

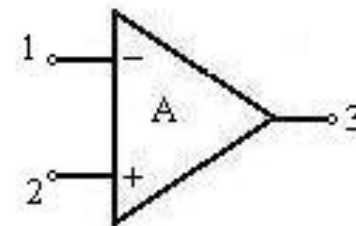
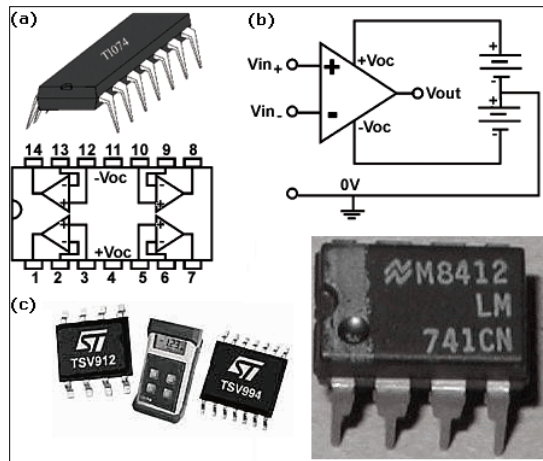
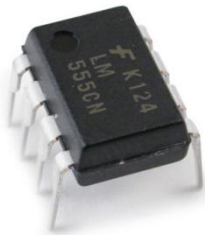
ECM305
Sistemas Eletrônicos

Amplificador Operacional

Sergio Ribeiro Augusto

Objetivo

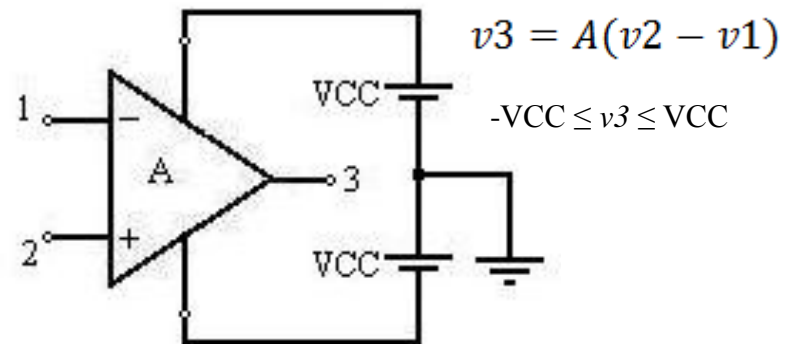
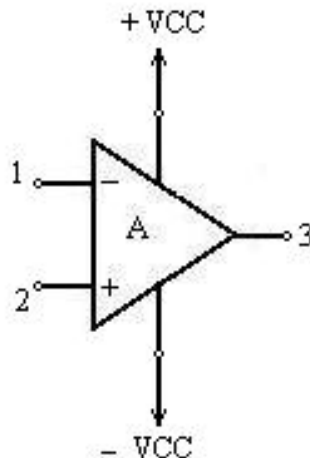
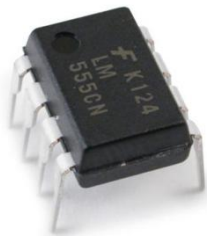
- Introdução aos Amplificadores Operacionais
- Principais configurações
- Comparadores



Simbologia
do Op-Amp

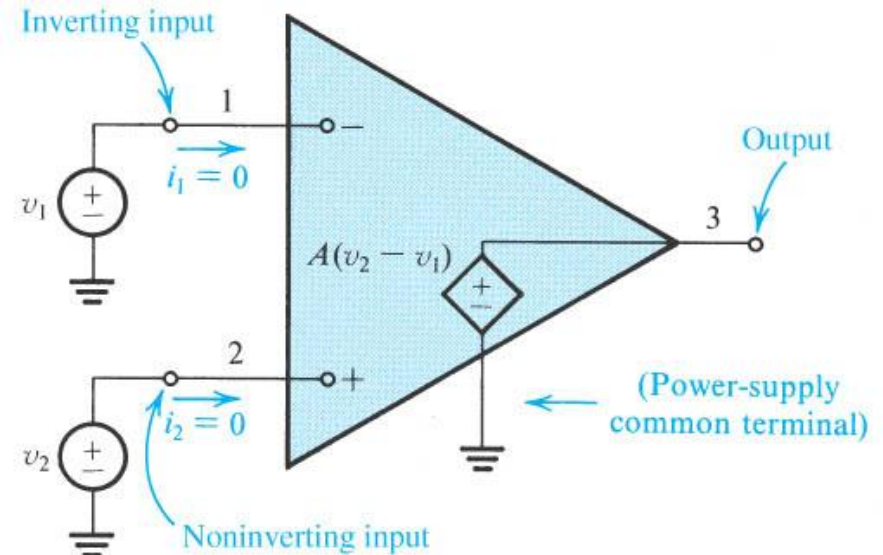
Amplificador Operacional Ideal

- ▶ O amplificador operacional (AMPOP) é um dispositivo eletrônico contendo duas entradas, v_2 (V_{in+}) e v_1 (V_{in-}) e uma saída v_3 (V_{out}) cujo valor é proporcional à diferença de tensão das duas entradas. É portanto um amplificador diferencial, sendo que possui um ganho muito elevado.
- ▶ Suas principais aplicações, como o próprio nome diz, são realizar operações matemáticas (integração, diferenciação, soma, multiplicação/amplificação, etc.)
- ▶ Normalmente necessitam de alimentação simétrica para operarem, por exemplo +12V e -12V, mas existem também alguns, desde que não se necessite de tensão negativa na saída, que permitem só alimentação positiva (chamados AMPOP *Unipolar*)



Circuito Equivalente AMPPOP Ideal

- Características de um Amplificador Operacional ideal:
 - Ganho de malha aberta, ou diferencial, A infinito;
 - Impedância de entrada infinita ($i_1 = 0$ e $i_2 = 0$);
 - Impedância de saída nula;
 - Rejeição de modo comum infinita.



$$v_3 = A(v_2 - v_1)$$

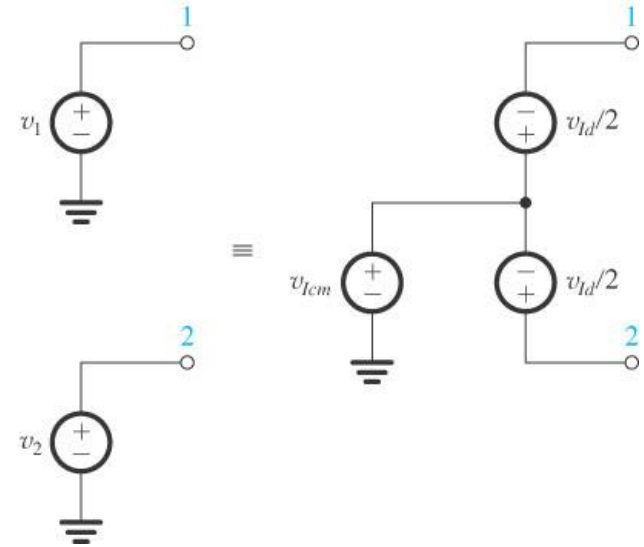
Tensão Diferencial e de Modo Comum

- Tensão diferencial v_{ld} é a diferença entre a tensão de dois sinais de entrada, v_1 e v_2 :

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

- Tensão de modo comum v_{lcm} é a tensão média de dois sinais de entrada, v_1 e v_2 :

$$v_{lcm} = (v_1 + v_2)/2$$

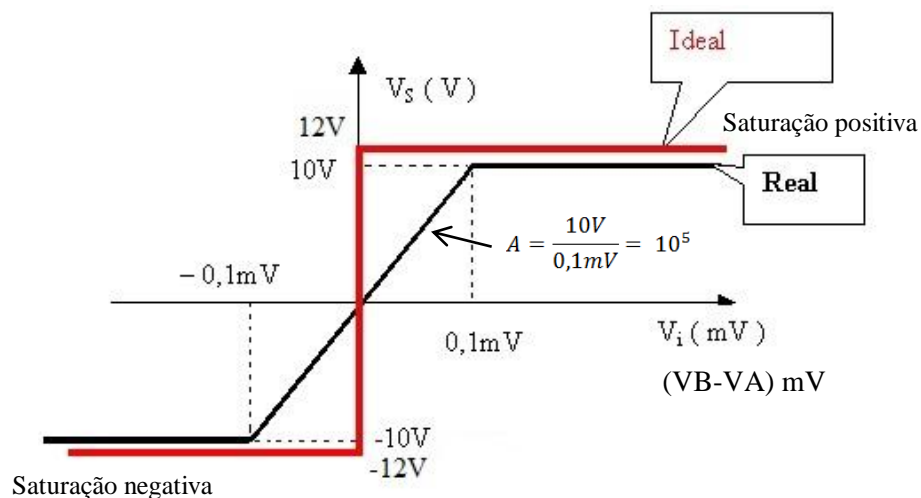
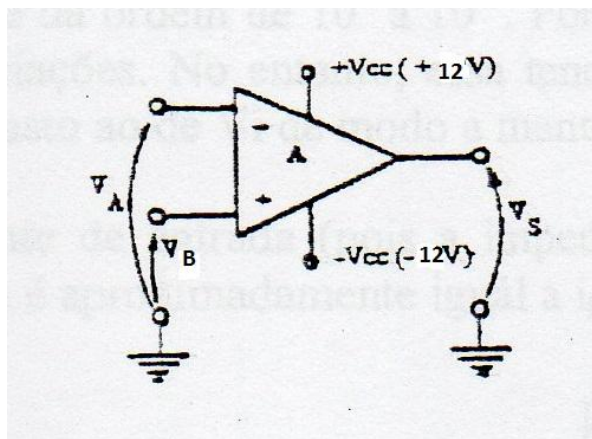


- O Amplificador Operacional responde somente à tensões diferenciais, diferença entre v_2 e v_1 :** $v_3 = A(v_2 - v_1)$
 - Se $v_1 = v_2 = 1$ V, teremos: $v_3 = A(1 - 1) = 0V$

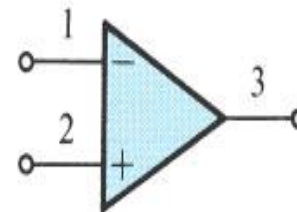
Amplificador Operacional Real

- Embora um AMPOP real não possa satisfazer plenamente as características teóricas do AMPOP ideal, para a maioria das aplicações práticas, podemos considerar tais características (ganho, impedâncias e rejeição de modo comum) válidas.
- A saída do AMPOP real satura tipicamente 1,5V antes do valor da alimentação → Existem AMPOPs chamados *rail to rail*, cujo a saída praticamente atinge o valor de tensão da fonte de alimentação.
- Tipicamente, a corrente de saída de um AMPOP é da ordem de 20mA .

Ideal (teórico)	Real (exemplo LM741)
$R_i \rightarrow \infty$	$R_i \rightarrow 2M\Omega$
$A \rightarrow \infty$	$A \rightarrow 10^5$
$R_o \rightarrow 0$	$R_o \rightarrow 75\Omega$



Terra Virtual



- Assumindo um AMPOP devidamente conectado, “funcionando”, e produzindo uma saída de tensão finita, temos:

$$v_2 - v_1 = \frac{v_3}{A}$$

- Com o ganho de malha aberta A muito elevado (tendendo a infinito), podemos escrever:

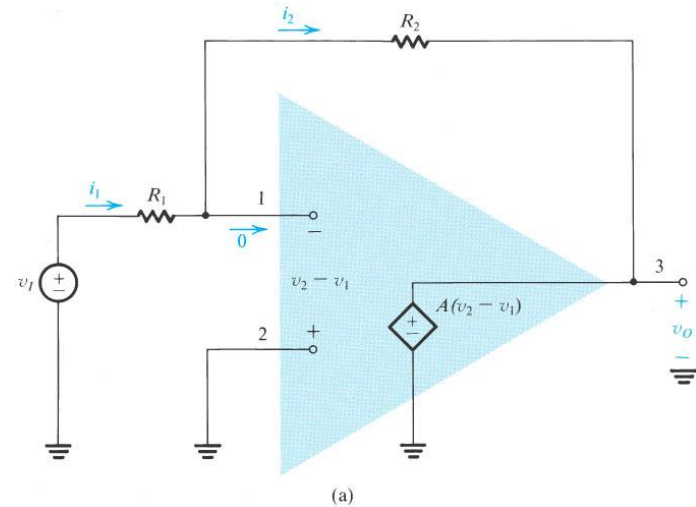
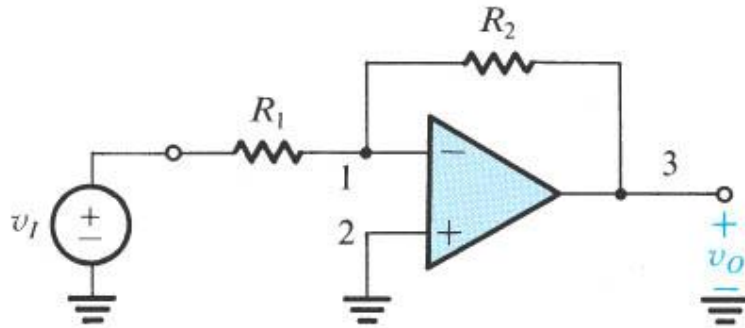
$$v_2 - v_1 = \frac{v_3}{A} = 0 \Rightarrow v_2 = v_1$$

- Assim sendo, a tensão no terminal 1 é igual à do terminal 2, ou seja, temos um *curto-circuito virtual* entre os dois terminais.
- Se um deles estiver ligado no terra o outro estará *virtualmente* aterrado, ou seja, sua tensão é nula, mas, devido à alta impedância (infinita) nos terminais 1 e 2 (- e +), a corrente que passa por esse *terra virtual* é nula.
- Temos portanto tensão nula mas o pino não está fisicamente conectado ao terra.

Configurações mais Utilizadas

Configuração Inversora

- Utilizando *realimentação negativa*:



1,2 - Para $A \rightarrow \infty \Rightarrow v_2 - v_1 = \frac{v_3}{A} = 0 \Rightarrow v_2 = v_1 = 0\text{V}$ (terra virtual)

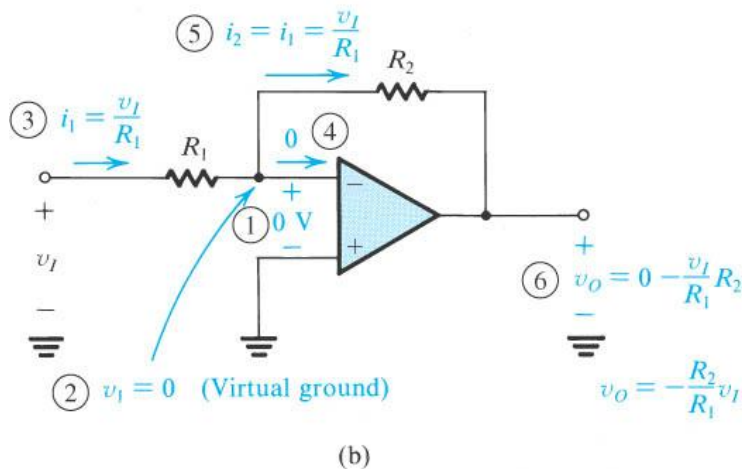
$$3 - i_1 = \frac{v_1 - 0}{R_1} = \frac{v_I}{R_1}$$

4 - $i_- = i_+ = 0$ (impedância de entrada infinita)

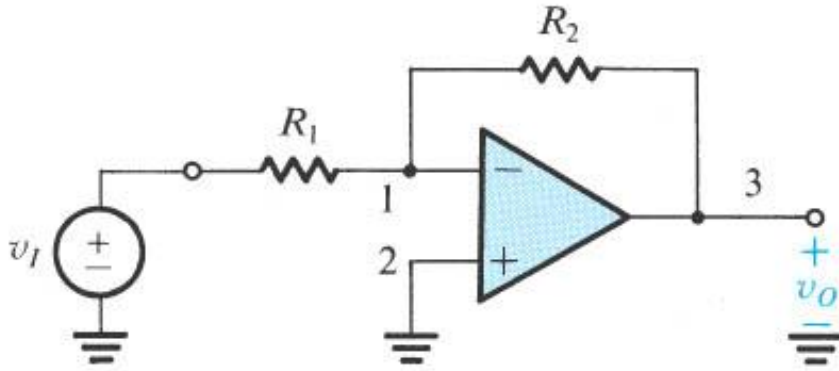
$$5 - i_2 = i_1 = \frac{v_I}{R_1}$$

$$6 - v_0 = v_1 - R_2 i_1 = 0 - R_2 i_1 = -R_2 \frac{v_I}{R_1}$$

$$\text{Então: } v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_I$$



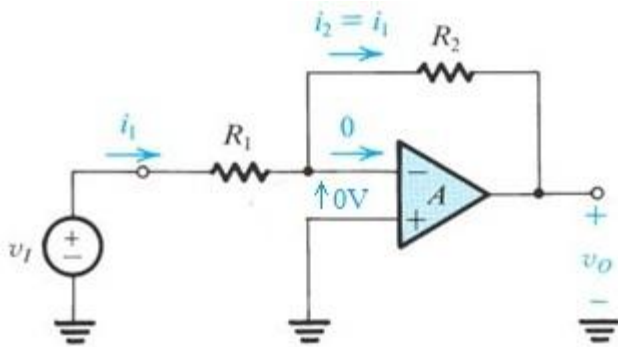
Configuração Inversora (cont.)



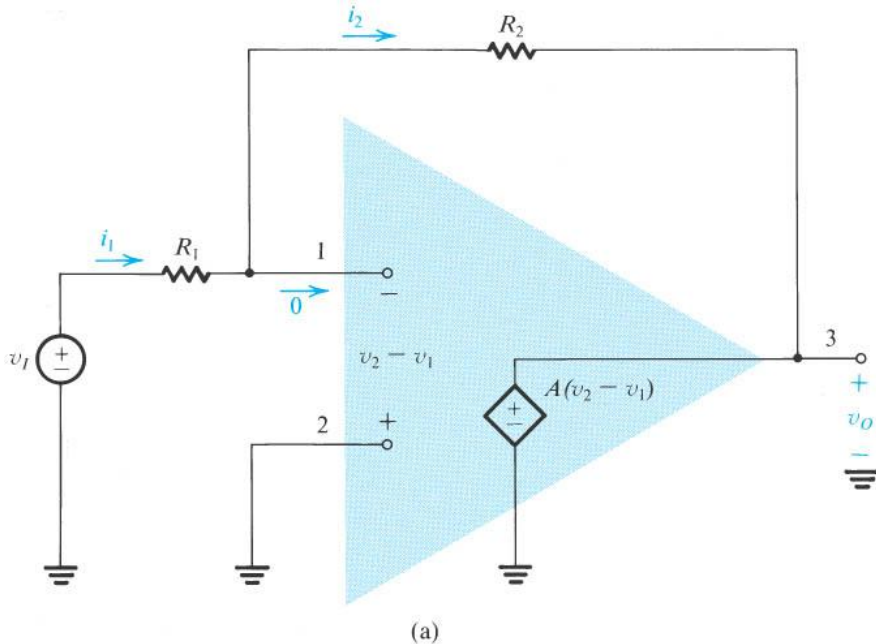
$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} v_I$$

- Ganho de *malha fechada* (com realimentação): $G = \frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_2}{R_1}$
- O sinal negativo indica que v_O é invertido em relação à v_I .
- Então, para 1 V de entrada (v_I) e $R_2/R_1 = 5$, teríamos $v_O = -5\text{V}$ na saída.

Configuração Inversora: Impedâncias de Entrada e Saída



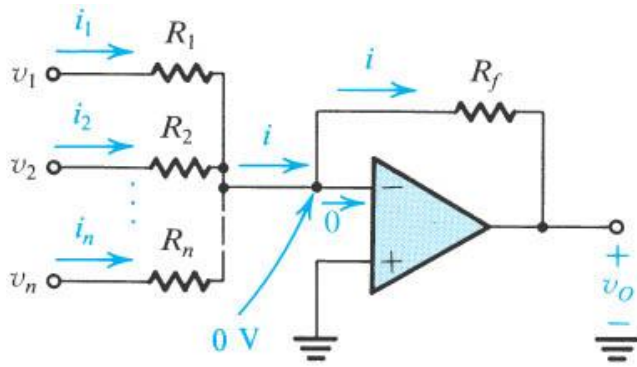
$$R_i = \frac{v_I}{i_1} = \frac{v_I}{v_I/R_1} = R_1$$



- Resistência da saída $R_{out} = 0$, pois a tensão de saída v_O é tomada nos terminais do gerador de tensão vinculado $A(v_2 - v_1)$, o qual não possui resistência de saída.

Amplificador Somador

- Somador Ponderado**



$$i_1 = \frac{v_1}{R_1} \quad , \quad i_2 = \frac{v_2}{R_2} \quad \dots \quad i_n = \frac{v_n}{R_n}$$

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

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

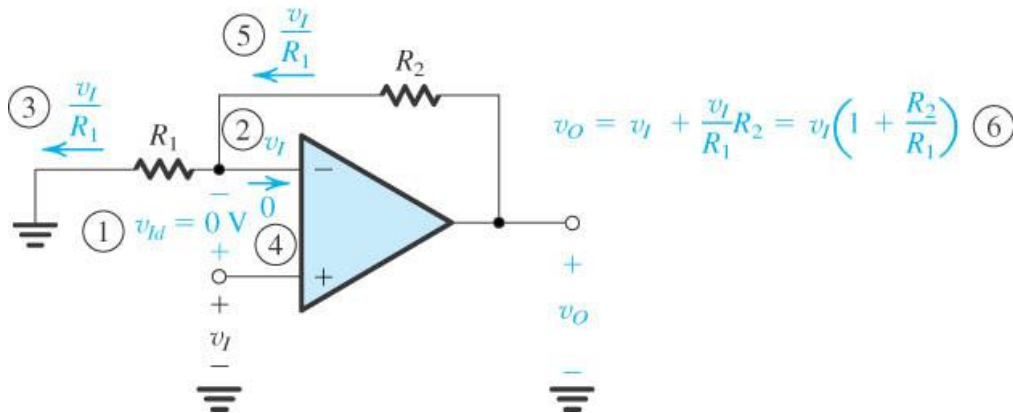
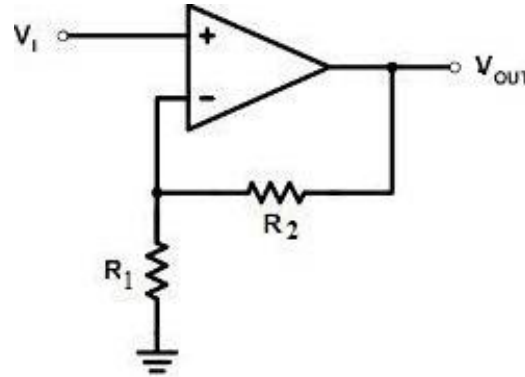
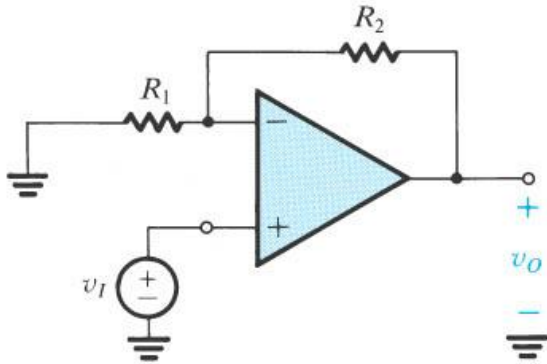
$$v_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

- Somador**

Se $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, temos um somador de tensão:

$$v_o = -\frac{R_f}{R} (v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

Configuração Não Inversora



1- $v_{Id} = 0V$ (“terra virtual”)

2- $v_- = v_I$

3- $i_{R1} = v_I/R_1$

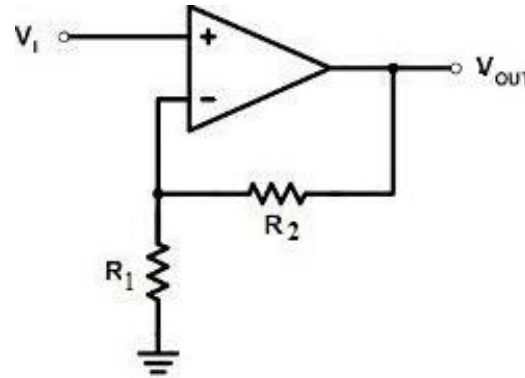
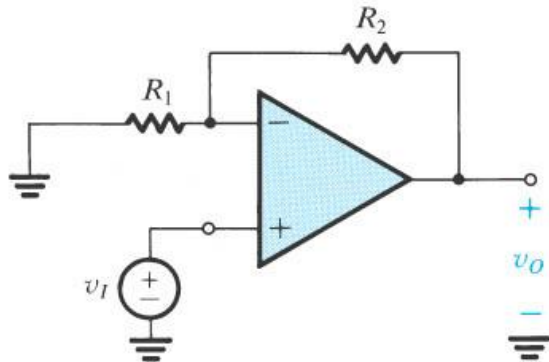
4- $i_- = i_+ = 0$ (impedância infinita nos terminais de entrada)

5- $i_{R2} = i_{R1} = v_I/R_1$

6- $v_o = v_I + 0 + R_2 * i_{R2}$
 $v_o = v_I + R_2 * v_I/R_1$

Logo: $v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_I$

Configuração Não Inversora (cont.)

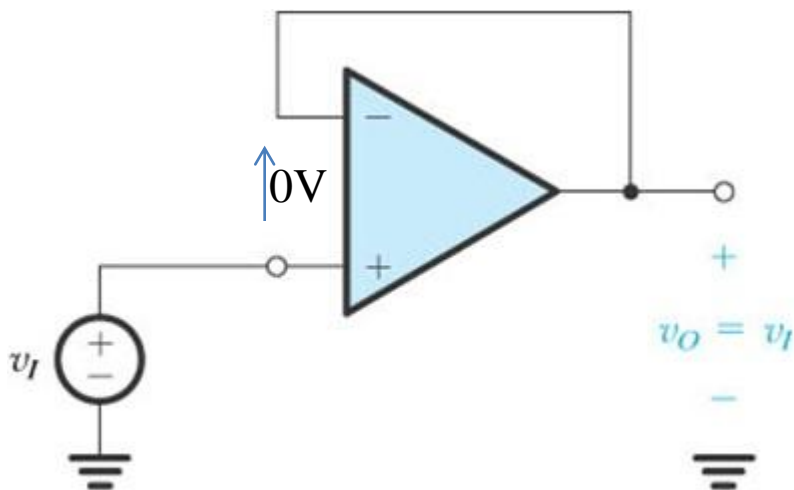


$$v_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_I$$

- Ganho de *malha fechada*: $G = \frac{v_0}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$
- O sinal de saída v_0 está em fase com o de entrada v_I (não há inversão).
- Então, para 1 V de entrada (v_I) e $R_2/R_1 = 5$, teríamos $v_0 = 6\text{V}$ na saída.
- Resistência de entrada $R_i = \infty$ (nenhuma corrente flui para o terminal '+' do AMPOP).
- Resistência da saída $R_{\text{out}} = 0$, pois a tensão de saída v_0 é tomada nos terminais do gerador de tensão vinculado $A(v_2 - v_1) = A(v_+ - v_-)$, o qual não possui resistência de saída.

Configuração Seguidor de Tensão (“Buffer”)

- A saída “segue” a entrada.
- Permite que uma fonte de alta impedância seja conectada a uma fonte de baixa impedância (funciona com um “isolador”).



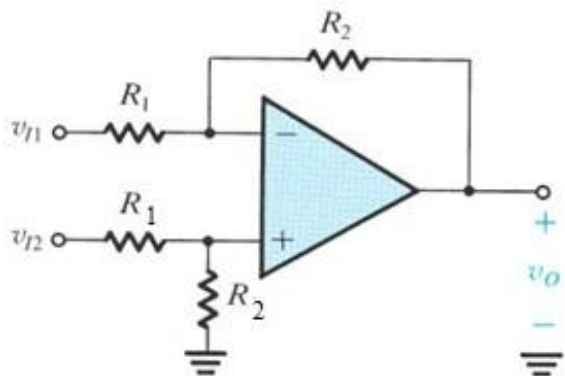
$v_O = v_I \rightarrow$ tensão de saída igual à de entrada

$R_i = \infty \rightarrow$ resistência de entrada infinita

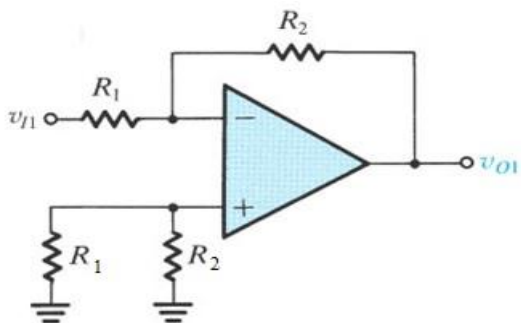
$R_{out} = 0\Omega \rightarrow$ resistência de saída nula

Amplificador de Diferenças (Amplificador Subtrator)

- Muito usado em instrumentação

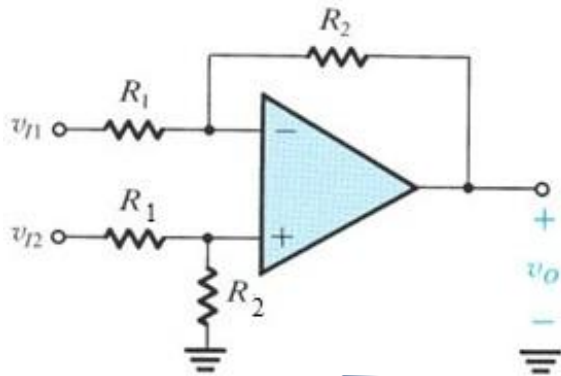


Para achar v_O em função de v_{I1} e v_{I2} podemos aplicar o princípio da superposição.

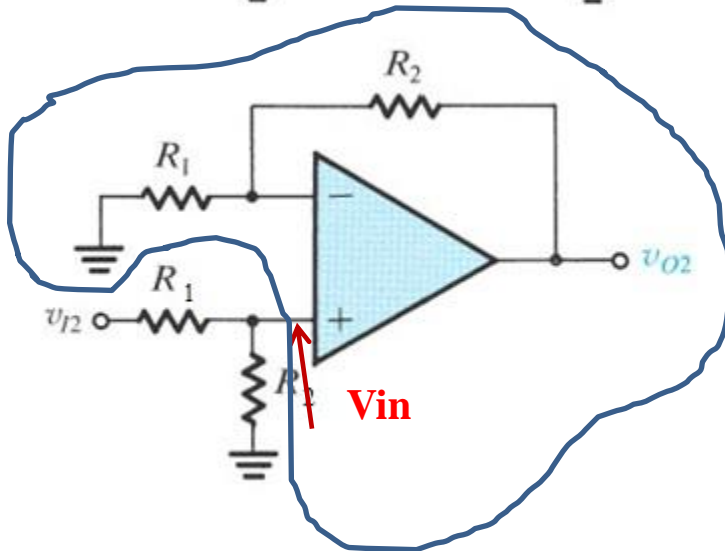


Fazendo $v_{I2} = 0$, obtemos a configuração inversora.
Logo:
$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1}$$

Amplificador Subtrator (cont.)



Fazendo $v_{I1} = 0$, obtemos a configuração não inversora.
Logo:



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

$$V_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{I2}$$



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

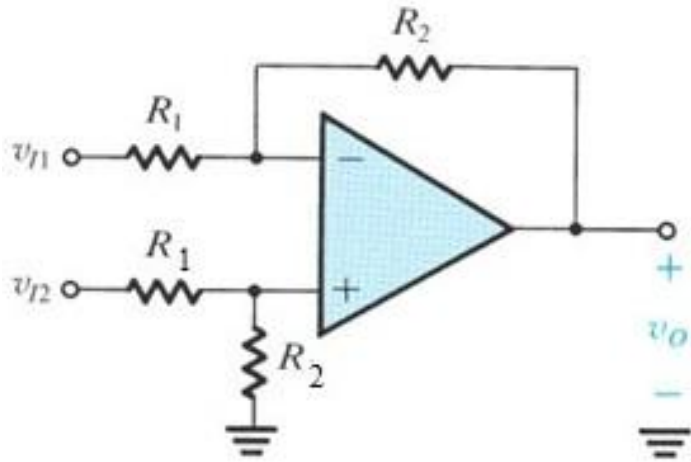


$$v_{O2} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) v_{I2}$$



$$v_{O2} = \frac{R_2}{R_1} v_{I2}$$

Amplificador Subtrator (cont.)



Então, como : $v_o = v_{o1} + v_{o2}$

$$v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1} \quad v_{o2} = \frac{R_2}{R_1} v_{I2}$$

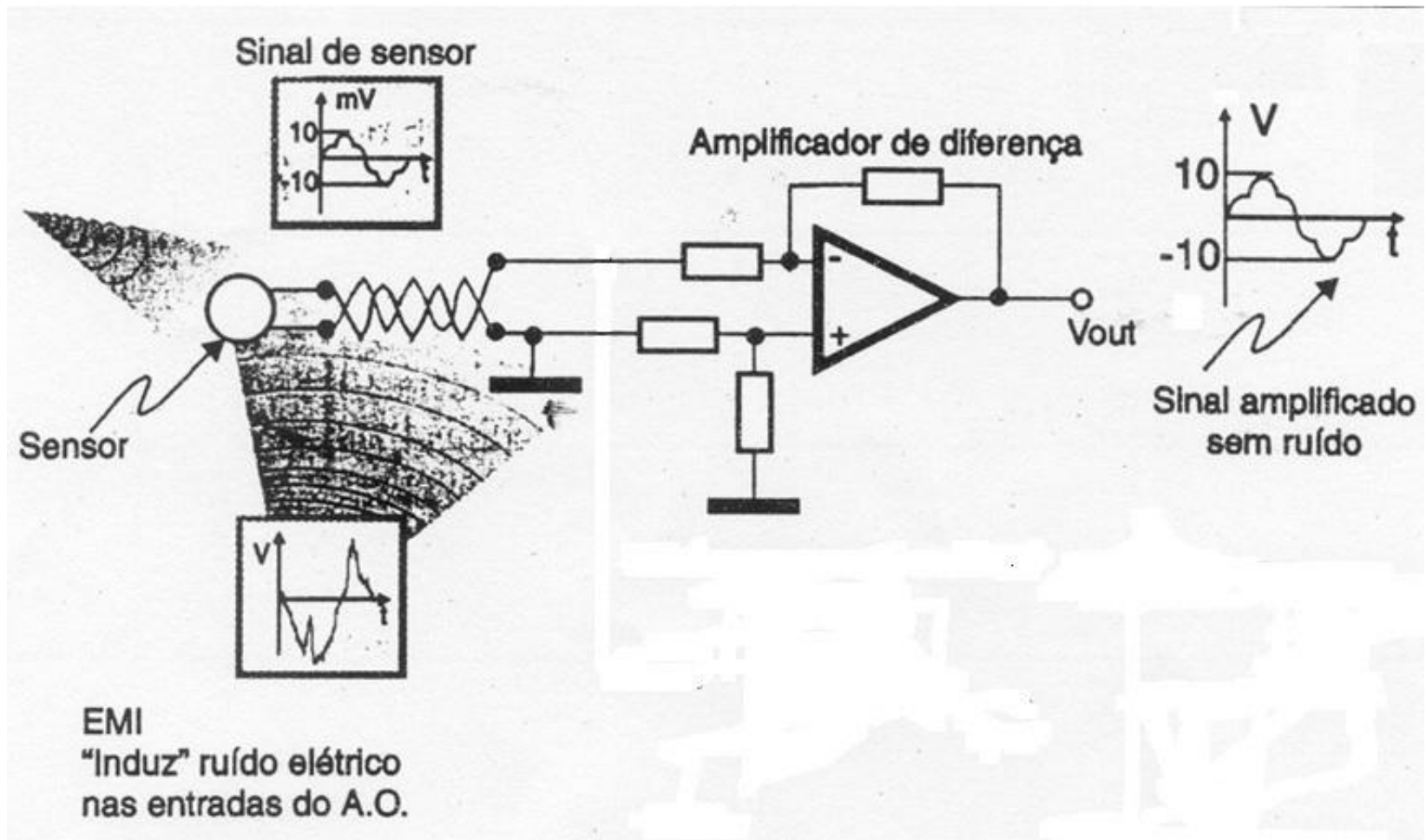
$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1} + \frac{R_2}{R_1} v_{I2}$$

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

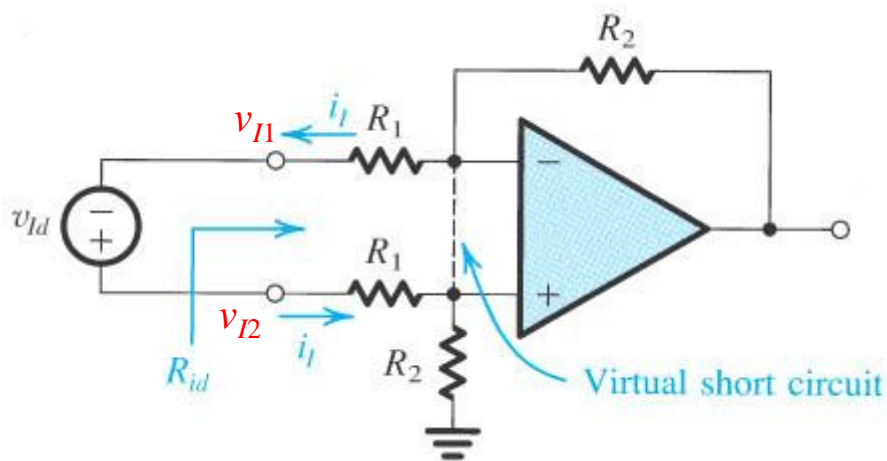
ou

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

Amplificador Subtrator- Ex. Aplicação



Amplificador Subtrator- Impedância de Entrada Diferencial



$$v_{Id} = v_{I2} - v_{I1}$$

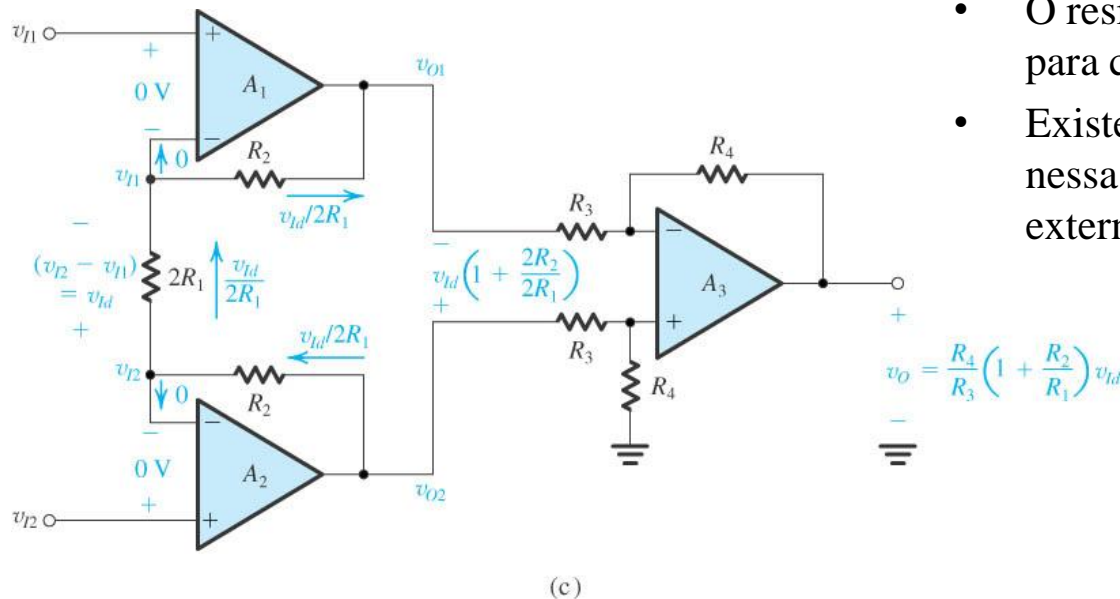
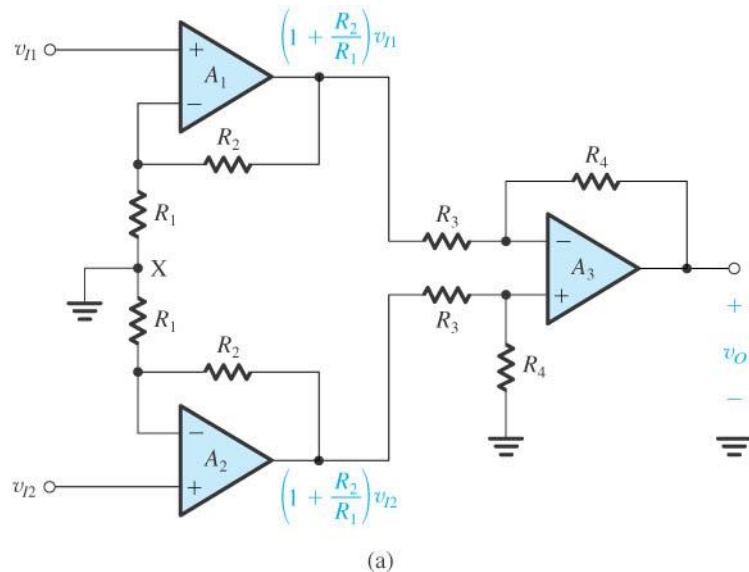
$$R_{id} = \frac{v_{Id}}{i_1}$$

$$v_{Id} = R_1 i_1 - 0 + R_1 i_1 = 2R_1 i_1$$

$$\text{Logo: } R_{id} = 2R_1$$

- A resistência R_{id} deve ser alta para não “carregar “ (consumir corrente) do circuito representado por v_{id} (por exemplo uma ponte de Wheatstone).
- Uma melhor solução para obter uma alta resistência de entrada seria utilizar seguidores de tensão precedendo o amplificador diferencial → *Amplificador de Instrumentação*

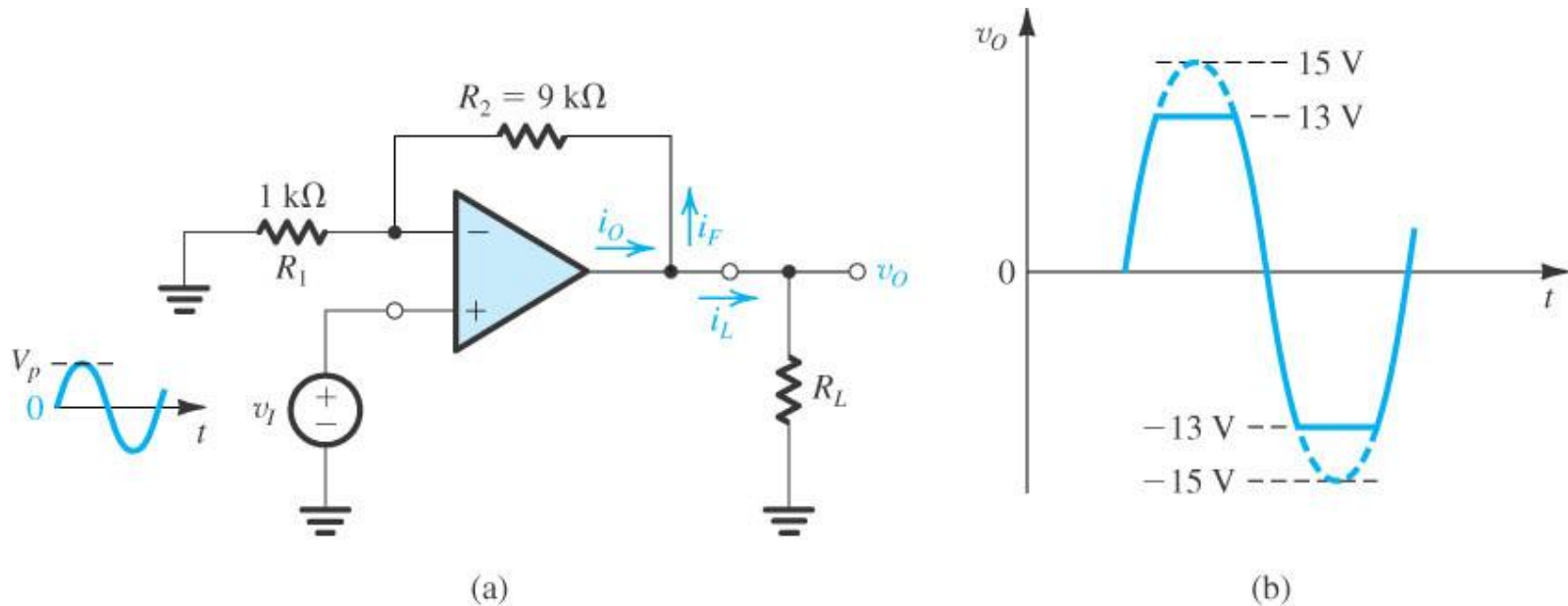
Amplificador de Instrumentação



- Formado por dois estágios de amplificação
 - Primeiro Estágio: dois AMPOP na Configuração Não Inversora (ou dois Seguidores de Tensão se desejarmos apenas ganho unitário nesse primeiro estágio).
 - Segundo Estágio: AMPOP na configuração Amplificador de Diferenças
- Fornece alta resistência de entrada (teoricamente infinita)
- O resistor $2R_1$ pode ser um resistor ajustável para controlar o ganho.
- Existem AMPOPs comerciais já vendidos nessa configuração, onde o resistor $2R_1$ é externo e permite ajustar o ganho.

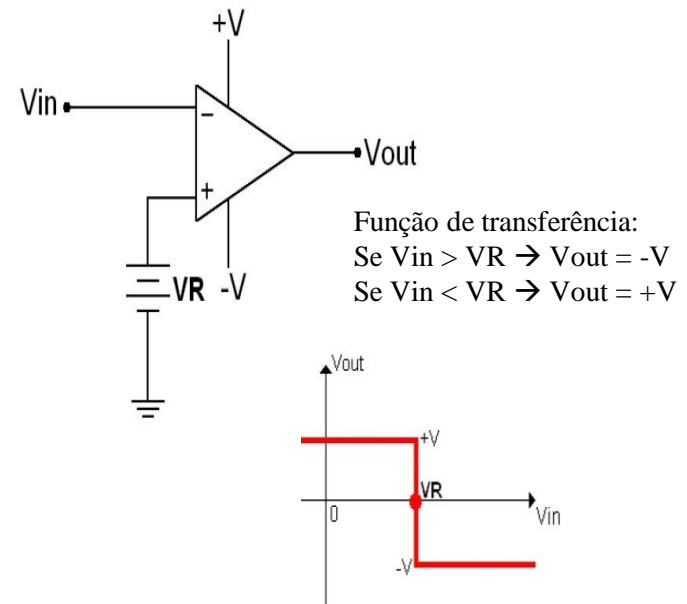
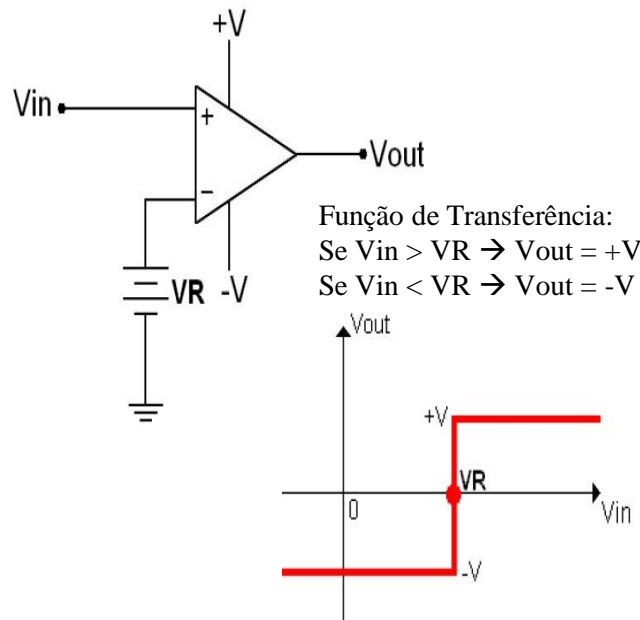
Saturação da Tensão de Saída

- Exemplo com entrada V_p com valor de pico de 1,5 V, ganho 10V/V e operacional ideal alimentado por fonte simétrica +13V e -13V.



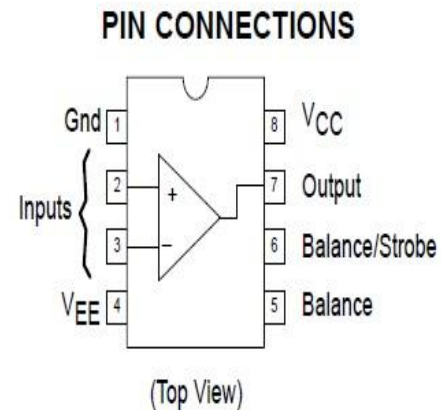
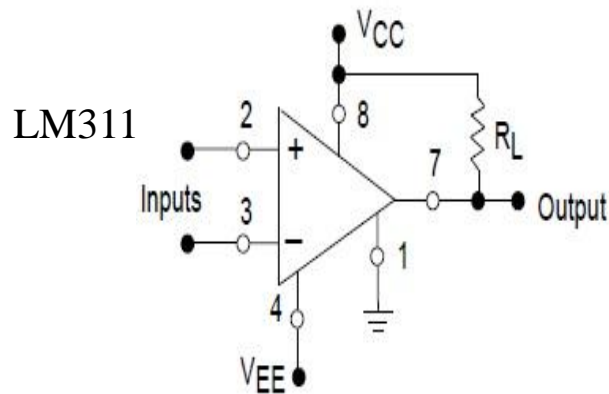
Comparador de Tensão

- Se utilizarmos o AMPOP em malha aberta, ou seja, sem realimentação negativa, obtemos um comparador entre as tensões entre os terminais V_+ e V_- .
- Como o ganho de malha aberta A é muito elevado, e o operacional não está realimentado negativamente, uma pequena diferença entre as tensões dos pinos V_+ e V_- leva a saída do AMPOP à saturação (positiva ou negativa), dependendo qual tensão é maior ($V_{out} = A(V_+ - V_-)$).

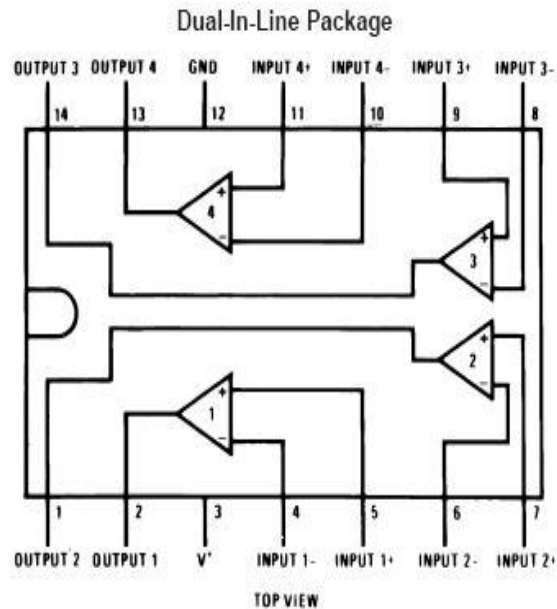


Exemplo Comparadores Comerciais

- Existem Comparadores comerciais otimizados para essa função

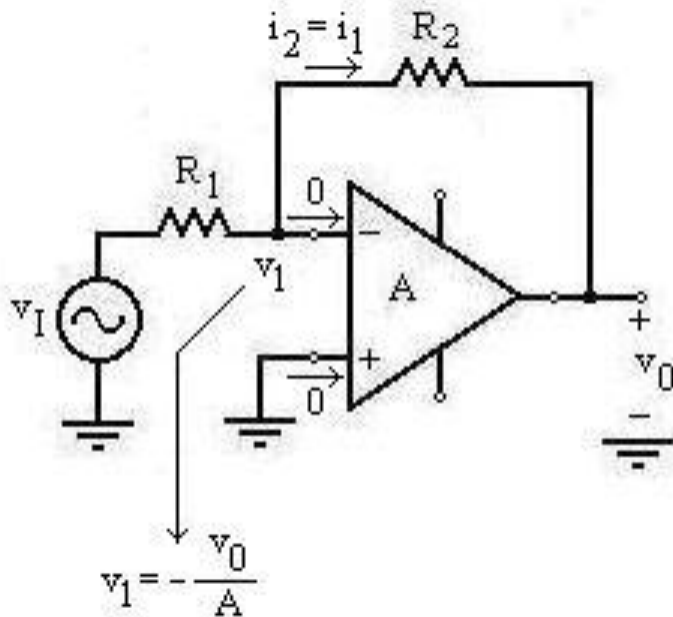


LM339
(Quadruplo)



Apêndice - Configuração Inversora com Ganho em Malha Aberta Finito

- Ganho real (considerando ganho de malha aberta A finito)



$$i_1 = \frac{v_I - (-v_0 / A)}{R_1} = \frac{v_I + v_0 / A}{R_1}$$

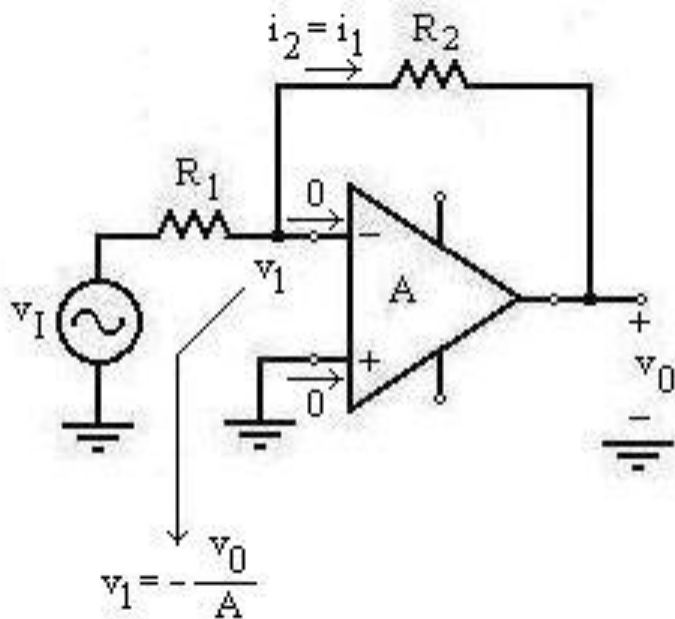
$$-\frac{v_0}{A} - v_0 = i_2 R_2$$

$$v_0 = -\frac{v_0}{A} - \left(\frac{v_I + v_0 / A}{R_1} \right) R_2$$

$$G = \frac{v_0}{v_I} = \frac{-R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A}$$

Apêndice - Configuração Inversora com Ganho em Malha Aberta Finito (cont.)

- Ganho real (considerando ganho de malha aberta A finito)



$$G = \frac{v_0}{v_I} = \frac{-R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A}$$

- Se: $\frac{(1 + R_2 / R_1)}{A} \ll 1 \quad (A \rightarrow \infty)$

ou seja:

$$1 + R_2 / R_1 \ll A$$

então:

$$G = \frac{v_0}{v_I} \approx \frac{-R_2}{R_1}$$

Apêndice - *Off Set* em Amplificadores Operacionais Reais

- Idealmente, por exemplo, com entrada nula, o sinal de saída do amplificador operacional devidamente realimentado deve ser também nula . No entanto, o sinal de saída poderá ter um pequeno deslocamento (da ordem de mV) devido a uma componente contínua adicionada ao “sinal ideal de entrada”. Este deslocamento é denominado *off set*.
- Para anular o *off set*, ou seja, eliminar o erro CC do circuito podemos utilizar dois terminais apropriados do amplificador operacional (quando existirem) denominados *OFF SET NULL* ou *BALANCE*.