

Sinais e Sistemas Electrónicos



Capítulo 5: Amplificadores operacionais (parte 2)



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



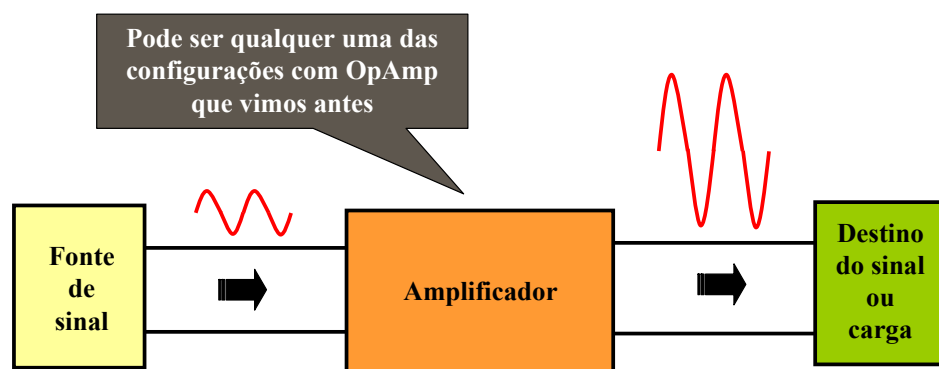
Sinais e Sistemas Electrónicos – 2024/2025

Sumário

- Resistência de entrada e resistência de saída num amplificador de tensão;
- Resistências de entrada e de saída das configurações inversora e não-inversora;
- Outras configurações do OpAmp
 - Seguidor de tensão;
 - Utilidade do seguidor de tensão;
 - Amplificador somador;
 - Amplificadores integrador e diferenciador;
 - OpAmp como comparador.

Resistências de entrada e de saída de amplificadores

Fonte de sinal, amplificador e carga

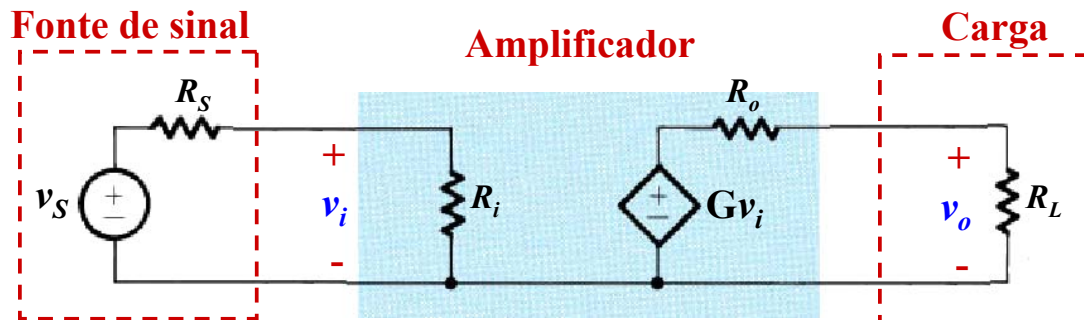


- Numa cadeia de amplificação como esta interessa sempre **maximizar a eficiência com que o sinal é transferido...**

- ... da fonte de sinal para a entrada do amplificador, e
- ... da saída do amplificador para a carga.

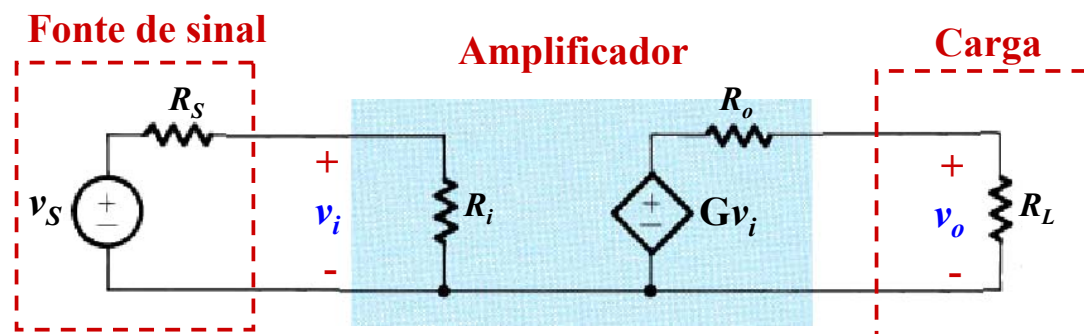
Cadeia de amplificação: equivalente de Thévenin

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



- No que se segue admitimos que o sinal a transferir da fonte de sinal para a carga é um *sinal em tensão*.

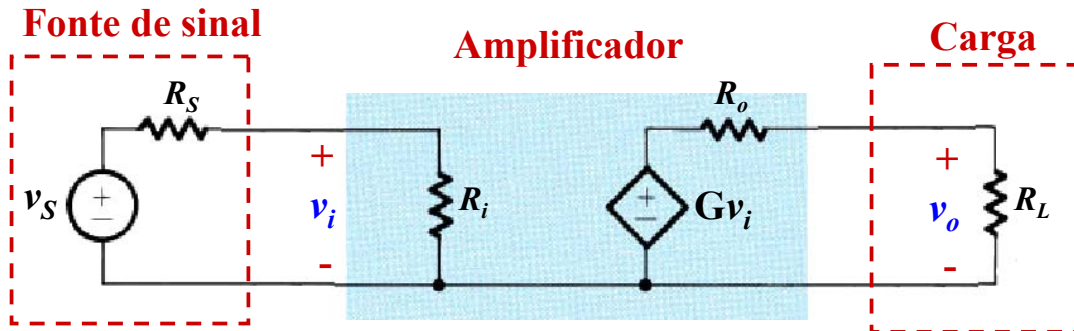
Máxima eficiência...



- 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!



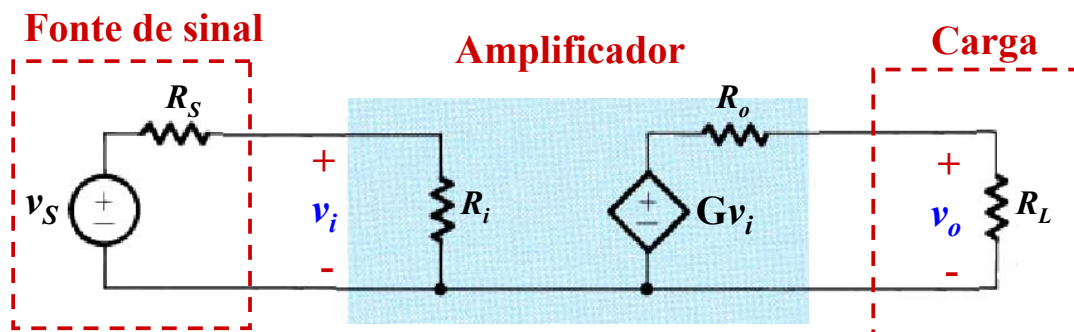
- A tensão que aparece efectivamente entre os terminais de entrada do amplificador é:

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

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

$$v_i = 0.83v_S$$

Eficiência da entrada do amplificador



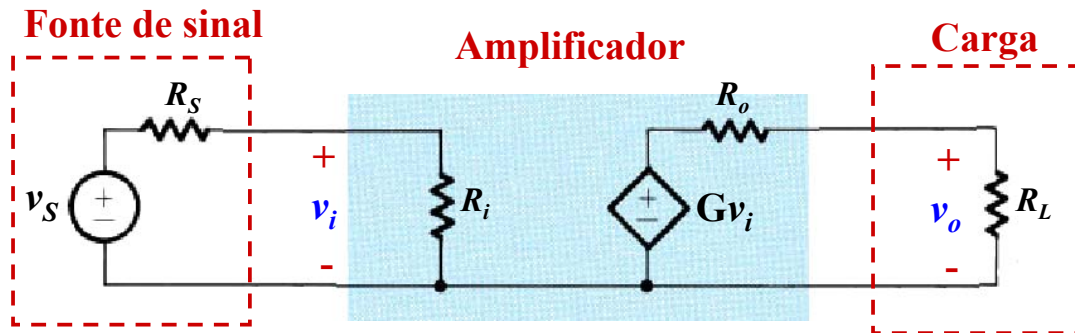
- Para termos $v_i \approx v_S$, como é pretendido, precisamos de ter R_i muito elevado.

Em concreto deveremos ter $R_i \gg R_S$:

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

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:

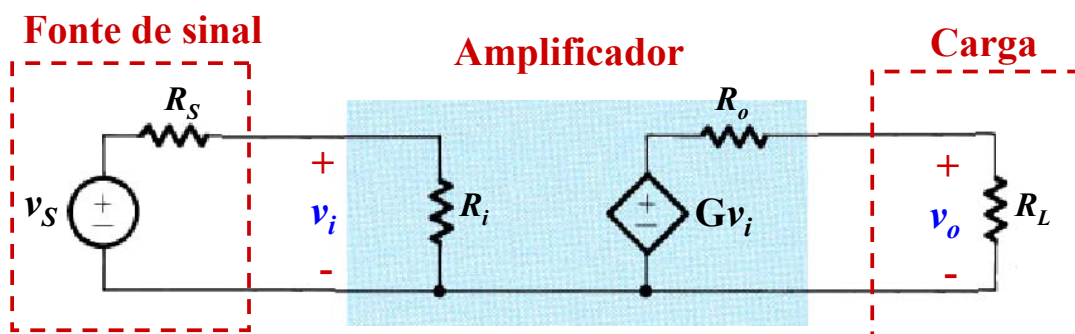
$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} Gv_i$$

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

$$v_o = 0.09Gv_i$$

➤ 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.

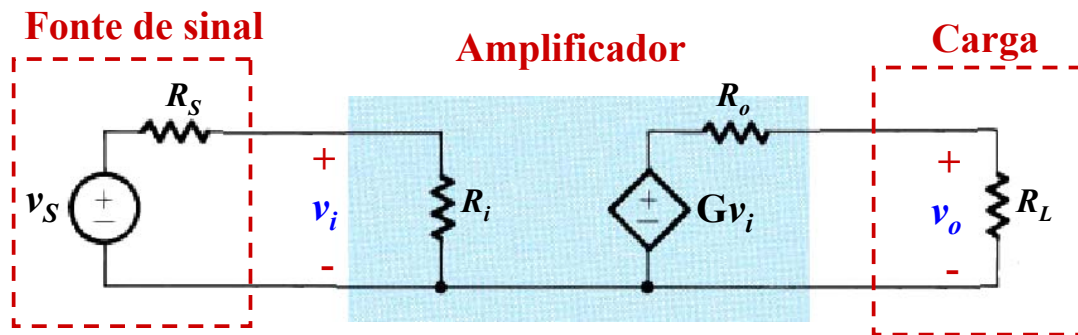
Em concreto deveremos ter $R_o \ll R_L$:

$$v_o = \frac{1}{1 + \frac{R_o}{R_L}} Gv_i \quad \text{se } R_o \ll R_L, \quad \text{então } v_o \approx Gv_i$$

Conclusão: Máxima eficiência do amplificador

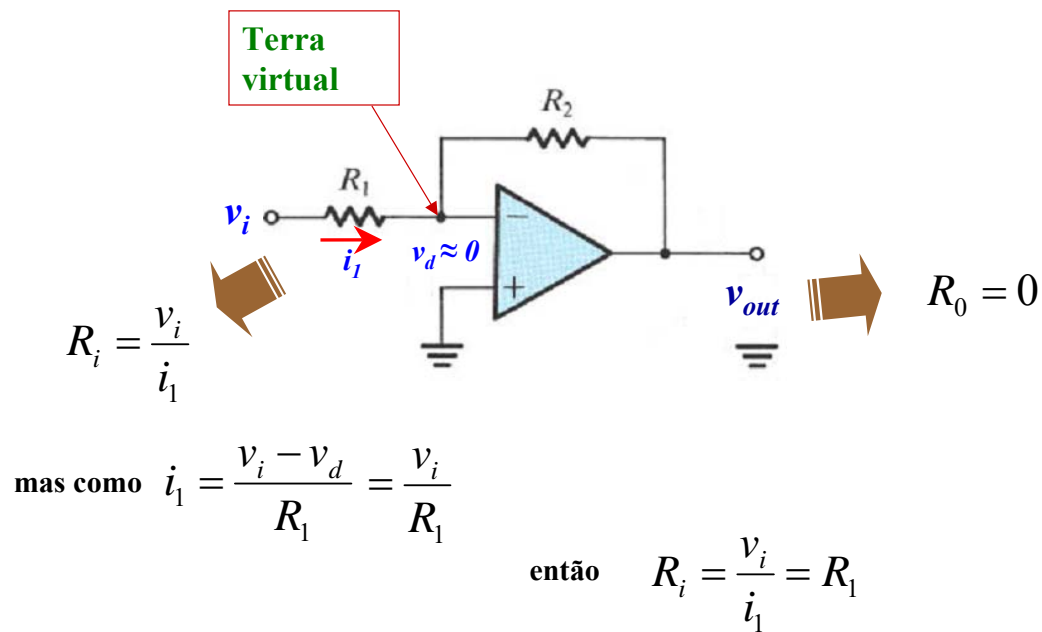
- Para maximizar a eficiência do acoplamento de sinal na entrada e na saída, um **amplificador de tensão** deve apresentar:

$$R_i \gg R_S \quad e \quad R_o \ll R_L$$

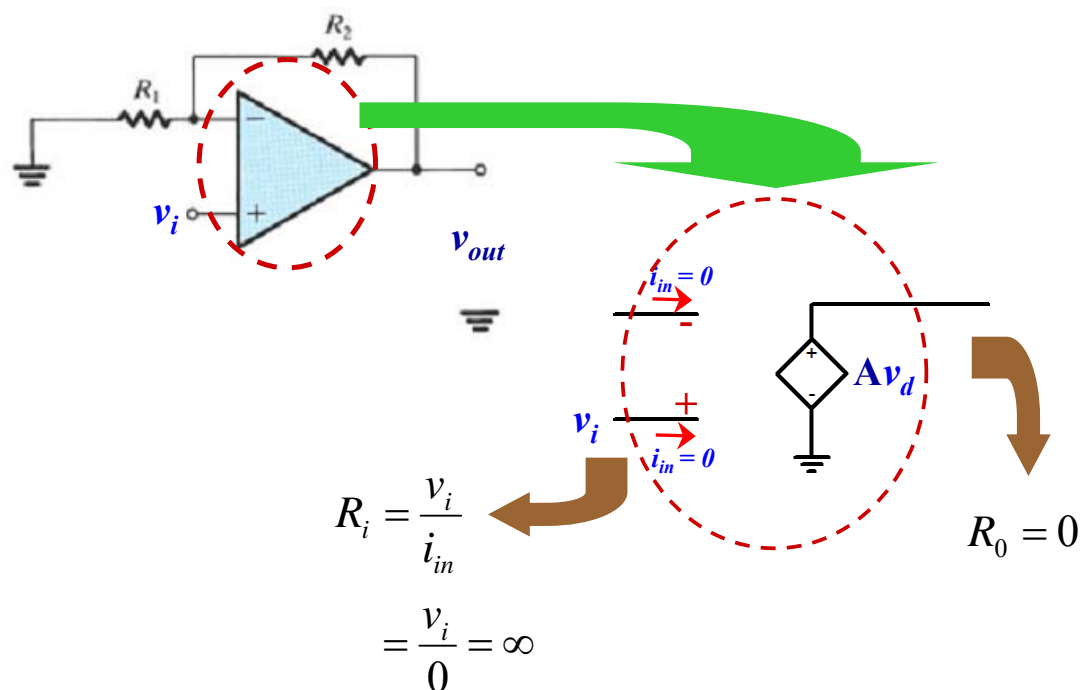


Resistências de entrada (R_i) e de saída (R_o) das configurações inversora e não-inversora

R_i e R_o na configuração **inversora**

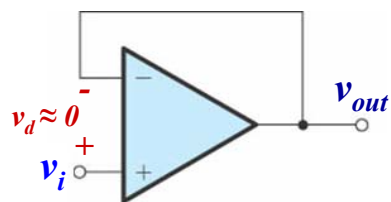


R_i e R_o na configuração **não-inversora**



Seguidor de tensão

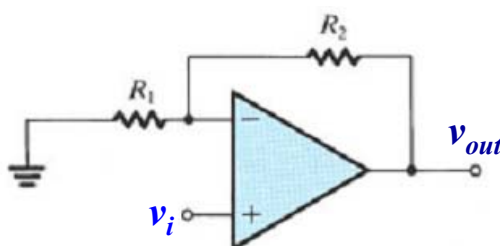
Seguidor de tensão ou *buffer*



$$v_{out} = v_i$$

- Saída **segue** a entrada!

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



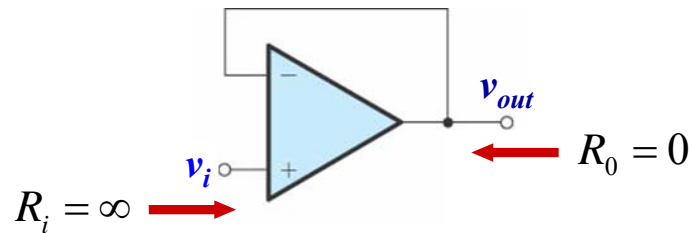
$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- Se $R_1 = \infty$ e $R_2 = 0 \dots$

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

Seguidor de tensão

- Mas que utilidade poderá ter um circuito com $\text{ganho} = 1$?



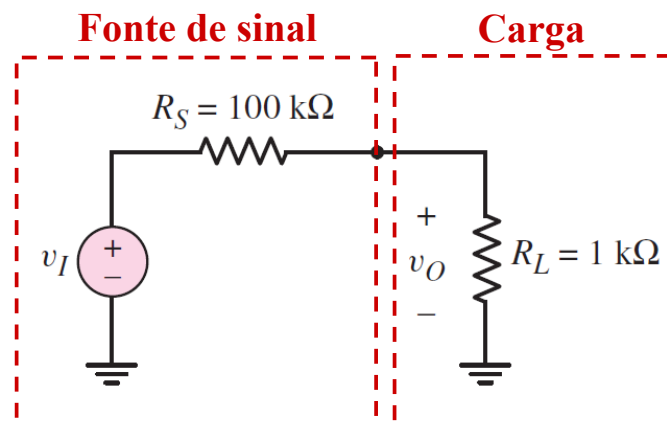
- Tal como a configuração não-inversora, este circuito também apresenta $R_i = \infty$ e $R_o = 0$, sendo útil quando queremos ligar um circuito com **resistência de saída elevada** a outro com **resistência de entrada baixa**.

Utilidade do seguidor de tensão

- Suponhamos uma fonte de sinal ligada a uma carga;
- Para conseguirmos maximizar a eficiência do acoplamento entre a fonte e a carga (de forma a ter $v_o \approx v_i$), é necessário que:

$$R_L \gg R_S$$

o que não é o caso.

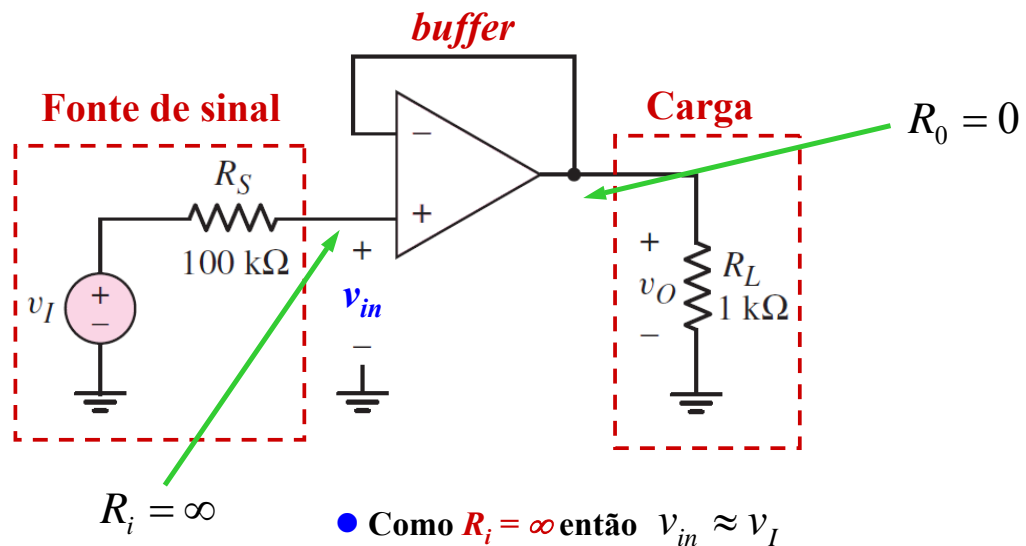


$$v_o = \frac{1K}{1K + 100K} v_I \approx 0.01 v_I$$

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:

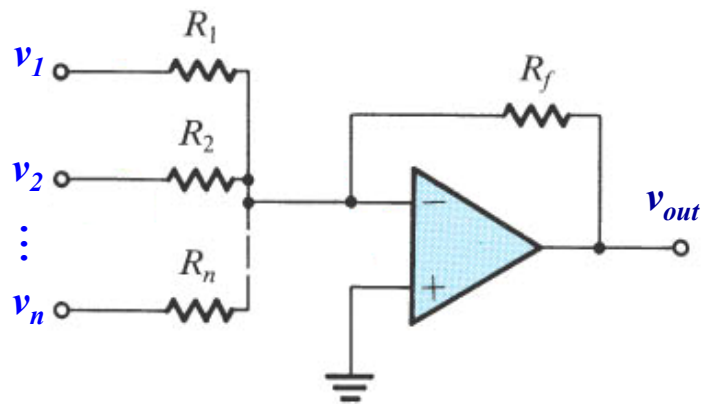


- Como $R_i = \infty$ então $v_{in} \approx v_I$

- Como $R_0 = 0$ então $v_O \approx v_I$

Amplificador somador

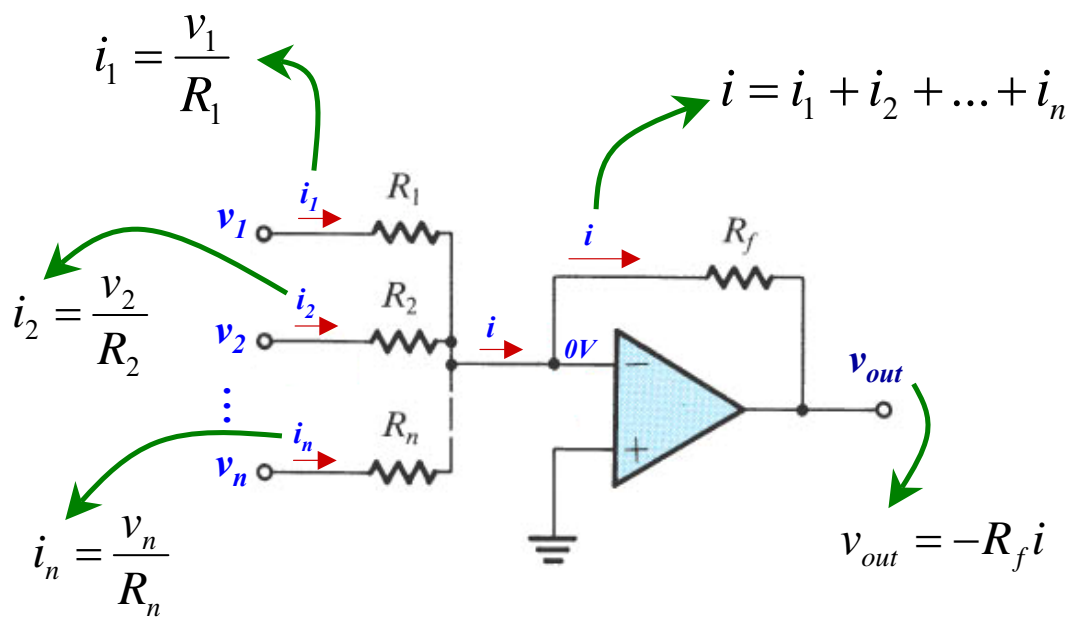
Amplificador somador



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

- Saída é uma soma ponderada das tensões de entrada.

Amplificador somador



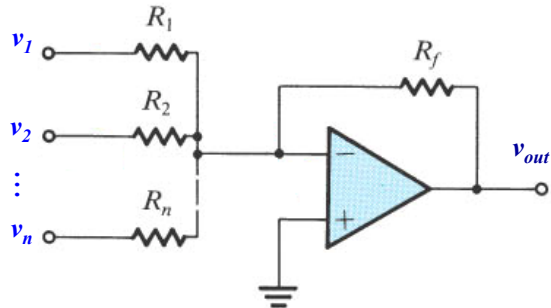
Amplificador somador

- Conjugando as expressões anteriores obtemos

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

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

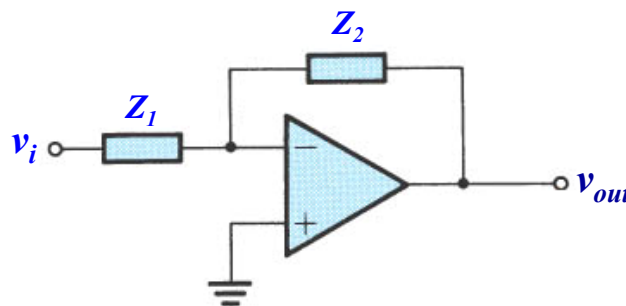
- Coeficientes de cada entrada podem ser ajustados individualmente.



Amplificadores integrador e diferenciador

Configurações inversoras com impedâncias

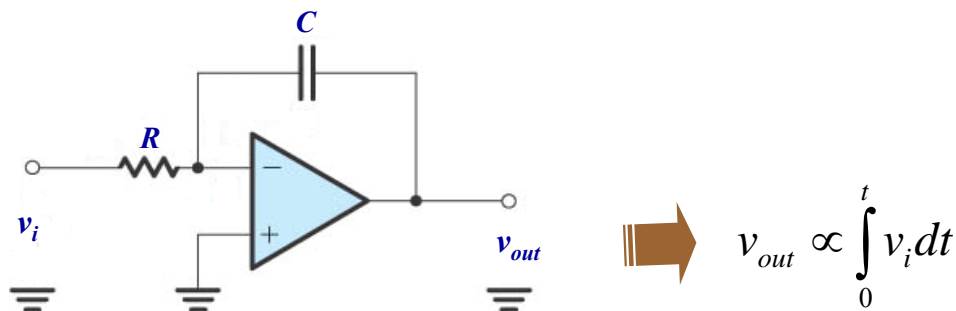
- Se substituirmos, na configuração inversora, as resistências R_1 e R_2 por impedâncias (de condensadores ou bobinas) obtemos amplificadores com **ganho dependente da frequência**.



$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

Configuração integradora

- Aqui a resistência de *feedback* R_2 é substituída por um condensador.
- A tensão de saída é proporcional ao integral do sinal de entrada.



Análise da configuração integradora

- Aplicando KVL à malha de entrada

$$-v_i + R \cdot i + 0 = 0$$

$$\Leftrightarrow i = \frac{v_i}{R}$$

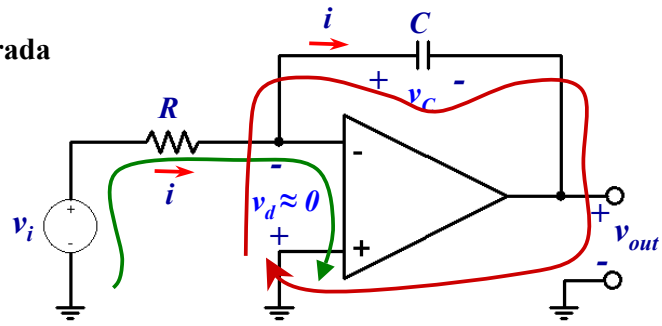
- Para a malha de saída:

$$v_C + v_{out} = 0 \Leftrightarrow v_{out} = -v_C = -\left(\frac{1}{C} \int_0^t i dt + v_C(0)\right)$$

- Substituindo a equação anterior

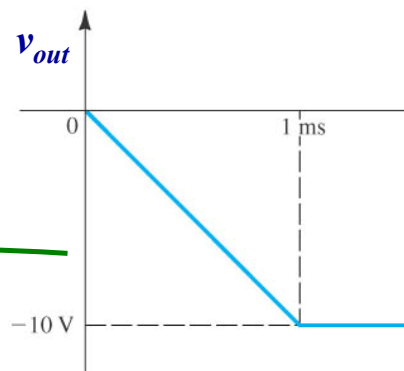
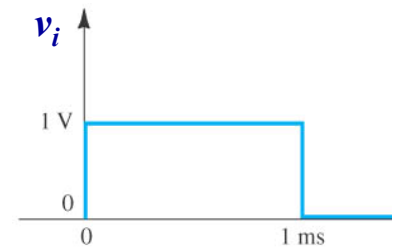
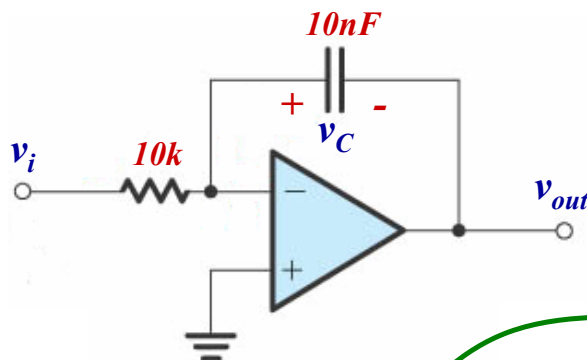
$$v_{out} = -\left(\frac{1}{RC} \int_0^t v_i dt + v_C(0)\right)$$

- **RC é a constante de tempo de integração.**



Configuração integradora

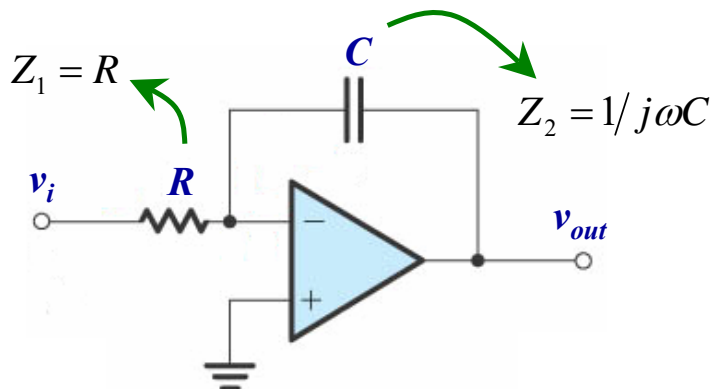
- Uma aplicação: conversão de ondas quadradas em triangulares.



$$v_{out} = -10^4 \int_0^t v_i dt$$

Assumindo $v_C(0) = 0V$

Configuração integradora

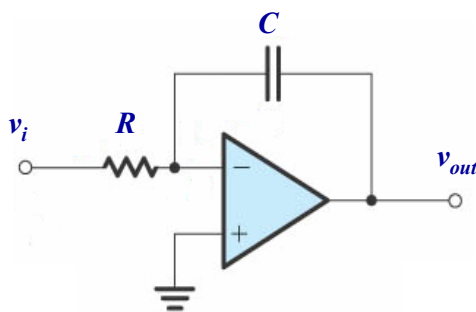


$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{1}{j\omega CR}$$

- Ganho do circuito diminui com a frequência - circuito é um **filtro passa baixo**;
- Ganho é unitário para $\omega_l = 1/RC$.

Configuração integradora



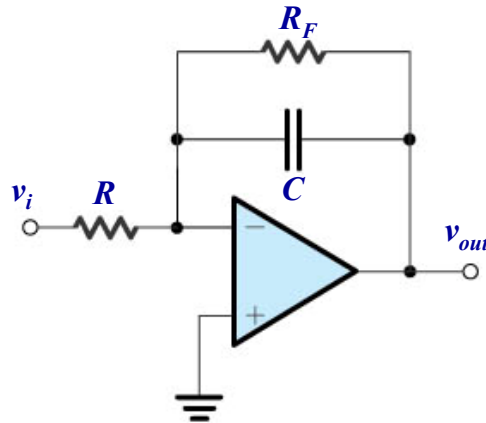
$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{1}{j\omega CR}$$

$$\left| \frac{v_{out}}{v_i} \right|_{\omega=0} = \frac{1}{\omega CR} = \infty$$

- Em DC ($\omega = 0$) o ganho do integrador **é infinito** (condensador é um circuito aberto).
- Ou seja, qualquer tensão DC na entrada, por pequena que seja, produz, mais tarde ou mais cedo, a **saturação da saída**.

Configuração integradora

- Para evitar este problema é costume usar-se o integrador com uma resistência de valor elevado em paralelo com o condensador.



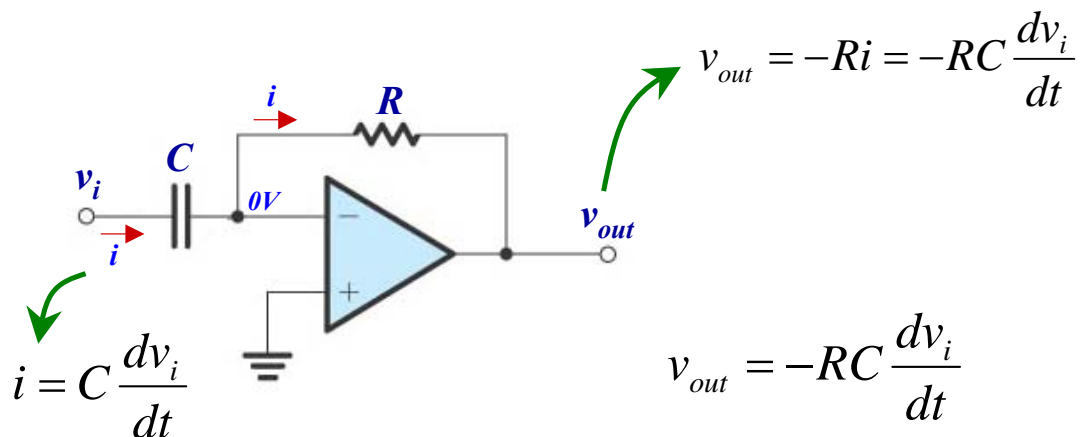
- Agora o ganho em DC é

$$\left| \frac{v_{out}}{v_i} \right|_{\omega=0} = \frac{R_F}{R}$$

- ... no entanto, assim, o integrador já não é ideal.

Configuração diferenciadora

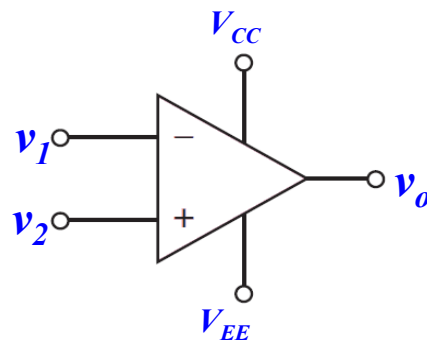
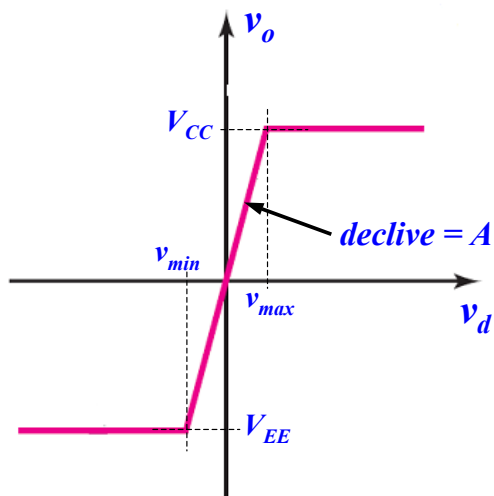
- Trocando a resistência e o condensador obtemos um circuito que produz uma saída proporcional à derivada do sinal de entrada.



OpAmp como comparador

Comparador

- Devido ao ganho muito elevado, um OpAmp pode ser usado em **loop aberto** (sem feedback) como **comparador de tensões**.



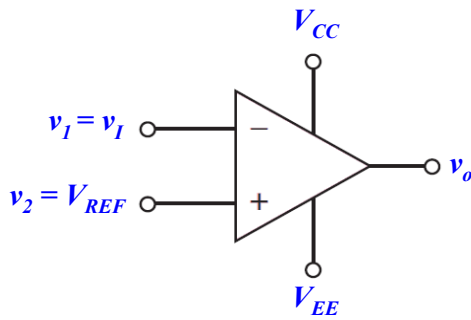
Se: $V_{CC} = -V_{EE} = 15V$

$$A = 10^5$$

$$v_{\max} - v_{\min} = \frac{30}{10^5} = 0.3mV$$

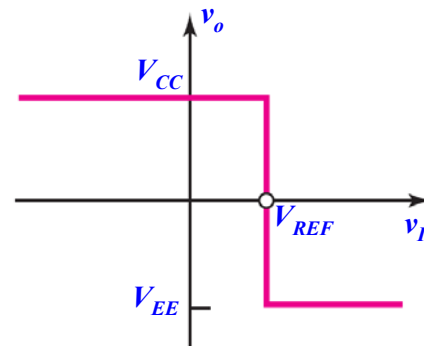
- Portanto a região linear pode considerar-se quase vertical.

Comparador

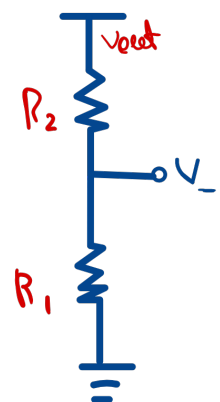
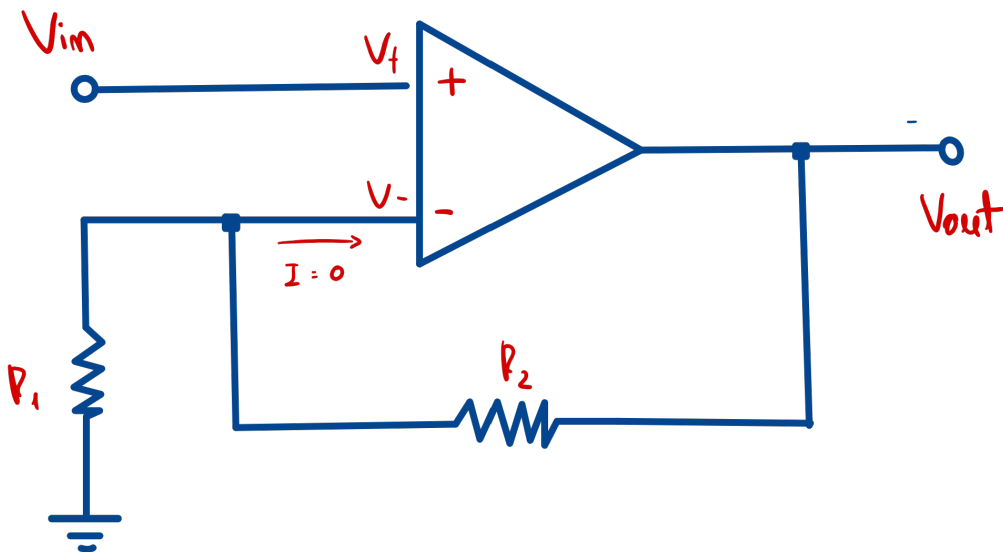


$$v_o = \begin{cases} V_{CC} & \text{se } v_I < V_{REF} \\ V_{EE} & \text{se } v_I > V_{REF} \end{cases}$$

- Circuito tem uma saída binária resultante da comparação das duas tensões de entrada.



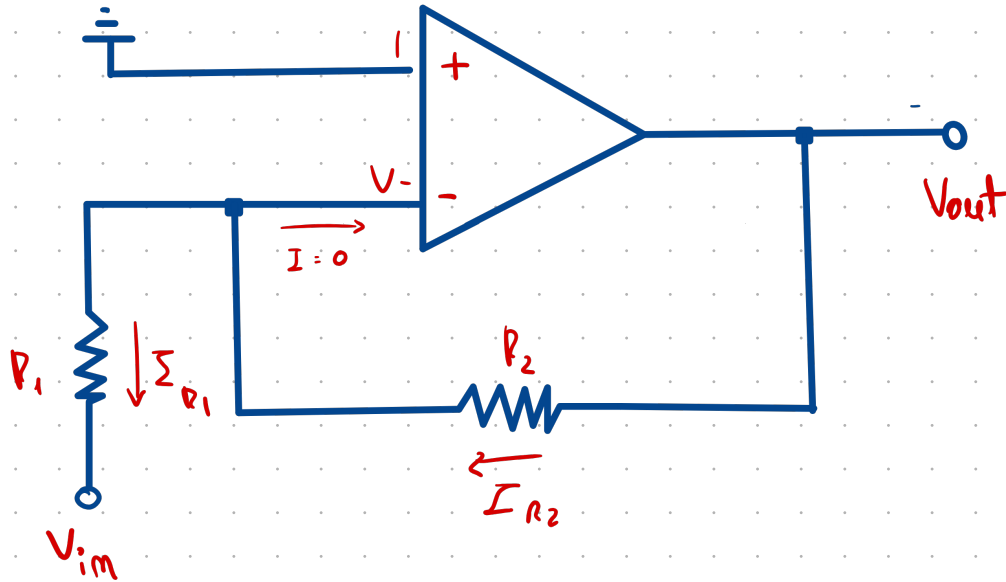
NOTA: assumindo que as tensões de saturação são V_{CC} e V_{EE} , o que nem sempre acontece!



$$\Rightarrow V_- = V_{out} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} \right)$$

$$\Leftrightarrow V_{im} = V_{out} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \Leftrightarrow \text{Ganho} = \frac{V_{out}}{V_{im}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Se quiseremos mudar a fase?



$$I_{R_1} = \frac{V}{R_1} = \frac{0 - V_{im}}{R_1} = -\frac{V_{im}}{R_1}$$

$$I_{R_2} = \frac{V_{out} - 0}{R_2} = \frac{V_{out}}{R_2}$$

$$\Rightarrow \text{Ganho} = \frac{V_{out}}{V_{im}} = -\frac{R_2}{R_1}$$