

# *Sinais e Sistemas Electrónicos*



## **Capítulo 6: Amplificadores operacionais (parte 2)**



Ernesto Martins  
[evm@ua.pt](mailto:evm@ua.pt)  
DETI (gab. 4.2.38)  
Universidade de Aveiro



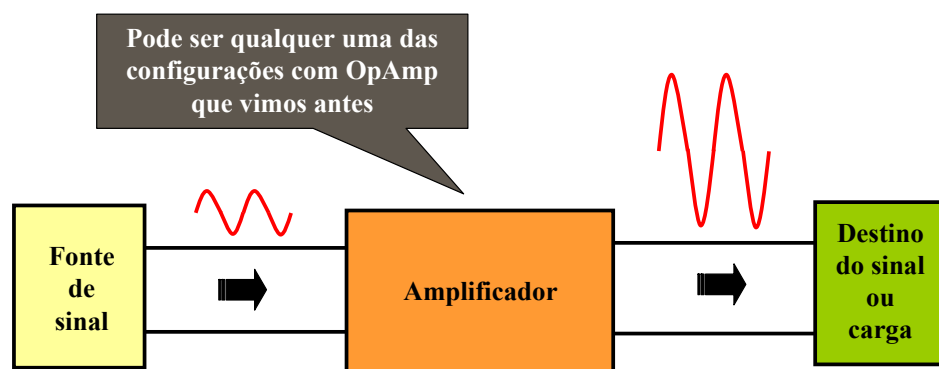
Sinais e Sistemas Electrónicos – 2023/2024

### **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

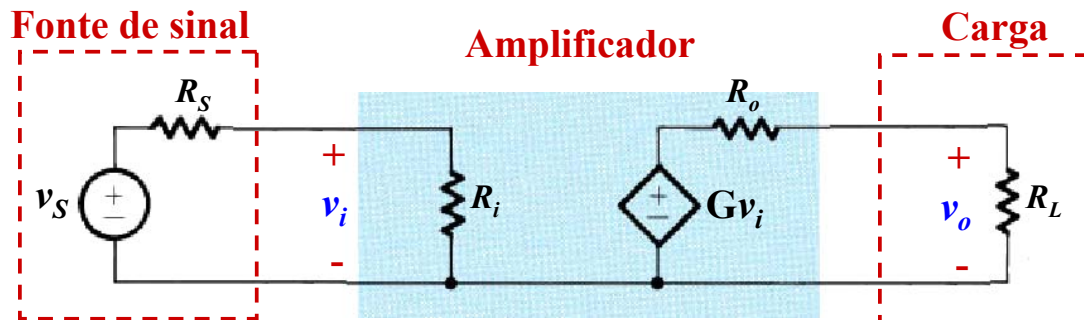


- Numa cadeia de amplificação como esta interessa sempre **maximizar a eficiência com que o sinal é transferido...**

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

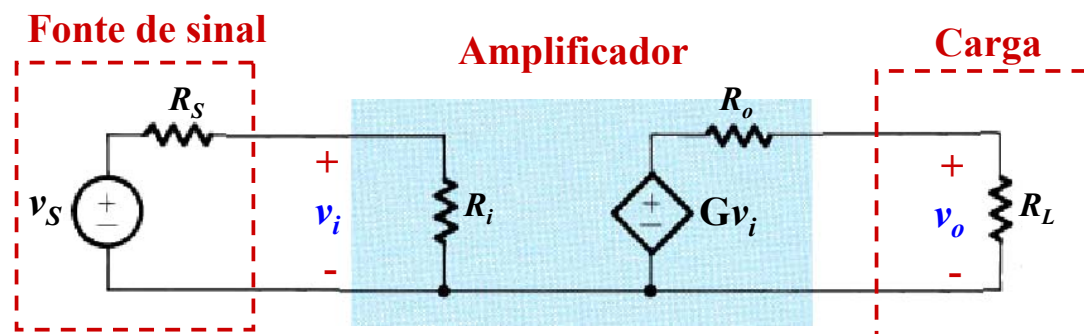
## Cadeia de amplificação: equivalente de Thévenin

- 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*.

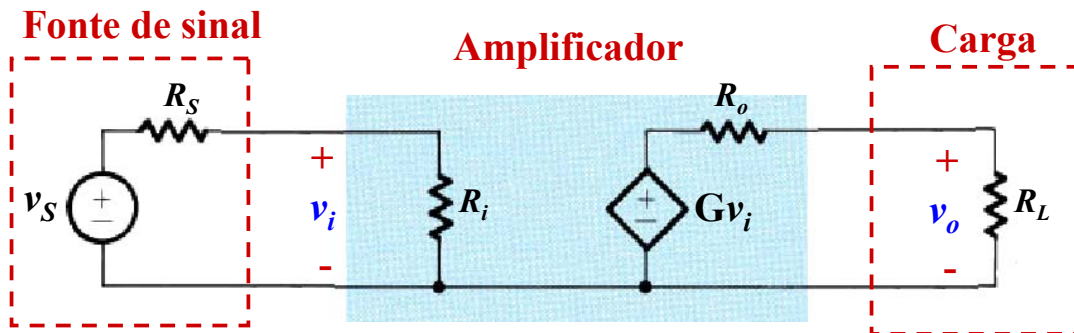
## Máxima eficiência...



- 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!



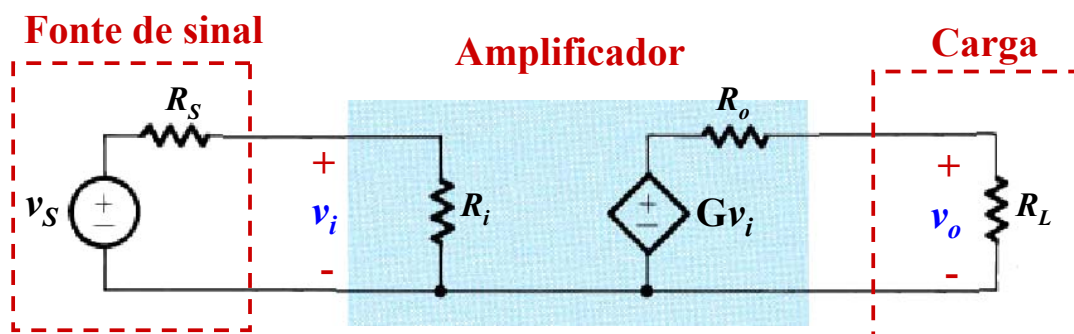
- A tensão que aparece efectivamente entre os terminais de entrada do amplificador é:

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

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

$$v_i = 0.83v_S$$

## Eficiência da entrada do amplificador



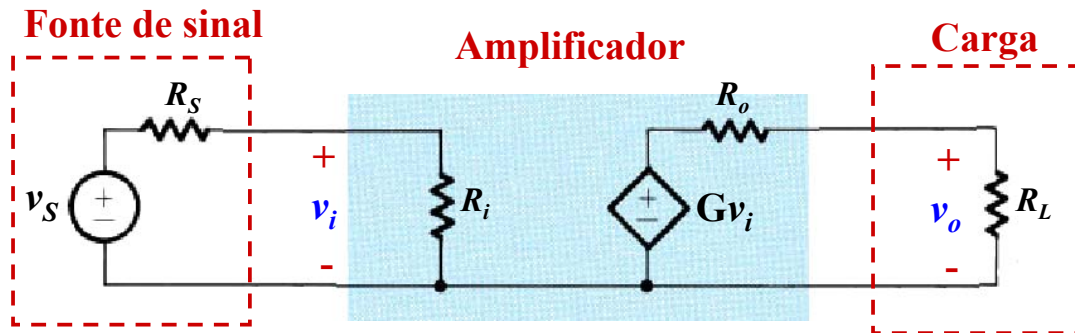
- Para termos  $v_i \approx v_S$ , como é pretendido, precisamos de ter  $R_i$  muito elevado.

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:

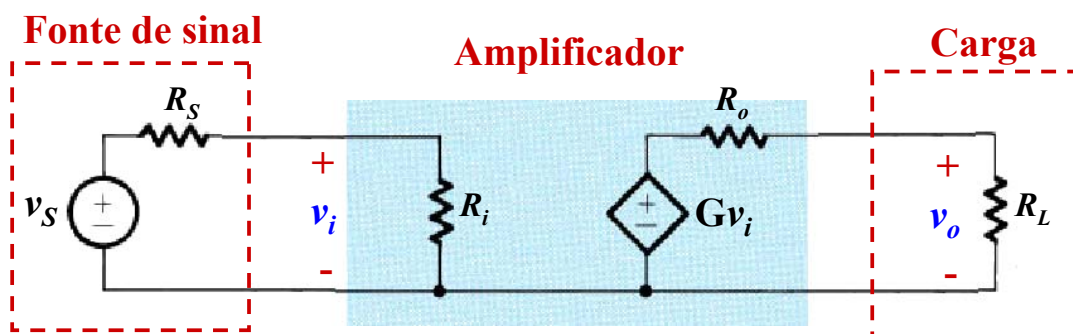
$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} Gv_i$$

➤ 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.

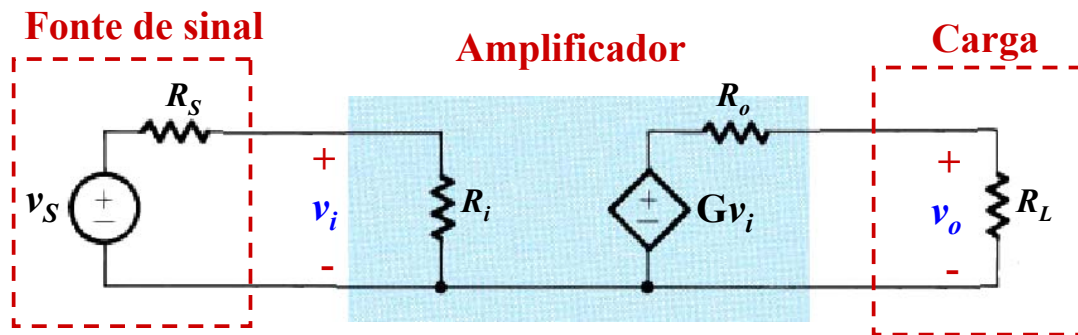
Em concreto deveremos ter  $R_o \ll R_L$ :

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

## Conclusão: Máxima eficiência do amplificador

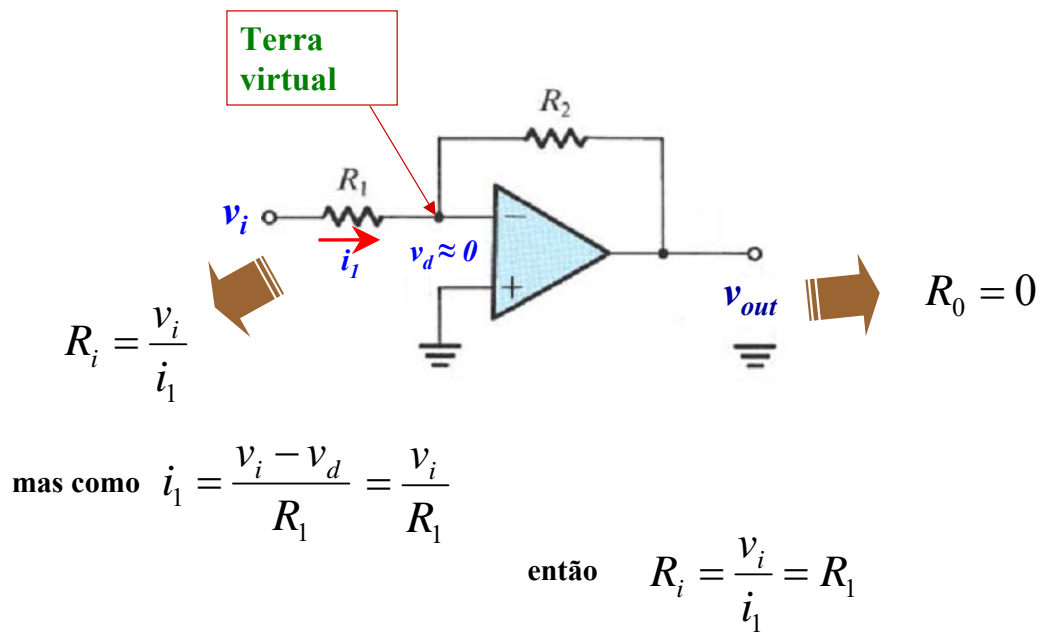
- Para maximizar a eficiência do acoplamento de sinal na entrada e na saída, um **amplificador de tensão** deve apresentar:

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

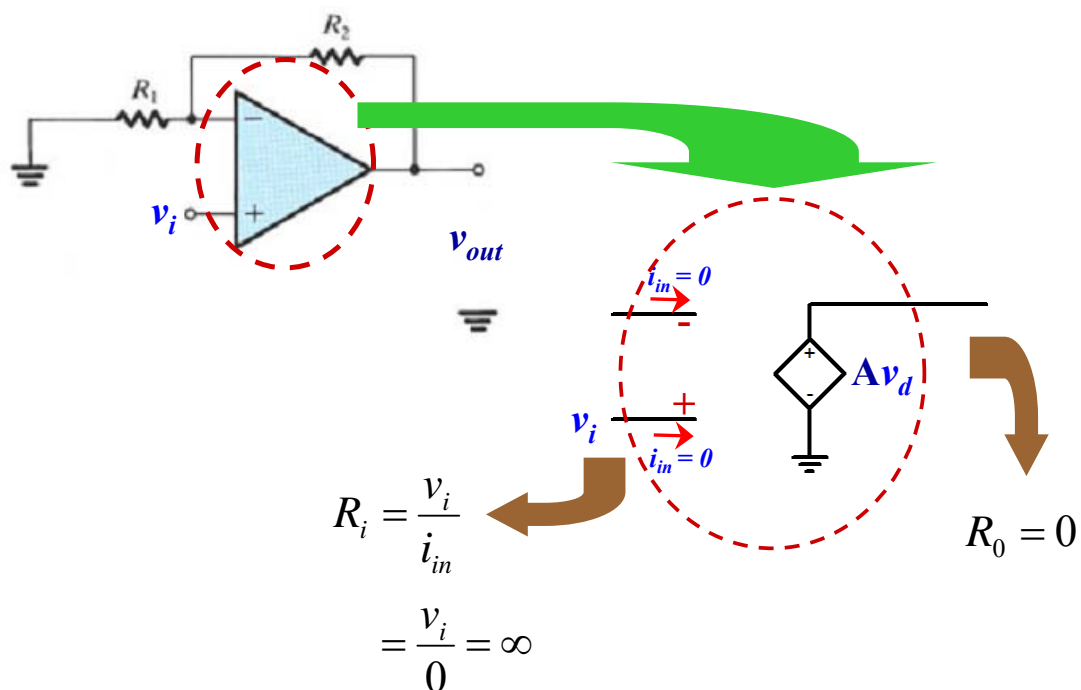


## Resistências de entrada ( $R_i$ ) e de saída ( $R_o$ ) das configurações inversora e não-inversora

## $R_i$ e $R_o$ na configuração **inversora**

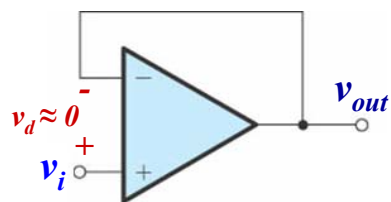


## $R_i$ e $R_o$ na configuração **não-inversora**



## Seguidor de tensão

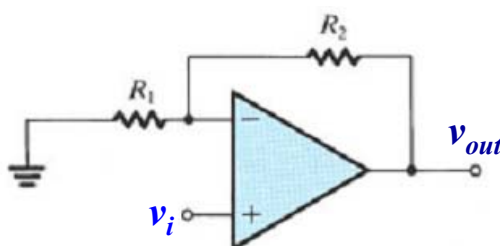
## Seguidor de tensão ou *buffer*



$$v_{out} = v_i$$

- Saída **segue** a entrada!

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



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

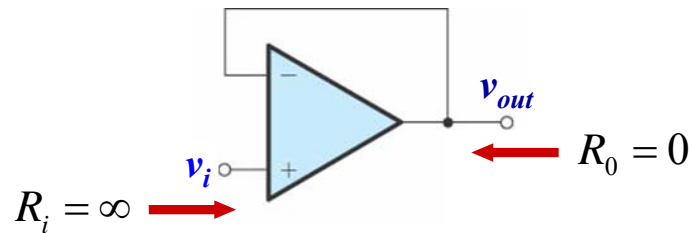
- Se  $R_1 = \infty$  e  $R_2 = 0 \dots$

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



## Seguidor de tensão

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



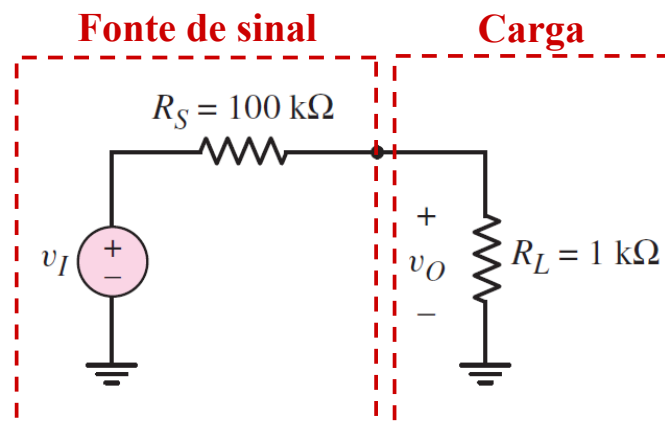
- Tal como a configuração não-inversora, este circuito também apresenta  $R_i = \infty$  e  $R_o = 0$ , sendo útil quando queremos ligar um circuito com **resistência de saída elevada** a outro com **resistência de entrada baixa**.

## 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.

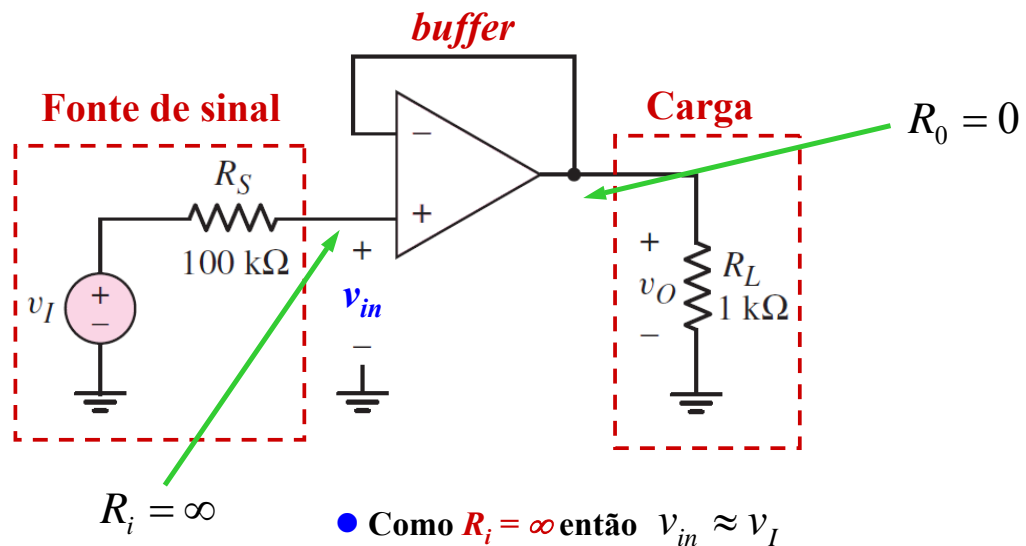


$$v_o = \frac{1K}{1K + 100K} v_I \approx 0.01 v_I$$

$v_o$  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:

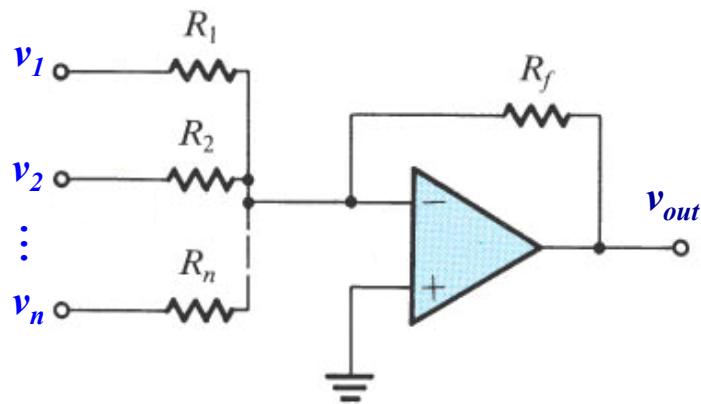


- Como  $R_i = \infty$  então  $v_{in} \approx v_I$

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

## Amplificador somador

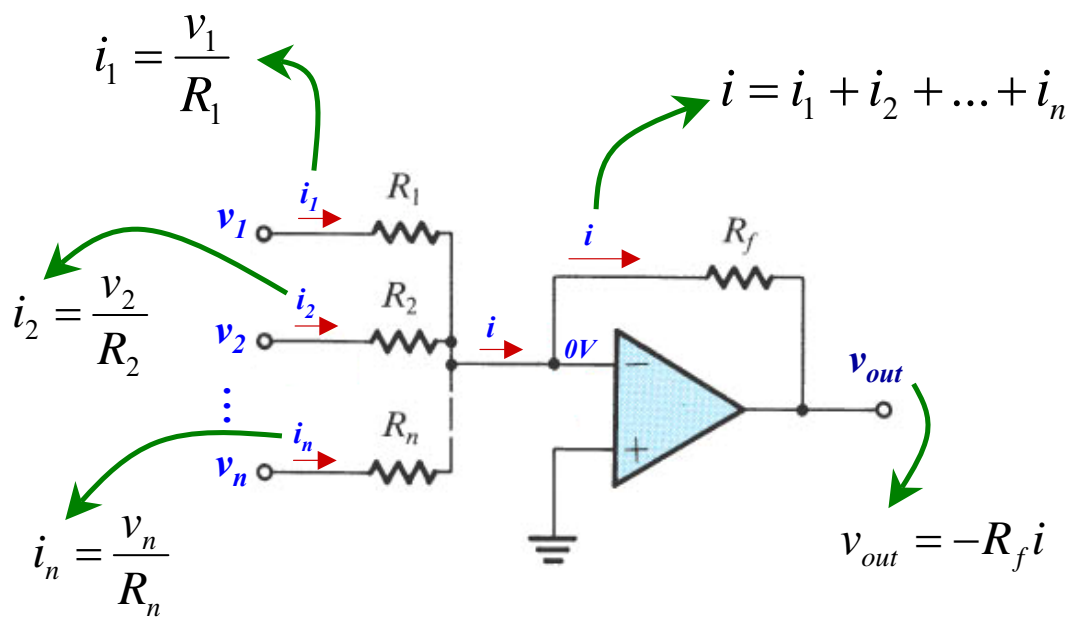
## Amplificador somador



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

- Saída é uma soma ponderada das tensões de entrada.

## Amplificador somador



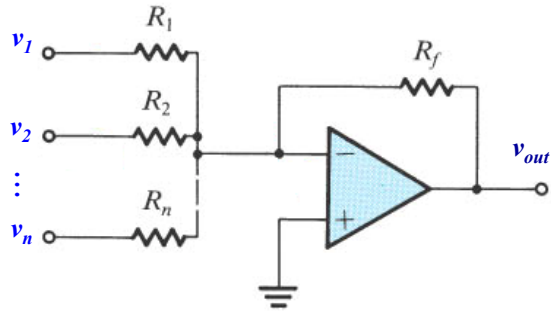
## Amplificador somador

- 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;

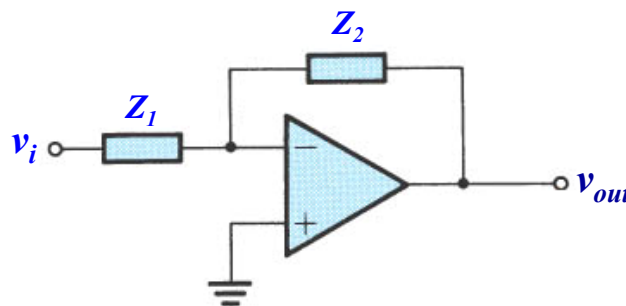
- Coeficientes de cada entrada podem ser ajustados individualmente.



## Amplificadores integrador e diferenciador

## Configurações inversoras com impedâncias

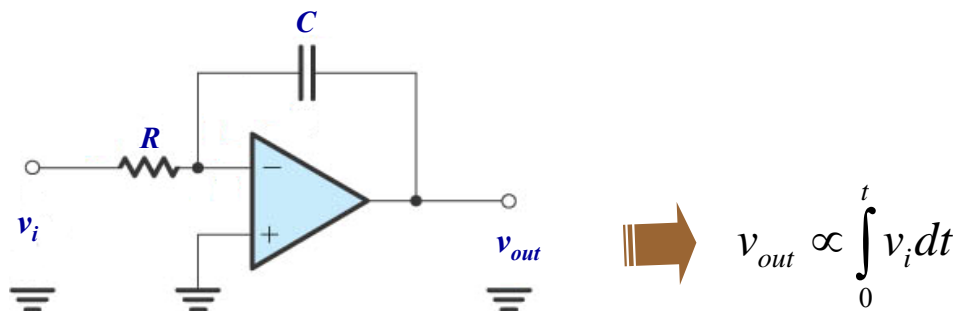
- Se substituirmos, na configuração inversora, as resistências  $R_1$  e  $R_2$  por impedâncias (de condensadores ou bobinas) obtemos amplificadores com **ganho dependente da frequência**.



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

## 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

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

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

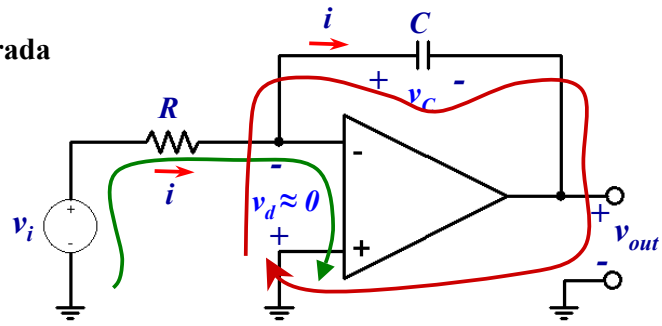
- Para a malha de saída:

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

- Substituindo a equação anterior

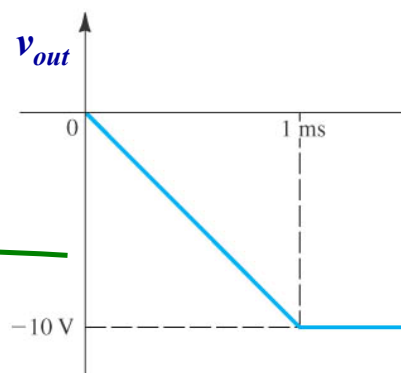
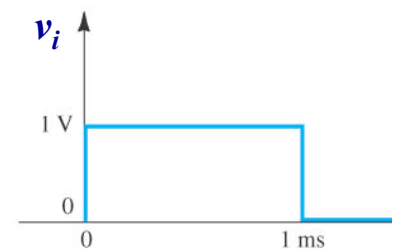
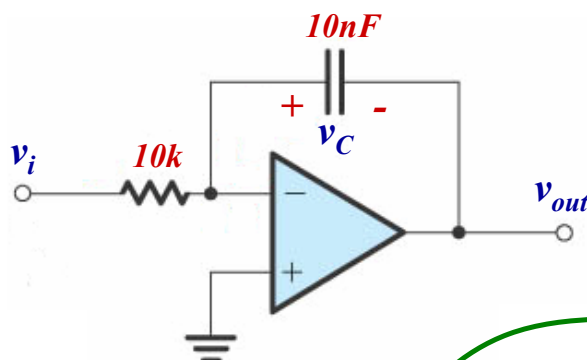
$$v_{out} = -\left(\frac{1}{RC} \int_0^t v_i dt + v_C(0)\right)$$

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



## Configuração integradora

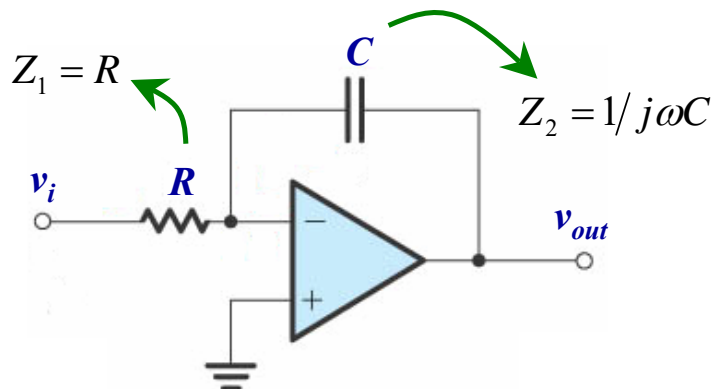
- Uma aplicação: conversão de ondas quadradas em triangulares.



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

Assumindo  $v_C(0) = 0V$

## Configuração integradora

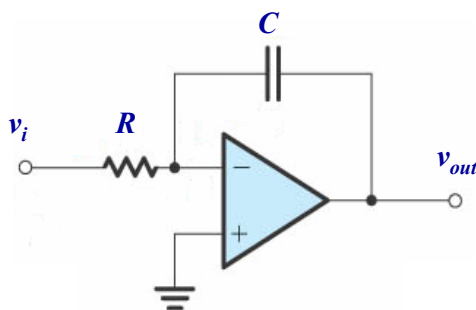


$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

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

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

## Configuração integradora



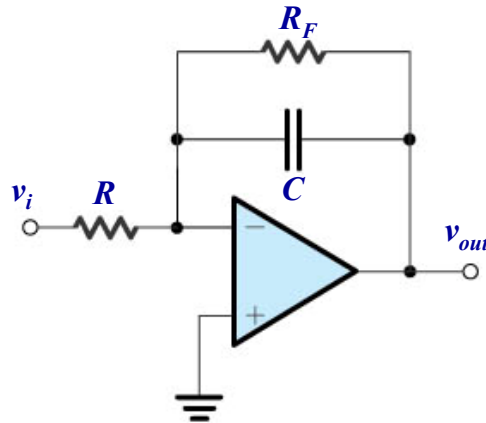
$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{1}{j\omega CR}$$

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

- 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.



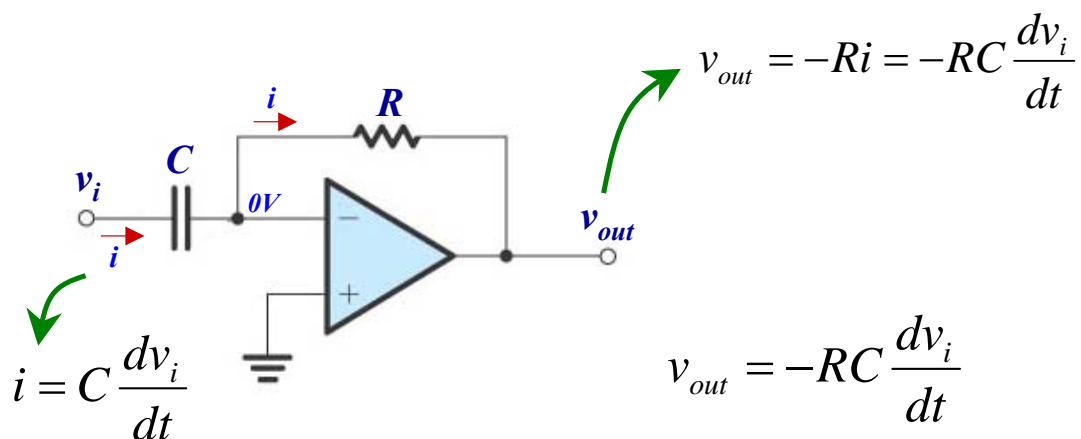
- Agora o ganho em DC é

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

- ... 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.

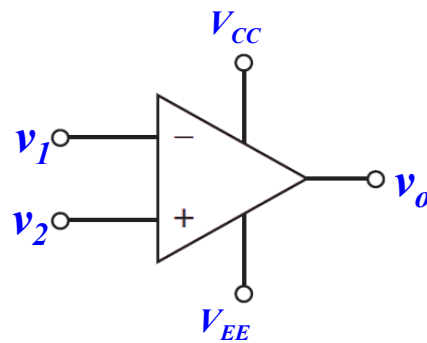
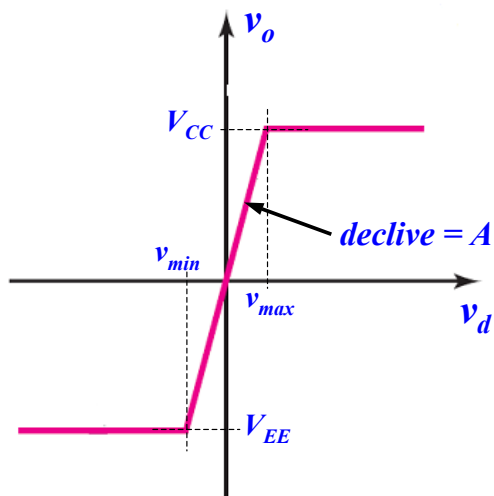




## OpAmp como comparador

### Comparador

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



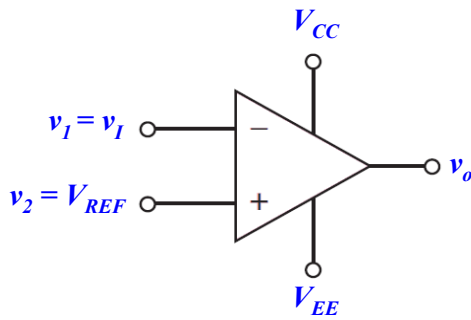
Se:  $V_{CC} = -V_{EE} = 15V$

$$A = 10^5$$

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

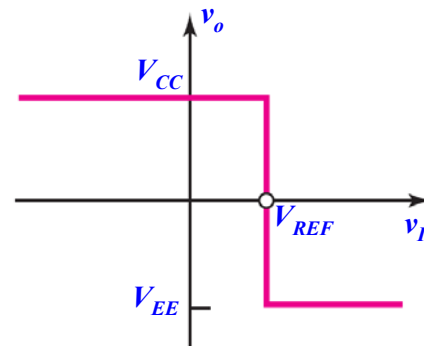
- Portanto a região linear pode considerar-se quase vertical.

## Comparador



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

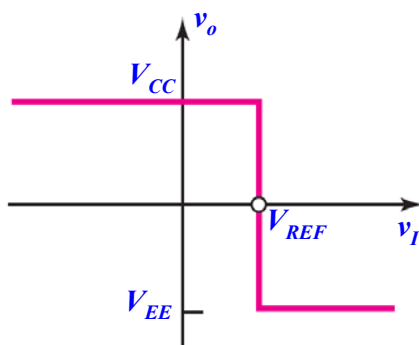
- Circuito tem uma saída binária resultante da comparação das duas tensões de entrada.



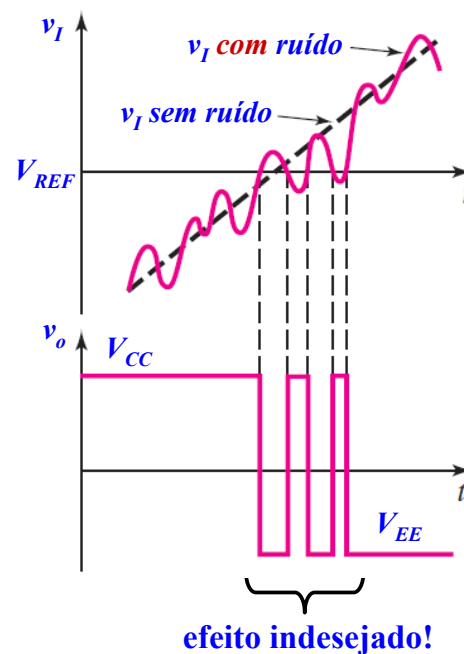
**NOTA:** assumindo que as tensões de saturação são  $V_{CC}$  e  $V_{EE}$ , o que nem sempre acontece!

## Comparador com *feedback* regenerativo

- Os comparadores em loop aberto não são aconselhados quando o sinal  $v_I$  têm muito ruído.



- Isto pode acontecer, por exemplo, se o sinal  $v_I$  vier dum sensor de temperatura.

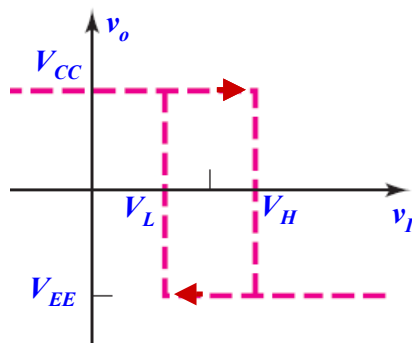


## Comparador com *feedback* regenerativo

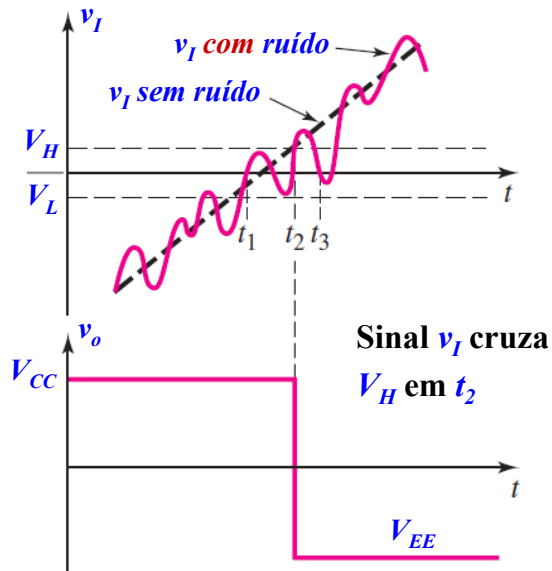
- Precisamos dum comparador com dois níveis de comparação:

$V_H$  – quando  $v_I$  sobe;

$V_L$  – quando  $v_I$  desce



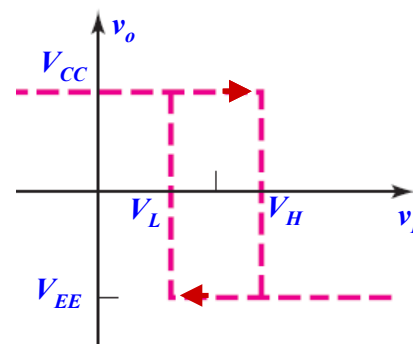
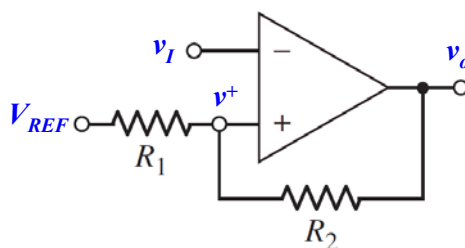
$V_H - V_L$  : histerese



Assim temos uma comutação *limpa*!

## Comparador com *feedback* regenerativo

- Este comparador obtém-se usando **feedback positivo**. A tensão de comparação depende do estado da saída.



- $V_H$  e  $V_L$  obtêm-se por **Sobreposição...**

$$v^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

$$V_H = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$V_L = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{EE}$$

## Comparador com *feedback* regenerativo - projeto

- Pretendemos obter a característica com os valores indicados.

Dos resultados anteriores...

$$V_H - V_L = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{CC} - V_{EE})$$

donde se tira  $R_2/R_1 = 89$

e.g.  $R_2 = 82K + 6K8$ ;  $R_1 = 1K$

$$V_A = \frac{V_H + V_L}{2} \quad \text{Usando as expressões anteriores: } V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF}$$

$$\text{donde } V_{REF} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_A = \left(1 + \frac{1}{89}\right) 3.5 = 3.54V$$

