

**E 206**

# **Eletrônica Analógica III**

**Prof. Egidio Raimundo Neto**

**Autor: Prof. Antonio Alves Ferreira Júnior**

# **Fundamentos e circuitos básicos para os amplificadores operacionais**

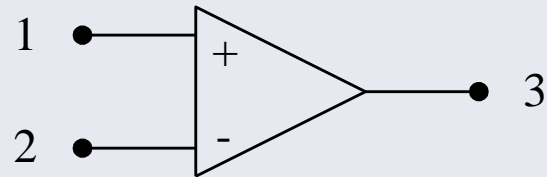
# Introdução

- O amplificador operacional (amp. op.) foi inicialmente desenvolvido para executar operações matemáticas em computação analógica, tais como:
  - somar;
  - subtrair;
  - integrar;
  - diferenciar.
- Atualmente é utilizado em diversas aplicações, lineares e não-lineares, em eletrônica, como por exemplo:
  - comparadores;
  - instrumentação;
  - sistemas de controle;
  - processamento de sinais;
  - geração de sinais e osciladores;
  - filtros ativos; etc.
- Pode ser utilizado para processar tanto sinais contínuos (c.c.) quanto alternados (c.a.).

# Introdução

- Possui as seguintes características elétricas principais:
  - alto ganho de tensão;
  - alta impedância de entrada;
  - baixa impedância de saída.
- Para operar como amplificador utiliza-se externamente uma malha de realimentação negativa. Nesta situação tem-se o controle do ganho de tensão.
- Caso o dispositivo seja utilizado com uma malha de realimentação positiva, tem-se uma instabilidade de operação. Esta configuração é mais utilizada em aplicações como osciladores.
- Quando não há externamente a realimentação externa, tem-se o ganho de malha aberta e não há o controle do ganho de tensão. É mais utilizada em circuitos comparadores.
- Normalmente estão disponíveis na forma de circuitos integrados (CIs).

# Simbologia



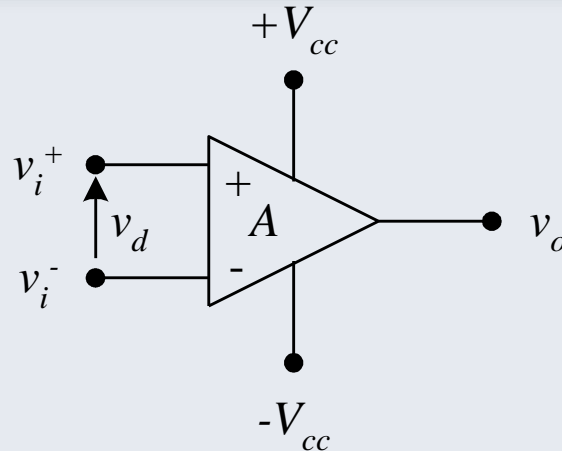
onde:

1: entrada não-inversora;

2: entrada inversora;

3: saída.

# Definições



onde:

$+V_{cc}$ : tensão de alimentação positiva;

$-V_{cc}$ : tensão de alimentação negativa;

$v_i^+$ : sinal de tensão de entrada aplicado ao terminal não-inversor (em relação ao terra);

$v_i^-$ : sinal de tensão de entrada aplicado ao terminal inversor (em relação ao terra);

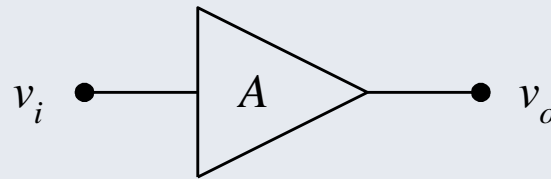
$v_o$ : sinal de tensão de saída (em relação ao terra);

$v_d$ : tensão diferencial de entrada;

$A$ : ganho de tensão de malha aberta.

# Definições

- Considerando um amplificador genérico, o ganho de tensão é dado pela razão entre os sinais de tensão de saída e de entrada, na forma:



$$A = \frac{v_o}{v_i} \rightarrow v_o = Av_i$$

$$v_o > v_i \rightarrow A > 1 \rightarrow \text{ganho}$$

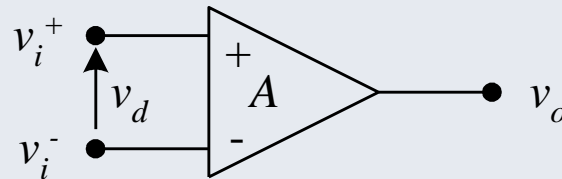
$$v_o < v_i \rightarrow A < 1 \rightarrow \text{atenuação}$$

e em decibel (escala logarítmica):

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

# Definições

- Seu funcionamento básico consiste na aplicação de sinais de tensão às suas entradas diferenciais, resultando em um sinal de tensão de saída simples. Os dois terminais de entrada sempre deverão ser utilizados, mesmo que um deles seja ligado ao terra.



- Tem-se que a tensão diferencial de entrada é dada por:

$$v_d = v_i^+ - v_i^-$$

e, portanto

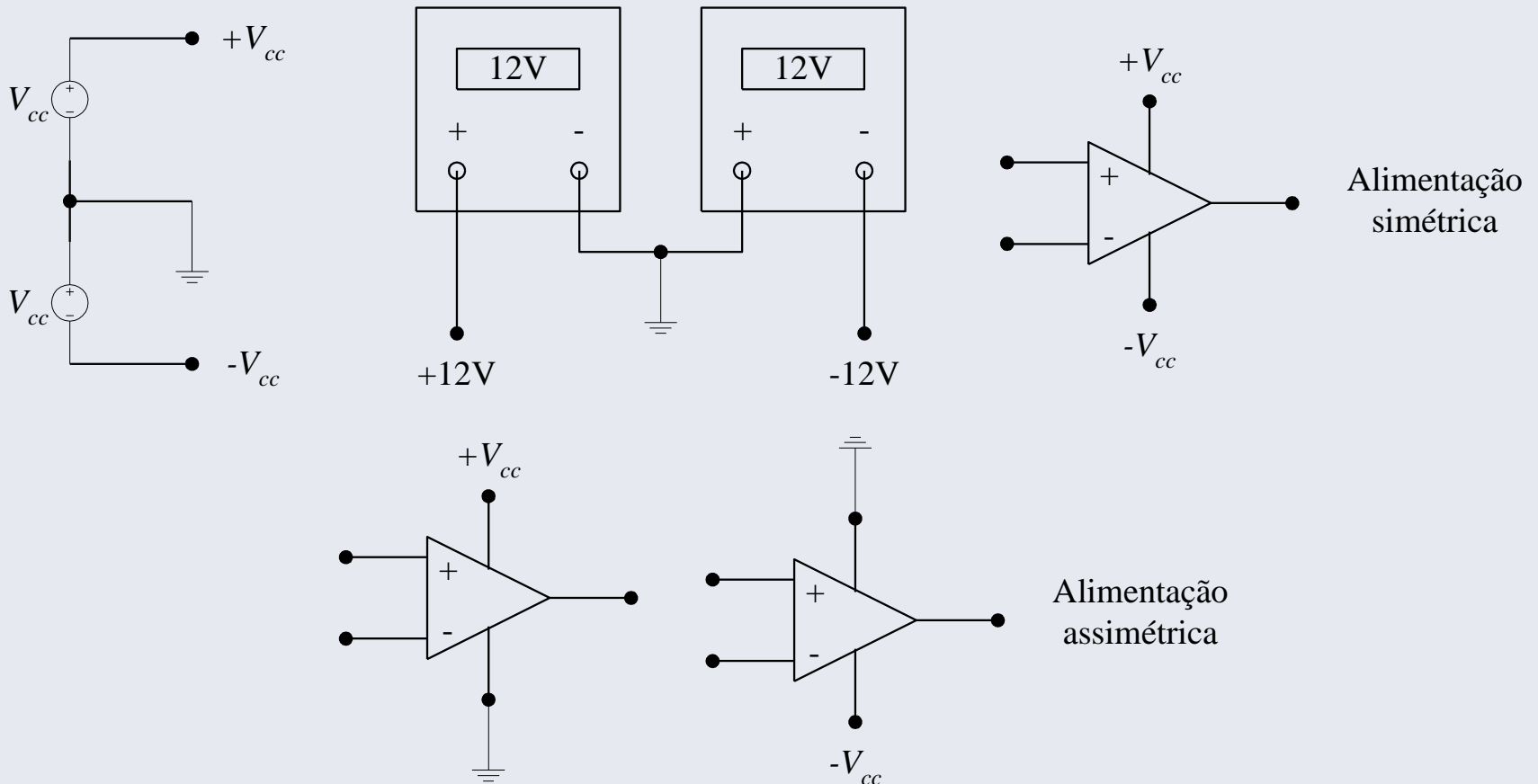
$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-)$$

- O amp. op. amplifica a diferença entre os sinais de tensão de entrada. Assim, a polaridade do sinal de tensão de saída depende da polaridade da diferença dos sinais de tensão das entradas.

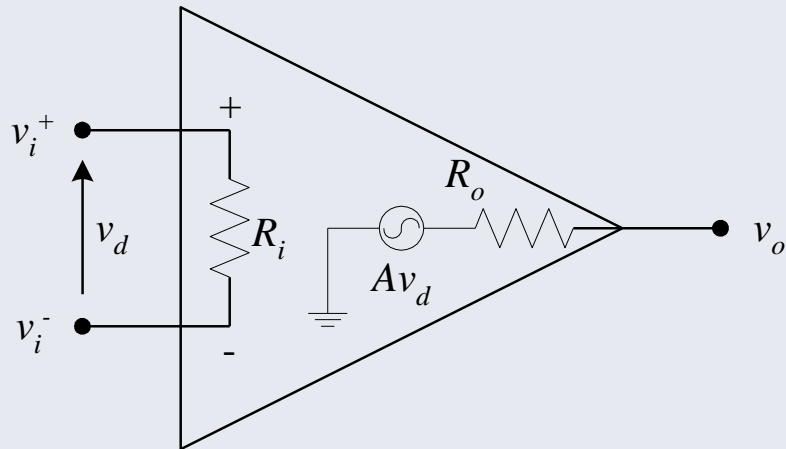


# Alimentação

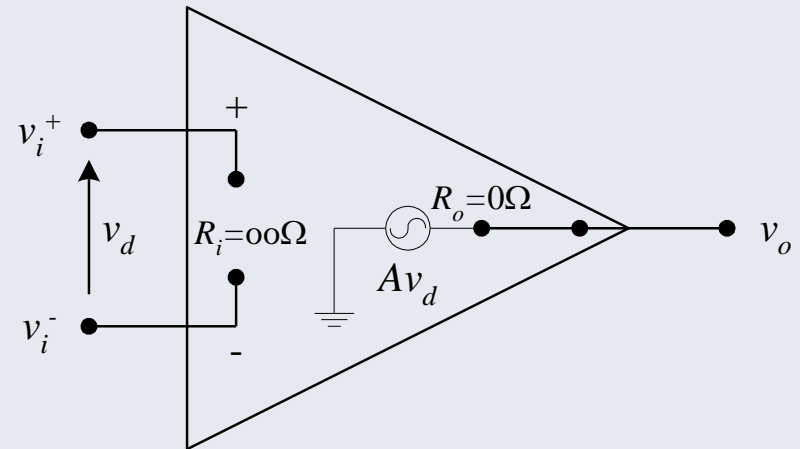
- Pode ser alimentado tanto de forma simétrica quanto assimétrica, dependendo do modelo do componente utilizado.



# Circuito equivalente simplificado



Modelo aproximado do amp. op. real



Modelo do amp. op. ideal

onde:

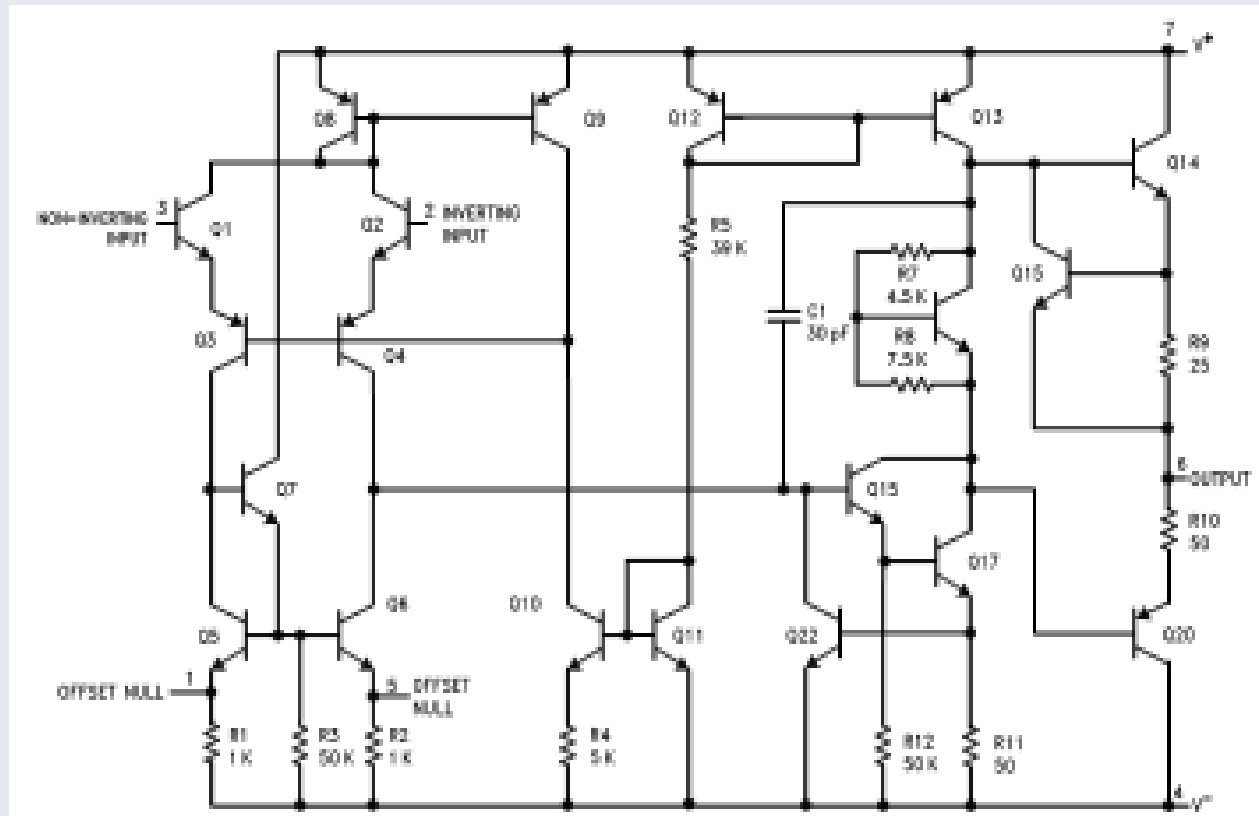
$R_i$ : resistência interna de entrada;

$R_o$ : resistência interna de saída.

Pode-se considerar o amplificador operacional como sendo uma fonte de tensão controlada por tensão (FTCT).

# Diagrama esquemático interno do amp. op.

- Amp. op. modelo 741:



- Alguns fabricantes: National Semiconductor, Texas Instruments, Fairchild Semiconductor, Intersil, Freescale, etc.

# Comparação entre os parâmetros ideais e reais

Parâmetros	Ideal	741 (valores típicos)
$A$	$\infty$	200V/mV
$R_i$	$\infty\Omega$	2M $\Omega$
$R_o$	0 $\Omega$	75 $\Omega$
$BW$	$\infty$ Hz	1MHz
$CMRR_{dB}$	$\infty$ dB	90dB
$SR$	$\infty$ V/s	0,5V/ $\mu$ s
$V_{io}$	0V	1mV
$I_{io}$	0A	20nA
$I_B$	0A	80nA

onde:

$A$ : ganho de tensão de malha aberta;

$R_i$ : resistência interna de entrada;

$R_o$ : resistência interna de saída;

$BW$ : largura de faixa;

$CMRR$ : Relação de rejeição de modo comum;

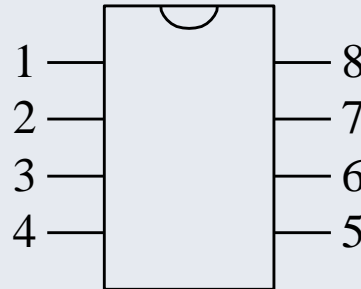
$SR$ : taxa de subida;

$V_{io}$ : tensão offset de entrada;

$I_{io}$ : corrente offset de entrada;

$I_B$ : corrente de polarização de entrada.

# Pinagem do amp. op.



• Para o amp. op. modelo 741:

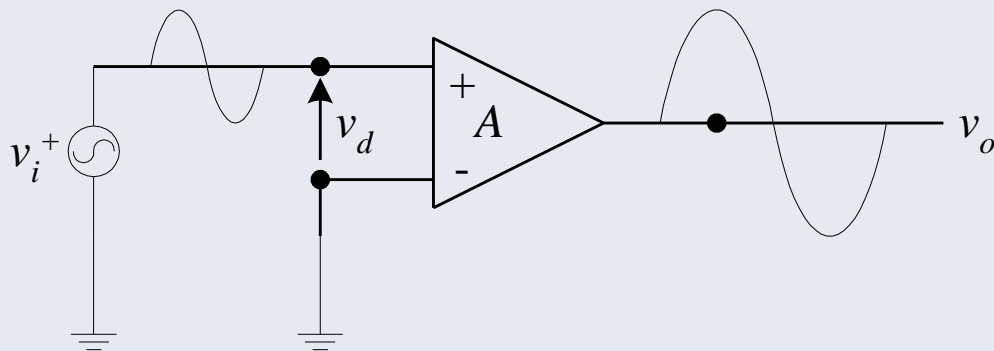
- 1: ajuste de *offset*;
- 2: entrada inversora;
- 3: entrada não-inversora;
- 4: alimentação negativa ( $-V_{cc}$ );
- 5: ajuste de *offset*;
- 6: saída;
- 7: alimentação positiva ( $+V_{cc}$ );
- 8: não-conectado (NC).

• Para o amp. op. modelo 358:

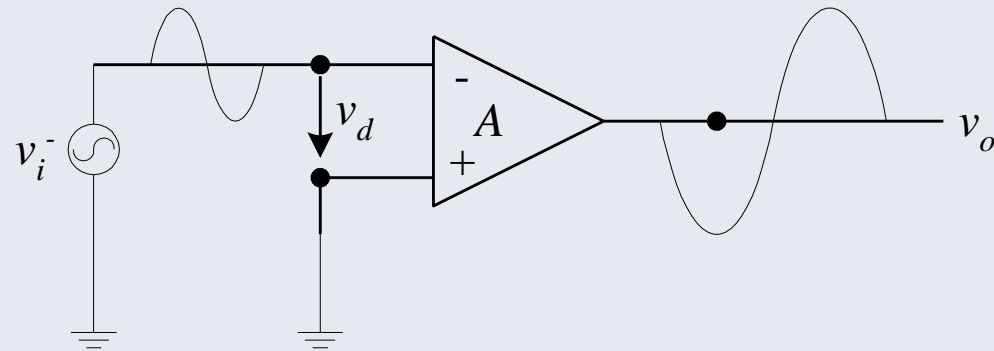
- 1: saída A;
- 2: entrada inversora A;
- 3: entrada não-inversora A;
- 4: terra ou alimentação negativa ( $-V_{cc}$ );
- 5: entrada não-inversora B;
- 6: entrada inversora B;
- 7: saída B;
- 8: alimentação positiva ( $+V_{cc}$ ).

# Modos de operação

- Entrada em modo simples:



$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-) = Av_i^+$$

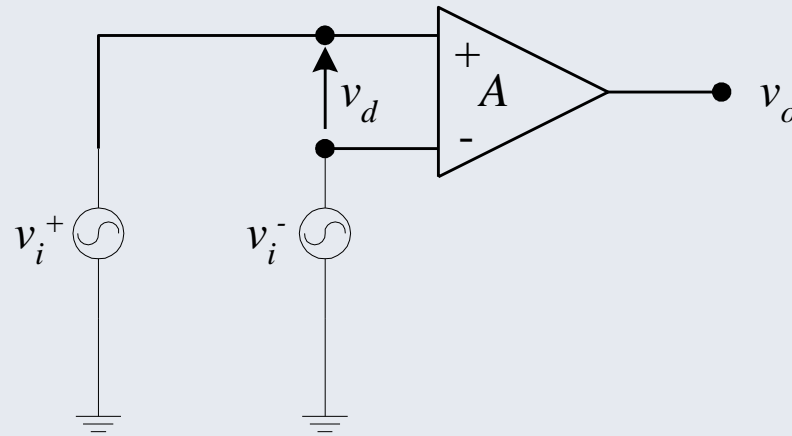


$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-) = -Av_i^-$$

Inversão de fase de 180°.

# Modos de operação

- Entrada em modo diferencial:



De forma geral:

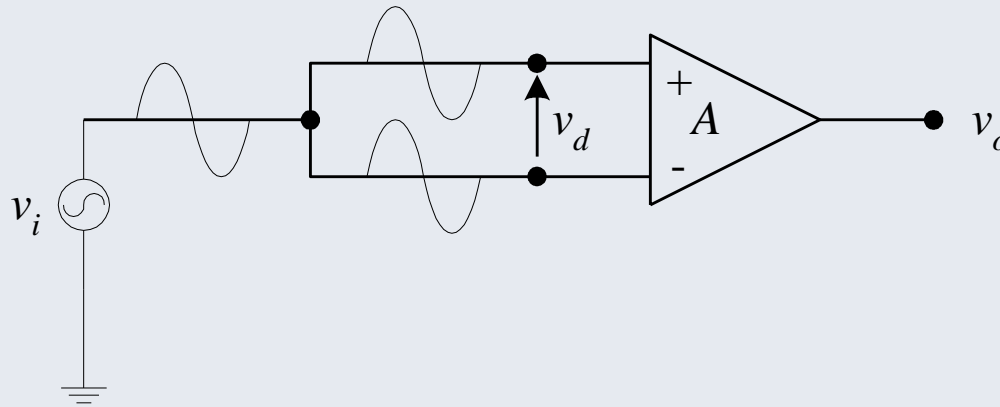
$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-)$$

e para sinais com polaridades opostas, ou seja,  $v_i^+ = -v_i^- = v_i$ :

$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-) = A(v_i + v_i) = 2Av_i$$

# Modos de operação

- Entrada em modo comum:



Os sinais são iguais em ambas as entradas, ou seja,  $v_i^+ = v_i^- = v_i$ :

$$v_o = Av_d = A(v_i^+ - v_i^-) = A(v_i - v_i) = 0$$



# Modos de operação

- Tensão comum de entrada:

$$v_c = \frac{v_i^+ + v_i^-}{2}$$

- Tensão diferencial de entrada:

$$v_d = v_i^+ - v_i^-$$

- Tensão de saída total (teorema da superposição):

$$v_o = A_d v_d + A_c v_c$$

onde:

$A_d$ : ganho de modo diferencial;

$A_c$ : ganho de modo comum.

# Modos de operação

- Para sinais de entrada com polaridades opostas,  $v_i^+ = -v_i^- = v_i$ :

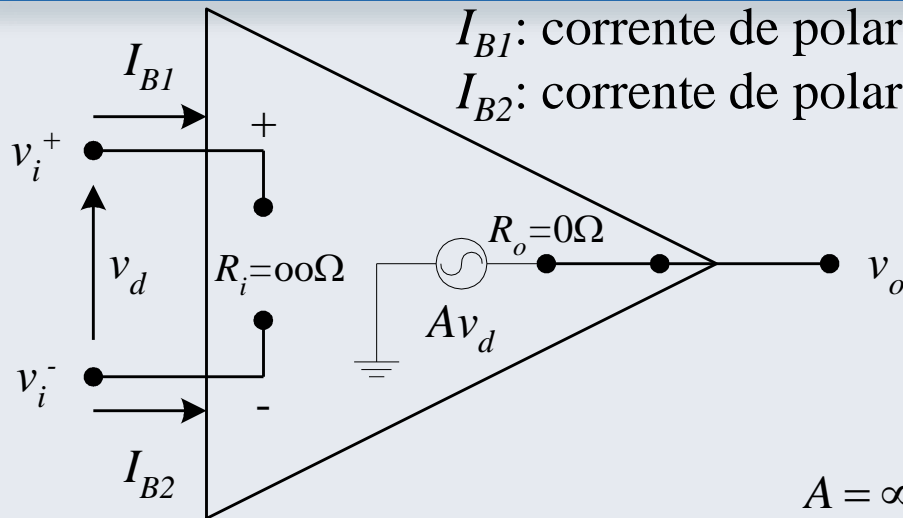
$$\left. \begin{aligned} v_c &= \frac{v_i^+ + v_i^-}{2} = \frac{v_i - v_i}{2} = 0 \\ v_d &= v_i^+ - v_i^- = v_i + v_i = 2v_i \end{aligned} \right\} v_{od} = 2A_d v_i$$

- Para sinais de entrada com mesma polaridades,  $v_i^+ = v_i^- = v_i$ :

$$\left. \begin{aligned} v_c &= \frac{v_i^+ + v_i^-}{2} = \frac{v_i + v_i}{2} = v_i \\ v_d &= v_i^+ - v_i^- = v_i - v_i = 0 \end{aligned} \right\} v_{oc} = A_c v_i$$

- Portanto, o amp. op. tem a função de amplificar sinais diferentes e rejeitar sinais iguais.

# Curto-circuito virtual (ou terra virtual)



$I_{B1}$ : corrente de polarização na entrada não-inversora;  
 $I_{B2}$ : corrente de polarização na entrada inversora.

- Considerando o amp. op. ideal tem-se:

$$R_i = \infty\Omega \therefore I_{B1} = I_{B2} = 0A$$

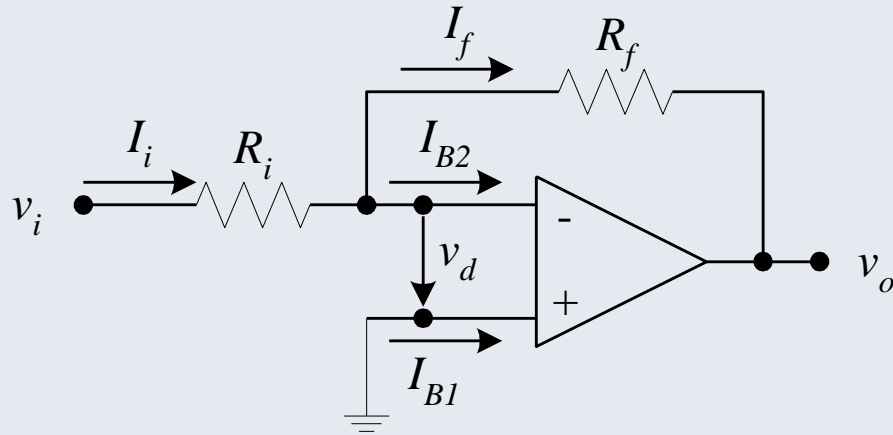
e

$$A = \infty \therefore v_o A v_d \rightarrow v_d = \frac{v_o}{A} = \frac{v_o}{\infty} = 0V = v_i^+ - v_i^- \rightarrow v_i^+ = v_i^-$$

- Como  $v_d = 0V$ , significa que há um curto-circuito entre os terminais de entrada do amp. op., ou seja,  $v_i^+$  e  $v_i^-$  possuem o mesmo potencial.
- Porém, não há corrente circulando pelos terminais de entrada do amp. op., pois  $I_{B1} = I_{B2} = 0A$ , significando um circuito aberto.
- Portanto, há dois efeitos distintos ocorrendo nos terminais de entrada do amp. op. e esta situação é chamada de curto-circuito virtual ou terra virtual.

# Configurações básicas

- Amplificador inversor:



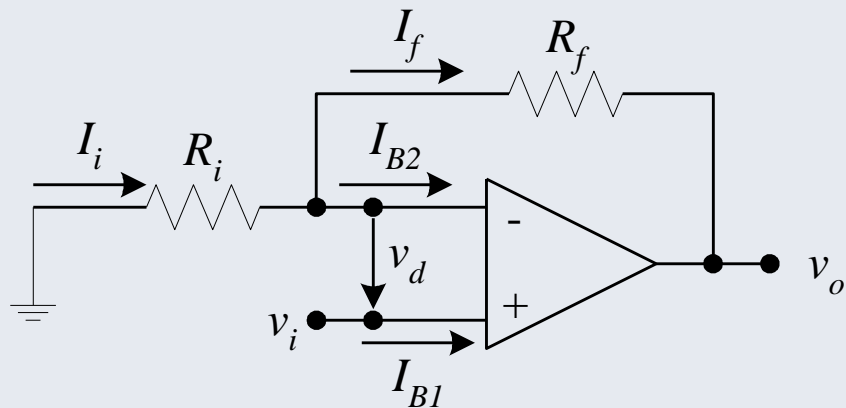
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

Ganho de tensão de malha fechada.

Inversão de fase de 180°.

# Configurações básicas

- Amplificador não-inversor:



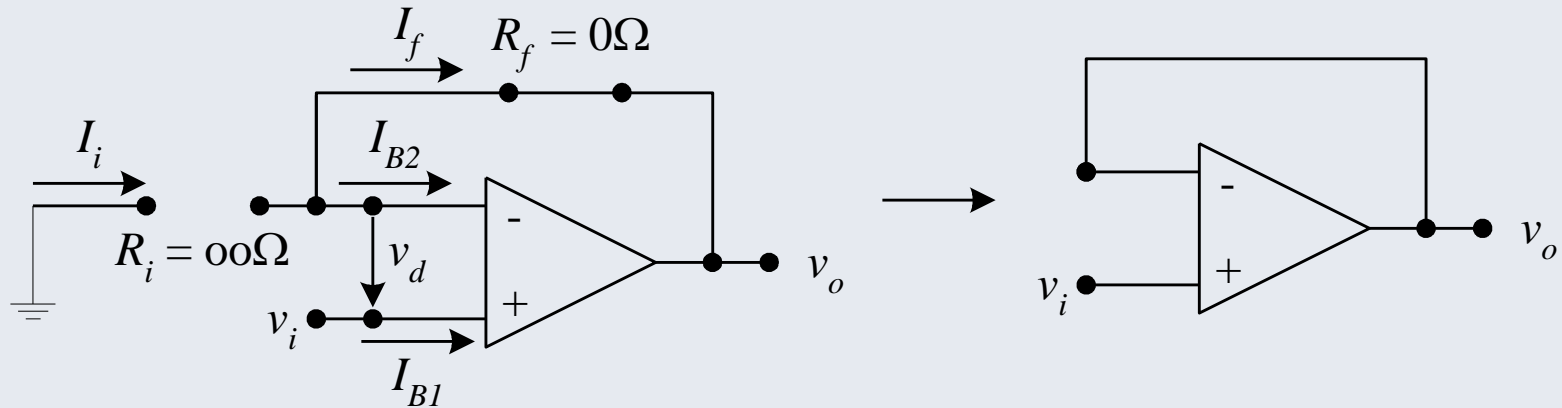
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

Ganho de tensão de malha fechada.

Não há inversão de fase.

# Configurações básicas

- Amplificador não-inversor de ganho unitário, ou *buffer*, ou seguidor de tensão:



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1$$

Ganho de tensão de malha fechada.

Alta impedância de entrada.

Baixa impedância de saída.

Utilizado para isolamento entre estágios.

# Exemplos

1) Para um amplificador inversor, determinar os valores da tensão de saída ( $v_o$ ) e do ganho de malha fechada ( $A_v$ ) considerando  $v_i = 2\text{V}$ ,  $R_i = 100\text{k}\Omega$  e  $R_f = 500\text{k}\Omega$ . Resp:  $v_o = -10\text{V}$ ,  $A_v = -5$

2) Para um amplificador não-inversor, determinar os valores da tensão de saída ( $v_o$ ) e do ganho de malha fechada ( $A_v$ ) considerando  $v_i = 2\text{V}$ ,  $R_i = 100\text{k}\Omega$  e  $R_f = 500\text{k}\Omega$ . Resp:  $v_o = 12\text{V}$ ,  $A_v = 6$

# Referências

## . Básica:

- R. Boylestad, L. Nashelsky, “Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos,” 8. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- A. F. Gruiter, “Amplificadores Operacionais: fundamentos e aplicações,” São Paulo: McGraw-Hill, 1988.
- R. A. Gayakwad. "Op-Amps and linear integrated circuits". 7. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

## . Complementar:

- S. Franco, “Design with operational amplifiers and analog integrated circuits,” 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 1998.
- A. Pertence Jr., “Eletrônica analógica: Amplificadores Operacionais e filtros ativos - teoria, projetos, aplicações e laboratório,” 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

## . Outras:

- <http://www.national.com/mpf/LM/LM741.html#Overview>
- <http://www.national.com/mpf/LM/LM358.html#Overview>
- <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/lm358.html>
- <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ua741.html>
- [www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com)
- [www.datasheetarchive.com](http://www.datasheetarchive.com)