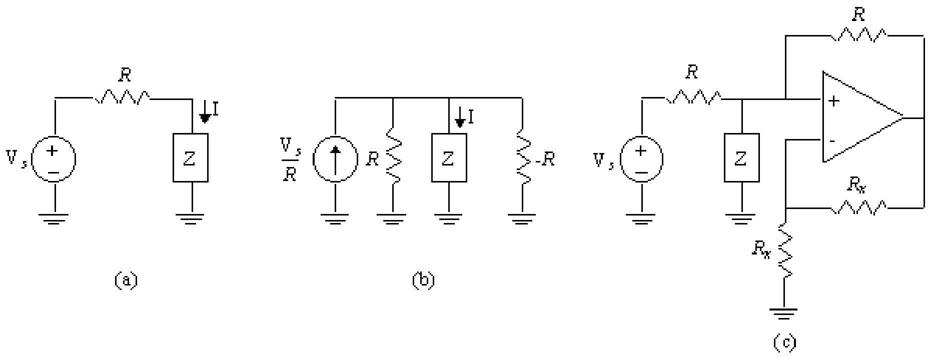

Figura 16 Conversor de tensão em corrente

Referindo-nos aos esquemas representados nas Figuras 15.16.a e 15.16.b, constata-se que a realização de uma fonte de corrente passa pela implementação de uma resistência negativa, por exemplo através do recurso ao conversor de impedâncias da Figura 15.15. Com efeito, a aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes ao nó de saída da fonte permite concluir que a corrente na carga é independente do valor nominal respectivo, ou seja, que o circuito externo à carga se comporta como uma fonte de corrente de valor

$$I_s = \frac{V_s}{R} \qquad (56)$$