

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

AMPOP

Prof. Marcos Fergütz

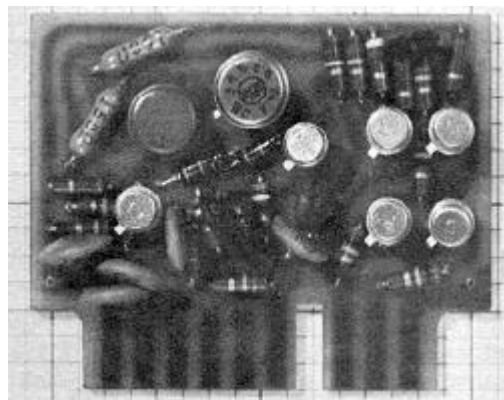
Outubro/2026

ORIGEM

- CIRCUITO QUE REALIZA OPERAÇÕES MATEMÁTICAS (SOMA, SUBTRAÇÃO, INTEGRAÇÃO, DIFERENCIAÇÃO) COM SINAIS ANALÓGICOS (TENSÃO);
- UTILIZADOS EM COMPUTADORES ANALÓGICOS



válvulas



Discreto à transistor



integrado

HISTÓRICO

Histórico

1945

1ª geração - Válvulas

1955

2ª geração - Transistores

1965

3ª geração - Monolíticos Bipolares

1963 - μ A702

1965 - μ A709

1968 - μ A741

FAIRCHILD

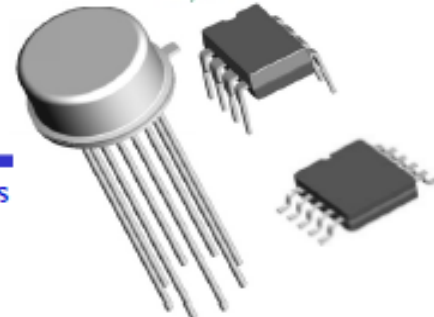
1975

4ª geração - Monolíticos BiFET e BiMOS

5ª geração - AOP's de Potência, etc

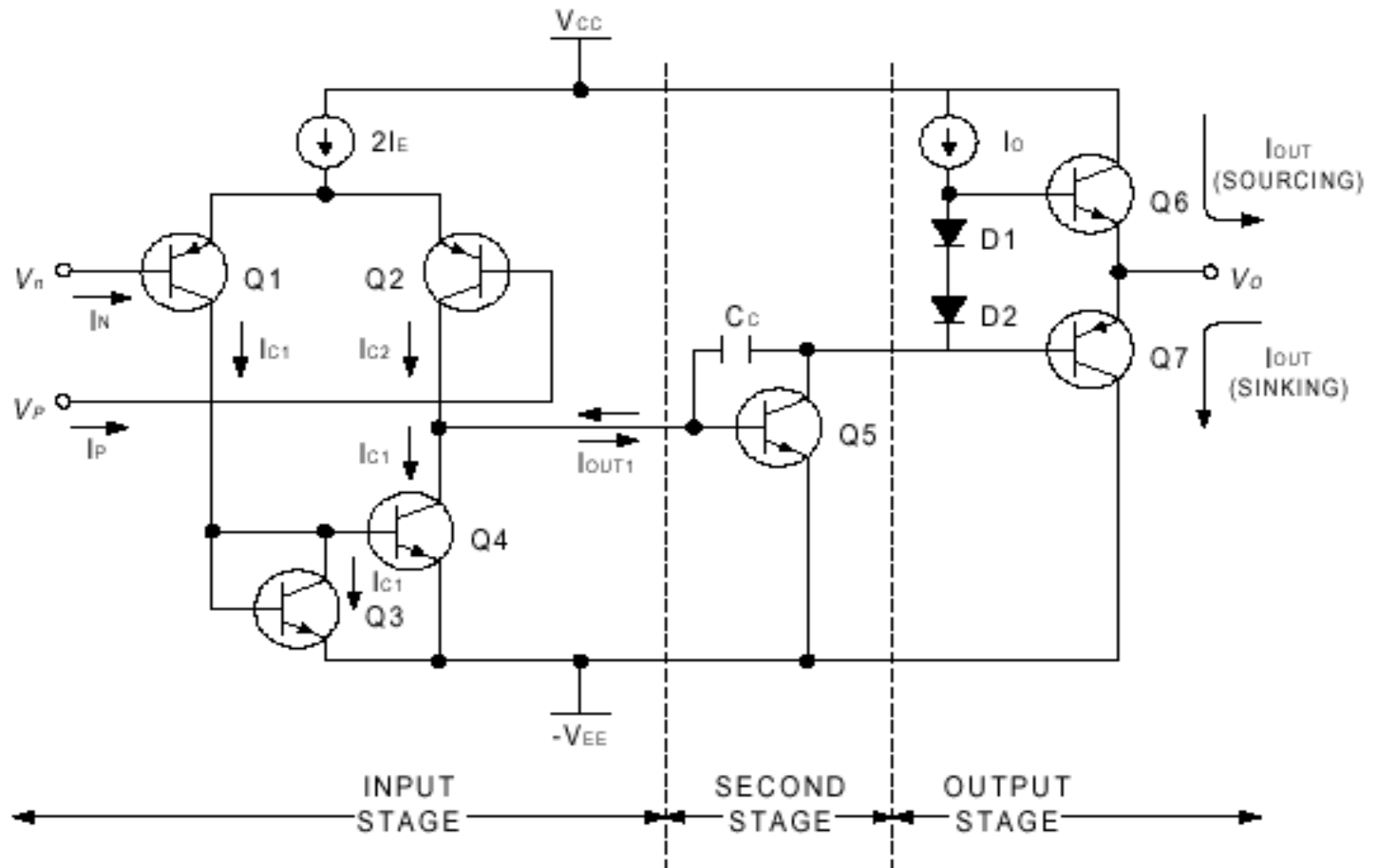
6ª geração - Muitas Inovações

Circuitos Integrados

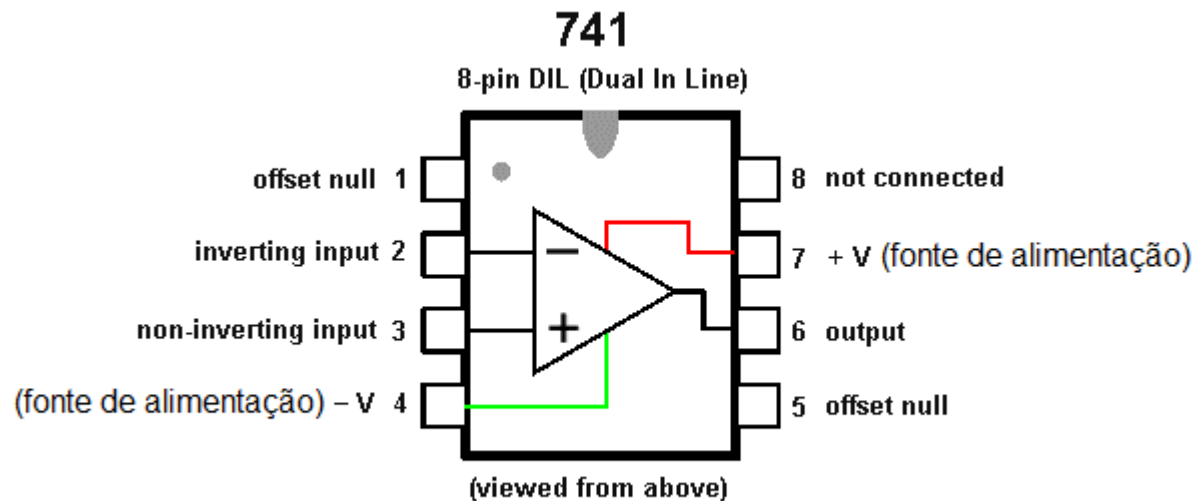
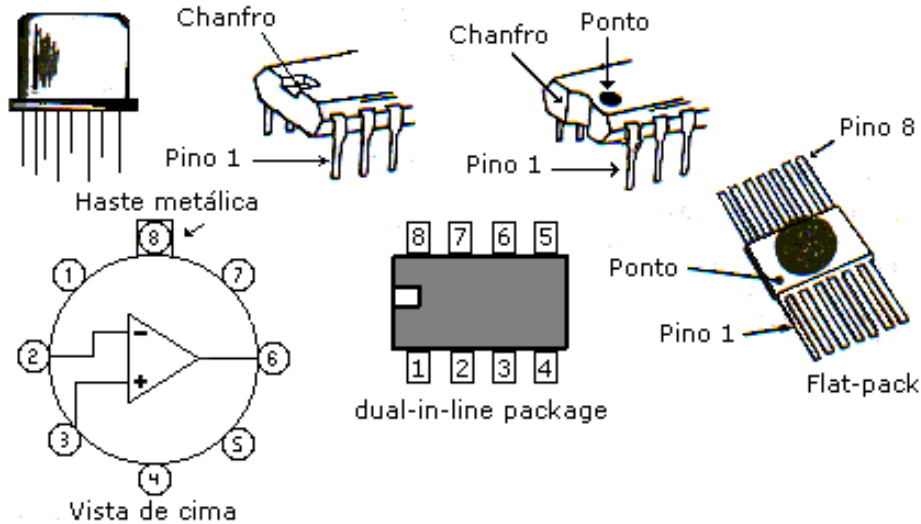


CIRCUITO INTERNO

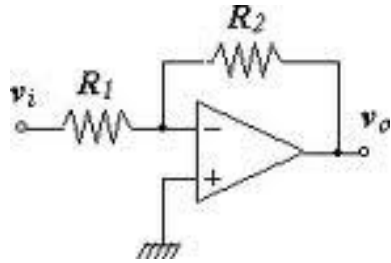
(ESQUEMÁTICO)



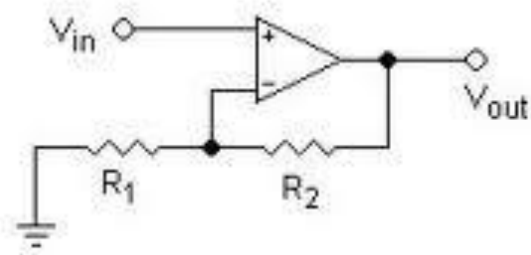
ENCAPSULAMENTO E PINAGEM



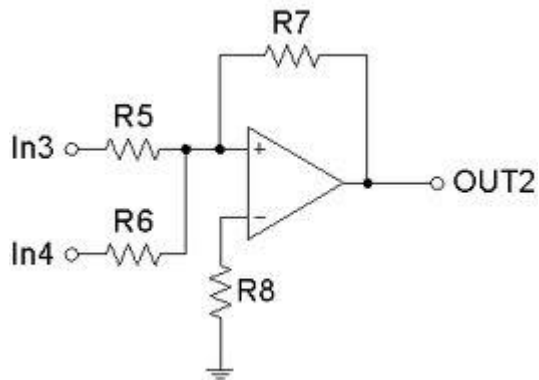
CIRCUITOS APLICATIVOS



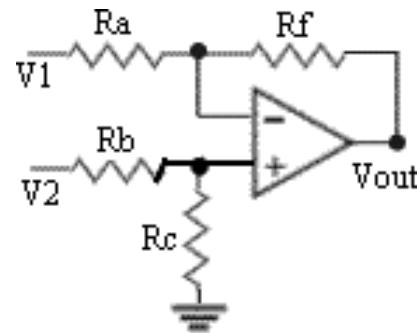
INVERSOR



NÃO-INVERSOR



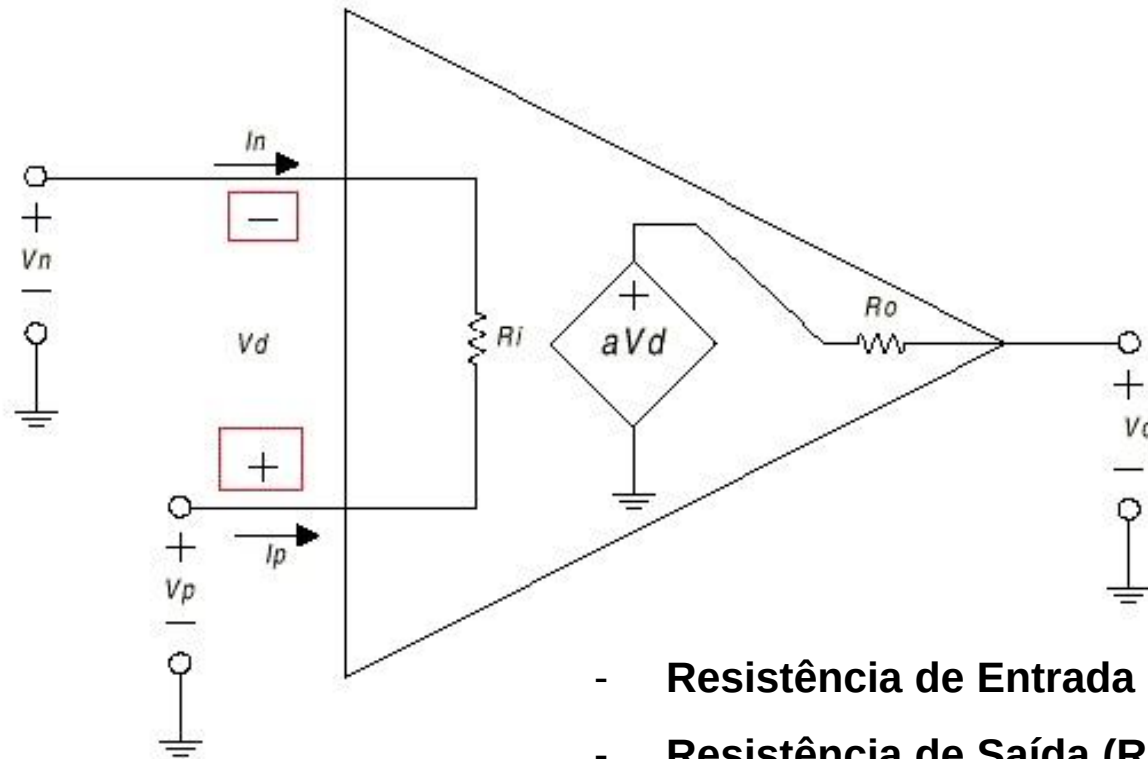
SOMADOR



DIFERENCIAL
(SUBTRATOR)

MODELAMENTO

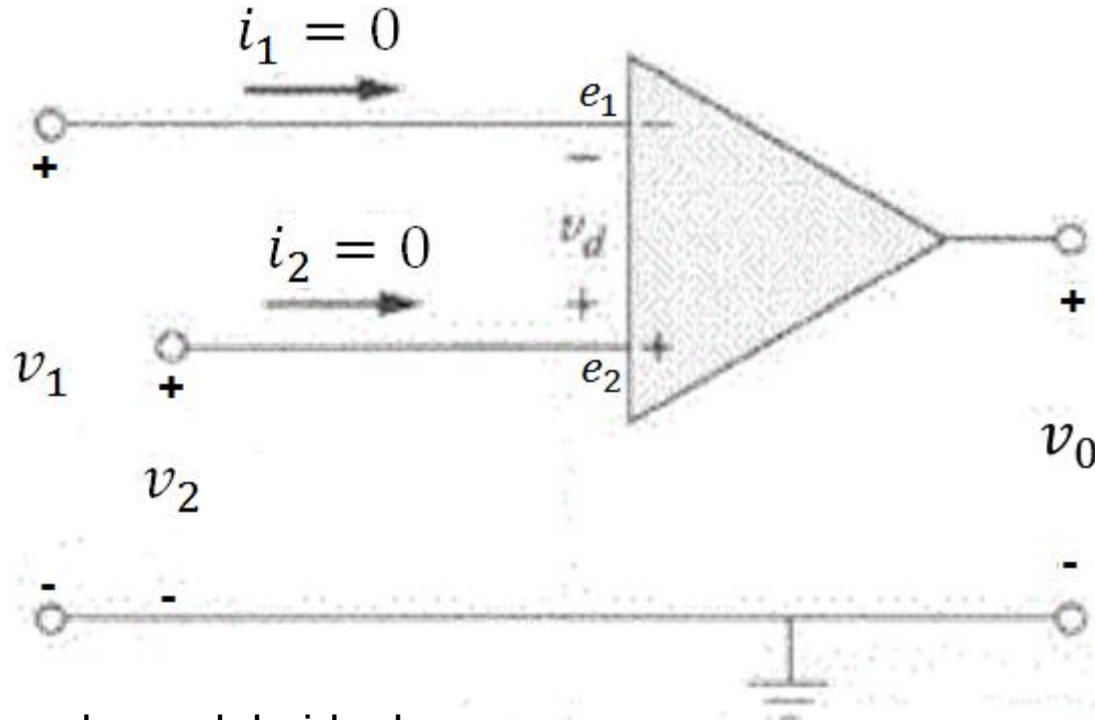
- REAL



- Resistência de Entrada (R_i) 10^6 a $10^{13} \Omega$
- Resistência de Saída (R_o) 10 a 100Ω
- Ganho de Malha Aberta (a) 10^5 a 10^8

MODELAMENTO

- IDEAL



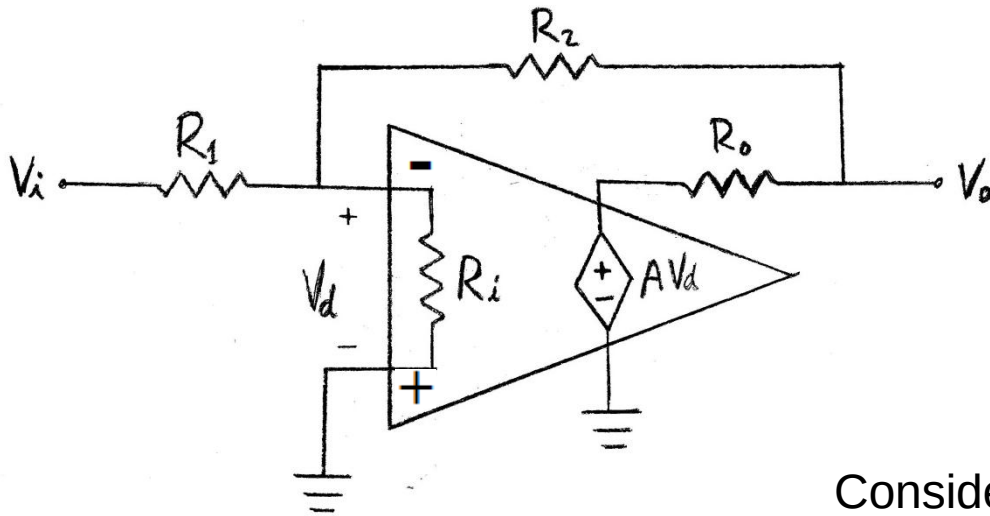
- Características do modelo ideal:

$$i_1 = 0 \quad i_2 = 0$$

$$e_1 = e_2$$

- Resistência de Entrada (R_i) ∞
- Resistência de Saída (R_o) 0Ω
- Ganho de Malha Aberta (a) ∞

AMPOP INVERSOR – MODELO REAL



Equação nodal no terminal (-):

$$\frac{V_i - V_d}{R_1} = \frac{V_d}{R_i} + \frac{V_d - V_o}{R_2} \quad (1)$$

Equação nodal em V_o :

$$\frac{V_o - V_d}{R_2} + \frac{V_o - A \cdot V_d}{R_o} = 0 \quad (2)$$

Considerando os seguintes parâmetros:

$$R_1 = R_2 = 1 \times 10^3 \Omega \quad R_i = 10^8 \Omega, R_o = 10 \Omega \text{ e } A = 10^5$$

Ajustando as equações, tem-se:

$$\frac{V_i}{R_1} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_i} \right) V_d = -\frac{V_o}{R_2} \quad (3) \quad \text{e} \quad \left(\frac{A}{R_o} + \frac{1}{R_2} \right) V_d = \left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_2} \right) V_o \quad (4)$$

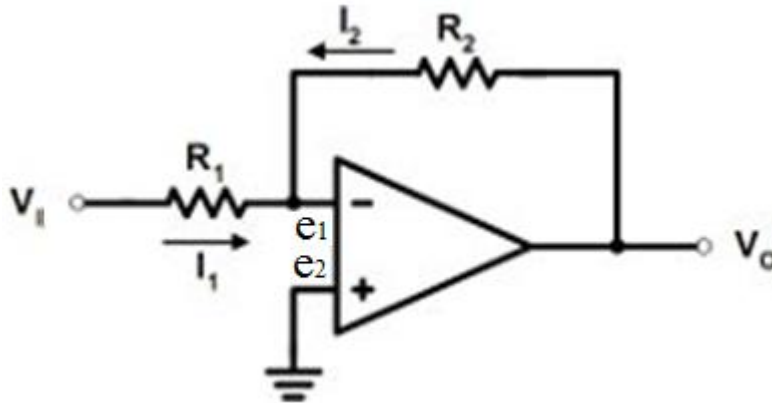
Substituindo os parâmetros nas equações 3 e 4, tem-se:

$$V_i = 2,00001 \cdot V_d - V_o \quad (5) \quad \text{e} \quad V_d = 1,0099998 \times 10^{-5} \times V_o \quad (6)$$

Substituindo a equação 6 em 5, tem-se:

$$V_o = -1,0000202 \times V_i$$

AMPOP INVERSOR – MODELO IDEAL



Aplicando análise nodal na porta inversora, tem-se:

$$\frac{V_i - e_1}{R_1} + \frac{V_o - e_1}{R_2} = 0$$

Sendo $e_1 = e_2 = 0V$, então:

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}, \text{ ou } V_o = -\frac{R_2}{R_1} \times V_i \quad (1)$$

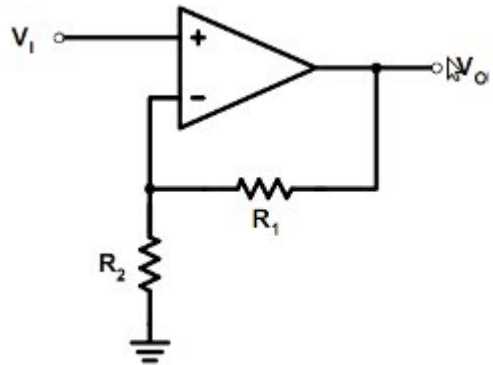
Utilizando os parâmetros: $R_1 = R_2 = 1 \times 10^3 \Omega$ em 1, tem-se:

$$V_o = -V_i$$

Comparando com o resultado do modelo real: $V_o = -1,0000202 \times V_i$

Observa-se que o erro se dá na 5ª casa decimal, o que, para a maioria das aplicações, pode ser desprezado. Portanto, utiliza-se o modelo ideal, para facilitar a análise dos circuitos.

Circuito Não Inversor



Análise Nodal em (-):

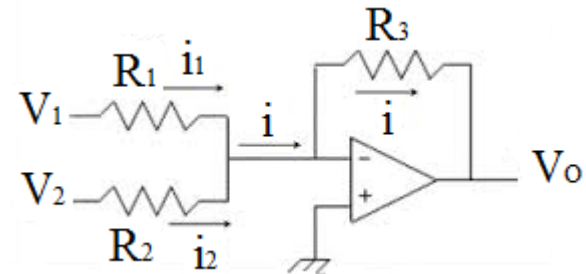
$$\frac{V_i}{R_2} + \frac{V_i - V_o}{R_1} = 0$$

$$\frac{V_i}{R_2} + \frac{V_i}{R_1} = \frac{V_o}{R_1}$$

$$\cancel{\frac{V_o}{R_1}} = \left(\frac{R_1 + R_2}{\cancel{R_1} \times R_2} \right) V_i$$

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

Circuito Somador Inversor



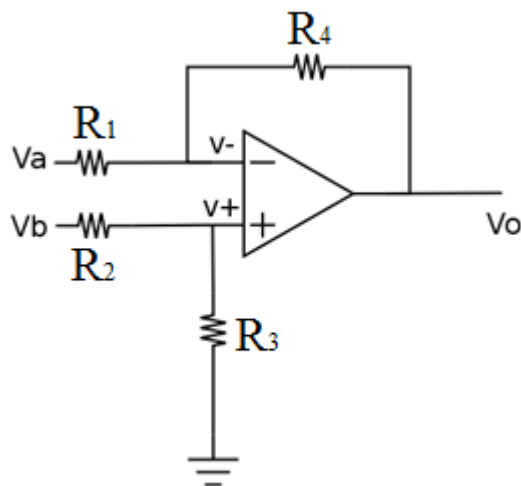
Análise Nodal em (-):

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_o}{R_3} = 0$$

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

$$V_o = - \left(\frac{R_3}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_3}{R_2} V_2 \right)$$

Circuito Subtrator



Aplicando Divisor de Tensão em (+):

$$V_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot V_b \quad (1)$$

Análise Nodal em (-):

$$\frac{V_a - V_-}{R_1} + \frac{V_0 - V_-}{R_4} = 0$$

$$\frac{V_a}{R_1} + \frac{V_0}{R_4} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} \right) V_- \Rightarrow \frac{V_0}{R_4} = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1 \cdot R_4} \right) V_- - \frac{V_a}{R_1}$$

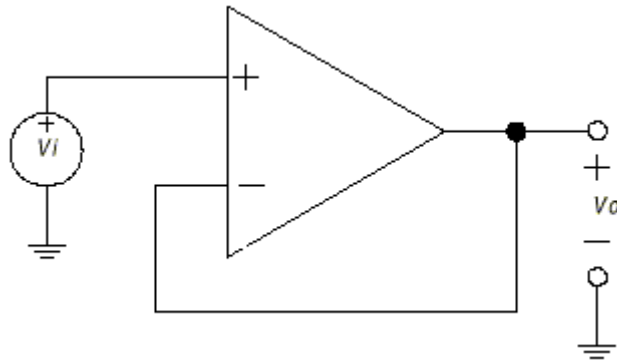
$$V_0 = \cancel{R_4} \cdot \left(\frac{R_1 + R_4}{\cancel{R_1} \cdot R_4} \right) V_- - \frac{R_4}{R_1} V_a \Rightarrow V_0 = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) V_- - \frac{R_4}{R_1} V_a \quad (2) \Rightarrow \text{Sendo: } V_+ = V_- \Rightarrow$$

Substituindo 1 em 2 $\Rightarrow V_0 = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_b - \frac{R_4}{R_1} V_a \Rightarrow V_0 = \frac{R_3}{R_1} \left(\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3} \right) V_b - \frac{R_4}{R_1} V_a$

$$R_1 = R_2 \text{ e } R_3 = R_4 \Rightarrow V_0 = \frac{R_4}{R_1} V_b - \frac{R_4}{R_1} V_a \quad R_1 = R_4 \text{ e } R_2 = R_3 \Rightarrow V_0 = V_b - V_a$$

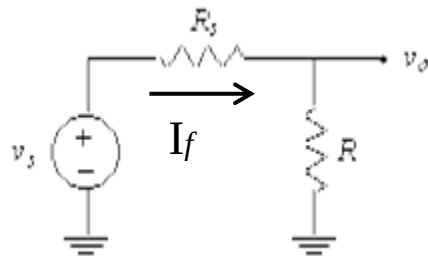
$$R_3 = \infty \Rightarrow R_3 \gg R_2 \Rightarrow V_0 = \cancel{R_3} \cdot \left(\frac{R_1 + R_4}{\cancel{R_3}} \right) V_b - \frac{R_4}{R_1} V_a \Rightarrow V_0 = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1} \right) V_b - \frac{R_4}{R_1} V_a$$

- Seguidor de Tensão



$$V_o = V_i$$

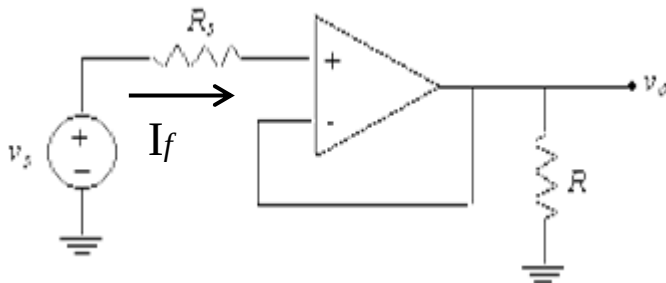
- Carregamento de Circuito:



$$V_o - V_s + R_s \cdot I_f = 0$$

R_s carregou a fonte

$$V_o = V_s - R_s \cdot I_f$$

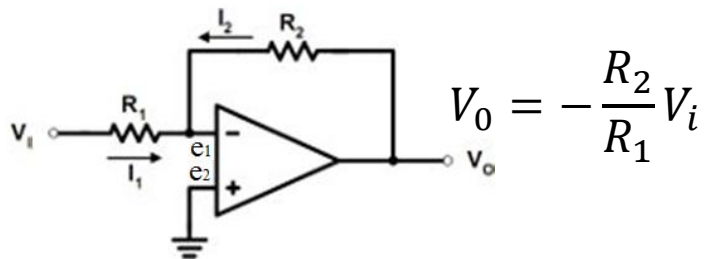


$$I_f = 0A \Rightarrow V_o = V_s$$

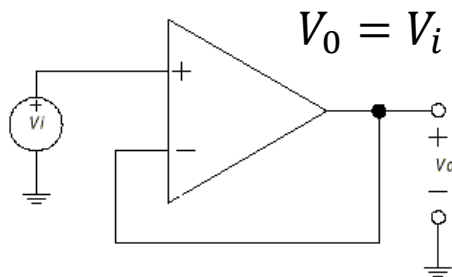
AMPOP “isolou” a entrada da saída, ou seja, R_s não carrega a fonte.

RESUMO

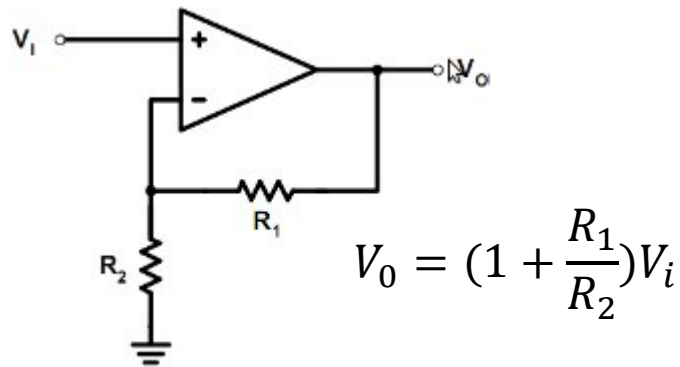
Circuito Inversor



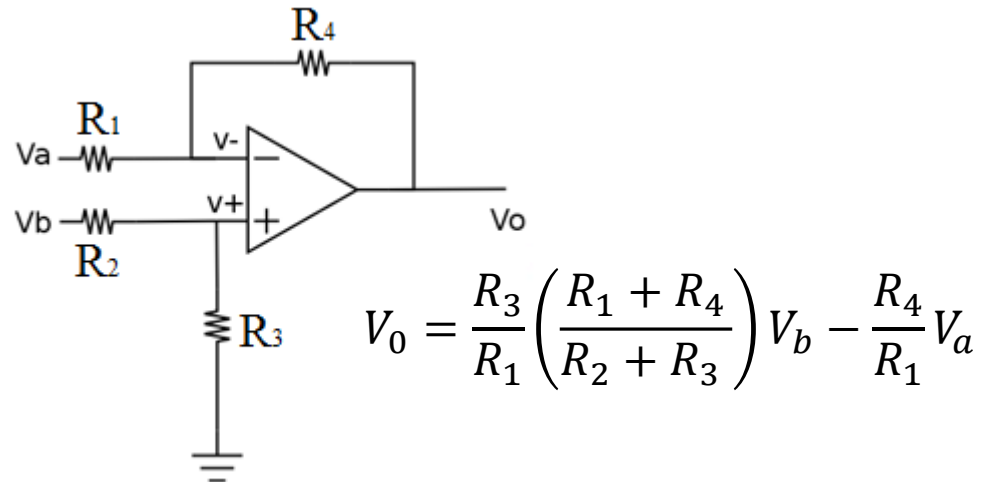
- Seguidor de Tensão



Circuito Não Inversor



Circuito Subtrator



Circuito Somador Inversor

