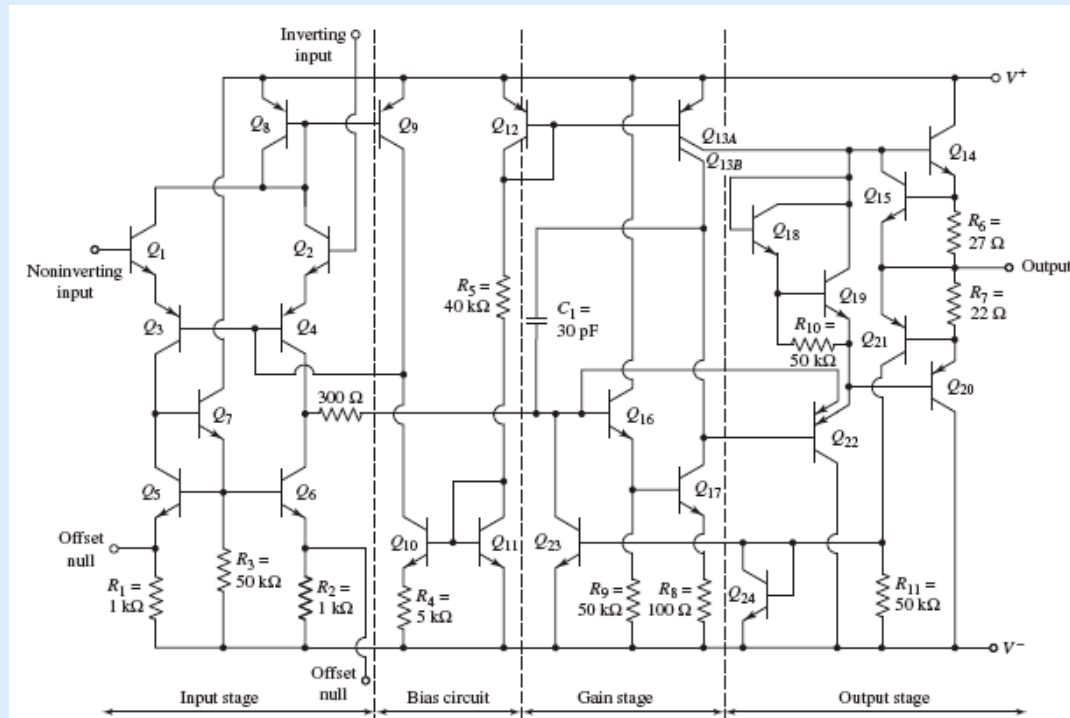


Amplificador Operacional:

- Entradas, saídas, alimentações.
- Modelos.
- Realimentação e Curto-Circuito Virtual.
- Amplificador Inversor e Não Inversor.
- Amplificador Somador e de Diferença.
- Integrador e Diferenciador.
- Comparadores.

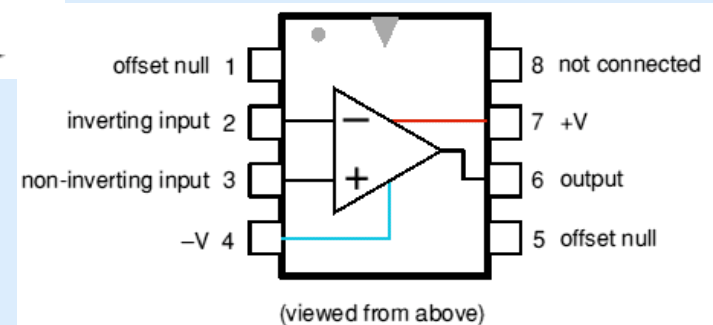
Amplificador Operacional



24 transistores

12 resistências

1 condensador



Amplificador Operacional (2)

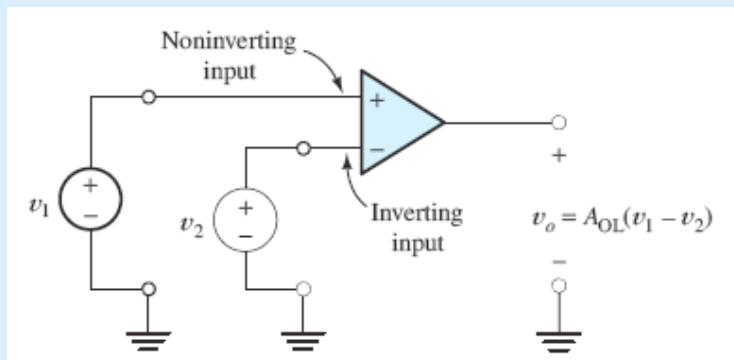
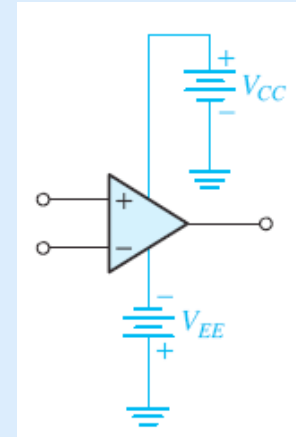
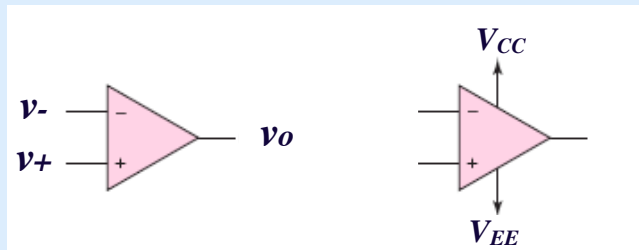
Saída

Entradas: Inversora (-) e Não Inversora (+)

Oposição de fase entre v_O e v_-

Saída em fase com a entrada v_+

Alimentação dc: muitas vezes 2 tensões simétricas $\pm V$



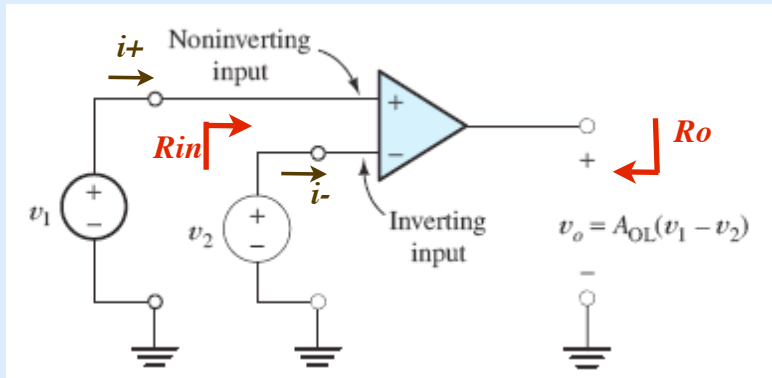
Tensão de entrada diferencial

$$v_{id} = v_1 - v_2$$

Tensão de entrada de modo comum

$$v_{icm} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

OpAmp: modelos



Ganho diferencial em malha aberta:

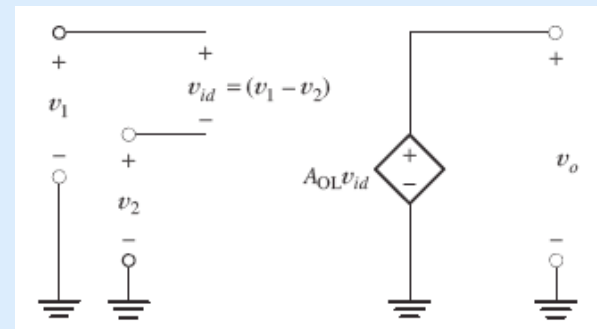
$$v_o = A_{OL} v_{id}$$

Ganho modo comum:

$$v_o = A_{CM} v_{icm}$$

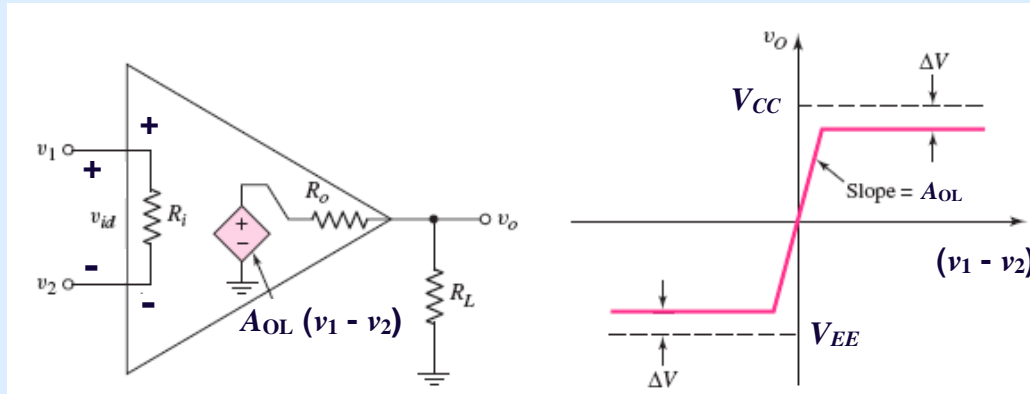
OpAmp	Real	Ideal
A_{OL}	Ex: 10^5	∞
A_{CM}	$\ll 1$	0
$i+ \quad i-$	$\mu A, nA, pA$	0
R_{in}	Ex: $10M\Omega$	∞
R_o	Ex: 50Ω	0

Modelo Ideal:



OpAmp: modelos (2)

Modelo Real simplificado:

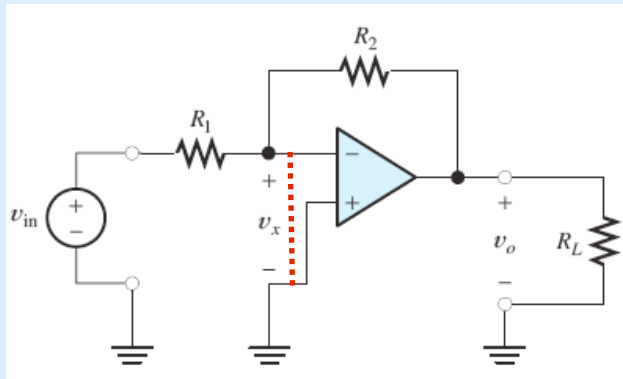


Nota: na figura da direita atentar na limitação imposta pelas alimentações
à excursão do sinal de saída: $V_{EE} < v_o < V_{CC}$

Exemplo com alimentações de $\pm 15V$: $-14.2V < v_o < 13.8V$

Realimentação negativa e positiva

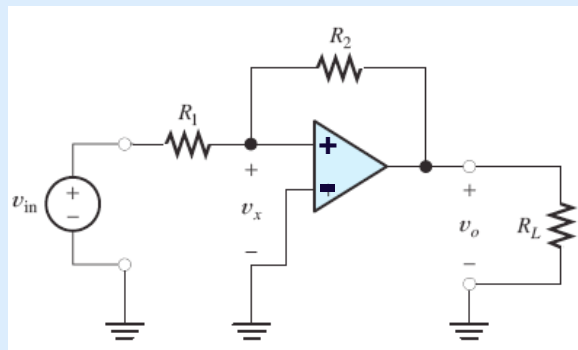
Realimentação negativa



- ➔ R_2 liga a saída à entrada inversora.
- ➔ v_o e v_{in} estão em oposição de fase.
- ➔ uma parte de v_o , através de R_2 , vai subtrair-se a v_{in} , diminuindo v_x .
- ➔ $AOL \rightarrow \infty$; $v_x \rightarrow 0$

Curto-Circuito Virtual

Realimentação positiva

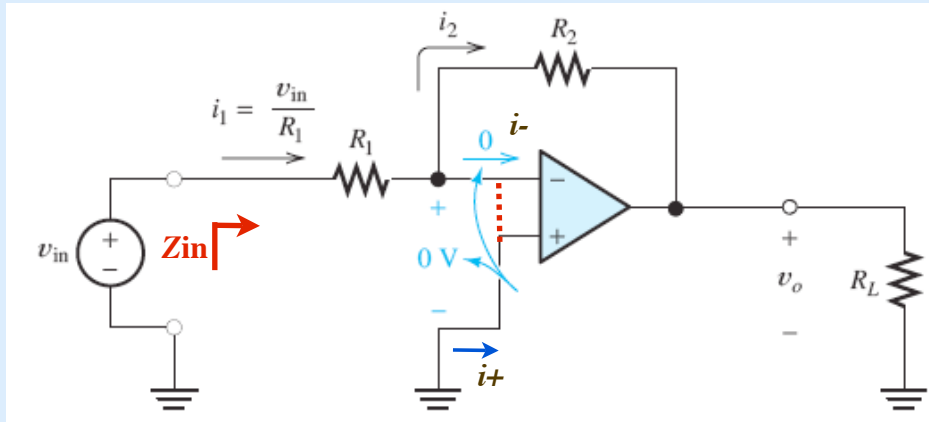


- ➔ R_2 liga a saída à entrada não inversora.
- ➔ v_o e v_{in} estão em fase.
- ➔ uma parte de v_o , através de R_2 , vai adicionar-se a v_{in} , aumentando v_x .
- ➔ $AOL \rightarrow \infty$; $v_x \rightarrow \infty$

Na prática o OpAmp satura positiva ou negativamente

Amplificador Inversor

Ganho em malha fechada



$$v_+ = v_- = 0$$

$$i_+ = 0 = i_-$$

$$i_1 = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$i_2 = i_1$$

$$i_2 = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o + R_2 i_2 = 0$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

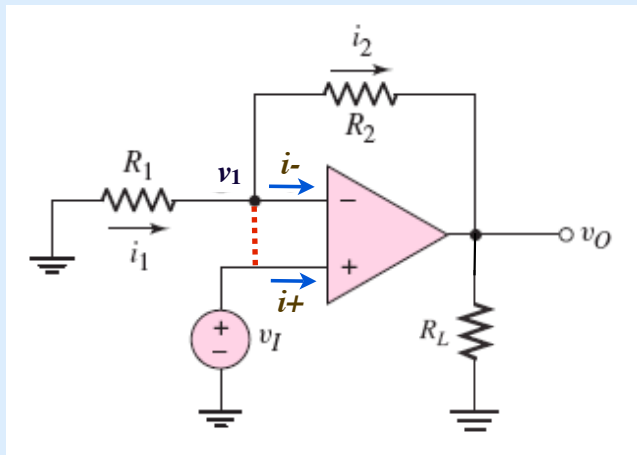
$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{in}$$

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_1} = R_1$$

Como v_o é independente de R_L : $Z_O = 0 \Omega$

$A_v < 0$ significa inversão da fase

Amplificador Não-Inversor



$$i_+ = 0 = i_-$$

Curto-circuito virtual:

$$v_- = v_+ = v_1 = v_I$$

$$i_2 = i_1$$

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

$$i_2 = \frac{v_1 - v_O}{R_2} = \frac{v_I - v_O}{R_2}$$

$$-\frac{v_I}{R_1} = \frac{v_I - v_O}{R_2}$$

$$A_v = \frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_{in} = \infty \Omega$$

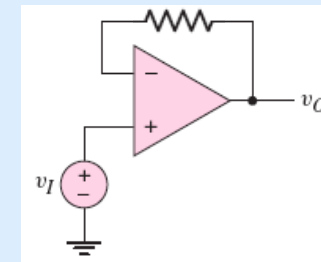
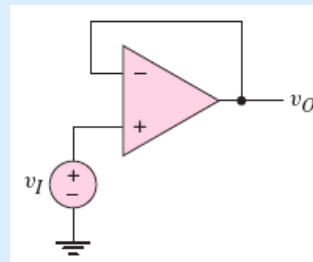
Como v_O é independente de R_L : $Z_O = 0 \Omega$

$A_v > 0$: entrada e saída em fase. Aliás $A_v \geq 1$

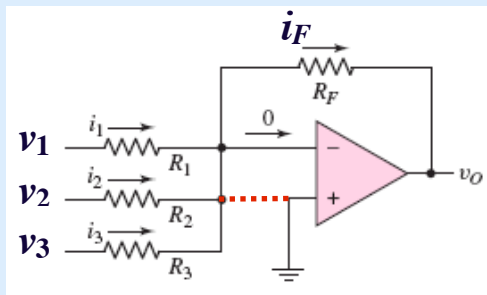
Seguidor de tensão:

$$R_1 = \infty \text{ e/ou } R_2 = 0 :$$

$$A_v = 1$$



Amplificador Somador



$$i_+ = 0 = i_-$$

Curto-circuito virtual:

$$v_- = v_+ = 0$$

$$i_1 = v_1 / R_1$$

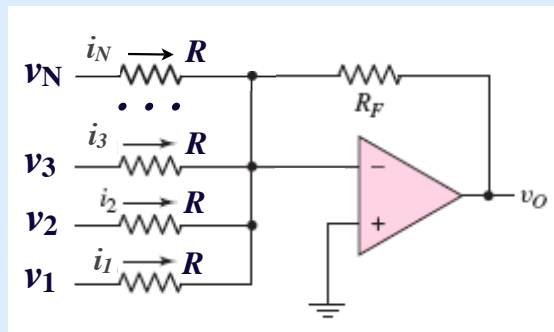
$$i_F = v_1 / R_1 + v_2 / R_2 + v_3 / R_3$$

$$i_2 = v_2 / R_2$$

$$i_3 = v_3 / R_3$$

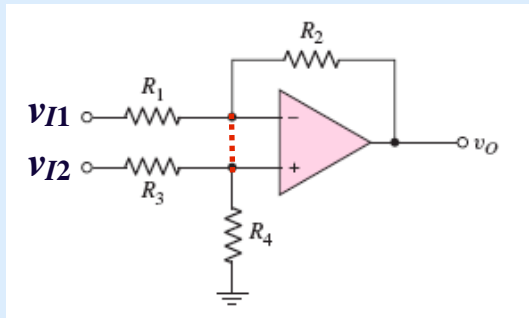
$$v_o = -R_F (v_1 / R_1 + v_2 / R_2 + v_3 / R_3)$$

Caso particular: $R_1 = R_2 = \dots = R_N = R$



$$v_o = - (v_1 + v_2 + \dots + v_N) R_F / R$$

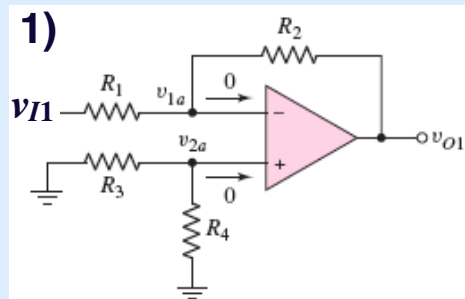
Amplificador de Diferença



$$i_+ = 0 = i_-$$

Curto-circuito virtual: $v_- = v_+$

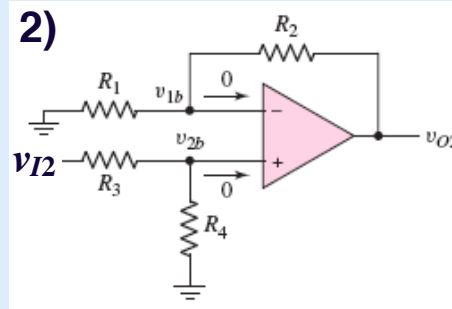
Apliquemos sobreposição



$$i_+ = 0 \rightarrow v_{2a} = 0$$

Amp. Inversor

$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1}$$



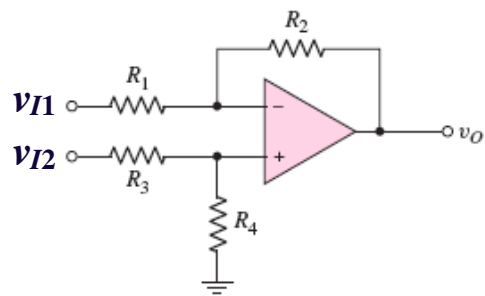
$$i_+ = 0 \rightarrow v_{2b} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{I2}$$

Amp. Não Inversor:

$$v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{2b}$$

$$v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{I2} = (1 + R_2/R_1) \left(\frac{R_4/R_3}{1 + R_4/R_3}\right) v_{I2}$$

Amplificador de Diferença (2)



$$1) \quad v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1}$$

$$2) \quad v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{I2} = (1 + R_2/R_1) \left(\frac{R_4/R_3}{1 + R_4/R_3}\right) v_{I2}$$

$$v_O = v_{O1} + v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{\frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_4}{R_3}}\right) v_{I2} - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) v_{I1}$$

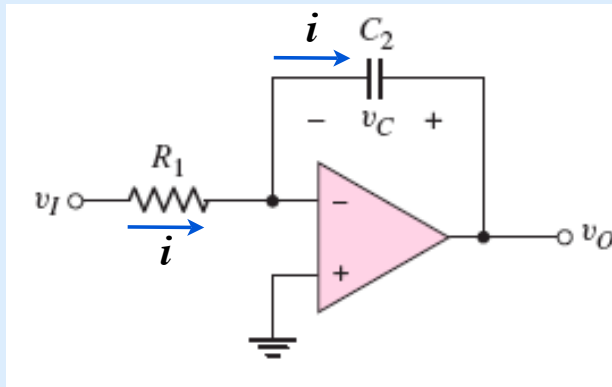
Caso particular:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$v_O = \frac{R_2}{R_1} (v_{I2} - v_{I1})$$

Integrador

INTEGRADOR



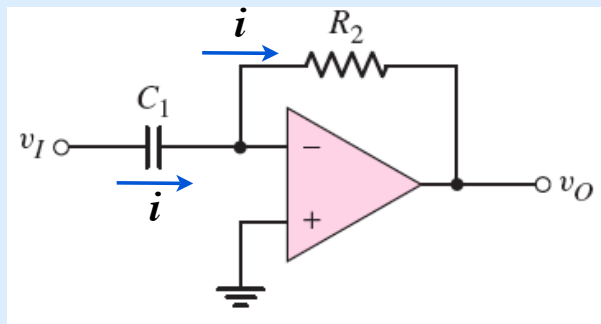
$$v_o = v_C \quad ; \quad i = v_I / R_1$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt + v_c(t_0)$$

$$v_O = V_C - \frac{1}{R_1 C_2} \int_0^t v_I(t) dt$$

Nota: se v_I for contínua, v_O será uma rampa que acabará por saturar o OpAmp

DIFERENCIADOR



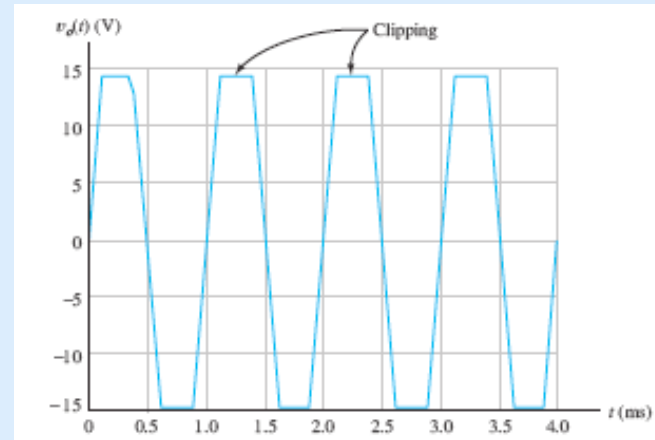
$$v_o = -R_2 i \quad ; \quad v_I = v_C$$

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

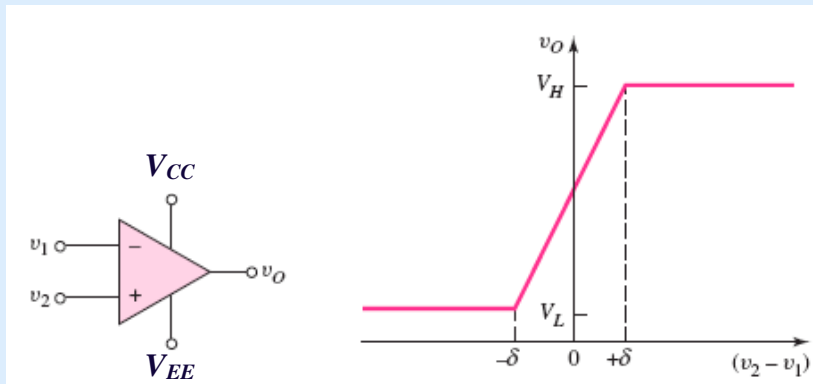
$$v_O(t) = -R_2 C_1 \frac{dv_I(t)}{dt}$$

Comparador

Quando a amplitude é muito elevada o sinal de saída é limitado pelas tensões de alimentação: V_{CC} para excursões positivas; V_{EE} para negativas.



OpAmp em malha aberta:



Saturação: $V_H \leq V_{CC}$ $V_L \geq V_{EE}$

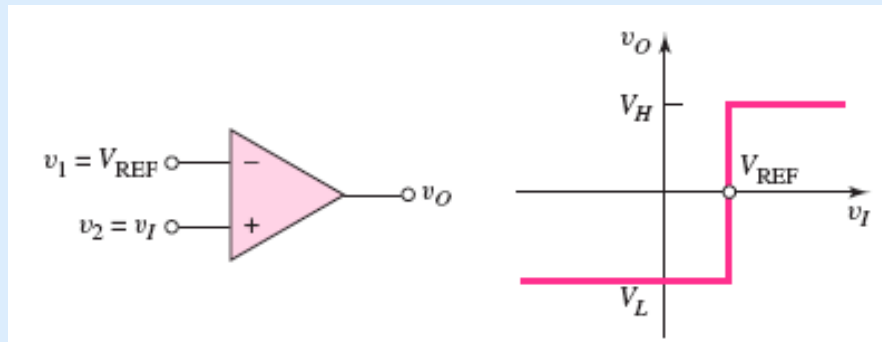
$$-\delta < (v_2 - v_1) < +\delta$$

$$V_H - V_L = 10V \quad A_{OL} = 100000$$

$$2\delta = 10/10^5 = 10^{-4} V = 0.1 \text{ mV}$$

Comparador (2)

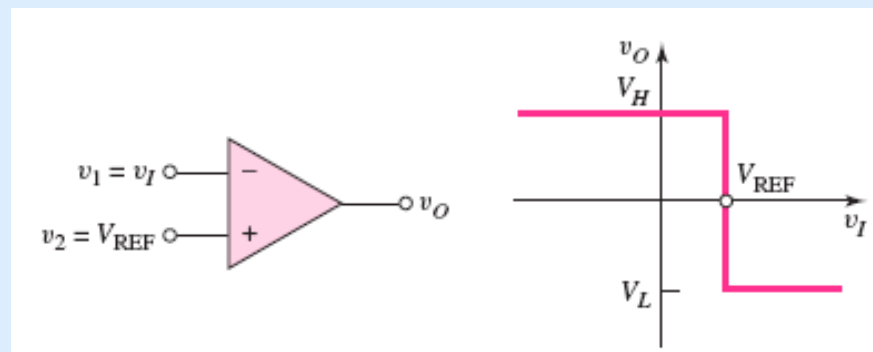
Comparador não inversor



$$v_I > V_{REF} \rightarrow v_O = V_H$$

$$v_I < V_{REF} \rightarrow v_O = V_L$$

Comparador inversor

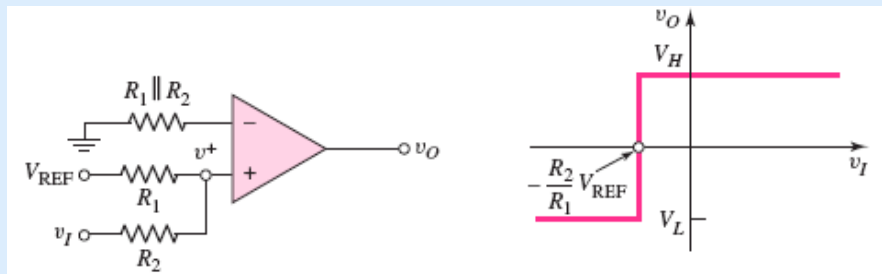


$$v_I > V_{REF} \rightarrow v_O = V_L$$

$$v_I < V_{REF} \rightarrow v_O = V_H$$

Outros comparadores em malha aberta

Comparador não inversor



Nota: R_1/R_2 é uma correcção dos efeitos das correntes de *bias*

Por sobreposição:

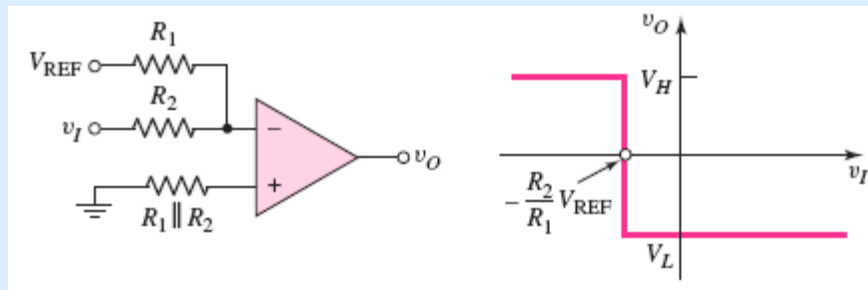
$$v_+ = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{REF} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_I$$

A tensão de *crossover* obtém-se quando $v_+ = 0$

$$R_2 V_{REF} + R_1 v_I = 0$$

$$v_I = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF}$$

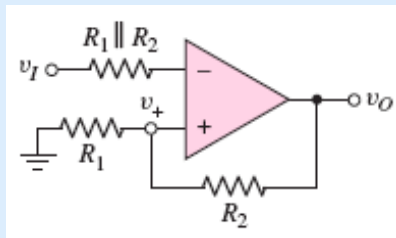
Comparador inversor



Comparador com histerese

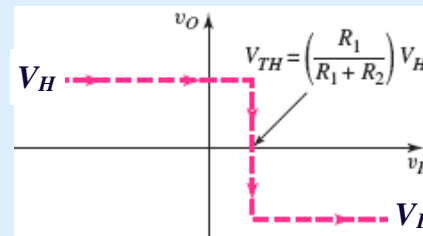
Realimentação Positiva

Schmitt Trigger Inversor

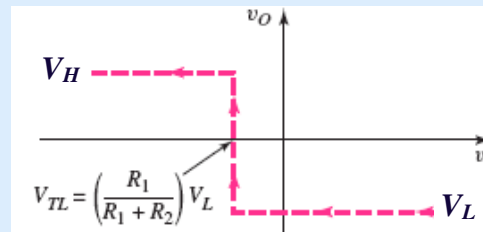
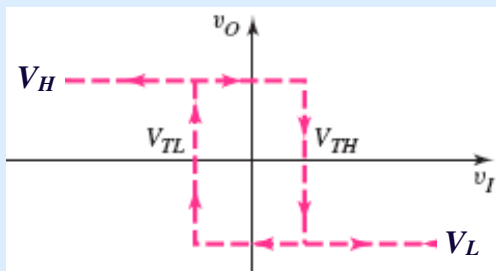


Assumir $V_H = |V_L|$

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



$$V_{TH} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_H$$

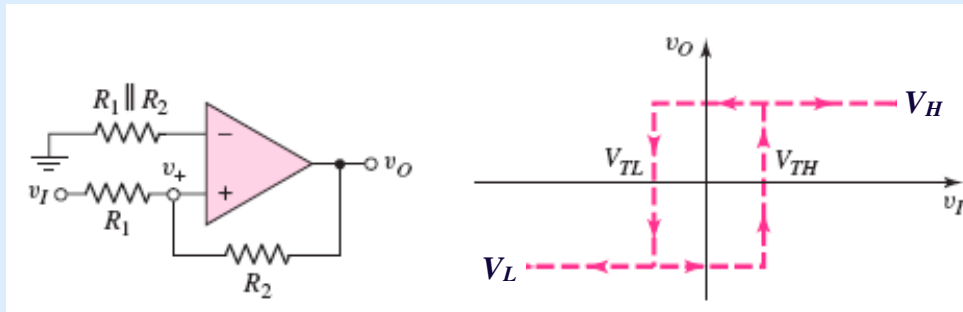


$$V_{TL} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_L$$

Histerese = $V_{TH} - V_{TL}$

Comparador com histerese (2)

Schmitt Trigger Não Inversor



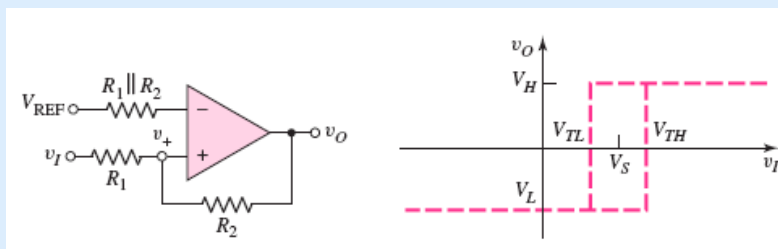
Realimentação Positiva

Assumir $V_H = |V_L|$
e aplicar sobreposição

$$\text{Histerese} = V_{TH} - V_{TL}$$

Acrescentando V_{REF} :

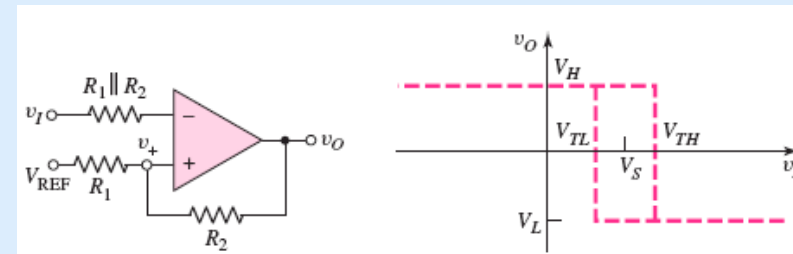
Schmitt Trigger Não Inversor



tensão de *switching*

$$V_S = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{REF}$$

Schmitt Trigger Inversor

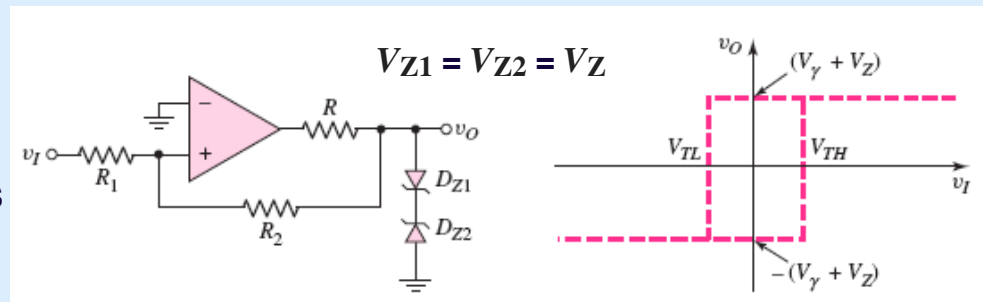


$$V_S = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{REF}$$

Gerador de onda quadrada e triangular

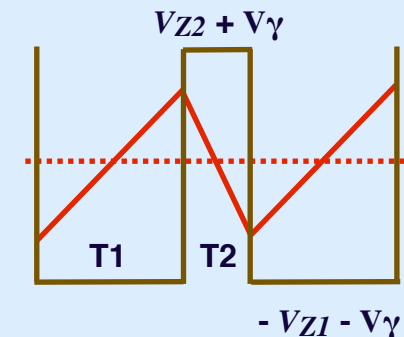
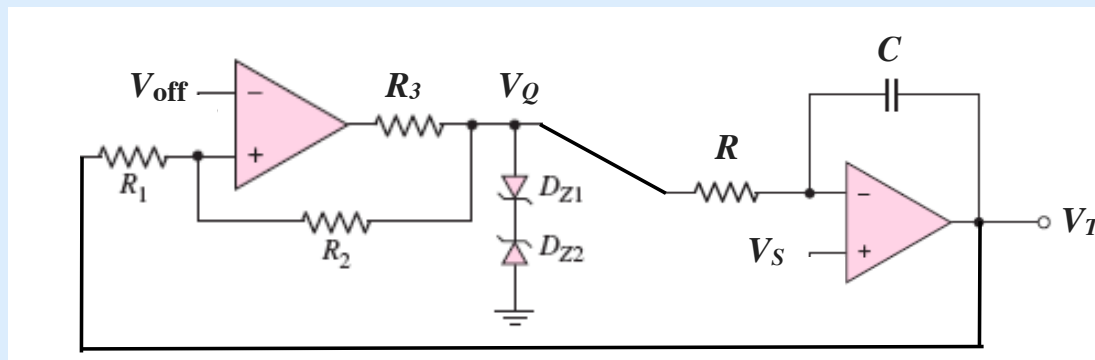
Schmitt Trigger Não Inversor com limitação, no caso frequente das tensões de saturação serem assimétricas

Nota: R limita $I_{máx}$ nos zeners



Gerador de Sinais

Juntando um *Schmitt Trigger* com um Integrador ...



V_{off} regula o offset ; $V_{off} = 0 \rightarrow V_T \text{ med} = 0$

V_S regula a simetria/duty-cycle ; $V_S = 0 \rightarrow \delta = 50\%$

A relação R_2/R_1 regula a amplitude de V_T

A frequência depende de R e C , mas também de vários outros factores.