



ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos  
PSI - EPUSP

**PSI 3212 - 2023**  
**LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**

**Experiência 06**  
**Circuitos com Amplificador Operacional**

Profa. Elisabete Galeazzo;  
Profa. Laisa Costa de Biase

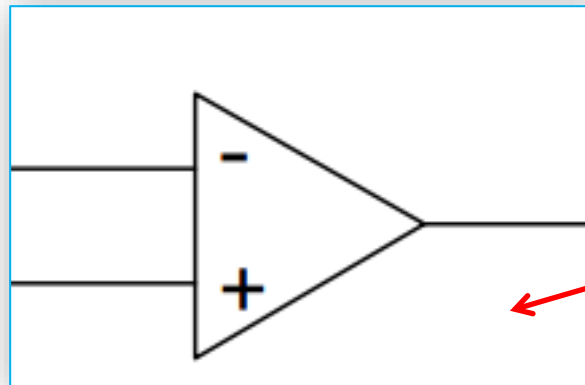
# Objetivos da Experiência 06

- Entender como funciona um amplificador operacional (**Amp.Op.**), utilizando-o em:
  - 👉 um circuito comparador
  - 👉 um circuito amplificador
  - 👉 um circuito somador
- Determinar o ganho em tensão do circuito amplificador inversor.
- Determinar o ganho em tensão do circuito amplificador somador

# Amplificador Operacional

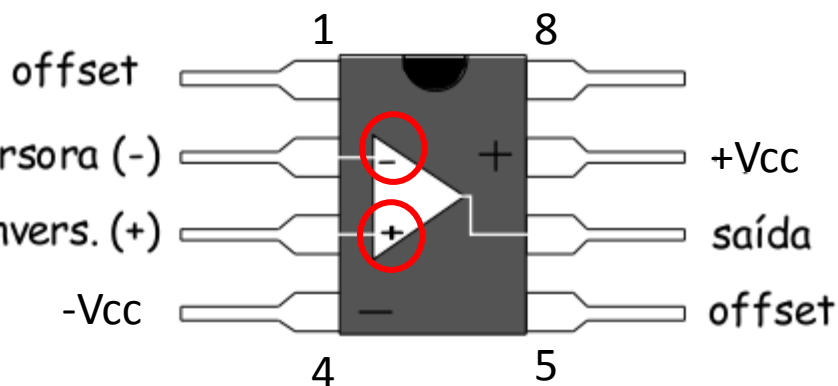
- Trata-se de um dispositivo complexo (fabricado com técnicas de microeletrônica) composto por:

- Diodos
- Transistores
- Resistores
- Capacitores



- Ele é um circuito analógico integrado (C.I.), sendo o chip encapsulado com **pinagem padronizada**.
- Na análise de circuitos elétricos, ele será tratado como **um componente**, representado geralmente com duas entradas e uma saída (configuração assimétrica)

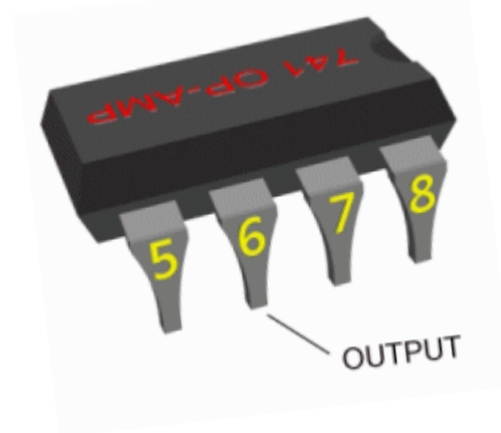
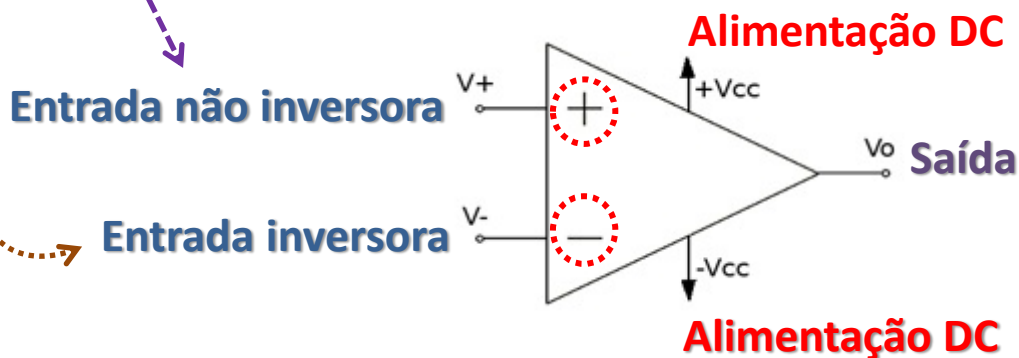
# Encapsulamento e símbolo elétrico de um Amp. Op. comercial: 741



Pinagem do 741



SÍMBOLO DO AMP OP:



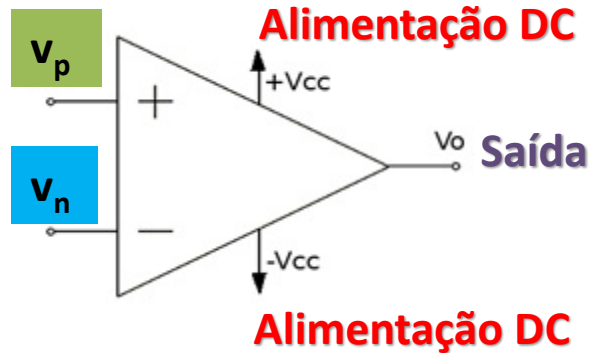
# Alimentação na Entrada do AmpOp

Entrada não inversora

$V_p$

Entrada inversora

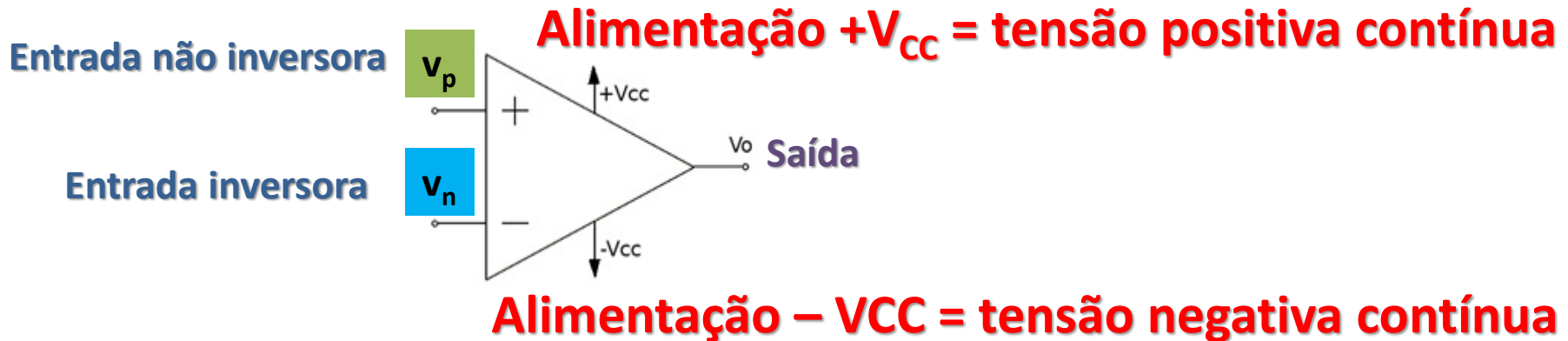
$V_n$



Entrada inversora (**terminal  $V_n$** ) aceita sinais positivos ou negativos!

Entrada não inversora (**terminal  $V_p$** ) aceita tanto sinais positivos quanto negativos!

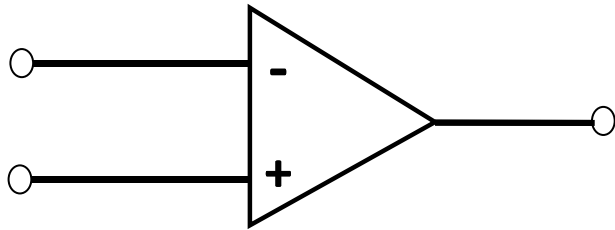
# Alimentação externa ( $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ )



👉 Para que funcione, o Amp. Op. **deve** ser alimentado com **tensão constante:  $+V_{cc}$  e  $-V_{cc}$**  (valores em torno de **+15 V** e **-15 V** para o modelo 741)

👉 As pinagens de alimentação  $+V_{cc}$  e  $-V_{cc}$  não aparecem nos esquemas elétricos!

# Amplificador em configuração de malha aberta



Malha aberta: é uma configuração que não apresenta retorno da saída à sua entrada.

O ganho do amp-op de malha aberta geralmente excede 10.000

# Características Básicas do AmpOp

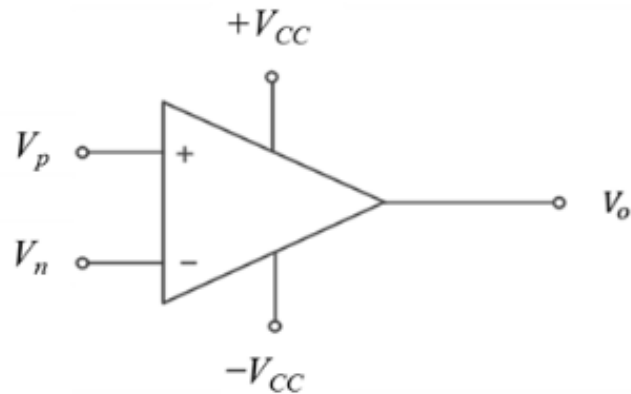
- Ganho ( $A$ ) em malha aberta muito elevado (da ordem de  $10^4$  a  $10^6$  em DC):

$$A = \frac{v_o}{(v_p - v_n)}$$

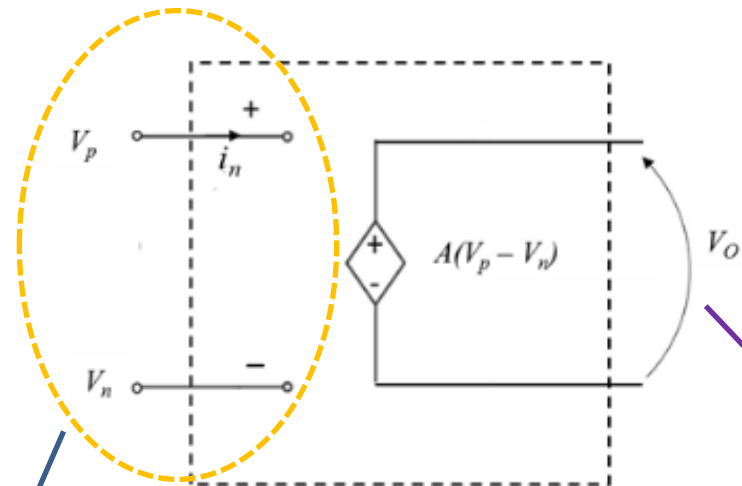
- Impedância de entrada ( $Z_{in} \rightarrow \infty$ ) (modelo ideal)
  - $\Rightarrow i_p$  (corrente na entrada não inversora) = 0
  - $\Rightarrow i_n$  (corrente na entrada inversora) = 0
- Impedância de saída ( $Z_{out} \rightarrow 0$ ) (modelo ideal)



# Modelo Equivalente do AmpOp



(a) Representação esquemática do AmpOp



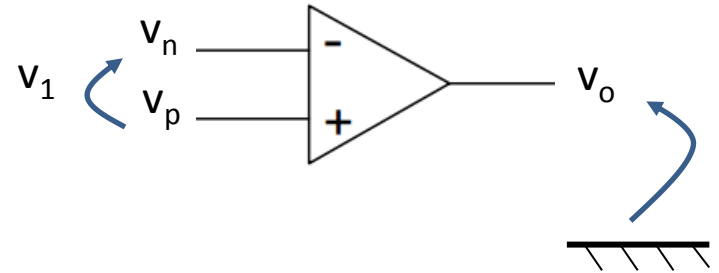
(b) Modelo Equivalente do AmpOp utilizando gerador vinculado

$$\left. \begin{aligned} Z_{in} &\rightarrow \infty \\ i_p &= 0 \\ i_n &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$v_o = A \cdot (v_p - v_n)$$

# Condição de operação do AmpOp em malha aberta

Considere no exemplo  
que:  $v_1 = v_n - v_p$



**Operação na região linear  
(ou região sem saturação):**

$$v_o = A(v_p - v_n)$$

$$v_o = -A(-v_p + v_n)$$

$$v_o = -A v_1$$

$A \rightarrow \infty$ ;  $v_o = \text{valor mensurável e } < V_{CC}$

$$\rightarrow v_1 \approx 0; \rightarrow v_p \approx v_n$$

**Fora da região linear  
(limite em que a tensão de  
saída satura):**

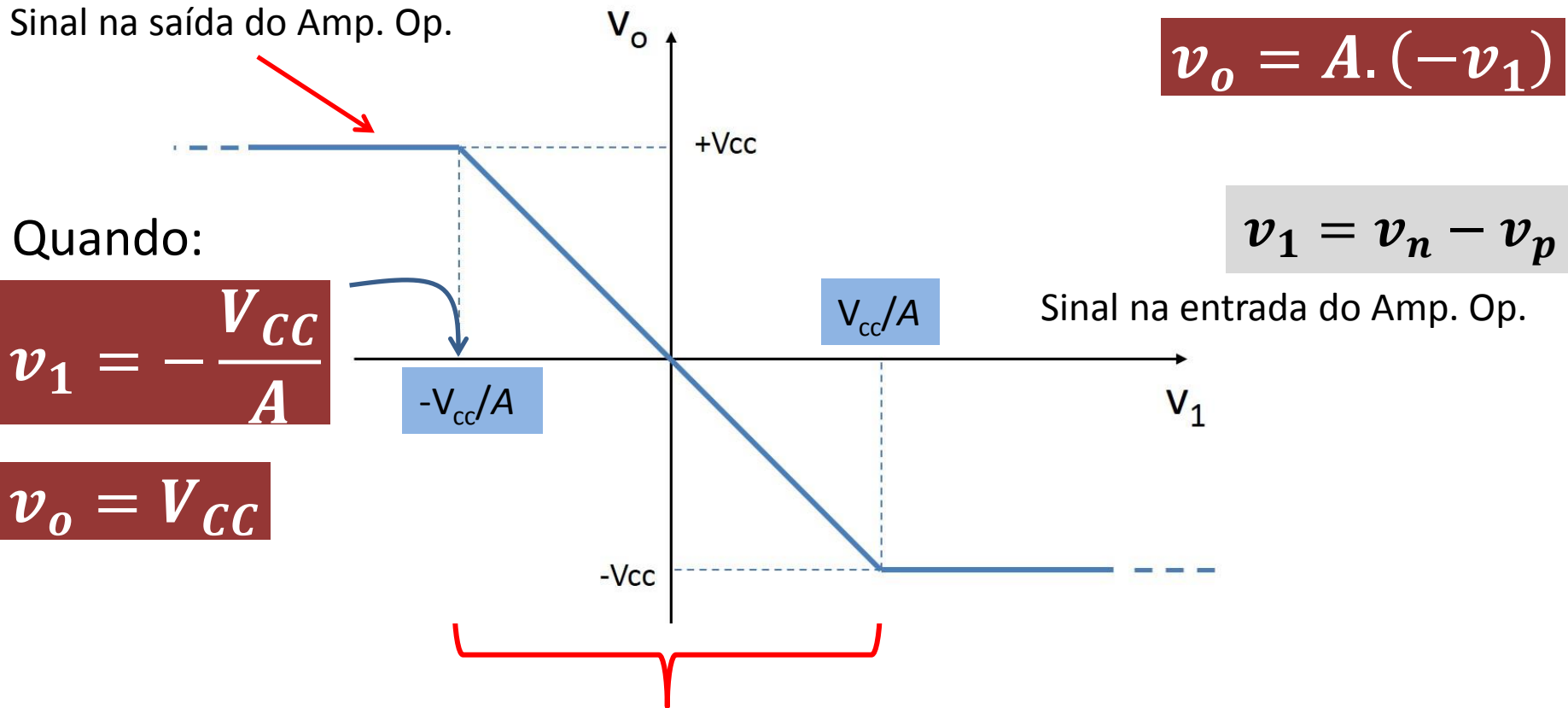
$$v_o = +V_{CC} \text{ ou } \dots$$

$$v_o = -V_{CC}$$

**ou seja, Amp. Op. satura**

# Resposta do AmpOp em malha aberta

Sinal na saída do Amp. Op.



Para o Amp.Op. trabalhar na região linear,  $-V_{CC}/A < v_1 < V_{CC}/A$

Exemplo: Se  $V_{CC} = 15 \text{ V}$  e  $A = 10^4$ ,  $v_1 < 1,5 \text{ mV} \Rightarrow v_p \approx v_n$

# Curto Virtual - AmpOp

Para o Amp.Op. operar na região linear:

$$v_p \approx v_n$$

→ ou seja, nesta condição há um “**curto-circuito virtual**”!

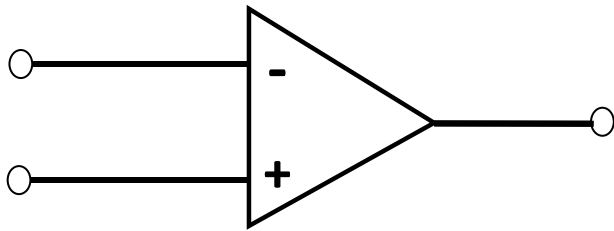
No entanto, temos que:

$$Z_{in} \rightarrow \infty;$$

→ conclusão:

$$i_p = i_n = 0$$

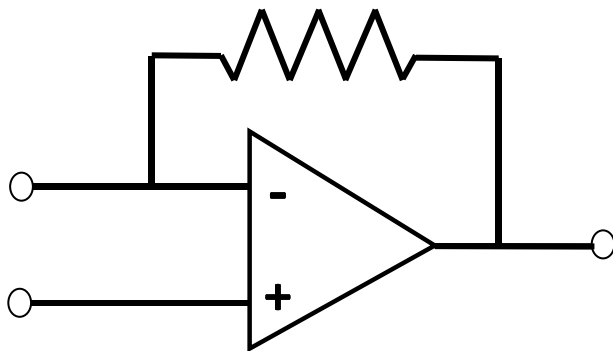
# Amplificador em configuração de malha aberta



Malha aberta: é uma configuração que não apresenta retorno da saída à sua entrada.

O ganho do amp-op de malha aberta geralmente excede 10.000

# Amplificador em configuração de malha fechada



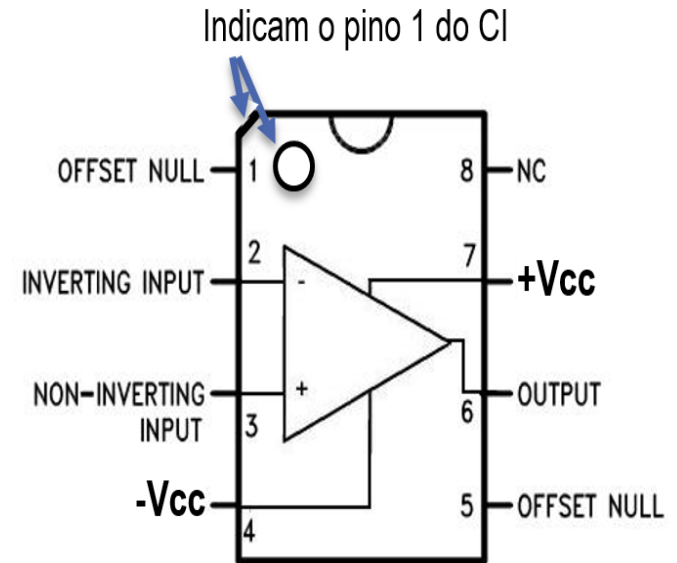
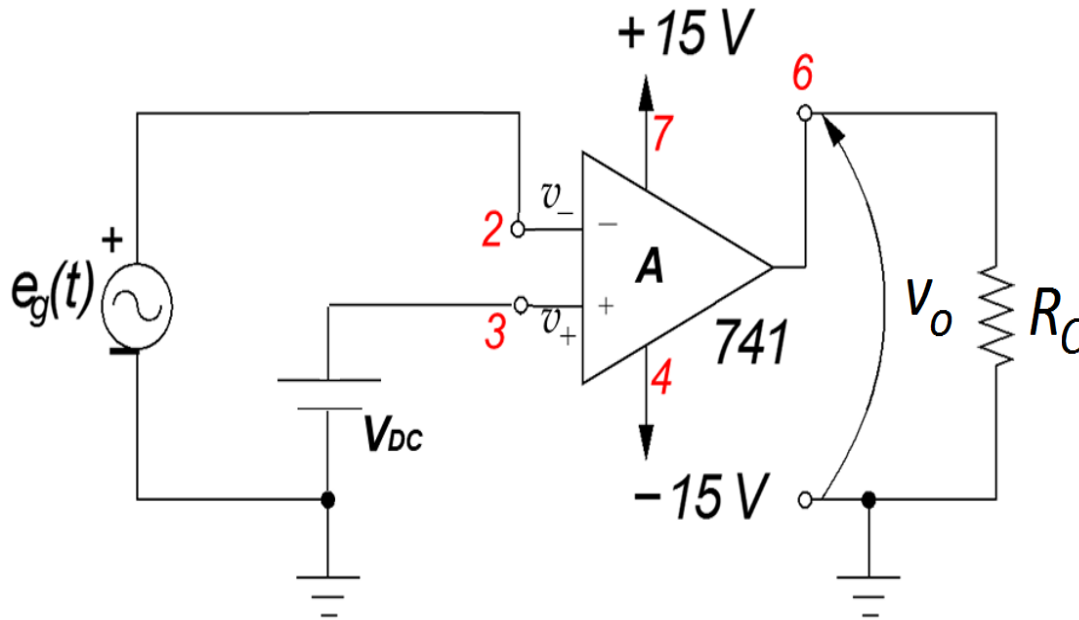
Malha fechada: é uma configuração que tem um caminho de retorno da saída à sua entrada.

O ganho da malha fechada é sempre inferior ao ganho da malha aberta

# Como manter o Amp.Op. operando na região linear?

- **Sabemos que em malha aberta** →  
pequenas variações de tensão entre  $v_p$  e  $v_n$  farão o Amp. Op. saturar para  $+V_{CC}$  ou  $-V_{CC}$ .....
- **Com realimentação negativa:**
  - circuito torna-se estável;
  - ganho ( $A_v$ ) é dependente da razão entre resistência de realimentação ( $R_F$ ) e  $R_1$  da entrada.
  - maior faixa da resposta em frequência.

# Circuito Comparador

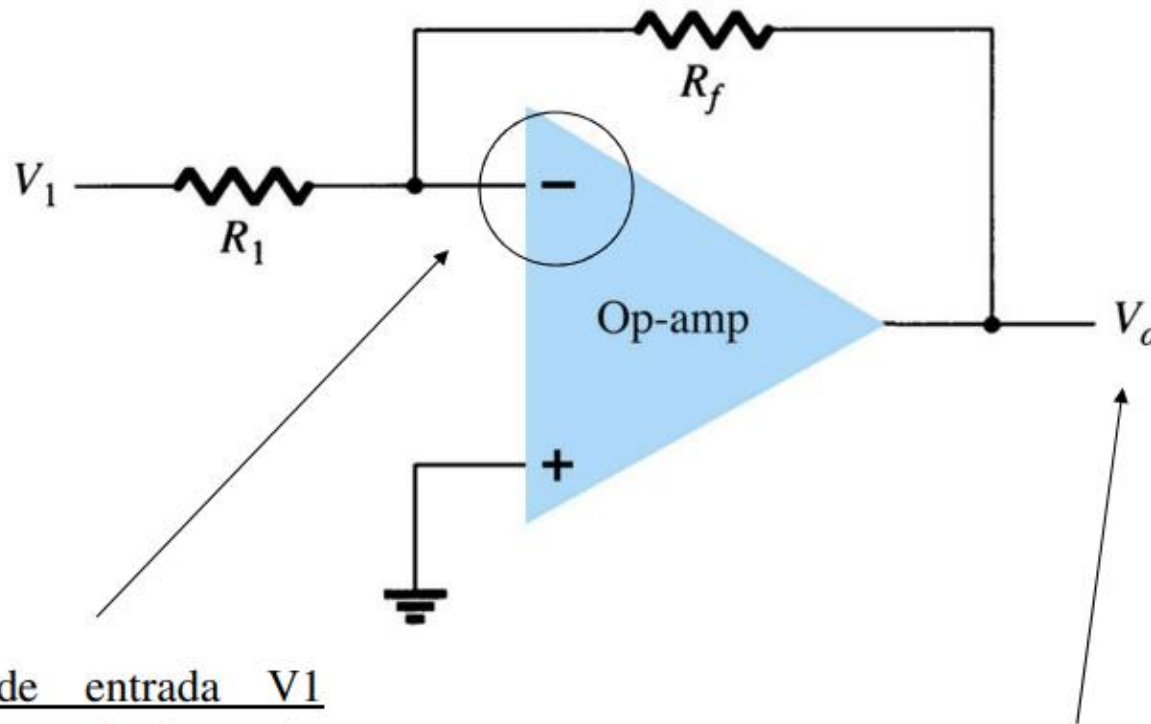


$$v_o(t) = A \cdot (v_p(t) - v_n(t))$$

$$v_o(t) = (V_{DC} - e_g(t)) \cdot A$$

Se:  $A \approx 10.000$ ;  $e_g(t) = 2 \cdot \text{sen}(\omega t)$ ;  $V_{DC} = 1V$ ,  
como fica a tensão  $v_o(t)$ ?

# Circuito Amplificador Inversor



Sinal de entrada  $V_1$  aplicado exclusivamente na entrada inversora.

A saída  $V_o$  será oposta em fase ao sinal de  $V_1$ .

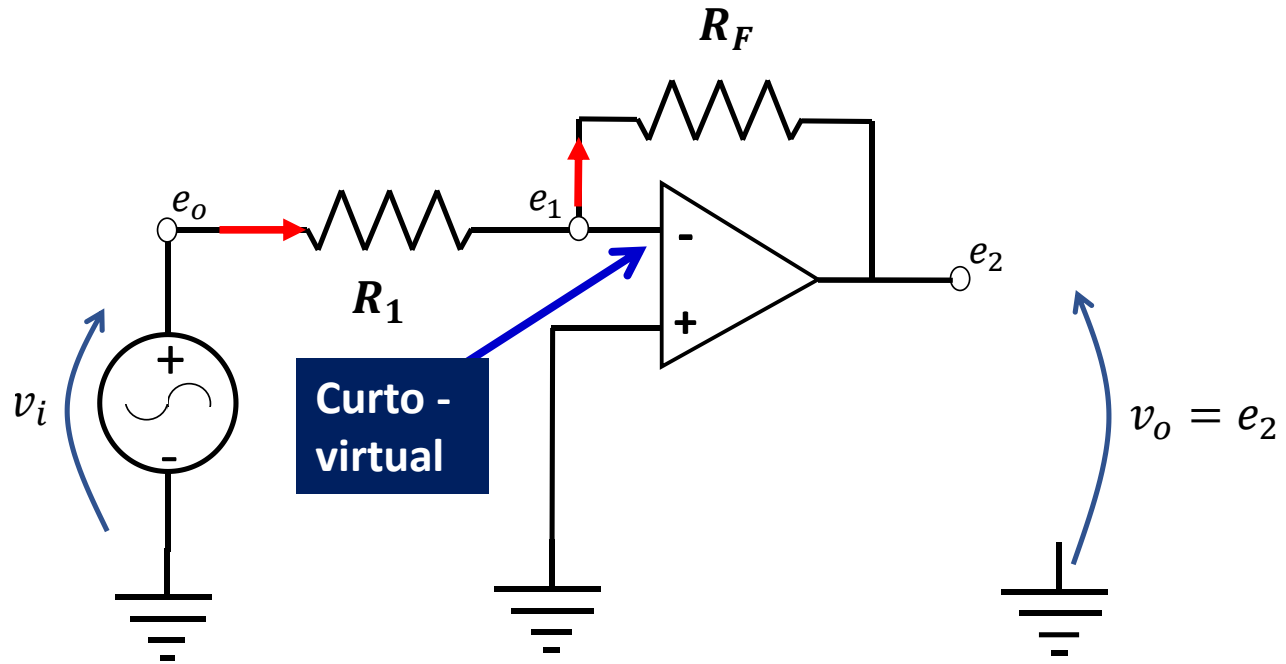


# Circuito Amplificador Inversor

$$e_o = v_i$$

$$e_2 = v_o$$

$$e_1 = 0$$

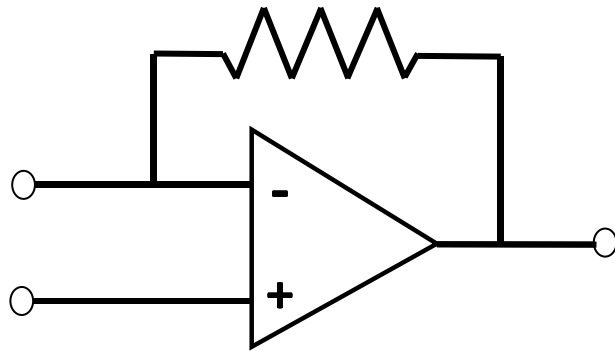


Fazendo-se **Análise Nodal** no nó  $e_1$ , temos:

A saída  $v_o(t)$  será oposta em fase ao sinal de entrada.

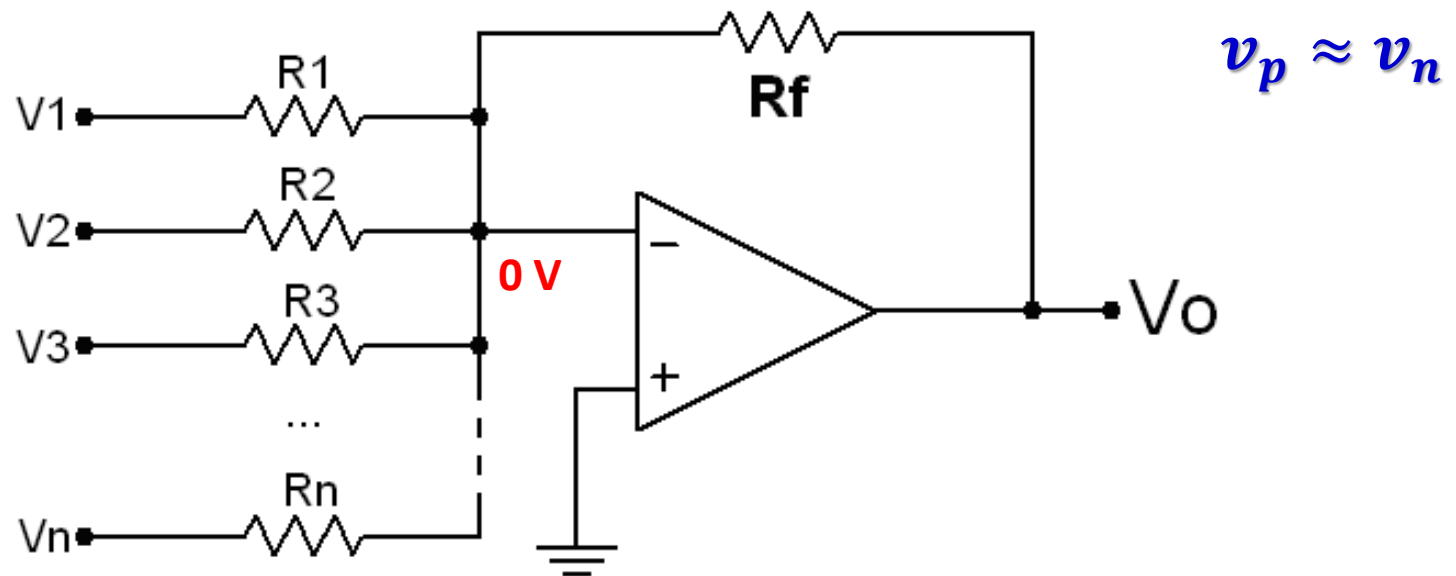
$$\frac{e_1 - e_o}{R_1} + \frac{e_1 - e_2}{R_F} = 0 \longrightarrow \frac{-v_i}{R_1} + \frac{(-v_o)}{R_F} = 0 \longrightarrow v_o = -\frac{R_F}{R_1} v_i$$

- **Com realimentação negativa:**
  - circuito torna-se estável;
  - ganho ( $A_v$ ) é dependente da razão entre resistência de realimentação ( $R_F$ ) e  $R_1$  da entrada.
  - maior faixa da resposta em frequência.



$$v_o = -\frac{R_F}{R_1} v_i$$

# Circuito Amplificador Somador



**A.N.:**

$$\frac{1}{R_1} (0 - V_1) + \frac{1}{R_2} (0 - V_2) + \frac{1}{R_3} (0 - V_3) + \dots + \frac{1}{R_N} (0 - V_4) + \frac{1}{R_F} (0 - V_O) = 0$$

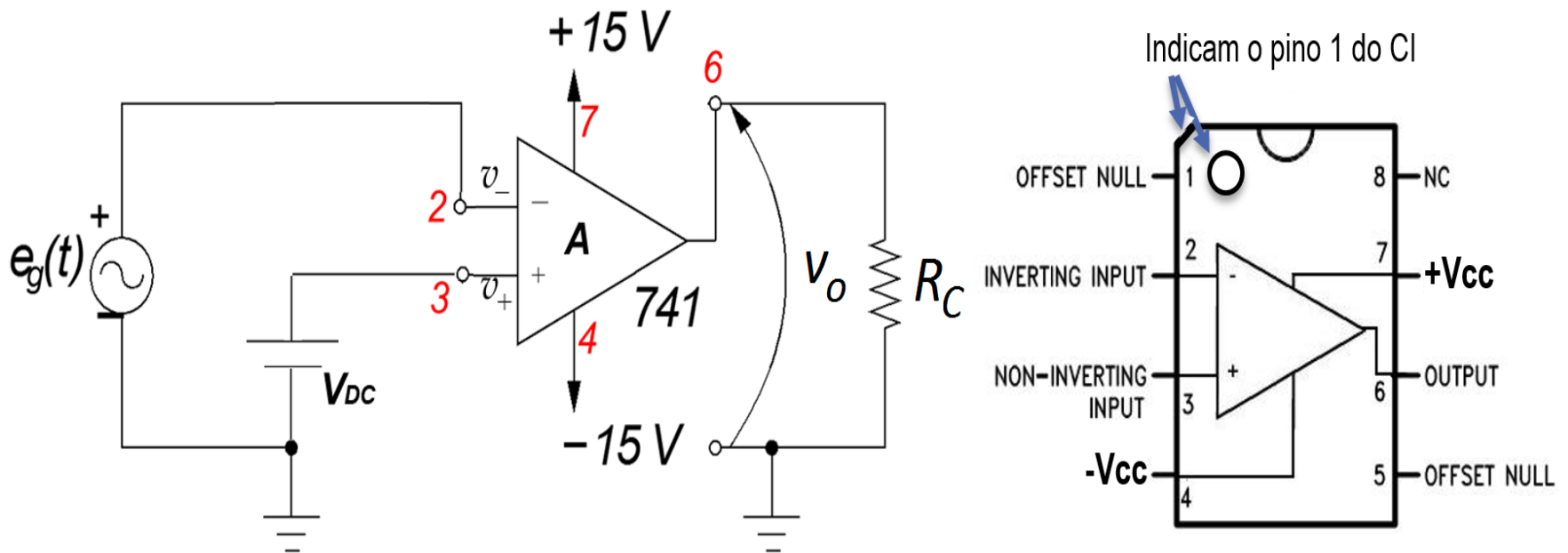
$$V_O = - \left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 \dots + \frac{R_F}{R_N} V_N \right)$$

# Parte experimental

Vamos, juntos, montar o circuito comparador indicado na Figura 1 do seu guia experimental:

1. Ajuste as tensões da fonte de tensão DC para  $-15\text{ V}$  e  $15\text{ V}$  (limite a corrente das fontes DC para  $100\text{ mA}$ ); a fonte de  $6\text{ V}$  deve ser programada para fornecer  $1\text{ V}$  (com limite de corrente de  $100\text{ mA}$ ). **Manter em output off.**
2. A carcaça da fonte ( $\perp$ ) deve estar em curto com o terminal negativo da fonte de  $6\text{ V}$  e em curto com o terminal "COM" das fontes de  $\pm 25\text{ V}$ .
3. Ajuste o gerador de funções para fornecer um sinal DC (em high Z)
4. Coloque corretamente o amp op 741 no protoboard, tomando o cuidado de não curto-circuitar seus terminais na mesma linha.

# Montagem do circuito no protoboard



Medir, com o osciloscópio, o sinal  $v_o(t)$  e  $e_g(t)$  e fazer as discussões sobre o resultado encontrado