

ENG1027: Instrumentação Eletrônica



3.1) Amplificação

⌘ Amplificadores:

- Dispositivo ou circuito que aumenta a **amplitude** (ou **magnitude**) de um sinal elétrico.
- Este sinal pode ser de **tensão** ou de **corrente**
- **4 tipos** de amplificador:

☒ tensão:

$$v_{out} = A_v v_{in}$$

☒ corrente:

$$i_{out} = A_i i_{in}$$

☒ transcondutância:

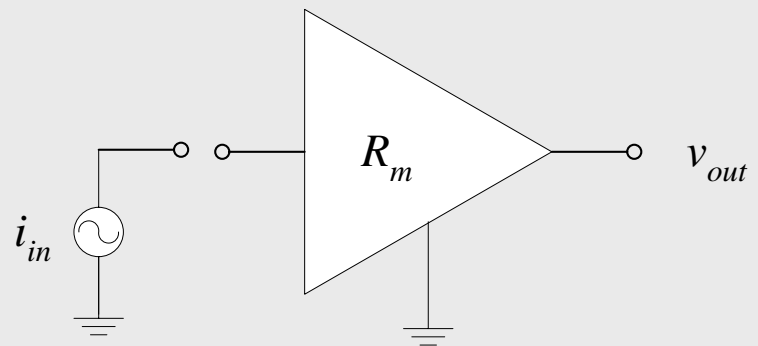
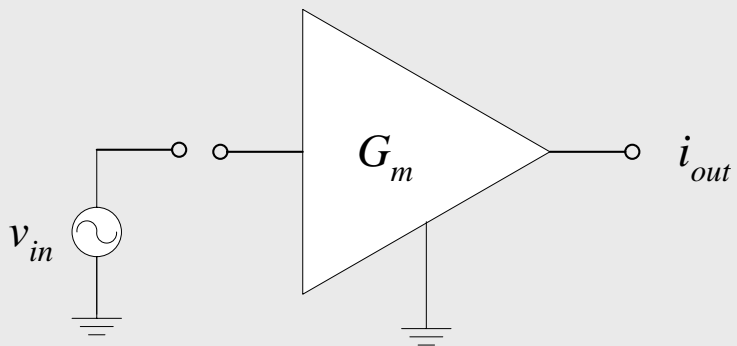
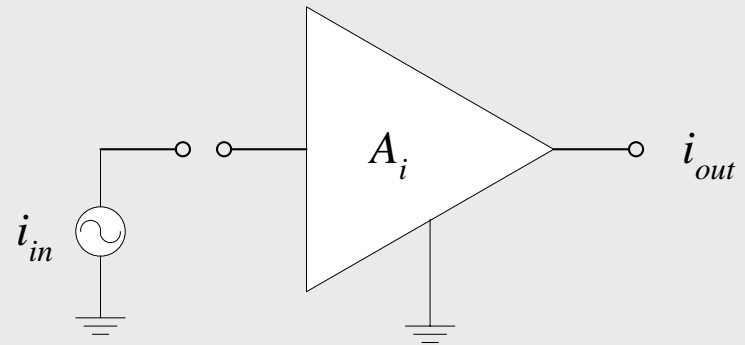
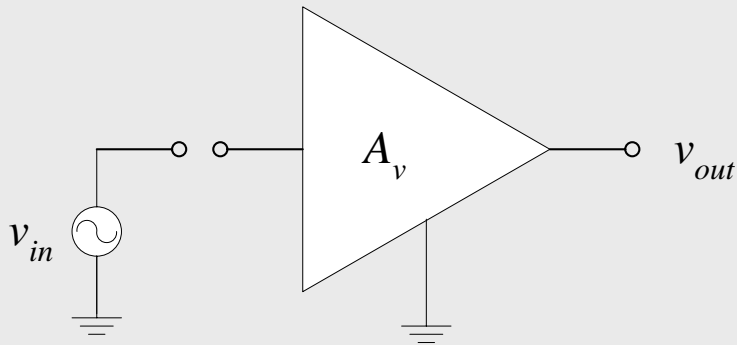
$$i_{out} = G_m v_{in}$$

☒ transimpedância:

$$v_{out} = R_m i_{in}$$

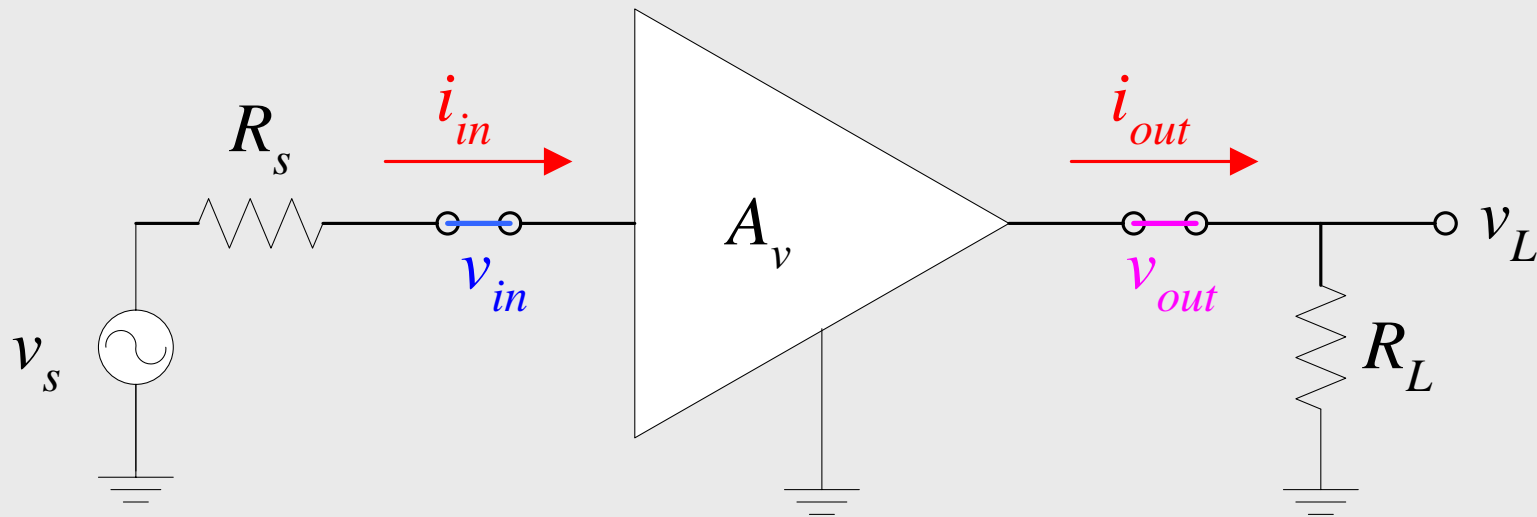
3.1) Amplificação

⌘ Amplificadores:



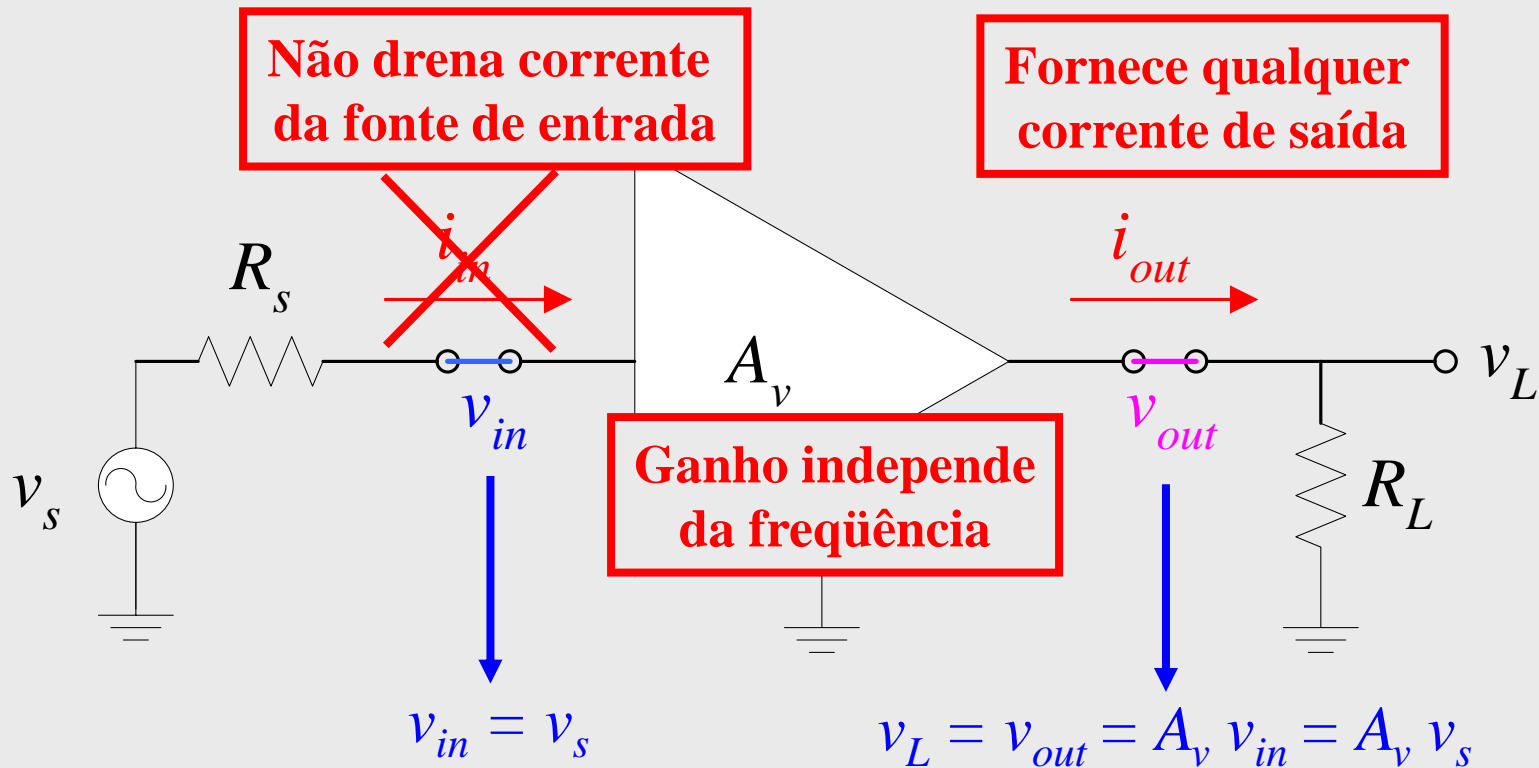
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Tensão na Prática:



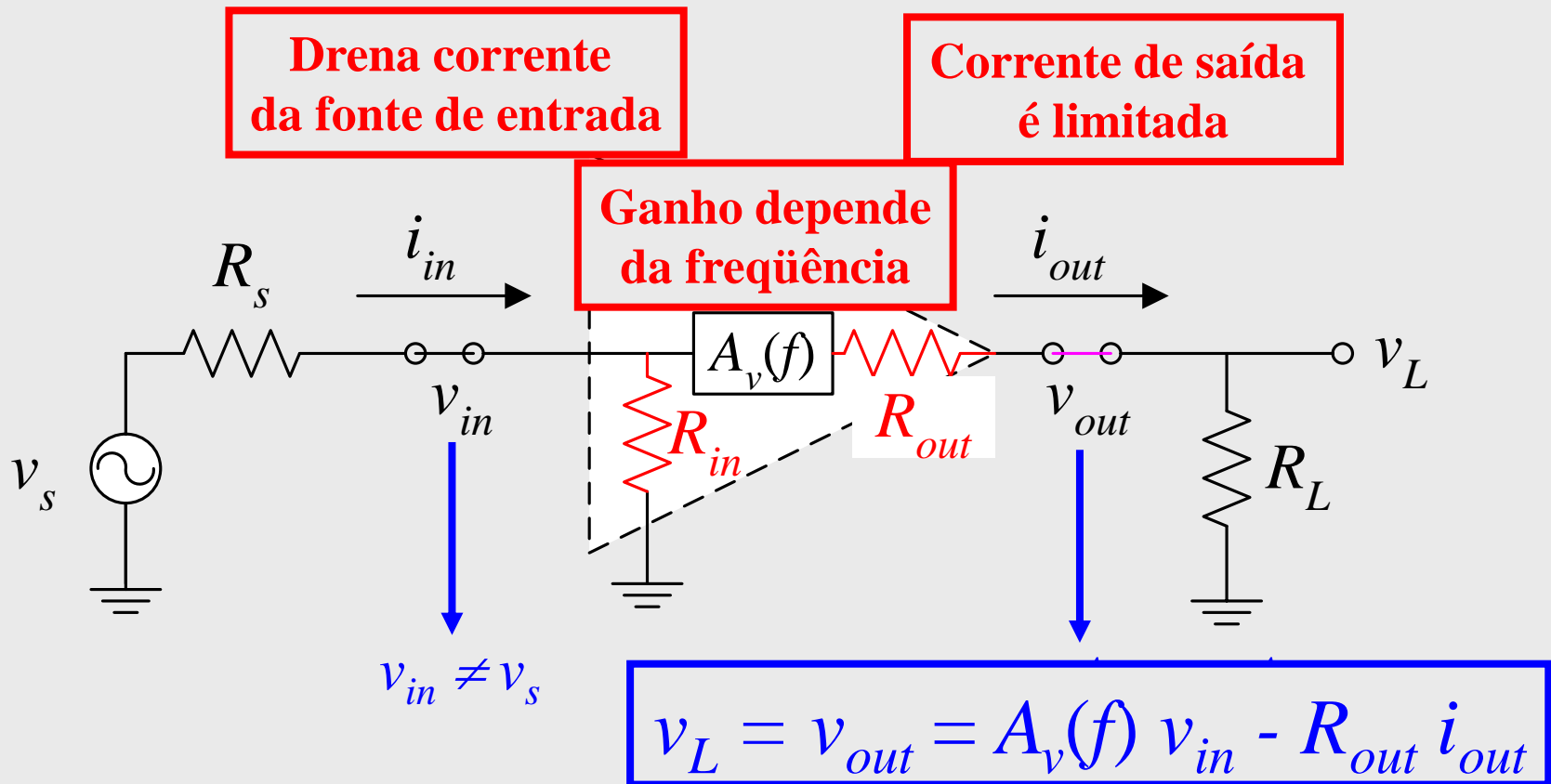
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Tensão Ideal:



3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Tensão Real:



3.1) Amplificação

Ideal

⌘ Amplificador de Tensão Ideal

- Não drena corrente da fonte de entrada
 - ⊗ $R_{in} = \infty$
- Capaz de fornecer qualquer corrente de saída
 - ⊗ $R_{out} = 0$
- Ganho **Independente** da Freqüência

3.1) Amplificação

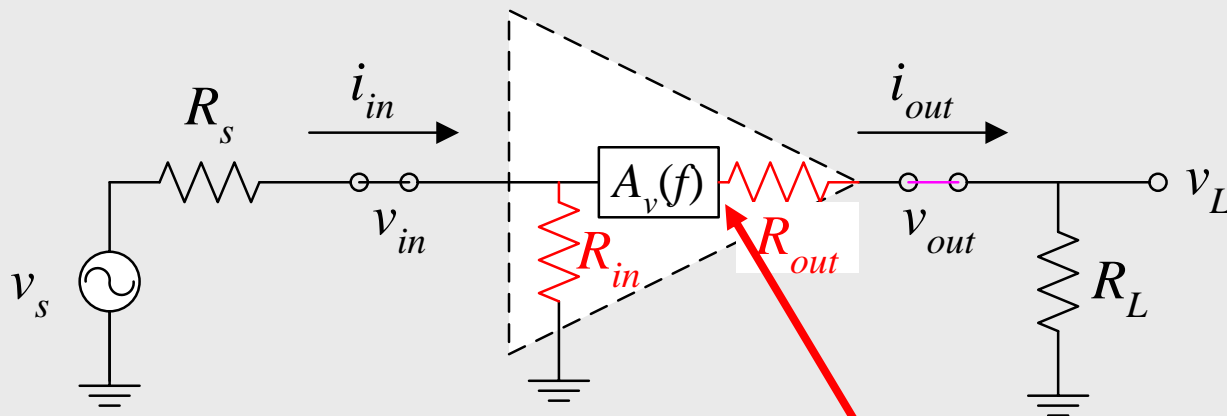
Ideal

⌘ Amplificador de Tensão Real

- Drena corrente da fonte de entrada
 - ⊗ R_{in} finito
- Capaz de fornecer qualquer corrente de saída
 - ⊗ $R_{out} \neq 0$
- Ganho **Depende** da Freqüência

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Tensão Real

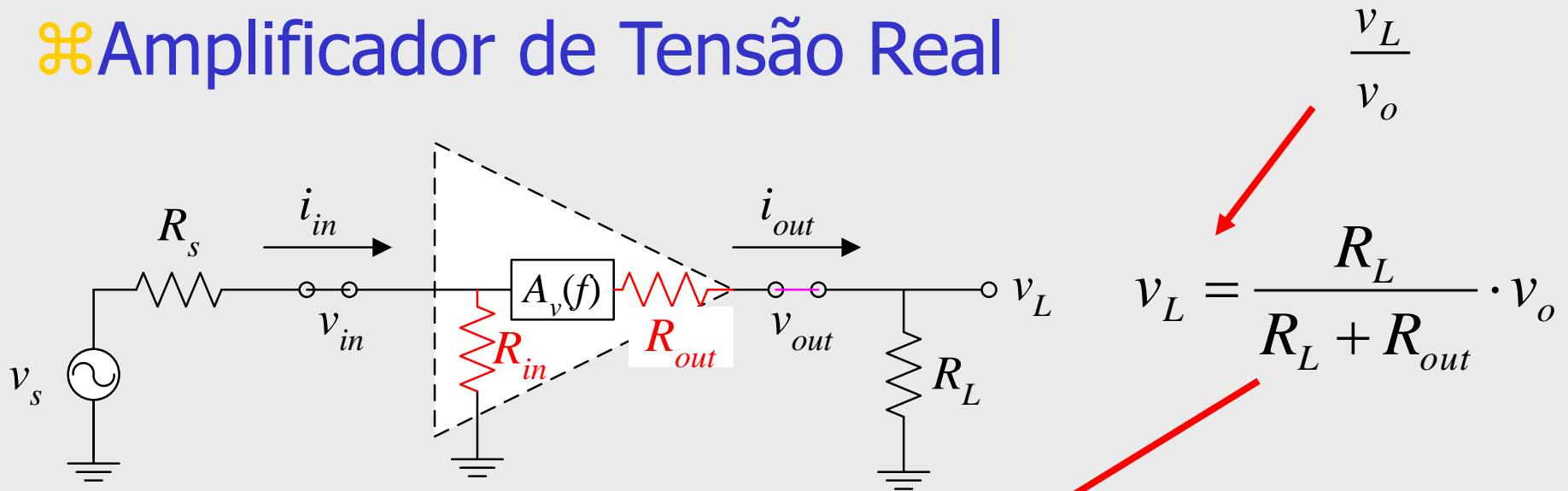


$$\frac{v_{in}}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \cdot v_s$$

$$v_o = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \cdot v_s \cdot A_v(f)$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Tensão Real

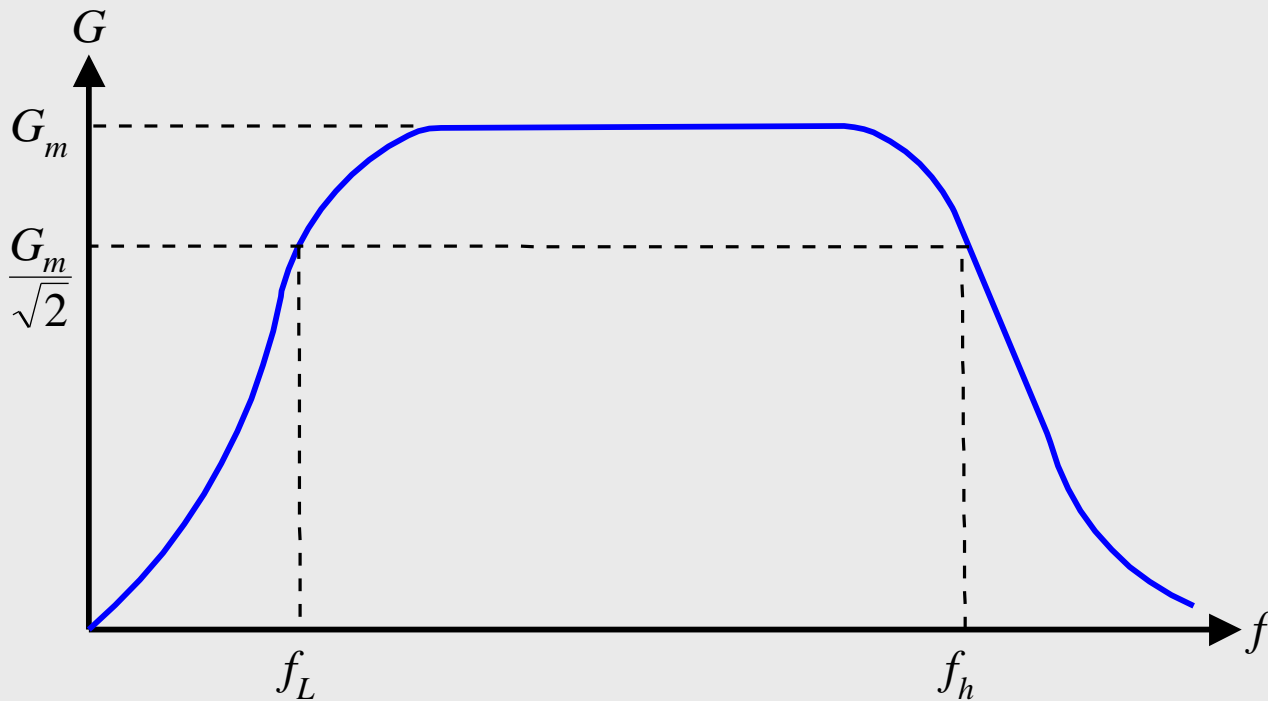


$$\frac{v_L}{v_o} = \frac{R_L}{R_L + R_{out}} \cdot v_o$$

$$v_L = \frac{R_L}{R_L + R_{out}} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \cdot v_s \cdot A_v(f)$$

3.1) Amplificação

⌘ Resposta em frequência típica:



3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional:

- Circuitos de amplificação **muito complexos**.
- Apresentados sob a forma de **circuitos integrados**.
- Compostos por **dezenas de transistores**.
- Projetados para realizar certas **operações matemáticas**, como adição, subtração, multiplicação, diferenciação, integração, etc
- Uso é **muito simples** em comparação com os **transistores**.

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional:

➤ Projetados para se aproximarem de um **amplificador de tensão ideal**:

☒ Impedância de entrada infinita

- $R_{in} = \infty$

☒ Impedância de saída nula

- $R_{out} = 0$

☒ Ganho de tensão infinito

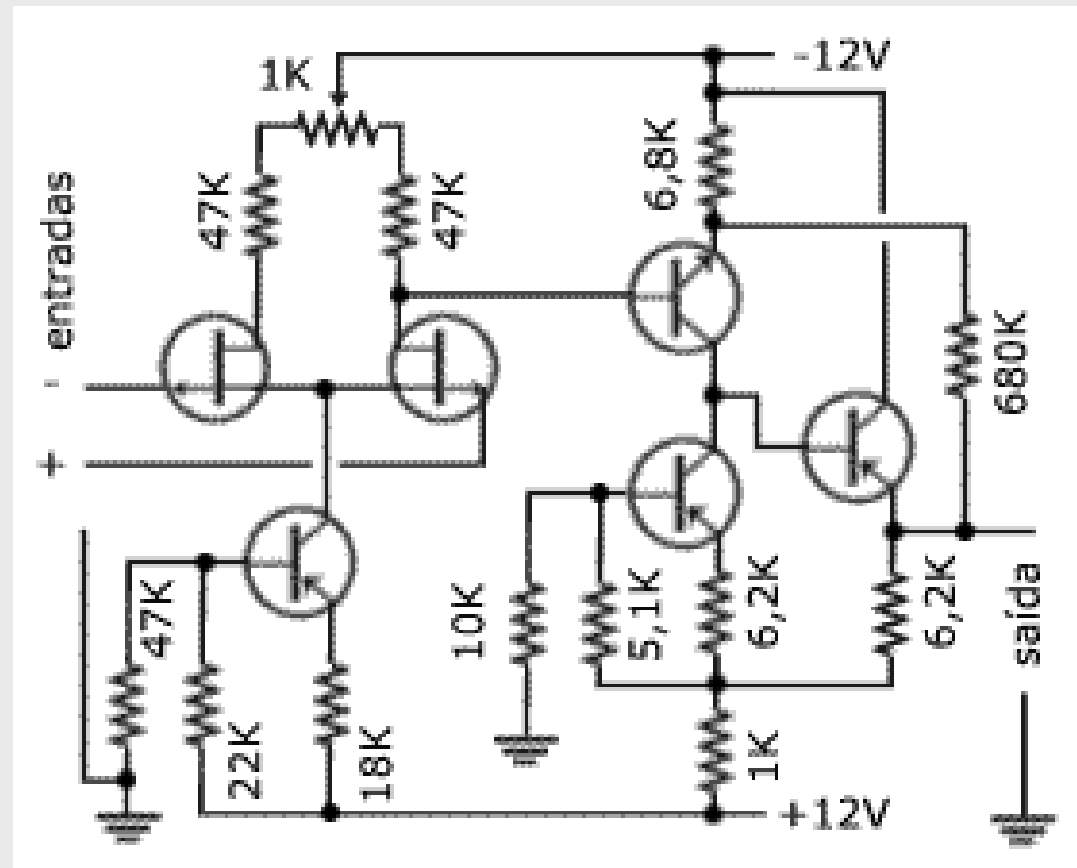
- $A_v = \infty$ (na prática entre 10^4 e 10^9)

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: exemplo simples

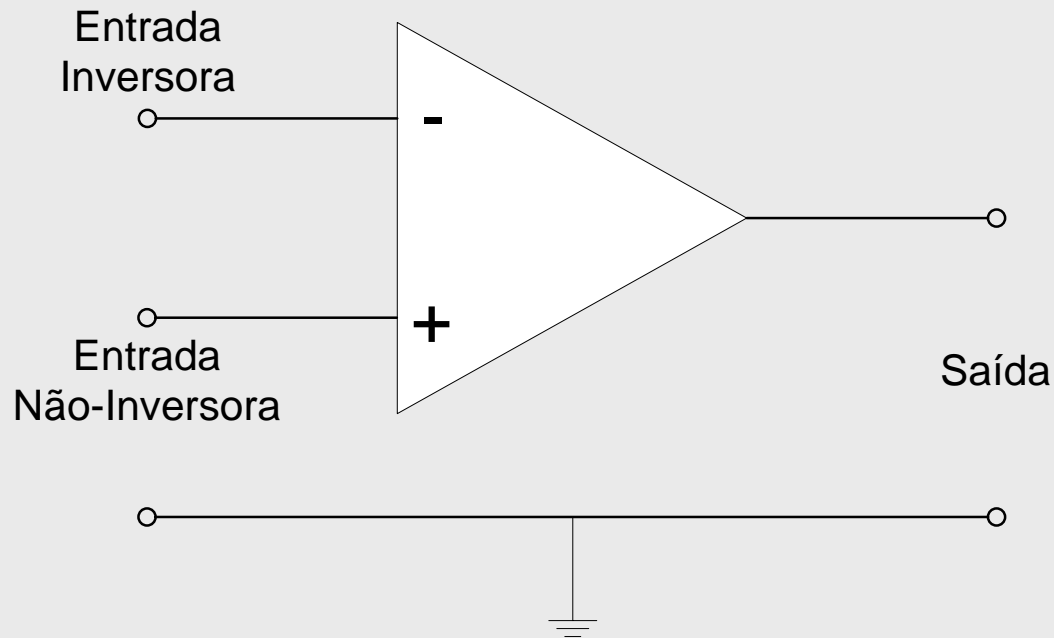
☑ $A_v \sim 100000$

☑ $R_{in} \sim 5 \text{ M}\Omega$



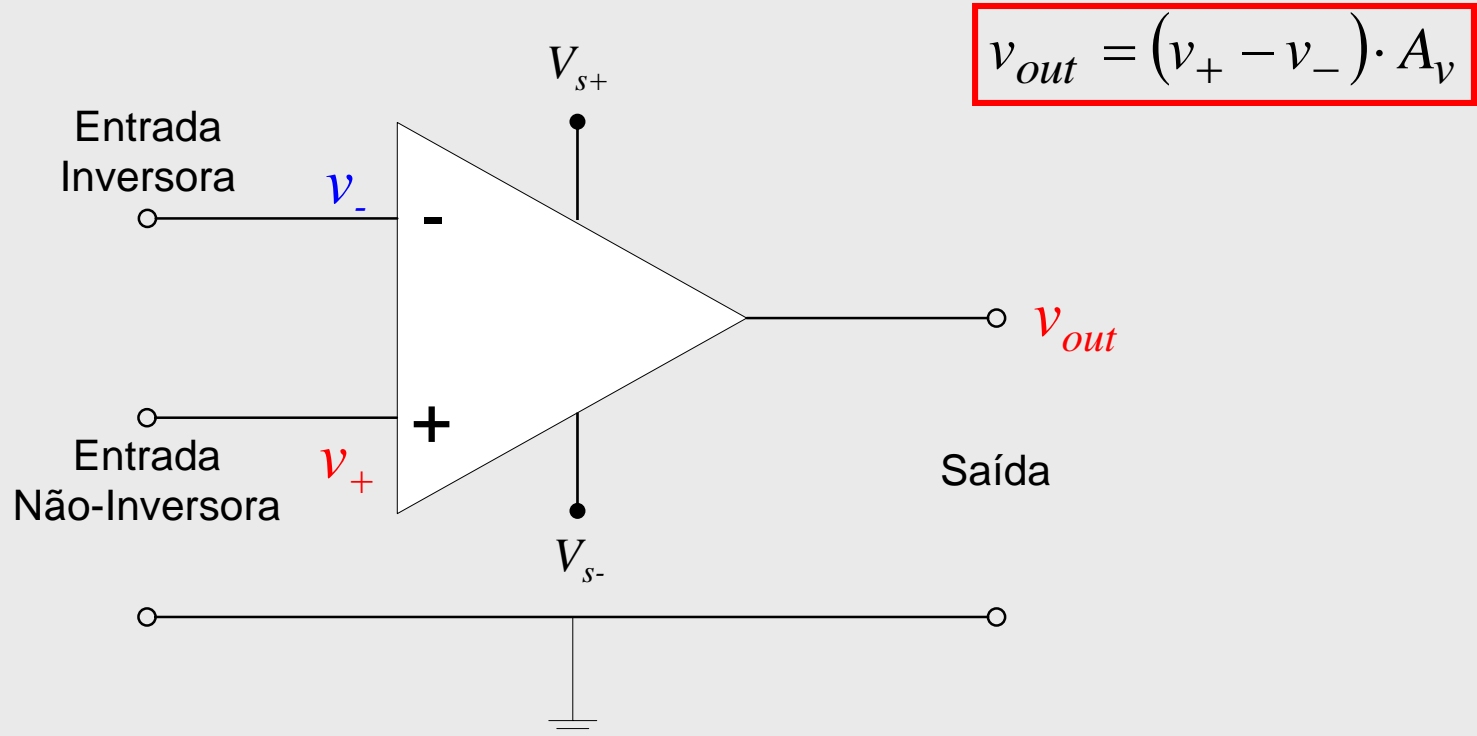
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: símbolo



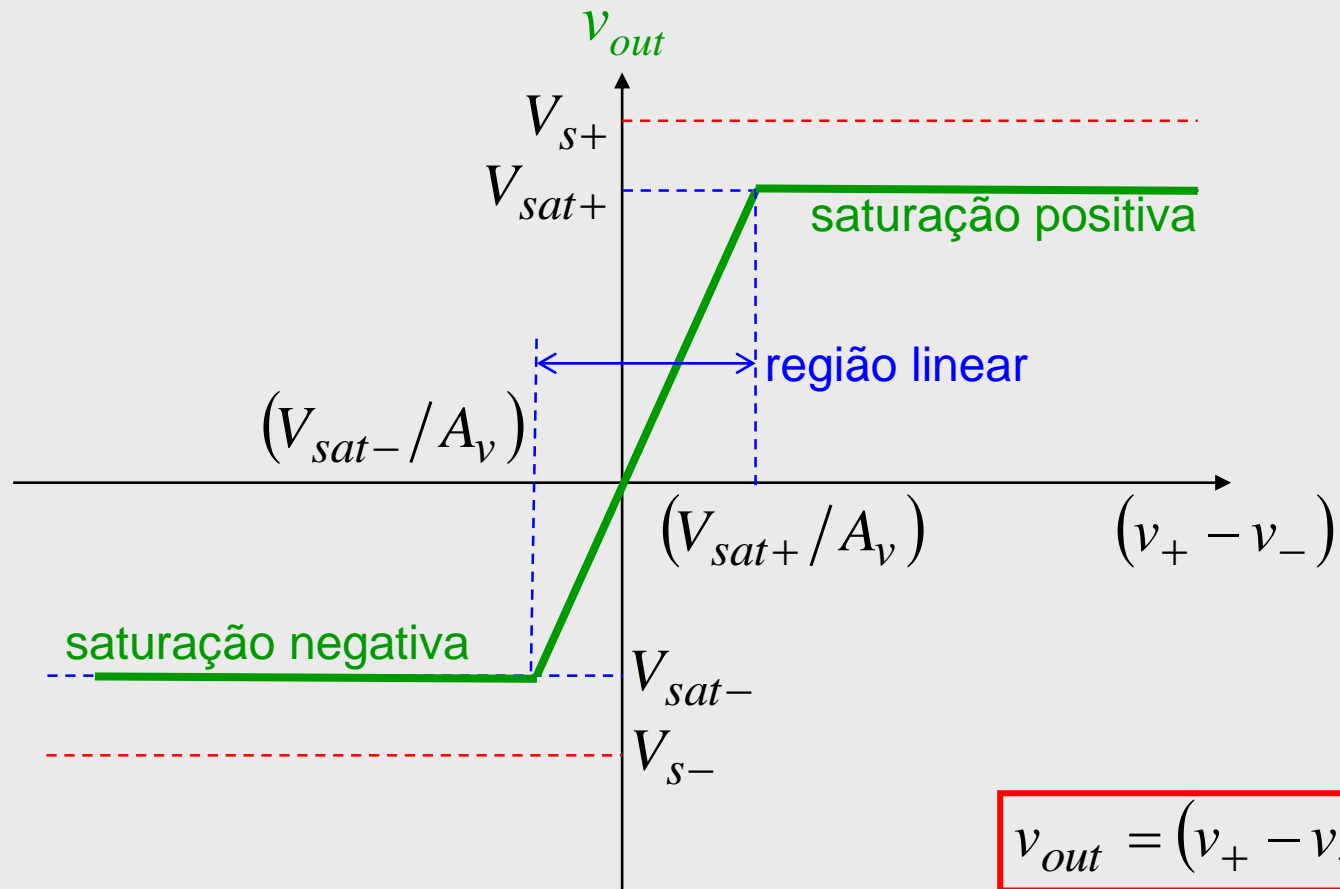
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: símbolo



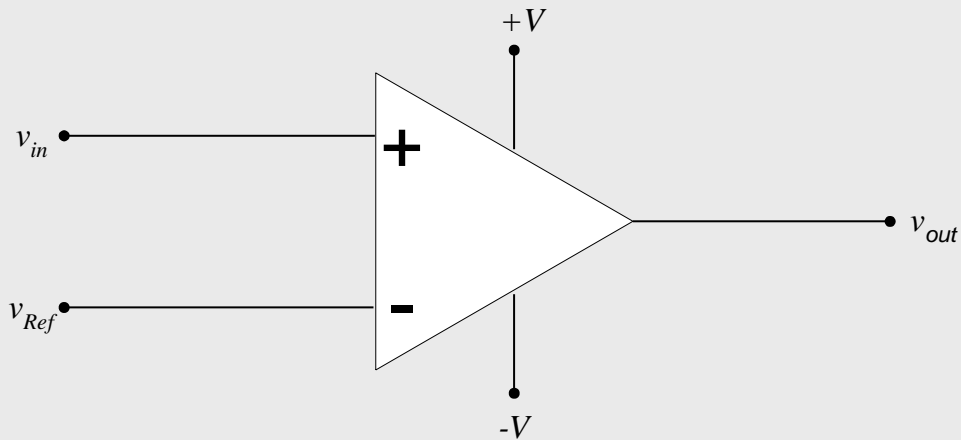
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: curva de transferência de tensão



3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Comparador



$$v_{in} > v_{ref} \longrightarrow v_{out} = +V$$

$$v_{in} < v_{ref} \longrightarrow v_{out} = -V$$

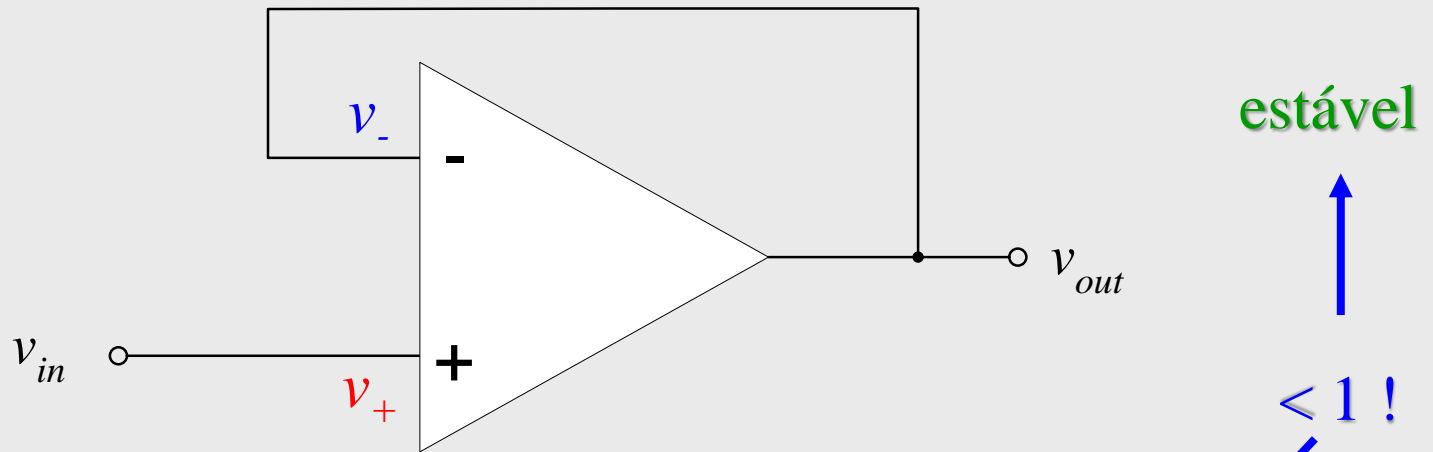
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional Ideal:

- É um amplificador tanto **cc** quanto **ca**.
- **Não há corrente** nos terminais de **entrada**
- A impedância de saída é **zero**
- O ganho é **infinito**
- Quando utilizando **realimentação positiva**, o circuito é **instável (oscilador)** e **não linear**.
- Quando utilizando **realimentação negativa**, o circuito é **estável** e **linear**.

3.1) Amplificação

⌘ Seguidor de Tensão (realimentação negativa):



$$v_{out} = (v_{+} - v_{-}) \cdot A_v \longrightarrow v_{out} = (v_{in} - v_{out}) \cdot A_v$$

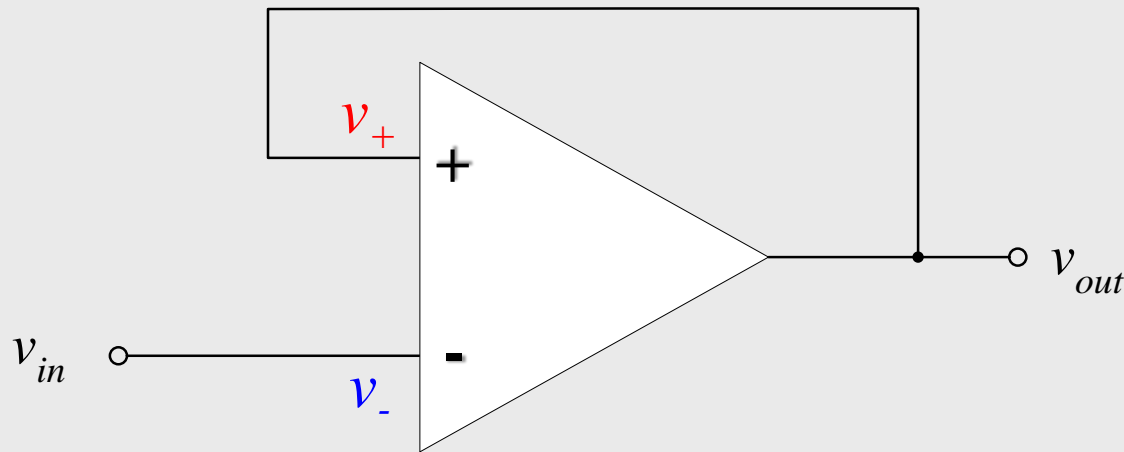
$$v_{out} (1 + A_v) = v_{in} \cdot A_v$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A_v}{1 + A_v} \cong 1$$

$$v_{+} = v_{-}$$

3.1) Amplificação

⌘ Seguidor de Tensão (realimentação positiva):



instável!



> 1 !

$$v_{out} = (v_+ - v_-) \cdot A_v \longrightarrow v_{out} = (v_{out} - v_{in}) \cdot A_v$$

$$v_{out} (A_v - 1) = v_{in} \cdot A_v$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A_v}{A_v - 1} \cong 1$$

$$v_+ = v_-$$

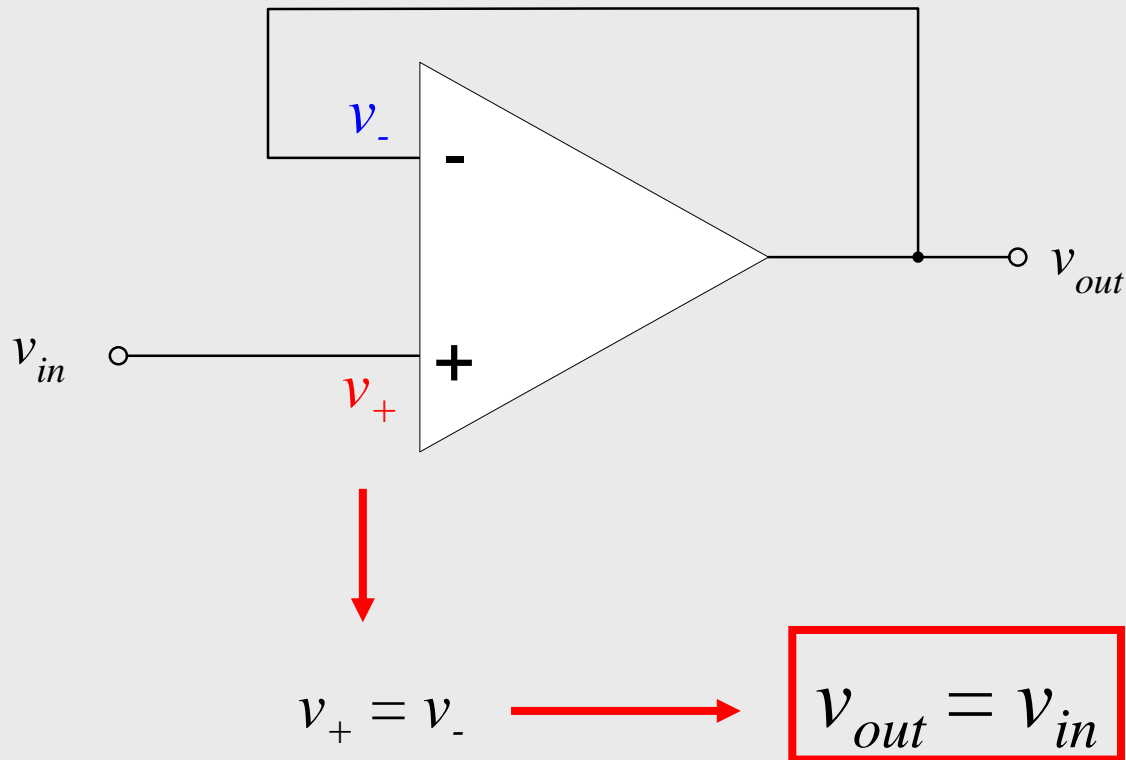
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional Ideal (realimentação negativa):

- Quando utilizando **realimentação negativa**, o circuito é **estável** e **linear**.
- Não há corrente nos terminais de **entrada**
- O ganho é **infinito**
- Para que a saída seja **finita**, as entradas inversora (-) e não-inversora (+) têm aproximadamente a **mesma voltagem**: curto-circuito virtual

3.1) Amplificação

⌘ Seguidor de Tensão:



3.1) Amplificação

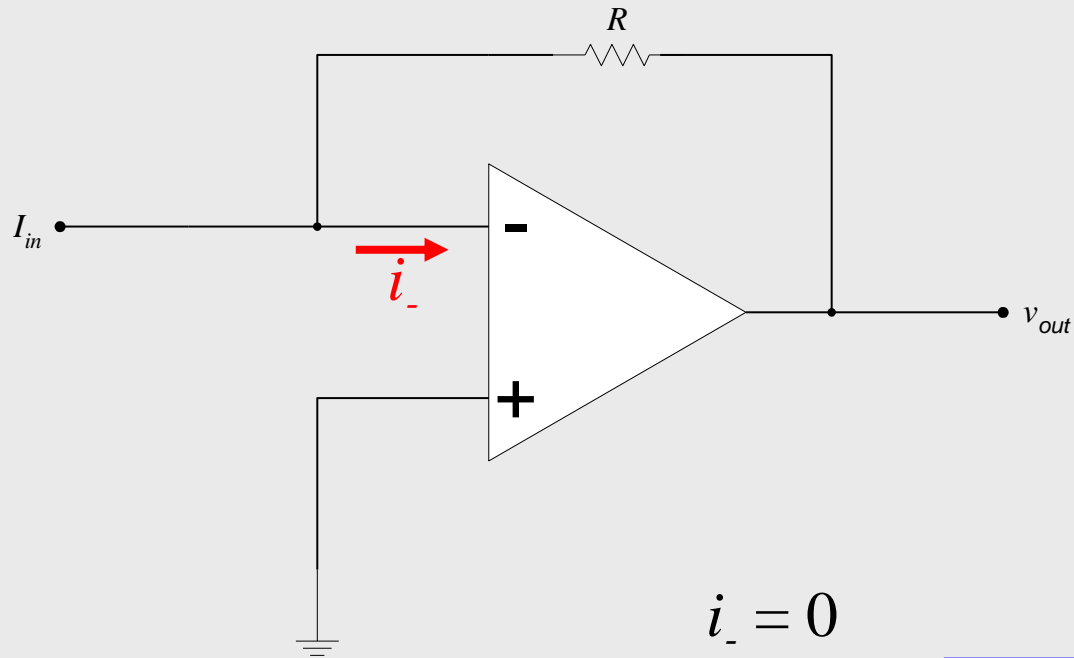
⌘ Seguidor de Tensão:

➤ Funciona como um *buffer ideal*:

- ☒ tensão de saída **igual** à tensão de entrada
- ☒ **impedância de entrada infinita**, não afetando o sinal de entrada
- ☒ impedância de saída **muito baixa**

3.1) Amplificação

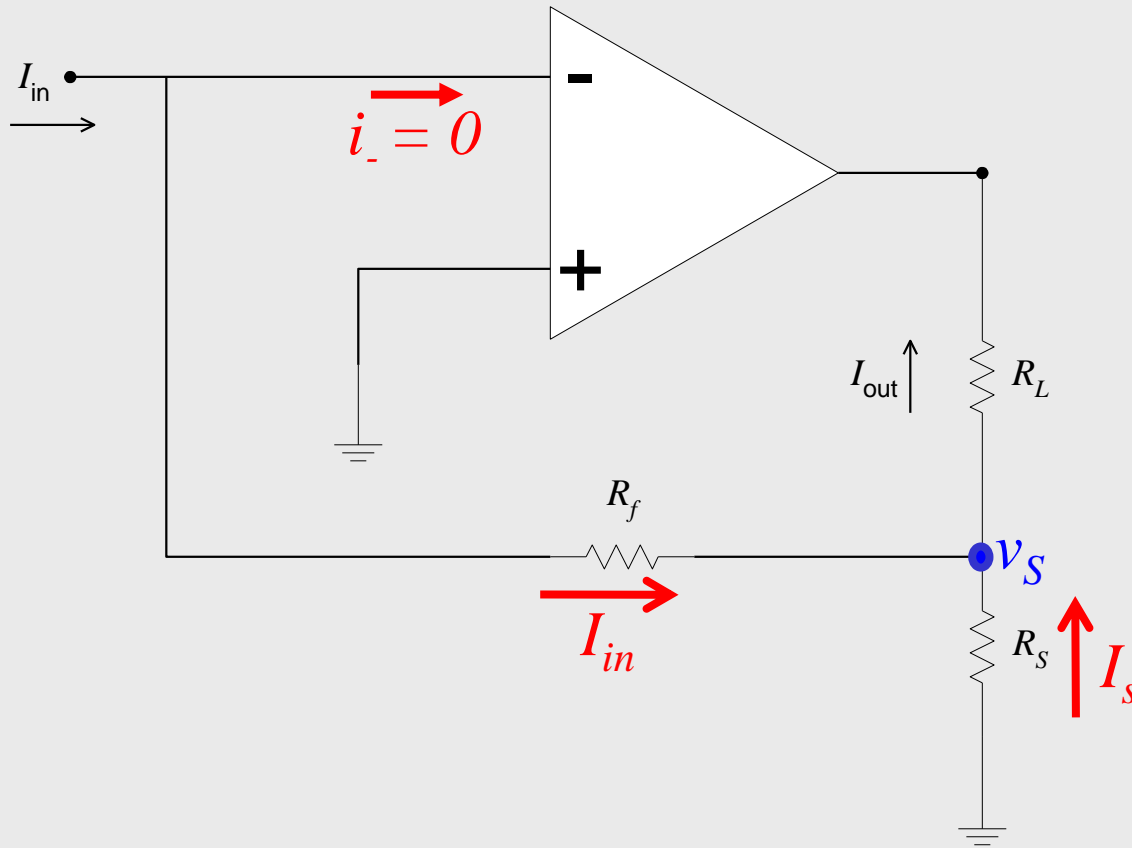
⌘ Amplificador de Transimpedância/Amperímetro:



$$\begin{aligned} i_- &= 0 \\ v_- = v_+ &= 0 \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad v_{out} = -RI_{in}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Corrente:



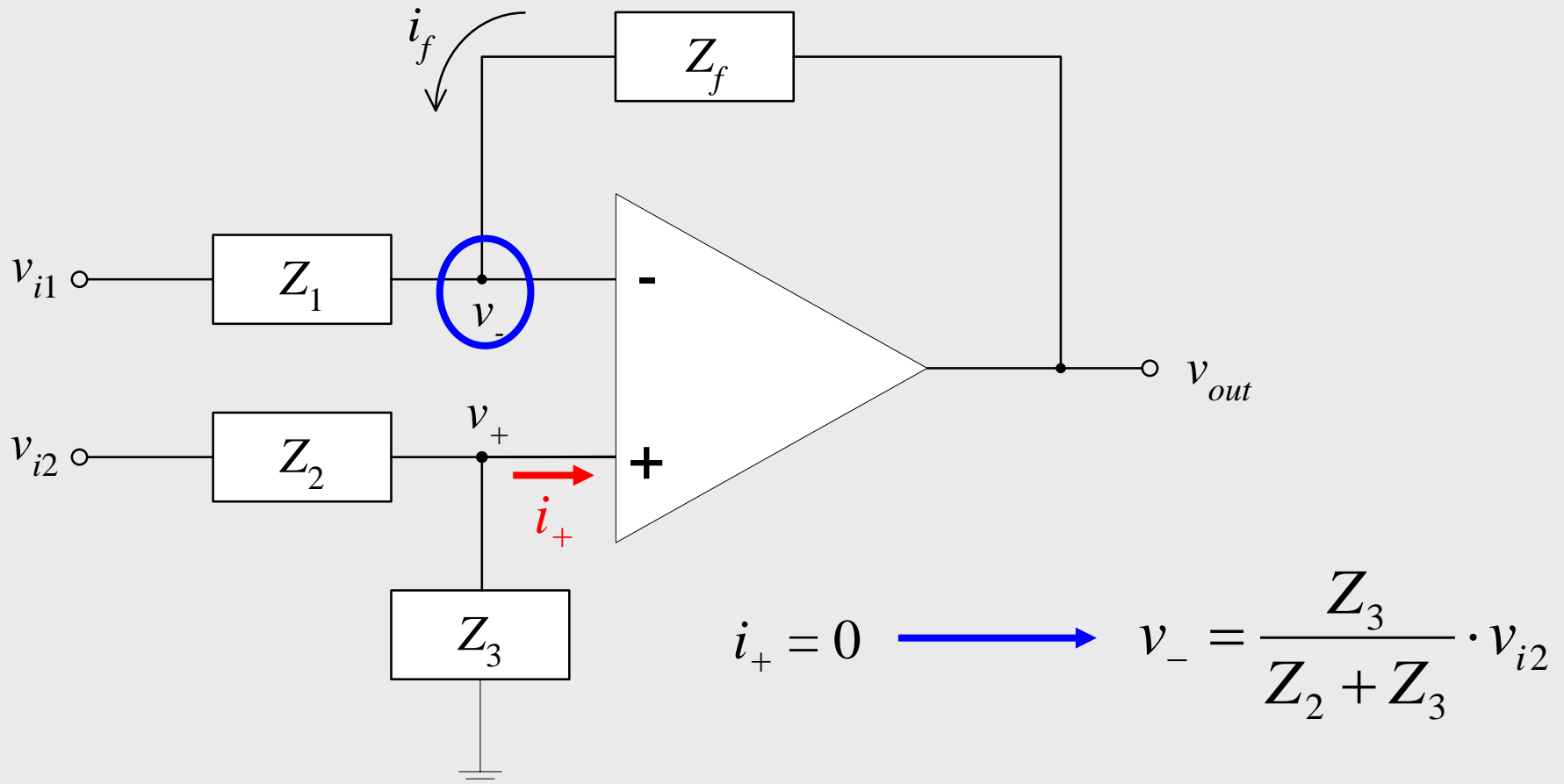
$$v_S = -R_f I_{in}$$

$$I_S = \frac{0 - v_S}{R_S} = \frac{R_f}{R_S} I_{in}$$

$$I_{out} = I_{in} \left(1 + \frac{R_f}{R_S} \right)$$

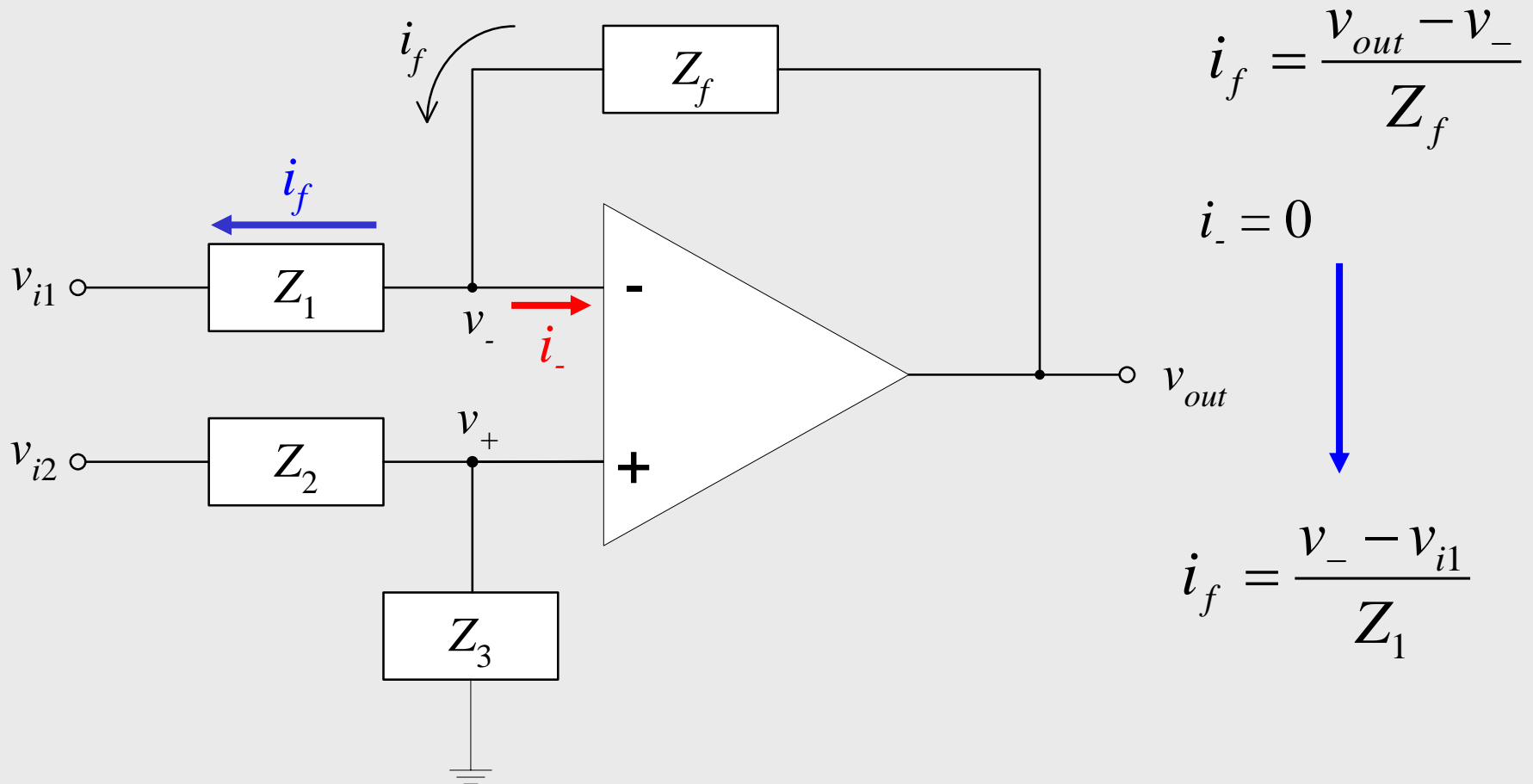
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



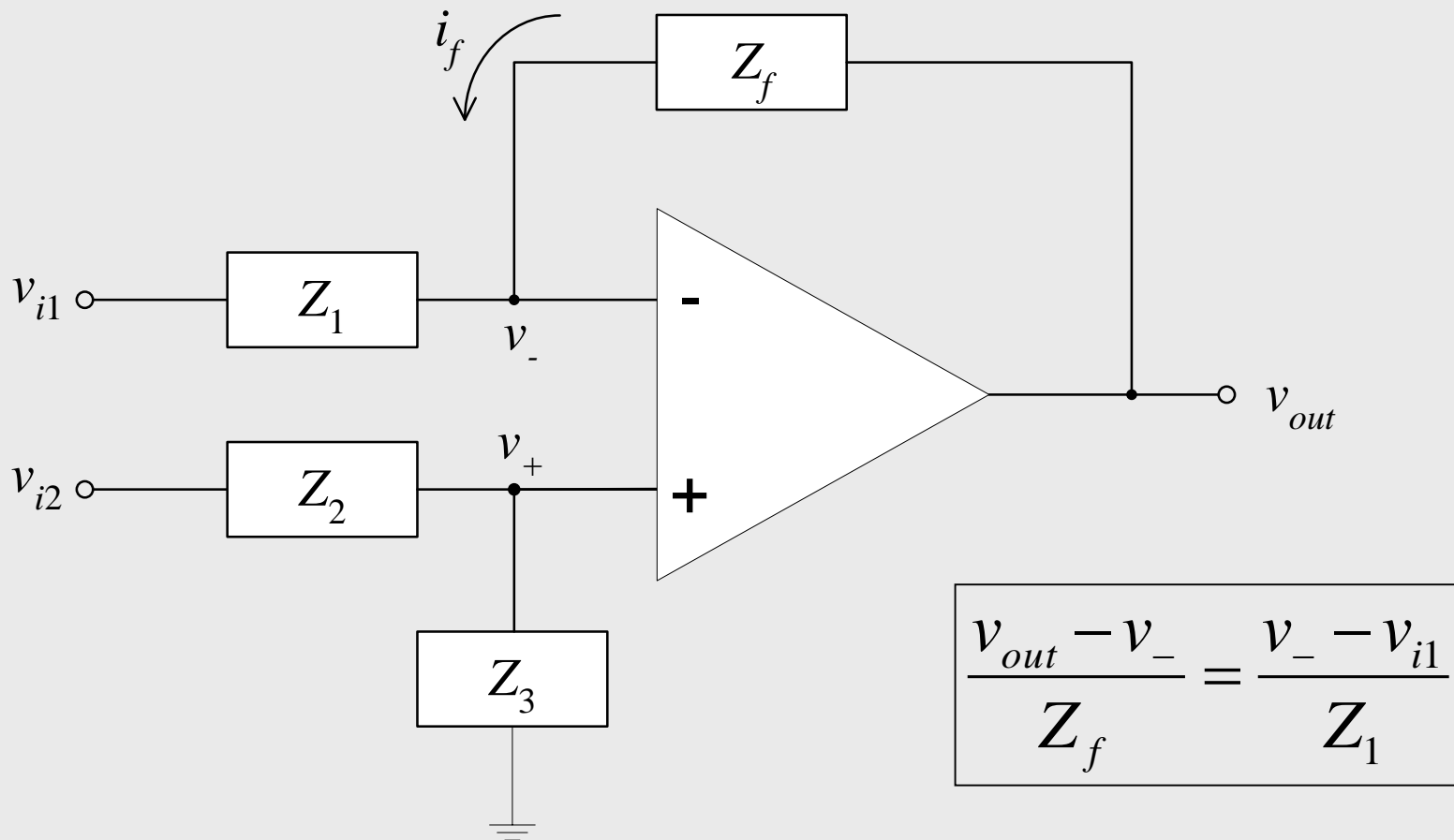
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



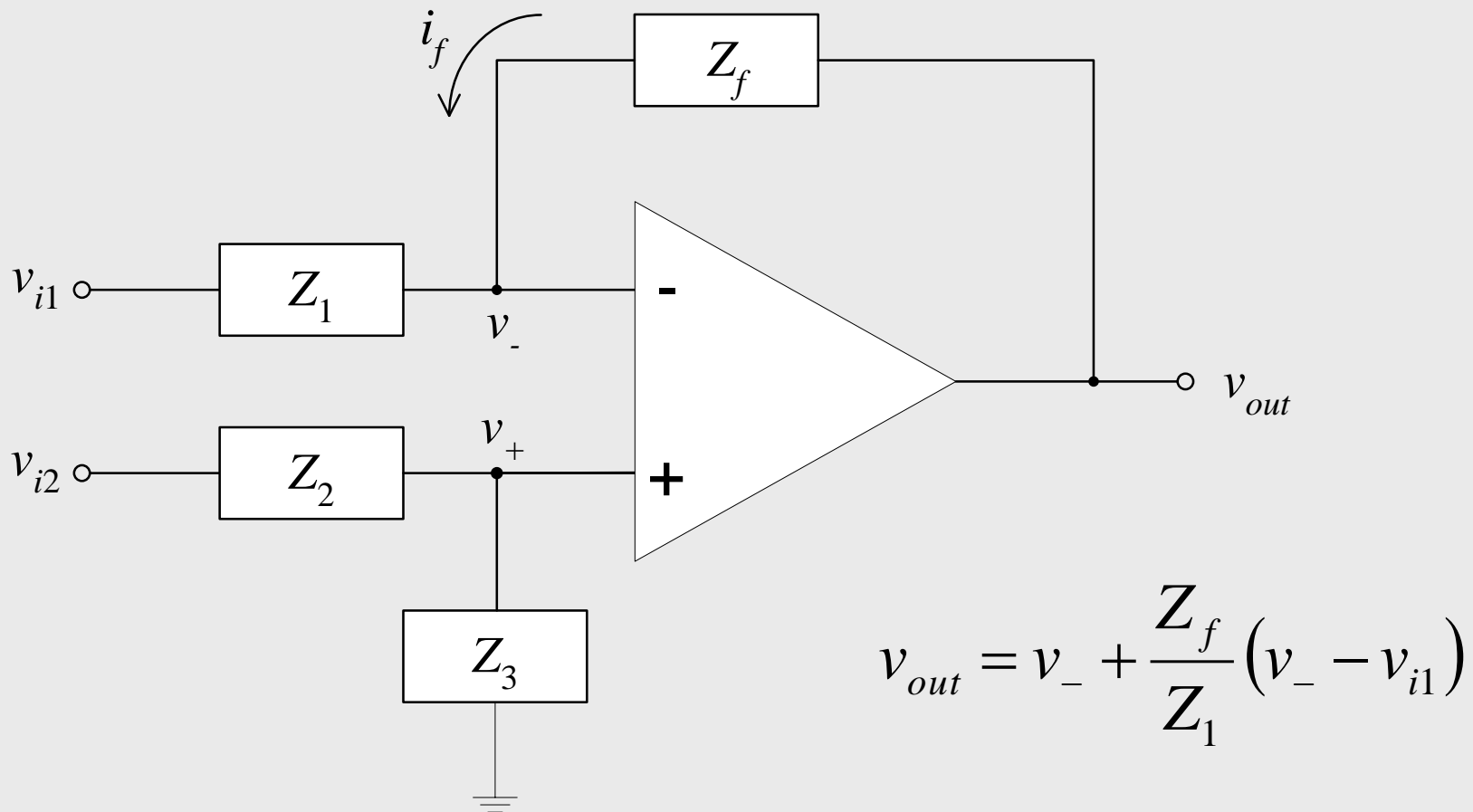
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



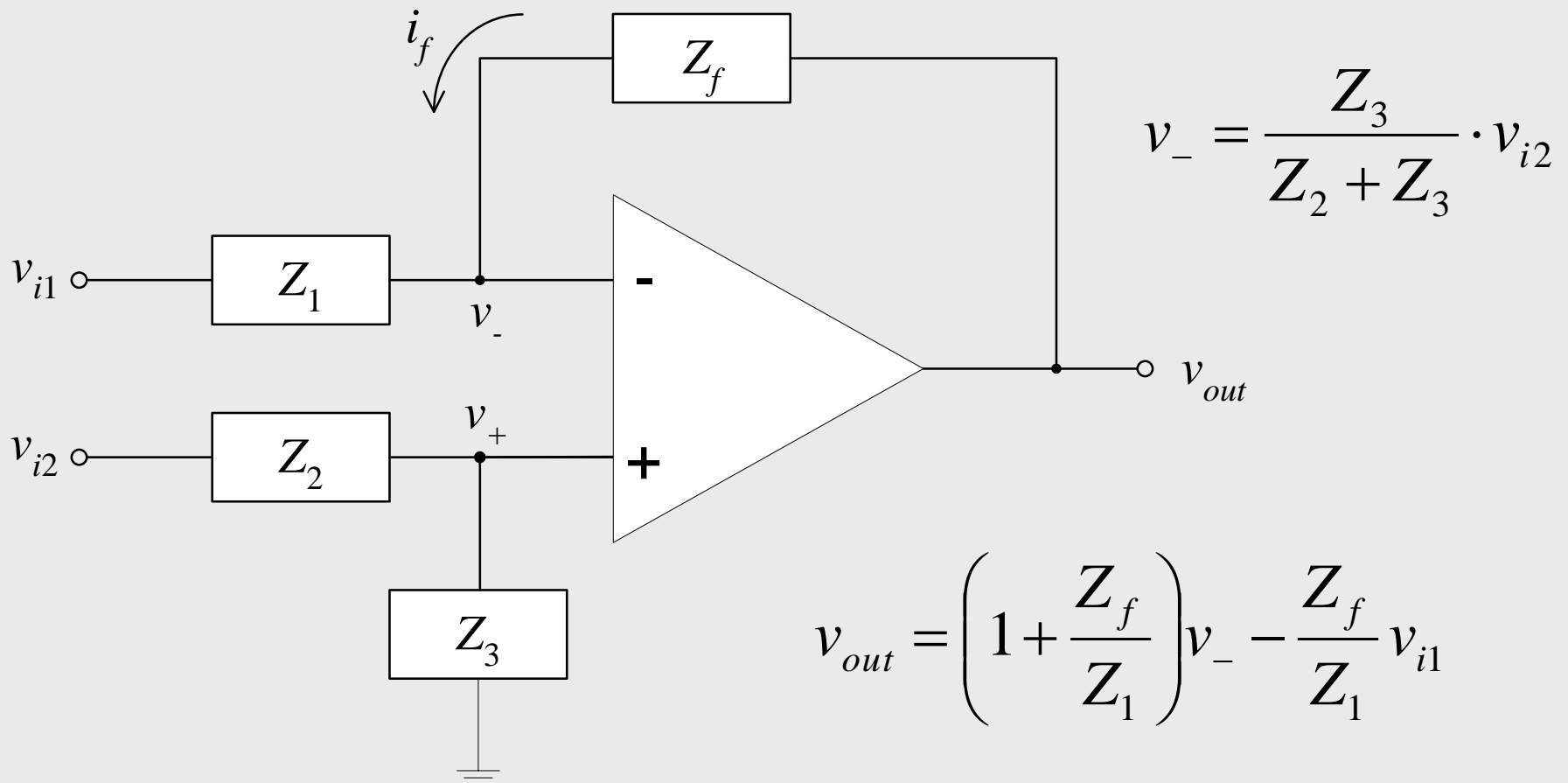
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



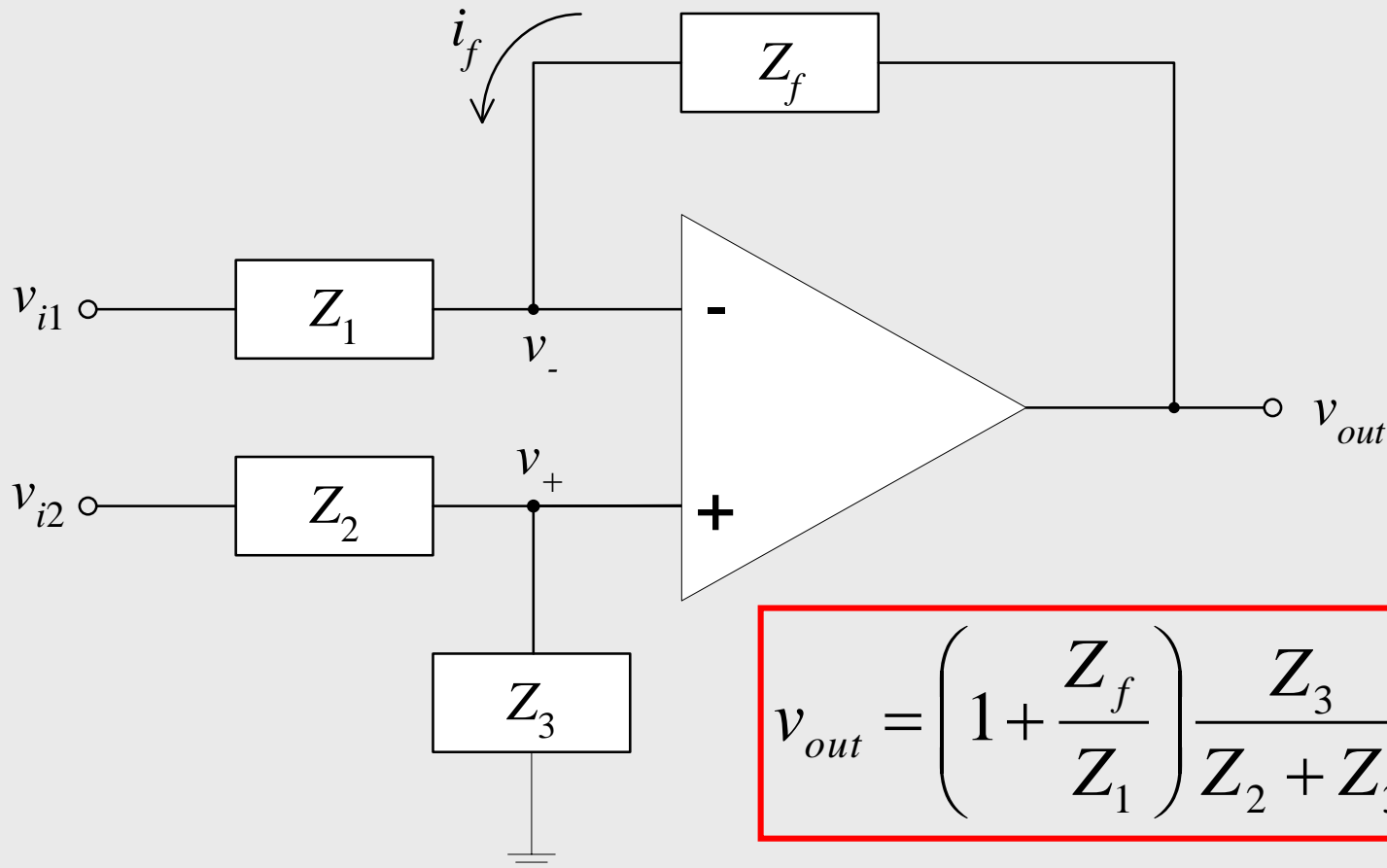
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



3.1) Amplificação

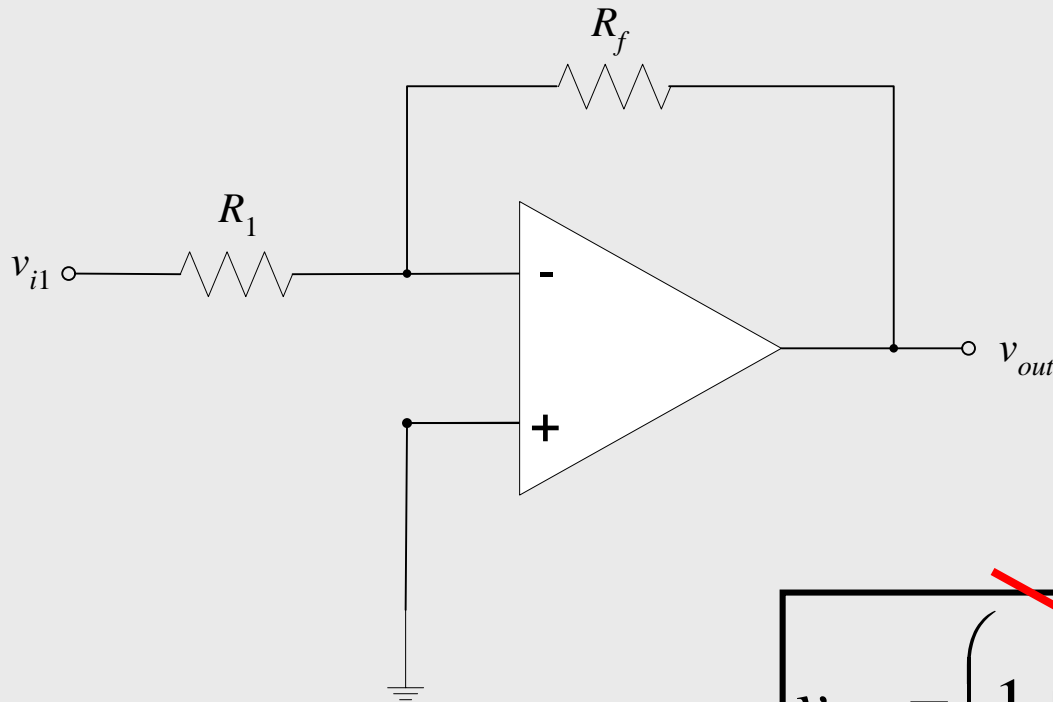
⌘ Amplificador Operacional: Caso Geral



$$v_{out} = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} \right) \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} v_{i2} - \frac{Z_f}{Z_1} v_{i1}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Inversor:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

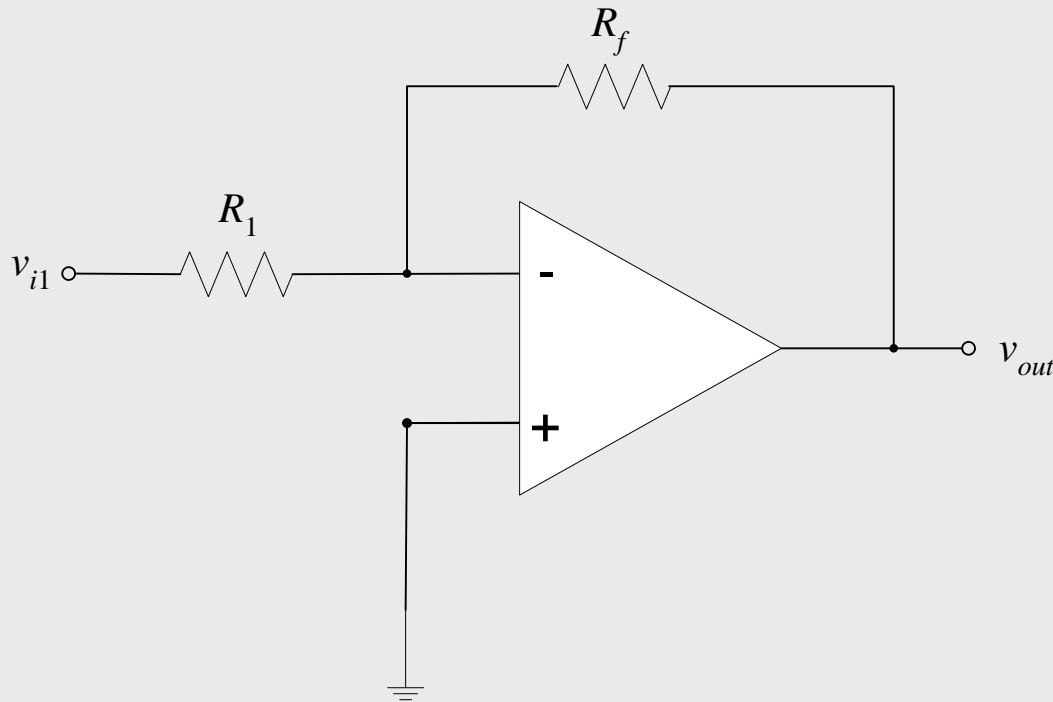
$$Z_2 = \infty$$

$$Z_3 = 0$$

~~$$v_{out} = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} \right) \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} v_{i2} - \frac{Z_f}{Z_1} v_{i1}$$~~

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Inversor:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

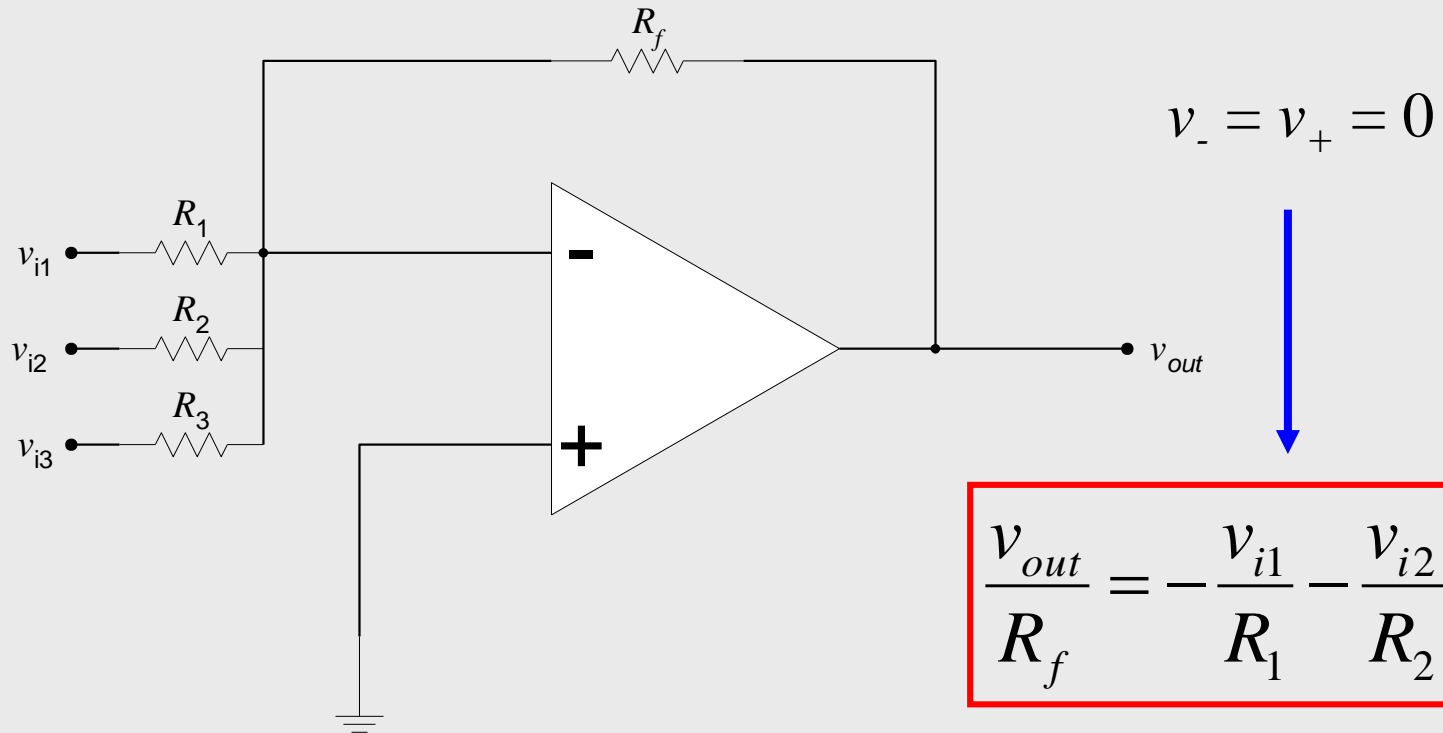
$$Z_2 = \infty$$

$$Z_3 = 0$$

$$v_{out} = -\frac{R_f}{R_1} v_{i1}$$

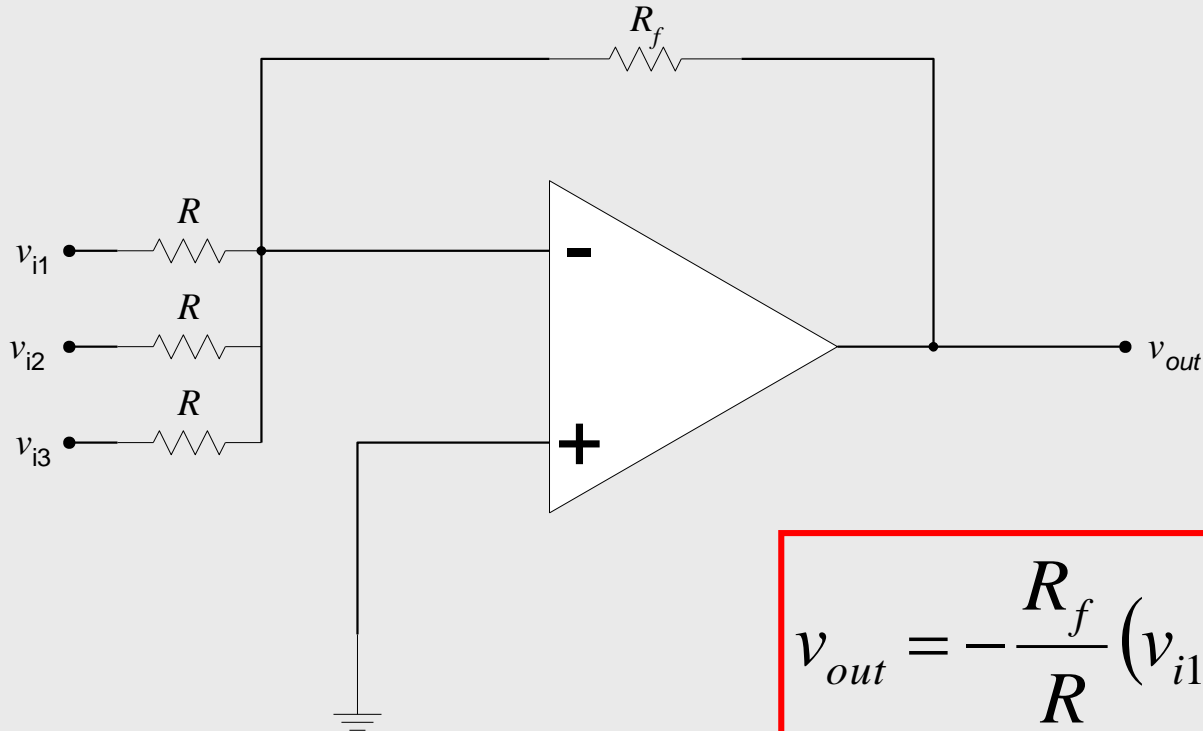
3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Somador:



3.1) Amplificação

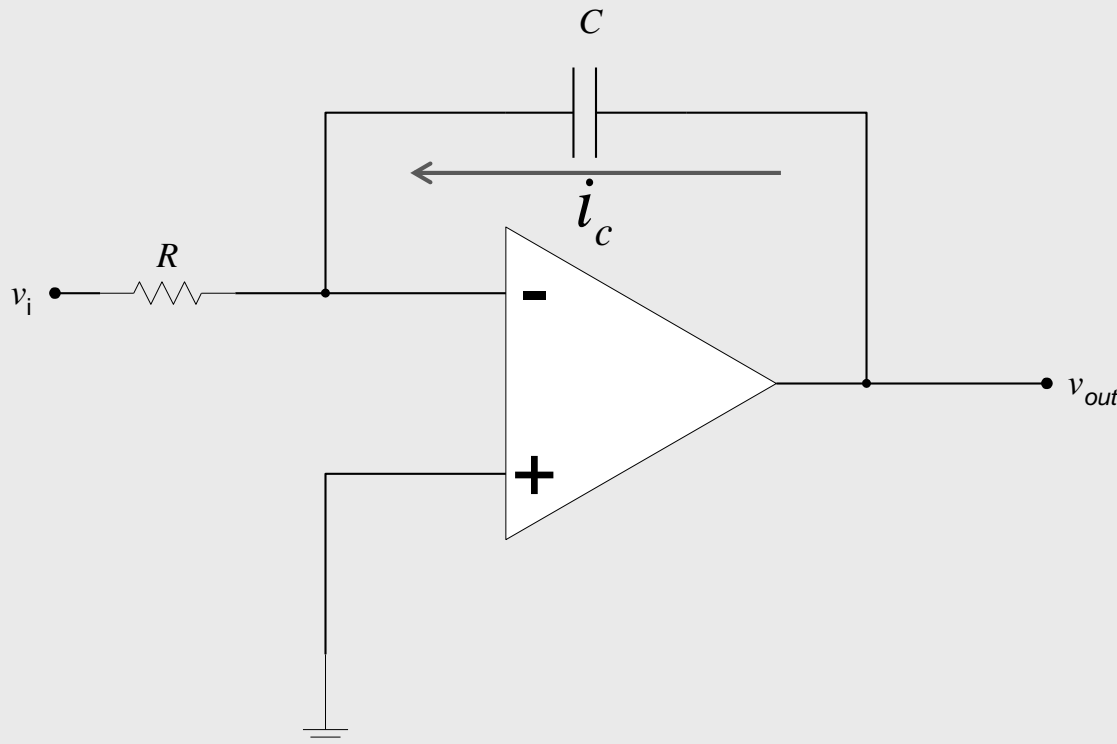
⌘ Amplificador Somador:



$$v_{out} = -\frac{R_f}{R} (v_{i1} + v_{i2} + v_{i3})$$

3.1) Amplificação

⌘ Integrador:



$$v_- = v_+ = 0$$



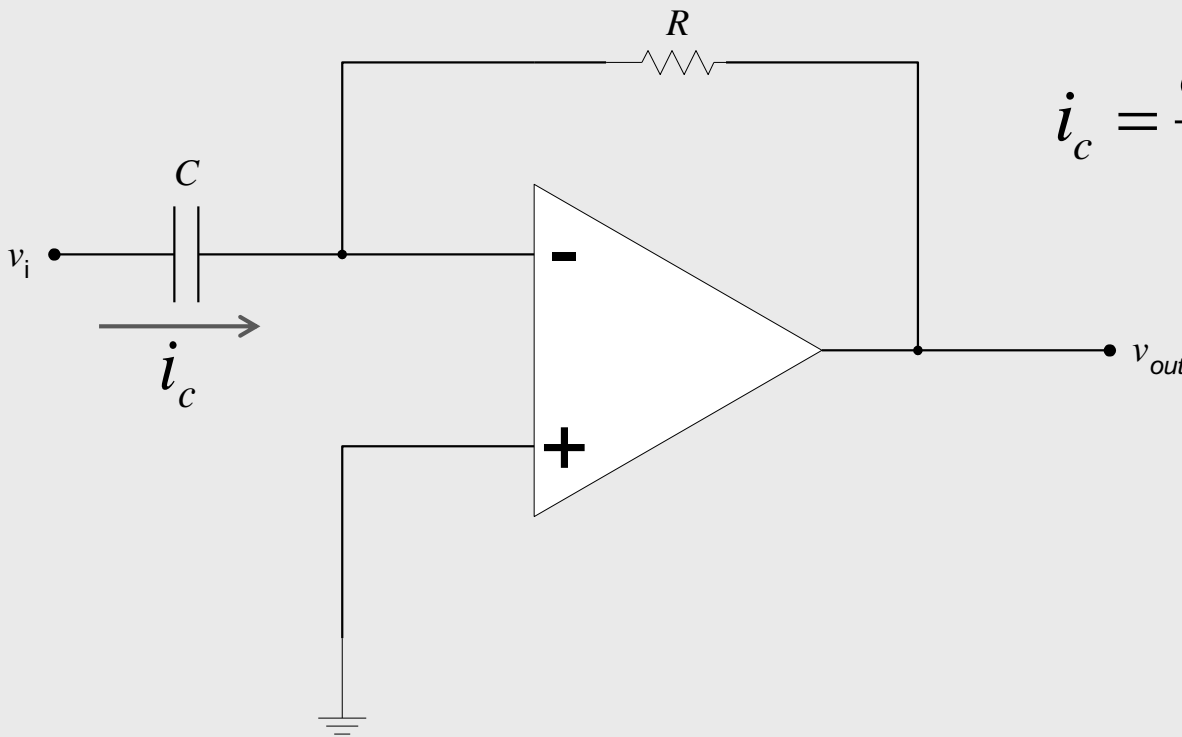
$$v_{out} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$i_- = 0 \longrightarrow i_c = -\frac{v_i}{R}$$

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

3.1) Amplificação

⌘ Diferenciador:



$$v_- = v_+ = 0 \rightarrow q = Cv_i$$

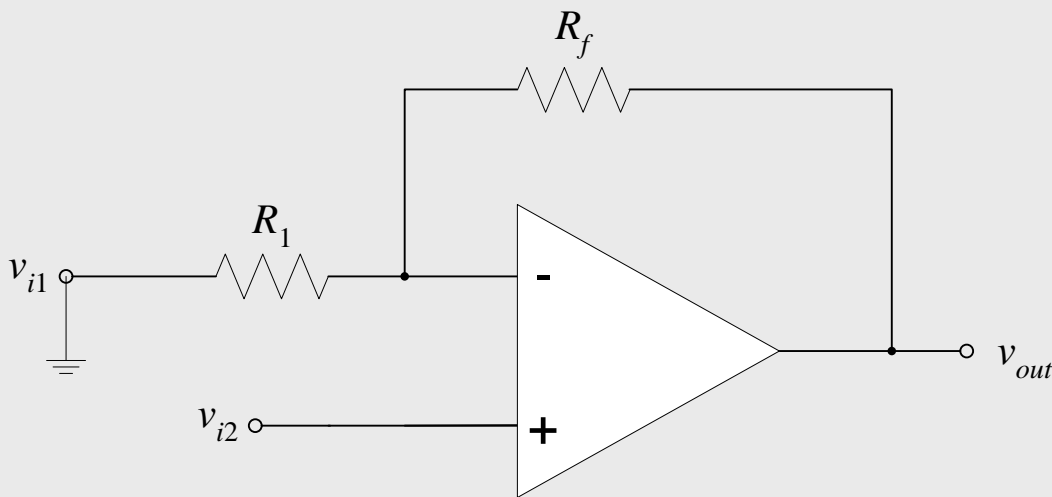
$$i_c = \frac{dq}{dt} \rightarrow i_c = C \frac{dv_i}{dt}$$

$$i_- = 0 \rightarrow i_c = -\frac{v_{out}}{R}$$

$$v_{out} = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Não-Inversor:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = 0$$

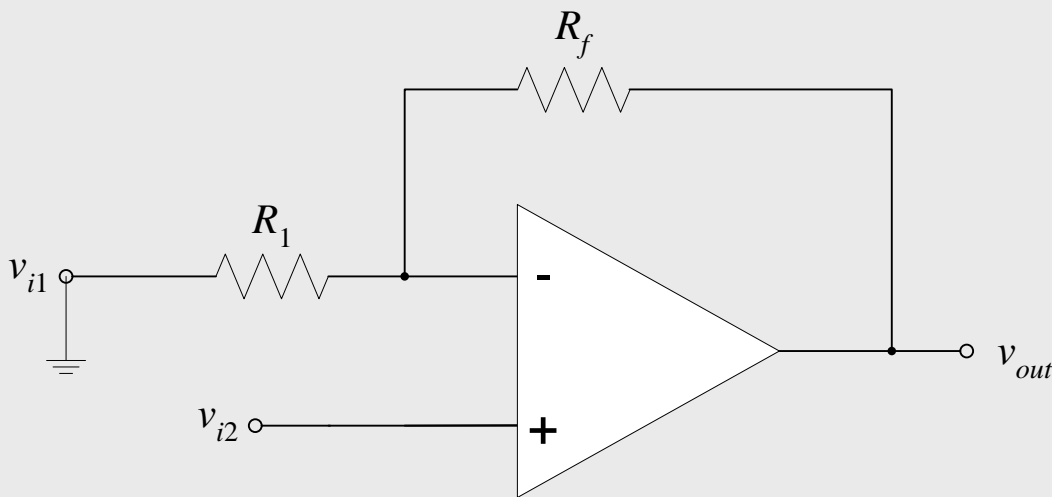
$$Z_3 = \infty$$

$$v_{i1} = 0$$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} \right) \frac{\cancel{Z_3}}{\cancel{Z_2} + \cancel{Z_3}} v_{i2} - \frac{\cancel{Z_f}}{\cancel{Z_1}} v_{i1}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Não-Inversor:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = 0$$

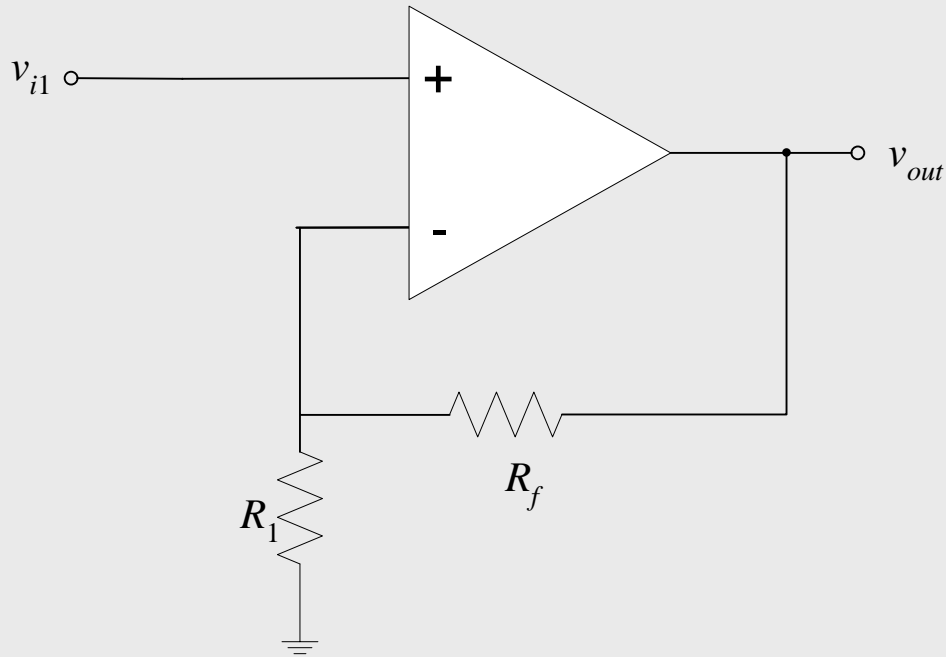
$$Z_3 = \infty$$

$$v_{i1} = 0$$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_{i2}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador Não-Inversor:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = 0$$

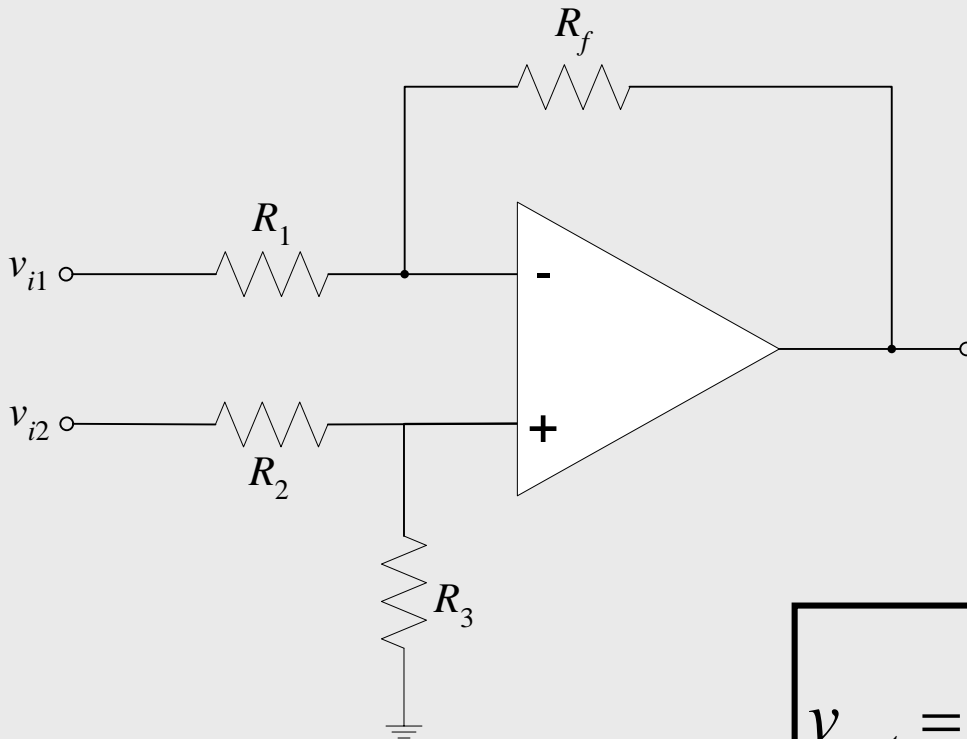
$$Z_3 = \infty$$

$$v_{i1} = 0$$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_{i2}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Diferenças:



$$Z_f = R_f$$

$$Z_1 = R_1$$

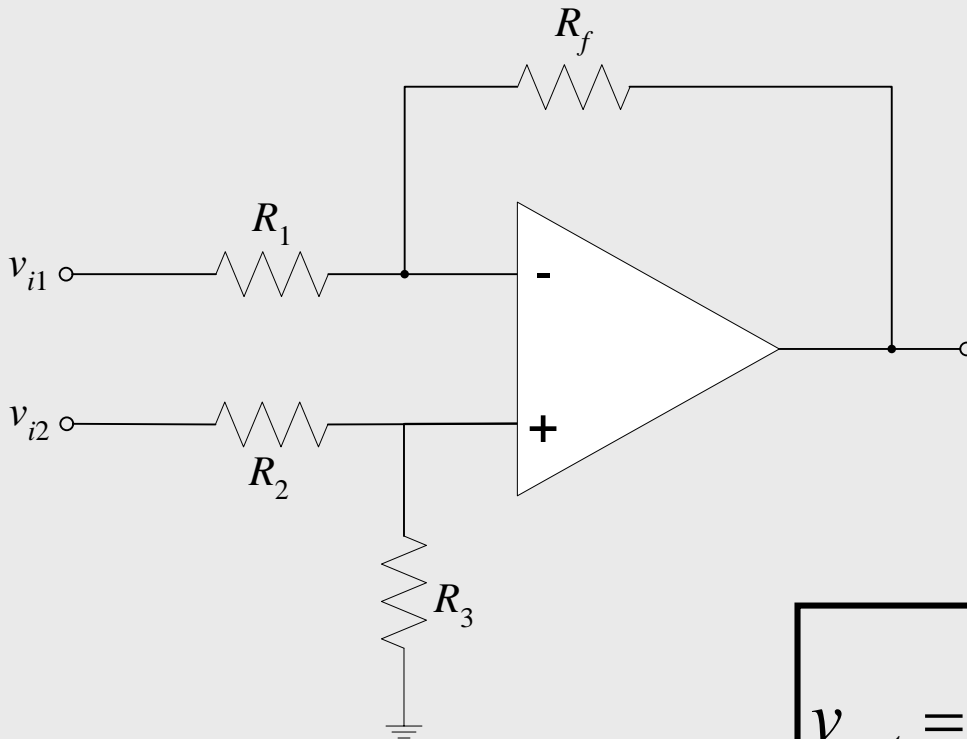
$$Z_2 = R_2$$

$$Z_3 = R_3$$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} \right) \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} v_{i2} - \frac{Z_f}{Z_1} v_{i1}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Diferenças:



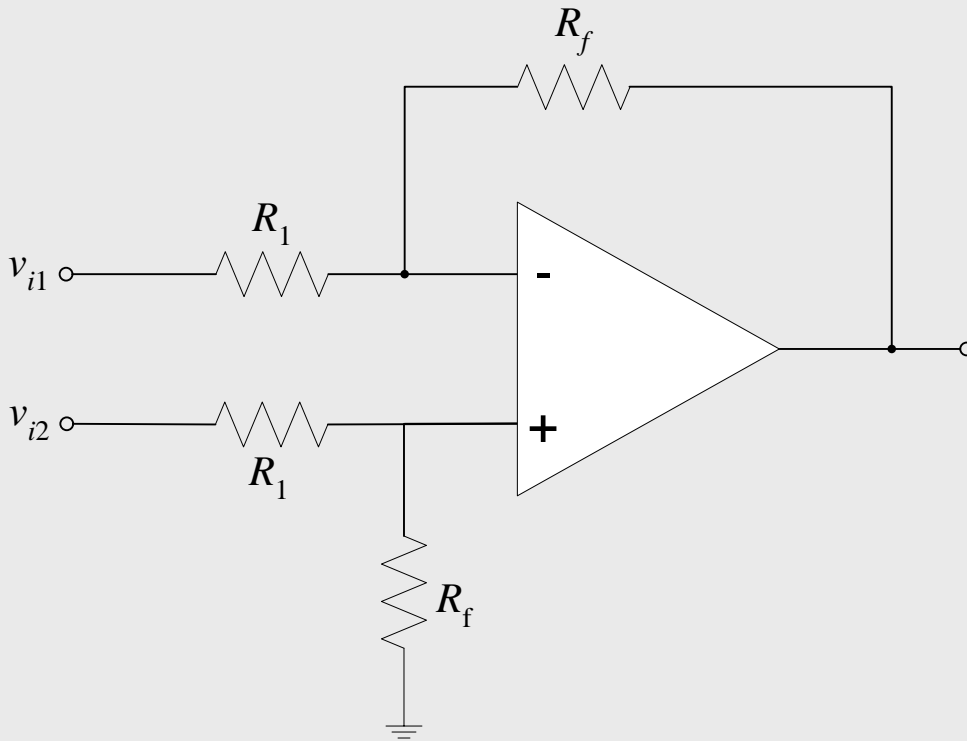
$$R_1 = R_2$$

$$R_3 = R_f$$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} - \frac{R_f}{R_1} v_{i1}$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Diferenças:



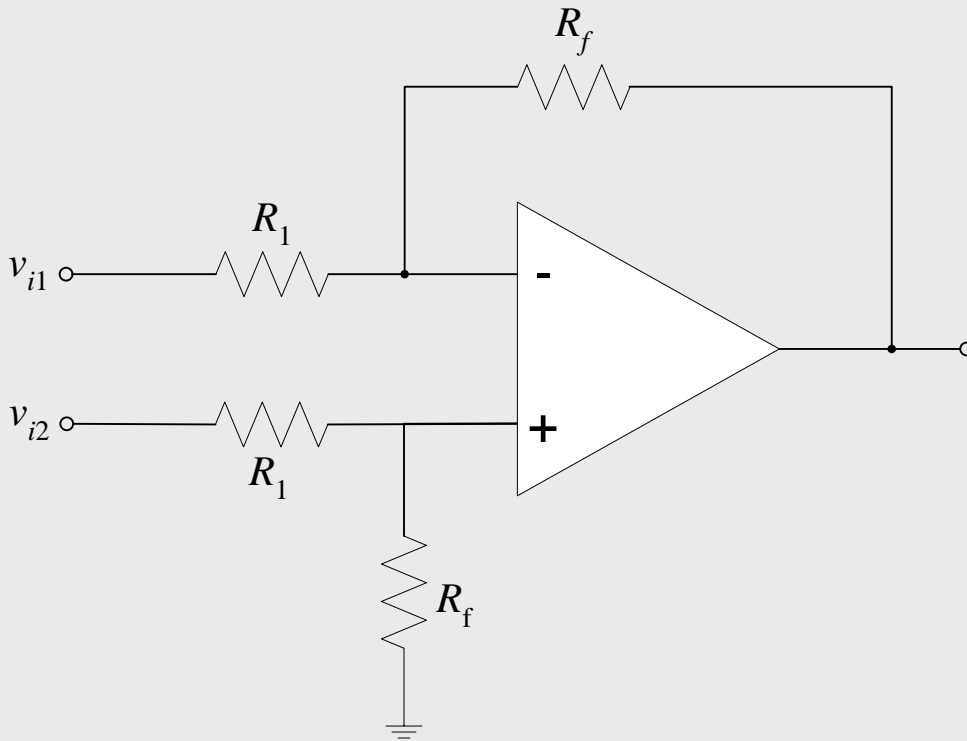
$$R_1 = R_2$$

$$R_3 = R_f$$

$$v_{out} = \left(\frac{R_f}{R_1} \right) (v_{i2} - v_{i1})$$

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Diferenças:



$$\boxed{\wedge} R_{in1} = R_1$$

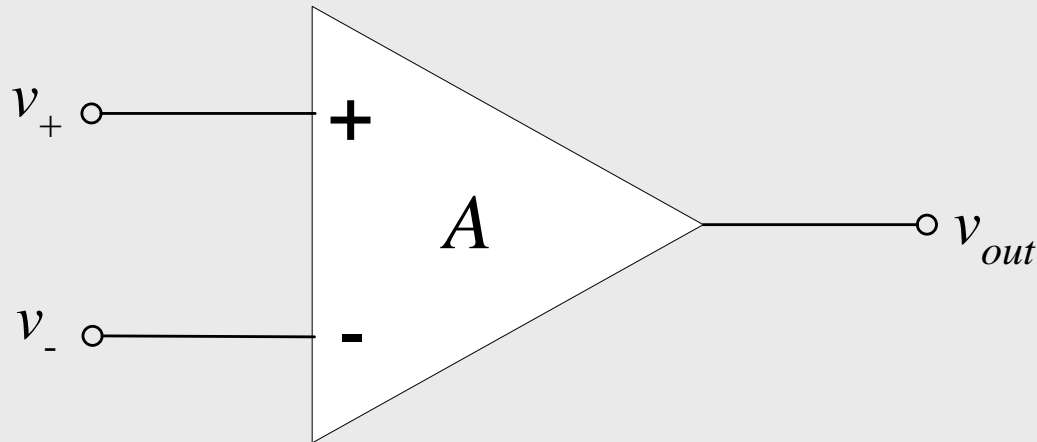
$$\boxed{\wedge} R_{in2} = R_1 + R_f$$



$\boxed{\wedge}$ muito baixas!

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Instrumentação:



$$v_{out} = (v_+ - v_-) \cdot A$$

ideal

Sejam:

$$v_d = v_+ - v_-$$

$$v_c = (v_+ + v_-) / 2$$

tensão diferencial

tensão de modo comum

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Instrumentação:

v_d	tensão diferencial
v_c	tensão de modo comum
A_d	ganho diferencial
A_c	ganho de modo comum
A_d / A_c ou $20 \log (A_d / A_c)$	CMRR = Razão de Rejeição de Modo Comum

3.1) Amplificação

⌘ Amplificador de Instrumentação:

- Ganho diferencial 1 - 1000
- Não-linearidade do ganho 0,01%
- CMRR 80 - 120 dB
- R_{in} diferencial $10^6 - 10^{10} \Omega$
- R_{out} 0,01 - 0,1 Ω
- Bias 50 - 250 μV