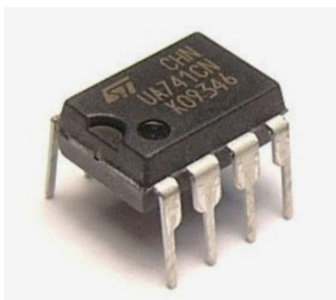
Análise de circuitos com amplificadores operacionais

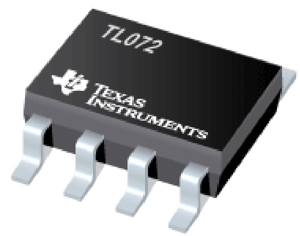
Introdução

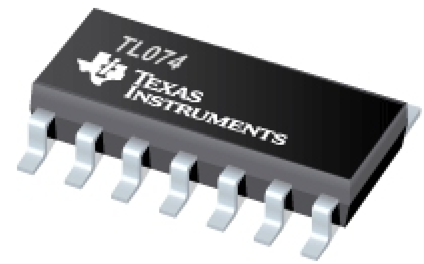
- **Amplificadores operacionais:**
  - **Circuitos eletrônicos capazes de realizar *operações matemáticas* sobre sinais de tensão ou corrente:**
    - **Adição e subtração.**
    - **Multiplicação e divisão.**
    - **Integração e derivação.**
    - **Etc.**
  - **Utilizados originalmente para construção de *computadores analógicos*.**
  - **Aplicados atualmente em várias situações:**
    - **Amplificadores.**
    - **Filtros.**
    - **Circuitos de controle analógico.**
    - **Etc.**

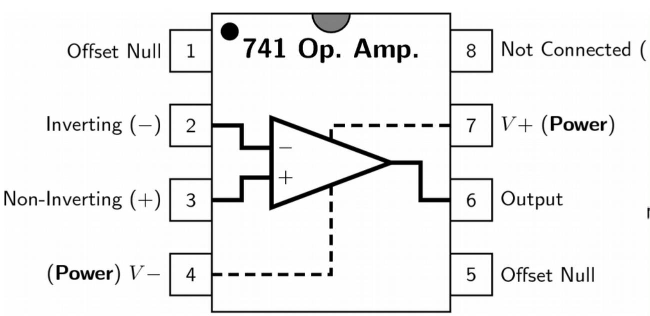
Circuitos integrados

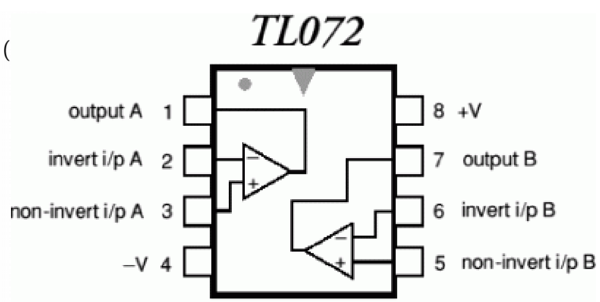
- **Amp. ops. são encontrados na forma de circuitos integrados.**

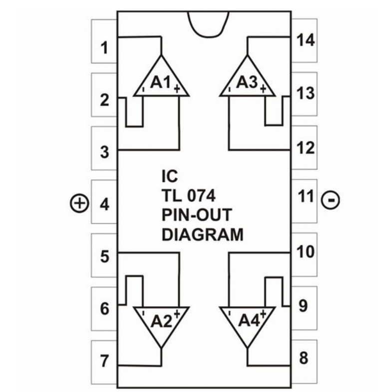






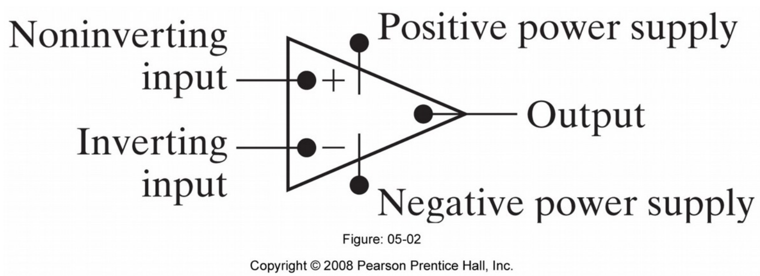


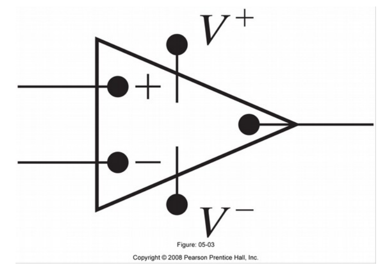




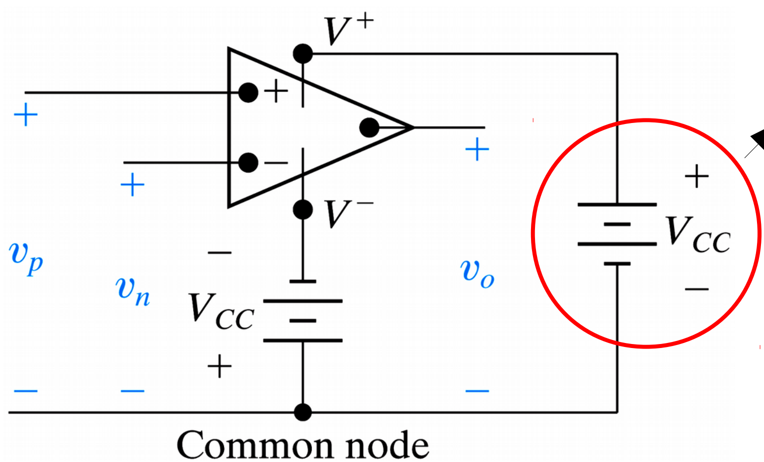
Símbolos e alimentação

- **O amp. op. possui a seguinte “interface”:**





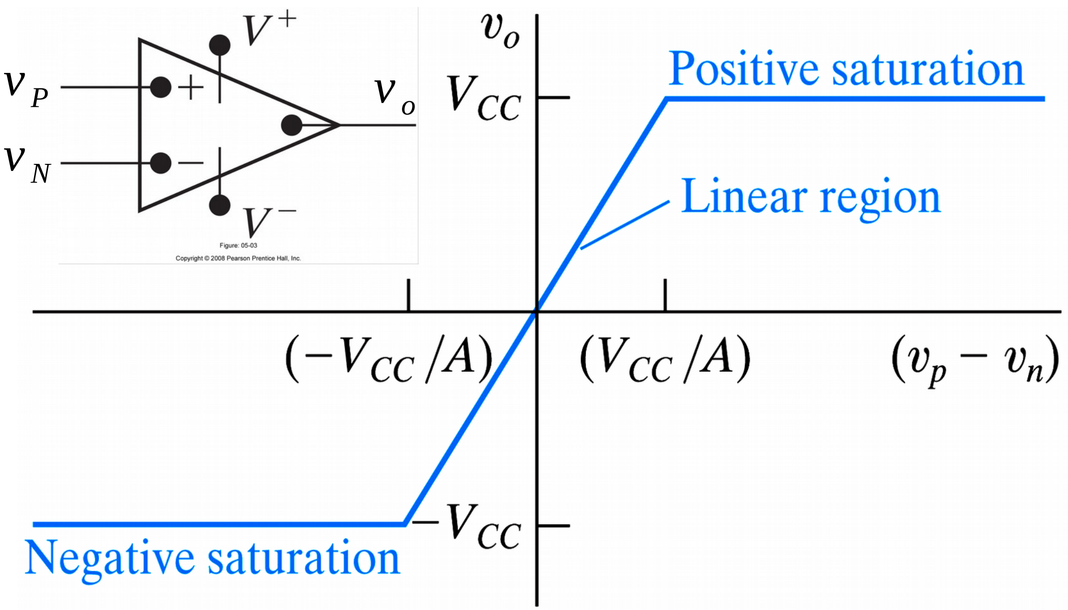
- **Alimentação e nó de referência:**



Tipicamente de 15 a 18V.

Função de transferência

- **Função de transferência → relação matemática que representa como a entrada é transferida para a saída.**
- **Amp. op. sem realimentação:**



$$\begin{cases} v_o = A(v_P - v_N), & se\ |v_P - v_N| < \dfrac{V_{CC}}{A} \\ v_o = \pm V_{CC}, & caso\ contrário \end{cases}$$

Onde:

v_P ► Tensão na entrada não inversora.

v_N ► Tensão na entrada não inversora.

A ► Ganho em malha aberta.

O ganho em malha aberta e o curto-circuito virtual

- **O amp. op. é projetado de forma a ter ganho em malha aberta extremamente elevado:**
  - **Valores comuns da ordem de $1x10^4$ a $1x10^8$.**
- **Por isso, diferenças muito pequenas nas tensões de entrada levam imediatamente o circuito à saturação:**

Região linear $\longrightarrow$ $v_o = A(v_P - v_N), \quad se\ |v_P - v_N| < \frac{V_{CC}}{A}$ $\longrightarrow$ $|v_P - v_N| < \frac{V_{CC}}{A} = \frac{V_{CC}}{1\times 10^8}$

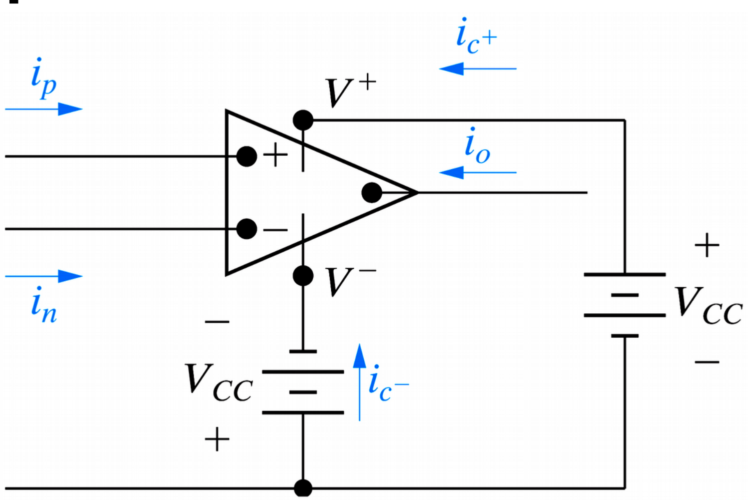
Se Vcc = 15V $\longrightarrow$ $|v_P - v_N| < 15\times 10^{-8} = 150\,nV\ !$

- **Portanto, para operar na região linear**

$|v_P - v_N| \approx 0\,V$ $\longrightarrow$ $\boxed{v_P = v_N}$ $\longrightarrow$ $\boxed{\text{Curto-circuito virtual!}}$

Resistência de entrada

- **O amp. op. é projetado de forma a apresentar uma resistência de entrada muito grande:**
  - **Idealmente infinita.**
  - **Valores comuns da ordem de 10^6 a 10^{12} Ω.**
- **Isto faz com que as correntes de entrada sejam praticamente nulas:**



$$\boxed{i_P = i_N = 0\,A}$$

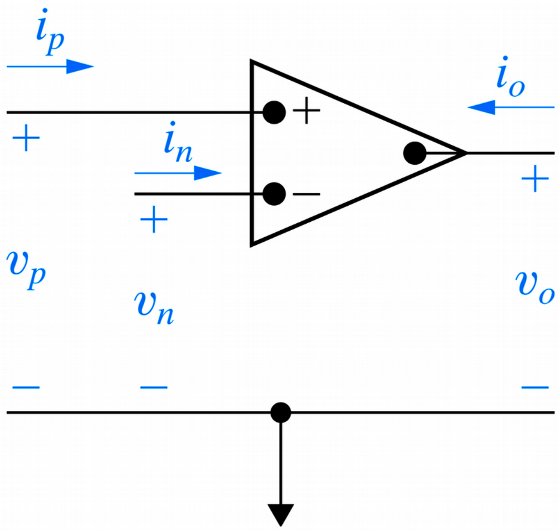
Por Kirchoff:

$$i_P + i_N + i_o + i_c^+ + i_c^- = 0$$

$$\boxed{i_o = -\left(i_c^+ + i_c^-\right)}$$ → A corrente na saída é totalmente fornecida pelas fontes.

Modelo ideal para um op. amp. operando na região linear

- **Resumo:**



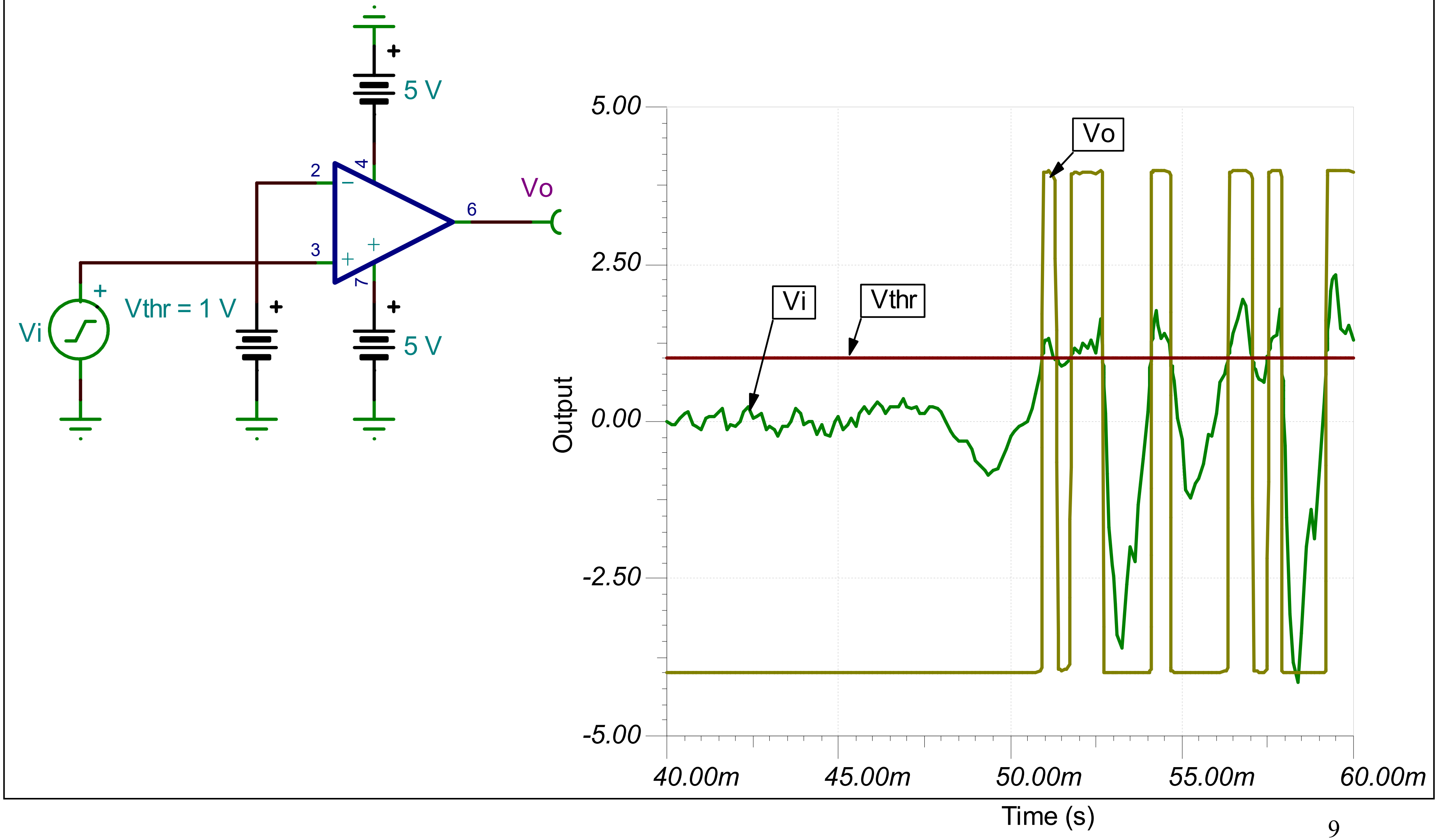
$\boxed{A=\infty}$ → Ganho infinito em malha aberta

$\boxed{v_P=v_N}$ → Curto-circuito virtual!

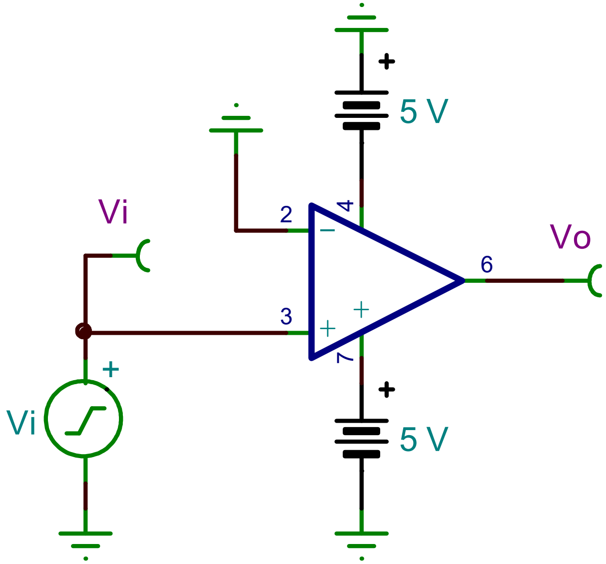
$\boxed{i_P=i_N=0\,A}$ → Resistência de entrada infinita!

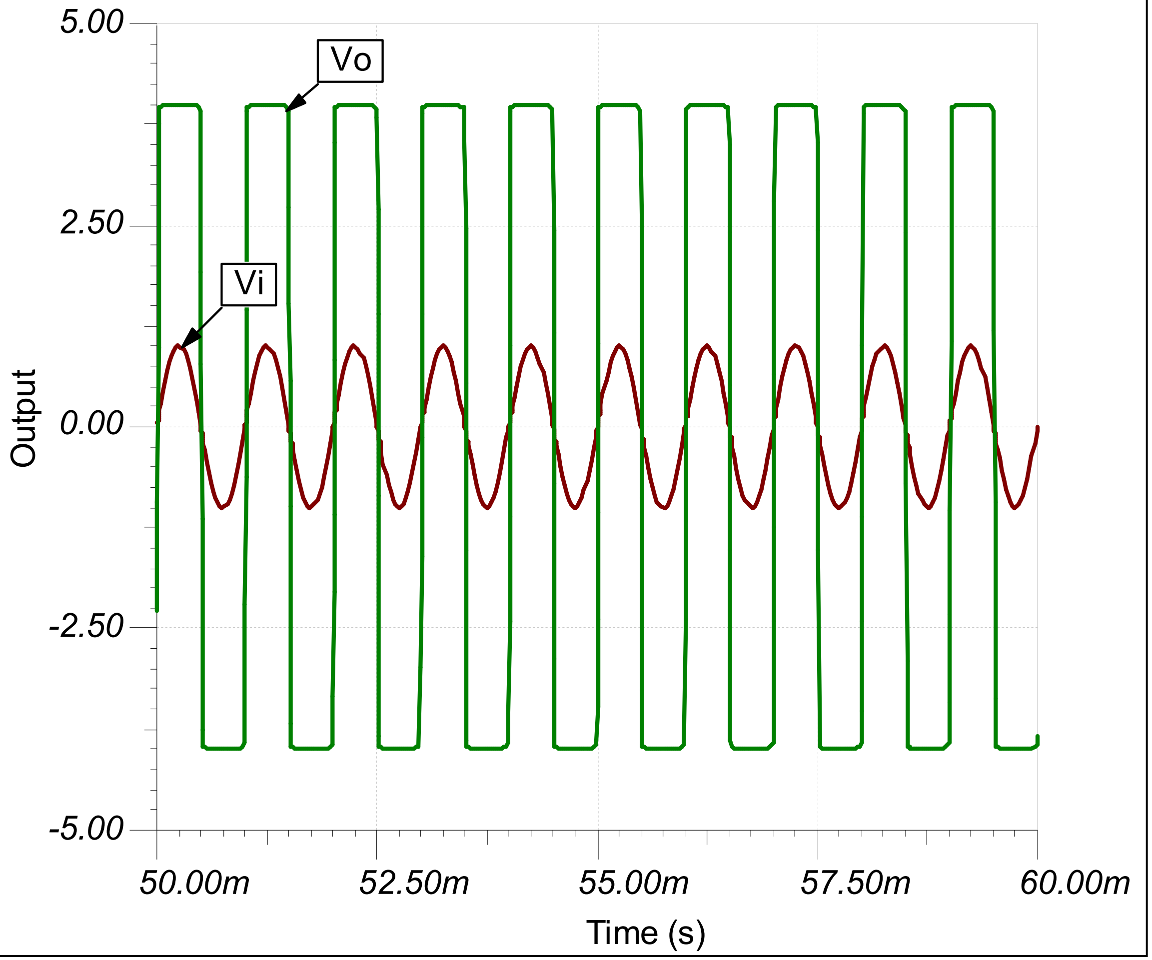
$\boxed{i_o=-\left(i_c^{+}+i_c^{-}\right)}$ → A corrente na saída é totalmente fornecida pelas fontes.

Ex.: comparadores de tensão



Ex.: gerador de onda quadrada.





Análise de circuitos básicos com amplificadores operacionais.

- **Amplificador inversor:**

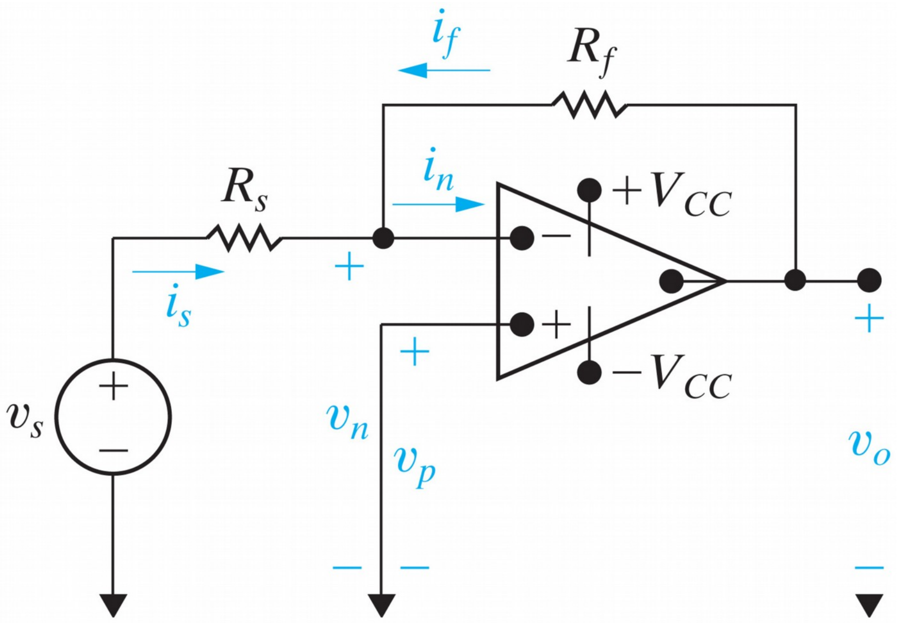


Figure: 05-09

$$\boxed{v_o = -\frac{R_f}{R_s} v_s}$$

Exemplo

- **Para o op. amp. da figura, considerado ideal, determine:**
  - **Vo, se Va = 1V e Vb = 0V.**
  - **Idem, se Va = 1V e Vb = 2V.**
  - **Se Va = 1V, quais valores de Vb garantem o funcionamento na região linear?**

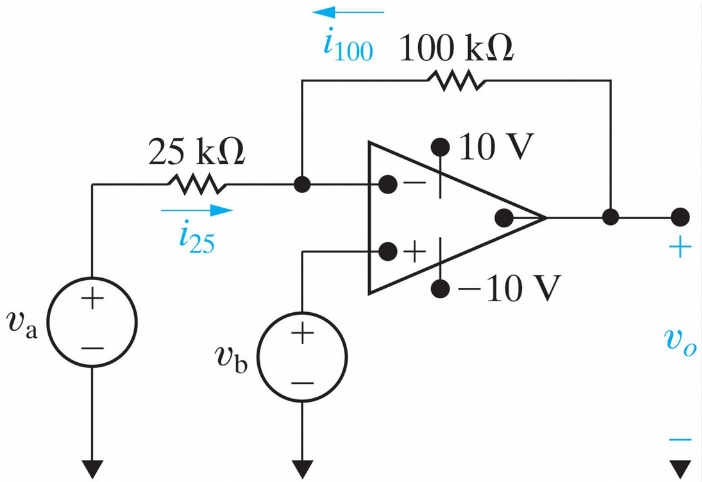


Figure: 05-08Ex5.1

Análise de circuitos básicos com amplificadores operacionais.

- **Amplificador somador inversor:**

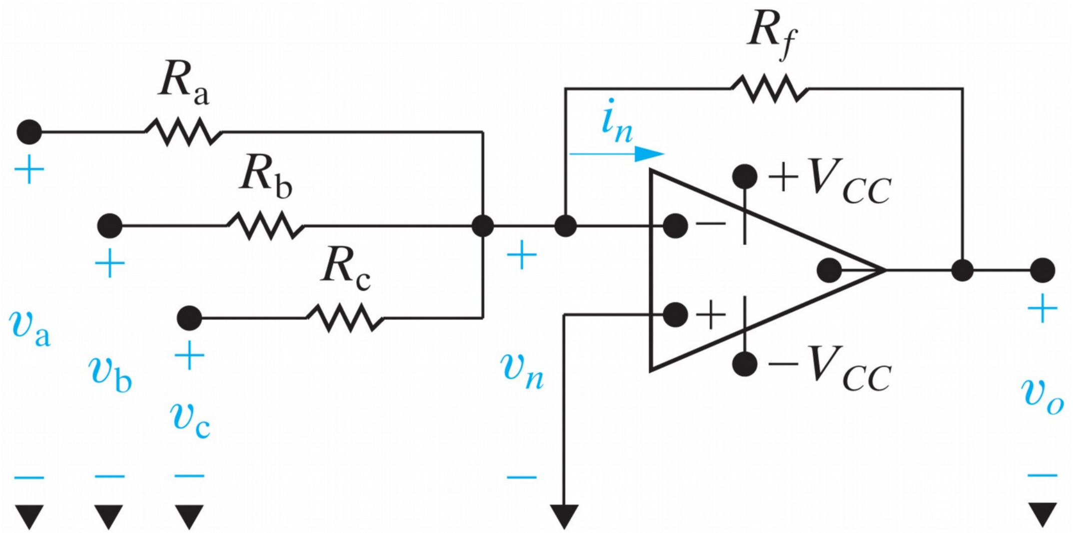


Figure: 05-11

$$\boxed{v_o = -\left(\frac{R_f}{R_a} v_a + \frac{R_f}{R_b} v_b + \frac{R_f}{R_c} v_c\right)}$$

Se: $R_a = R_b = R_c = R_s \longrightarrow$

$$v_o = -\frac{R_f}{R_s}\left(v_a + v_b + v_c\right)$$

Se: $R_s = R_f \longrightarrow$

$$v_o = -\left(v_a + v_b + v_c\right)$$

Exemplo:

- **Determine:**
  - **Vo, se Va = 0,1V e Vb = 0,25V.**
  - **Idem, se Vb = - 0,25V**
  - **Se Vb = 0,25V, a faixa de valores de Va para a região linear.**

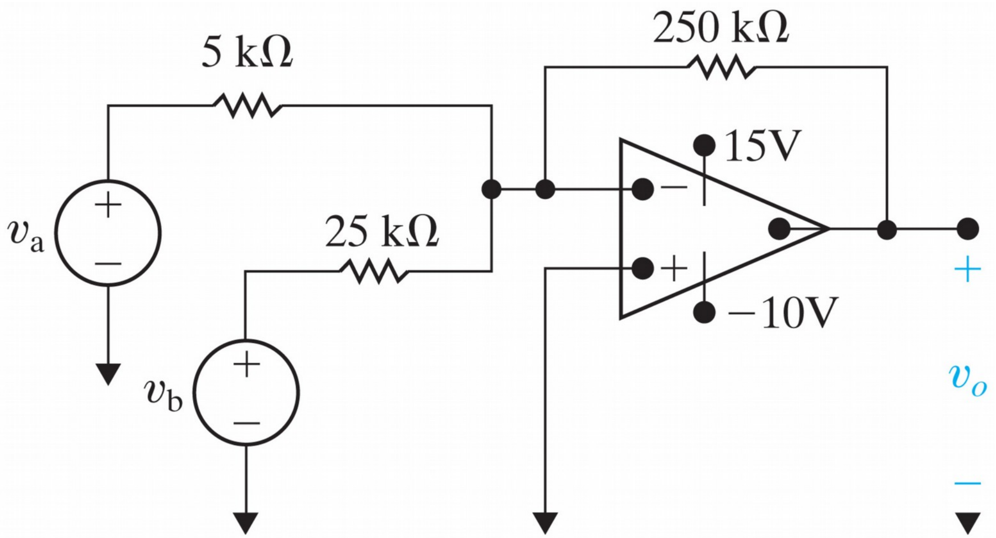


Figure: 05-11-01AO2-5.3

Análise de circuitos básicos com amplificadores operacionais.

- **Amplificador não-inversor:**

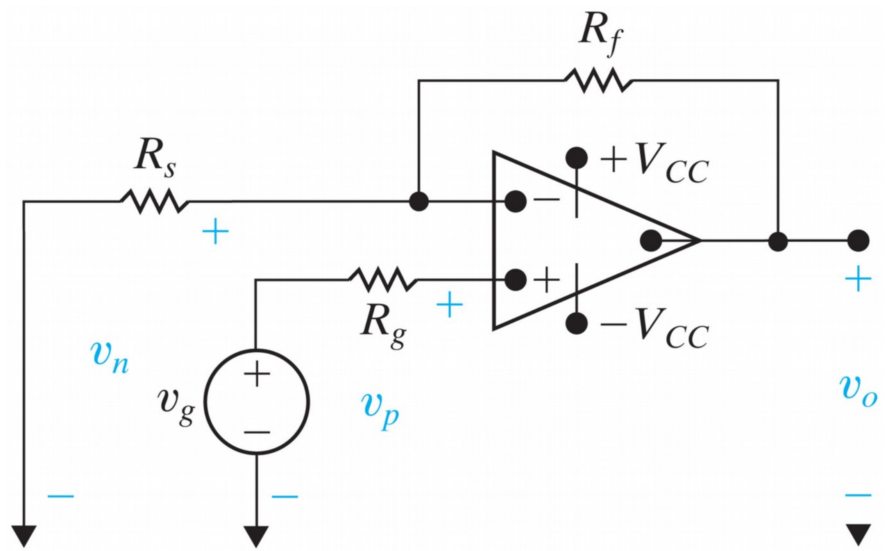


Figure: 05-12

$$\boxed{v_o = \frac{R_s + R_f}{R_s} v_g}$$

Exemplo

- **Determine:**
  - **Vo para Rx = 60kΩ.**
  - **O maior valor de Rx para trabalho na região linear.**

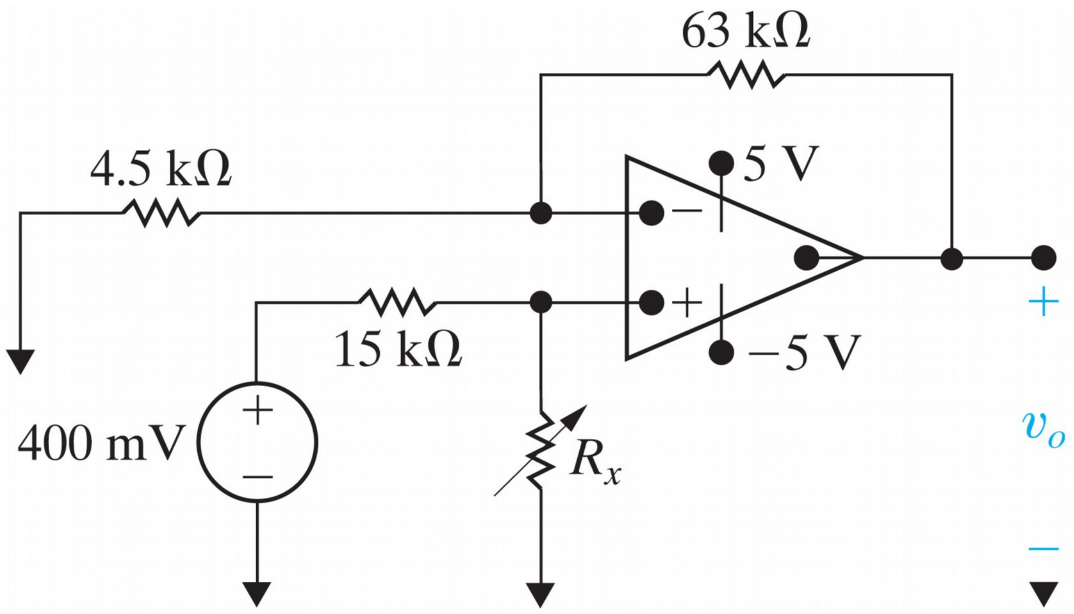


Figure: 05-12-01AO2-5.4

Análise de circuitos básicos com amplificadores operacionais.

- **Amplificador de diferenças:**

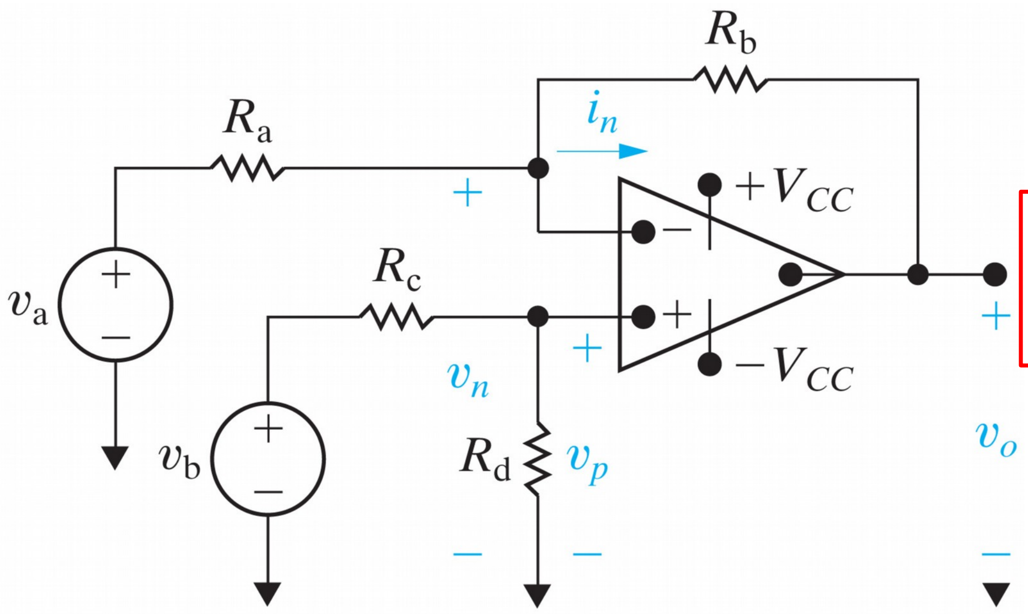


Figure: 05-13

$$\boxed{v_o = -\left[\frac{R_b}{R_a} v_a - \frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a(R_c + R_d)} v_b\right]}$$

Se: $\dfrac{R_a}{R_b} = \dfrac{R_c}{R_d} \longrightarrow$

$$v_o = -\frac{R_b}{R_a}(v_a - v_b)$$

Se: $R_a = R_b = R_c = R_d \longrightarrow$

$$v_o = -(v_a - v_b)$$

Exemplo:

- **Determine:**
  - **Vo para Va = 2,5V e Vb = 4V.**
  - **Se Vb = 4V, a faixa de valores de Va para região linear.**

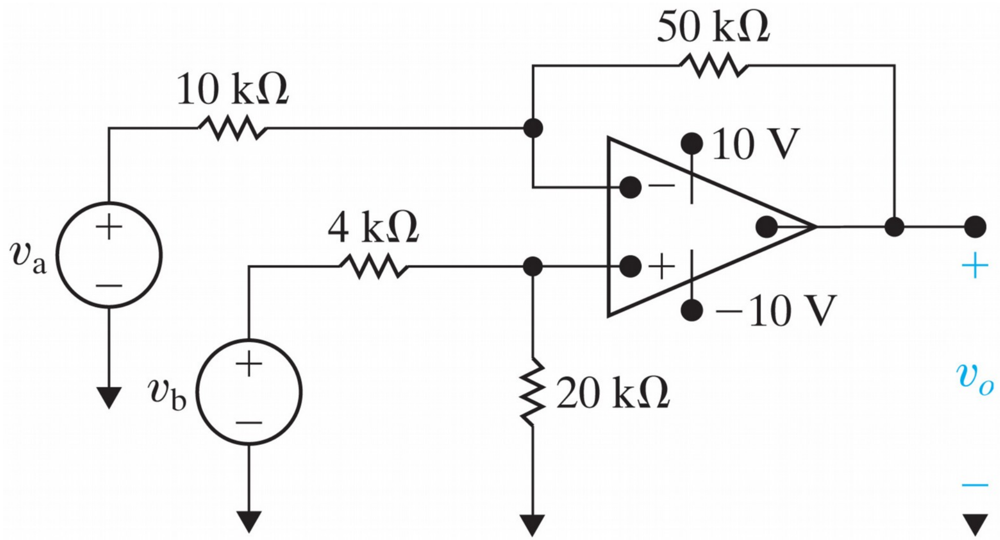
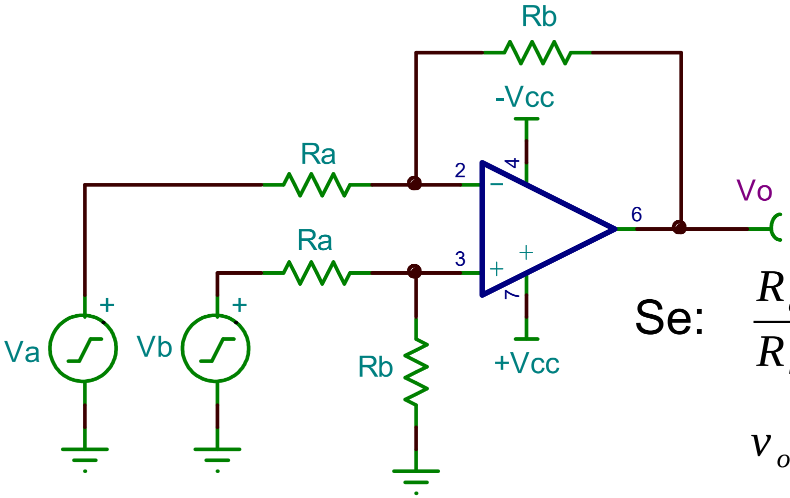


Figure: 05-13-01AO2-5.5

O amplificador de diferenças e a rejeição de modo comum



Se: $\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d}$

$$v_o = -\frac{R_b}{R_a}\left(v_a - v_b\right)$$

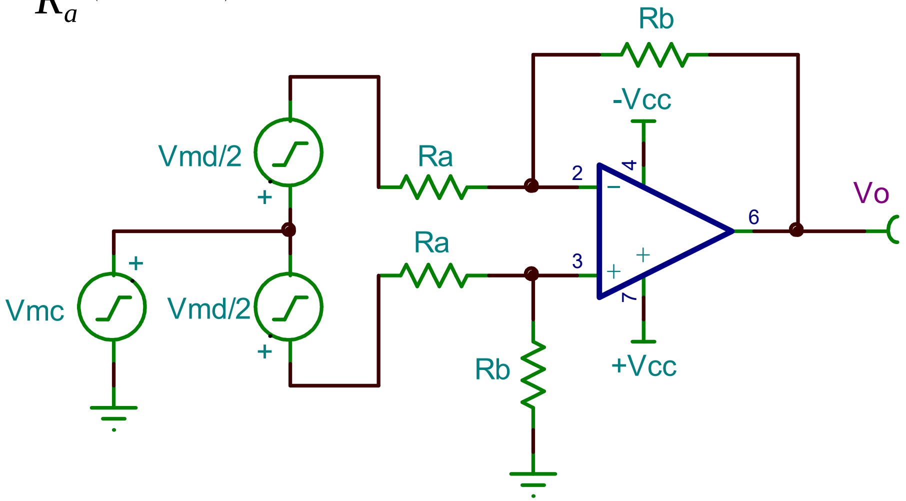
Definindo:

$v_b - v_a = v_{md}$ → Tensão em modo diferencial

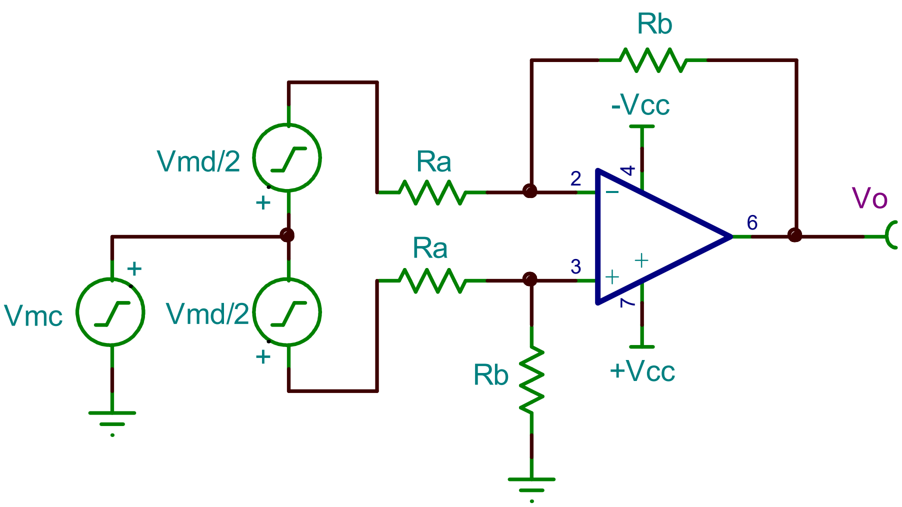
$\frac{v_b + v_a}{2} = v_{mc}$ → Tensão em modo comum

$$v_a = \frac{v_b + v_a}{2} - \frac{v_b - v_a}{2} \rightarrow v_a = v_{mc} - \frac{1}{2} v_{md}$$

$$v_b = \frac{v_b + v_a}{2} + \frac{v_b - v_a}{2} \rightarrow v_b = v_{mc} + \frac{1}{2} v_{md}$$



O amplificador de diferenças e a rejeição de modo comum



Se: $\frac{R_a}{R_b}=\frac{R_c}{R_d}$

$$v_o=-\frac{R_b}{R_a}\left(v_a-v_b\right)$$

$$v_a=v_{mc}-\frac{1}{2}v_{md}$$

$$v_b=v_{mc}+\frac{1}{2}v_{md}$$

$$v_o=-\frac{R_b}{R_a}\left[\left(v_{mc}-\frac{1}{2}v_{md}\right)-\left(v_{mc}+\frac{1}{2}v_{md}\right)\right]=-\frac{R_b}{R_a}\left[v_{mc}-v_{mc}-\frac{1}{2}v_{md}-\frac{1}{2}v_{md}\right]$$

$$\boxed{v_o=+\frac{R_b}{R_a}v_{md}}$$

Idealmente o amplificador de diferenças só responderá a tensões de modo diferencial!

Exemplo

- **Determine a equação para a saída do circuito, Vo, em função das tensões de entrada e dos resistores.**