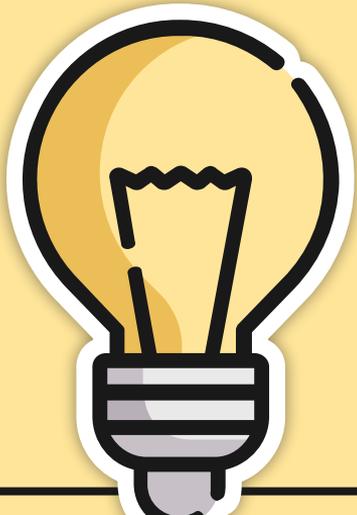


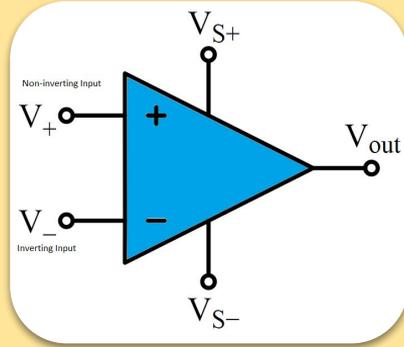
# PETEE apoio acadêmico

Conteúdos

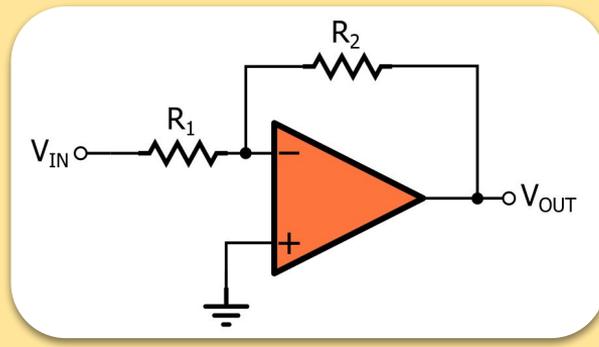
ELT084 - Dispositivos e Circuitos Eletrônicos Básicos  
Amplificadores Operacionais



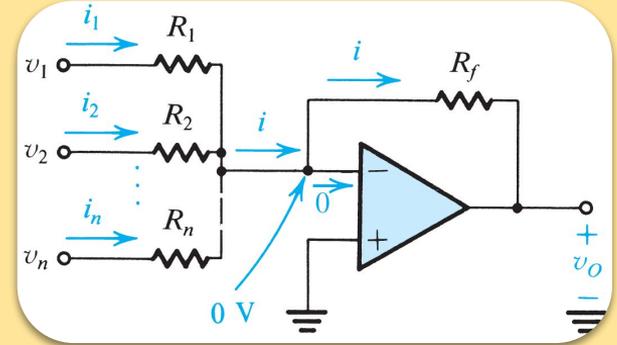
# Amplificadores operacionais



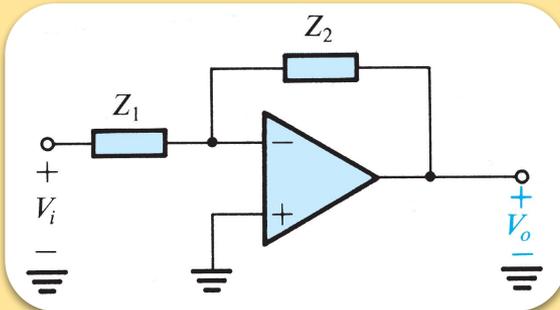
Entradas



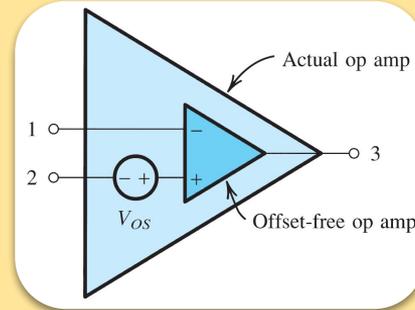
Modos de operação



Aplicações



Impedâncias Generalizadas



Imperfeições DC e AC

Página anterior



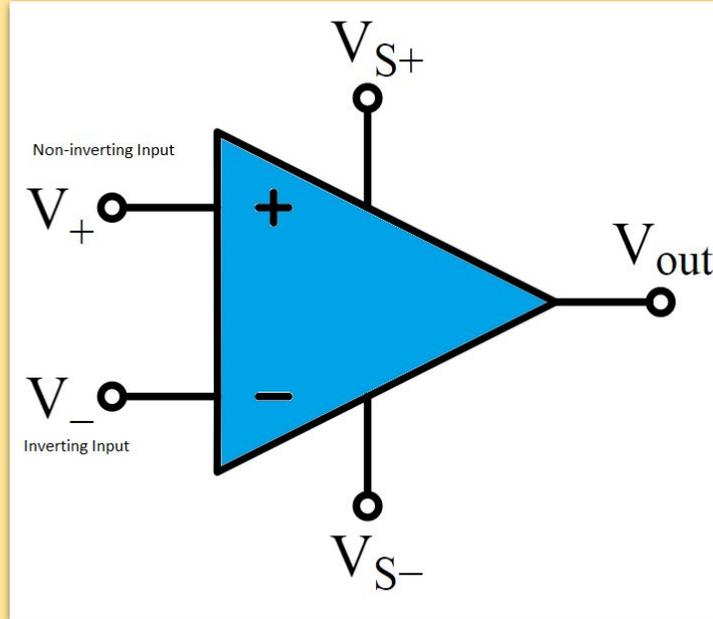
# Entradas do amplificador

[Página inicial](#)

$V_{S+}$   
Alimentação positiva

$V_+$   
Entrada não-inversora

$V_-$   
Entrada inversora



$V_{out}$   
Saída

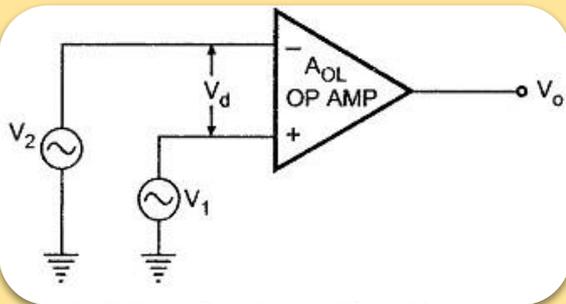
$V_{S-}$   
Alimentação negativa



# Modos de operação

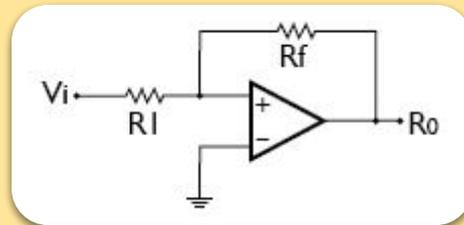
Página inicial

## Malha aberta



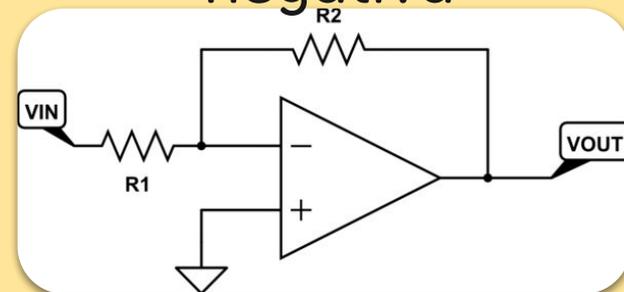
Não se tem controle sobre o ganho do circuito ( $A$ ) que é definido pelo fabricante. Muito usado em comparadores.

## 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



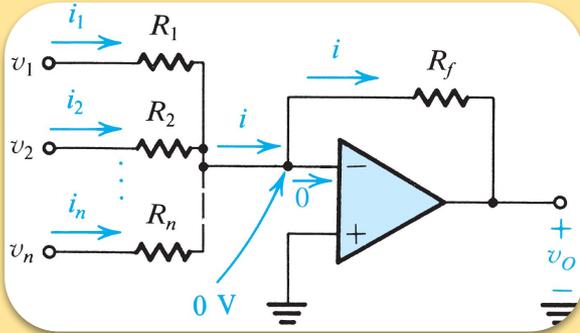
Devido à estabilidade, linearidade e o controle do ganho, é o modo de operação mais utilizado.



# Aplicações

Página inicial

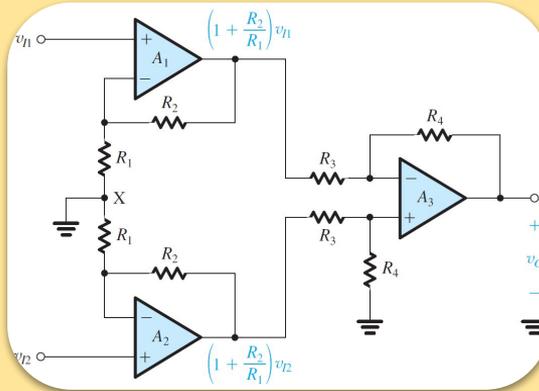
## Somador



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

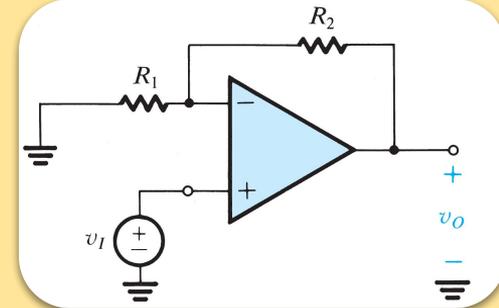
$$v_O = - \left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

## Amplificador de instrumentação



Amplificador de instrumentação

## Configuração não inversora

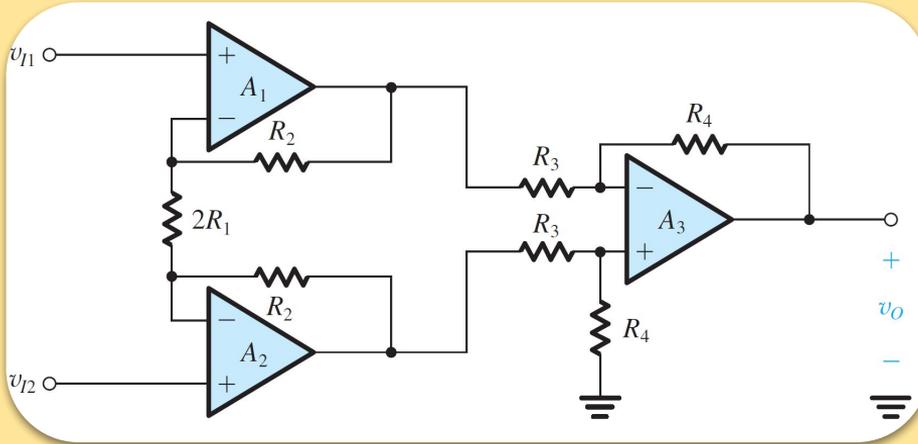


Na configuração não inversora, o sinal de entrada é conectado à entrada não inversora.

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  $2R_1$

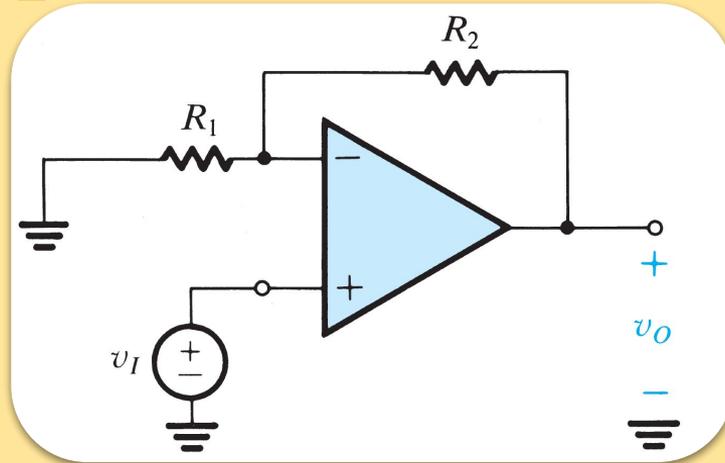
O ganho diferencial é dado por:

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

# Configuração não inversora

[Página inicial](#)

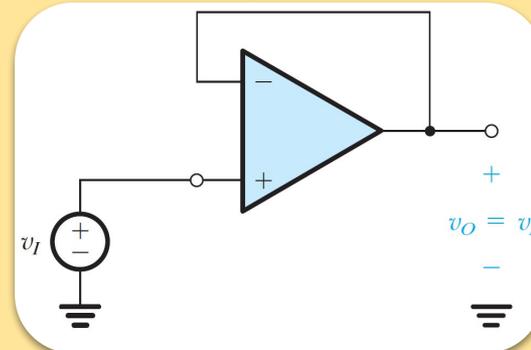
[Aplicações](#)



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



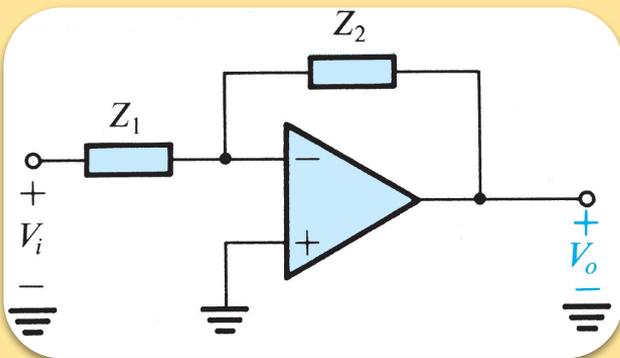
A configuração não inversora é muito usada como buffer (seguidor de tensão), devido a sua característica de impedância de entrada infinita.

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

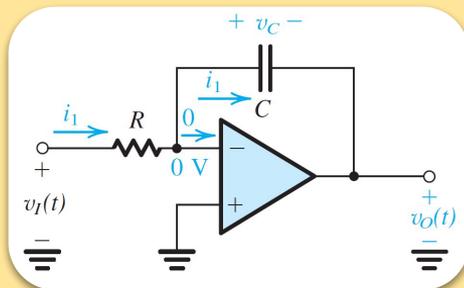
## Inversor genérico



A função de transferência com impedâncias generalizadas é:

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

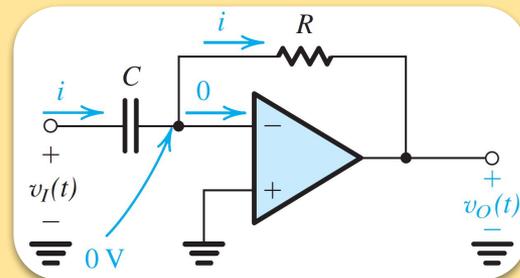
## Integrador Inversor



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

Integrador  
Inversor

## Diferenciador



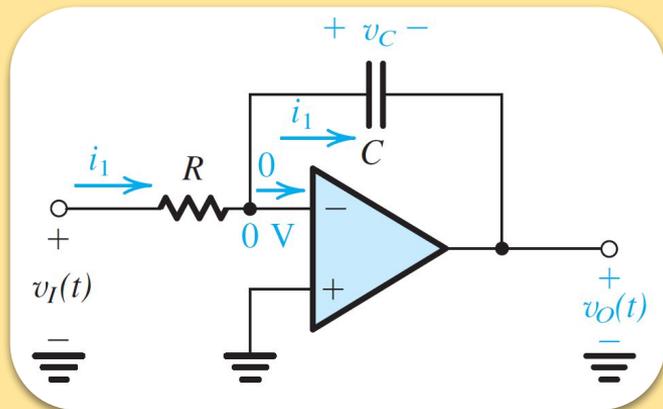
Trocando o capacitor de lugar com o resistor, o circuito passa a realizar a operação de diferenciação

Diferenciador



# Integrador Inversor

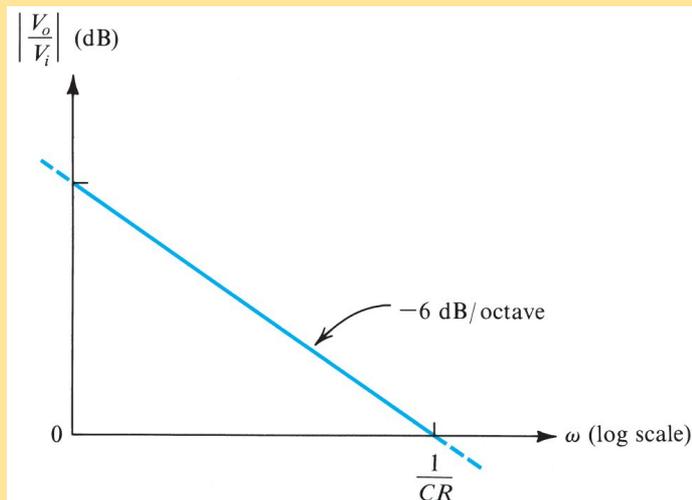
Página inicial



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

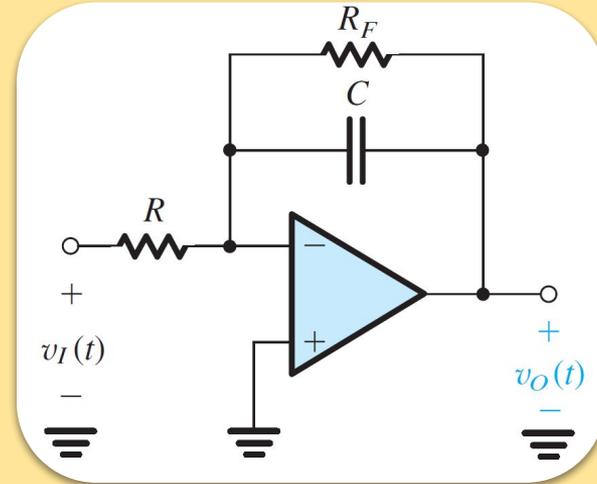


# Integrador Inversor

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:

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

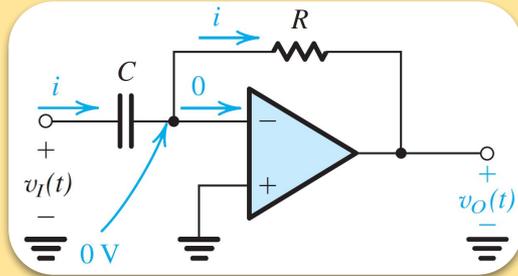
Voltar

Impedâncias Generalizadas



# Diferenciador

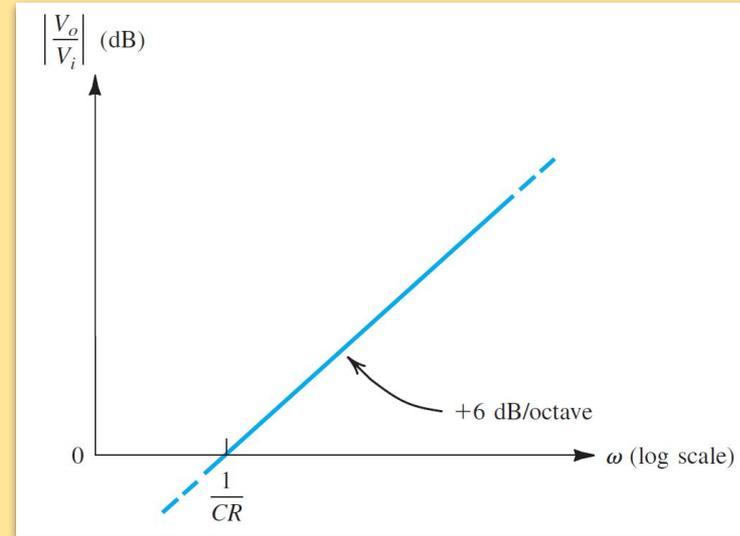
Página inicial



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.

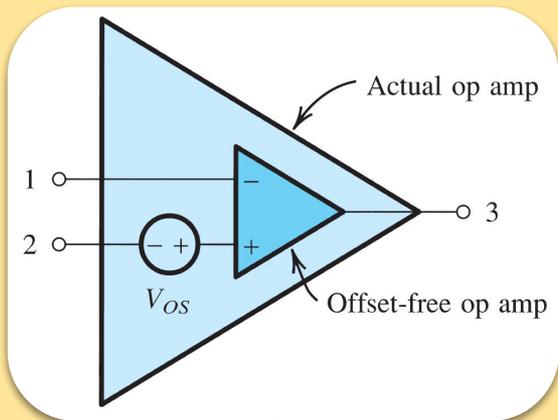
Impedâncias Generalizadas



# Imperfeições DC e AC

[Página inicial](#)

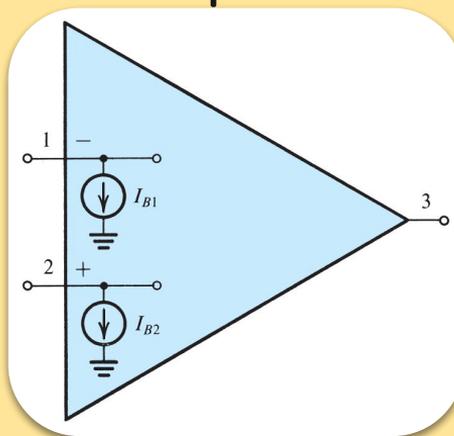
## Tensão de offset



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

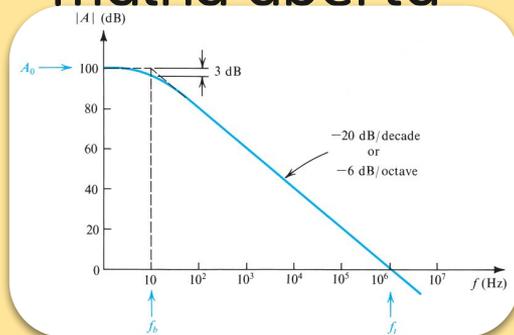
[Próxima página](#)



# Imperfeições DC e AC

Página inicial

## Ganho finito de malha aberta

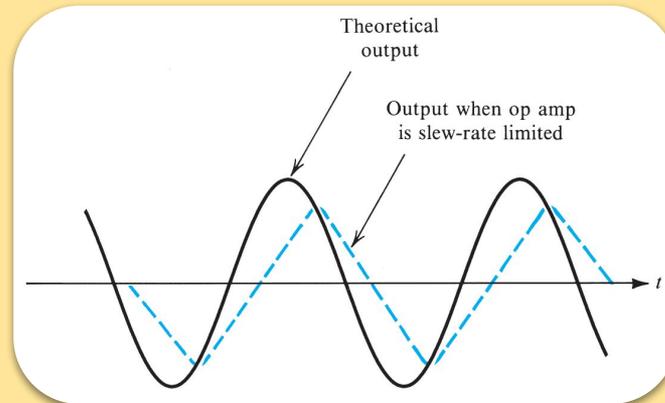


Página anterior

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



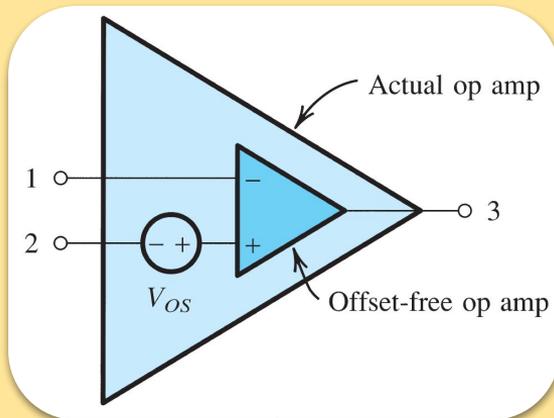
# Tensão de offset

[Página inicial](#)

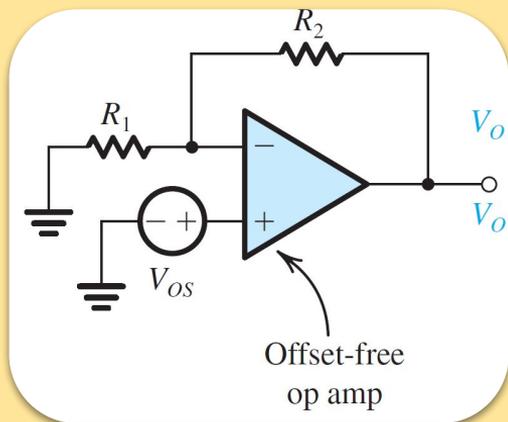


A tensão na saída do AmpOp real não é nula quando ambas entradas estão no potencial zero.

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:

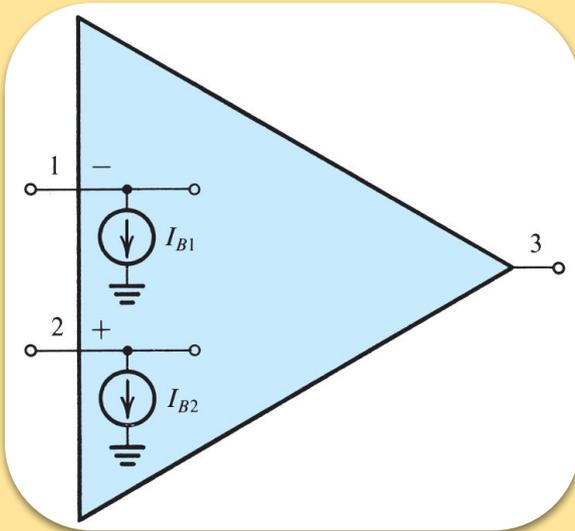
$$V_O = V_{Os} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

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.

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

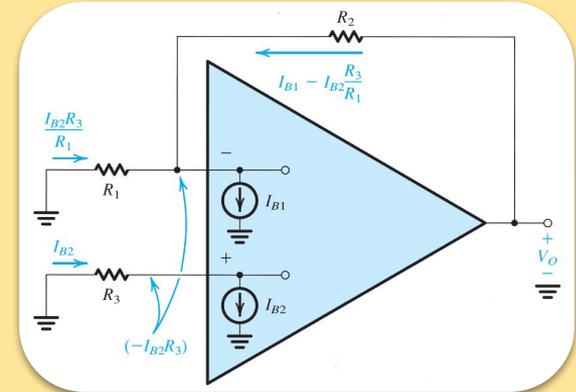
A tensão de saída devido à corrente de polarização é:

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

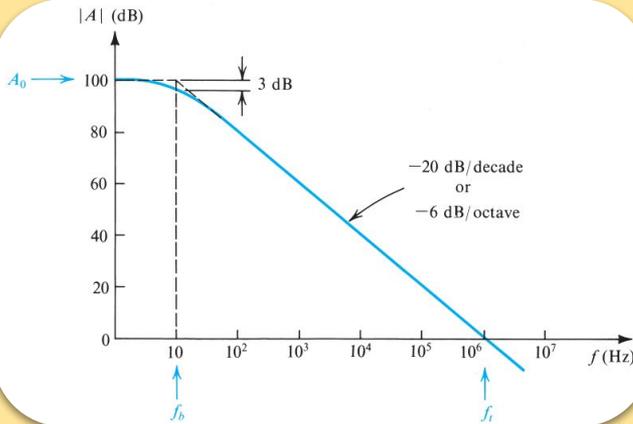
Isso determina um limite superior para a resistência de feedback. Isso pode ser resolvido colocando uma resistência específica  $R_3$  na entrada não inversora.

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  $\omega_t$ .

$$\omega_t = A_0\omega_b$$

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

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

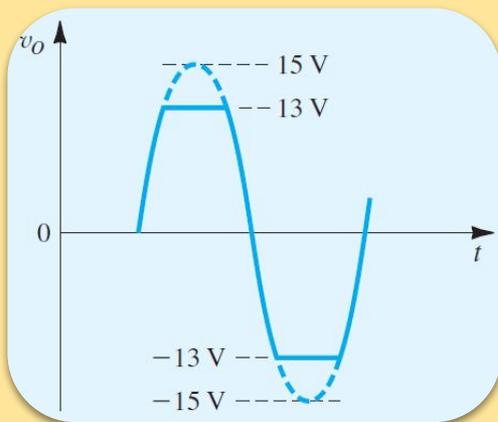
**Inversora**

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

**Não inversora**

## Saturação

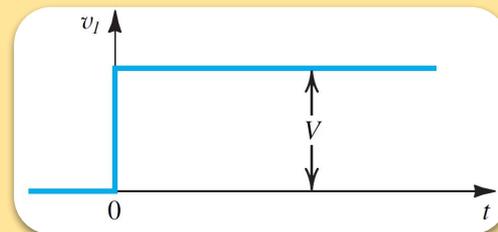
AmpOps operam de forma linear por uma faixa limitada de tensões de saída. Para evitar que a tensão de saída seja grampeada, o sinal de entrada deve ser limitado.



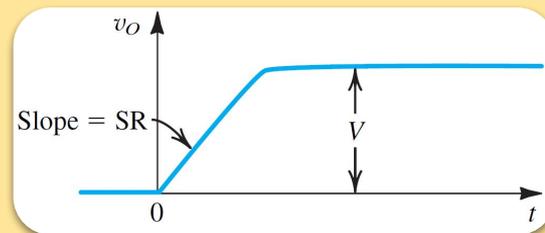
A corrente de saída também é um fator limitante. O projetista de circuitos deve garantir que, sob nenhuma condição, o amplificador operacional seja exigido a fornecer uma corrente de saída superior a esse valor.

## Slew rate

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



Entrada



Saída