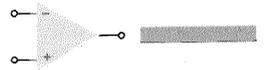


Amplificadores Operacionais 14



14.1 INTRODUÇÃO

Um amplificador operacional, ou amp-op, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito alta e baixa impedância de saída. Normalmente se utiliza o amplificador operacional para que se obtenham variações na tensão (amplitude e polaridade), para a construção de osciladores, filtros e alguns circuitos de instrumentação. Um amp-op contém alguns estágios amplificadores diferenciais para produzir um ganho de tensão muito alto.

A Fig. 14.1 mostra um amp-op básico com duas entradas e uma saída, uma vez que o estágio de entrada é um estágio de entrada de amplificador diferencial. Recorde, do Cap. 12, que

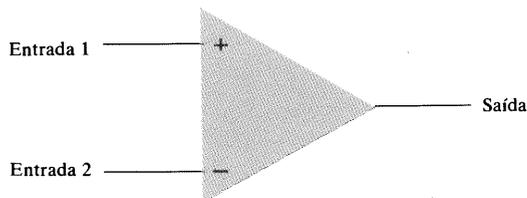


Fig. 14.1 Amp-op básico.

cada entrada resulta numa saída de mesma polaridade (ou fase) ou numa saída com polaridade (ou fase) oposta, dependendo de se o sinal está aplicado à entrada (+) ou à (-).

Entrada com Terminação-Única

A operação de entrada com terminação-única ocorre quando o sinal de entrada é conectado a uma entrada com a outra entrada conectada à terra. A Fig. 14.2 mostra os sinais conectados para esta operação. Na Fig. 14.2a, o sinal de entrada é aplicado à entrada mais (com a entrada menos aterrada), o que resulta numa saída com a mesma polaridade do sinal de entrada aplicado. A Fig. 14.2b mostra um sinal de entrada aplicado à entrada menos, sendo a saída, portanto, de fase oposta ao sinal aplicado.

Entrada (Diferencial) com Terminação-Dupla

Por sua vez, usando somente uma entrada, é possível aplicar sinais a ambas as entradas — isto se chama operação com terminação-dupla. A Fig. 14.3a mostra uma entrada, V_i , aplicada nos dois terminais de entrada (lembre-se que nenhuma entrada está aterrada), resultando num sinal de saída em fase com o sinal apli-

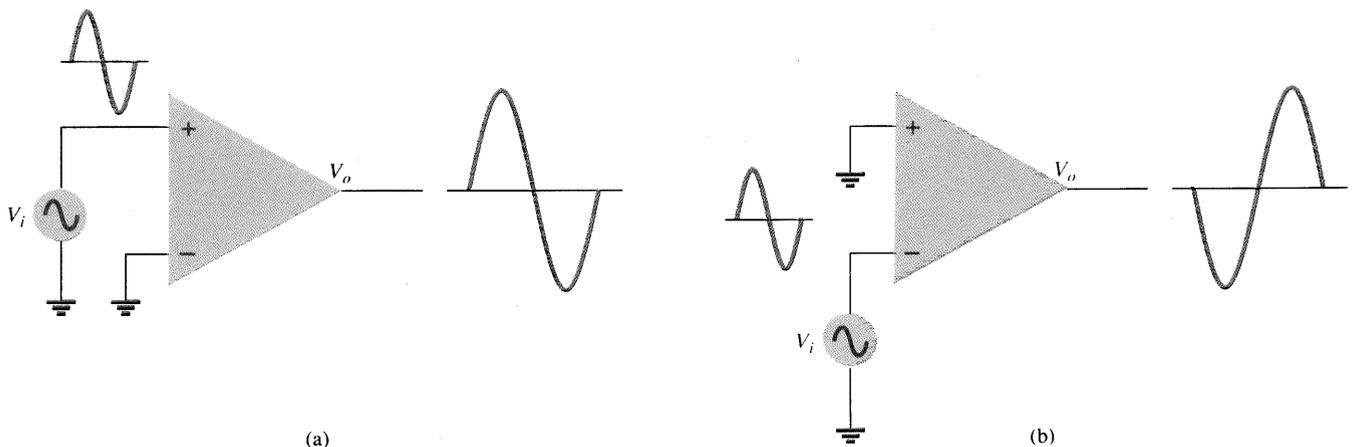


Fig. 14.2 Operação com terminação única.

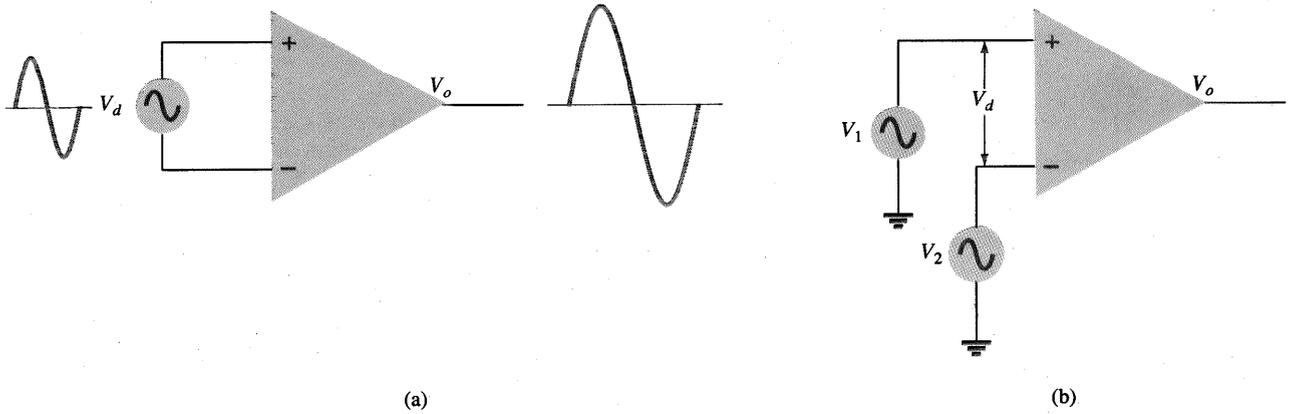


Fig. 14.3 Operação (diferencial) com terminação-dupla.

cado em ambas as entradas. A Fig. 14.3b mostra uma situação que produz o mesmo resultado, isto é, quando dois sinais separados são aplicados às entradas, sendo que a diferença entre eles é $V_{i1} - V_{i2}$.

Saída com Terminação-Dupla

Até o momento apresentamos as operações do amp-op em que se produz apenas uma saída; no entanto, o amp-op pode também fornecer saídas opostas, como mostrado na Fig. 14.4. Um sinal de entrada aplicado a qualquer entrada resultará em saídas para ambos os terminais de saída, com polaridades opostas. A Fig. 14.5 mostra uma entrada com terminação-única, com uma saída com terminação-dupla. Como mostrado, o sinal aplicado à entrada mais resulta em duas saídas amplificadas de polaridades opostas. A Fig. 14.6 mostra a mesma operação com uma saída única, medida entre os terminais de saída (não em relação à terra). Esta saída diferença é $V_{o1} - V_{o2}$. A saída diferença é também denominada *senal flutuante*, uma vez que nenhum dos terminais de saída é o terminal terra (referência). Note que a saída diferença é duas

vezes maior que V_{o1} ou V_{o2} , uma vez que são de polaridades opostas, e, subtraindo-os, resulta em duas vezes sua amplitude [i.e., $10\text{ V} - (-10\text{ V}) = 20\text{ V}$]. A Fig. 14.7 mostra a operação entrada diferencial, saída diferencial. A entrada é aplicada entre os dois terminais de entrada e a saída tomada entre os dois terminais de saída. Esta é uma operação completamente diferencial.

Operação Modo-Comum

Quando os mesmos sinais de entrada são aplicados a ambas as entradas, a operação é denominada operação modo-comum, como mostrado na Fig. 14.8. Idealmente, as duas entradas são igualmente amplificadas e como produzem sinais de polaridades opostas na saída, estes sinais se cancelam, resultando em 0 V. Na prática, verifica-se um pequeno sinal na saída.

Rejeição de Modo-Comum

Uma característica importante da conexão diferencial é que os sinais, quando são opostos nas entradas, são altamente amplificados, enquanto um sinal comum às entradas é apenas suavemente amplificado — a operação amplifica o sinal diferença enquanto rejeita o sinal comum às duas entradas. Uma vez que em geral o ruído (qualquer sinal de entrada não desejado) é comum a ambas as entradas, a conexão diferencial tende a atenuar esta entrada indesejada enquanto fornece uma saída amplificada do sinal diferença aplicado às entradas. Esta característica operacional, denominada rejeição de modo-comum, é discutida na próxima seção com uma abordagem mais completa.

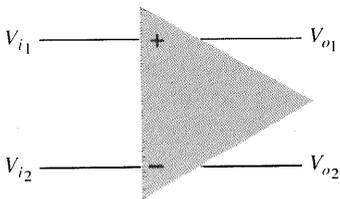


Fig. 14.4 Saída com terminação-dupla.

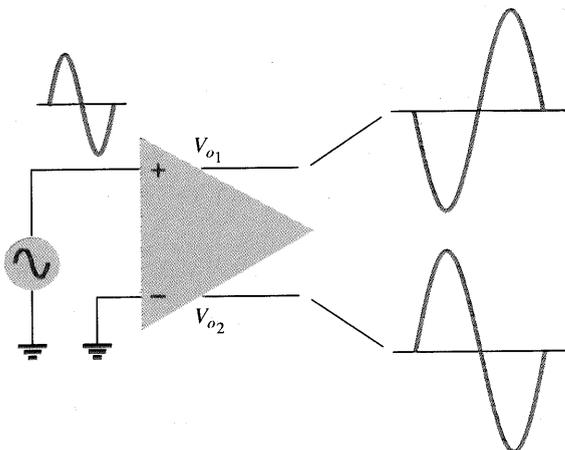


Fig. 14.5 Saída com terminação-dupla e entrada com terminação-única.

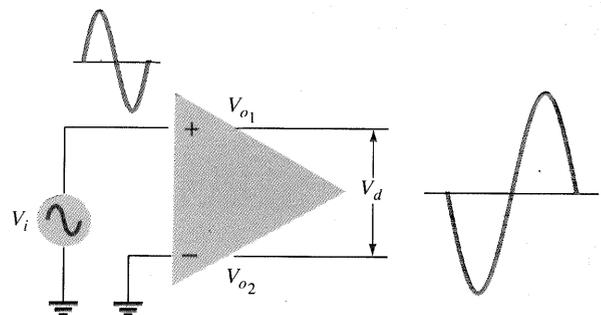


Fig. 14.6 Saída com terminação-dupla.

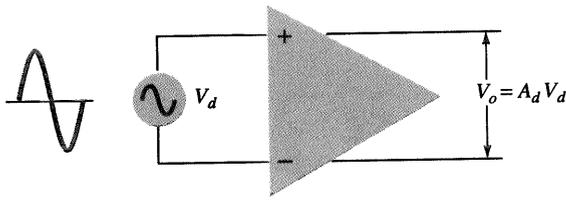


Fig. 14.7 Operação entrada-diferencial, saída-diferencial.

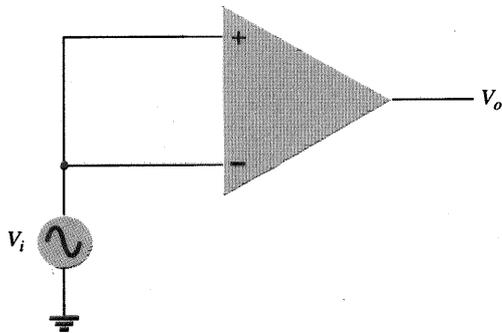


Fig. 14.8 Operação modo-comum.

14.2 OPERAÇÃO DIFERENCIAL E MODO-COMUM

Uma das mais importantes características de uma conexão de circuito diferencial, observada em um amp-op, é a capacidade de o circuito amplificar consideravelmente sinais opostos nas duas entradas, enquanto amplifica suavemente sinais comuns a ambas as entradas. Um amp-op fornece uma componente de saída que é devida à amplificação da diferença dos sinais aplicados às entradas mais e menos e uma componente devida aos sinais comuns a ambas as entradas. Como a amplificação dos sinais de entrada opostos é muito maior que a dos sinais de entrada comuns, o circuito fornece uma rejeição de modo-comum, descrita por um parâmetro chamado razão de rejeição de modo-comum (RRMC).

Entradas Diferenciais

Quando entradas separadas são aplicadas ao amp-op, o sinal diferença resultante é a diferença entre as duas entradas.

$$V_d = V_{i_1} - V_{i_2} \quad (14.1)$$

Entradas Comuns

Quando os sinais são iguais, o sinal comum às duas entradas pode ser definido como a média aritmética entre os dois sinais,

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) \quad (14.2)$$

Tensão de Saída

Como qualquer sinal aplicado a um amp-op tem, em geral, componentes em fase e fora de fase, a saída resultante pode ser expressa como

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c \quad (14.3)$$

onde V_d = tensão diferença dada pela Eq. (14.1)
 V_c = tensão comum dada pela Eq. (14.2)
 A_d = ganho diferencial do amplificador
 A_c = ganho de modo-comum do amplificador

Entradas de Polaridades Opostas

Se entradas de polaridades opostas aplicadas a um amp-op são sinais idealmente opostos, $V_{i_1} = -V_{i_2} = V_s$, a tensão diferença resultante é

$$\text{Eq. (14.1): } V_d = V_{i_1} - V_{i_2} = V_s - (-V_s) = 2V_s$$

enquanto a tensão comum resultante é

$$\text{Eq. (14.2): } V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = \frac{1}{2}[V_s + (-V_s)] = 0$$

tal que a tensão de saída resultante é

$$\text{Eq. (14.3): } V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d(2V_s) + 0 = 2A_d V_s$$

Isso mostra que quando as entradas são sinais idealmente opostos (nenhum elemento comum), a saída é o ganho diferencial vezes o dobro do sinal de entrada aplicado a uma das entradas.

Entradas de Mesma Polaridade

Se entradas de mesma polaridade são aplicadas a um amp-op, $V_{i_1} = V_{i_2} = V_s$ a tensão diferença resultante é

$$\text{Eq. (14.1): } V_d = V_{i_1} - V_{i_2} = V_s - V_s = 0$$

enquanto a tensão comum resultante é

$$\text{Eq. (14.2): } V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = \frac{1}{2}(V_s + V_s) = V_s$$

tal que a tensão de saída resultante é

$$\text{Eq. (14.3): } V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d(0) + A_c V_s = A_c V_s$$

Isto mostra que quando as entradas são sinais ideais, em fase (nenhum sinal diferença), a saída é o ganho de modo-comum vezes o sinal de entrada, V_s , o qual mostra que somente a operação de modo-comum ocorre.

Rejeição de Modo-Comum

As soluções acima fornecem relações que podem ser usadas para medir A_d e A_c em circuitos de amp-ops.

1. Para medir A_d : Faça $V_{i_1} = -V_{i_2} = V_s = 0,5 \text{ V}$, tal que

$$\text{Eq. (14.1): } V_d = (V_{i_1} - V_{i_2}) = (0,5 \text{ V} - (-0,5 \text{ V})) = 1 \text{ V}$$

e

$$\text{Eq. (14.2): } V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = \frac{1}{2}[0,5 \text{ V} + (-0,5 \text{ V})] = 0 \text{ V}$$

Sob essas condições, a tensão de saída é

$$\text{Eq. (14.3): } V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d(1 \text{ V}) + A_c(0) = A_d$$

Portanto, fazendo as tensões de entrada $V_{i_1} = -V_{i_2} = 0,5 \text{ V}$ resulta numa tensão de saída numericamente igual ao valor de A_d .

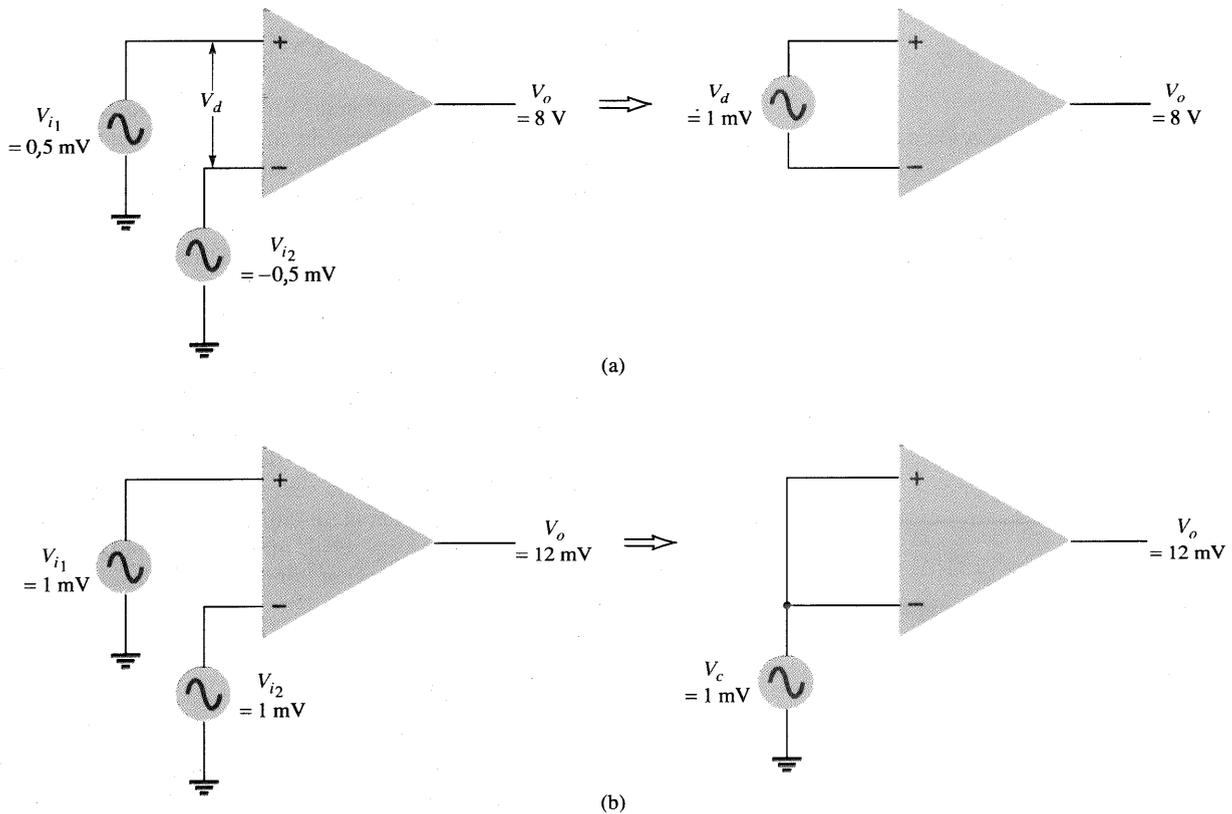


Fig. 14.9 Operação diferencial e modo-comum: (a) modo-diferencial; (b) modo-comum.

2. Para medir A_c : Faça $V_{i1} = V_{i2} = V_s = 1 \text{ V}$, tal que

$$\text{Eq. (14.1): } V_d = (V_{i1} - V_{i2}) = (1 \text{ V} - 1 \text{ V}) = 0 \text{ V}$$

e

$$\text{Eq. (14.2): } V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) = \frac{1}{2}(1 \text{ V} + 1 \text{ V}) = 1 \text{ V}$$

Sob essas condições, a tensão de saída é

$$\text{Eq. (14.3): } V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d(0 \text{ V}) + A_c(1 \text{ V}) = A_c$$

Portanto, fazendo as tensões de entrada $V_{i1} = V_{i2} = 1 \text{ V}$ resulta numa tensão de saída numericamente igual ao valor de A_c .

Razão de Rejeição de Modo-Comum

Tendo obtido A_d e A_c (pelo procedimento de medida discutido acima), podemos, agora, calcular um valor para a razão de rejeição de modo-comum (RRMC), a qual é definida pela seguinte equação:

$$\text{RRMC} = \frac{A_d}{A_c} \quad (14.4)$$

O valor de RRMC pode também ser expresso em termos logarítmicos como

$$\text{RRMC (log)} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} \quad (\text{dB}) \quad (14.5)$$

Solução

Das medidas mostradas na Fig. 14.9a, usando o procedimento no passo 1 acima, obtemos

$$A_d = \frac{V_o}{V_d} = \frac{8 \text{ V}}{1 \text{ mV}} = 8000$$

Das medidas mostradas na Fig. 14.9b, usando o procedimento no passo 2 acima, obtemos

$$A_c = \frac{V_o}{V_c} = \frac{12 \text{ mV}}{1 \text{ mV}} = 12$$

Usando a Eq. (14.4), o valor de RRMC é

$$\text{RRMC} = \frac{A_d}{A_c} = \frac{8000}{12} = 666,7$$

o qual também pode ser expresso como

$$\text{RRMC} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} = 20 \log_{10} 666,7 = 56,48 \text{ dB}$$

Deve ficar claro que a situação favorável ocorre quando A_d é muito grande e A_c muito pequeno. Isto é, as componentes do sinal de polaridades opostas aparecerão muito amplificadas na saída, enquanto as componentes do sinal que estão em fase se cancelam em grande parte, de modo que o ganho de modo-comum, A_c , é muito pequeno. Idealmente, valor da RRMC é infinito. Na prática, quanto maior o valor de RRMC, melhor a operação do circuito.

Podemos expressar a tensão de saída em termos do valor de RRMC como se segue:

EXEMPLO 14.1

Calcule a RRMC para os circuitos de medidas mostrados na Fig. 14.9.



Eq. (14.3): $V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d V_d \left(1 + \frac{A_c V_c}{A_d V_d} \right)$

Usando a Eq. (14.4), podemos escrever a equação acima como

$$V_o = A_d V_d \left(1 + \frac{1}{RRMC} \frac{V_c}{V_d} \right) \quad (14.6)$$

Mesmo quando ambas as componentes V_d e V_c do sinal estão presentes, a Eq. (14.6) mostra que para grandes valores de RRMC, a tensão de saída será devida principalmente ao sinal diferença, com a componente de modo-comum enormemente reduzida ou rejeitada. Alguns exemplos práticos ajudarão a elucidar esta idéia.

EXEMPLO 14.2

Determine a tensão de saída de um amp-op para tensões de entrada de $V_{i1} = 150 \mu\text{V}$, $V_{i2} = 140 \mu\text{V}$. O amplificador tem um ganho diferencial de $A_d = 4000$ e o valor de RRMC é:

- (a) 100.
- (b) 10^5 .

Solução

Eq. (14.1): $V_d = V_{i1} - V_{i2} = (150 - 140) \mu\text{V} = 10 \mu\text{V}$

Eq. (14.2): $V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2}) = \frac{150 \mu\text{V} + 140 \mu\text{V}}{2} = 145 \mu\text{V}$

(a) Eq. (14.6): $V_o = A_d V_d \left(1 + \frac{1}{RRMC} \frac{V_c}{V_d} \right) = (4000)(10 \mu\text{V}) \left(1 + \frac{1}{100} \frac{145 \mu\text{V}}{10 \mu\text{V}} \right) = 40 \text{ mV}(1,145) = 45,8 \text{ mV}$
 (b) $V_o = (4.000)(10 \mu\text{V}) \left(1 + \frac{1}{10^5} \frac{145 \mu\text{V}}{10 \mu\text{V}} \right) = 40 \text{ mV}(1,000145) = 40,006 \text{ mV}$

O Exemplo 14.2 mostra que quanto maior o valor de RRMC, mais próxima a tensão de saída está da diferença das entradas vezes o ganho diferencial, com o sinal de modo-comum sendo rejeitado.

14.3 AMP-OPS BÁSICOS

Um amplificador operacional é um amplificador de ganho muito alto com uma impedância de entrada muito alta (tipicamente alguns megohms) e uma baixa impedância de saída (menor do que 100 Ω). O circuito básico é construído usando-se um amplificador de diferença com duas entradas (mais e menos) e pelo menos uma saída. A Fig. 14.10 mostra uma unidade de amp-op básica. Como discutido anteriormente, a entrada mais (+) produz uma saída que está em fase com o sinal aplicado, enquanto um sinal de entrada menos (-) resulta em uma saída com polaridade oposta. O circuito ac equivalente do amp-op é mostrado na Fig. 14.11a. Como mostrado, o sinal de entrada aplicado entre os terminais de entrada vê uma impedância de entrada, R_i , tipicamente muito alta. A tensão de saída é mostrada como sendo o ganho do amplificador vezes o sinal de entrada, tomado através de uma impedância de saída, R_o , tipicamente muito baixa. Um circuito amp-op ideal, mostrado na Fig. 14.11b, teria impedância de entrada infinita, impedância de saída zero, e um ganho de tensão infinito.

Amp-Op Básico

O circuito básico que utiliza um amp-op é mostrado na Fig. 14.12; o circuito opera como um multiplicador de ganho constante. Um sinal de entrada, V_i , é aplicado através do resistor R_i à entrada menos. A saída é então conectada de volta à mesma entrada menos, através do resistor R_f . A entrada mais é conectada à terra. Como o sinal V_i é aplicado exclusivamente à entrada menos, a saída resultante é oposta em fase ao sinal de entrada. A Fig. 14.13a mostra o amp-op substituído por seu circuito ac equivalente. Se usamos o circuito amp-op equivalente ideal, substituindo R_i por uma resistência infinita e R_o por uma resistência nula, o circuito ac equivalente é aquele mostrado na Fig. 14.13b. O circuito é então redesenhado, como mostrado na Fig. 14.13c, do qual a análise de circuito é efetuada.

Usando superposição, podemos resolver para a tensão V_i em termos das componentes devidas a cada uma das fontes. Para a fonte V_1 somente ($-A_v V_i$ fixado em zero).

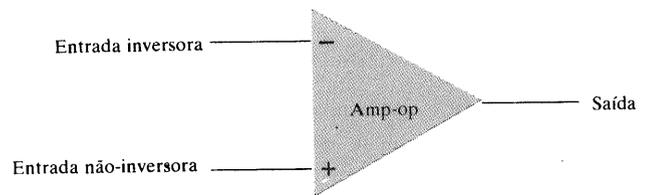


Fig. 14.10 Amp-op básico.

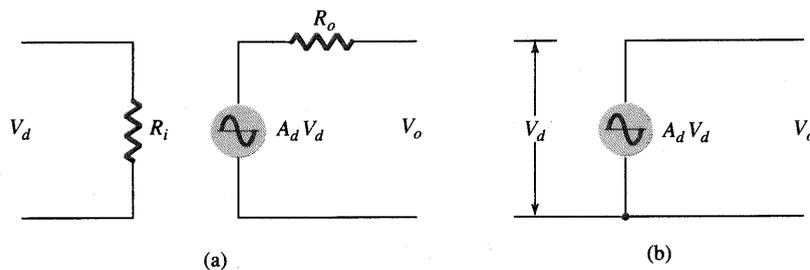


Fig. 14.11 Ac equivalente do circuito amp-op: (a) prático; (b) ideal.

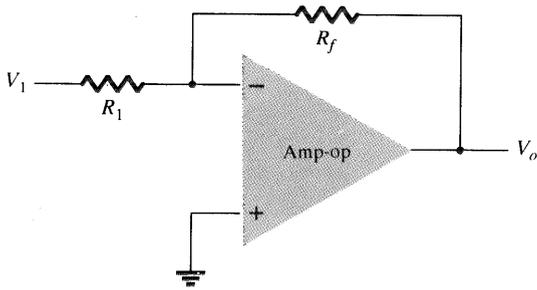
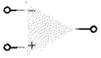


Fig. 14.12 Conexão amp-op básica.

$$V_{i_1} = \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_1$$

Para $-A_v V_i$ apenas (V_1 fixado em zero),

$$V_{i_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} (-A_v V_i)$$

A tensão total V_i é então

$$V_i = V_{i_1} + V_{i_2} = \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_f} (-A_v V_i)$$

a qual pode ser resolvida para V_i como

$$V_i = \frac{R_f}{R_f + (1 + A_v)R_1} V_1 \tag{14.7}$$

Se $A_v \gg 1$ e $A_v R_1 \gg R_f$ como geralmente ocorre, então

$$V_i = \frac{R_f}{A_v R_1} V_1$$

Resolvendo para V_o / V_i , obtemos

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-A_v V_i}{V_i} = \frac{-A_v}{V_i} \frac{R_f V_1}{A_v R_1} = -\frac{R_f}{R_1} \frac{V_1}{V_i}$$

de modo que

$$\boxed{\frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}} \tag{14.8}$$

O resultado, na Eq. (14.8), mostra que a razão de saída para a tensão de entrada depende apenas dos valores dos resistores R_1 e R_f — desde que A_v seja muito grande.

Ganho Unitário

Se $R_f = R_1$, o ganho é

$$\text{ganho de tensão} = -\frac{R_f}{R_1} = -1$$

assim sendo, o circuito fornece um ganho de tensão unitário com inversão de fase de 180°. Se R_f é exatamente igual a R_1 , o ganho de tensão é exatamente 1.

Ganho de Amplitude Constante

Se R_f é múltiplo de R_1 , o ganho global do amplificador é uma constante. Por exemplo, se $R_f = 10R_1$, então

$$\text{ganho de tensão} = -\frac{R_f}{R_1} = -10$$

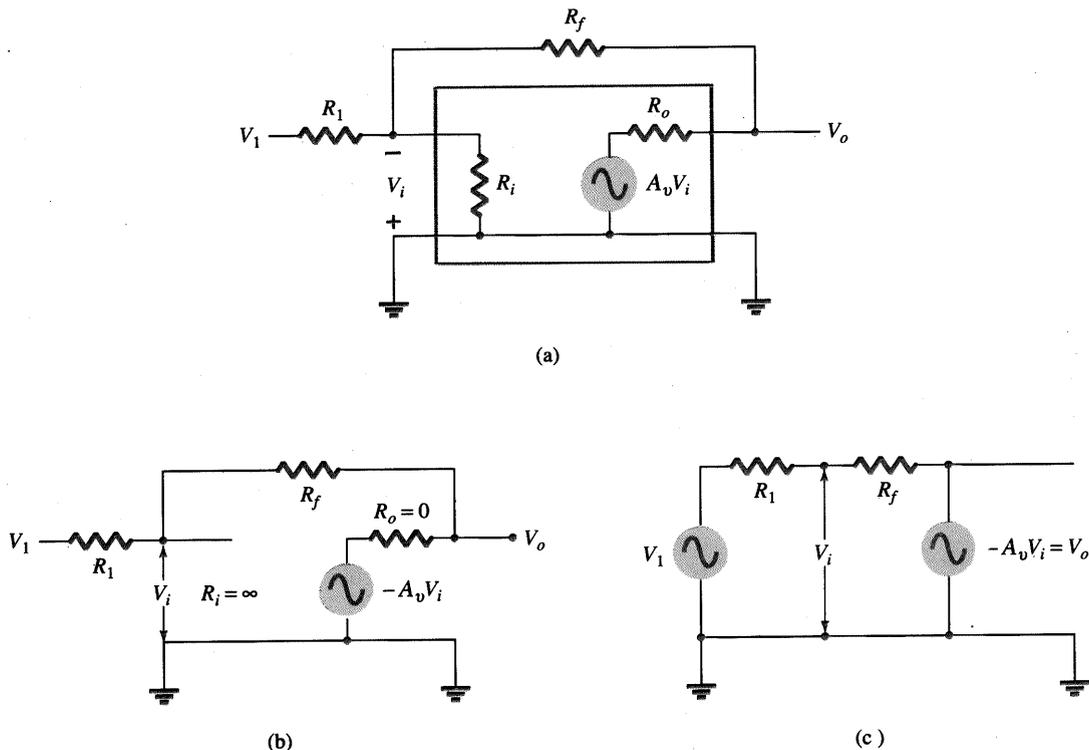
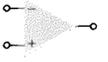


Fig. 14.13 Operação de amp-op como um multiplicador de ganho constante: (a) circuito ac equivalente do amp-op; (b) circuito equivalente do amp-op ideal; (c) circuito equivalente redesenhado.



e o circuito fornece um ganho de tensão de exatamente 10, com uma inversão de fase de 180° do sinal de entrada. Se selecionarmos valores convenientes para R_f e R_1 , poderemos obter uma ampla faixa de ganhos, o ganho sendo tão preciso quanto os resistores usados, e apenas levemente afetado pela temperatura e outros fatores do circuito.

Terra Virtual

A tensão de saída é limitada pela fonte de tensão em, tipicamente, alguns volts. Como afirmado antes, os ganhos de tensão são muito altos. Se, por exemplo, $V_o = -10\text{ V}$ e $A_v = 20.000$, a tensão de entrada seria então

$$V_i = \frac{-V_o}{A_v} = \frac{10\text{ V}}{20.000} = 0,5\text{ mV}$$

Se o circuito tem um ganho global (V_o/V_1) de, digamos, 1, o valor de V_1 seria então 10 V. Comparado a todas as outras tensões de entrada e saída, o valor de V_i é ainda pequeno e pode ser considerado 0 V.

Note que, embora $V_i \approx 0\text{ V}$, não é exatamente 0 V. (A tensão de saída é de alguns volts, devido à entrada muito pequena vezes um ganho A_v , muito grande.) O fato de que $V_i \approx 0\text{ V}$ leva a um conceito de que na entrada do amplificador existe um curto-circuito virtual ou terra virtual.

O conceito de uma terra virtual implica que, embora a tensão seja quase 0 V, não há corrente na entrada do amplificador para a terra. A Fig. 14.14 descreve o conceito de terra virtual. A linha grossa é usada para indicar que podemos considerar a existência de um curto com $V_i \approx 0\text{ V}$, mas que isto é um curto virtual, uma vez que nenhuma corrente circula do curto para a terra. A corrente circula somente através dos resistores R_1 e R_f como mostrado.

Usando o conceito de terra virtual, podemos escrever equações para a corrente I , como se segue:

$$I = \frac{V_1}{R_1} = -\frac{V_o}{R_f}$$

a qual pode ser resolvida para V_o/V_1 :

$$\frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

O conceito de terra virtual, que depende de A_v ser muito grande, permitiu uma solução simples para a determinação do ganho global do sistema. Deve ser entendido que, embora o circuito da Fig. 14.14 seja uma aproximação, esta abordagem facilita na determinação do ganho de tensão global.

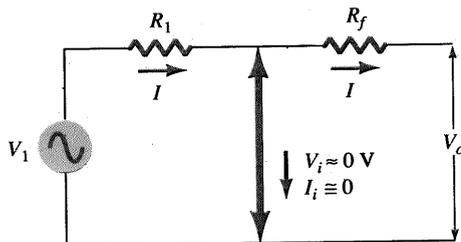


Fig. 14.14 Terra virtual num amp-op.

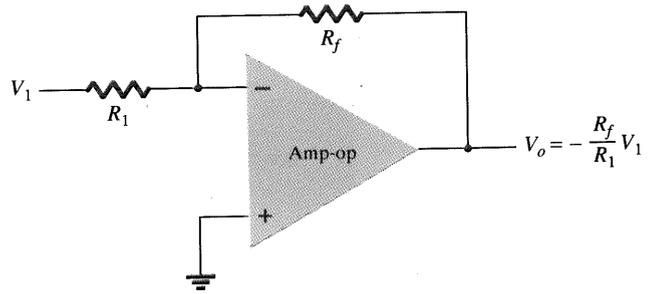


Fig. 14.15 Multiplicador inversor de ganho constante.

14.4 CIRCUITOS AMP-OP PRÁTICOS

O amp-op pode ser conectado a uma grande variedade de circuitos estabelecendo várias possibilidades operacionais. Nesta seção, abordamos alguns dos circuitos mais comuns.

Amplificador Inversor

O amplificador de ganho constante mais amplamente usado é o amplificador inversor, mostrado na Fig. 14.15. A saída é obtida pela multiplicação da entrada por um ganho fixo ou constante, fixado pelo resistor de entrada (R_1) e o resistor de realimentação (R_f) — esta saída também é invertida em relação à entrada. Usando a Eq. (14.8), podemos escrever

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1$$

EXEMPLO 14.3

Se o circuito da Fig. 14.15 tem $R_1 = 100\text{ k}\Omega$ e $R_f = 500\text{ k}\Omega$, que tensão de saída resulta para uma entrada de $V_1 = 2\text{ V}$?

Solução

$$\text{Eq. (14.8): } V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1 = -\frac{500\text{ k}\Omega}{100\text{ k}\Omega} (2\text{ V}) = -10\text{ V}$$

Amplificador Não-Inversor

A conexão da Fig. 14.16a mostra um circuito com amp-op que trabalha como um amplificador não-inversor ou multiplicador de ganho constante. Deve-se observar que a conexão amplificador inversor é mais amplamente usada porque tem melhor estabilidade em frequência (discutido mais tarde). Para determinar o ganho de tensão do circuito, podemos usar a representação equivalente mostrada na Fig. 14.16b. Note que a tensão através de R_1 é V_1 , uma vez que $V_i \approx 0\text{ V}$. O mesmo vale para a tensão de saída, que pode ser relacionada a V_1 através do divisor de tensão entre R_1 e R_f :

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o$$

o qual resulta em

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \tag{14.9}$$

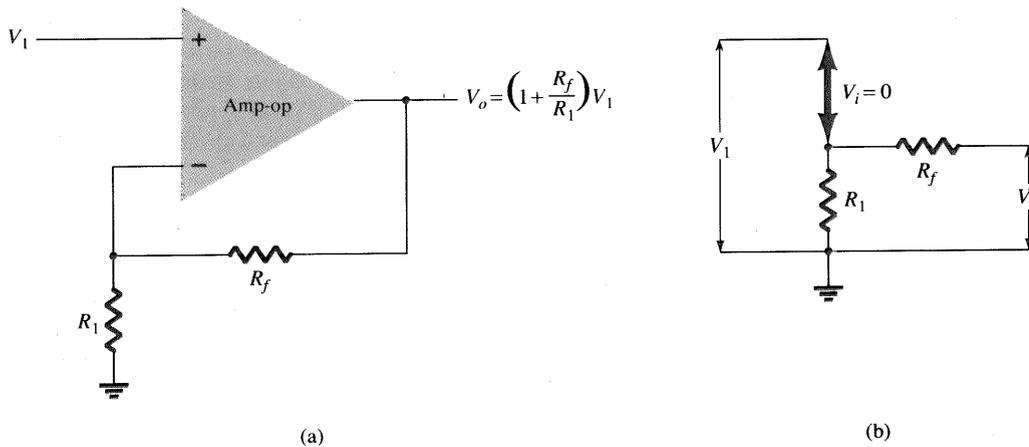


Fig. 14.16 Multiplicador de ganho constante não-inversor.

EXEMPLO 14.4

Calcule a tensão de saída de um amplificador não-inversor (como na Fig. 14.16) para valores de $V_1 = 2 \text{ V}$, $R_f = 500 \text{ k}\Omega$, e $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$.

Solução

$$\text{Eq. (14.9): } V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)V_1 = \left(1 + \frac{500 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega}\right)(2 \text{ V}) = 6(2 \text{ V}) = +12 \text{ V}$$

Seguidor Unitário

O circuito seguidor-unitário, mostrado da Fig. 14.17a, fornece um ganho unitário (1) sem inversão de polaridade ou fase. Do circuito equivalente (veja Fig. 14.17b) é claro que

$$V_o = V_1 \tag{14.10}$$

e que a saída tem a mesma polaridade e amplitude da entrada. O circuito opera como um circuito seguidor de emissor ou de fonte, exceto que o ganho é exatamente um.

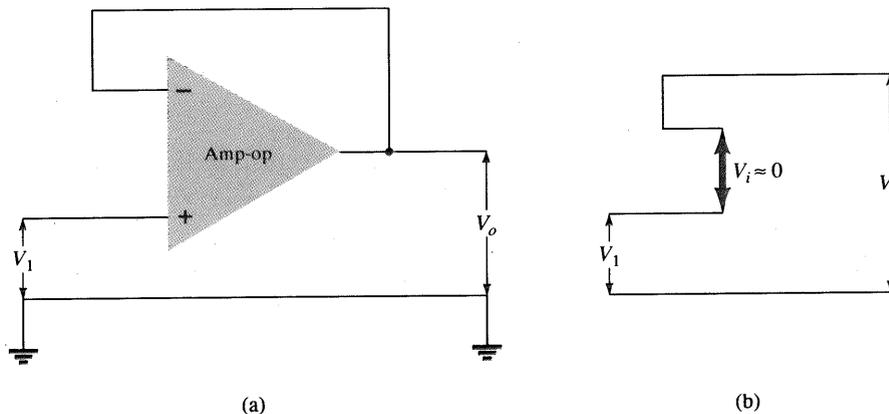


Fig. 14.17 (a) Seguidor unitário; (b) circuito equivalente com terra virtual.

Amplificador Somador

Provavelmente, o mais usado dos circuitos amp-ops é o circuito amplificador somador mostrado na Fig. 14.18a. O circuito mostra um circuito amplificador somador de três entradas, o qual fornece um meio de somar algebricamente (adicionando) três tensões, cada uma multiplicada por um fator de ganho constante. Usando a representação equivalente, mostrada na Fig. 14.18b, a tensão de saída pode ser expressada em termos das entradas como

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3\right) \tag{14.11}$$

Em outras palavras, cada entrada adiciona uma tensão à saída, multiplicada pelo seu correspondente fator de ganho. Se mais entradas são usadas, cada qual acrescenta uma componente adicional à saída.

EXEMPLO 14.5

Calcule a tensão de saída de um amplificador somador com amp-op para os seguintes conjuntos de tensões e resistores (Use $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ em todos os casos.)

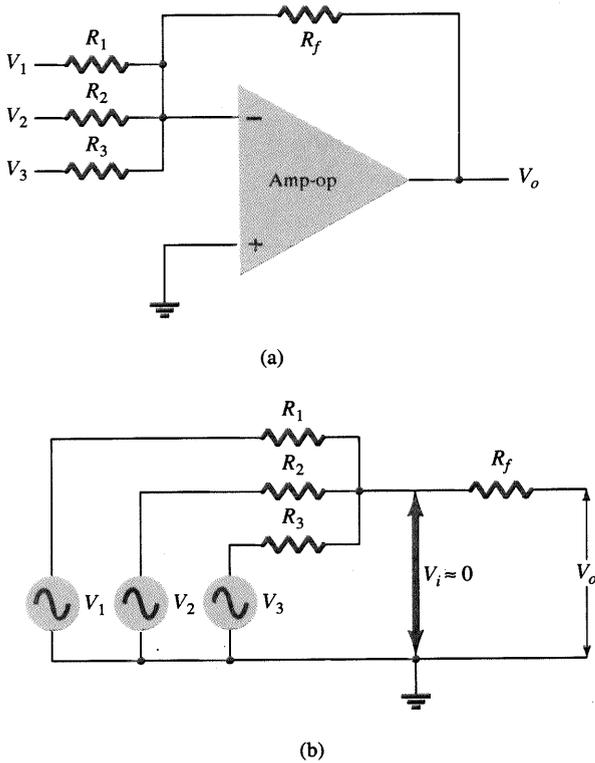
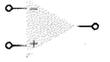


Fig. 14.18 (a) Amplificador somador; (b) circuito equivalente com terra virtual.

Solução

- (a) $V_1 = +1 \text{ V}$, $V_2 = +2 \text{ V}$, $V_3 = +3 \text{ V}$, $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$.
- (b) $V_1 = -2 \text{ V}$, $V_2 = +3 \text{ V}$, $V_3 = +1 \text{ V}$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$.

Usando a Eq. (14.11):

$$\begin{aligned} \text{(a) } V_o &= - \left[\frac{1000 \text{ k}\Omega}{500 \text{ k}\Omega} (+1 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+2 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+3 \text{ V}) \right] \\ &= - [2(1 \text{ V}) + 1(2 \text{ V}) + 1(3 \text{ V})] = -7 \text{ V} \\ \text{(b) } V_o &= - \left[\frac{1000 \text{ k}\Omega}{200 \text{ k}\Omega} (-2 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{500 \text{ k}\Omega} (+3 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+1 \text{ V}) \right] \\ &= - [5(-2 \text{ V}) + 2(3 \text{ V}) + 1(1 \text{ V})] = +3 \text{ V} \end{aligned}$$

Integrador

Até agora, a entrada e os componentes de realimentação eram resistores. Se o componente de realimentação usado for um capacitor, como mostrado na Fig. 14.19a, a conexão resultante é chamada de *integrador*. O circuito equivalente, com terra-virtual (Fig. 14.19b), mostra que uma expressão para a tensão entre en-

trada e saída pode ser deduzida em função da corrente I , da entrada para a saída. Recorde que terra virtual significa que podemos considerar a tensão na junção de R e X_c como sendo um terra (uma vez que $V_i \approx 0 \text{ V}$) mas nenhuma corrente flui para a terra neste ponto. A impedância capacitiva pode ser expressa por

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC}$$

onde $s = j\omega$ corresponde à notação de Laplace.* Resolvendo para V_o/V_i obtemos

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_1}{R} = -\frac{V_o}{X_C} = \frac{-V_o}{1/sC} = -sCV_o \\ \frac{V_o}{V_1} &= \frac{-1}{sCR} \end{aligned} \tag{14.12}$$

A expressão acima pode ser reescrita no domínio do tempo como

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_1(t) dt \tag{14.13}$$

A equação (14.13) mostra que a saída é a integral da entrada, com uma inversão e um multiplicador de $1/RC$. A capacidade de integrar um dado sinal dá ao computador analógico a possibilidade de resolver equações diferenciais e, portanto, resolver eletricamente operações de sistemas físicos análogos.

A operação de integração é semelhante à de somar, uma vez que constitui uma soma da área sob a forma de onda ou curva em um período de tempo. Se uma tensão fixa for aplicada como entrada para um circuito integrador, a Eq. (14.13) mostra que a tensão de saída cresce sobre um período de tempo, fornecendo uma tensão em forma de rampa. A equação (14.13) mostra que a rampa de tensão de saída (para uma tensão de entrada fixa) é oposta em polaridade à tensão de entrada e é multiplicada pelo fator $1/RC$. Embora o circuito da Fig. 14.19 possa operar com vários tipos de sinais, os exemplos seguintes usarão uma tensão de entrada fixa, resultando numa rampa de tensão de saída.

Como exemplo, considere uma tensão de entrada, $V_i = 1 \text{ V}$, para o circuito integrador da Fig. 14.20a. O fator de escala de $1/RC$ é

$$-\frac{1}{RC} = \frac{1}{(1 \text{ M}\Omega)(1 \mu\text{F})} = -1$$

de modo que a saída é uma rampa de tensão negativa como mostrado na Fig. 14.20b. Se o fator de escala é alterado fazendo $R = 100 \text{ k}\Omega$, por exemplo, então

$$-\frac{1}{RC} = \frac{1}{(100 \text{ k}\Omega)(1 \mu\text{F})} = -10$$

e a saída é, então, uma rampa de tensão em declive, como mostrado na Fig. 14.20c.

Mais de uma entrada pode ser aplicada a um integrador, como mostrado na Fig. 14.21, com a operação resultante dada por

$$\begin{aligned} v_o(t) &= - \left[\frac{1}{R_1 C} \int v_1(t) dt + \frac{1}{R_2 C} \int v_2(t) dt + \frac{1}{R_3 C} \int v_3(t) dt \right] \end{aligned} \tag{14.14}$$

*A notação de Laplace permite expressar operações diferenciais e integrais usando o operador s . Leitores não familiarizados com esta teoria devem ignorar os passos que levam à Eq. (14.13) e seguir o significado físico usado daí por diante.

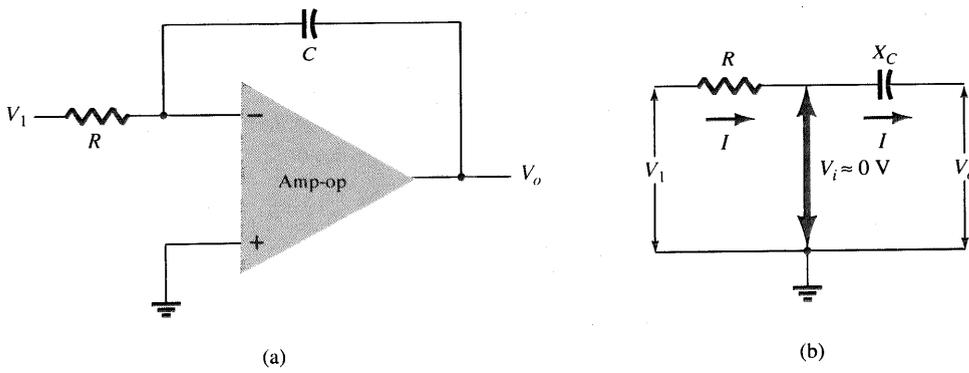
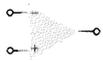


Fig. 14.19 Integrador.

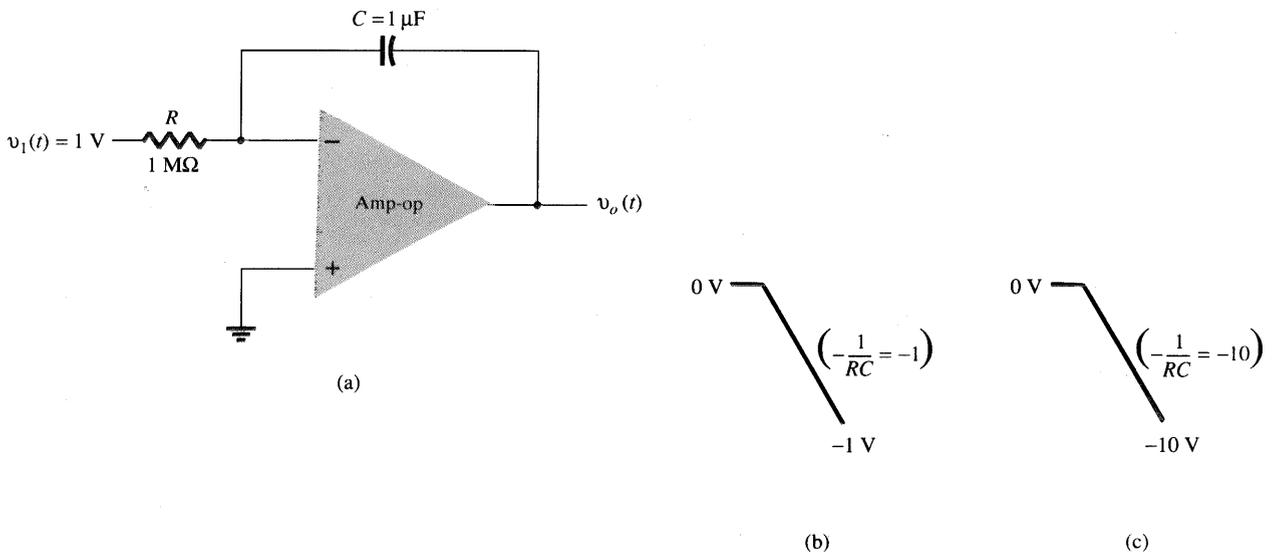


Fig. 14.20 Operação do integrador com entrada em degrau.

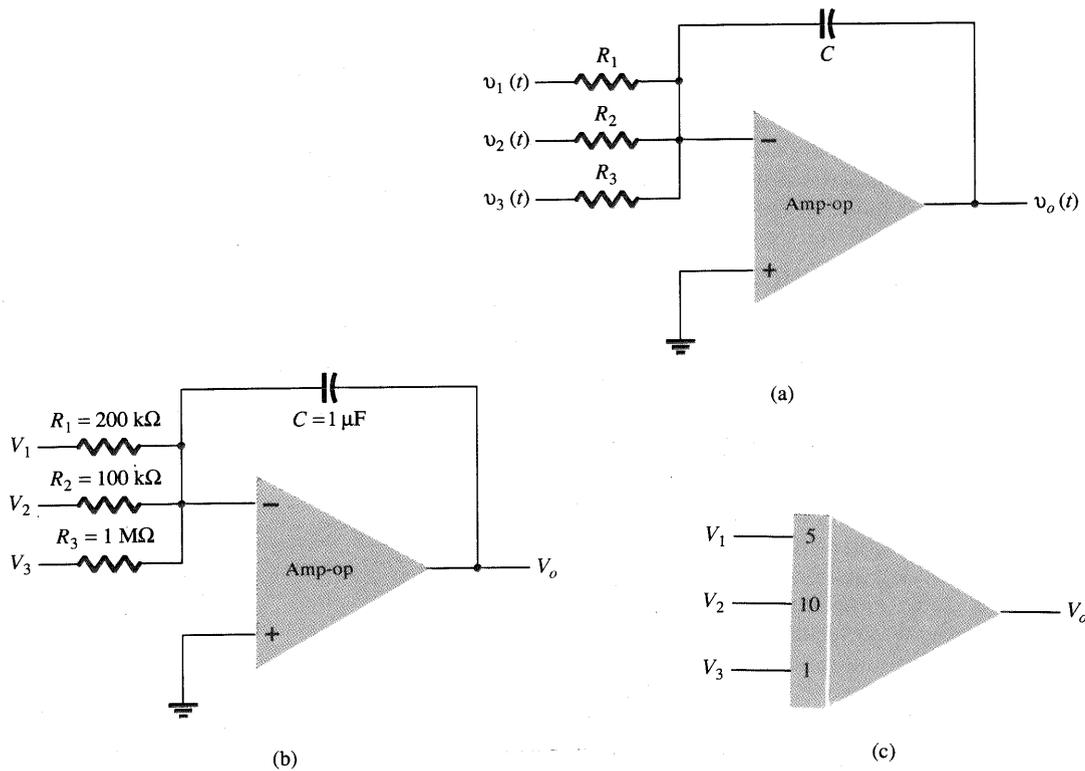


Fig. 14.21 (a) Circuito integrador somador; (b) valores dos componentes; (c) representação do computador analógico, circuito integrador.

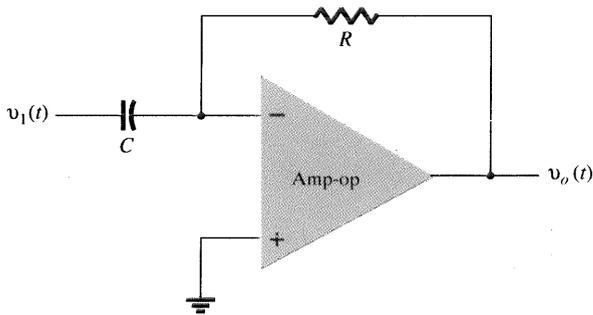
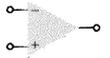


Fig. 14.22 Circuito diferenciador.

Um exemplo de integrador somador usado num computador analógico é dado na Fig. 14.21. O circuito real é mostrado com resistores de entrada e capacitor de realimentação, visto que a representação do computador analógico indica apenas o fator de escala para cada entrada.

Diferenciador

Um circuito diferenciador é mostrado na Fig. 14.22. Embora não seja tão útil quanto os circuitos vistos acima, o diferenciador é muito utilizado, sendo a razão resultante para o circuito

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_1(t)}{dt} \quad (14.15)$$

onde o fator de escala é $-RC$.

14.5 ESPECIFICAÇÕES DO AMP-OP — PARÂMETROS DE DESEQUILÍBRIO DC

Antes de abordarmos as várias aplicações que utilizam amp-ops, devemos nos familiarizar com alguns dos parâmetros usados para definir a operação do componente. Estas especificações incluem características dc, de transiente e de frequência, como será visto em seguida.

Tensões e Correntes de Desequilíbrio

Em princípio, a saída do amp-op deve ser de 0 V quando a entrada for de 0 V; no entanto, na prática, verifica-se na saída a existência de uma tensão de desequilíbrio nestas condições. Por exemplo, se for aplicado 0 V a ambas as entradas do am-op e verificado 26 mV (dc) na saída, esta tensão seria indesejada e gerada pelo circuito, e não pelo sinal de entrada. Porém, como o usuário pode conectar o circuito amplificador para operação com vários ganhos e polaridades, o fabricante especifica uma tensão de desequilíbrio de entrada para o amp-op. A tensão de desequilíbrio de saída é então determinada pela tensão de desequilíbrio de entrada e o ganho do amplificador, conforme a conexão estabelecida pelo usuário.

Pode ser mostrado que a tensão de desequilíbrio de saída é afetada por duas condições de circuito independentes: (1) uma tensão de desequilíbrio de entrada, V_{IO} , e (2) uma corrente de desequilíbrio devido à diferença nas correntes resultantes nas entradas mais (+) e menos (-).

TENSÃO DE DESEQUILÍBRIO DE ENTRADA, V_{IO}

As folhas de especificações do fabricante fornecem um valor de V_{IO} para o amp-op. Para determinar o efeito desta tensão de entrada sobre a saída, considere a conexão mostrada na Fig. 14.23. Usando $V_o = AV_i$, podemos escrever

$$V_o = AV_i = A \left(V_{IO} - V_o \frac{R_1}{R_1 + R_f} \right)$$

Resolvendo para V_o , temos

$$V_o = V_{IO} \frac{A}{1 + A[R_1/(R_1 + R_f)]} \approx V_{IO} \frac{A}{A[R_1/(R_1 + R_f)]}$$

do qual podemos escrever

$$V_o \text{ (desequilíbrio)} = V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1} \quad (14.16)$$

A equação (14.16) mostra como a tensão de desequilíbrio de saída depende da tensão de desequilíbrio de entrada especificada para uma conexão típica do amp-op.

EXEMPLO 14.6

Calcule a tensão de desequilíbrio de saída do circuito da Fig. 14.24. As especificações do amp-op lista $V_{IO} = 1,2 \text{ mV}$.

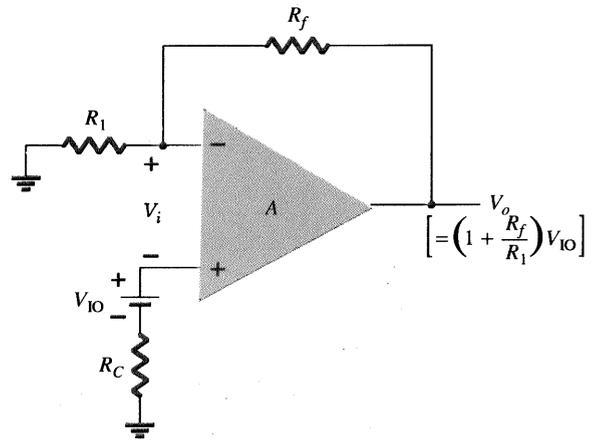


Fig. 14.23 Operação mostrando os efeitos da tensão de desequilíbrio de entrada, V_{IO} .

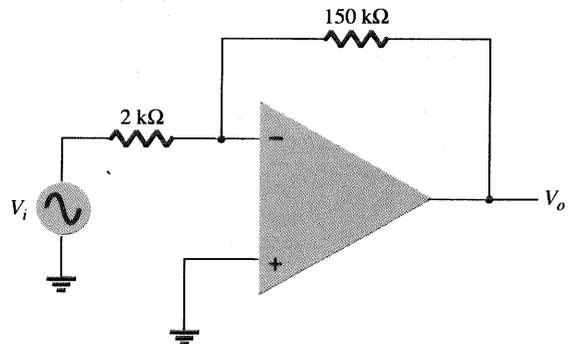
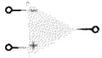


Fig. 14.24 Conexão do amp-op para os Exemplos 14.6 e 14.7.



Solução

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.16): } V_o(\text{desequilíbrio}) &= V_{I0} \frac{R_1 + R_f}{R_1} \\ &= (1,2 \text{ mV}) \left(\frac{2 \text{ k}\Omega + 150 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega} \right) = \mathbf{91,2 \text{ mV}} \end{aligned}$$

TENSÃO DE DESEQUILÍBRIO DE SAÍDA DEVIDA À CORRENTE DE DESEQUILÍBRIO DE ENTRADA, I_{I0}

Uma diferença entre as correntes de polarização das entradas também produz uma tensão de desequilíbrio na saída. Como os dois transistores de entrada nunca são exatamente iguais, as correntes de operação serão levemente diferentes. Para uma conexão amp-op típica, como a mostrada na Fig. 14.25, uma tensão de desequilíbrio de saída pode ser determinada como se segue. Substituindo as correntes de polarização através dos resistores de entrada pela queda de tensão correspondente, como mostrado pela Fig. 14.26, podemos determinar a expressão para a tensão de saída resultante. Usando superposição, a tensão de saída devida às correntes de polarização de entrada I_{IB}^+ , denotada por V_o^+ , é

$$V_o^+ = I_{IB}^+ R_C \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

enquanto a tensão de saída devida a apenas I_{IB}^- denotada por V_o^- é

$$V_o^- = I_{IB}^- R_1 \left(-\frac{R_f}{R_1} \right)$$

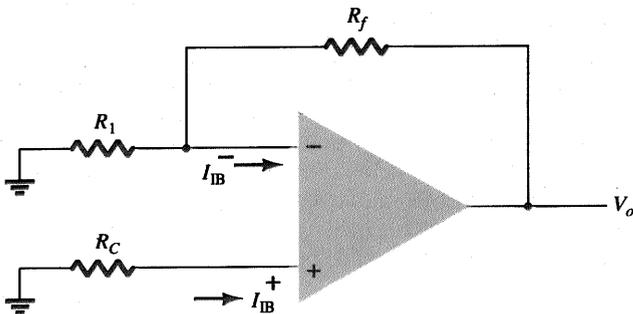


Fig. 14.25 Conexão do amp-op mostrando as correntes de polarização das entradas.

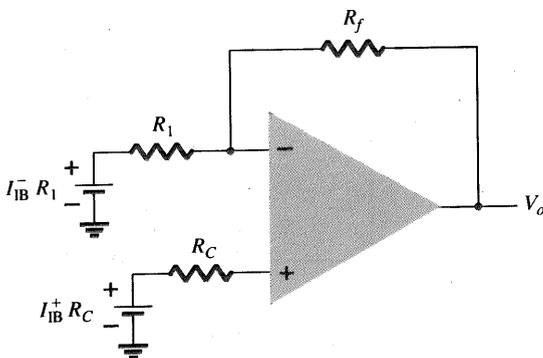


Fig. 14.26 Circuito redesenhado da Fig. 14.25.

para uma tensão de desequilíbrio de saída total de

$$\begin{aligned} V_o(\text{desequilíbrio devido a } I_{IB}^+ \text{ } I_{IB}^-) &= I_{IB}^+ R_C \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \\ &\quad - I_{IB}^- R_1 \frac{R_f}{R_1} \end{aligned} \quad (14.17)$$

Como o objetivo principal é determinar a diferença entre as correntes de polarização das entradas em vez de cada valor em separado, definimos a corrente de desequilíbrio I_{I0} por

$$I_{I0} = I_{IB}^+ - I_{IB}^-$$

Como a resistência de compensação R_c é, quase sempre, aproximadamente igual ao valor de R_1 , usando $R_c = R_1$ na Eq. (14.17), podemos escrever

$$\begin{aligned} V_o(\text{desequilíbrio}) &= I_{IB}^+ (R_1 + R_f) - I_{IB}^- R_f \\ &= I_{IB}^+ R_f - I_{IB}^- R_f = R_f (I_{IB}^+ - I_{IB}^-) \end{aligned}$$

resultando em

$$V_o(\text{desequilíbrio devido a } I_{I0}) = I_{I0} R_f \quad (14.18)$$

EXEMPLO 14.7

Calcule a tensão de desequilíbrio do circuito da Fig. 14.24 para uma especificação de $I_{I0} = 100 \text{ nA}$.

Solução

$$\text{Eq. (14.18): } V_o = I_{I0} R_f = (100 \text{ nA})(150 \text{ k}\Omega) = \mathbf{15 \text{ mV}}$$

DESEQUILÍBRIO TOTAL DEVIDO A V_{I0} E I_{I0}

Como a tensão de saída do amp-op pode apresentar uma tensão de desequilíbrio de saída devida a ambos os fatores vistos acima, a tensão de desequilíbrio de saída total pode ser expressada como

$$\begin{aligned} |V_o(\text{desequilíbrio})| &= |V_o(\text{desequilíbrio devido a } V_{I0})| + \\ &\quad + |V_o(\text{desequilíbrio devido a } I_{I0})| \end{aligned} \quad (14.19)$$

O valor absoluto é usado, pois a polaridade da tensão de desequilíbrio pode ser positiva ou negativa.

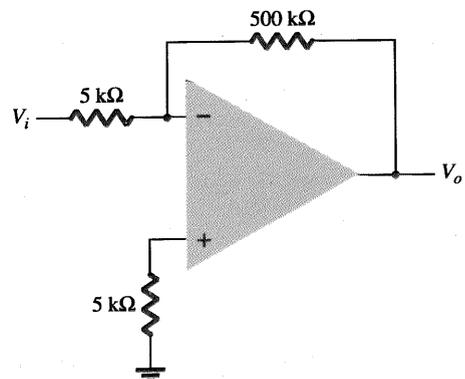


Fig. 14.27 Circuito com amp-op para o Exemplo 14.8.



EXEMPLO 14.8

Calcule a tensão de desequilíbrio total para o circuito da Fig. 14.27 para um amp-op com valores especificados de tensão de desequilíbrio de entrada, $V_{IO} = 4 \text{ mV}$ e corrente de desequilíbrio de entrada de $I_{IO} = 150 \text{ nA}$.

Solução

O desequilíbrio devido a V_{IO} é

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.16): } V_o(\text{desequilíbrio devido a } V_{IO}) &= V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1} = \\ &= (4 \text{ mV}) \left(\frac{5 \text{ k}\Omega + 500 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega} \right) = 404 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.18): } V_o(\text{desequilíbrio devido a } I_{IO}) &= I_{IO} R_f = \\ &= (150 \text{ nA})(500 \text{ k}\Omega) = 75 \text{ mV} \end{aligned}$$

resultando num desequilíbrio total

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.19): } V_o(\text{desequilíbrio total}) &= \\ &= V_o(\text{desequilíbrio devido a } V_{IO}) + \\ &+ V_o(\text{desequilíbrio devido a } I_{IO}) = \\ &= 404 \text{ mV} + 75 \text{ mV} = \mathbf{479 \text{ mV}} \end{aligned}$$

CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE ENTRADA, I_{IB}

Um parâmetro relacionado a I_{IO} e às correntes de polarização das entradas I_{IB}^+ e I_{IB}^- é a corrente de polarização média definida como

$$I_{IB} = \frac{I_{IB}^+ + I_{IB}^-}{2} \tag{14.20}$$

Poder-se-ia determinar as correntes de polarização das entradas em separado, usando os valores especificados para I_{IO} e I_{IB} . Pode ser mostrado que para $I_{IB}^+ > I_{IB}^-$

$$I_{IB}^+ = I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2} \tag{14.21}$$

$$I_{IB}^- = I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}$$

EXEMPLO 14.9

Calcule as correntes de polarização de cada entrada de um amp-op com valores especificados de $I_{IO} = 5 \text{ nA}$ e $I_{IB} = 30 \text{ nA}$.

Solução

Usando a Eq. (14.21):

$$I_{IB}^+ = I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2} = 30 \text{ nA} + \frac{5 \text{ nA}}{2} = \mathbf{32,5 \text{ nA}}$$

$$I_{IB}^- = I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2} = 30 \text{ nA} - \frac{5 \text{ nA}}{2} = \mathbf{27,5 \text{ nA}}$$

14.6 ESPECIFICAÇÕES DO AMP-OP — PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA

Um amp-op ideal é projetado para ser um amplificador de alto ganho, com ampla banda-passante. Esta operação tende a ser instável (oscilar) devido aos efeitos de realimentação positiva (veja Cap. 18). Para que seja assegurada uma operação estável, os amp-ops são construídos com circuitos de compensação interna, que podem reduzir o ganho de malha aberta com o aumento da frequência. Esta redução no ganho é denominada *roll-off*. Em muitos amp-ops, o roll-off ocorre numa taxa de 20 dB por década (−20 dB/década) ou 6 dB por oitava (−6 dB/oitava). (O Cap. 11 serve como referência para uma discussão inicial sobre dB e resposta em frequência.)

Note que embora as especificações do amp-op listem o ganho de tensão de malha aberta (A_{VD}), o usuário conecta, normalmente, o amp-op usando resistores de realimentação para reduzir o ganho de tensão do circuito a um valor muito menor (ganho de tensão de malha fechada, A_{CL}). Obtêm-se vários benefícios como resultado desta redução de ganho. Primeiro, o ganho de tensão do amplificador é mais estável e preciso, estabelecido por resistores externos; segundo, a impedância de entrada do circuito assume um valor maior do que a do amp-op isolado; terceiro, a impedância de saída do circuito assume um valor menor do que a do amp-op isolado; e finalmente, a resposta em frequência do circuito ocupa uma faixa maior do que a do amp-op isolado.

Ganho — Banda Passante

Devido aos circuitos de compensação interna existentes em um amp-op, o ganho de tensão cai com o aumento de frequência. As especificações do amp-op fornecem uma descrição do ganho *versus* banda passante. A Fig. 14.28 fornece uma curva do ganho *versus* frequência para um amp-op típico. Em baixas frequências, próximo à operação dc, o ganho é dado por A_{VD} (ganho de tensão diferencial) e é tipicamente um valor muito grande. Quando a frequência do sinal de entrada aumenta, o ganho de malha aberta cai, até finalmente atingir o valor de 1 (unitário). A frequência neste valor de ganho é especificada pelo fabricante como banda passante de ganho unitário, B_1 . Embora este valor esteja associado a uma frequência (veja Fig. 14.28) na qual o ganho torna-se 1, pode ser considerada também uma largura de faixa, pois representa a banda de

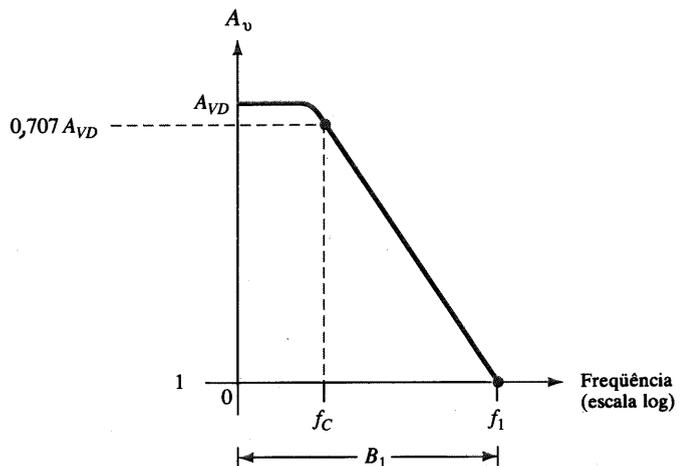


Fig. 14.28 Gráfico de ganho *versus* frequência.



freqüências de 0 Hz até a freqüência que proporciona um ganho unitário. Pode-se, portanto, denominar este ponto de freqüência de ganho unitário (f_1) ou banda passante de ganho unitário (B_1).

Uma outra freqüência de interesse está representada na Fig. 14.28, em que o ganho cai 3 dB (ou para 0,707 do ganho dc, A_{VD}), sendo esta a freqüência de corte do amp-op, f_c . Na realidade, a freqüência de ganho unitário e a freqüência de corte estão relacionadas por

$$f_1 = A_{VD} f_c \quad (14.22)$$

A equação (14.22) mostra que a freqüência de ganho unitário também pode ser chamada de produto ganho-banda passante do amp-op.

EXEMPLO 14.10

Determine a freqüência de corte de um amp-op com valores especificados de $B_1 = 1$ MHz e $A_{VD} = 200$ V/mV.

Solução

Uma vez que $f_1 = B_1 = 1$ MHz, podemos usar a Eq. (14.22) para calcular

$$f_c = \frac{f_1}{A_{VD}} = \frac{1 \text{ MHz}}{200 \text{ V/mV}} = \frac{1 \times 10^6}{200 \times 10^3} = 5 \text{ Hz}$$

Taxa de Subida, TS

Outro parâmetro que reflete a capacidade do amp-op de operar com sinais variantes é a taxa de subida, definida como

taxa de subida = máxima taxa na qual a saída do amplificador pode variar em volts por microssegundo (V/ μ s)

$$SR = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \quad \text{V}/\mu\text{s} \quad \text{com } t \text{ em } \mu\text{s}. \quad (14.23)$$

A taxa de subida fornece um parâmetro que especifica a máxima taxa de variação da tensão de saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na forma de degrau.* Se for aplicado um sinal de entrada com uma taxa de variação de tensão maior que a taxa de subida, a saída não será capaz de variar suficientemente rápido, e não cobrirá a faixa completa esperada, resultando num sinal ceifado ou distorcido. De qualquer forma, a saída não será uma versão amplificada do sinal de entrada se a taxa de subida do amp-op não for respeitada.

EXEMPLO 14.11

Para um amp-op com uma taxa de subida $TS = 2$ V/ μ s, qual é o máximo ganho de tensão de malha fechada que pode ser usado quando o sinal de entrada varia de 0,5 V em 10 μ s?

Solução

Como $V_o = A_{CL} V_i$, podemos usar

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta t} = A_{CL} \frac{\Delta V_i}{\Delta t}$$

* O ganho de malha fechada é obtido com a saída realimentada à entrada.

da qual nós temos

$$A_{CL} = \frac{\Delta V_o / \Delta t}{\Delta V_i / \Delta t} = \frac{SR}{\Delta V_i / \Delta t} = \frac{2 \text{ V}/\mu\text{s}}{0,5 \text{ V}/10 \mu\text{s}} = 40$$

Um ganho de tensão de malha fechada de amplitude maior que 40 fará com que a saída tenha uma taxa de variação maior do que a taxa de subida. Portanto, o máximo ganho permitido de malha fechada é 40.

Máxima Freqüência do Sinal

A máxima freqüência de sinal em que um amp-op pode operar depende da banda passante (B) e da taxa de subida (TS). Para um sinal senoidal da forma

$$v_o = K \text{ sen}(2\pi ft)$$

pode-se mostrar que a máxima taxa de variação é

$$\text{máxima taxa de variação do sinal} = 2\pi fK \quad \text{V/s}$$

Para evitar distorção na saída, a taxa de variação também deve ser menor do que a taxa de subida, isto é

$$2\pi fK \leq TS$$

$$\omega K \leq TS$$

tal que

$$\begin{aligned} f &\leq \frac{TS}{2\pi K} \quad \text{Hz} \\ \omega &\leq \frac{TS}{K} \quad \text{rad/s} \end{aligned} \quad (14.24)$$

Adicionalmente, a máxima freqüência, f , na Eq. (14.24), é também limitada pela banda passante de ganho unitário.

EXEMPLO 14.12

Para o sinal e circuito da Fig. 14.29, determine a máxima freqüência que pode ser usada. (Taxa de subida do amp-op é $TS = 0,5$ V/ μ s.)

Solução

Para um ganho de amplitude

$$A_{CL} = \left| \frac{R_f}{R_1} \right| = \frac{240 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 24$$

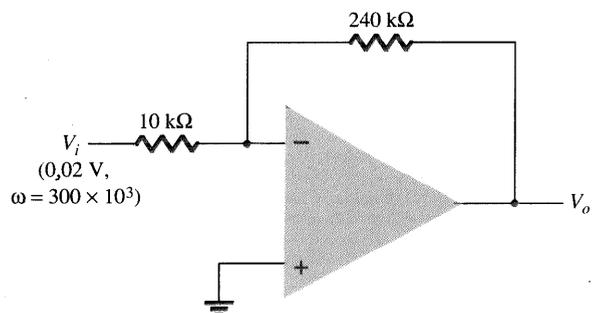


Fig. 14.29 Circuito com amp-op para o Exemplo 14.12.



a tensão de saída fornece

$$K = A_{CL} V_i = 24(0,02 \text{ V}) = 0,48 \text{ V}$$

$$\text{Eq. (14.24): } \omega \leq \frac{TS}{K} = \frac{0,5 \text{ V}/\mu\text{s}}{0,48 \text{ V}} = 1,1 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

Uma vez que a frequência do sinal, $\omega = 300 \times 10^3 \text{ rad/s}$, é menor que o valor máximo determinado acima, não há distorção resultante na saída.

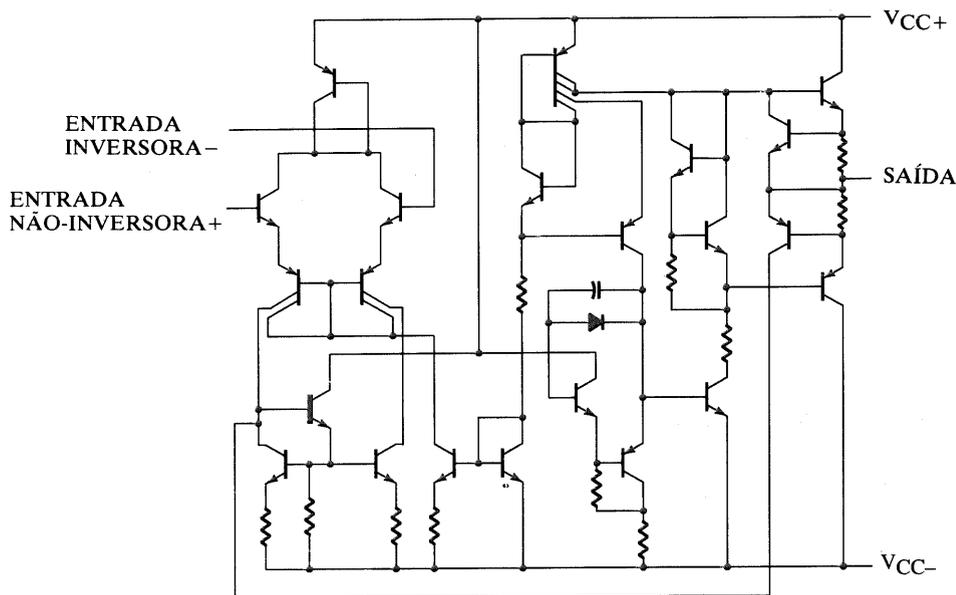
741 descrito pelas informações fornecidas na Fig. 14.30 representa um amp-op bipolar típico. O amp-op está disponível em um grande número de encapsulamentos, sendo que o encapsulamento DIP de 8 pinos e o de 10 pinos são os mais usuais.

Valores Máximos Nominais

Os valores máximos nominais incluem os maiores valores de tensão que podem ser usados, a máxima oscilação do sinal de entrada permitida, e a máxima potência com a qual o dispositivo é capaz de operar. Dependendo da versão do CI utilizada, o maior valor da fonte de tensão é uma fonte dupla de $\pm 18 \text{ V}$ ou $\pm 22 \text{ V}$. Por sua vez, um CI pode dissipar internamente de 310 a 570 mW, dependendo da pastilha de CI usada. O Quadro 14.1

14.7 ESPECIFICAÇÕES DA UNIDADE AMP-OP

Nesta seção, discutimos como as especificações do fabricante devem ser interpretadas para uma unidade de amp-op típica. O CI



valores máximos absolutos para a faixa de operação com temperatura ao ar livre (a menos que mencionado ao contrário)

	uA741M	uA741C	UNIDADE
Fonte de tensão V_{CC+} (veja Nota 1)	22	18	V
Fonte de tensão V_{CC-} (veja Nota 1)	-22	-18	V
Tensão de entrada diferencial (veja Nota 2)	± 30	± 30	V
Tensão de entrada para qualquer entrada (veja Notas 1 e 3)	± 15	± 15	V
Tensão entre o terminal de desequilíbrio nulo (N1/N2) e V_{CC-}	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	V
Duração do curto-circuito na saída (veja Nota 4)	ilimitada	ilimitada	
Dissipação de potência total contínua em (ou abaixo) temperatura ao ar livre de 25°C (Veja Nota 5)	500	500	mW
Faixa de temperatura de operação ao ar livre	-55 a 125	0 a 70	°C
Faixa de temperatura de armazenagem	-65 a 150	-65 a 150	°C
Temperatura do condutor de 1,6 mm (1/16 polegada) do encapsulamento por 60 segundos Encapsulamento FH, FK, J, JG, ou U	300	300	°C
Temperatura do condutor de 1,6 mm (1/16 polegada) do encapsulamento por 10 segundos Encapsulamento D, N, ou P		260	°C

- NOTAS: 1. Todos os valores de tensão; a não ser quando dito o contrário, dizem respeito ao ponto médio entre V_{CC+} e V_{CC-} .
 2. Tensões diferenciais são do terminal de entrada não-inversora em relação ao terminal de entrada inversora.
 3. A amplitude da tensão de entrada nunca deve exceder a amplitude da fonte de tensão ou 15 volts, o que for menor.
 4. A saída pode ser curto-circuitada para a terra ou outra fonte de potência. Para o uA741M apenas, a duração ilimitada do curto-circuito aplica-se em (ou abaixo) 125°C de temperatura do encapsulamento ou 75°C de temperatura ao ar livre.
 5. Para uma operação acima de 25°C ao ar livre, consulte as Curvas de Redução de Capacidade de Dissipação, Seção 2. Nos encapsulamentos J e JG, uA741M as pastilhas são montadas em liga; uA741C são montadas em vidro.

Fig. 14.30 Especificações do amp-op 741.

características elétricas específicas para temperatura ao ar livre, $V_{cc+} = 15V$, $V_{cc-} = -15V$

PARÂMETRO		CONDIÇÕES DE TESTE		uA741M			uA741C			UNIDADE
				MÍN	TÍP	MÁX	MÍN	TÍP	MÁX	
V_{IO}	Tensão de desequilíbrio de entrada	$V_o = 0$	25°C	1	5	1	6	mV		
			Faixa Completa	6			7,5			
$\Delta V_{IO(ajd)}$	Faixa de ajuste da tensão de desequilíbrio	$V_o = 0$	25°C	± 15			mV			
I_{IO}	Corrente de desequilíbrio de entrada	$V_o = 0$	25°C	20	200	20	200	nA		
			Faixa Completa	500			300			
I_{IB}	Corrente de polarização de entrada	$V_o = 0$	25°C	80	500	80	500	nA		
			Faixa Completa	1.500			800			
V_{LCR}	Faixa de tensão de entrada em modo comum		25°C	± 12	± 13	± 12	± 13	V		
			Faixa Completa	± 12			± 12			
V_{OM}	Pico de oscilação da tensão de saída		$R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C	± 12	± 14	± 12	± 14	V	
			$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	Faixa Completa	± 12					
			$R_L = 2\text{ k}\Omega$	25°C	± 10	± 13	± 10	± 13		
			$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	Faixa Completa	± 10					
V_{VD}	Aplicação de tensão diferencial para grandes sinais		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	50	200	20	200	V/mV	
			$V_o = \pm 10V$	Faixa Completa	25			15		
r_i	Resistência de entrada		25°C	0,3	2	0,3		M Ω		
r_o	Resistência de saída	$V_o = 0$ Veja Nota 6	25°C	75			75	Ω		
C_i	Capacitância de entrada		25°C	1,4			1,4	pF		
RRMC	Razão de rejeição de modo-comum	$V_{ic} = V_{icr}^{min}$	25°C	70	90	70	90	dB		
			Faixa Completa	70						
K_{SVS}	Sensibilidade da fonte de tensão $\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$	$V_{CC} = \pm 9V$ a $\pm 15V$	25°C	30	150	30	150	$\mu V/V$		
			Faixa Completa	150						
I_{OS}	Corrente de saída de curto-circuito		25°C	± 25	± 40	± 25	± 40	mA		
I_{CC}	Fonte de corrente	Sem carga $V_o = 0$	25°C	1,7	2,8	1,7	2,8	mA		
			Faixa Completa	3,3						
P_D	Dissipação de total de potência	Sem carga $V_o = 0$	25°C	50	85	50	85	mW		
			Faixa Completa	100						

características de operação, $V_{cc+} = 15V$, $V_{cc-} = -15V$, $T_A = 25^\circ C$

PARÂMETRO		CONDIÇÕES DE TESTE		uA741M			uA741MI			UNIDADE
				MÍN	TÍP	MÁX	MÍN	TÍP	MÁX	
t_r	Tempo de subida Fator de overshoot	$V_i = 20\text{ mV}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ $C_L = 1.000\text{ pF}$. Veja Fig. 1		0,3		0,3		μs		
				5%		5%				
SR	Taxa de subida em ganho unitário	$V_i = 10\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ $C_L = 1.000\text{ pF}$. Veja Fig. 1		0,5		0,5	V/ μs			

Fig. 14.30 Continuação.

resumo alguns valores típicos para uso em exemplos e problemas.

QUADRO 14.1 Valores Máximos Absolutos	
Fonte de tensão	$\pm 22\text{ V}$
Dissipação interna de potência	500 mW
Tensão de entrada-diferencial	$\pm 30\text{ V}$
Tensão de entrada	$\pm 15\text{ V}$

EXEMPLO 14.13

Determine a corrente drenada de uma fonte de potência de $\pm 12\text{ V}$ se o CI dissipa 500 mW.

Solução

Se assumirmos que cada fonte fornece metade da potência total para o CI, então

$$P = VI$$

$$250\text{ mW} = 12\text{ V}(I)$$

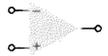
tal que cada fonte deve fornecer uma corrente de

$$I = \frac{250\text{ mW}}{12\text{ V}} = \mathbf{20,83\text{ mA}}$$

Características Elétricas

As características elétricas incluem muitos dos parâmetros mencionados anteriormente neste capítulo. O fabricante fornece algumas combinações de valores típicos, mínimos ou máximos para vários parâmetros julgados mais úteis para o usuário. Um resumo é fornecido no Quadro 14.2.

V_{IO} Tensão de desequilíbrio de entrada: A tensão de desequilíbrio de entrada é tipicamente 1 mV, mas pode assumir valores maiores do que 6 mV. A tensão de desequilíbrio de entra-


QUADRO 14.2 Características Elétricas do $\mu\text{A}741$: $V_{CC} = \pm 15 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

Características	MÍN	TÍP	MÁX	Unidade
V_{IO} Tensão de desequilíbrio de entrada		1	6	mV
I_{IO} Corrente de desequilíbrio de entrada		20	200	nA
I_{IB} Corrente de polarização de entrada		80	500	nA
V_{ICR} Faixa de tensão de entrada de modo-comum	± 12	± 13		V
V_{OM} Pico máximo de oscilação da tensão de saída	± 12	± 14		V
A_{VD} Amplificação de tensão-diferencial para grandes sinais	20	200		V/mV
r_i Resistência de entrada	0,3	2		M Ω
r_o Resistência de saída		75		Ω
C_i Capacitância de entrada		1,4		pF
RRMC Razão de rejeição de modo-comum	70	90		dB
I_{CC} Fonte de corrente		1,7	2,8	mA
P_D Dissipação total de potência		50	85	mW

da é calculada com base no circuito utilizado. Se a pior condição possível for a de interesse, o máximo valor deve ser usado. Na prática, costuma-se trabalhar com os valores típicos fornecidos.

I_{IO} Corrente de desequilíbrio de entrada: A corrente de desequilíbrio de entrada é listada como sendo tipicamente de 20 nA, enquanto o maior valor esperado é de 200 nA.

I_{IB} Corrente de polarização de entrada: A corrente de polarização de entrada é tipicamente 80 nA podendo alcançar 500 nA.

V_{ICR} Faixa de tensão de entrada de modo-comum: Este parâmetro apresenta a faixa superior em que a tensão de entrada pode variar (usando uma fonte de $\pm 15 \text{ V}$), cerca de $\pm 12 \text{ V}$ a $\pm 13 \text{ V}$. Entradas maiores que este valor, em amplitude, provavelmente provocarão uma distorção na saída e devem ser evitadas.

V_{OM} Máxima oscilação de saída: Este parâmetro apresenta o valor máximo que o sinal de saída pode atingir (usando uma fonte de $\pm 15 \text{ V}$). Dependendo do ganho de malha fechada do circuito, o sinal de entrada deve ser limitado para manter a saída variando em uma faixa menor do que $\pm 12 \text{ V}$, no pior caso, ou $\pm 14 \text{ V}$, tipicamente.

A_{VD} Amplificação de tensão diferencial para grandes sinais: Este é o ganho de tensão de malha aberta do amp-op. O valor máximo é de 20 V/mV, ou 20.000 V/V, e o valor típico é de 200 V/mV ou 200.000 V/V.

r_i Resistência de entrada: A resistência de entrada do amp-op, quando medida sob malha aberta, é tipicamente 2 M Ω , mas poderia ser tão pequena quanto 0,3 M Ω ou 300 k Ω . Num circuito de malha fechada, esta impedância de entrada pode ser muito grande, como discutido anteriormente.

r_o Resistência de saída: A resistência de saída do amp-op é, tipicamente, de 75 Ω . Nenhum valor mínimo ou máximo é dado pelo fabricante para este amp-op. Novamente, no circuito de malha fechada, a impedância de saída pode ser mais baixa, dependendo do ganho do circuito.

C_i Capacitância de entrada: Para operações em altas frequências, é útil saber que a entrada para o amp-op tem tipicamente 1,4 pF de capacitância. Este valor é considerado pequeno para a maioria das aplicações.

RRMC Razão de rejeição de modo-comum: O parâmetro do amp-op é tipicamente 90 dB, mas pode chegar a 70 dB. Como 90 dB equivale a 31.622,78, o amp-op amplifica ruído (entrada comum) mais de 30.000 vezes menos do que a diferença das entradas.

I_{CC} Fonte de corrente: O amp-op drena um total de 2,8 mA, tipicamente, da fonte dupla de tensão, mas a corrente drenada

pode chegar a 1,7 mA. Este parâmetro ajuda o usuário a determinar o tamanho da fonte de tensão a ser utilizada. Pode também ser usado para calcular a potência dissipada pelo CI ($P_D = 2V_{CC}I_{CC}$).

P_D Dissipação total de potência: A potência total dissipada pelo amp-op é tipicamente de 50 mW, mas pode chegar a 85 mW. Referindo-se ao parâmetro anterior, o amp-op dissipará cerca de 50 mW quando drenando 1,7 mA de uma fonte dupla de 15 V. Para fontes de tensão menores, a corrente drenada será menor e a dissipação total de potência também será reduzida.

EXEMPLO 14.14

Usando as especificações listadas no Quadro 14.2, calcule a tensão de desequilíbrio de saída típica para a conexão de circuito da Fig. 14.31.

Solução

O desequilíbrio na saída devido a V_{IO} é calculado por

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.16): } V_o(\text{desequilíbrio}) &= V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1} = \\ &= (1 \text{ mV}) \left(\frac{12 \text{ k}\Omega + 360 \text{ k}\Omega}{12 \text{ k}\Omega} \right) = 31 \text{ mV} \end{aligned}$$

A tensão de saída devida a I_{IO} é calculada por

$$\begin{aligned} \text{Eq. (14.18): } V_o(\text{desequilíbrio}) &= I_{IO} R_f = 20 \text{ nA}(360 \text{ k}\Omega) \\ &= 7,2 \text{ mV} \end{aligned}$$

Assumindo que estes dois desequilíbrios são de mesma polaridade na saída, a tensão de desequilíbrio total é então

$$V_o(\text{desequilíbrio}) = 31 \text{ mV} + 7,2 \text{ mV} = \mathbf{38,2 \text{ mV}}$$

EXEMPLO 14.15

Para as características típicas do amp-op 741 ($r_o = 25\Omega$, $A = 200 \text{ k}$), calcule os seguintes parâmetros para o circuito da Fig. 14.31.

- A_{CL} .
- Z_i .
- Z_o .

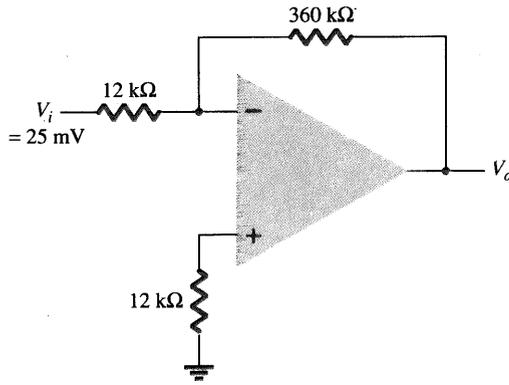


Fig. 14.31 Circuito com amp-op para o Exemplo 14.14.

Solução

- (a) Eq. (14.8): $\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{360 \text{ k}\Omega}{12 \text{ k}\Omega} = -30 \cong \frac{1}{\beta}$
- (b) $Z_i = R_1 = 12 \text{ k}\Omega$
- (c) $Z_o = \frac{r_o}{(1 + \beta A)} = \frac{75 \Omega}{1 + \left(\frac{1}{30}\right)(200 \text{ k}\Omega)} = 0,011 \Omega$

Características de Operação

Um outro grupo de valores usados para descrever a operação do amp-op com sinais variantes é fornecido no Quadro 14.3.

EXEMPLO 14.16

Calcule a frequência de corte do amp-op cujas características são fornecidas nos Quadros 14.2 e 14.3.

Solução

$$\text{Eq. (14.22): } f_c = \frac{f_1}{A_{VD}} = \frac{B_1}{A_{VD}} = \frac{1 \text{ MHz}}{20.000} = 50 \text{ Hz}$$

EXEMPLO 14.17

Calcule a máxima frequência permitida para o sinal de entrada para o circuito na Fig. 14.31, com uma entrada de $V_i = 25 \text{ mV}$.

QUADRO 14.3 Características de Operação: $V_{CC} = \pm 15 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parâmetro	MÍN	TÍP	MÁX	Unidade
B_1 Banda passante de ganho unitário		1		MHz
t_r Tempo de subida		0,3		μs

Solução

Para um ganho de malha fechada de $A_{CL} = -30$ e uma entrada de $V_i = 25 \text{ mV}$, o fator de ganho da saída é calculado por

$$K = A_{CL} V_i = 30(25 \text{ mV}) = 750 \text{ mV} = 0,750 \text{ V}$$

Usando a Eq. (14.24), a máxima frequência do sinal, $f_{\text{máx}}$, é

$$f_{\text{máx}} = \frac{\text{SR}}{2\pi K} = \frac{0,5 \text{ V}/\mu\text{s}}{2\pi(0,750 \text{ V})} = 106 \text{ kHz}$$

Desempenho do Amp-op

O fabricante fornece um grande número de gráficos para descrever o desempenho do amp-op. A Figura 14.32 inclui algumas curvas de desempenho típicas comparando várias características em função da fonte de tensão. O ganho de tensão de malha aberta aumenta à medida que aumenta o valor da fonte de tensão. Enquanto as informações fornecidas anteriormente correspondem a uma fonte de tensão em particular, as curvas de desempenho abaixo mostram o ganho de tensão para uma faixa de valores de fontes de tensão.

EXEMPLO 14.18

Usando a Fig. 14.32, determine o ganho de tensão de malha aberta para uma fonte de tensão com $V_{CC} = \pm 12 \text{ V}$.

Solução

Da curva na Fig. 14.32, $A_{VD} \approx 104 \text{ dB}$. Este é um ganho de tensão linear de

$$A_{VD} (\text{dB}) = 20 \log_{10} A_{VD}$$

$$104 \text{ dB} = 20 \log A_{VD}$$

$$A_{VD} = \text{antilog} \frac{104}{20} = 158,5 \times 10^3$$

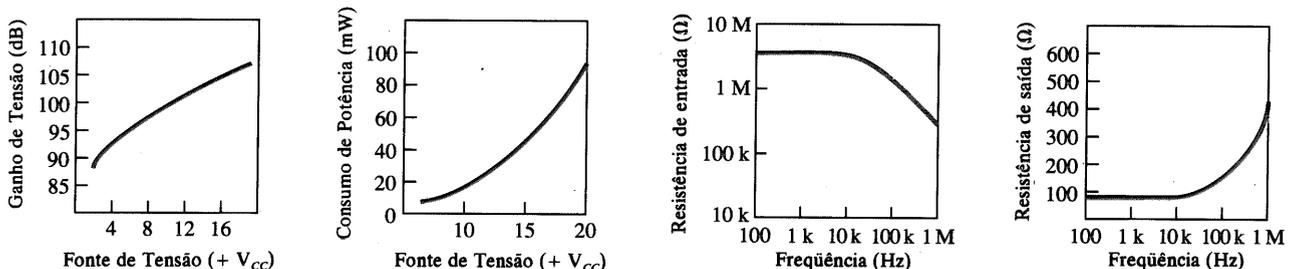


Fig. 14.32 Curvas de desempenho.



Uma outra curva de desempenho mostra como o consumo de potência varia em função da fonte de tensão. Como mostrado, o consumo de potência aumenta com valores maiores de fonte de tensão. Por exemplo, enquanto a dissipação de potência é cerca de 50 mW com $V_{CC} = \pm 15$ V, ela cai para 5 mW com $V_{CC} = \pm 5$ V. Duas outras curvas mostram como as resistências de entrada e saída são afetadas pela frequência. Como se pode ver, a resistência de entrada cai e a resistência de saída aumenta para as altas frequências.

14.8 ANÁLISE POR COMPUTADOR

Um amp-op pode ser modelado usando o PSpice para a implementação de amp-ops inversores, amp-ops não-inversores, amp-ops somadores e seguidores unitários. Vamos iniciar descrevendo um modelo de amp-op ideal que pode ser usado no PSpice.

Modelo do Amp-op no PSpice

Um amp-op pode ser descrito no PSpice como um dispositivo que possui uma impedância de entrada, R_i , uma impedância de saída, R_o , e um ganho de tensão, A_v . A Fig. 14.33 mostra o circuito com esta abordagem, com terminais identificados como

- Terminal 2: entrada não-inversora
- Terminal 1: entrada inversora
- Terminal 3: saída do amp-op
- Terminal 4: terminal interno
- Terminal 0: referência de terra

Para um amp-op ideal: A impedância de entrada é listada como

$$RI\ 2\ 1\ 1E12 \quad (R_i = 10^{12})$$

a qual é essencialmente uma impedância infinita, ou um circuito aberto. A impedância de saída, R_o , é listada como

$$RO\ 4\ 3\ 1M \quad (R_o = 0,001\ \Omega \approx 0\ \Omega)$$

a qual representa essencialmente zero ohm de impedância. O ganho de tensão do amplificador é dado por

$$EOP\ 4\ 0\ 2\ 1\ 1E10 \quad (A_v = 10^{10})$$

o qual é essencialmente um ganho de tensão infinito. A última linha fornece uma fonte de tensão na saída (entre os terminais 4

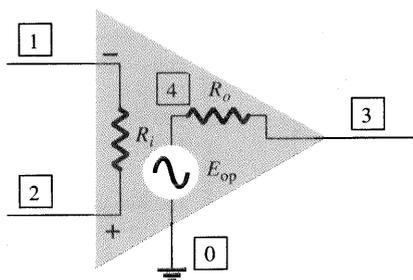


Fig. 14.33 Modelo de amp-op ideal para o PSpice.

e 0), a qual é $1E10$ vezes maior que a tensão na entrada (entre os terminais 2 e 1).

Para um amp-op prático, tal como o 741, as linhas PSpice seriam como se segue:

```
RI 2 1 2E6
RO 4 3 75
EOP 4 0 2 1 200E3
```

O 741 é, portanto, descrito como tendo

$$R_i = 2\ M\Omega$$

$$R_o = 75\ \Omega$$

$$A_v = 200,000\ V/V = 200\ V/mV$$

Programa 14.1: Amp-op Inversor

Um amp-op inversor do tipo descrito no Exemplo 14.3 e mostrado na Fig. 14.15 é considerado primeiro. Um circuito amp-op inversor mostrando terminais numerados de acordo com o amp-op ideal descrito na Fig. 14.33 é fornecido na Fig. 14.34. A descrição PSpice é fornecida na listagem do Programa 14.1 (Fig. 14.35). Para valores de circuito de $V_1 = 2$ V, $R_f = 500$ k Ω , e $R_1 = 100$ k Ω , a saída deveria ser 2 V amplificada por um ganho de

$$A_v = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{500\ k\Omega}{100\ k\Omega} = -5$$

tal que $V_o = -5(2V) = -10V$. O componente RP é usado para estabelecer uma conexão do terminal 2 para a terra, permitindo que os números dos terminais do amp-op fiquem de acordo com os da Fig. 14.33.

Um item adicional fornecido na análise da saída é a função de transferência do circuito, dado pela linha PSpice

```
·TF V(3) V1
```

a qual fornece a função transferência para a saída em V(3) devido à tensão de entrada V1. O resultado mostra um ganho de tensão de -5 , uma resistência de saída de 100 m Ω (a de R_1), e uma resistência de saída de quase 0 (devido a R_o).

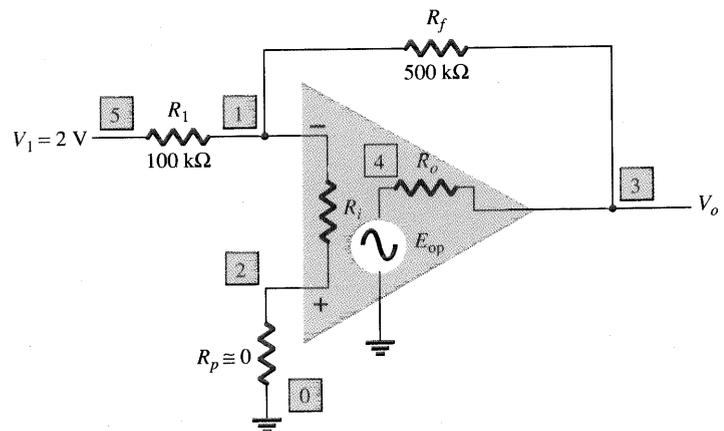


Fig. 14.34 Circuito para o Programa 14.1.



```

Inverting op-amp circuit
****      CIRCUIT DESCRIPTION
*****
V1 5 0 2V
R1 5 1 100K
RF 3 1 500K
RP 2 0 1M
*OPAMP Description
RI 2 1 1E12
RO 4 3 1M
EOP 4 0 2 1 1E10
*output
.DC V1 2 2 2
.PRINT DC V(5) V(3)
.TF V(3) V1
.OPTIONS NOPAGE
.END

****      DC TRANSFER CURVES          TEMPERATURE = 27.000 DEG C
V1          V(5)          V(3)
2.000E+00  2.000E+00  -1.000E+01

****      SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION    TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 1.000E-09 ( 2) 1.000E-24 ( 3) -10.0000 ( 4) -10.0000
( 5) 2.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V1        -2.000E-05

****      SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS
V(3)/V1 = -5.000E+00
INPUT RESISTANCE AT V1 = 1.000E+05
OUTPUT RESISTANCE AT V(3) = 6.000E-13

```

Fig. 14.35 Saída do PSpice para o Programa 1.

O amp-op usado no Programa 14.1 utilizou a mesma numeração apresentada na Fig. 14.33. No Programa 14.1, os valores de RI, RO e EOP correspondem aos valores para um amp-op quase ideal.

PSpice para Windows (Windows Design Center Analysis)

O circuito da Fig. 14.34 pode ser desenhado no programa para Windows da MicroSim. A seguir será dada uma breve descrição dos passos necessários para o desenho do circuito mostrado na Fig. 14.36.

1. Selecione o item uA741 da biblioteca eval.slb.

2. Selecione o item R da biblioteca analog.slb.

3. Selecione o item VSRC da biblioteca source.slb para a fonte dc (na versão 6.0) ou bateria (usando a versão 6.1 ou posterior). Entre com um Nome (Vcc) e um Valor (+20V). Repita para Vcc = -20V.

4. Selecione o item VSRC da biblioteca source.slb. Entre com VDC = 2V.

Configure o programa para que sejam mostrados o Nome e o Valor da fonte.

5. Selecione o item VIEWPOINT da biblioteca special.slb e posicione na saída.

Execute o programa e verifique a tensão de saída fornecida em Viewpoint.

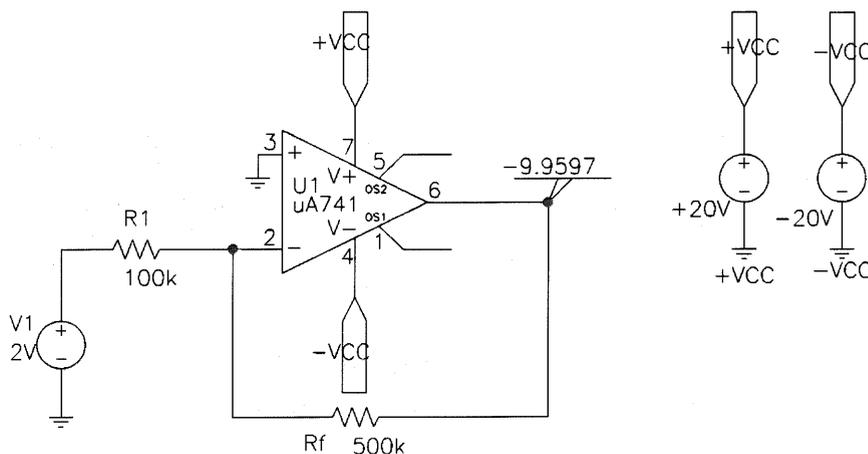


Fig. 14.36 Desenho no PSpice para Windows do circuito com amp-op da Fig. 14.34.

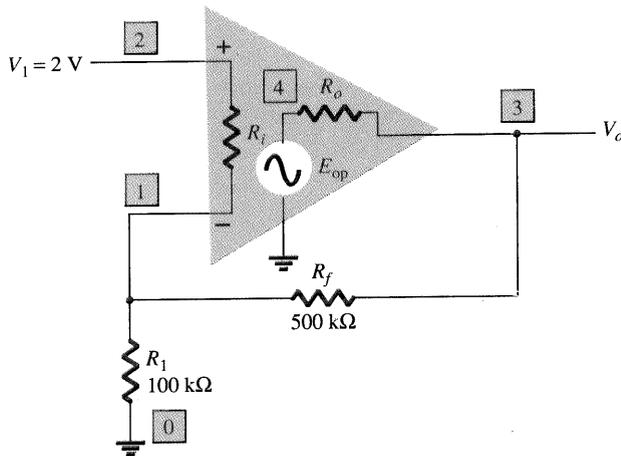


Fig. 14.37 Circuito para o Problema 14.2.

```

Non-inverting op-amp circuit

****      CIRCUIT DESCRIPTION
*****
V1 2 0 2V
R1 1 0 100K
RF 3 1 500K
*OPAMP Description
RI 2 1 1E12
RO 4 3 1M
EOP 4 0 2 1 1E10
*Output
.DC V1 2 2 2
.PRINT DC V(2) V(3)
.TF V(3) V1
.OPTIONS NOPAGE
.END

****      DC TRANSFER CURVES          TEMPERATURE = 27.000 DEG C
V1      V(2)      V(3)
2.000E+00  2.000E+00  1.200E+01

****      SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION
NODE      VOLTAGE NODE      VOLTAGE NODE      VOLTAGE NODE      VOLTAGE
( 1)      2.0000 ( 2)      2.0000 ( 3)      12.0000 ( 4)      12.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V1        -1.2000E-21

****      SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS
V(3)/V1 = 6.000E+00
INPUT RESISTANCE AT V1 = 1.000E+20
OUTPUT RESISTANCE AT V(3) = 6.000E-13
    
```

Fig. 14.38 Saída do PSpice para o Programa 14.2.

Programa 14.2: Amp-op Não-Inversor

Um circuito não-inversor tal como o analisado no Exemplo 14.4 é mostrado na Fig. 14.37, e descrito na Fig. 14.38. Para a conexão não-inversora (usando o mesmo amp-op ideal descrito na Fig. 14.33), o ganho de tensão é

$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{500 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} = +6$$

com tensão de saída

$$V_o = (+6)(2 \text{ V}) = 12 \text{ V}$$

Programa 14.3: Circuito Amp-op Somador

Um circuito amp-op somador do tipo analisado no Exemplo 14.5 é mostrado na Fig. 14.39. A Fig. 14.40 apresenta a análise PSpice. A saída é $V(3) = 3 \text{ V}$, como esperado, uma vez que o modelo amp-op ideal é usado.

PSpice para Windows (Windows Design Center Analysis)

O circuito da Fig. 14.39 pode ser desenhado no programa para Windows da MicroSim. A seguir será dada uma breve descrição

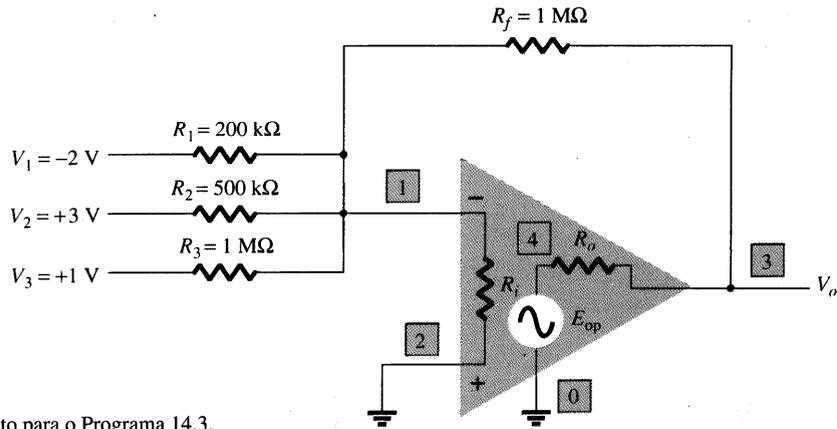


Fig. 14.39 Circuito para o Programa 14.3.

```

Summing op-amp circuit
****   CIRCUIT DESCRIPTION
*****
V1 5 0 -2V
V2 6 0 +3V
V3 7 0 +1V
R1 5 1 200K
R2 6 1 500K
R3 7 1 1MEG
RF 1 3 1MEG
RP 2 0 1M
*OPAMP Description
RI 2 1 1E12
RO 4 3 1M
EOP 4 0 2 1 1E10
*Output
.DC V1 -2 -2 1
.PRINT DC V(5) V(6) V(7) V(3)
.OPTIONS NOPAGE
.END

****   DC TRANSFER CURVES           TEMPERATURE = 27.000 DEG C
V1          V(5)          V(6)          V(7)          V(3)
-2.000E+00 -2.000E+00  3.000E+00  1.000E+00  3.000E+00
    
```

Fig. 14.40 Saída PSpice para o Programa 14.3.

dos passos necessários para o desenho do circuito mostrado na Fig. 14.41.

1. Selecione o item uA741 da biblioteca eval.slb.
2. Selecione o item R da biblioteca analog.slb.
3. Selecione o item VSRC da biblioteca source.slb para a fonte dc (na versão 6.0) ou bateria (usando a versão 6.1 ou posterior).

Entre com um Nome (Vcc) e um Valor (+20V).
Repita para Vcc = -20V.

4. Selecione o item VSRC da biblioteca source.slb.
Entre com V1 = -2V.

Configure o programa para que sejam mostrados o Nome e o Valor da fonte

Repita para V2 = +3V e V3 = +1V.

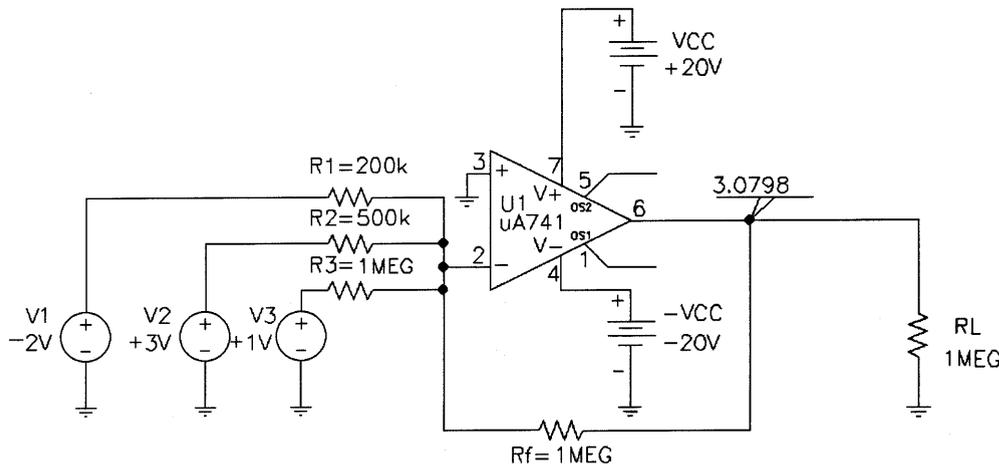


Fig. 14.41 Desenho no PSpice para Windows da Fig 14.39.

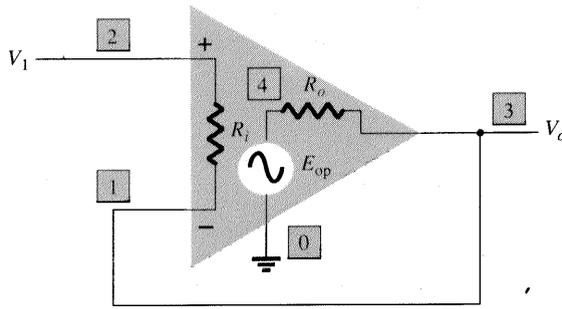
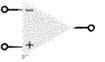


Fig. 14.42 Circuito para o Programa 14.4.

```

Basic unity gain op-amp circuit
****   CIRCUIT DESCRIPTION
*****
V1 2 0 2V
R1 3 1 1M
*OPAMP Description
RI 2 1 1E12
RO 4 3 1M
EOP 4 0 2 1 1E10
*Output
.DC V1 2 2 2
.PRINT DC V(3)
.TF V(3) V1
.OPTIONS NOPAGE
.END

****   DC TRANSFER CURVES           TEMPERATURE = 27.000 DEG C
      V1      V(3)
      2.000E+00  2.000E+00

****   SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION   TEMPERATURE = 27.000 DEG C
      NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE
      (  1)  2.0000  (  2)  2.0000  (  3)  2.0000  (  4)  2.0000

      VOLTAGE SOURCE CURRENTS
      NAME      CURRENT
      V1        -2.000E-22

****   SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS
      V(3)/V1 = 1.000E+00
      INPUT RESISTANCE AT V1 = 1.000E+20
      OUTPUT RESISTANCE AT V(3) = 1.000E-13
    
```

Fig. 14.43 Saída PSpice para o Programa 14.4.

5. Selecione o item VIEWPOINT da biblioteca special.slb e posicione na saída.

Execute o programa e verifique a tensão de saída fornecida em Viewpoint.

Programa 14.4: Circuito Amp-op Seguidor Unitário

A Fig. 14.42 fornece o circuito de um amp-op conectado como seguidor unitário. Para uma entrada de $V_1 = 2\text{ V}$, a saída (veja listagem na Fig. 14.43) é $V(3) = 2\text{ V}$, o mesmo valor da entrada. Um cálculo da função de transferência estabelece que o ganho de tensão do circuito é

$$\frac{V(3)}{V_1} = 1$$

a impedância de entrada vista pela fonte V_1 é $1\text{E}20$, essencialmente infinita, e a impedância de saída no terminal 3 é $1\text{E}-13$, essencialmente zero.

PROBLEMAS

§ 14.2 Operação Modo-Diferencial e Comum

1. Calcule a RRCM (em dB) dado que foram medidas: $V_d = 1\text{ mV}$, $V_o = 120\text{ mV}$, e $V_c = 1\text{ mV}$, $V_o = 20\text{ }\mu\text{V}$.
2. Determine a tensão de saída de um amp-op para tensões de entrada de $V_{i1} = 200\text{ }\mu\text{V}$ e $V_{i2} = 140\text{ }\mu\text{V}$. O amplificador tem um ganho diferencial de $A_d = 6000$ e o valor de RRCM é:
 - (a) 200.
 - (b) 10^5 .

§ 14.4. Circuitos Amp-op Práticos

3. Qual é a tensão de saída no circuito da Fig. 14.44?
4. Qual é a faixa de ajustes de ganho de tensão no circuito da Fig. 14.45?
5. Que tensão de entrada produz uma saída de 2 V no circuito da Fig. 14.46?

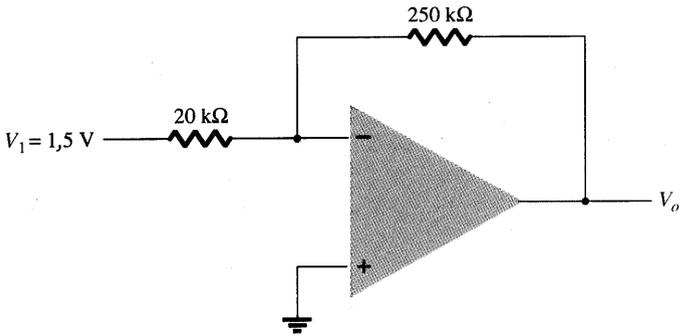


Fig. 14.44 Problemas 3, 25.

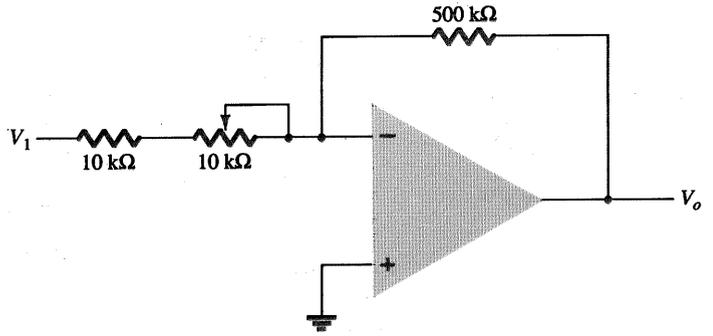


Fig. 14.45 Problema 4.

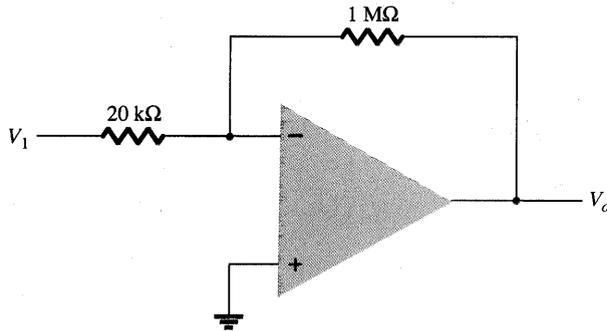


Fig. 14.46 Problema 5.

6. Qual é a faixa das tensões de saída no circuito da Fig. 14.47 se a entrada pode variar de 0,1 a 0,5 V?
7. Que tensão de saída resulta no circuito da Fig. 14.48 para uma entrada de $V_i = -0,3$ V?

8. Que entrada deve ser aplicada na Fig. 14.48 para resultar numa saída de 2,4 V?
9. Que faixa de tensão de saída é produzida no circuito da Fig. 14.49?
10. Calcule a tensão de saída produzida pelo circuito da Fig. 14.50 para $R_f = 330$ kΩ.
11. Calcule a tensão de saída do circuito na Fig. 14.50 para $R_f = 68$ kΩ.
12. Esboce a forma de onda de saída resultante na Fig. 14.51.
13. Que tensão de saída resulta no circuito da Fig. 14.52 para $V_i = +0,5$ V?
14. Calcule a tensão de saída para o circuito da Fig. 14.53.
15. Calcule as tensões de saída V_2 e V_3 no circuito da Fig. 14.54.

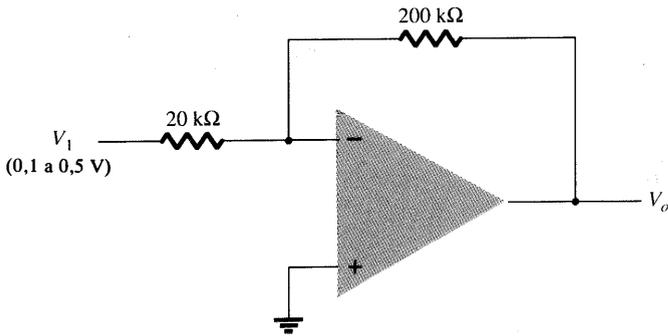


Fig. 14.47 Problema 6.

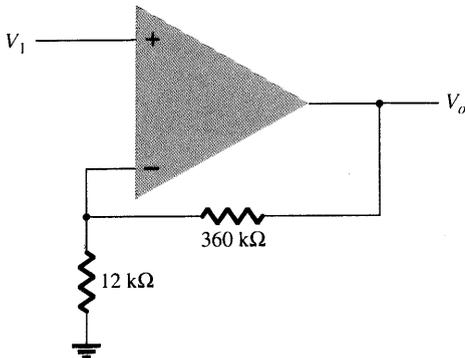


Fig. 14.48 Problemas 7-8, 26.

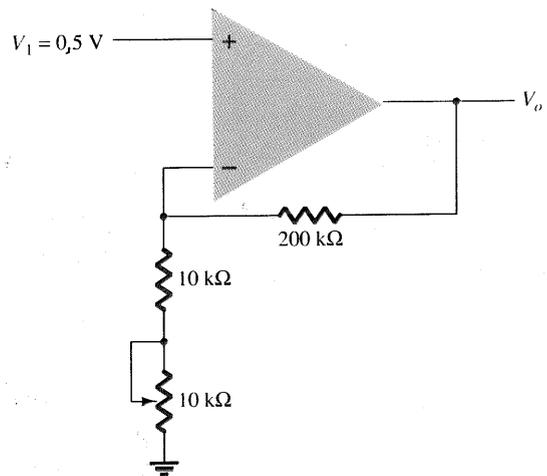


Fig. 14.49 Problema 9.

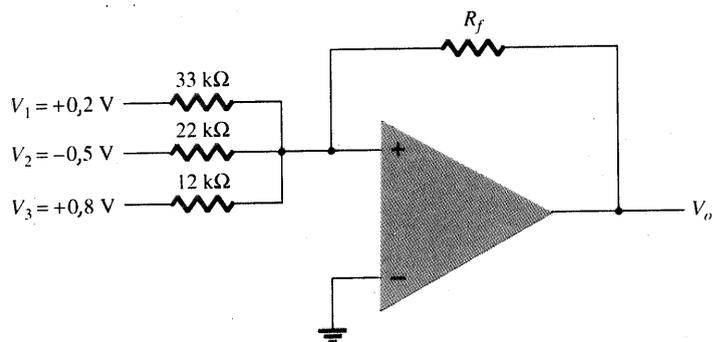


Fig. 14.50 Problemas 10-11, 27.

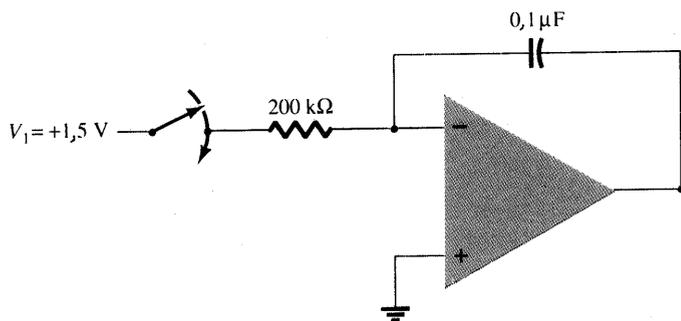


Fig. 14.51 Problema 12.

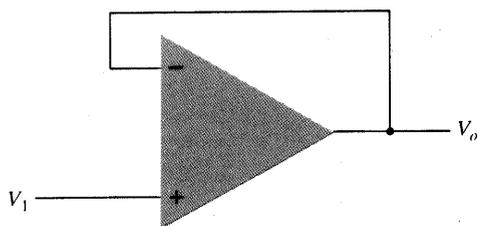


Fig. 14.52 Problema 13.

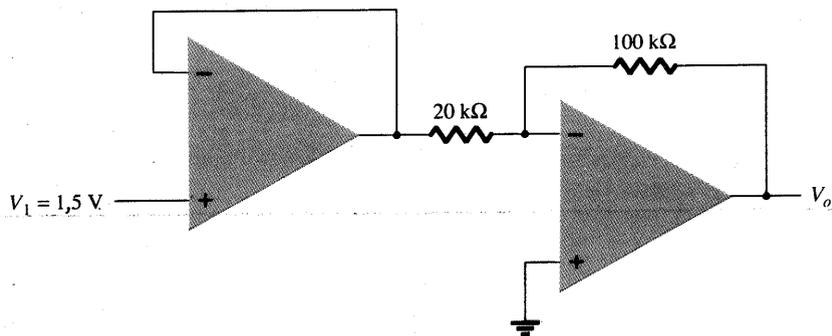


Fig. 14.53 Problemas 14, 28.

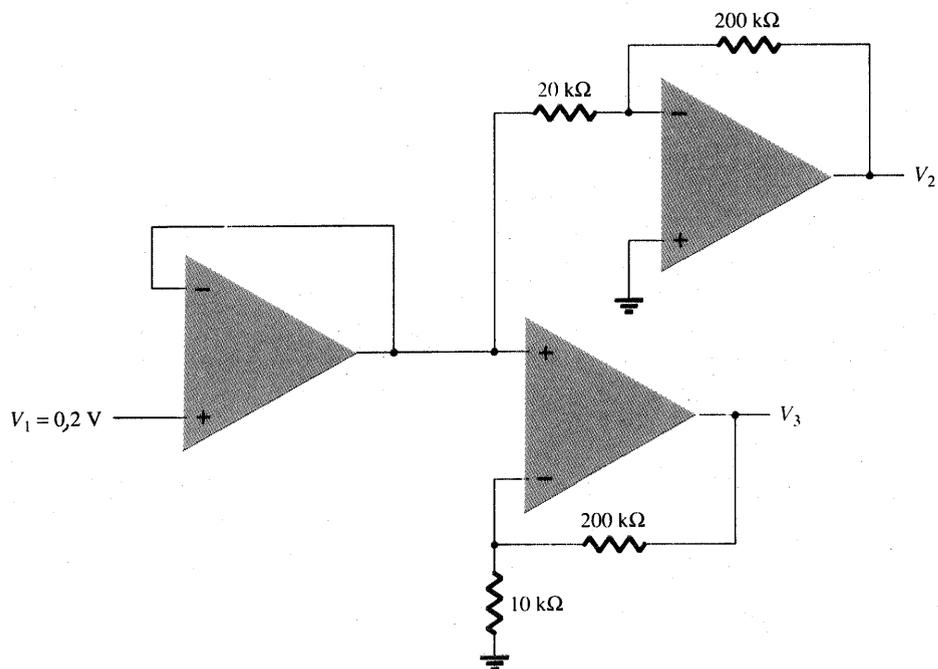
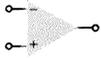


Fig. 14.54 Problema 15.



16. Calcule a tensão de saída, V_o , no circuito da Fig. 14.55.

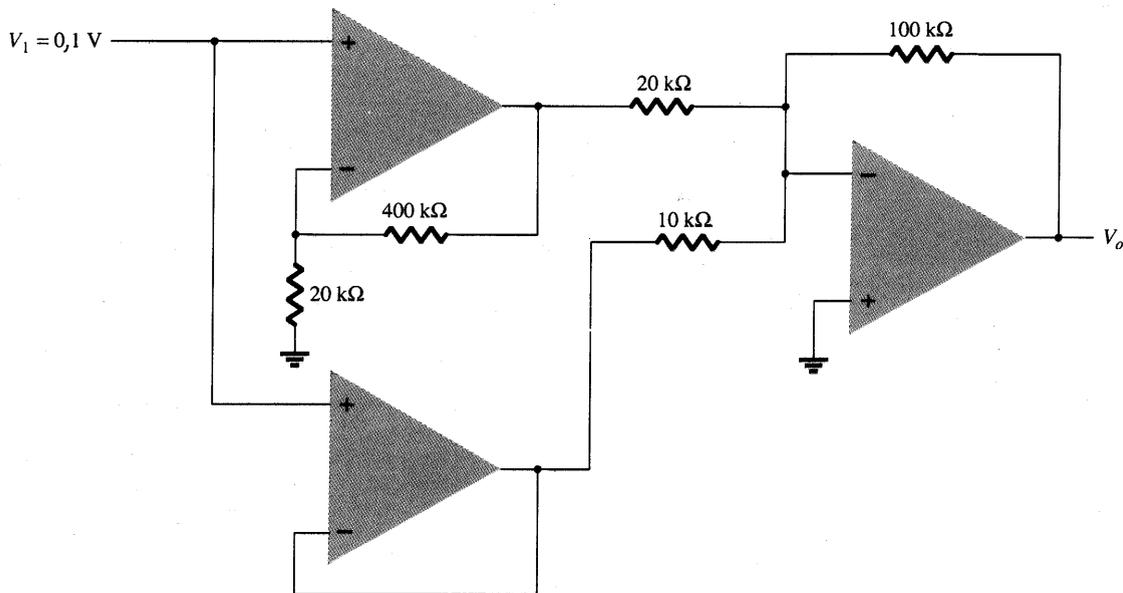


Fig. 14.55 Problemas 16, 29.

17. Calcule V_o no circuito da Fig. 14.56.

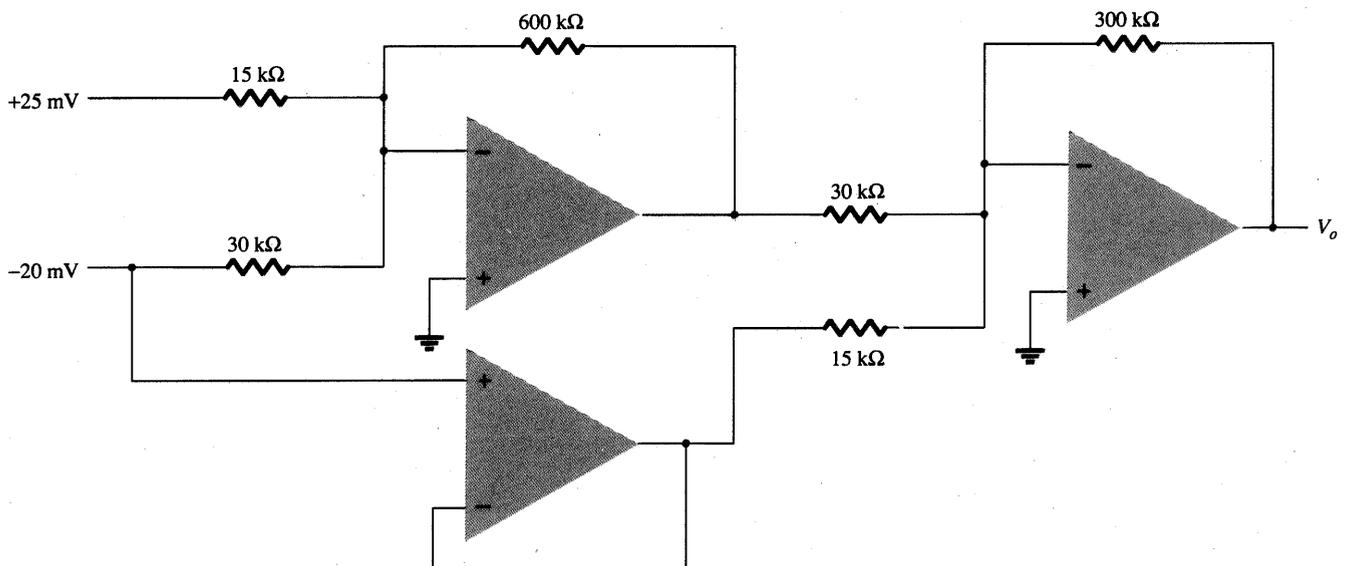


Fig. 14.56 Problema 17.

§ 14.5 Especificações do Amp-op — Parâmetros de Desequilíbrio DC

- *18. Calcule a tensão de desequilíbrio total para o circuito da Fig. 14.57 para um amp-op com valores especificados de tensão de desequilíbrio de entrada, $V_{10} = 6 \text{ mV}$ e corrente de desequilíbrio de entrada $I_{10} = 120 \text{ nA}$.
- *19. Calcule a corrente de polarização em cada terminal de entrada de um amp-op com valores especificados de $I_{10} = 4 \text{ nA}$ e $I_{1B} = 20 \text{ nA}$.

§ 14.6 Especificações do Amp-op — Parâmetros de Frequência

20. Determine a frequência de corte de um amp-op com valores especificados de $B_1 = 800 \text{ kHz}$ e $A_{vd} = 150 \text{ V/mV}$.
- *21. Para um amp-op com uma taxa de subida de $TS = 2,4 \text{ V}/\mu\text{s}$, qual é o máximo ganho de tensão de malha fechada que pode ser usado quando o sinal de entrada varia de $0,3 \text{ V}$ em $10 \mu\text{s}$?

Observação: Os asteriscos indicam problemas mais difíceis.

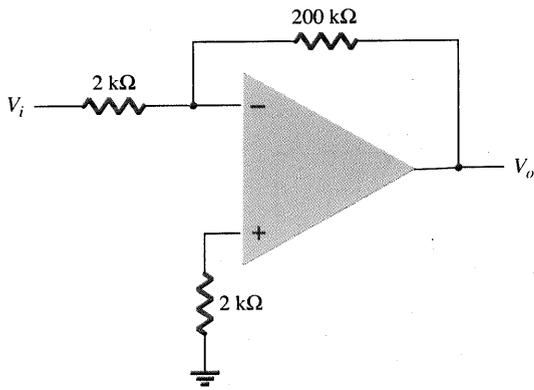
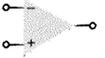


Fig. 14.57 Problemas 18, 22, 23, 24.

- *22. Para uma entrada de $V_i = 50 \text{ mV}$ no circuito da Fig. 14.57, determine a máxima frequência que pode ser usada. A taxa de subida do amp-op é $TS = 0,4 \text{ V}/\mu\text{s}$.

23. Usando as especificações listadas no Quadro 14.2, calcule a tensão de desequilíbrio típica para a conexão utilizada no circuito da Fig. 14.57.
- *24. Para as características típicas do amp-op 741, calcule os seguintes parâmetros para o circuito da Fig. 14.57.
- A_{CL} .
 - Z_i .
 - Z_o .

§ 14.8 Análise por Computador

- *25. Escreva um programa no PSpice para determinar a tensão de saída no circuito da Fig. 14.44.
- *26. Escreva um programa no PSpice para determinar a tensão de saída no circuito da Fig. 14.48 para a entrada $V_i = 0,5 \text{ V}$.
- *27. Escreva um programa no PSpice para determinar a tensão de saída no circuito da Fig. 14.50 para $R_f = 68 \text{ k}\Omega$.
- *28. Escreva um programa no PSpice para determinar a tensão de saída no circuito da Fig. 14.53.
- *29. Escreva um programa no PSpice para determinar a tensão de saída no circuito da Fig. 14.55.
- *30. Analise o circuito da Fig. 14.50 utilizando o PSpice para Windows.
- *31. Analise o circuito da Fig. 14.53 utilizando o PSpice para Windows.