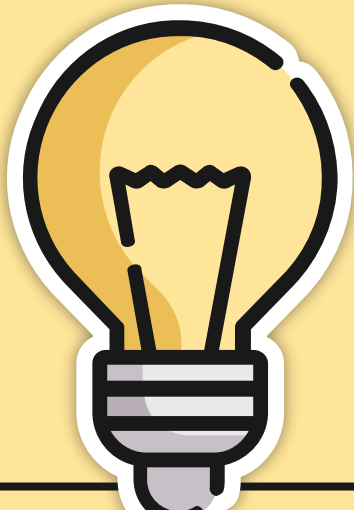


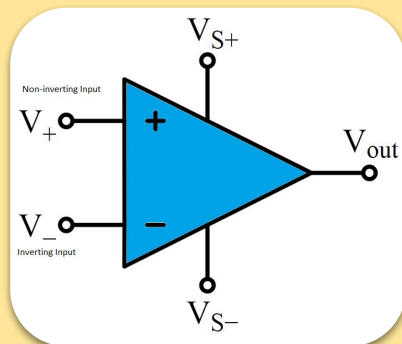
PETEE apoio acadêmico

Conteúdos

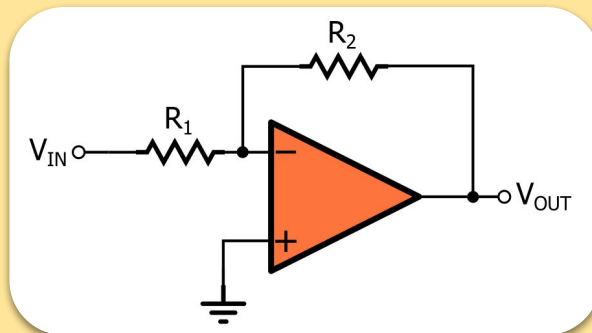
ELT084 - Dispositivos e Circuitos Eletrônicos Básicos
Amplificadores Operacionais



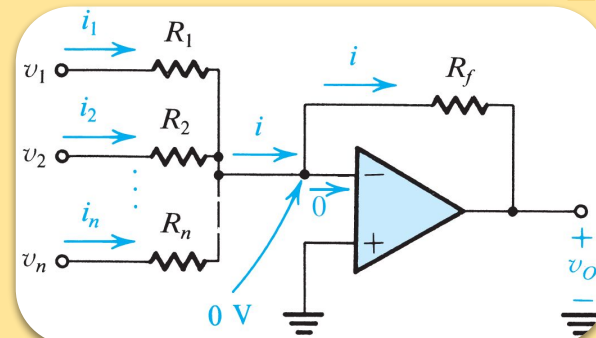
Amplificadores operacionais



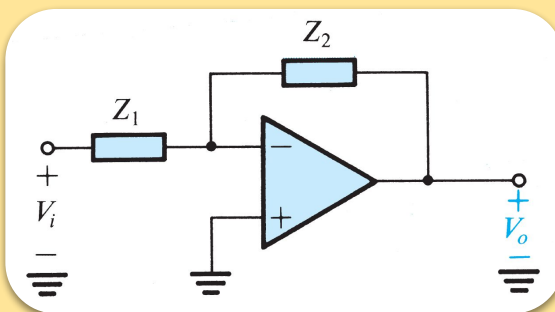
Entradas



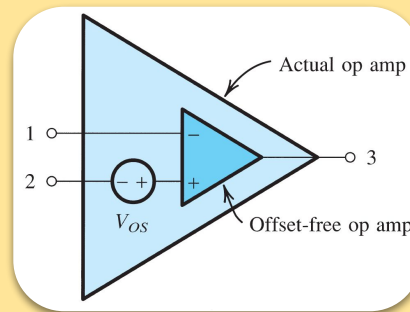
Modos de operação



Aplicações



Impedâncias Generalizadas



Imperfeições DC e AC

Página anterior



Entradas do amplificador

[Página inicial](#)

V_{S+}

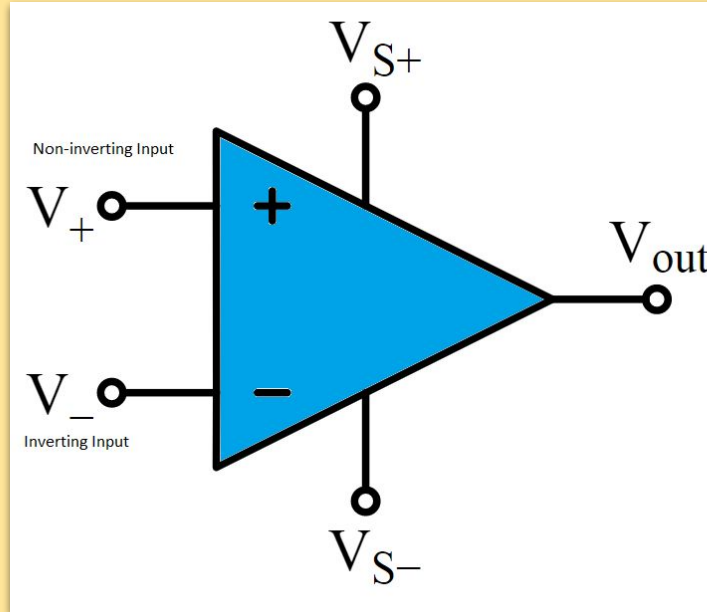
Alimentação positiva

V_+

Entrada não-inversora

V_-

Entrada inversora



V_{out}

Saída

V_{S-}

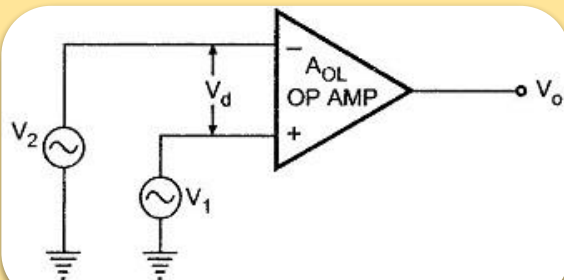
Alimentação negativa



Modos de operação

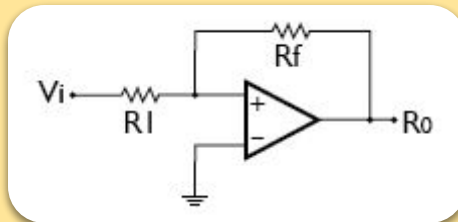
Página inicial

Malha aberta



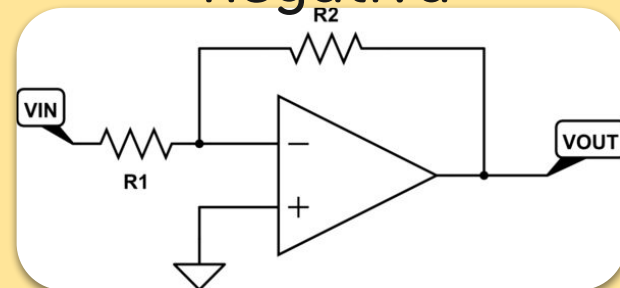
Não se tem controle sobre o ganho do circuito (A) que é definido pelo fabricante. Muito usado em comparadores.

Realimentação positiva



Apresenta somente dois pontos de estabilidade, a saturação positiva e a saturação negativa. Muito utilizado em circuitos comparadores por histerese e osciladores.

Realimentação negativa



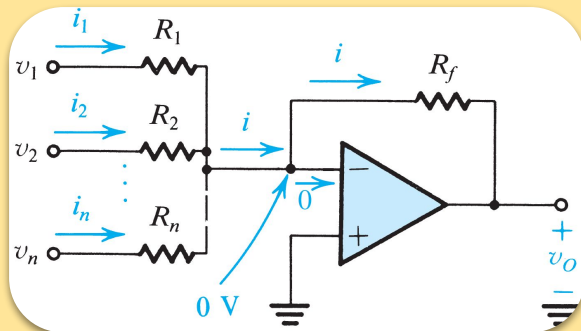
Devido à estabilidade, linearidade e o controle do ganho, é o modo de operação mais utilizado.



Aplicações

Página inicial

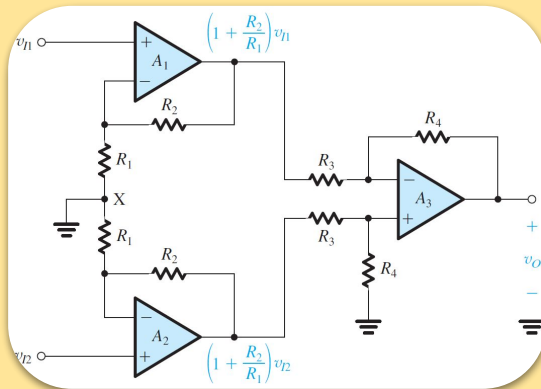
Somador



A tensão de saída é uma soma ponderada das tensões de entrada

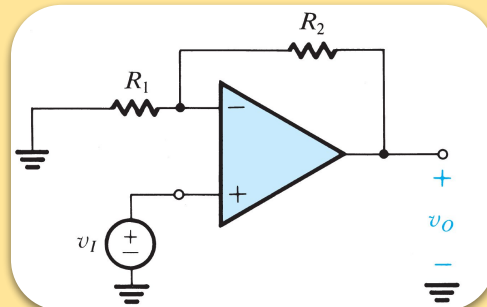
$$v_O = - \left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \cdots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

Amplificador de instrumentação



Amplificador de instrumentação

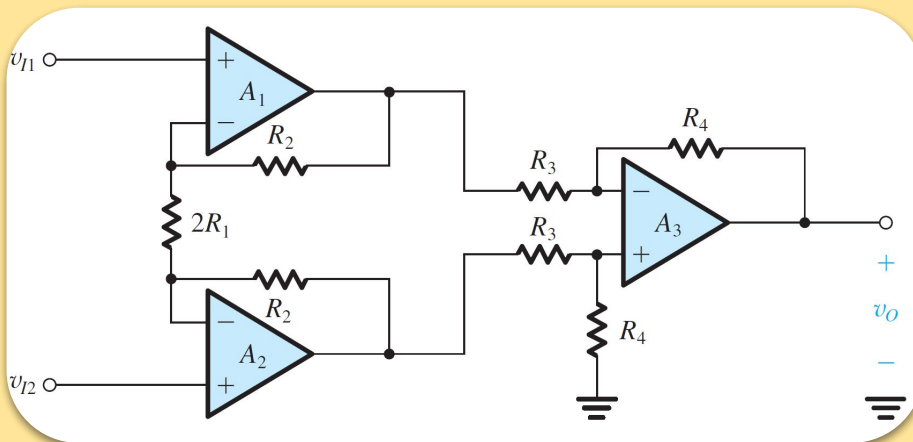
Configuração não inversora



Na configuração não inversora, o sinal de entrada é conectado à entrada não inversora.

Configuração não inversora

Amplificador de instrumentação



Possui alta resistência de entrada e alto ganho diferencial.

Sendo A1 e A2 e seus resistores correspondentes, os dois caminhos de sinal são simétricos.

O ganho pode ser variado simplesmente alterando o resistor $2R_1$

O ganho diferencial é dado por:

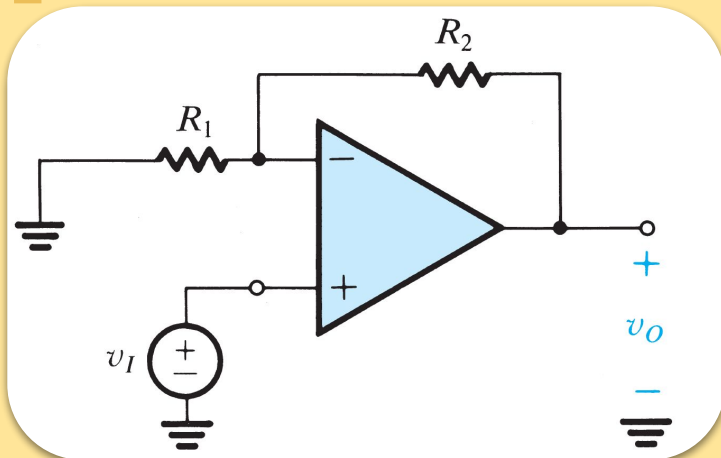
$$A_d \equiv \frac{v_O}{v_{Id}} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



Configuração não inversora

[Página inicial](#)

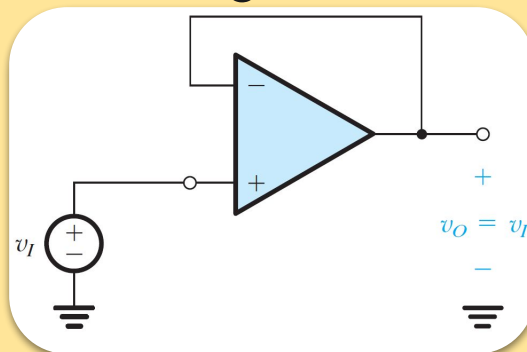
[Aplicações](#)



O ganho da configuração não inversora é positivo, daí o nome “não inversor”. A impedância de entrada desse amplificador de malha fechada é idealmente infinito.

$$v_O = v_I + \frac{v_I R_2}{R_1} = v_I \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Seguidor de tensão



A configuração não inversora é muito usada como buffer (seguidor de tensão), devido a sua característica de impedância de entrada infinita.

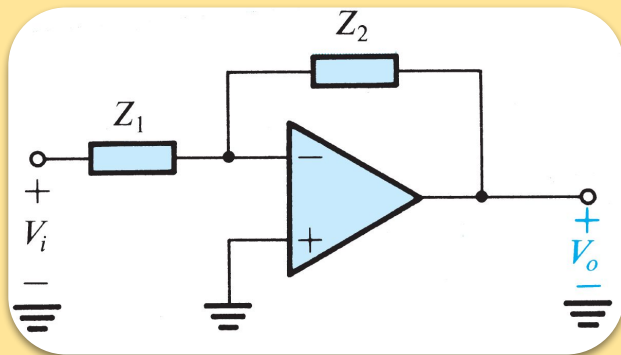
Apesar de possuir um ganho nulo, o seguidor de tensão é muito útil por isolar dois circuitos, pegando a tensão no primeiro circuito e aplicando no segundo. Por possuir impedância de entrada infinita, ele não interfere no primeiro circuito ao ser conectado nele. E por possuir impedância de saída nula, não sofre diminuição de tensão.



Impedâncias generalizadas

Página inicial

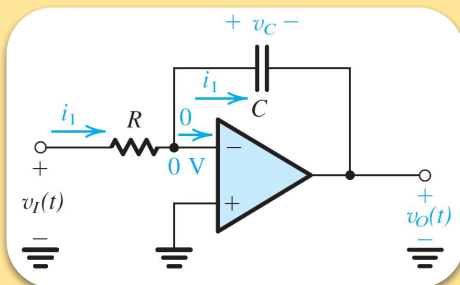
Inversor genérico



A função de transferência com impedâncias generalizadas é:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

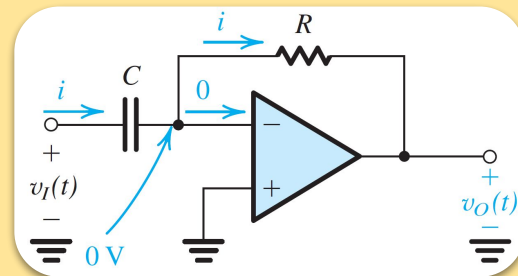
Integrador Inversor



Colocando um capacitor no caminho de feedback e um resistor na entrada, o circuito realiza a função de integração.

Integrador
Inversor

Diferenciador



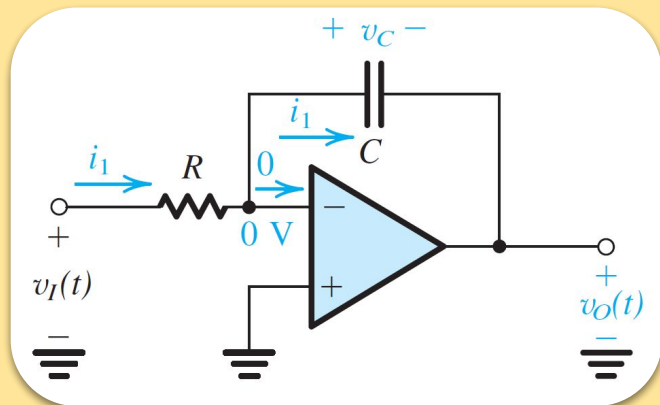
Trocando o capacitor de lugar com o resistor, o circuito passa a realizar a operação de diferenciação

Diferenciador



Integrador Inversor

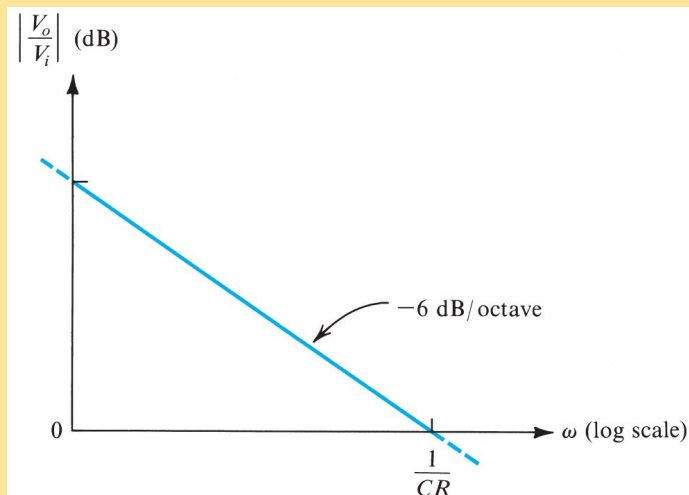
[Página inicial](#)



A tensão de saída é dada por:

$$v_O(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t v_I(t) dt - V_C$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sCR}$$



O integrador se comporta como um filtro passa baixas com frequência de corte em 0 Hz.

Na frequência de 0 Hz, a magnitude da função de transferência do integrador é infinita.

[Impedâncias Generalizadas](#)

[Continuação](#)

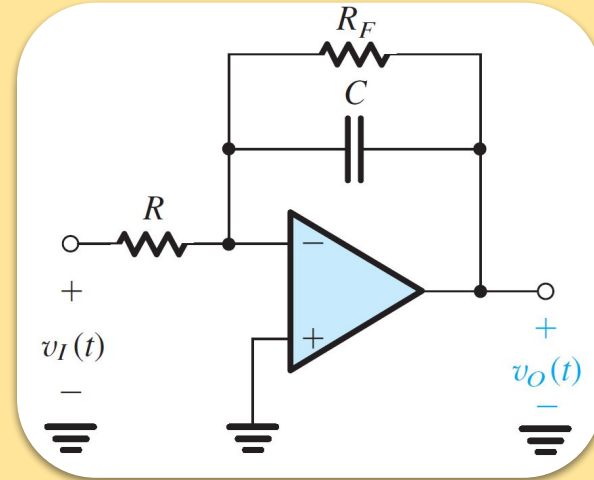


Integrador Inversor

Página inicial

Devido às imperfeições DC e ao ganho muito elevado para frequências nulas, o integrador sofre restrições práticas.

O problema DC do circuito integrador pode ser reduzido adicionando um resistor em paralelo com o capacitor, como no circuito ao lado:



Com essa alteração, a função de transferência do integrador se torna:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = - \frac{R_F/R}{1 + sCR_F}$$

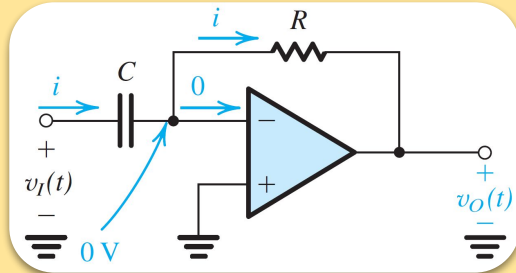
Voltar

Impedâncias Generalizadas



Diferenciador

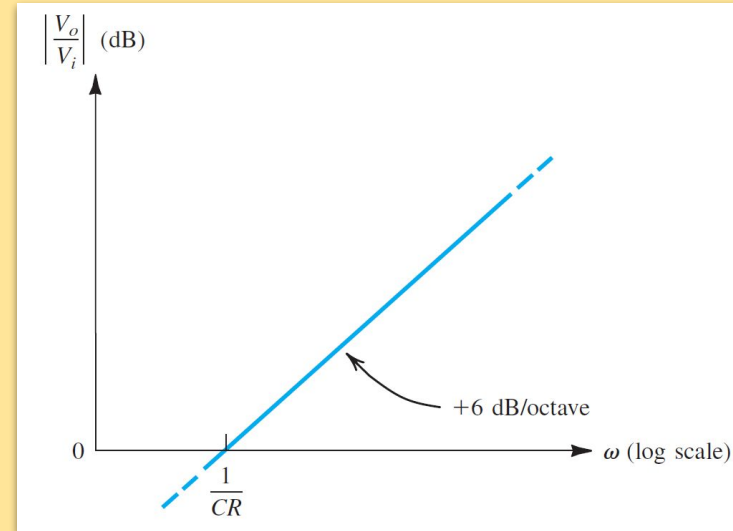
Página inicial



A tensão de saída é dada por:

$$v_O(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t v_I(t) dt - V_C$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sCR}$$



O diferenciador tem o comportamento de um passa altas com frequência de corte no infinito.

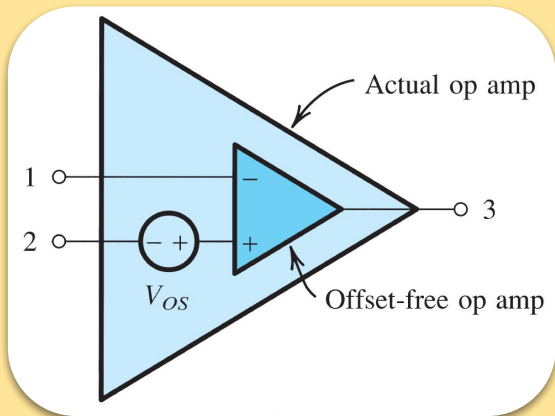
Impedâncias Generalizadas



Imperfeições DC e AC

[Página inicial](#)

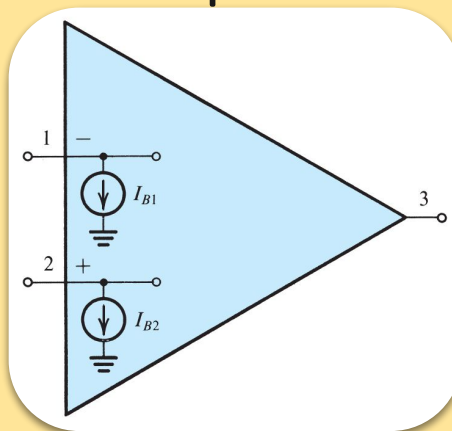
Tensão de offset



Em um amplificador real, existe uma pequena diferença de tensão entre as entradas, mesmo quando ambas estão em um nível igual.

Tensão de offset

Corrente de polarização



Para funcionar, o AmpOp deve ser alimentado nos dois terminais com correntes DC, chamadas corrente de polarização

Corrente de polarização

[Próxima página](#)

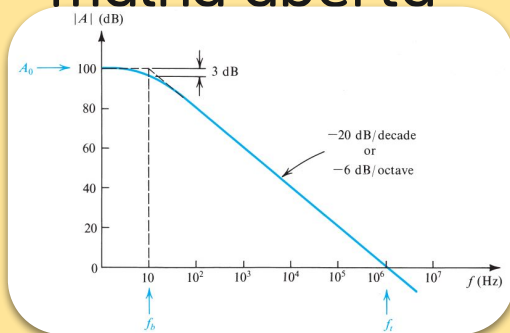


Imperfeições DC e AC

Página inicial

Página anterior

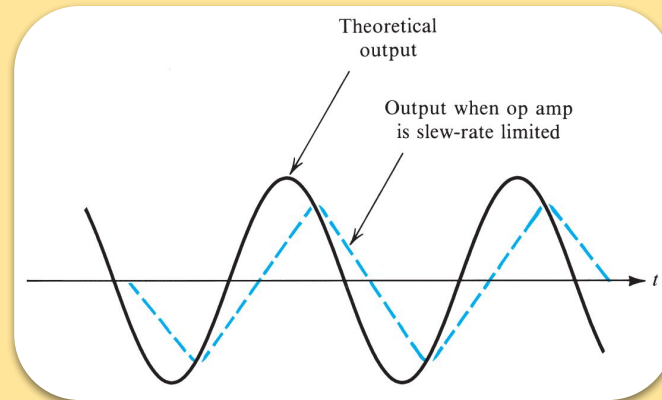
Ganho finito de malha aberta



O ganho diferencial de malha aberta A de um amplificador operacional não é infinito e possuem resposta em frequência típica de um filtro passa-baixa de primeira ordem

Ganho finito de malha aberta

Saturação e slew rate



Aplicar tensões ou frequências muito altas faz com que a saída do amplificador deixe de ser linear

Saturação e slew rate



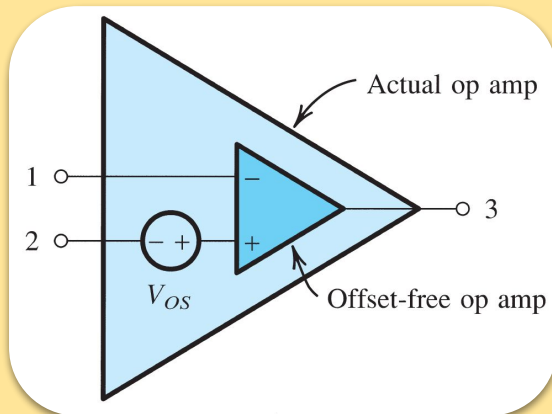
Tensão de offset

[Página inicial](#)

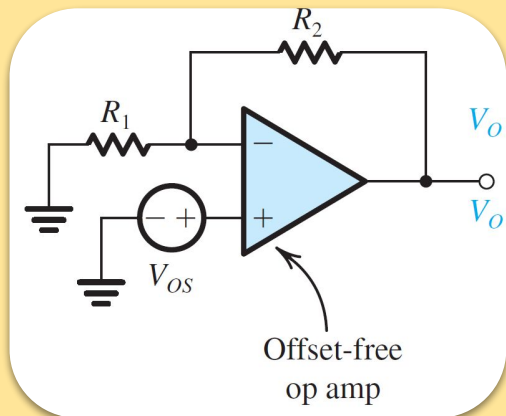


A tensão na saída do AmpOp real não é nula quando ambas entradas estão no potencial zero.

A tensão de offset surge como resultado de desequilíbrios inevitáveis presentes no estágio diferencial de entrada dentro do amplificador operacional.



O offset do AmpOp pode ser modelado como um AmpOp ideal, sem offset, com uma fonte DC conectada a uma das entradas.



Para medir o offset, curto-circuite a fonte de tensão da configuração inversora ou não-inversora e substitua pelo modelo acima. A saída do AmpOp será dada por:

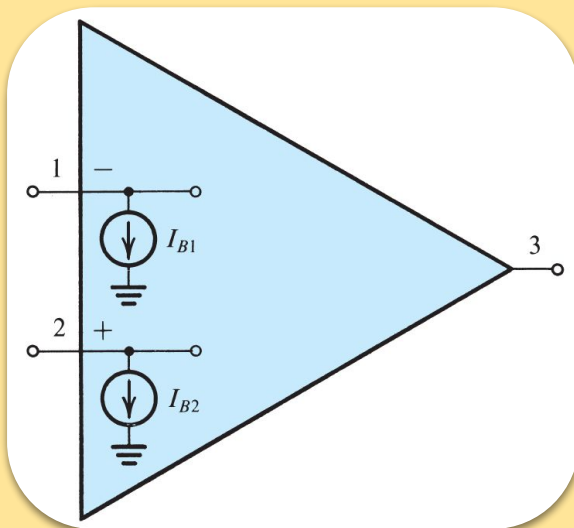
$$V_o = V_{Os} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Imperfeições DC e AC



Corrente de polarização

[Página inicial](#)



A corrente de polarização pode ser modelada como duas fontes de corrente ligadas nas entradas do amplificador.

A corrente média é chamada de corrente de polarização.

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

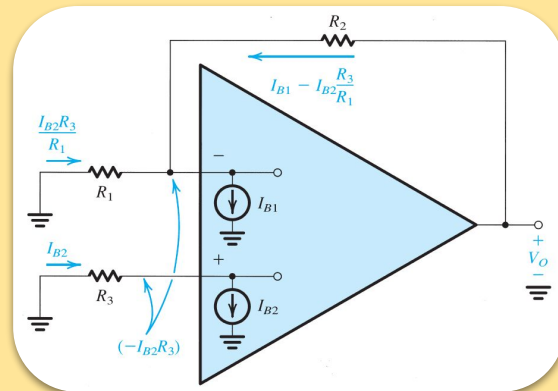
A tensão de saída devido à corrente de polarização é:

$$V_O = I_{B1} R_2 \simeq I_B R_2$$

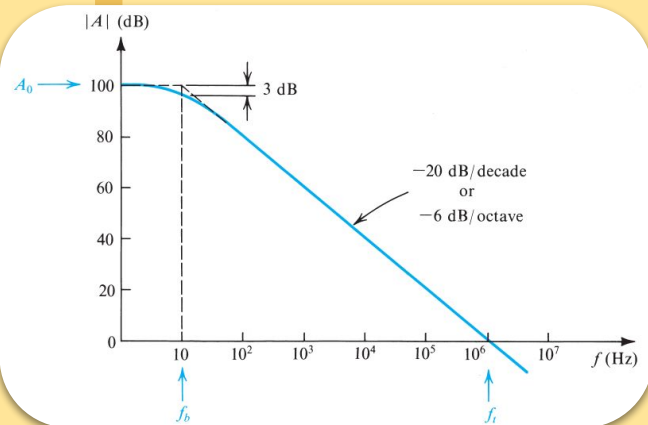
Isso determina um limite superior para a resistência de feedback. Isso pode ser resolvido colocando uma resistência específica R_3 na entrada não inversora.

E a diferença entre as correntes é chamada de corrente de offset.

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$



Imperfeições DC e AC



A característica passa baixa em malha aberta é projetada com o objetivo de garantir estabilidade aos circuitos com amplificador operacional.

O produto ganho x banda passante (GBW) é uma figura de mérito usada para comparar os diferentes amplificadores operacionais.

O ganho A de um amplificador operacional compensado internamente pode ser expresso por:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_b}$$

Para frequências $\omega > 10\omega_b$, pode-se aproximar o ganho por:

$$|A(j\omega)| = \frac{A_0\omega_b}{\omega}$$

Outro parâmetro muito comum em datasheets de AmpOps é a largura de banda de ganho unitário ω_t .

$$\omega_t = A_0\omega_b$$

Os ganhos do malha fechada considerando ganho de malha aberta finito para as configurações inversora e não inversora são de:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} \simeq \frac{1 + R_2/R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t/(1 + R_2/R_1)}}$$

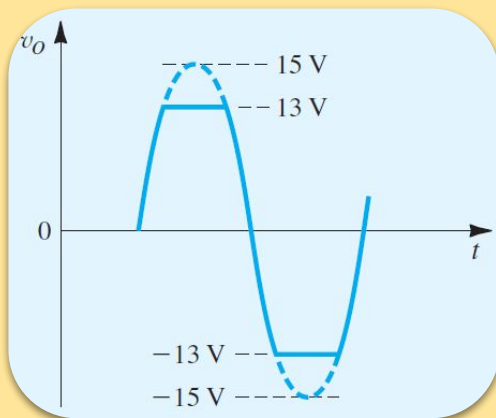
Inversora

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} \simeq \frac{-R_2/R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t/(1 + R_2/R_1)}}$$

Não inversora

Saturação

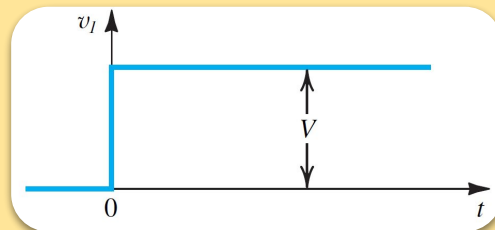
AmpOps operam de forma linear por uma faixa limitada de tensões de saída. Para evitar que a tensão de saída seja grampeada, o sinal de entrada deve ser limitado.



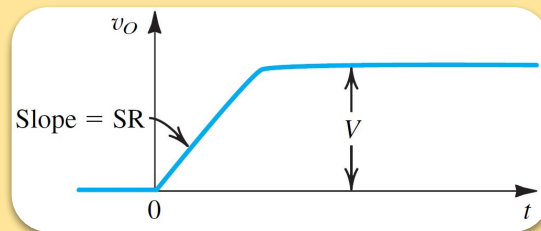
A corrente de saída também é um fator limitante. O projetista de circuitos deve garantir que, sob nenhuma condição, o amplificador operacional seja exigido a fornecer uma corrente de saída superior a esse valor.

Slew rate

Definido como a taxa máxima da variação da tensão de saída em amplificador operacional real.



Entrada



Saída