

Circuitos Lineares Usando o Amplificador Operacional

Introdução

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.

Um circuito usando amplificador operacional é caracterizado como um circuito linear quando o mesmo opera de forma que o sinal que for introduzido na entrada do circuito não sofre alteração em suas características. Por exemplo, se na entrada do circuito for introduzida uma onda senoidal, este sinal será processado segundo a finalidade que se propõe o circuito mas não haverá a possibilidade de que o sinal na saída do circuito seja alterado.

Circuitos que não são capazes de alterar forma de onda são caracterizados como circuitos lineares. Isto é dito por que há uma série de circuitos que são modificadores de forma de onda e, portanto, são tratados como circuitos não lineares.

O que se desenvolverá a seguir é a análise de alguns circuitos que se podem dizer que são circuitos lineares.

Amplificador não inversor

Como primeiro circuito que se caracteriza como um circuito linear pode-se citar o amplificador não inversor. O que se pretende neste circuito é a possibilidade de se amplificar um sinal que foi injetado na entrada do mesmo.

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.

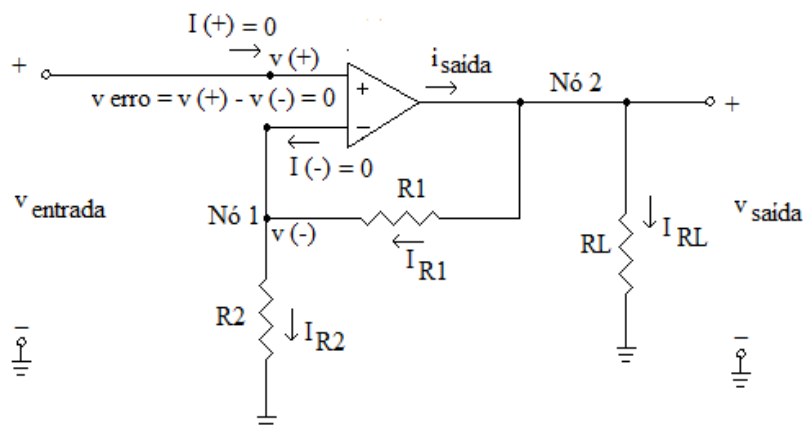


figura 1

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 $v(+) \approx v(-) \approx v_{\text{entrada}}$

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

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

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

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

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

Amplificador inversor

O segundo circuito que se pode analisar como um circuito linear é o amplificador inversor. Nele não há alteração na forma do sinal de saída se comparada com a forma que ele tinha na entrada do circuito. A única alteração existente entre o sinal de entrada e o sinal de saída é a defasagem de 180° entre os dois sinais. De forma que se o sinal de entrada for senoidal o sinal de saída será senoidal amplificado e defasado de 180° em relação ao sinal de entrada.

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 2.

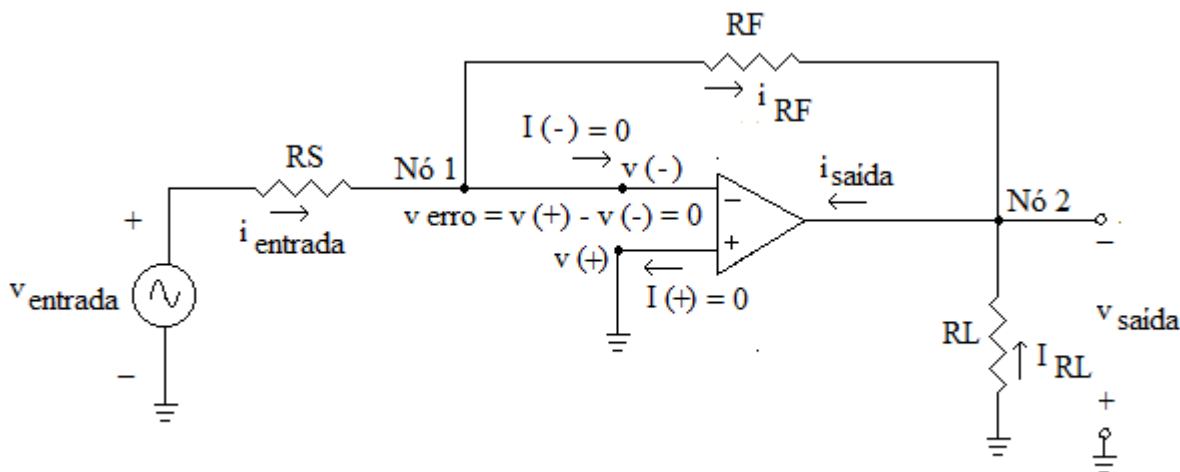


figura 2

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 temos:

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

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

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

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

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

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

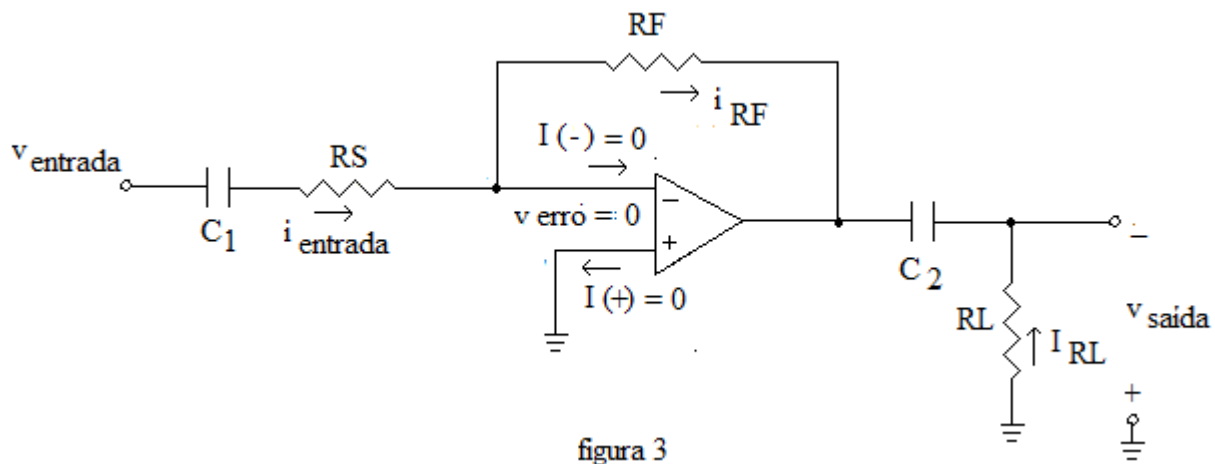
$$\text{Ganho de tensão de malha fechada} = v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} = A_{CL} = -R_F / R_S$$

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” tensão zero e corrente zero.

Amplificador CA usando o circuito inversor e o circuito não inversor

Existem ocasiões nas quais se torna necessário bloquear a componente CC de um sinal e amplificar apenas a sua componente CA. Estes amplificadores de sinais alternados (CA) são facilmente obtidos a partir do amplificador inversor e do amplificador não inversor.

Para se obter um amplificador CA inversor basta acrescentar os capacitores C_1 e C_2 , respectivamente, na entrada e na saída de um amplificador inversor, conforme está indicado na figura 3. A polarização da entrada inversora é feita pela malha de realimentação.



É conveniente projetar o circuito de tal modo que os capacitores C_1 e C_2 tenham reatâncias capacitivas (X_C) aproximadamente iguais a zero na faixa de passagem de sinais CA. Assim sendo, costuma-se adotar como regra prática um valor R_1 aproximadamente 10 vezes maior que X_{C1} , ou seja, $X_{C1} = 0,1 R_1$.

Logo:

$$R_1 \geq 10 / 2 \pi f_{\text{mínima}} C_1$$

onde $f_{\text{mínima}}$ é a frequência mínima a ser injetada na entrada do circuito.

Da mesma forma, se uma carga R_L for conectada à saída do circuito, o valor da mesma deverá ser aproximadamente 10 vezes maior do que X_{C2} . Portanto, tem-se:

$$R_L \geq 10 / 2 \pi f_{\text{mínima}} C_2$$

Esta equação permite obter o valor de C_2 quando se conhece $f_{\text{mínima}}$ e R_L .

Depois que os capacitores forem curto circuitados, tem-se então:

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

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

Enquanto os capacitores não forem curto circuitados não haverá tensão na saída do circuito.

Na figura 4 tem-se a representação de um amplificador CA usando o circuito não inversor. Porém, torna-se necessário a inclusão do resistor R_3 , a fim de se garantir o retorno CC para o terra e a consequente polarização da entrada não inversora, já que C_1 impede que o mesmo se faça através da

fonte de sinal v_{entrada} . Este retorno CC é fundamental pois a polarização do estágio de entrada está condicionado ao mesmo. Sem o resistor R_3 o circuito não funcionará.

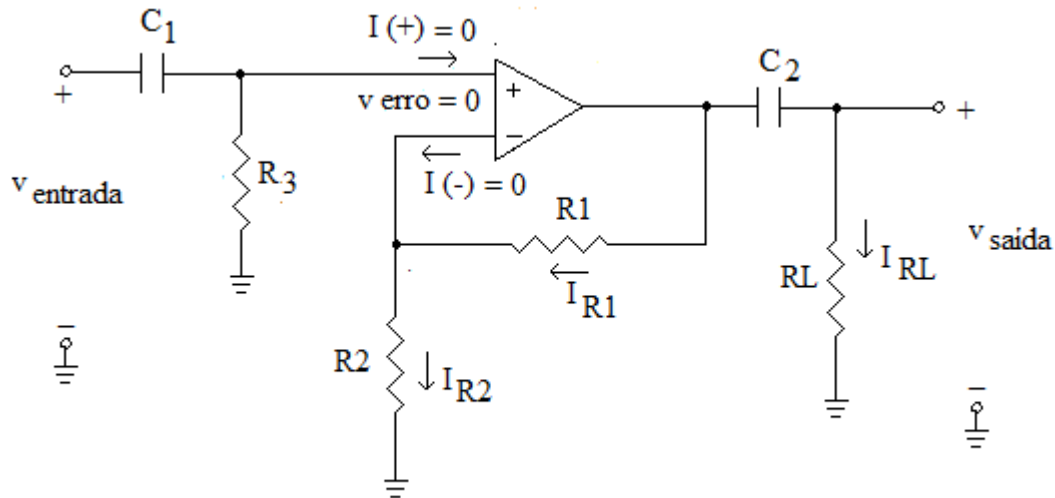


figura 4

Como no circuito anterior:

$$R_3 \geq 10 / 2 \pi f_{\text{minima}} C_1$$

$$R_L \geq 10 / 2 \pi f_{\text{minima}} C_2$$

Depois que os capacitores forem curto circuitados, tem-se então:

$$v_{\text{saida}} / v_{\text{entrada}} = (R_1 + R_2) / R_2$$

$$\text{Ganho de tensão de malha fechada} = v_{\text{saida}} / v_{\text{entrada}} = A_{CL} = (R_1 + R_2) / R_2$$

Enquanto os capacitores não forem curto circuitados não haverá tensão na saída do circuito.

O somador não inversor

O amplificador não inversor não é capaz de gerar soma a partir de um número qualquer de entradas como será mostrado no amplificador somador inversor, mas é possível se gerar soma de sinais com o amplificador não inversor em situação bem particular. A figura 5 mostra esta possibilidade.

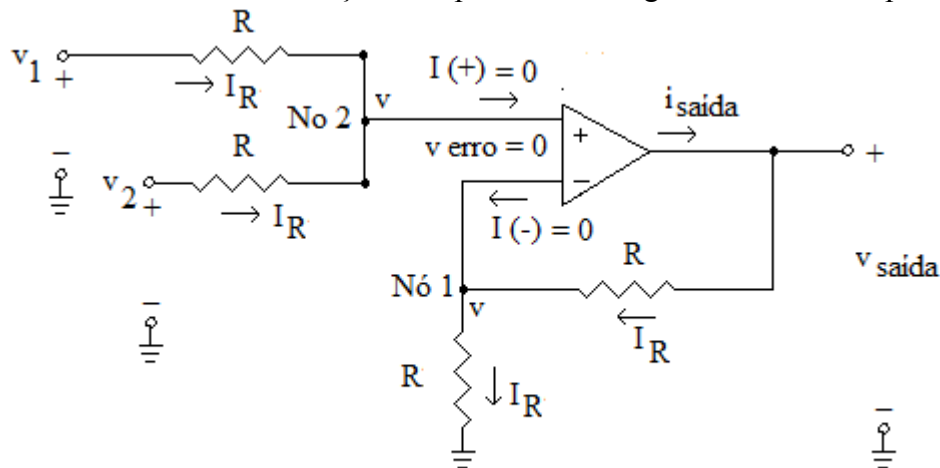


figura 5

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 2 temos:

$$I_R + I_R = I(+)$$

$$I(+)=0$$

$$I_R + I_R = 0$$

$$\begin{aligned}
 (v_1 - v) / R + (v_2 - v) / R &= 0 \\
 (v_1 - v) + (v_2 - v) &= 0 \\
 v_1 + v_2 - 2v &= 0 \\
 2v &= v_1 + v_2 \\
 v &= (v_1 + v_2) / 2
 \end{aligned}$$

A tensão de saída será expressa por:

$$\begin{aligned}
 v_{\text{saída}} &= [(R + R) / R] \times (v) = 2 \times (v_1 + v_2) / 2 \\
 v_{\text{saída}} &= v_1 + v_2
 \end{aligned}$$

Se um terceiro sinal de entrada for introduzido no circuito da figura 3 já não será mais possível afirmar que a tensão de saída será a soma dos três sinais v_1 , v_2 e v_3 . Se a operação for efetuada se perceberá que o sinal de saída aparecerá como sendo:

$$V_{\text{saída}} = [2 (v_1 + v_2 + v_3) / 3]$$

Com isto pode-se afirmar que não é possível se usar o amplificador somador não inversor para produzir a soma de um número qualquer de sinais nas entradas e obter na saída a soma de tais sinais.

O somador inversor

No caso do somador inversor é possível se injetar um número qualquer de entradas e obter na saída a soma de tais sinais apenas com a defasagem de 180° que é própria do circuito inversor. Vai-se mostrar a ideia para duas entradas e, em seguida para três entradas. Tais circuitos são mostrados nas figuras 6.1 e 6.2.

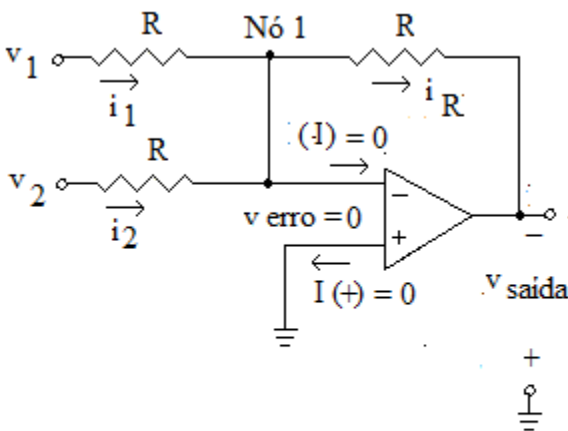


figura 6.1

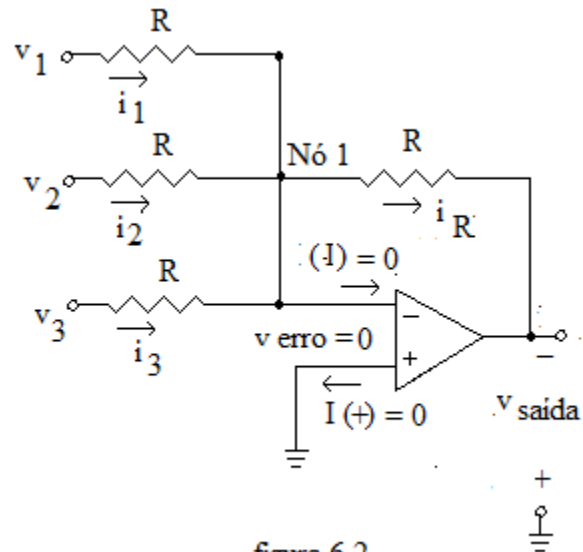


figura 6.2

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 no circuito da figura 6.1, temos:

$$\begin{aligned}
 i_1 + i_2 &= i_R \\
 [(v_1 - 0) / R] + [(v_2 - 0) / R] &= [(0 - v_{\text{saída}}) / R] \\
 v_1 + v_2 &= -v_{\text{saída}} \\
 v_{\text{saída}} &= -(v_1 + v_2)
 \end{aligned}$$

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 no circuito da figura 6.2,temos:

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= i_R \\ [(v_1 - 0)] / R + [(v_2 - 0)] / R + [(v_3 - 0)] / R &= [(0 - v_{saída})] / R \\ v_1 + v_2 + v_3 &= -v_{saída} \\ v_{saída} &= -(v_1 + v_2 + v_3) \end{aligned}$$

A regra para gerar soma de várias entradas com o circuito inversor é geral como se verá na figura 7 que apresenta o somador com quatro entradas.

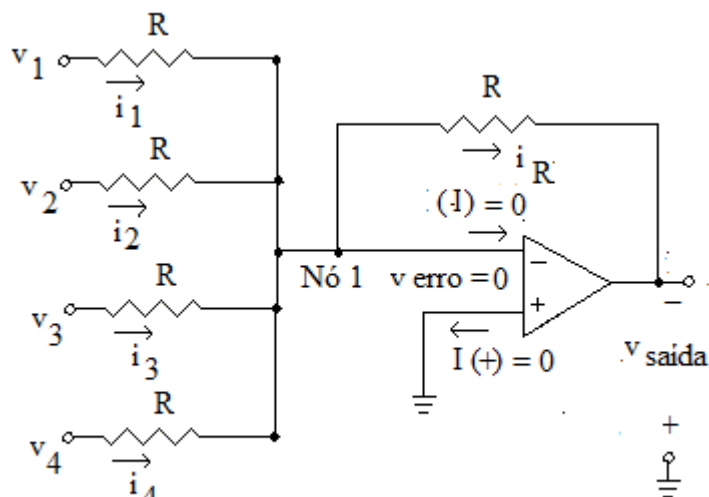


figura 7

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 no circuito da figura 7,temos:

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 &= i_R \\ [(v_1 - 0)] / R + [(v_2 - 0)] / R + [(v_3 - 0)] / R + [(v_4 - 0)] / R &= [(0 - v_{saída})] / R \\ v_1 + v_2 + v_3 + v_4 &= -v_{saída} \\ v_{saída} &= -(v_1 + v_2 + v_3 + v_4) \end{aligned}$$

A versatilidade do somador inversor permite que se use o mesmo para misturar dois ou mais sinais de áudio como mostra a figura 8. Os resistores ajustáveis permitem estabelecer o nível de tensão de cada entrada, e o controle de ganho, feito pelo resistor de realimentação, permite ajustar o volume do sinal de saída.

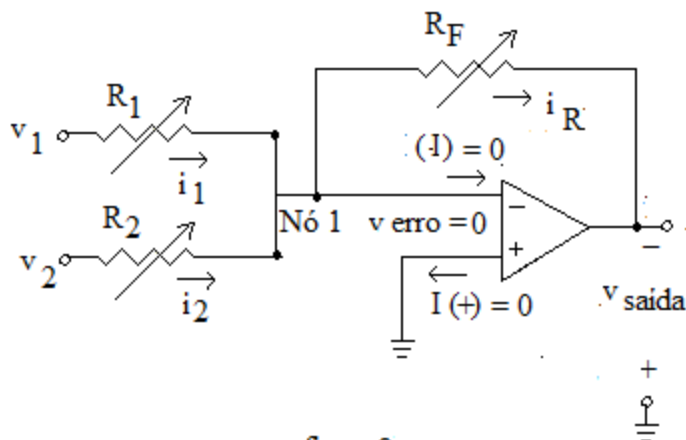


figura 8

Aplicando a lei de Kirchhoff no nó 1 no circuito da figura 8 temos:

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 &= i_R \\ [(v_1 - 0)] / R_1 + [(v_2 - 0)] / R_2 &= [(0 - v_{saída})] / R_F \\ (v_1) / R_1 + (v_2) / R_2 &= (-v_{saída}) / R_F \\ v_{saída} &= -R_F \times [(v_1) / R_1 + (v_2) / R_2] \end{aligned}$$

O somador inversor também se presta para gerar circuitos que conseguem converter um sinal digital num equivalente analógico como mostra a figura 9. Tal circuito é conhecido como um conversor D/A. No circuito mostrado na figura 9 há quatro entradas representando um número binário. Devido aos resistores de entrada, a saída é dada por:

$$v_{saída} = -(v_4 + 0,5v_3 + 0,25v_2 + 0,125v_1)$$

As tensões de entrada são digitais, portanto elas têm somente dois valores: baixo (0) ou alto (1). A tensão de saída é o equivalente analógico da tensão de entrada.

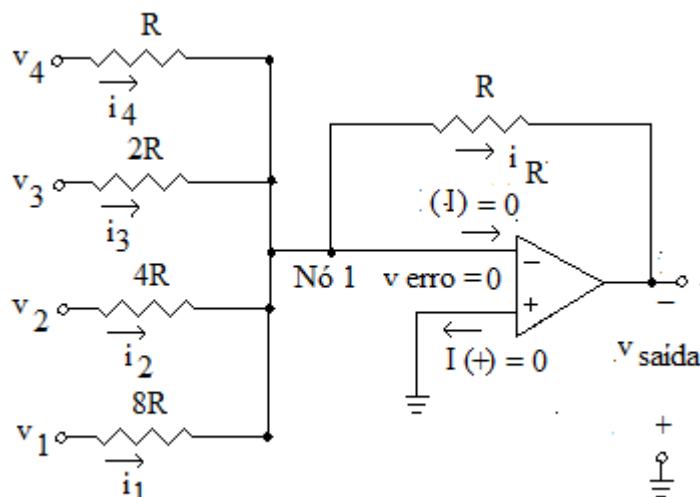


figura 9

O amplificador subtrator (amplificador diferencial)

Este circuito permite que se obtenha na saída uma tensão igual à diferença entre os sinais aplicados nas entradas, multiplicado por um ganho de tensão. Trata-se de um amplificador de inúmeras aplicações na área de instrumentação eletrônica. A figura 10 mostra tal configuração.

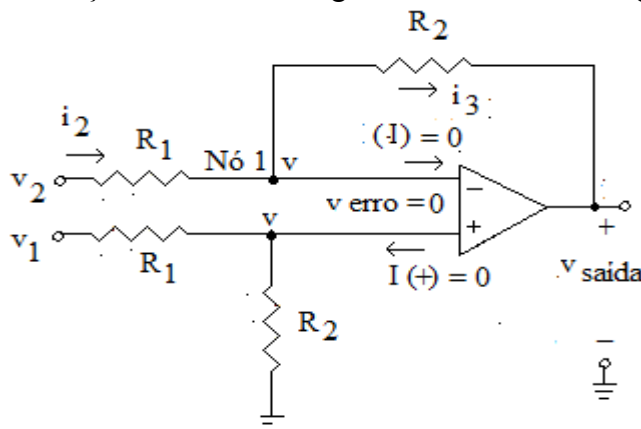


figura 10

Pode-se usar o teorema da superposição no circuito da figura 10 para se calcular $v_{\text{saída}}$.

Relação entre $v_{\text{saída}}$ e v_1 . v_2 estará curto-circuitada.

$$v = (R_2 \times v_1) / (R_1 + R_2)$$

$v_{\text{saída}1} = [(R_1 + R_2) / R_1] \times v$ Relação para o amplificador não inversor

$$v_{\text{saída}1} = [(R_1 + R_2) / R_1] \times [(R_2 \times v_1) / (R_1 + R_2)]$$

$$v_{\text{saída}1} = (R_2 / R_1) \times v_1$$

Relação entre $v_{\text{saída}}$ e v_2 . v_1 estará curto-circuitada.

$v_{\text{saída}2} = -(R_2 / R_1) \times v_2$ Relação para o amplificador inversor

$$v_{\text{saída}} = v_{\text{saída}1} + v_{\text{saída}2}$$

$$v_{\text{saída}} = (R_2 / R_1)(v_1 - v_2)$$

O amplificador de instrumentação

Chama-se amplificador de instrumentação a um tipo especial de circuito formado por alguns amplificadores operacionais e que se permite obter algumas características citadas a seguir:

Impedância de entrada extremamente elevada.

Impedância de saída extremamente baixa.

Razão de Rejeição do modo comum extremamente elevada.

Tensão de offset de entrada extremamente baixa.

Um amplificador de instrumentação é usado especialmente em aplicações onde as entradas são uma pequena tensão diferencial e uma grande tensão de modo comum. É usado em circuitos de controle de processos industriais e em circuitos de biomedicina. Normalmente um dos sinais de entrada (v_1 ou v_2) é proveniente de sensores ou transdutores colocados nas malhas de controle do sistema e o outro sinal é fixado num determinado valor denominado referência ou “set-point”, o qual “informa” ao sistema a condição na qual o mesmo está estabilizado ou, em outras palavras, fornece a condição desejada para o sistema. A figura 11 mostra tal configuração e o resistor variável no circuito serve para fazer o ajuste da razão de rejeição do modo comum do circuito. O amplificador de instrumentação é, na verdade, a junção do amplificador subtrator (ou diferencial) e dois circuitos seguidores de tensão.

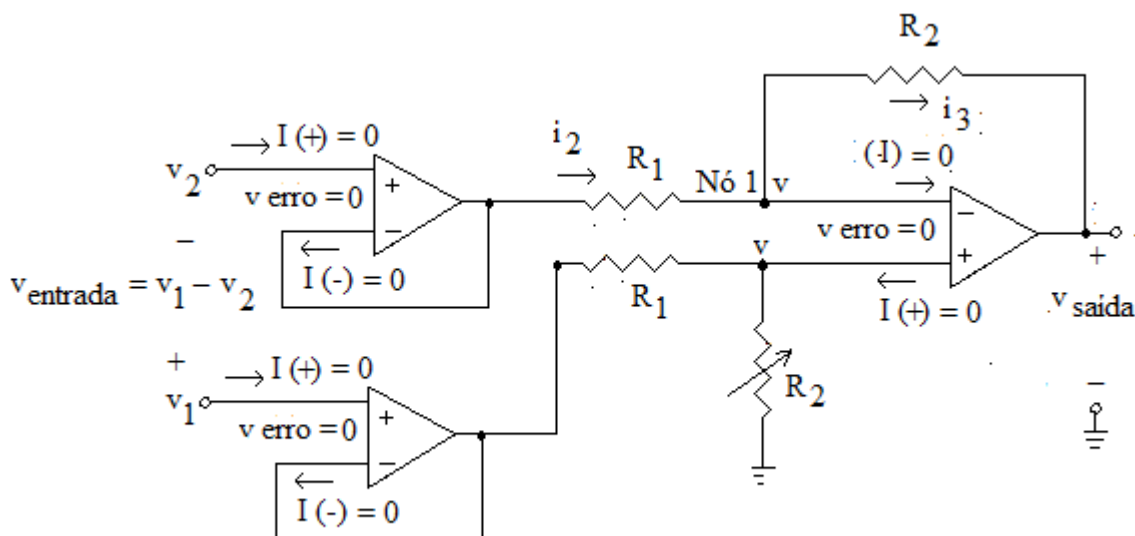


figura 11

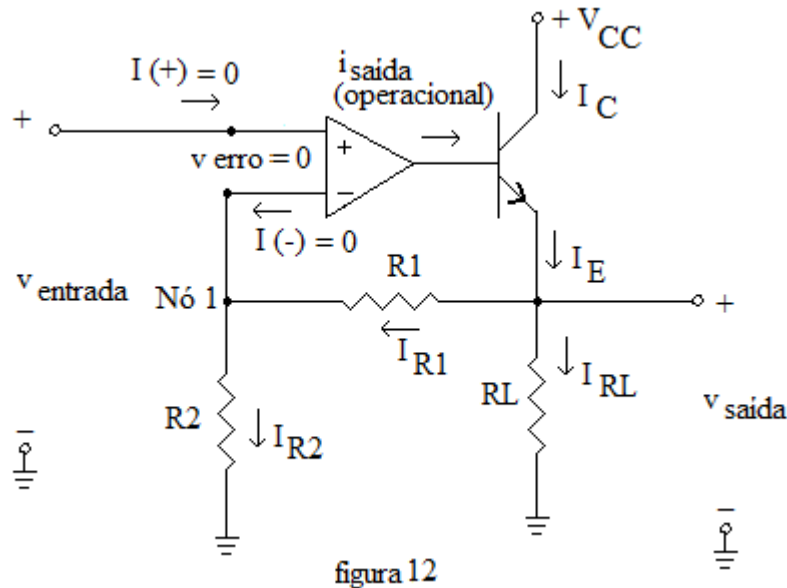
$$v_{\text{saída}} = (R_2 / R_1) \times v_{\text{entrada}}$$

$$v_{\text{saída}} = (R_2 / R_1) \times (v_1 - v_2)$$

Reforçadores de corrente para os amplificadores de tensão

A corrente máxima de saída de um amplificador operacional é limitada. Por exemplo, o 741 tem uma saída máxima de corrente de 25 mA. Se a carga exigir mais do que isto, é preciso acrescentar à saída do circuito um reforçador de corrente.

A figura 12 mostra um circuito reforçador de corrente unidirecional. Com o transistor dentro da malha de realimentação, a realimentação negativa automaticamente ajusta V_{BE} para o valor exigido. O circuito é composto de um amplificador não inversor acrescentado de um seguidor de tensão ligado ao transistor. O amplificador não inversor só precisa fornecer a corrente de base do transistor. A corrente de carga é fornecida pelo transistor. Como consequência, o reforçador de corrente permite usar resistências de carga menores.



$$v_{\text{saída}} = [(R_1 + R_2) / R_2] \times v_{\text{entrada}}$$

$$I_E \approx I_C \quad I_E = I_{R_L} + I_{R_1}$$

$$I_B = I_C / \beta_{CC}$$

$$i_{\text{saída(operacional)}} = I_B$$

A maior desvantagem do circuito reforçador de corrente unidirecional é a sua corrente de carga só fluir numa direção. Uma forma de se obter uma corrente de carga bidirecional é o seguidor do emissor push pull classe B, como mostra a figura 13. Neste caso, o ganho de tensão de malha fechada é $ACL = -R_F / R_S$.

Quando a tensão de entrada for positiva, o transistor T2 conduz e a tensão da carga é negativa. Por outro lado, quando a tensão de entrada for negativa, o transistor T1 conduz e a tensão da carga é positiva.

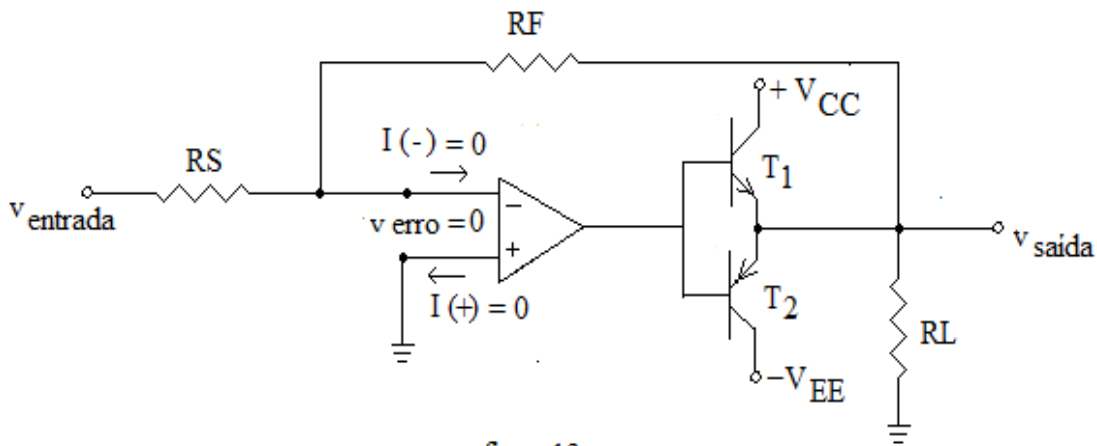


figura 13

Fontes de corrente controladas pela tensão

A figura 14 mostra um circuito que pode se chamado de fonte de corrente controlada por tensão e a corrente de saída independe do valor da resistência de carga. Como as correntes do coletor e do emissor são praticamente iguais, pode-se dizer que a corrente de carga flui através do resistor de realimentação R. A corrente de carga fica estabilizada.

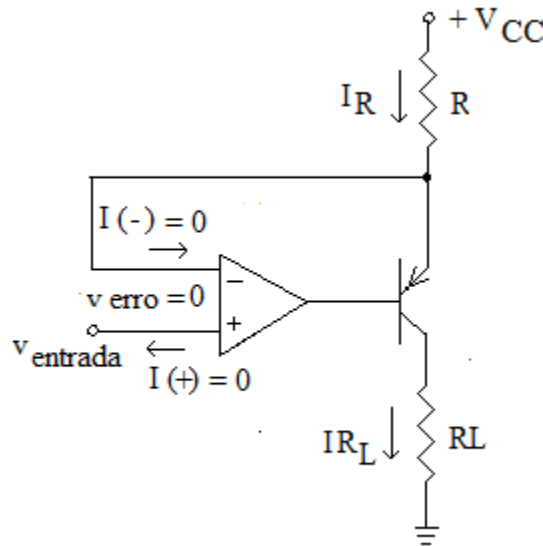


figura 14

$$I_{R_L} = I_R = (V_{CC} - v_{\text{entrada}}) / R$$

Há um limite para corrente de saída que o circuito pode fornecer. A corrente de base do transistor é igual a $i_{\text{saída}} / \beta_{CC}$. Como o amplificador operacional tem que alimentar essa corrente de base, $i_{\text{saída}} / \beta_{CC}$ precisa ser menor que a máxima corrente de saída do amplificador operacional dada pelo fabricante.

Há também um limite na tensão da saída do circuito. À medida que a resistência da carga aumenta, a tensão da carga aumenta. Eventualmente, o transistor cai fora da região ativa porque ele entra na região de saturação. Portanto, a corrente de saída multiplicada pela maior resistência de carga não pode ultrapassar a tensão v_{entrada} .

A figura 15 mostra um outro circuito de fonte de corrente controlada pela tensão com a corrente de saída proporcional à tensão de entrada. Este circuito é útil sempre que se tiver que converter uma tensão de entrada numa corrente de saída. A limitação deste circuito está no fato de que somente tensões positivas podem ser geradas através da carga devido à corrente unidirecional no transistor de saída.

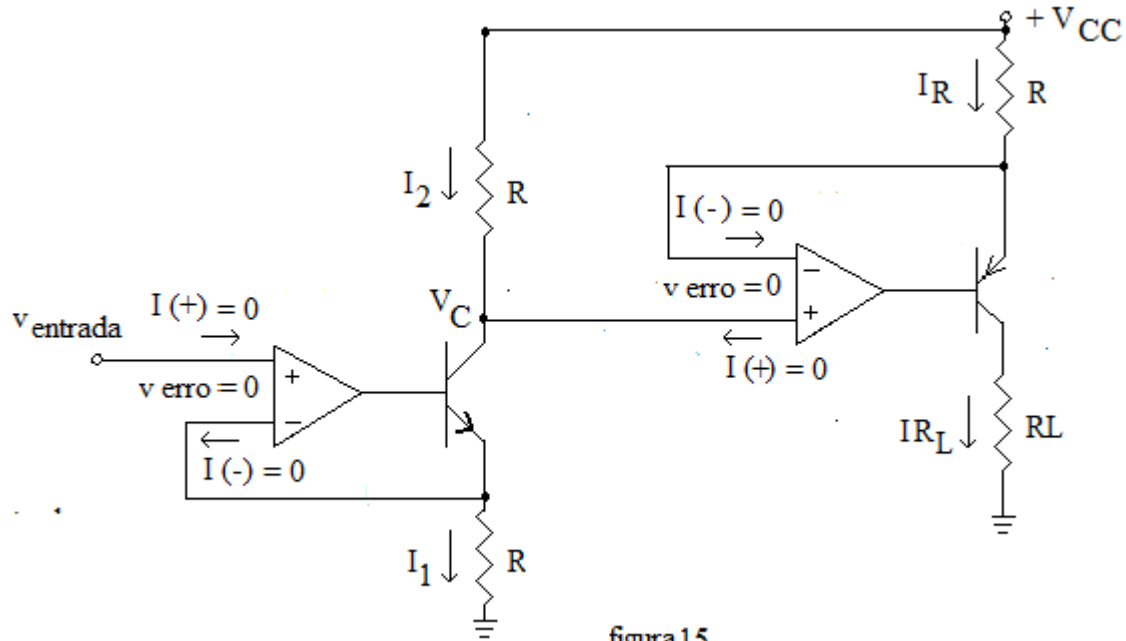


figura15

$$I_1 = v_{\text{entrada}} / R$$

$$I_2 \approx I_1 = v_{\text{entrada}} / R$$

$$V_C = V_{CC} - R I_2 = V_{CC} - v_{\text{entrada}}$$

$$I_R = (V_{CC} - V_C) / R = (V_{CC} - V_{CC} - v_{\text{entrada}}) / R$$

$$I_R = v_{\text{entrada}} / R$$

$$I_{R_L} \approx I_R = v_{\text{entrada}} / R$$