Sinais e Sistemas Electrónicos

Capítulo 6: Amplificadores operacionais

(parte 2)

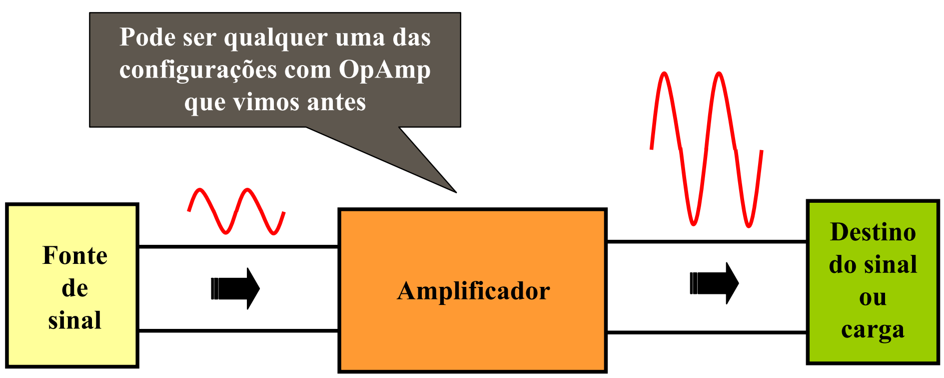
Ernesto Martins
evm@ua.pt
DETI (gab. 4.2.38)
Universidade de Aveiro

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

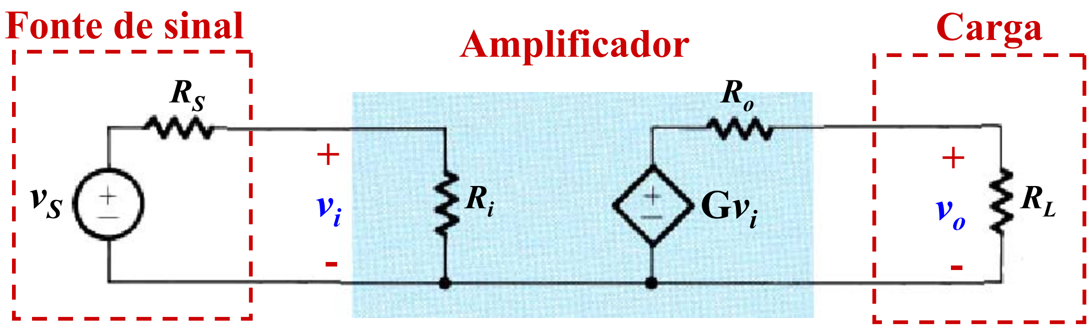
Fonte de sinal, amplificador e carga



- **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.**

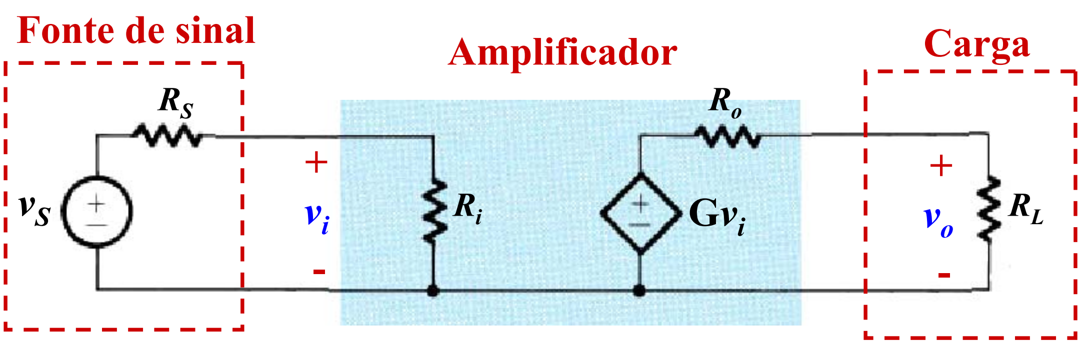
Cadeia de amplificação: equivalente de Thévenin

- **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…

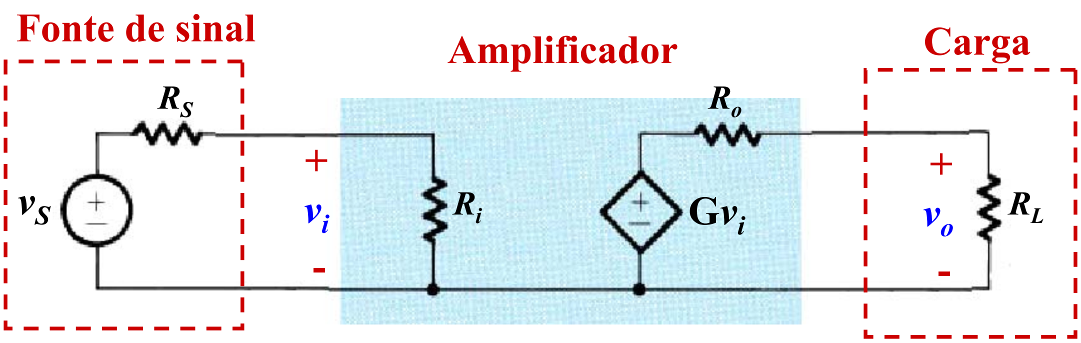


- **A máxima eficiência será conseguida se todo o sinal produzido pela fonte de sinal aparecer na entrada do amplificador. Ou seja se** $v_i = v_s$

- **… 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!



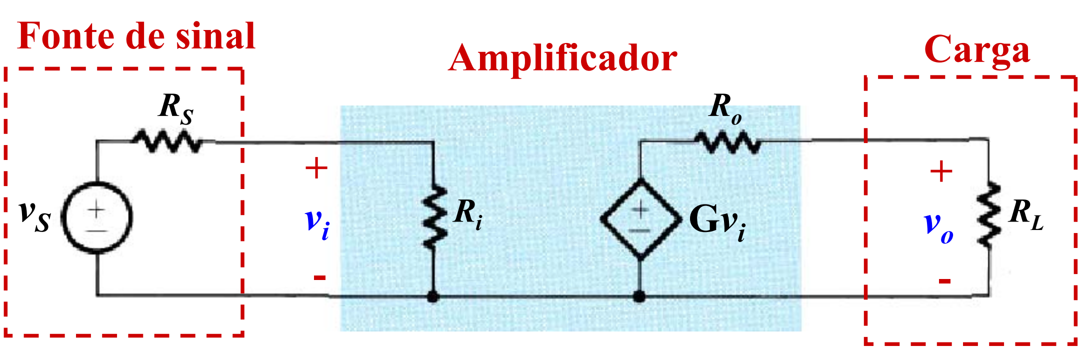
- **A tensão que aparece efectivamente entre os terminais de entrada do amplificador é:**

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

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

$$v_i = 0.83 v_S$$

Eficiência da entrada do amplificador



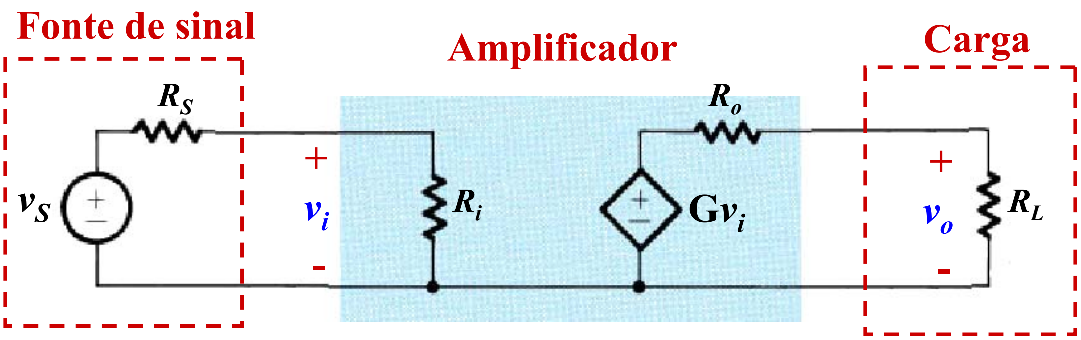
- **Para termos $v_i \approx v_s$, como é pretendido, precisamos de ter R_i muito elevado.**

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:**

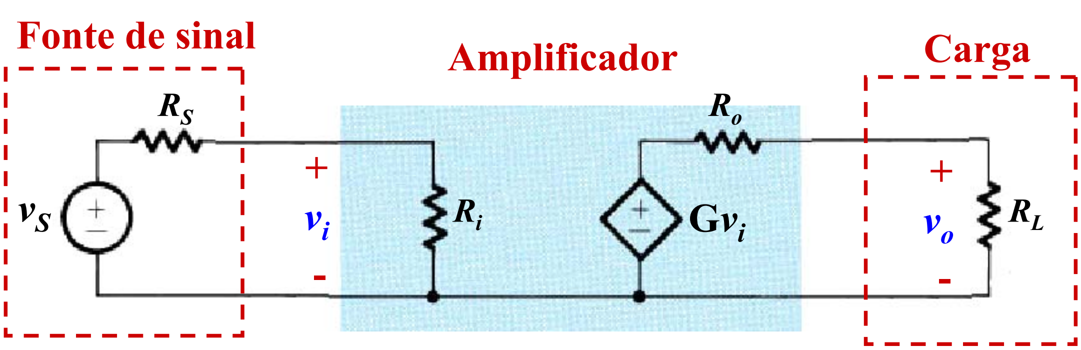
$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} G v_i$$

- **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.**

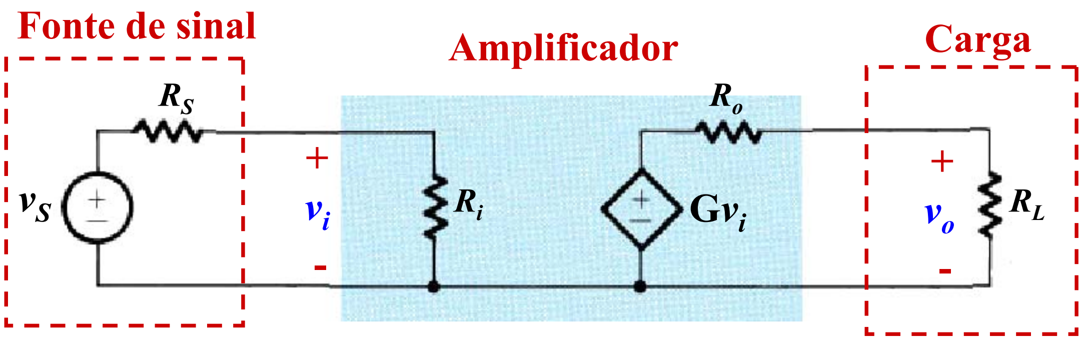
Em concreto deveremos ter $R_o << R_L$:

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

Conclusão: Máxima eficiência do amplificador

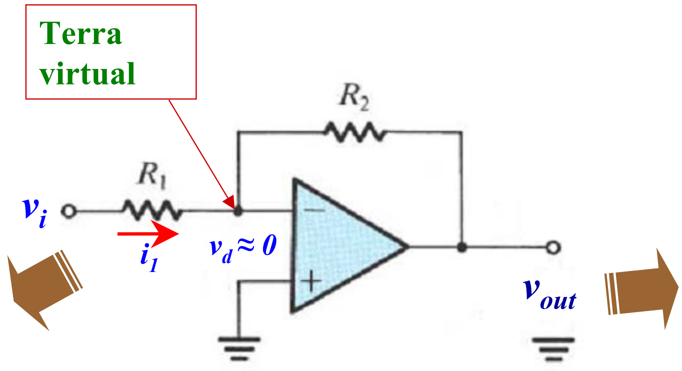
- **Para maximizar a eficiência do acoplamento de sinal na entrada e na saída, um amplificador de tensão deve apresentar:**

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



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

R_i e R_o na configuração inversora



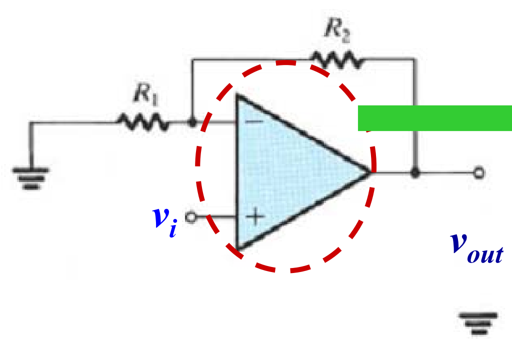
$$R_i = \frac{v_i}{i_1}$$

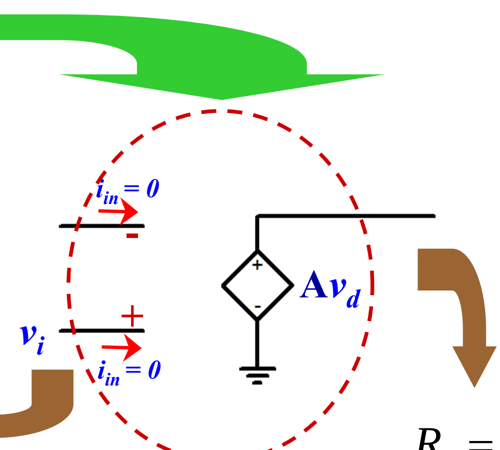
$$R_0 = 0$$

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 R_o na configuração não-inversora





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

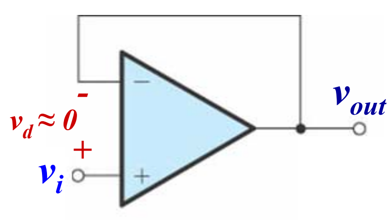
$$= \frac{v_i}{0} = \infty$$

$$R_0 = 0$$

Seguidor de tensão

Sinais e Sistemas Electrónicos – 2021/2022

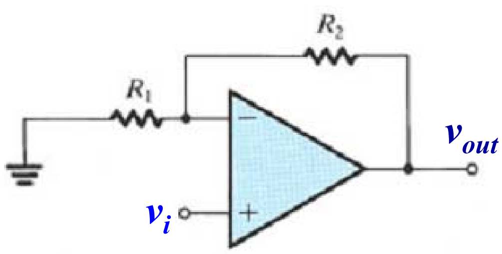
Seguidor de tensão ou *buffer*



$$v_{out} = v_i$$

- **Saída segue a entrada!**

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



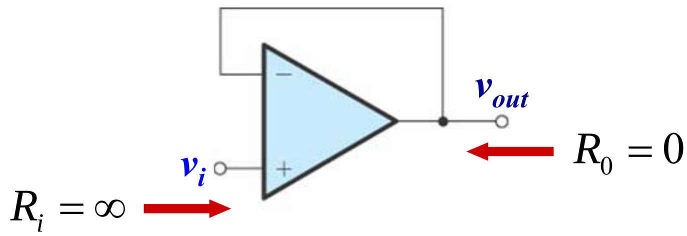
$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- **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.**

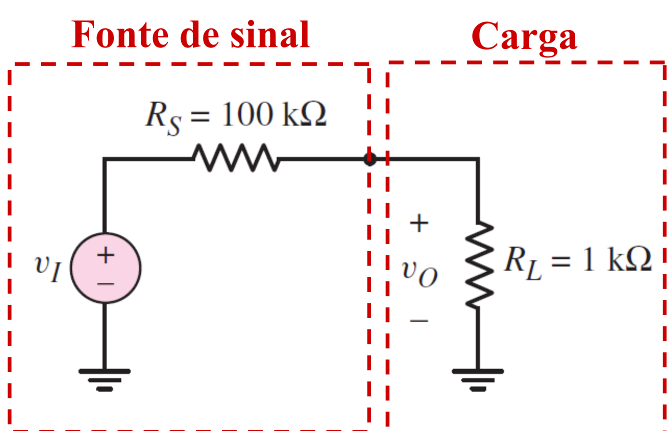
Utilidade do seguidor de tensão

- **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.

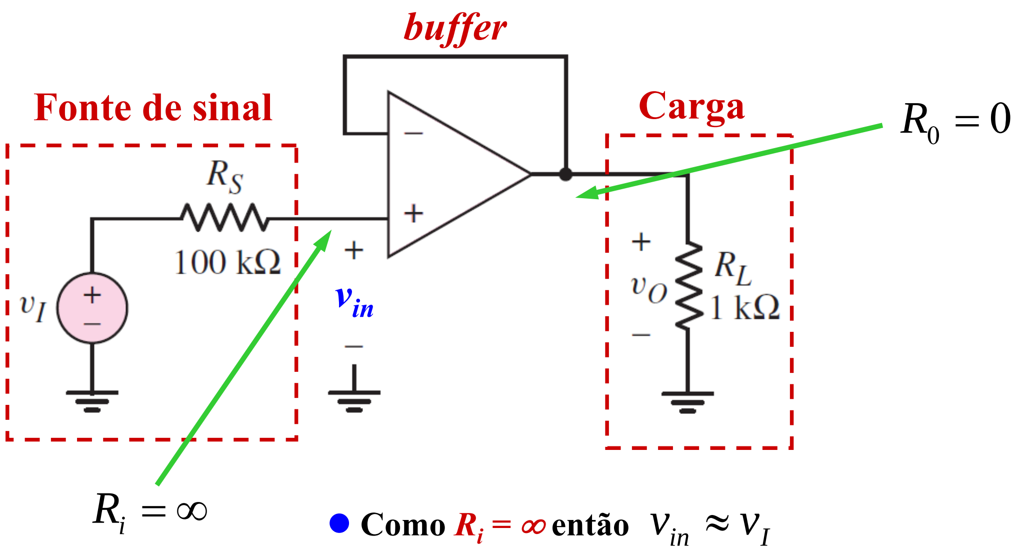


$$v_o = \frac{1K}{1K + 100K} v_I \approx 0.01 v_I$$

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:**

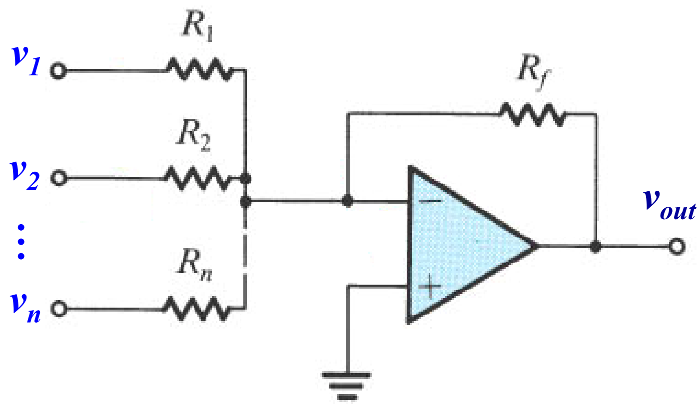


- **Como $R_i = \infty$ então** $v_{in} \approx v_I$

- **Como $R_0 = 0$ então** $v_0 \approx v_I$

Amplificador somador

Amplificador somador



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

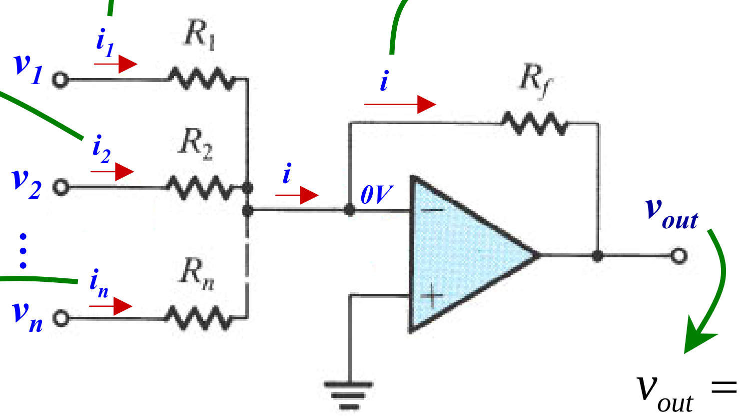
- **Saída é uma soma ponderada das tensões de entrada.**

Amplificador somador

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

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

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



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

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

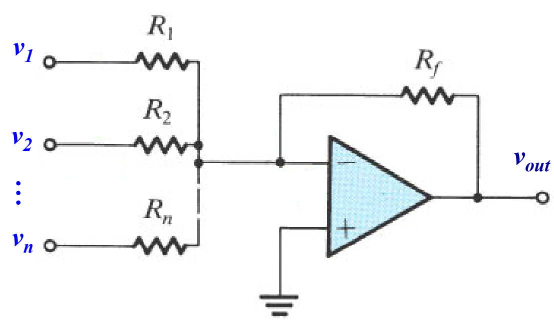
Amplificador somador

- **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;**

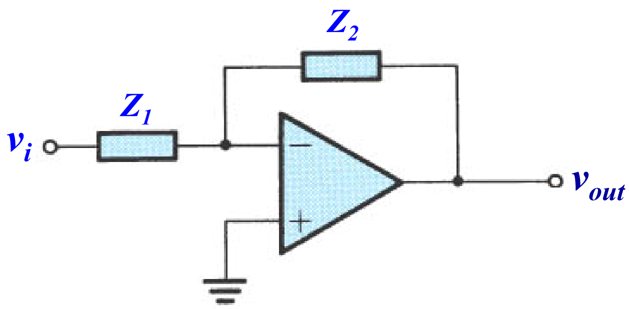
- **Coeficientes de cada entrada podem ser ajustados individualmente.**



Amplificadores integrador e diferenciador

Configurações inversoras com impedâncias

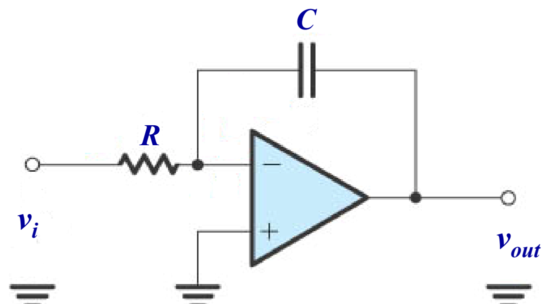
- **Se substituirmos, na configuração inversora, as resistências R_1 e R_2 por impedâncias (de condensadores ou bobinas) obtemos amplificadores com ganho dependente da frequência.**



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

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.**



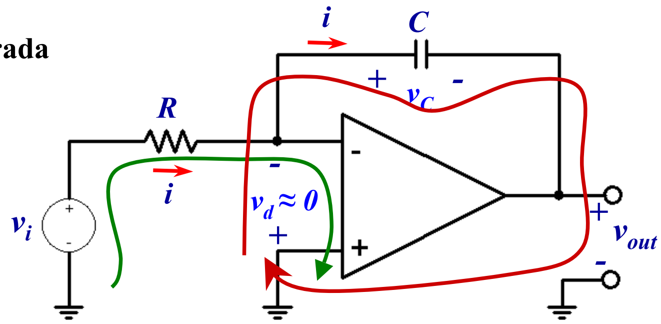
$$v_{out} \propto \int_0^t v_i dt$$

Análise da configuração integradora

- **Aplicando KVL à malha de entrada**

$$-v_i + R.i + 0 = 0$$

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



- **Para a malha de saída:**

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

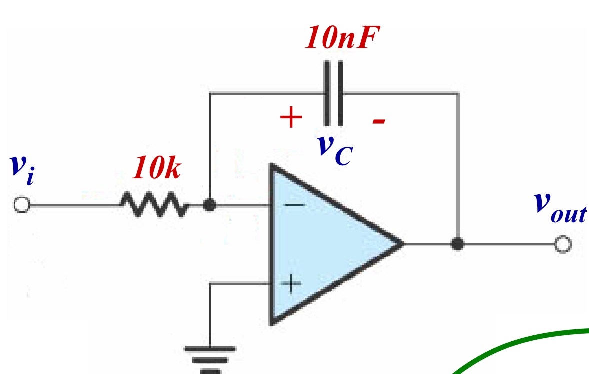
- **Substituindo a equação anterior**

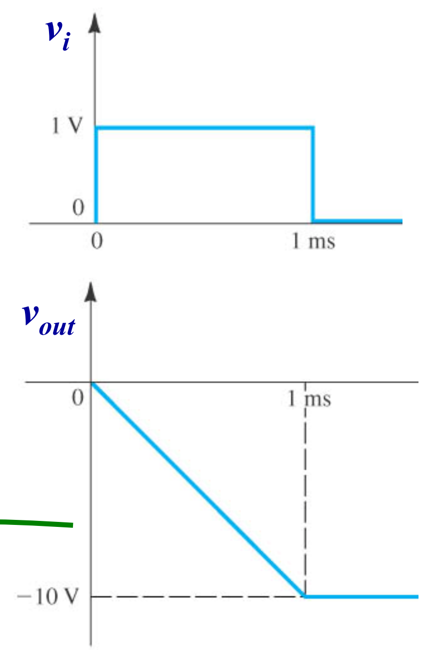
$$v_{out} = -\left(\frac{1}{RC}\int_0^t v_i dt + v_C(0)\right)$$

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

Configuração integradora

- **Uma aplicação: conversão de ondas quadradas em triangulares.**

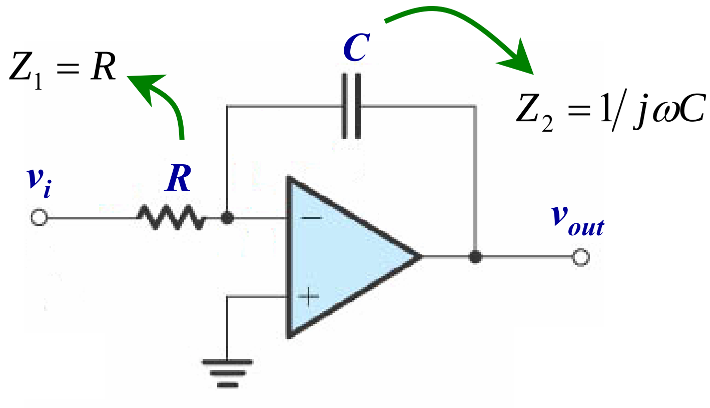




$$v_{out} = -10^4 \int_0^t v_i dt$$

Assumindo $v_C(0) = 0V$

Configuração integradora

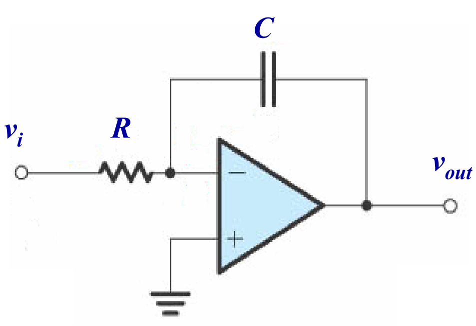


$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

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

- **Ganho do circuito diminui com a frequência - circuito é um filtro passa baixo;**
- **Ganho é unitário para $\omega_1 = 1/RC$.**

Configuração integradora



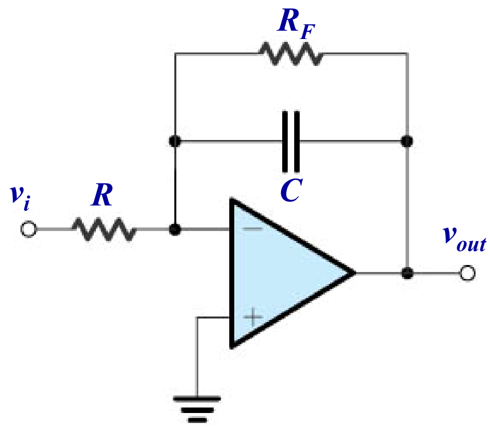
$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{1}{j\omega CR}$$

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

- **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**

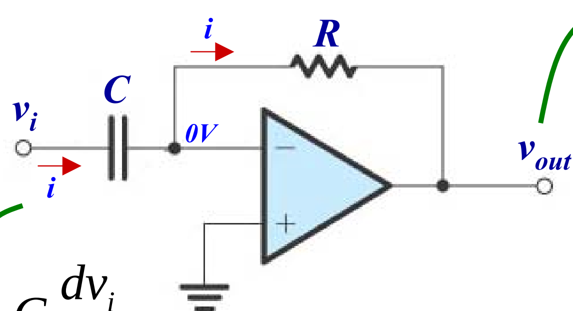
$$\left|\frac{v_{out}}{v_i}\right|_{\omega=0} = \frac{R_F}{R}$$

- **… 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.**

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



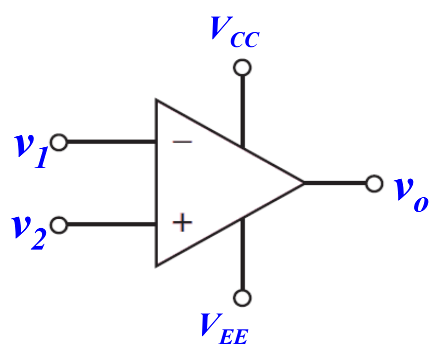
$$i = C\frac{dv_i}{dt}$$

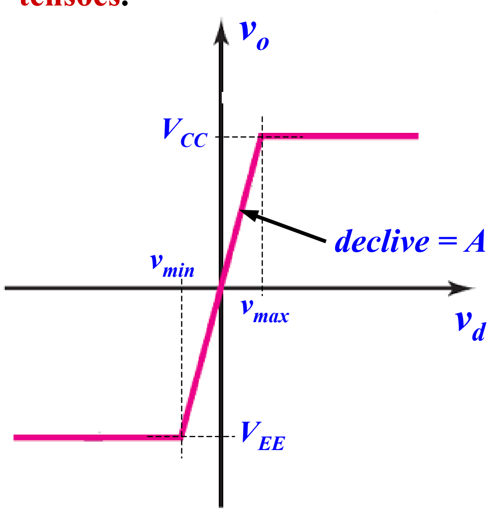
$$v_{out} = -RC\frac{dv_i}{dt}$$

OpAmp como comparador

Comparador

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





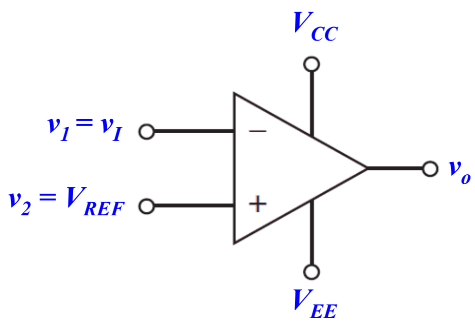
Se: $V_{CC} = -V_{EE} = 15V$

$A = 10^5$

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

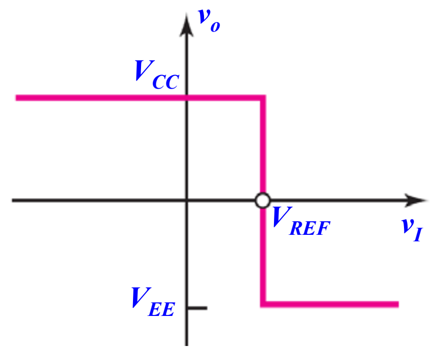
- Portanto a região linear pode considerar-se quase vertical.

Comparador



$$v_0 = \begin{cases} V_{CC} & \text{se } v_I < V_{REF} \\ V_{EE} & \text{se } v_I > V_{REF} \end{cases}$$

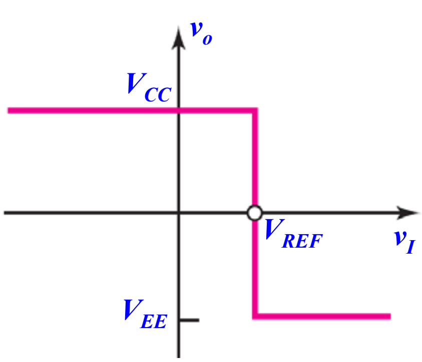
- **Circuito tem uma saída binária resultante da comparação das duas tensões de entrada.**



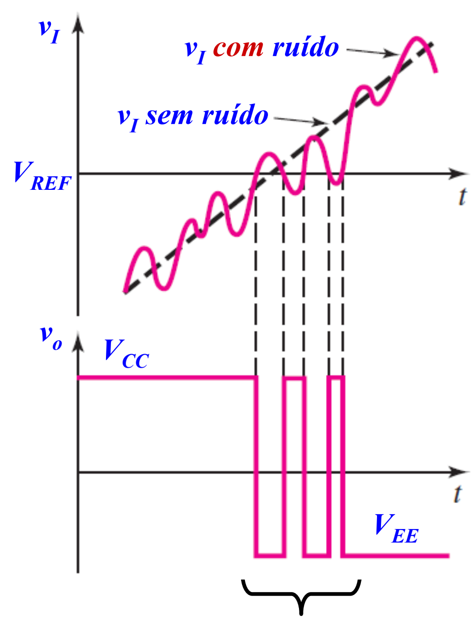
NOTA: assumindo que as tensões de saturação são V_{CC} e V_{EE}, o que nem sempre acontece!

Comparador com *feedback* regenerativo

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



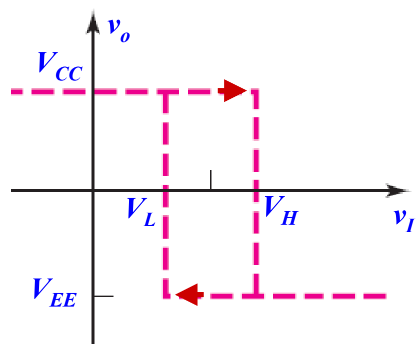
- **Isto pode acontecer, por exemplo, se o sinal v_I vier dum sensor de temperatura.**



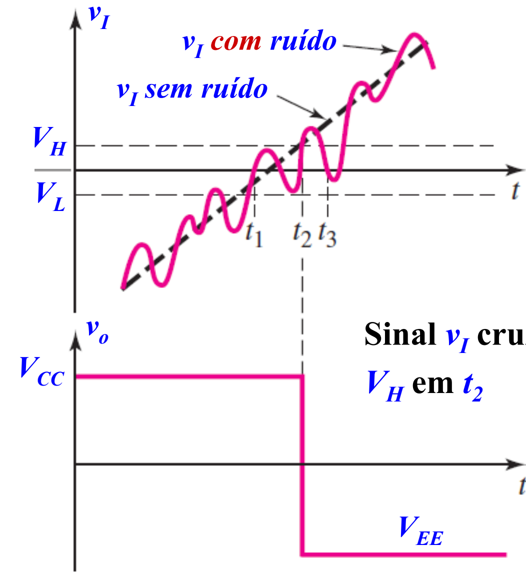
efeito indesejado!

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

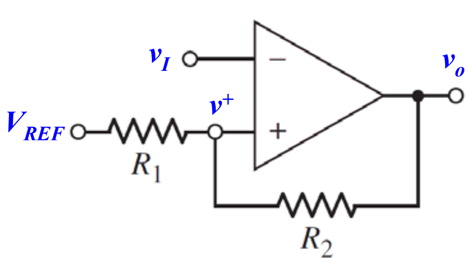


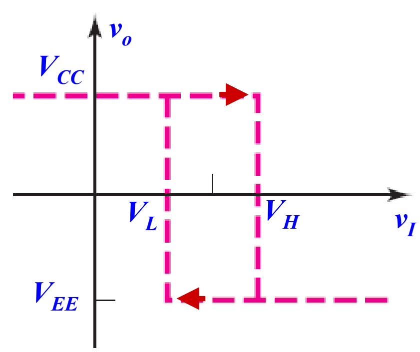
Sinal v_I cruza V_H em t_2

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...**

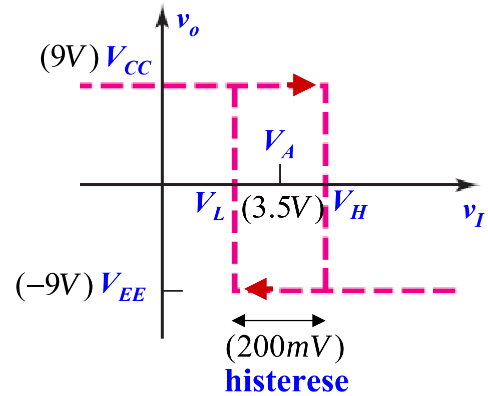
$$v^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{REF} + \frac{R_1}{R_1+R_2}v_o$$

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

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

Comparador com *feedback* regenerativo - projeto

- **Pretendemos obter a característica com os valores indicados.**



Dos resultados anteriores...

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

donde se tira $R_2 / R_1 = 89$

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

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

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