

Sumário

Introdução	5
Circuitos lineares com amplificador operacional	6
Curva de transferência de um amplificador operacional	6
Alargamento da região linear de um amplificador operacional	11
Amplificador inversor	15
Ganho	16
Impedância de entrada	18
Impedância de saída	18
Amplificador não inversor	19
Ganho	19
Impedância de entrada	21
Impedância de saída	21
Circuito seguidor de tensão	21
Impedância	22
Circuitos aritméticos com <i>AO</i>	22
Circuito somador	22
Circuito subtrator	25
Apêndice	28
Questionário	28
Bibliografia	29



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O amplificador operacional foi introduzido no fascículo anterior, onde foram apresentadas as características fundamentais desse componente e ajustes necessários para o seu correto funcionamento.

Neste fascículo, são apresentados exemplos de circuitos que fazem uso do amplificador operacional. Alguns dos circuitos aqui mostrados são circuitos lineares tipicamente utilizados na indústria e no lazer.

Ao final deste fascículo o leitor deverá estar apto a identificar os circuitos lineares e conhecer os seus princípios básicos de funcionamento.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Amplificador operacional.

Circuitos lineares com amplificador operacional

O ganho de um *AO* em malha aberta, ou seja, sem realimentação, é altíssimo, podendo atingir fatores acima de 10.000. No entanto, o ganho só permanece constante entre limites bem definidos da tensão diferencial de entrada, conforme discutido a seguir.

CURVA DE TRANSFERÊNCIA DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Assumindo inicialmente a situação ilustrada na **Fig.1**, em que a tensão diferencial de entrada $\Delta V_i = V_A - V_B$ é positiva e crescente, a tensão de saída V_o cresce na mesma proporção, de acordo com a relação

$$V_o = A_d \Delta V_i \quad (1)$$

onde A_d é o ganho do amplificador.

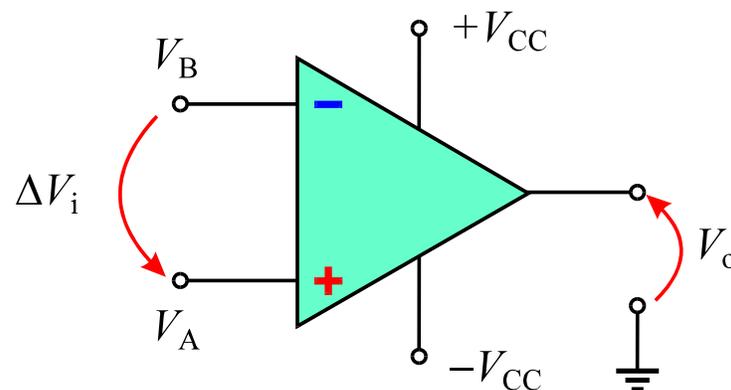


Fig.1 Amplificador operacional submetido a uma tensão diferencial positiva.

É de se esperar, no entanto, que a tensão de saída, quando positiva, não supere o valor $+V_{CC}$ imposto externamente pela fonte de alimentação. Isso implica que a **Eq.(1)** permanece válida até o limite de tensão diferencial de entrada $\Delta V_{i,máx}$, tal que a tensão de saída se aproxima do valor $+V_{CC}$, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.2**.

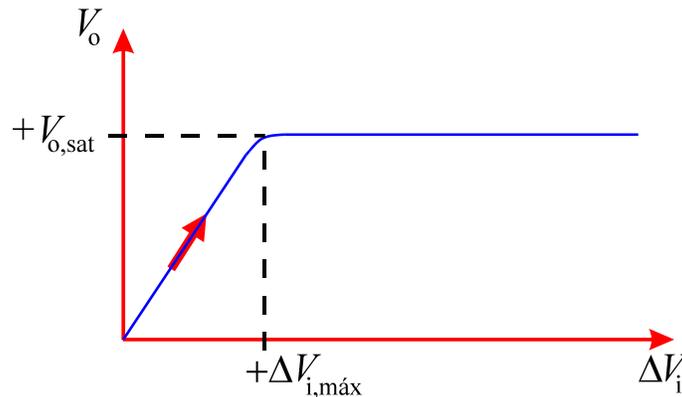


Fig.2 Variação da tensão de saída devido à aplicação de uma tensão diferencial positiva e crescente na entrada do amplificador operacional.

Como se pode observar na **Fig.2**, a partir da condição

$$\Delta V_i > \Delta V_{i,máx}$$

a tensão de saída **satura**, assumindo um valor $V_{o,sat}$. A partir dessa condição, nenhum aumento na tensão ΔV_i produz aumento significativo na tensão de saída, e esta permanece praticamente constante ou **saturada** no valor $V_{o,sat}$. O valor $V_{o,sat}$ é geralmente um pouco inferior ao valor V_{CC} .

De forma semelhante, aplicando-se uma tensão diferencial ΔV_i negativa e decrescente na entrada do *AO*, a tensão de saída V_o varia na mesma proporção, isto é, torna-se negativa e decrescente, como expresso pela **Eq.(1)**. Essa variação ocorre até o limite em que a tensão de entrada atinge o valor $(-\Delta V_{i,máx})$.

A partir da condição

$$\Delta V_i < -\Delta V_{i,max}$$

a tensão de saída **satura** no valor negativo $-V_{o,sat}$, e nenhum decréscimo adicional na tensão de entrada produz variação significativa na tensão de saída, como mostrado na **Fig.3**.

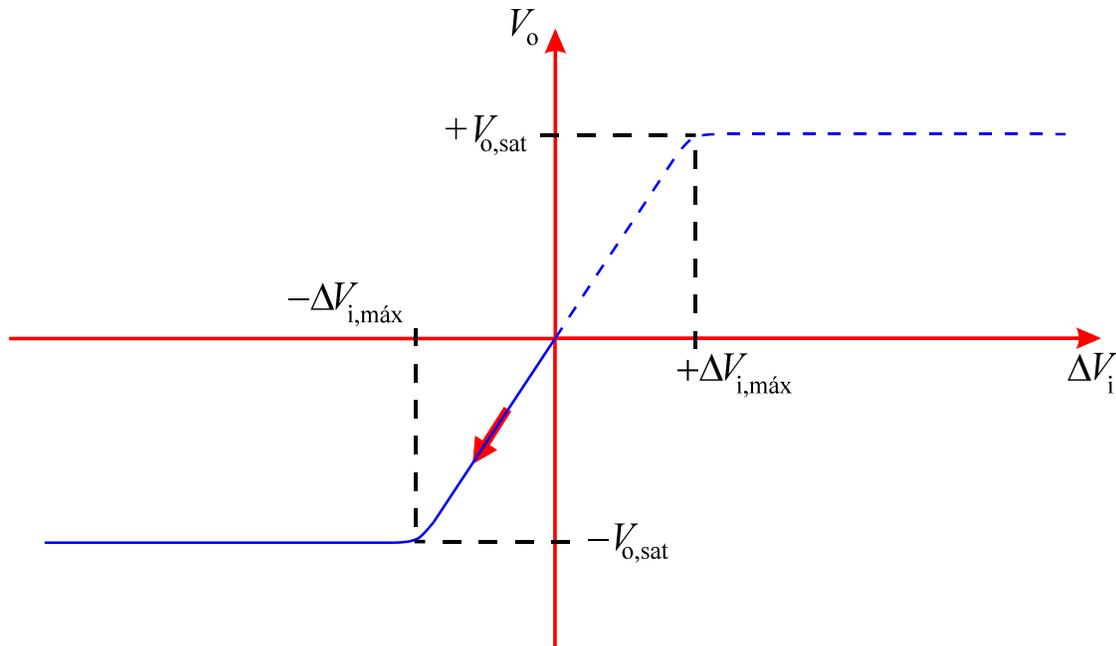


Fig.3 Variação da tensão de saída devido à aplicação de uma tensão diferencial negativa e decrescente na entrada do amplificador operacional.

A **Fig.4** mostra a **curva de transferência** de um amplificador operacional, onde podem ser identificadas três regiões de operação:

- Região linear.
- Região de saturação positiva.
- Região de saturação negativa.

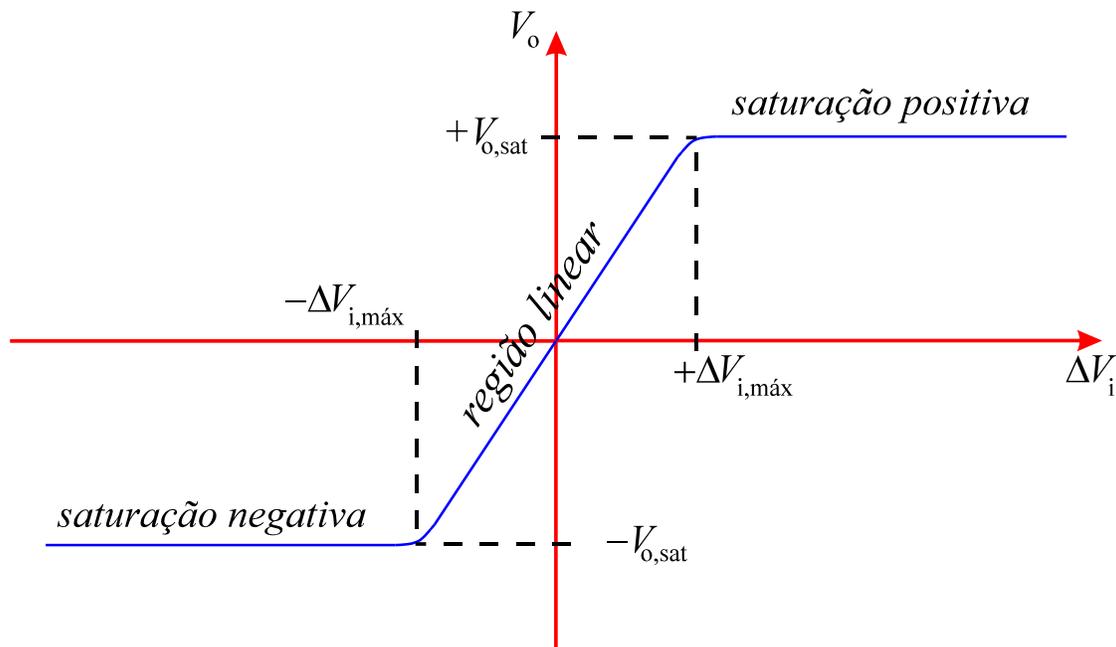


Fig.4 Curva de transferência de um AO.

Região linear: Essa região corresponde à porção da curva em que o amplificador opera com um ganho praticamente constante, sendo definida a partir da condição

$$-\Delta V_{i,\text{máx}} \leq \Delta V_i \leq +\Delta V_{i,\text{máx}}$$

Na região linear, para o caso de um AO operando sem realimentação, a tensão de saída pode ser obtida a partir da tensão diferencial de entrada pela relação linear

$$V_o = A_d \Delta V_i$$

onde A_d é o ganho em malha aberta do AO .

Região de saturação positiva: Essa corresponde à porção da curva em que a tensão de saída é positiva e constante, sendo independente da tensão diferencial de entrada. A região de saturação positiva ocorre na condição

$$\Delta V_i > +\Delta V_{i,\text{máx}}$$

e a tensão de saída é dada por

$$V_o = +V_{o,\text{sat}}$$

Região de saturação negativa: Essa região corresponde à porção da curva em que a tensão de saída é negativa e constante, sendo também independente da tensão diferencial de entrada. A região de saturação negativa ocorre na condição

$$\Delta V_i < -\Delta V_{i,\text{máx}}$$

e a tensão de saída é dada por

$$V_o = -V_{o,\text{sat}}$$

É importante observar que quanto maior for o ganho em malha aberta de um AO , menor será a largura da região linear. Isso ocorre porque um alto ganho em malha aberta implica uma maior declividade da curva de transferência na região linear, conforme ilustrado na **Fig.5**.

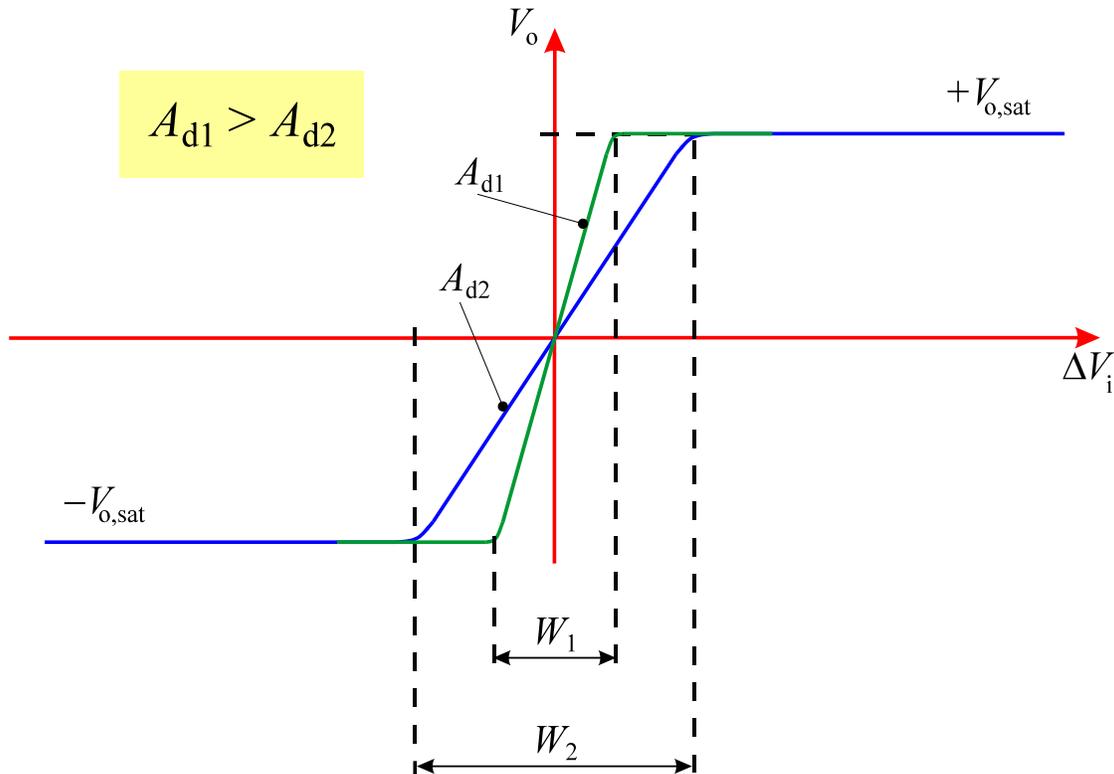


Fig.5 Curvas de transferência de AOs de ganhos distintos.

Como pode ser observado na **Fig.5**, as duas curvas se referem a amplificadores operacionais com ganhos em malha aberta A_{d1} e A_{d2} , com $A_{d1} > A_{d2}$. Em geral os valores de tensão de saturação permanecem praticamente invariáveis para tipos distintos de amplificadores operacionais, uma vez que as tensões de alimentação são tipicamente ± 15 V. Dessa forma, as larguras das regiões lineares, representadas na **Fig.5** pelos parâmetros W_1 e W_2 , obedecem à condição $W_1 < W_2$.

Com base na **Fig.5**, pode concluir-se que AOs operando em níveis idênticos de tensão de alimentação, exibem ganhos e larguras das respectivas regiões lineares obedecendo à condição

$$A_{d1}W_1 \approx A_{d2}W_2 \approx \text{constante} \quad (2)$$

ALARGAMENTO DA REGIÃO LINEAR DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A operação em condições normais de um amplificador operacional é usualmente feita na região linear, pois é nessa região que a tensão de saída pode ser controlada pela tensão aplicada à entrada do componente.

Como discutido na seção anterior, um alto ganho em malha aberta implica uma região linear de largura estreita, da ordem de alguns milivolts na maioria dos casos.

A **Fig.6** mostra a curva de transferência típica de um *AO* com ganho em malha aberta $A_d = 10.000$, que exibe uma região linear de largura $W = 2 \times 1,3 = 2,6$ mV. Como pode ser aí observado, um *AO* operando em malha aberta estaria limitado a aceitar sinais de entrada de poucos milivolts.

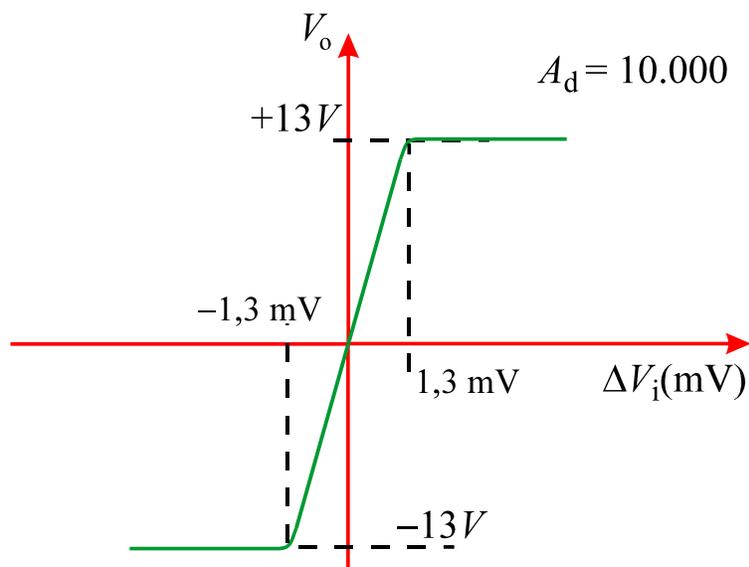


Fig.6 Curva de transferência de um *AO* típico.

Como mostrado anteriormente na **Eq.(2)**, o produto $A_d \times W$ de um *AO* é aproximadamente constante. Aquela expressão sugere que a largura da região de operação linear de um *AO* pode ser ampliada através da redução do ganho do dispositivo.

Como o amplificador operacional exibe um ganho em malha aberta bem definido, o fator de amplificação só pode ser alterado fazendo-se uma realimentação externa entre os terminais de saída e de entrada do amplificador.

A técnica de **realimentação negativa** produz a redução de ganho desejada e consiste em retornar uma parte do sinal de saída para a entrada **inversora** do amplificador, através de um circuito externo.

A **Fig.7** mostra um *AO* submetido a uma realimentação negativa com o uso de dois resistores externos que formam um divisor de tensão.

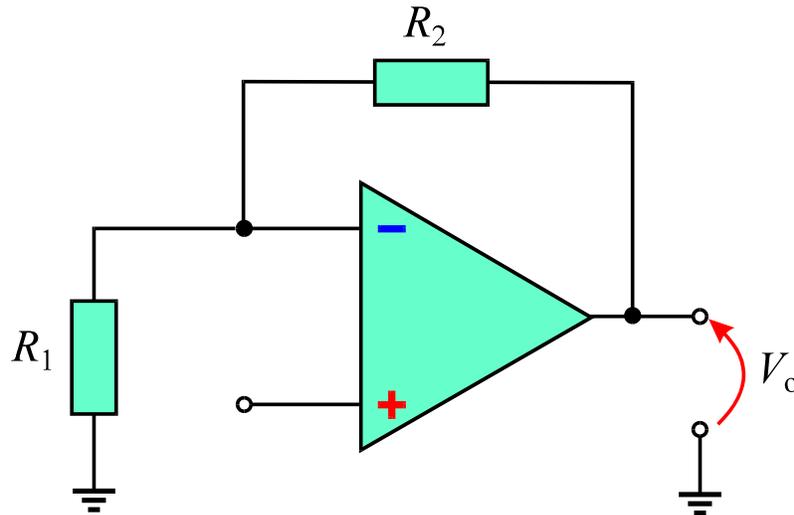


Fig.7 Amplificador operacional sujeito à realimentação negativa por intermédio de um divisor de tensão.

Exemplo 1: Considere um *AO* com ganho em malha aberta $A_d=10.000$ e tensão de saturação $V_{o,sat} = 13 \text{ V}$. Como mostrado na **Fig.6**, a largura da região linear desse *AO* é $W = 2,6 \text{ mV}$. Admitindo que o *AO* esteja agora configurado com a realimentação negativa mostrada na **Fig.8** e que esta produza uma amplificação de 100 na tensão V_i , determinar a largura da região linear nessa nova configuração.

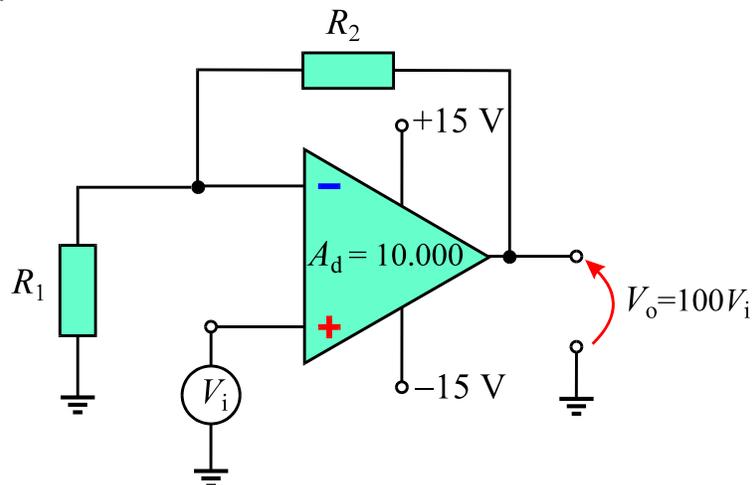


Fig.8 Amplificador operacional com realimentação negativa para o **Exemplo 1**.

Neste exemplo, admite-se que a realimentação negativa produz uma relação entre as tensões de entrada e saída dada por

$$V_o = 100 \times V_i$$

e o objetivo é determinar os valores limites do parâmetro V_i que levam o AO à condição de saturação.

Do gráfico da **Fig.6**, a tensão de saturação ali registrada é $V_{o,sat} = 13 \text{ V}$. Dessa forma, tem-se que o valor máximo do parâmetro V_i na região linear vale

$$V_{i,m\acute{a}x} = \frac{V_{o,sat}}{100} = \frac{13}{100}$$

$$\Rightarrow V_{i,m\acute{a}x} = 0,13 \text{ V} = 130 \text{ mV}$$

Assim a largura da região linear para o AO com realimentação negativa vale

$$W = 2V_{i,m\acute{a}x} = 2 \times 130 \text{ mV} = 260 \text{ mV}$$

Comparando-se com o AO operando em malha aberta, nota-se portanto que a largura da região linear aumentou 100 vezes, que corresponde ao fator de redução do ganho decorrente da realimentação externa.

A **Fig.9** mostra a característica de transferência para o AO com realimentação negativa, ilustrando o alargamento obtido na região linear em comparação à situação que seria obtida para operação em malha aberta.

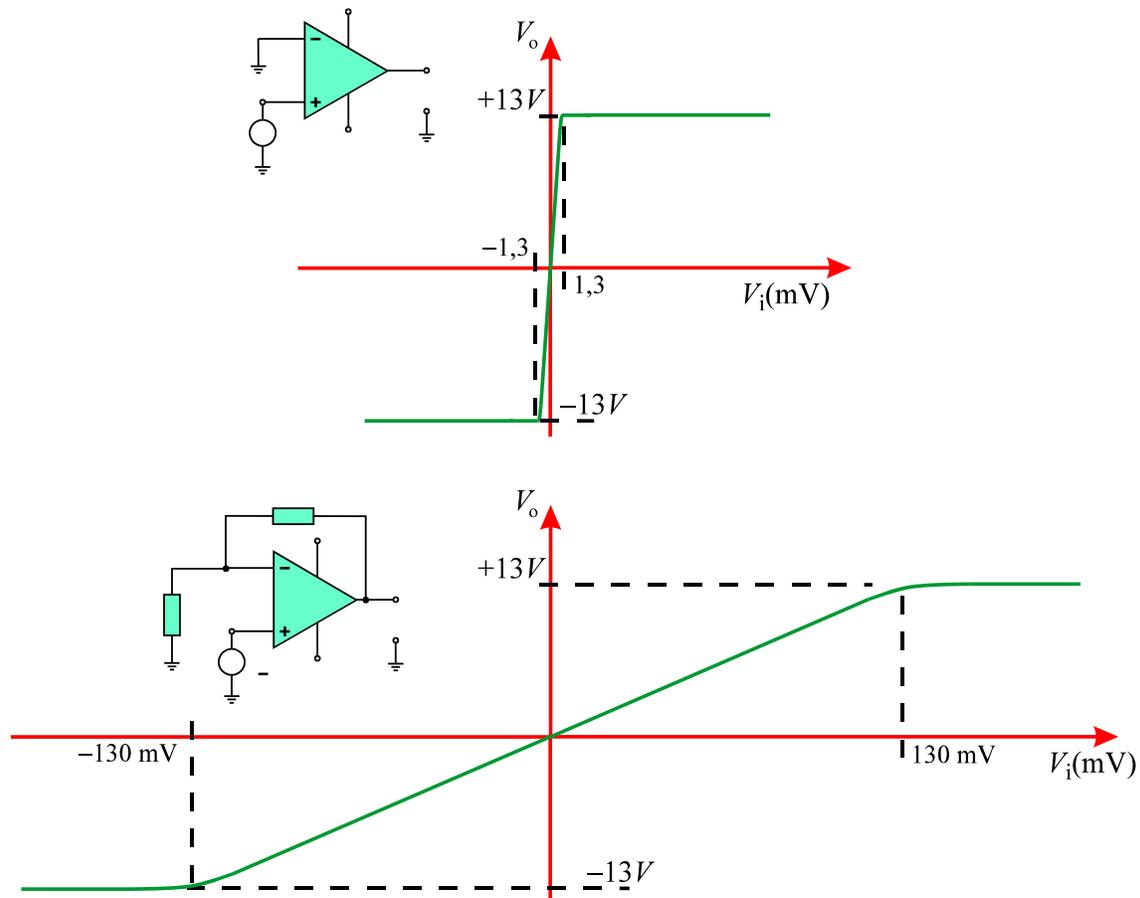


Fig.9 Curvas de transferência do AO em malha aberta e com realimentação negativa.



Circuitos que utilizam AOs operando na região linear são denominados de circuitos lineares.

Existem várias aplicações de circuitos lineares que utilizam amplificadores operacionais. Dentre esses circuitos, podem-se destacar aqueles freqüentemente utilizados na área de eletrônica, como por exemplo:

- Amplificador inversor.
- Amplificador não inversor.
- Circuito seguidor de tensão.
- Circuito somador.
- Circuito subtrator.

O funcionamento de cada um desses circuitos é descrito nas próximas seções.

AMPLIFICADOR INVERSOR

O amplificador operacional possui uma entrada de sinal inversora que permite a sua utilização como amplificador de sinal com inversão de fase entre entrada e saída, conforme ilustrado na **Fig.10**.

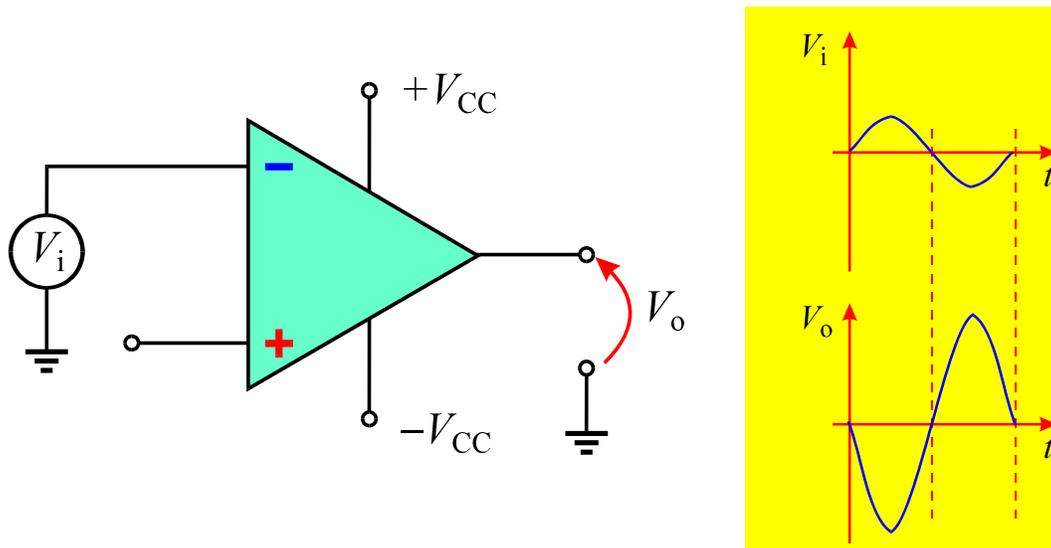


Fig.10 Sinais de entrada e saída em um amplificador inversor.

Como discutido anteriormente, para que o AO opere na região linear em uma faixa mais ampla de amplitudes do sinal de entrada, faz-se necessário acrescentar a malha de realimentação negativa ao circuito.

A **Fig.11** mostra a configuração de um amplificador inversor que utiliza um AO com realimentação negativa, onde não estão mostrados os outros terminais do componente. Como pode ser aí observado, o terminal não inversor do AO está aterrado e os resistores R_1 e R_2 são utilizados na malha de realimentação.

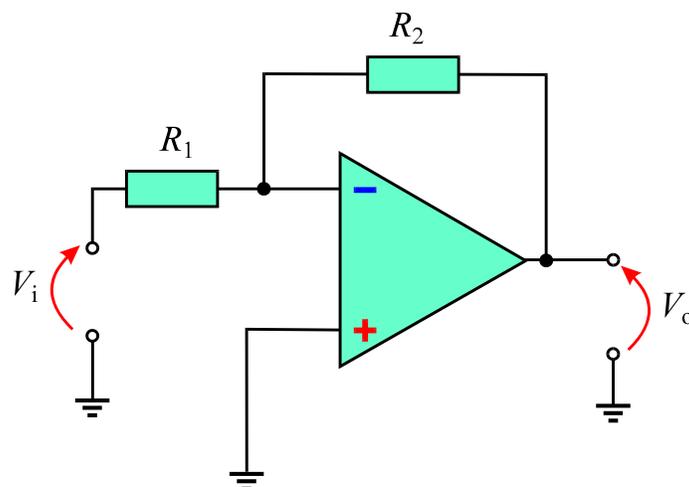


Fig.11 Configuração de um amplificador inversor.

GANHO

O ganho do amplificador inversor, representado pelo parâmetro A_V , depende apenas dos resistores da malha de realimentação. Essa dependência pode ser verificada analisando-se o circuito da **Fig.11**.

Toda análise de circuitos que utilizam AO s leva em conta uma propriedade fundamental do dispositivo:

 ***O amplificador operacional exibe uma impedância de entrada extremamente alta, e portanto a corrente injetada em qualquer de seus terminais de entrada é praticamente nula.***

Essa observação é extremamente importante e permite, na maioria dos casos, admitir que a impedância de entrada do AO seja tomada como infinita, o que equivale a considerar um valor nulo para a corrente injetada em qualquer de seus terminais.

Com essa hipótese, para o circuito mostrado na **Fig.12**, pode-se concluir que os terminais inversor e não inversor são equivalentes, uma vez que não existe fluxo de corrente entre os dois terminais.

A equivalência entre os dois terminais corresponde à igualdade entre os seus potenciais, ou seja, não existe queda de tensão entre os terminais inversor e não inversor. Como o terminal não inversor na **Fig.12** está aterrado, o mesmo deve ocorrer para o terminal inversor e seu potencial é praticamente nulo. Tudo se passa como se o terminal inversor estivesse submetido a um **terra virtual**.

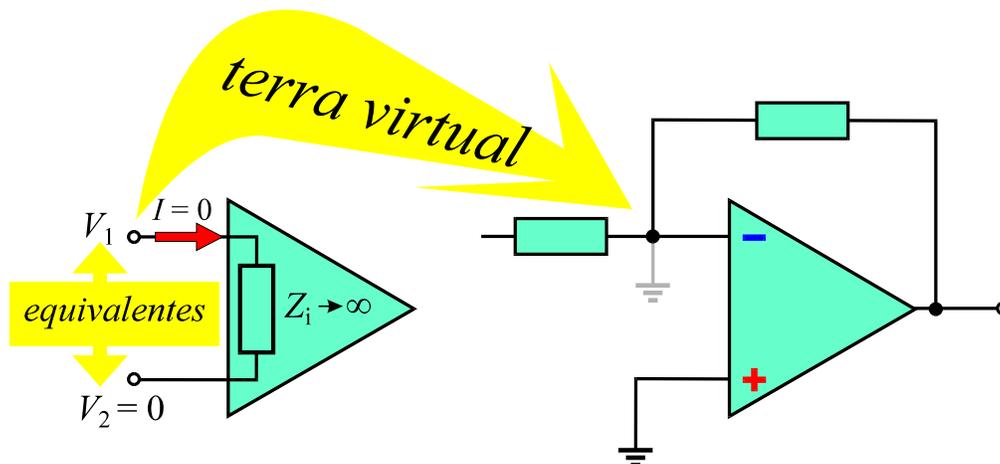


Fig.12 Equivalência entre os terminais de entrada de um amplificador inversor.

Dessa forma, para estabelecer a relação entre entrada e saída do amplificador inversor, basta considerar a porção do circuito mostrada na **Fig.13**, isto é, sem a presença do *AO*. Como pode ser aí observado, a mesma corrente flui nos resistores R_1 e R_2 , uma vez que a corrente injetada no terminal inversor é nula.

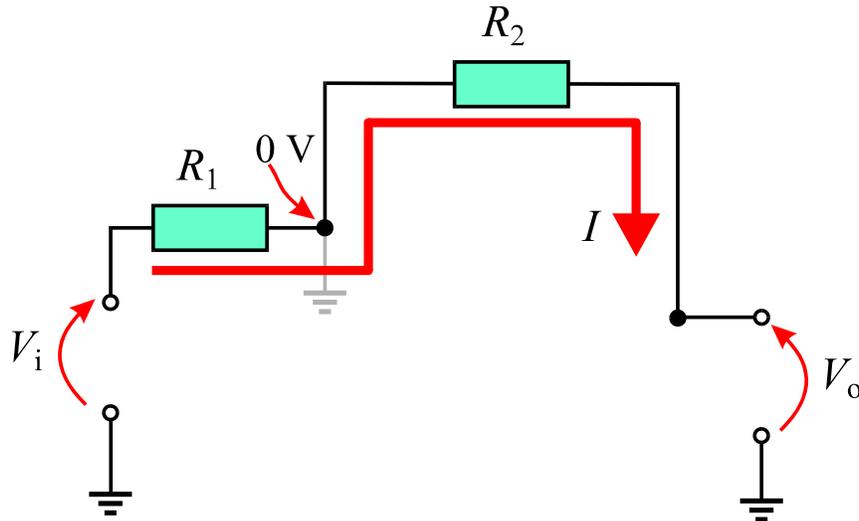


Fig.13 Porção da malha de realimentação do amplificador inversor.

Com o ponto de conexão entre os dois resistores da **Fig.13** estando a um potencial nulo, utilizando-se a lei de Ohm, tem-se que

$$I = \frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0 - V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

resultando em

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (3)$$

Assim, o ganho do amplificador inversor é negativo, o que indica a inversão de fase, dependendo apenas da razão entre resistências da malha de realimentação e sendo dado por

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

Exemplo 2: Determinar o ganho do amplificador da **Fig.14**.

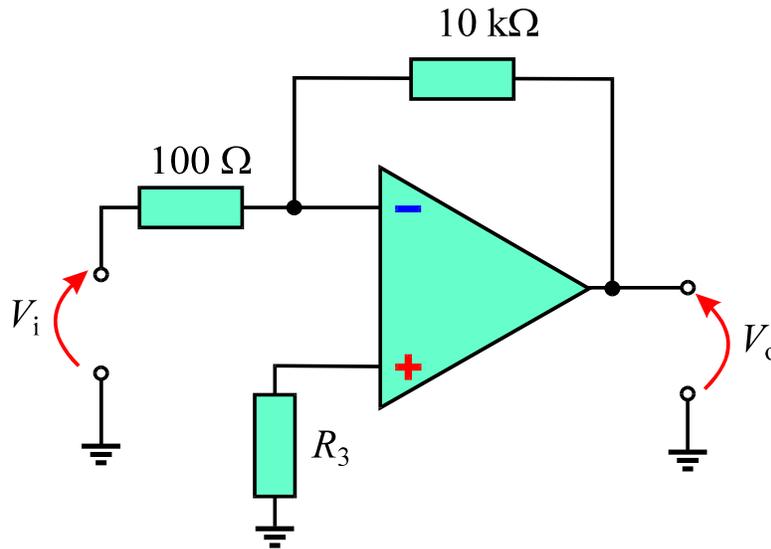


Fig.14 Amplificador inversor para o **Exemplo 2**.

Com $R_1 = 100 \Omega$ e $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, o uso da **Eq.(4)** fornece

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10.000}{100}$$

$$\Rightarrow A_V = -100$$

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Admitindo-se que o terminal da entrada inversora é um terra virtual, a impedância de entrada do circuito será o próprio valor de resistência do resistor R_1 da **Fig.11**, ou seja,

$$Z_i = R_1 \quad (5)$$

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

A impedância de saída Z_o do amplificador inversor é sempre muito menor que a impedância de saída do próprio AO . Valores típicos de Z_o são geralmente inferiores a 1Ω .

AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR

Para a obtenção de um amplificador não inversor utiliza-se a entrada não inversora do AO, conforme ilustrado na **Fig.15**, o que resulta em um sinal de saída em fase com o sinal de entrada.

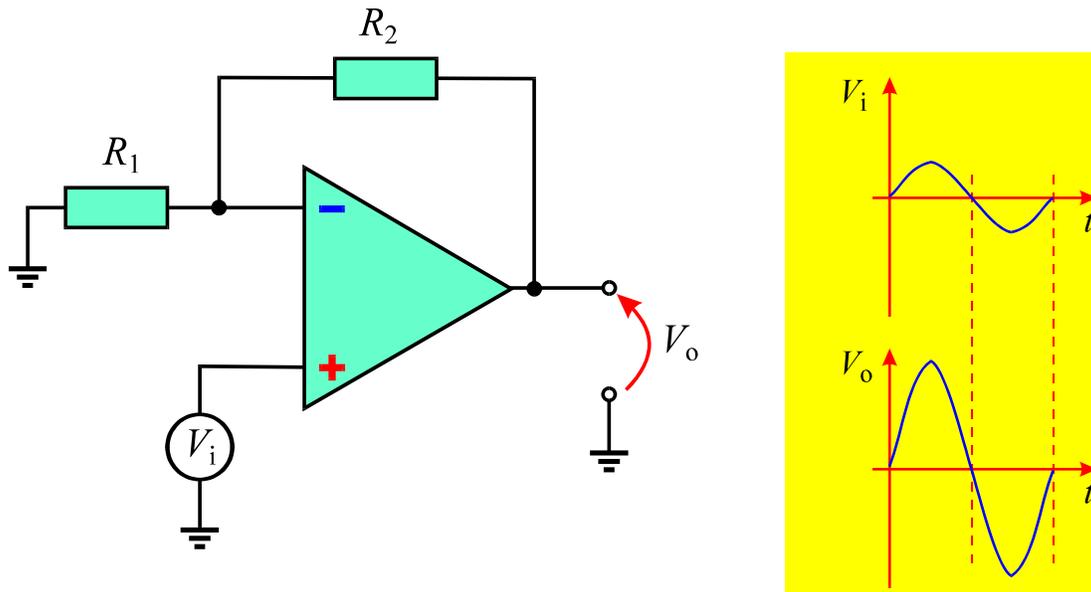


Fig.15 Configuração de um amplificador não inversor.

Conforme discutido anteriormente, a malha de realimentação mostrada na **Fig.15** é utilizada para ampliar a faixa de operação linear do amplificador.

GANHO

O ganho A_V do amplificador não inversor é determinado utilizando-se considerações semelhantes às aquelas discutidas na análise do amplificador inversor.

Com base na **Fig.15**, considerando-se como nula a corrente injetada em quaisquer dos terminais de entrada do AO, ambos os terminais de entrada podem ser considerados como estando submetidos ao mesmo potencial, ou seja, a tensão sobre o terminal inversor também vale V_i .

Dessa forma, para estabelecer a relação entre entrada e saída do amplificador inversor, basta considerar a porção do circuito mostrada na **Fig.16**, isto é, sem a presença do AO. Como pode ser aí observado, o circuito resultante é um divisor de tensão e conseqüentemente, as tensões são relacionadas por

$$\frac{V_o}{R_1 + R_2} = \frac{V_i}{R_1} \Rightarrow V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_i$$

e conseqüentemente,

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i \quad (6)$$

Da **Eq.(6)** obtém-se o ganho do amplificador não inversor

$$A_V = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7)$$

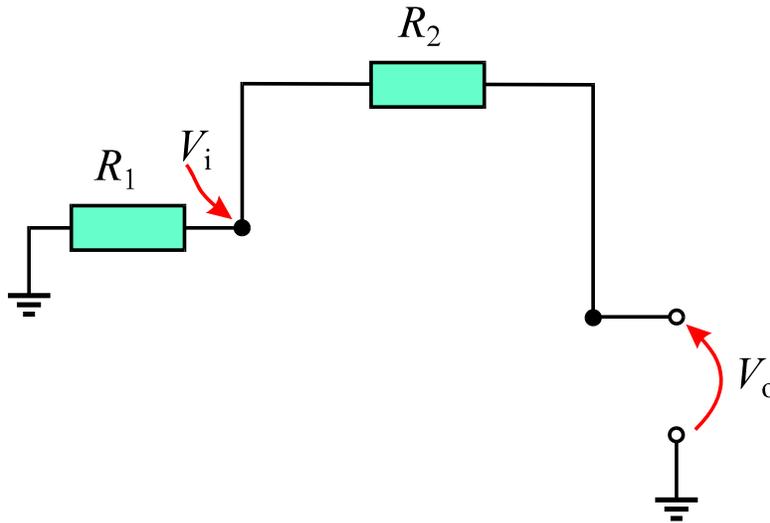


Fig.16 Porção da malha de realimentação do amplificador não inversor.

Dessa forma, o ganho do amplificador não inversor é positivo, indicando que as tensões de entrada e saída permanecem em fase. Em situações em que $R_2 \gg R_1$, a **Eq.(7)** pode ser aproximada na forma

$$A_V \approx \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

que é semelhante à expressão para o ganho do amplificador inversor, a menos do sinal.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

No amplificador não inversor o sinal de entrada é aplicado diretamente à entrada não inversora do AO . Assim, a impedância de entrada Z_i é a própria impedância de entrada do AO .

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

Como no caso do amplificador inversor, a impedância de saída Z_o do amplificador não inversor também é sempre muito menor que a impedância de saída do próprio AO . Valores típicos para aquele parâmetro são geralmente inferiores a 1Ω .

CIRCUITO SEGUIDOR DE TENSÃO

O circuito seguidor de tensão, também conhecido pelo termo inglês *buffer*, utiliza um AO com realimentação de tal forma que o ganho de tensão é unitário. Nessas condições, o sinal de saída exibe **mesma amplitude e fase** do sinal de entrada.

O seguidor de tensão é um tipo particular de amplificador não inversor. A **Fig.17** ilustra o diagrama de circuito correspondente.

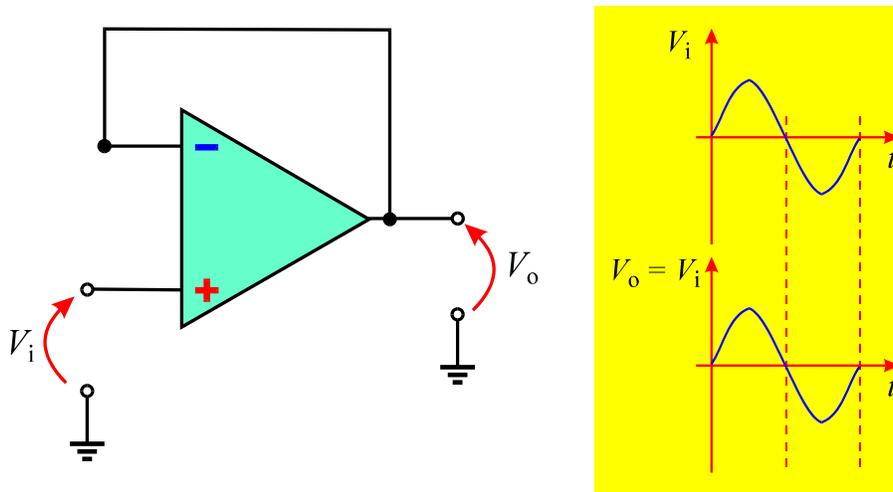


Fig.17 Diagrama de circuito de um seguidor de tensão.

Com base na **Fig.17**, e utilizando a equivalência entre os terminais de entrada do *AO*, conclui-se que

$$V_o = V_i$$

e portanto o seguidor de tensão exibe um ganho $A_V = 1$.

IMPEDÂNCIA

Em termos de impedância o circuito seguidor de tensão comporta-se como um amplificador não inversor tendo como impedância de entrada a própria impedância de entrada do *AO* e uma impedância de saída tipicamente inferior a 1Ω . Essa propriedade do circuito de reproduzir o sinal de entrada em sua saída e transformar impedâncias, permite o seu uso no casamento de impedâncias.

CIRCUITOS ARITMÉTICOS COM AO

A combinação de *AOs* e resistores de realimentação permite o desenvolvimento de circuitos capazes de realizar operações aritméticas. Dentre esses destacam-se os circuitos somador e subtrator, discutidos a seguir.

CIRCUITO SOMADOR

O circuito somador fornece na saída uma tensão igual a soma das tensões aplicadas às entradas. A **Fig.18** ilustra a configuração típica de um somador de duas entradas.

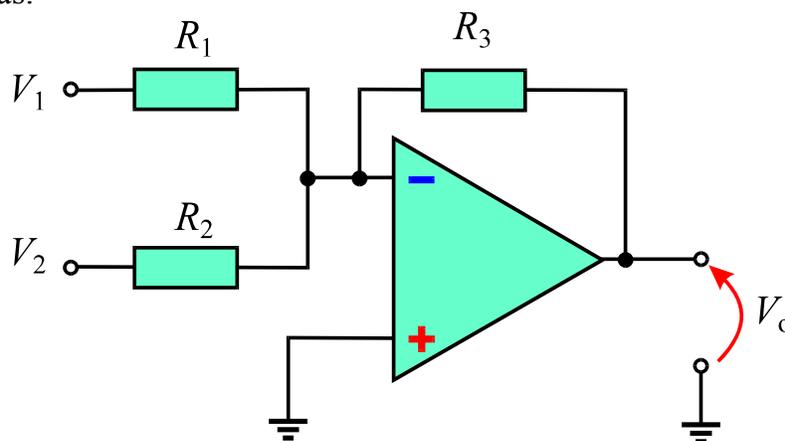


Fig.18 Circuito somador de duas entradas.

Com a corrente injetada na entrada inversora podendo ser considerada nula, as correntes mostradas na **Fig.19** se relacionam por

$$I = I_1 + I_2 \quad (9)$$

Notando que a configuração mostrada na **Fig.19** corresponde àquela de um amplificador inversor, o terminal inversor se reduz a um terra virtual. Portanto, aplicando a lei de Ohm para os três resistores mostrados na **Fig.19**, tem-se que

$$I = \frac{0 - V_o}{R_3} \Rightarrow I = -\frac{V_o}{R_3}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - 0}{R_1} \Rightarrow I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_2 - 0}{R_2} \Rightarrow I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$

Inserindo essas últimas relações na **Eq.(9)**, resulta em

$$-\frac{V_o}{R_3} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{R_3} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

ou equivalentemente,

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_1} V_1 + \frac{R_3}{R_2} V_2\right) \quad (10)$$

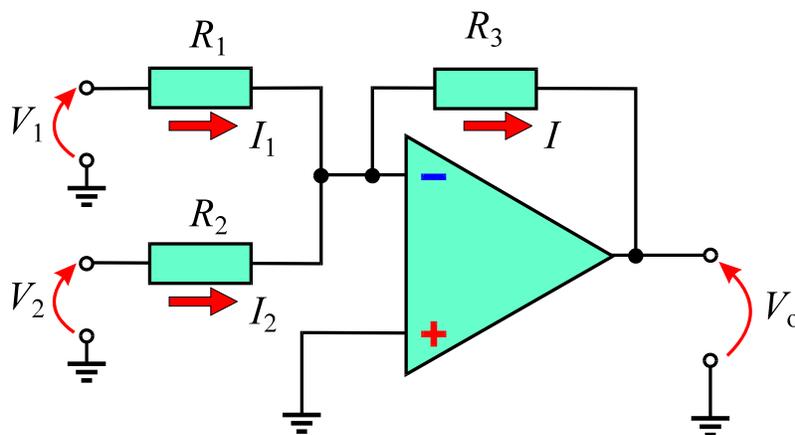


Fig.19 Circuito somador de duas entradas e parâmetros elétricos correspondentes.

Escolhendo-se os resistores com valores de resistência idênticos, a Eq.(10) pode ser simplificada na forma

$$V_o = -(V_1 + V_2) \quad (11)$$

A Eq.(11) mostra que, a menos do sinal, a tensão de saída é numericamente igual à soma das tensões de entrada V_1 e V_2 .

Se for necessário obter a soma não invertida das tensões V_1 e V_2 pode-se usar um amplificador inversor com ganho unitário após o somador, conforme ilustrado na Fig.20.

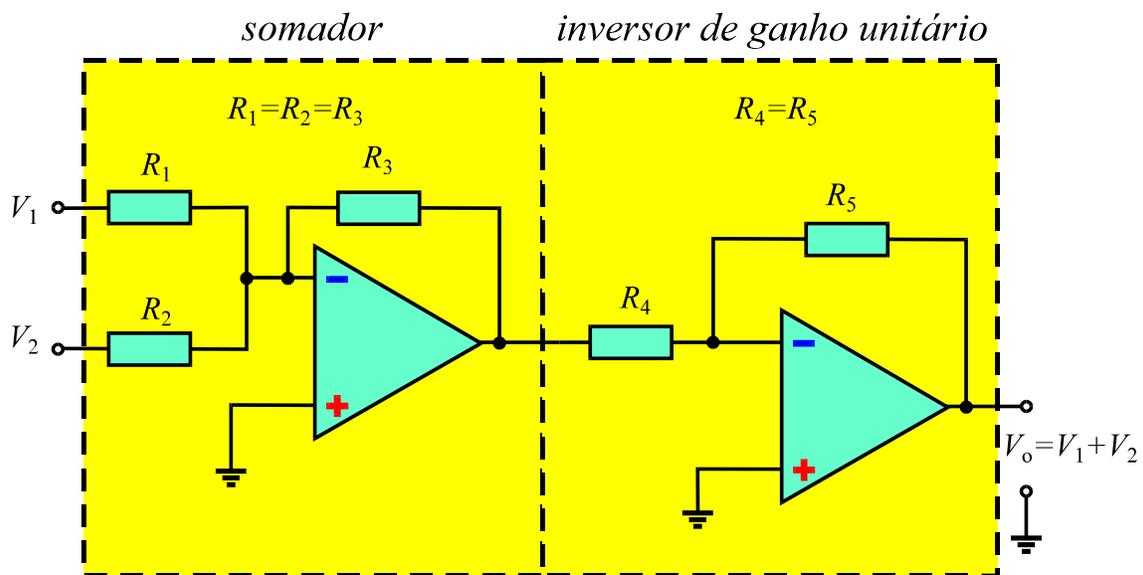


Fig.20 Circuito somador seguido de inversor de ganho unitário para correção do sinal da tensão de saída.

O circuito somador de mais de duas entradas, ilustrado na Fig.21 é uma extensão natural daquele de duas entradas. Escolhendo todos os resistores com mesma resistência, obtém-se uma tensão de saída

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n) \quad (12)$$

Se os resistores da Fig.21 exibem resistências distintas, a tensão de saída pode ser obtida a partir da generalização da Eq.(10), resultando na expressão

$$V_o = -\left(\frac{R_o}{R_1} V_1 + \frac{R_o}{R_2} V_2 + \frac{R_o}{R_3} V_2 + \dots + \frac{R_o}{R_n} V_2 \right) \quad (13)$$

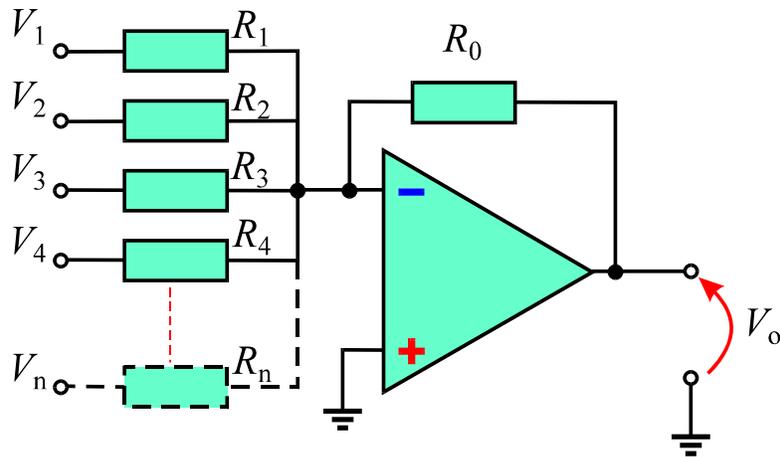


Fig.21 Circuito somador de n entradas.

CIRCUITO SUBTRATOR

O AO pode ser utilizado para obtenção de um circuito que realiza a subtração entre tensões. O efeito de subtração é obtido aplicando uma tensão na entrada inversora e outra na não inversora. A **Fig.22** mostra a configuração de um circuito subtrator.

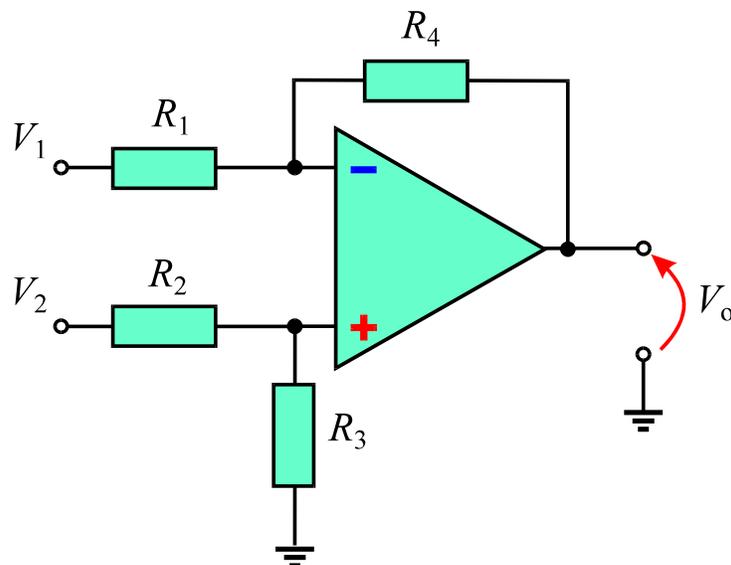


Fig.22 Configuração de um circuito subtrator.

Para estabelecer a relação entre tensões no circuito, considera-se que os terminais inversor e não inversor estejam a um mesmo potencial e que a corrente injetada em cada entrada do AO seja nula. Essa hipótese permite separar as malhas do circuito em dois divisores de tensão independentes, com o nó central de cada divisor submetido à mesma tensão V_i , conforme ilustrado na **Fig.23**.

As equações dos divisores de tensão irão envolver o parâmetro V_i . Para estabelecer a relação entre os parâmetros V_o , V_1 e V_2 , é necessário que o termo V_i seja eliminado das equações. Da hipótese de corrente nula injetada em cada terminal de entrada do AO, tem-se que

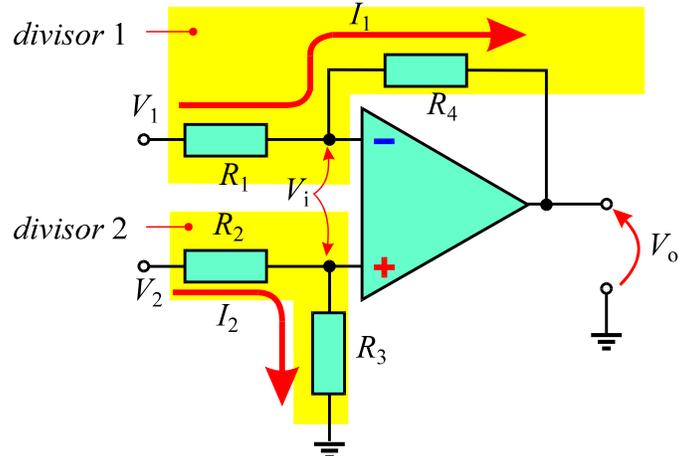


Fig.23 Circuito subtrator e parâmetros elétricos correspondentes.

Divisor de tensão 1:

$$\frac{V_1 - V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_4} \Rightarrow V_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)V_i - \frac{R_4}{R_1}V_1$$

que fornece

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1}\right)V_i - \frac{R_4}{R_1}V_1 \quad (14)$$

Divisor de tensão 2:

$$\frac{V_i}{R_3} = \frac{V_2}{R_2 + R_3}$$

que fornece

$$V_i = \frac{R_3}{R_2 + R_3}V_2 \quad (15)$$

Inserindo a **Eq.(15)** na **Eq.(14)**, obtém-se

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1$$

ou equivalentemente,

$$V_o = \frac{R_3}{R_1}\left(\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1 \quad (16)$$

A **Eq.(16)** é a expressão geral relacionando a tensão de saída V_o às tensões de entrada V_1 e V_2 . Os valores de resistência podem ser escolhidos de forma que o circuito opere de acordo com as seguintes condições:

Circuito subtrator

Escolhendo-se valores iguais para as resistências do circuito, ou seja,

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

a **Eq.(16)** fornece

$$V_o = V_2 - V_1 \quad (17)$$

que corresponde a uma tensão de saída igual à diferença entre as tensões de entrada.

Amplificador diferencial

Se os valores de resistência no circuito obedecem às relações

$$R_2 = R_1, R_3 = R_4$$

a **Eq.(16)** fornece

$$V_o = \frac{R_3}{R_1} \left(\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3} \right) V_2 - \frac{R_4}{R_1} V_1 = \frac{R_4}{R_1} \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_4} \right) V_2 - \frac{R_4}{R_1} V_1 = \frac{R_4}{R_1} V_2 - \frac{R_4}{R_1} V_1$$

ou equivalentemente,

$$V_o = \frac{R_4}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (18)$$

A **Eq.(18)** mostra que a tensão de saída corresponde à diferença entre tensões de entrada, com um fator de escala igual à razão entre as resistências R_4 e R_1 .

Se $R_4 > R_1$, a tensão de saída é uma versão amplificada da diferença entre tensões, e nessas condições o circuito é denominado de **amplificador diferencial**.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em geral, de que forma depende a tensão de saída com respeito à tensão diferencial aplicada à entrada de um *AO*? Como se denomina a curva representativa dessa dependência?
2. Qual a técnica comumente empregada para alargar a região linear de um *AO*?
3. Qual a relação entre ganho e largura da região linear de um *AO*?
4. O que se pode dizer a respeito da impedância de entrada, corrente injetada nos terminais de entrada, e diferença de potencial entre aqueles terminais para um *AO* ideal?
5. Qual o ganho de um amplificador não inversor com a realimentação feita com resistores tais que $R_1 = R_2$?
6. Qual o ganho de um seguidor de tensão e qual o valor correspondente em dB?
7. Para o circuito da **Fig.18**, admitindo $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 150 \Omega$, $R_3 = 300 \Omega$, $V_1 = 10 \text{ V}$ e $V_2 = 5 \text{ V}$, determine a tensão de saída.
8. Para o circuito subtrator da **Fig.22**, admitindo $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 150 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$, $R_4 = 300 \Omega$, $V_1 = 5 \text{ V}$, $V_2 = 5 \text{ V}$, determine a tensão de saída.

BIBLIOGRAFIA

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica, 1983.

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1986.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, Mc Graw- Hill do Brasil, São Paulo, 1981.