

Circuitos Básicos Usando o Amplificador Operacional

Introdução

Dizemos que um circuito com amplificador operacional é linear quando o mesmo opera como amplificador. A análise de circuitos lineares com amplificadores operacionais é muito simplificada quando se supõe o amplificador operacional ideal. Neste caso, e considerando o fato de o circuito ser linear, a análise pode ser feita aplicando os teoremas já estabelecidos na teoria de circuitos elétricos, por exemplo: leis de Kirchhoff, teorema da superposição, teorema de Thevenin etc.

Usando técnicas de análise de circuito é possível analisar alguns circuitos usando amplificador operacional e, a partir desses circuitos, se desenvolver novas aplicações a partir desses circuitos básicos.

O que se desenvolverá a seguir é a análise de alguns circuitos que se podem dizer básicos no estudo de circuitos usando amplificador operacional.

Amplificador não inversor

O tipo mais fundamental do uso da realimentação negativa é o que se chama de realimentação com tensão não inversora. Com este tipo de realimentação, o sinal de entrada alimenta a entrada não inversora de um amplificador operacional; uma fração da tensão de saída é então amostrada e alimenta novamente a entrada inversora. Um amplificador com realimentação de tensão não inversora tende a se comportar como um amplificador perfeito de tensão, isto é, tem impedância de entrada infinita, impedância de saída zero e ganho de tensão constante. Tal configuração é comumente conhecida com amplificador não inversor pois o sinal de saída e o sinal de entrada estão em fase.

O circuito mostrado na figura 1 representa o amplificador não inversor. A tensão de saída está sendo amostrada através de um divisor de tensão. Portanto a tensão de realimentação para entrada inversora é proporcional à tensão de saída.

Num amplificador de realimentação, a diferença entre as tensões da entrada não inversora e inversora é chamada tensão de erro, ou seja, $v_{\text{erro}} = v_1 - v_2$.

Devido a impedância de entrada do amplificador operacional tender a infinito pode-se considerar que não há corrente circulando nas entradas do amplificador operacional, ou seja, $I(+) \approx I(-) \approx 0$.

Devido a ideia do “curto circuito virtual” podemos considerar $v_{\text{erro}} = v_1 - v_2 \approx 0$.

Na análise de qualquer circuito que usa o amplificador operacional é possível se levar em consideração os seguintes pressupostos:

$$v_{\text{erro}} = v_1 - v_2 \approx 0$$

$$I(+) \approx I(-) \approx 0$$

A partir das considerações citadas acima se aplicará as leis de Kirchhoff ao circuito para se obter as relações necessárias entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

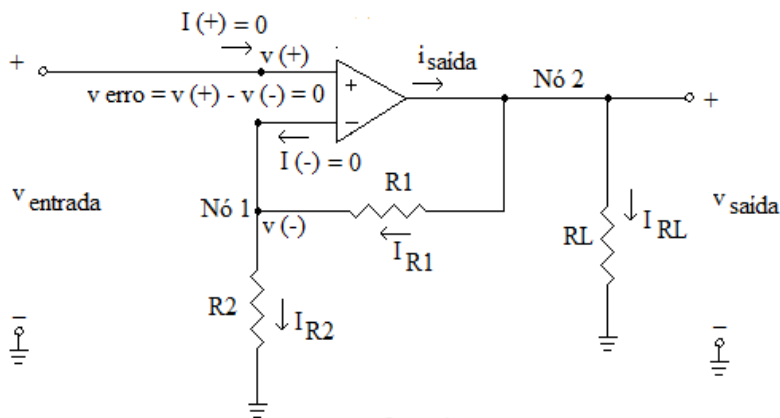


figura 1

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

$$I(-) + IR_1 = IR_2$$

$$I(-) \approx 0$$

$$IR_1 \approx IR_2$$

$$[v_{\text{saída}} - v(-)] / R_1 \approx [v(-) - 0] / R_2$$

Aplicando a condição $v_{\text{erro}} = v(+) - v(-) \approx 0$, então $v(+) \approx v(-) \approx v_{\text{entrada}}$

$$[v_{\text{saída}} - v_{\text{entrada}}] / R_1 \approx v_{\text{entrada}} / R_2$$

$$R_2 v_{\text{saída}} - R_2 v_{\text{entrada}} \approx R_1 v_{\text{entrada}}$$

$$R_2 v_{\text{saída}} \approx v_{\text{entrada}} (R_1 + R_2)$$

$$\text{Ganho de tensão de malha fechada} = v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} \approx (R_1 + R_2) / R_2$$

$$A_{CL} = (R_1 + R_2) / R_2 = 1 + R_1 / R_2$$

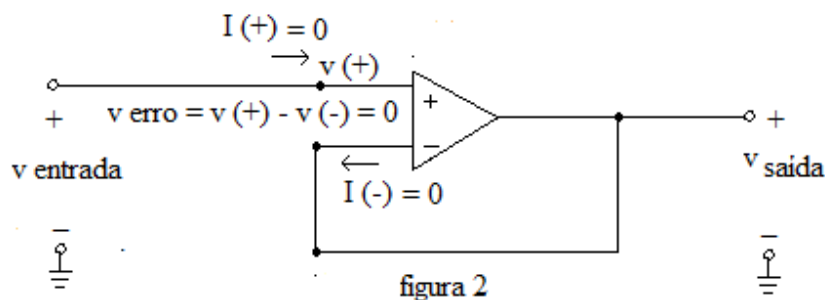
Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 2 temos:

$$i_{\text{saída}} = IR_1 + IR_L$$

$$i_{\text{saída}} = (v_{\text{saída}} / R_1 + R_2) + (v_{\text{saída}} / R_L)$$

Se no amplificador não inversor fizermos $R_2 = \infty$ (circuito aberto) e $R_1 = 0$ (curto-circuito) teremos o ganho de tensão de malha fechada igual a 1.

A figura 2 nos mostra a configuração denominada seguidor de tensão ou “Buffer”.



Este circuito apresenta uma altíssima impedância de entrada e uma baixíssima impedância de saída.

Dos circuitos com amplificador operacional, o seguidor de tensão é o que apresenta características mais próximas das ideais, em termos de impedâncias de entrada e de saída.

O seguidor de tensão apresenta diversas aplicações: isolador de estágios, reforçador de corrente, casador de impedâncias.

Uma aplicação prática para o seguidor de tensão é a utilização desse circuito no casamento da impedância de saída de um gerador de sinal com um amplificador de baixa impedância de entrada.

Amplificador inversor

A figura 3 mostra a representação original do amplificador inversor. O sinal de entrada é feito por uma fonte de corrente que alimenta a entrada inversora, e a tensão de saída é amostrada. Isto produz uma realimentação de tensão inversora. Um amplificador com realimentação de tensão inversora tende a se comportar como um conversor de corrente em tensão perfeito, um dispositivo com uma impedância de entrada zero, uma impedância de saída zero e a razão $v_{\text{saída}} / i_{\text{entrada}}$ igual a uma constante.

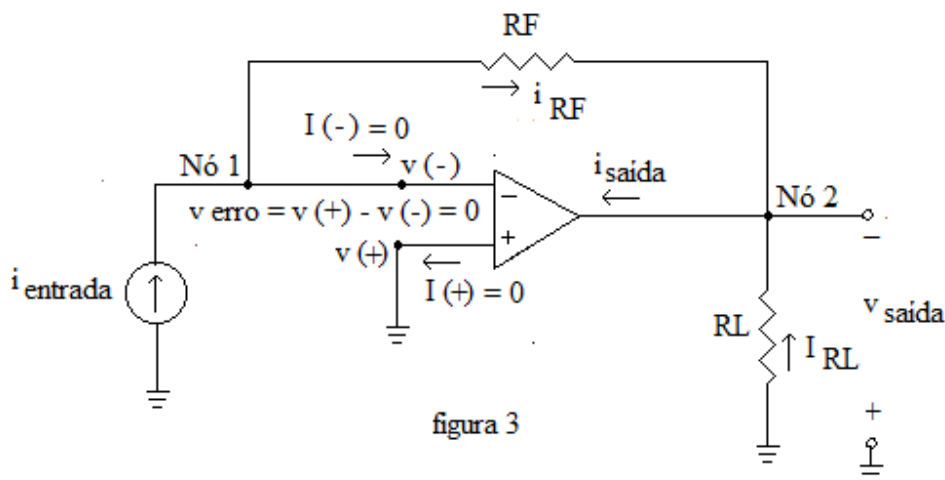


figura 3

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

$$I(-) + i_{R_F} = i_{\text{entrada}}$$

$$I(-) \approx 0 \text{ e } v(+) = 0$$

$$i_{R_F} \approx i_{\text{entrada}}$$

$$(0 - v_{\text{saída}}) / R_F \approx i_{\text{entrada}}$$

$$-v_{\text{saída}} \approx (R_F) (i_{\text{entrada}})$$

O sinal menos é para indicar que o sinal de saída está defasado de 180° do sinal de entrada.

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 2 temos:

$$i_{\text{saída}} = i_{R_F} + I_{R_L}$$

Nos circuitos usuais do amplificador inversor a fonte de corrente de entrada é substituída por uma fonte de tensão em série com um resistor como mostra a figura 4.

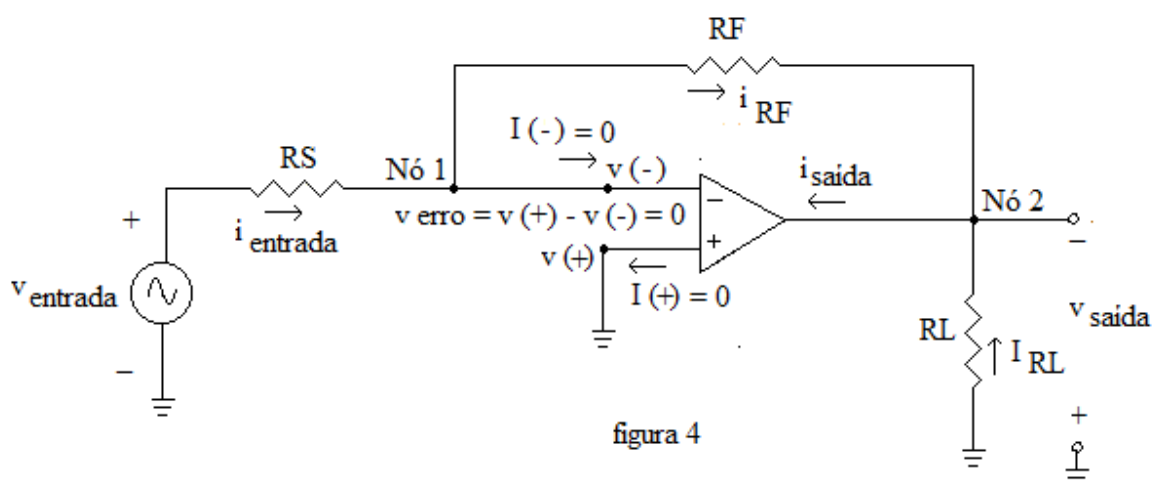


figura 4

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

$$I(-) + i_{R_F} = i_{\text{entrada}}$$

$$I(-) \approx 0 \text{ e } v(+) = 0$$

$$i_{R_F} \approx i_{\text{entrada}}$$

$$(v_{\text{entrada}} - 0) / R_S \approx (0 - v_{\text{saída}}) / R_F$$

$$v_{\text{entrada}} / R_S \approx - v_{\text{saída}} / R_F$$

$$v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} \approx - R_F / R_S$$

$$\text{Ganho de tensão de malha fechada} = v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} = A_{CL} = - R_F / R_S$$

O conceito de “terra virtual” é usado no amplificador inversor como se pode perceber no circuito mostrado na figura 4. A entrada não inversora está aterrada. Como $v_{\text{erro}} = 0$, isto faz a entrada inversora também ficar aterrada. Como $I(-) = 0$ temos que $i_{\text{entrada}} = i_{R_F}$. Estas duas ideias-chave estão resumidas no conceito de “terra virtual”, que é qualquer ponto num circuito que tenha tensão zero e não retire nenhuma corrente. Um “terra comum” tem tensão zero e pode sorver uma corrente infinita. Um “terra virtual” tem tensão zero e corrente zero.

Circuito conversor de tensão em corrente

Com a realimentação da corrente não inversora, uma tensão de entrada alimenta a entrada não inversora de um amplificador operacional, e a corrente de saída é amostrada para se obter a tensão de realimentação. Um amplificador com uma realimentação de corrente não inversora tende a se comportar como um conversor de tensão em corrente perfeito, isto é, aquele que tem impedância de entrada infinita, impedância de saída infinita e transcondutância estável.

A figura 5 mostra o circuito conversor de tensão em corrente. O resistor de carga é a resistência interna do amperímetro colocado na saída para captar a corrente de saída. Tal resistência é muito pequena que pode ser considerada praticamente zero. No nó 1 do circuito pode-se aplicar a lei de Kirchhoff dos nós e dizer que a corrente de saída é praticamente igual a corrente que passa no resistor R_F . A ideia de que $v_{\text{erro}} \approx 0$ permite dizer que a tensão de entrada é praticamente igual a tensão sobre o resistor R_F . Pode-se dizer que a tensão de realimentação é proporcional à corrente de saída e se conclui: Sempre que a tensão de realimentação for proporcional à corrente de saída, o circuito terá realimentação de corrente.

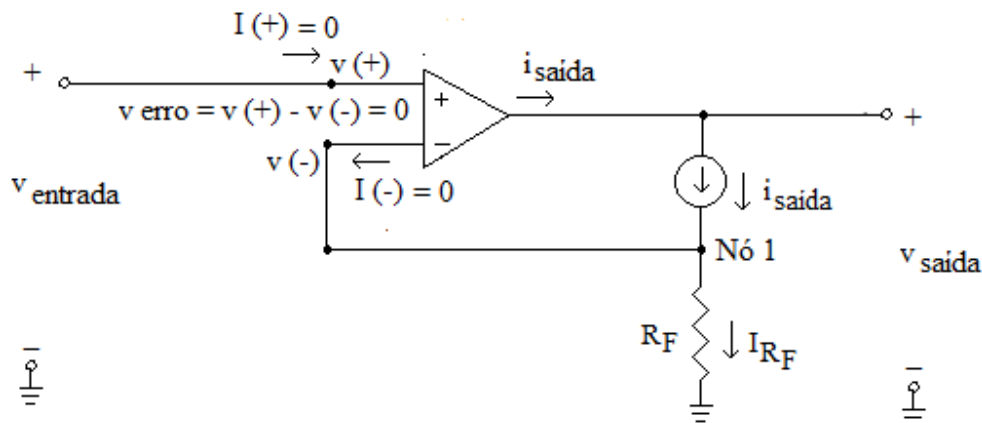


figura 5

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

$$i_{\text{saída}} \approx I_{R_F}$$

$$I_{R_F} = v_{\text{entrada}} / R_F$$

$$i_{\text{saída}} \approx v_{\text{entrada}} / R_F$$

$$v_{\text{saída}} \approx v_{\text{entrada}}$$

$$i_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} \approx 1 / R_F = \text{transcondutância}$$

A razão da corrente de saída sobre a tensão de entrada é igual ao inverso de R_F . Como R_F é um resistor externo, $i_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}$ tem um valor constante independente do ganho de tensão de malha aberta do amplificador operacional e da resistência de carga.

O circuito é chamado de conversor de tensão em corrente porque uma tensão de entrada controla a corrente de saída.

Amplificador de corrente

Na figura 6 se mostra o circuito que representa um amplificador de corrente. Uma corrente de entrada alimenta a entrada inversora do amplificador operacional e a corrente de saída virá como consequência. Um amplificador com realimentação da corrente inversora tende a se comportar como um amplificador perfeito de corrente, isto é, aquele que tem impedância de entrada igual a zero, impedância de saída infinita e um ganho de corrente constante.

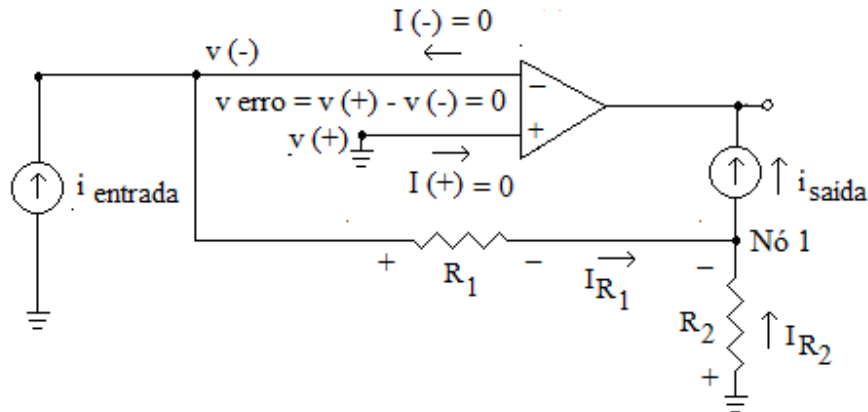


figura 6

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

$$\begin{aligned}
 V_{R2} &= V_{R1} \\
 V_{R1} &= R_1 i_{\text{entrada}} \\
 i_{\text{saída}} &= I_{R1} + I_{R2} \\
 i_{\text{saída}} &= V_{R1} (1/R_1 + 1/R_2) \\
 i_{\text{saída}} &= R_1 i_{\text{entrada}} (R_2 + R_1) / (R_1 R_2) \\
 i_{\text{saída}} &= i_{\text{entrada}} (R_2 + R_1) / R_2 \\
 i_{\text{saída}} &= [(R_1 + R_2) / R_2] i_{\text{entrada}} \\
 i_{\text{saída}} &= A_{CL} i_{\text{entrada}}
 \end{aligned}$$

onde: $A_{CL} = (R_1 + R_2) / R_2$ é o ganho de corrente do circuito.

Produto ganho-largura de banda de malha fechada

O lado esquerdo da expressão mostrada abaixo é chamado produto ganho-largura de banda de malha fechada porque ele representa o produto de ganho de malha fechada pela largura de banda. O produto do ganho-largura de banda é o mesmo para as condições de malha aberta e de malha fechada e ambos os produtos são iguais a frequência unitária do amplificador operacional.

$$A_{CL} \times f_{2(CL)} = f_{OL} \times A = f_{\text{unitária}}$$

onde: A_{CL} é o ganho de tensão de malha fechada.

$f_{2(CL)}$ é a frequência de corte superior de malha fechada.

A é o ganho de tensão de malha aberta.

f_{OL} é a frequência de corte superior de malha aberta.

$f_{\text{unitária}}$ é a frequência na qual o ganho do amplificador operacional é um.

O produto ganho-largura de banda é o meio mais rápido de comparar amplificadores. Quanto maior o produto ganho-largura de banda, mais altas as frequências que podemos conseguir tendo ainda o mesmo ganho útil.