Sistemas Electrónicos

Capítulo 3: Amplificadores operacionais e aplicações

Parte 2

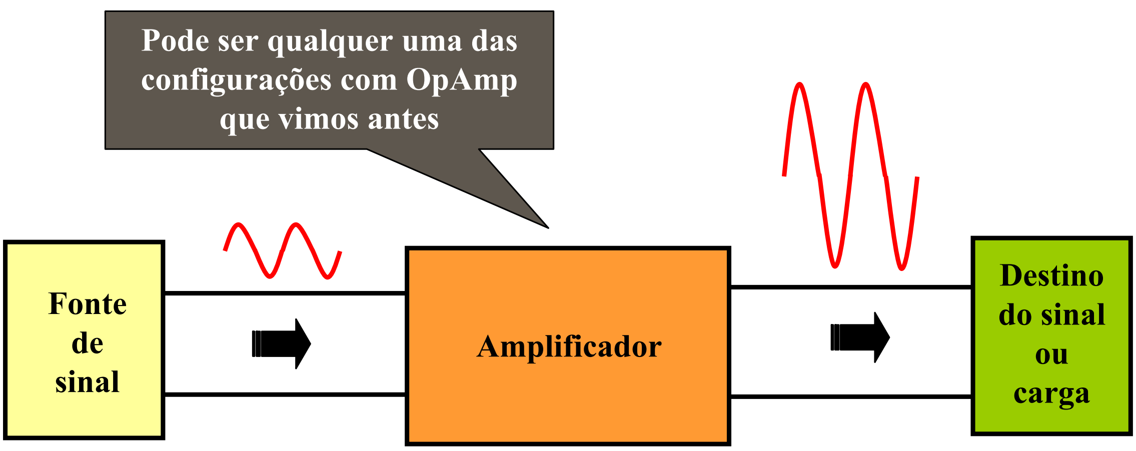
Ernesto Martins
evm@ua.pt
DETI (gab. 4.2.38)
Universidade de Aveiro

Sumário

- **Resistência de entrada e de saída de amplificadores;**
- **Resistências de entrada e saída das configurações inversora e não-inversora;**
- **Configuração inversora com circuito em T;**
- **Outras configurações do OpAmp**
  - **Seguidor de tensão;**
  - **Somador;**
  - **Amplificador diferença.**

Resistências de entrada e de saída de amplificadores

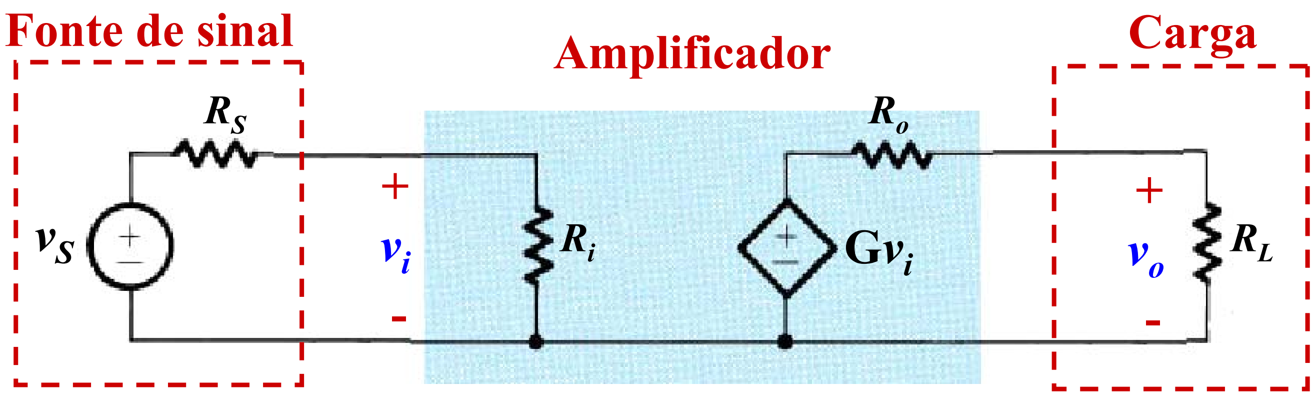
Fonte de sinal, amplificador e carga



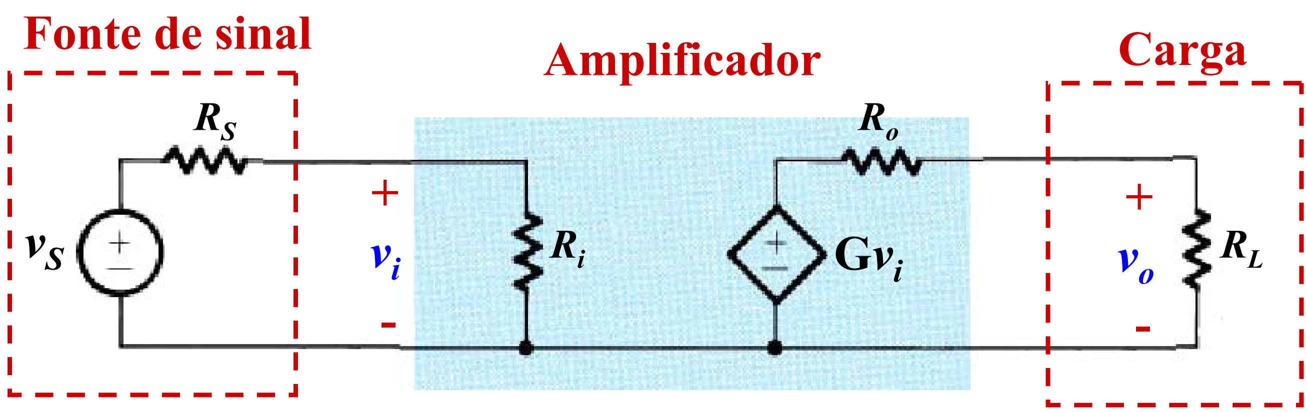
- **Numa cadeia de amplificação como esta interessa sempre maximizar a eficiência com que o sinal é transferido…**
  - **… da fonte de sinal para a entrada do amplificador, e**
  - **… da saída do amplificador para a carga.**

Cadeia de amplificação: equivalente de Thévenin

- **Substituindo cada um dos elementos da cadeia anterior pelo seu modelo, obtemos:**



Máxima eficiência…

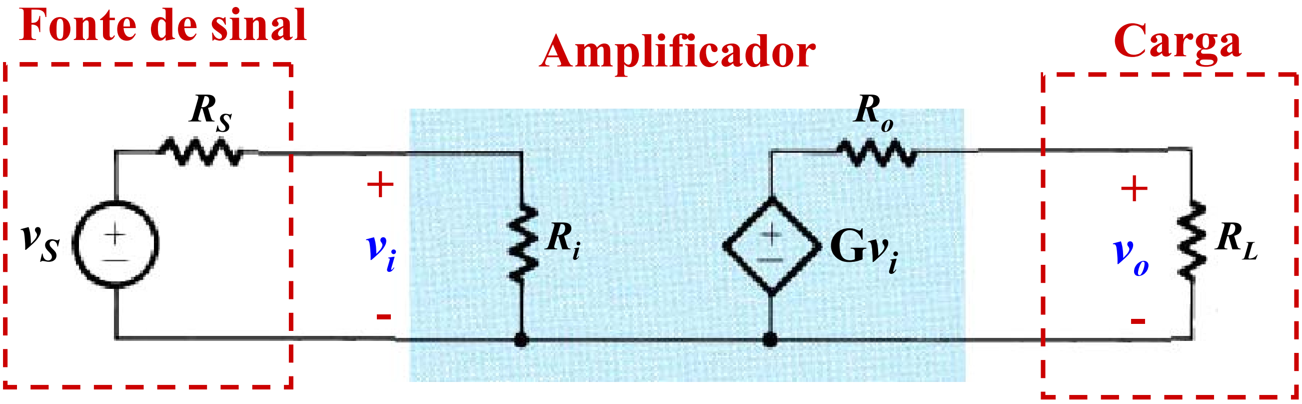


- **A máxima eficiência será conseguida se todo o sinal produzido pela fonte de sinal aparecer na entrada do amplificador. Ou seja se** $v_i = v_s$

- **… e se todo o sinal produzido pelo amplificador aparecer na resistência de carga. Ou seja se** $v_o = Gv_i$

Eficiência da entrada do amplificador

… mas não é isso que acontece!



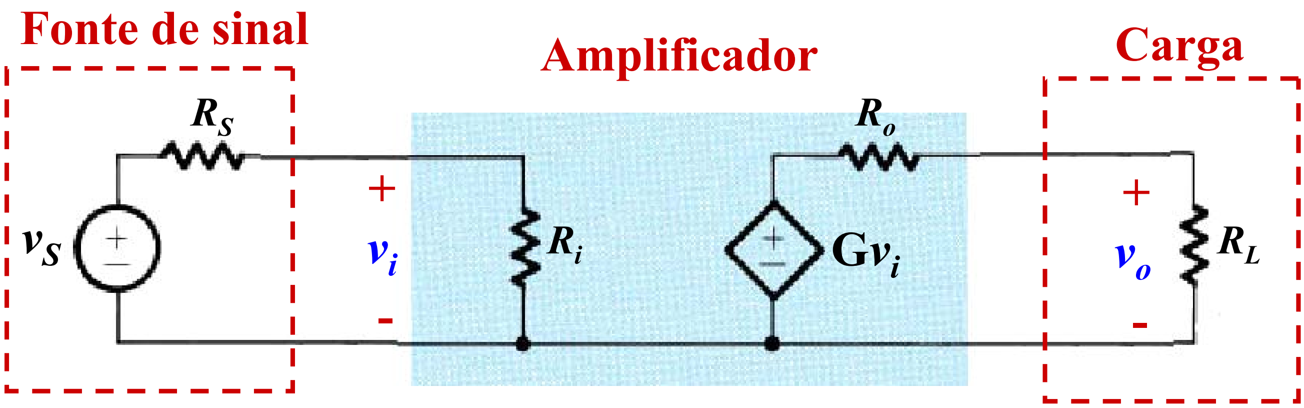
- **A tensão que aparece efectivamente entre os terminais de entrada do amplificador é:**

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_S} v_S$$

> **Se $R_S = 100\Omega$ e $R_i = 500\Omega$, então:**

$$v_i = 0.83 v_S$$

Eficiência da entrada do amplificador



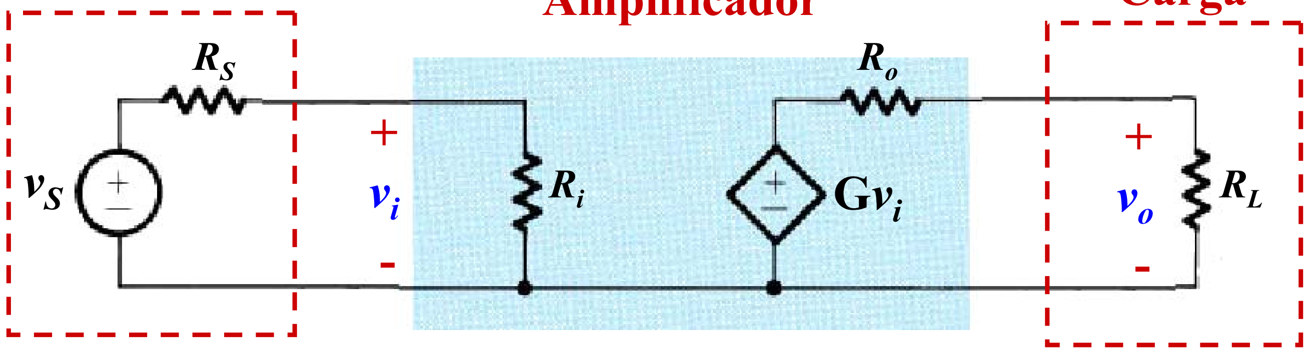
- **Para termos $v_i \approx v_S$, como é pretendido, precisamos de ter R_i muito elevado.**

Em concreto deveremos ter $R_i >> R_S$:

$$v_i = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_i}} v_S \quad se \quad R_i >> R_S, \quad então \quad v_i \approx v_S$$

Eficiência da saída do amplificador

- **O raciocínio que fazemos relativamente à saída do amplificador é idêntico:**



- **A tensão v_o que aparece efectivamente na resistência de carga, R_L, é:**

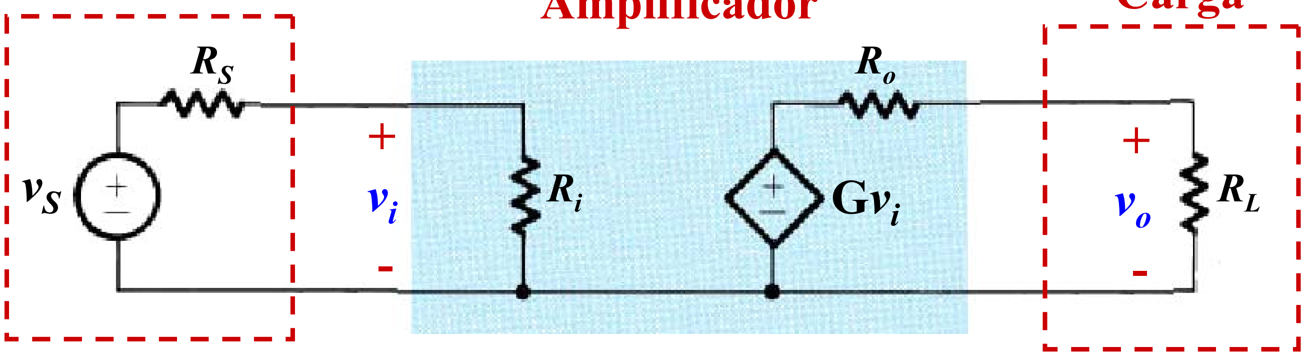
$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} G v_i$$

- **Se $R_o = 10\Omega$ e $R_L = 1\Omega$, então:**

$$v_o = 0.09 G v_i$$

- **Estamos pois muito longe de ter $v_o = Gv_i$**

Eficiência da saída do amplificador



- **Para termos $v_o \approx Gv_i$, como pretendido, precisamos de ter R_o muito baixo.**

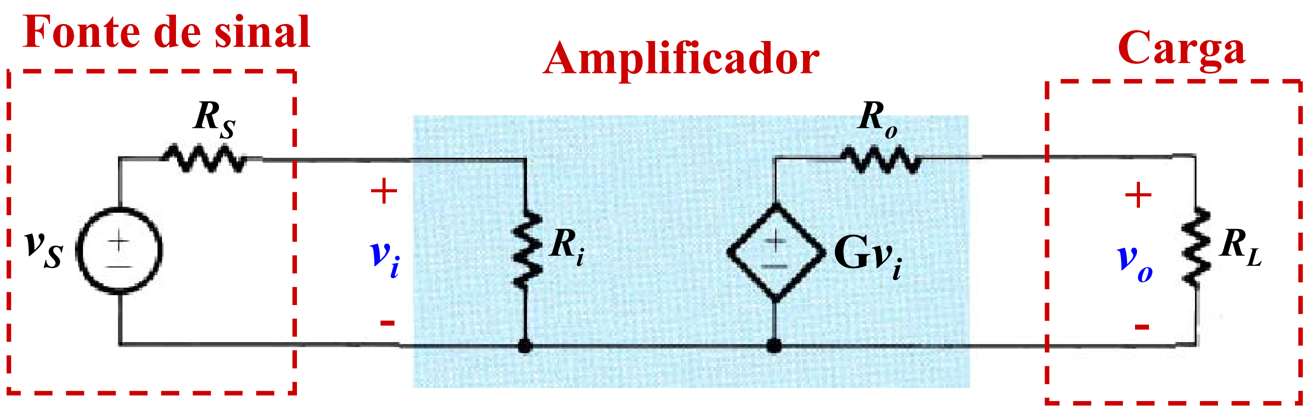
Em concreto deveremos ter $R_o << R_L$:

$$v_o = \frac{1}{1 + \frac{R_o}{R_L}} G v_i \quad se \quad R_o << R_L, \quad então \quad v_o \approx G v_i$$

Conclusão: Máxima eficiência do amplificador

- **Para maximizar a eficiência do acoplamento de sinal na entrada e na saída, um amplificador de tensão deve apresentar:**

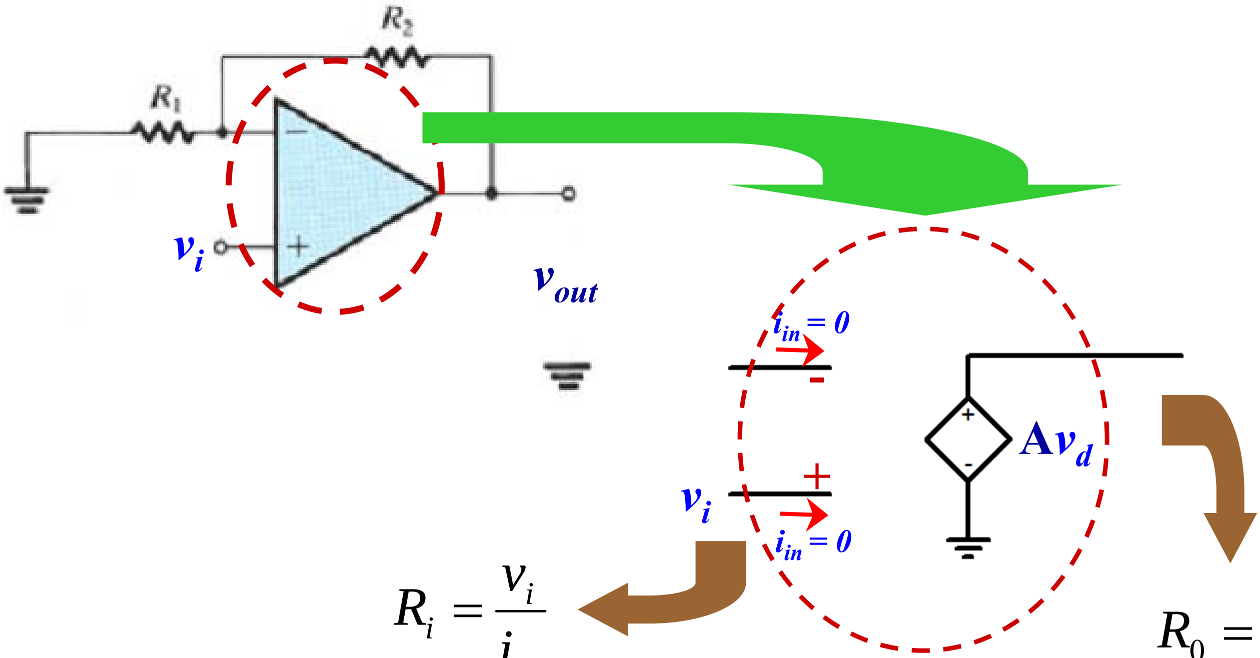
$$R_i >> R_S \quad e \quad R_o << R_L$$



Resistências de entrada (R_i) e de saída (R_o) das configurações inversora e não-inversora

Configuração inversora em T

R_i e R_o na configuração não-inversora

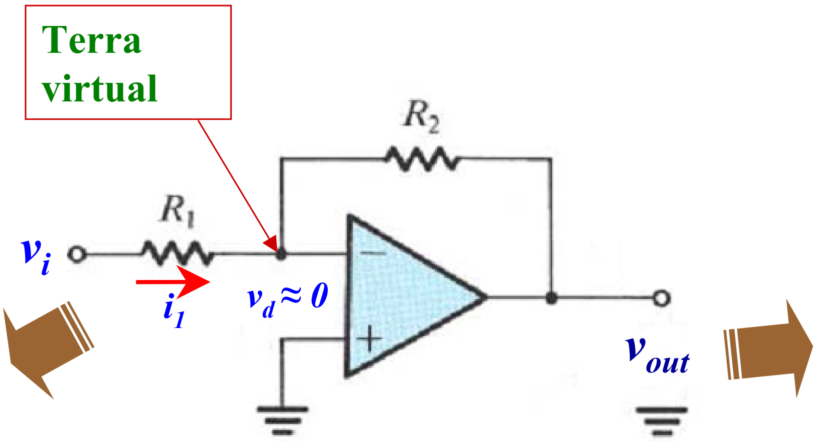


$$R_i = \frac{v_i}{i_{in}}$$

$$= \frac{v_i}{0} = \infty$$

$$R_0 = 0$$

R_i e R_o na configuração inversora



$$R_i = \frac{v_i}{i_1}$$

$$R_0 = 0$$

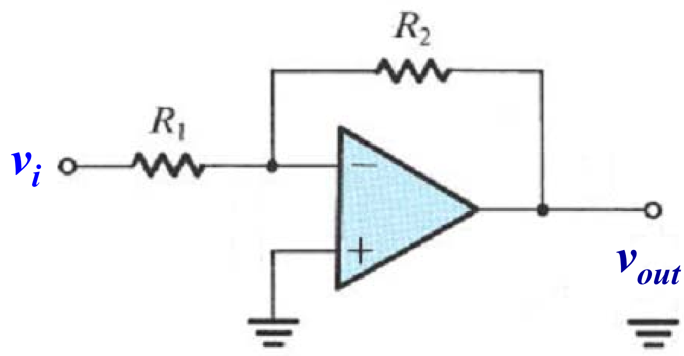
mas como $i_1 = \dfrac{v_i - v_d}{R_1} = \dfrac{v_i}{R_1}$

então $R_i = \dfrac{v_i}{i_1} = R_1$

R_i e ganho elevados na configuração inversora

$$R_i = R_1$$

$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

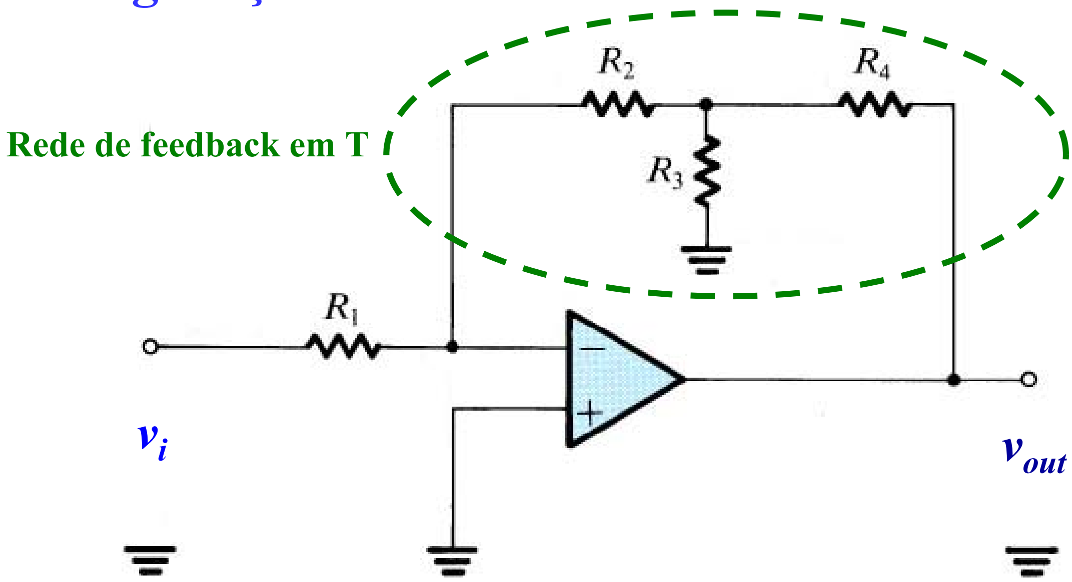


- O que acontece se quisermos ter uma configuração inversora com R_i elevado e, simultaneamente, G elevado?

Exemplo: Para $R_i = 1M\Omega$ e $G = -100$, teremos de ter $R_1 = 1M\Omega$ e $R_2 = 100M\Omega$

Mas um valor tão grande para R_2 é impraticável!

Configuração inversora com circuito em T



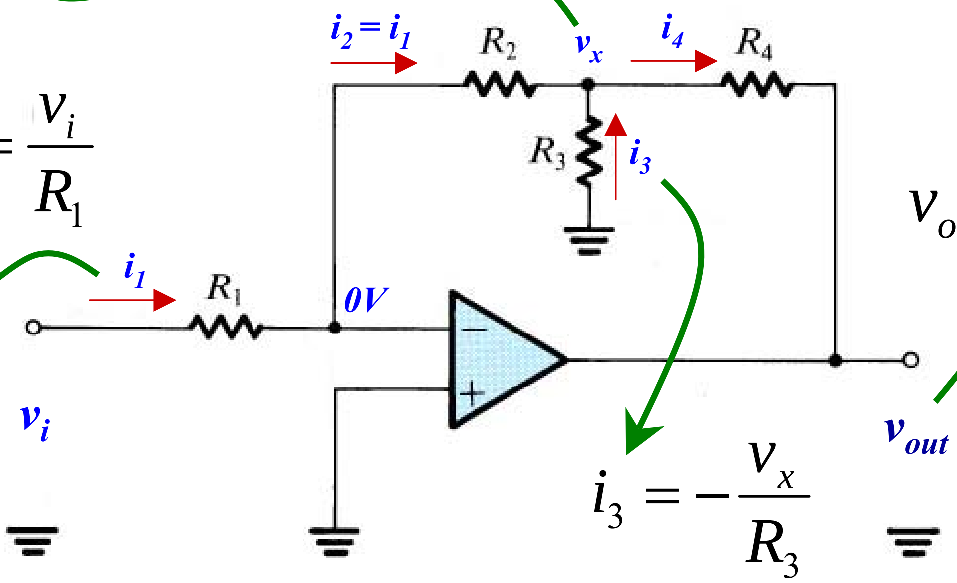
- Tem a vantagem de ter um ganho independente da resistência de entrada;
- Ideal para casos em que queremos ter simultaneamente R_i e G elevados.

Configuração inversora com circuito em T

$$v_x = -R_2 i_2 = -R_2 i_1$$

$$i_4 = i_1 + i_3$$

$$i_1 = \frac{v_i}{R_1}$$



$$v_{out} = v_x - R_4 i_4$$

$$i_3 = -\frac{v_x}{R_3}$$

Configuração inversora com circuito em T

- **Efectuando substituições…**

$$v_x = -R_2 i_1 \qquad i_1 = \frac{v_i}{R_1}$$

$$i_3 = -\frac{v_x}{R_3} \qquad i_4 = i_1 + i_3$$

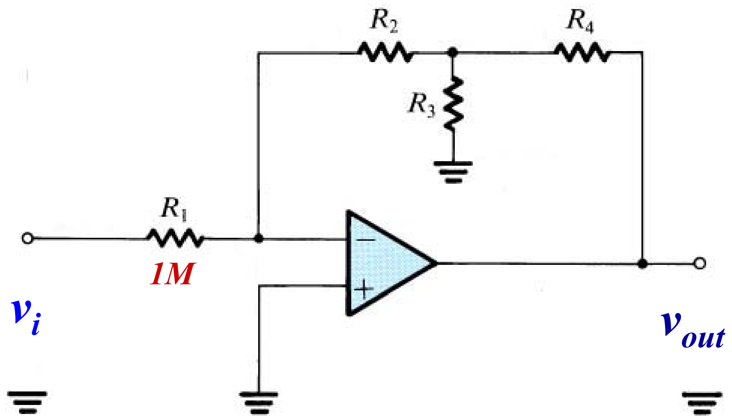
$$v_{out} = v_x - R_4 i_4$$

- **Obtemos**

$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

Configuração inversora com circuito em T

- Se quisermos um amplificador com $R_i = 1M\Omega$ e $G = -100$, então $R_1 = 1M\Omega$.

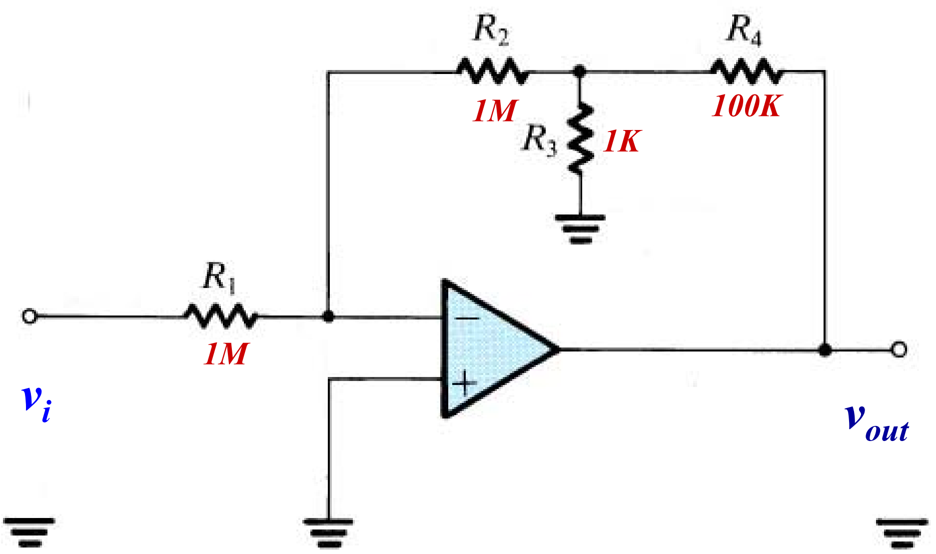


- Se escolhermos $R_2 = 1M\Omega$ e $R_4 = 100K\Omega$, ficamos com

$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{1M}{1M}\left(1 + \frac{100K}{1M} + \frac{100K}{R_3}\right) = -100$$

Configuração inversora com circuito em T

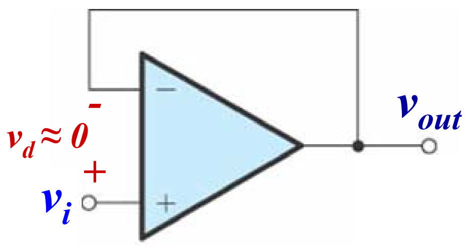
- De onde se tira $R_3 = 1K\Omega$



Ou seja, conseguimos ter $R_i = 1M\Omega$ e $G = -100$, sem que nenhuma das resistências tenha de ter uma valor astronómico.

Outras configurações do OpAmp

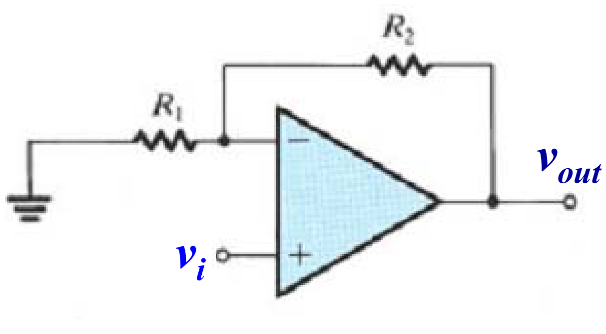
Seguidor de tensão ou *buffer*



$$v_{out} = v_i$$

- **Saída segue a entrada!**

- **Na realidade, este circuito é um caso particular da configuração não-inversora.**



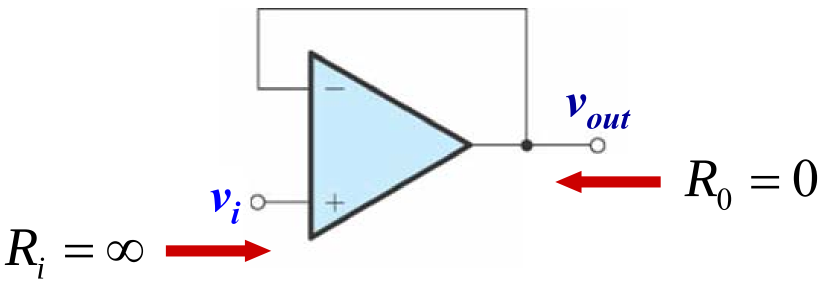
$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- **Se $R_1 = \infty$ e $R_2 = 0$…**

$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1$$

Seguidor de tensão

- Mas que utilidade poderá ter um circuito com ganho = 1 ?



- Tal como a configuração não-inversora, este circuito também apresenta $R_i = \infty$ e $R_o = 0$, sendo útil quando queremos ligar um circuito com **resistência de saída elevada** a outro com **resistência de entrada baixa**.

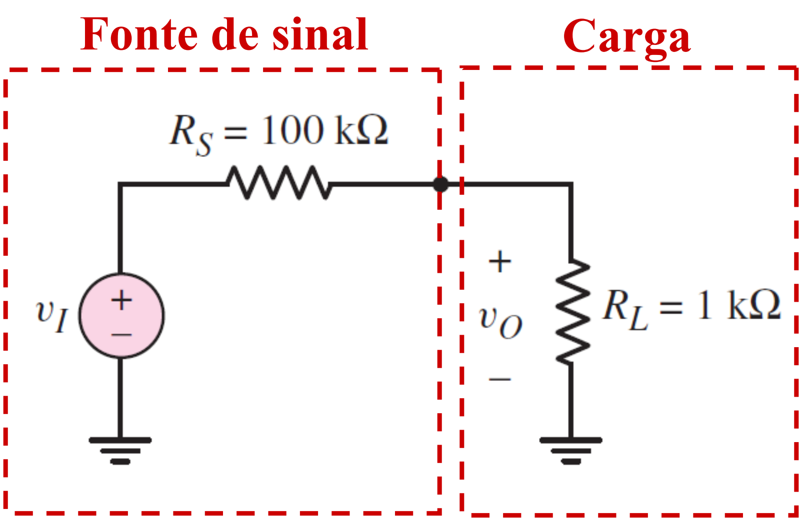
Utilidade do seguidor de tensão

- Suponhamos uma fonte de sinal ligada a uma carga;

- Para conseguimos maximizar a eficiência do acoplamento entre a fonte e a carga (de forma a ter $v_o \approx v_i$), é necessário que:

$$R_L >> R_S$$

o que não é o caso.

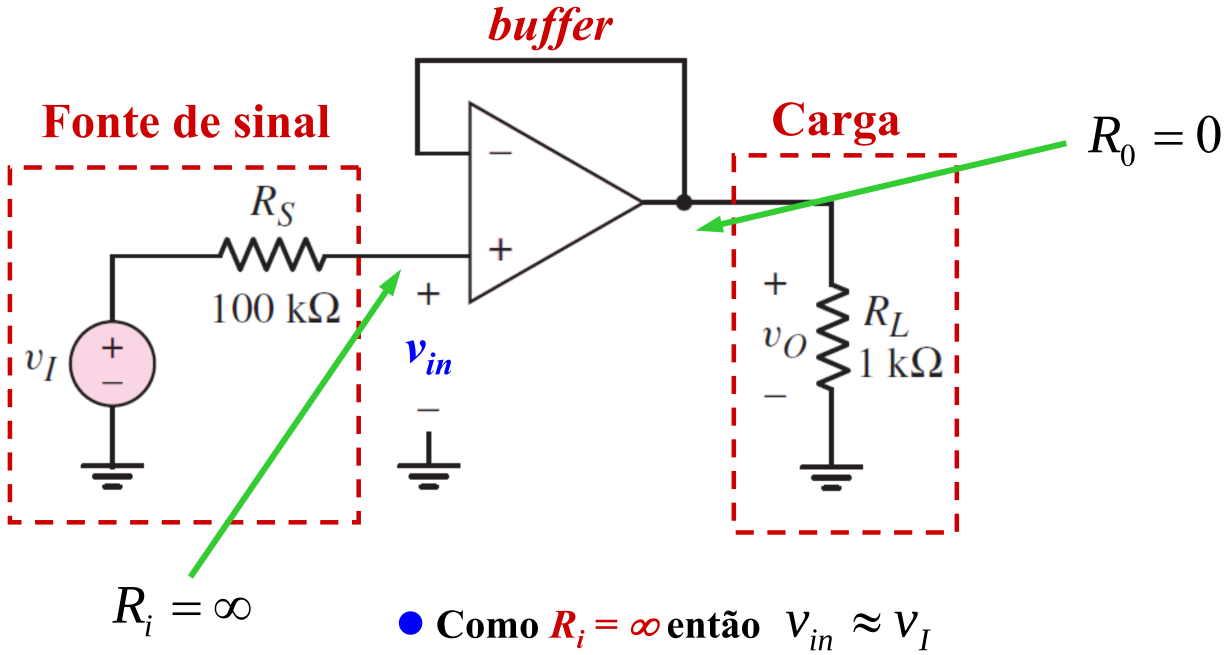


$$v_o = \frac{1K}{1K + 100K} v_I \approx 0.01 v_I$$

v_o vai ser apenas uma pequena fracção de v_i !

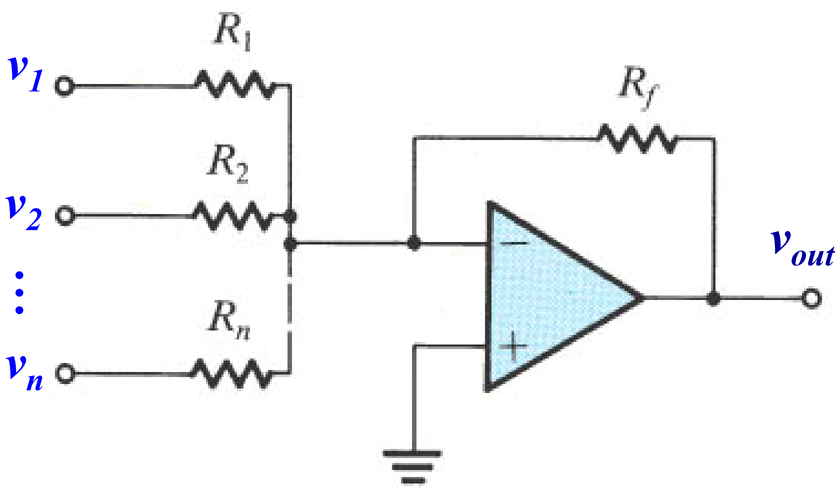
Utilidade do seguidor de tensão

- Problema resolve-se com um *buffer* entre a fonte de sinal e a carga:



- Como $R_i = \infty$ então $v_{in} \approx v_I$
- Como $R_0 = 0$ então $v_0 \approx v_I$

Amplificador somador



$$v_{out} = K_1 v_1 + K_2 v_2 + \ldots + K_n v_n$$

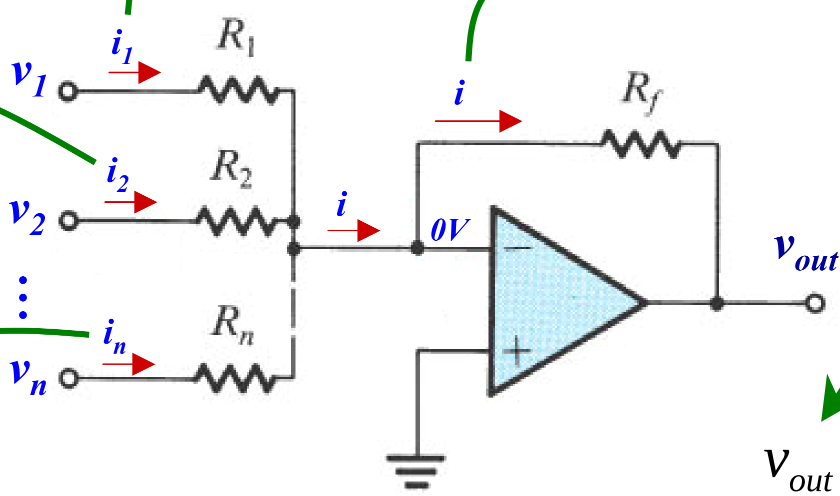
- Saída é uma soma ponderada das tensões de entrada.

Amplificador somador

$$i_1 = \frac{v_1}{R_1}$$

$$i = i_1 + i_2 + \ldots + i_n$$

$$i_2 = \frac{v_2}{R_2}$$



$$i_n = \frac{v_n}{R_n}$$

$$v_{out} = -R_f i$$

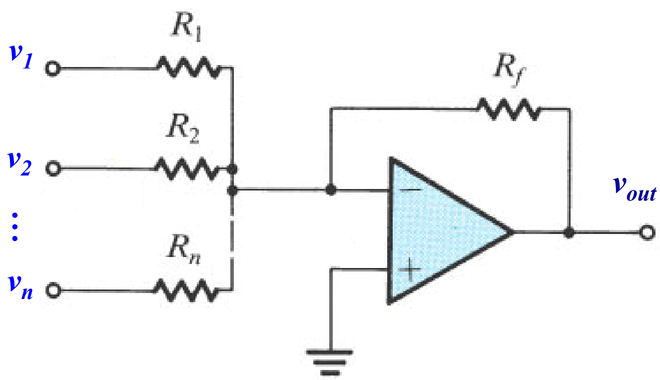
Amplificador somador

- **Conjugando as expressões anteriores obtemos**

$$v_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \ldots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

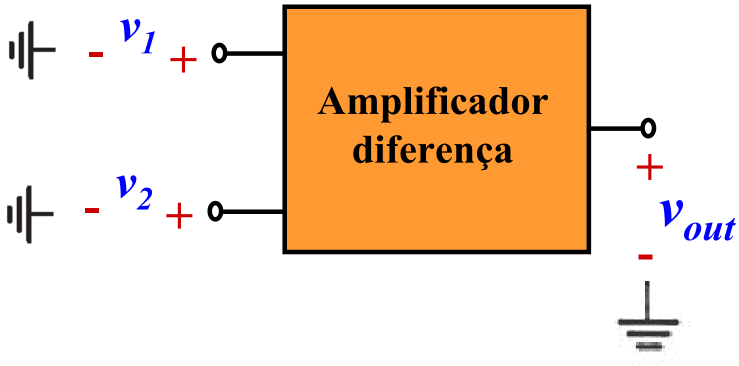
- **Saída é portanto a soma ponderada dos sinais de entrada;**

- **Coeficientes de cada entrada podem ser ajustados individualmente.**



Amplificador diferença

- **Tem duas entradas. Responde à diferença entre os dois sinais de entrada: $v_2 - v_1$.**



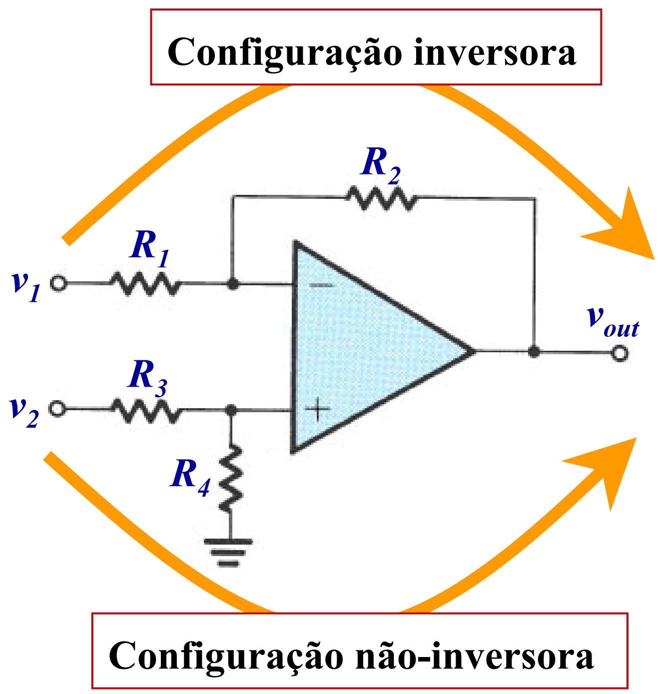
$$v_{out} = A_d(v_2 - v_1)$$

A_d é o Ganho Diferencial

- **Idealmente o amplificador não responde a variações de tensão comuns às duas entradas.**

Amplificador diferença

- **Este amplificador diferença combina as configurações inversora e não inversora.**



- **Para calcular A_d vamos usar o Princípio da Sobreposição que nos permite calcular separadamente os ganhos:**

$$G_I \equiv \frac{v_{out1}}{v_1}$$

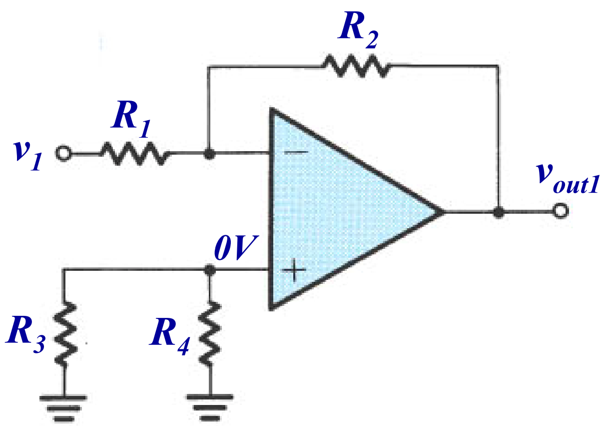
$$G_{NI} \equiv \frac{v_{out2}}{v_2}$$

Amplificador diferença

1) Consideremos primeiro só a configuração inversora (entrada v_1) para obter

$$G_I \equiv \frac{v_{out1}}{v_1}$$

● **Começamos por desactivar a fonte ligada a v_2, curto-circuitando-a.**



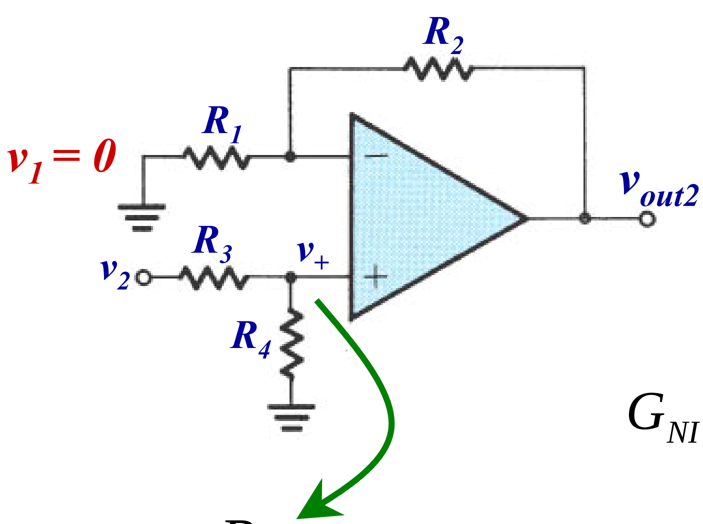
$v_2 = 0$

$$G_I \equiv \frac{v_{out1}}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$v_{out1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1$$

Amplificador diferença

2) Consideremos agora a configuração não-inversora (entrada v_2), curto-circuitando desta vez v_1:



$$v_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

$$v_{out2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_+$$

$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

$$G_{NI} \equiv \frac{v_{out2}}{v_2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$v_{out2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

Amplificador diferença

3) Finalmente obtemos v_{out} somando os dois contributos:

$$v_{out} = v_{out1} + v_{out2} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

- **Se escolhermos** $R_3 = R_1$ e $R_4 = R_2$

obtemos $v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_2$

$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1}\left(v_2 - v_1\right) \Rightarrow A_d = \frac{R_2}{R_1}$$

- **Ou seja, o amplificador é mesmo sensível só à diferença v_2 - v_1.**