AMPLIFICADOR OPERACIONAL

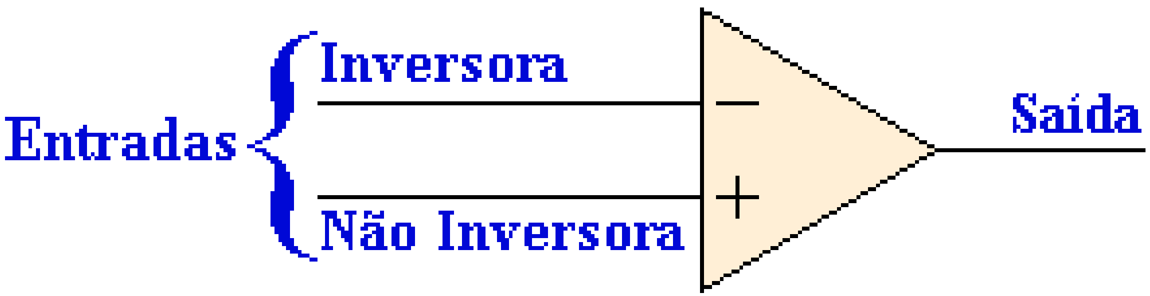
J.R. Kaschny

(2004)

Definição

O **Amplificador Operacional** é um amplificador de **corrente continua** multiestágio com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador **ideal**, ou seja:

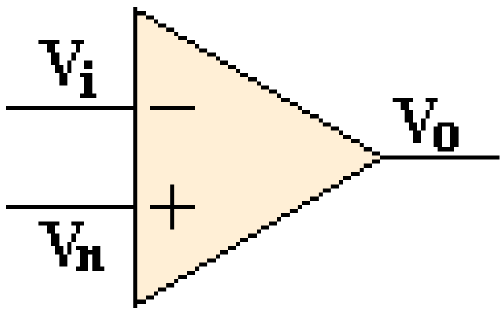
	CASO REAL
a) resistência (impedância) de entrada infinita,	muito alta
b) resistência (impedância) de saída nula,	muito baixa
c) ganho de tensão infinito,	muito alto mas finito
d) resposta de freqüência infinita e	faixa larga mas finita
e) insensibilidade à temperatura (drift = 0)	drift pequeno $\neq 0$



Por que razão “operacional” ?

WIKIPEDIA - O amplificador operacional é chamado desta maneira pois ele realiza uma operação matemática usando tensão como o análogo de uma outra quantidade. (ver http://en.wikipedia.org)

O amplificador operacional (**AOP**) é chamado desta maneira pois ele realiza uma operação matemática, entre as tensões aplicadas nas suas entradas, fornecendo o respectivo resultado na sua saída, ou seja:



$$V_o = (V_n - V_i) \cdot A_V$$

onde Av é o ganho de tensão (uma constante).

A grande utilidade dos AOP’s esta em, uma vez definido um bloco quadripolar padrão, com função de transferencia conhecida e comportamento ideal (ou quase), possibilitar a fácil construção de uma enorme quantidade de circuitos aplicativos sem a necessidade de conhecermos detalhes de sua estrutura interna.

Histórico

1945 1ª geração - Válvulas

1955 2ª geração - Transistores

1965 3ª geração - Monolíticos Bipolares

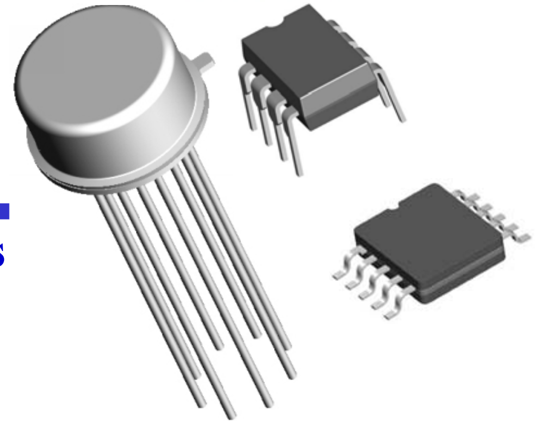
- **1963** - μA702
- **1965** - μA709 } **FAIRCHILD**
- **1968** - μA741

1975 4ª geração - Monolíticos BiFET e BiMOS

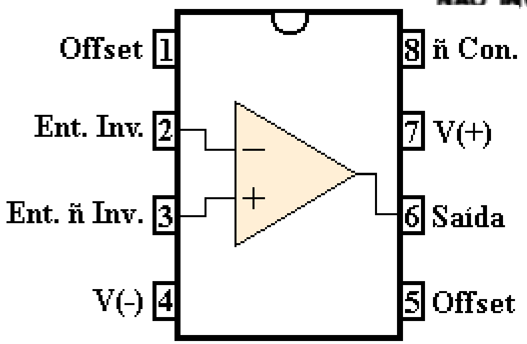
5ª geração - AOP's de Potência, etc ....

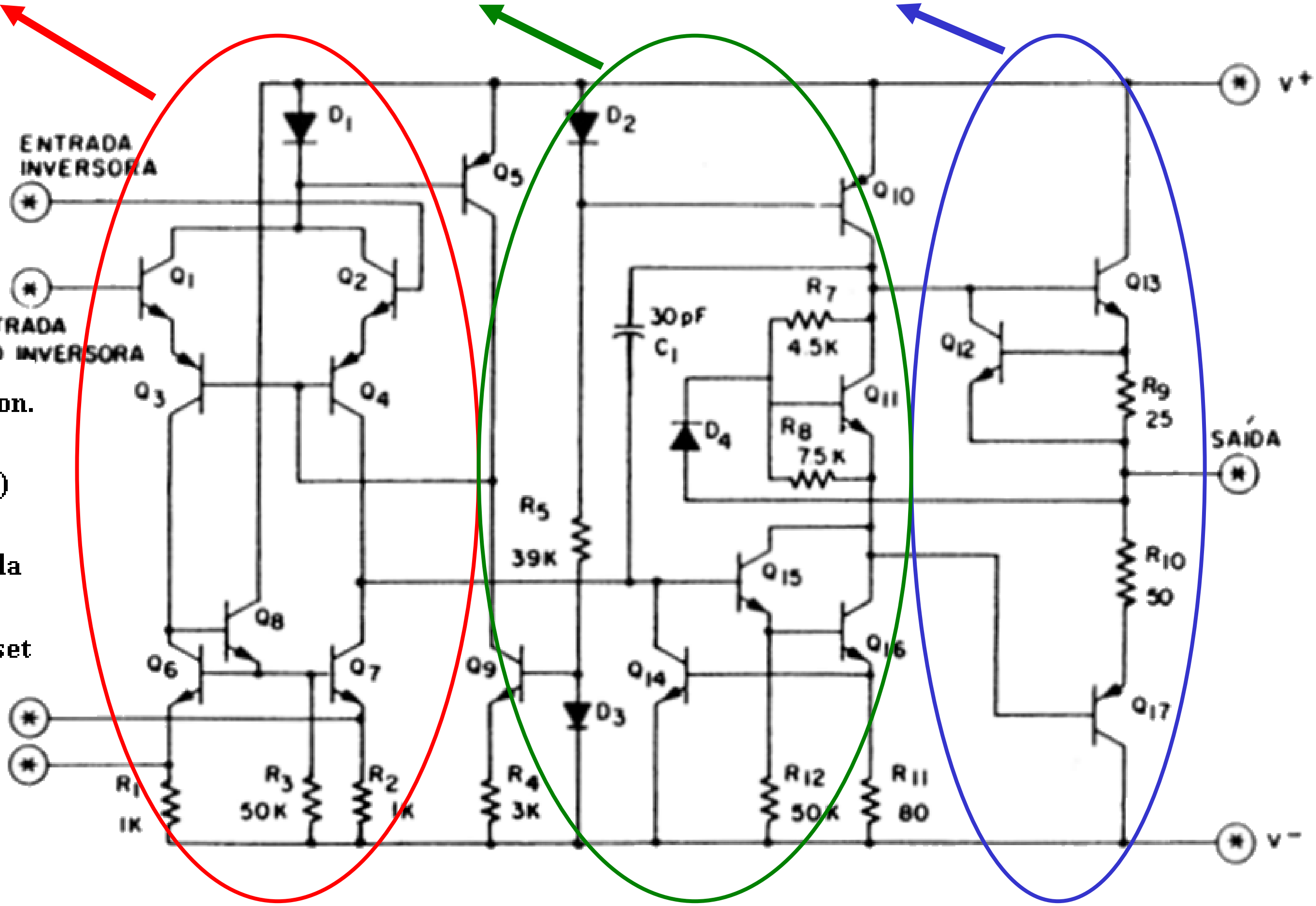
6ª geração - Muitas Inovações ......

Circuitos Integrados



Estrutura interna básica

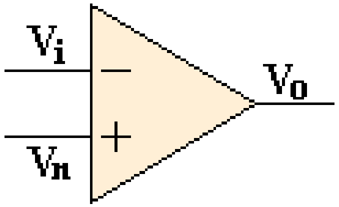


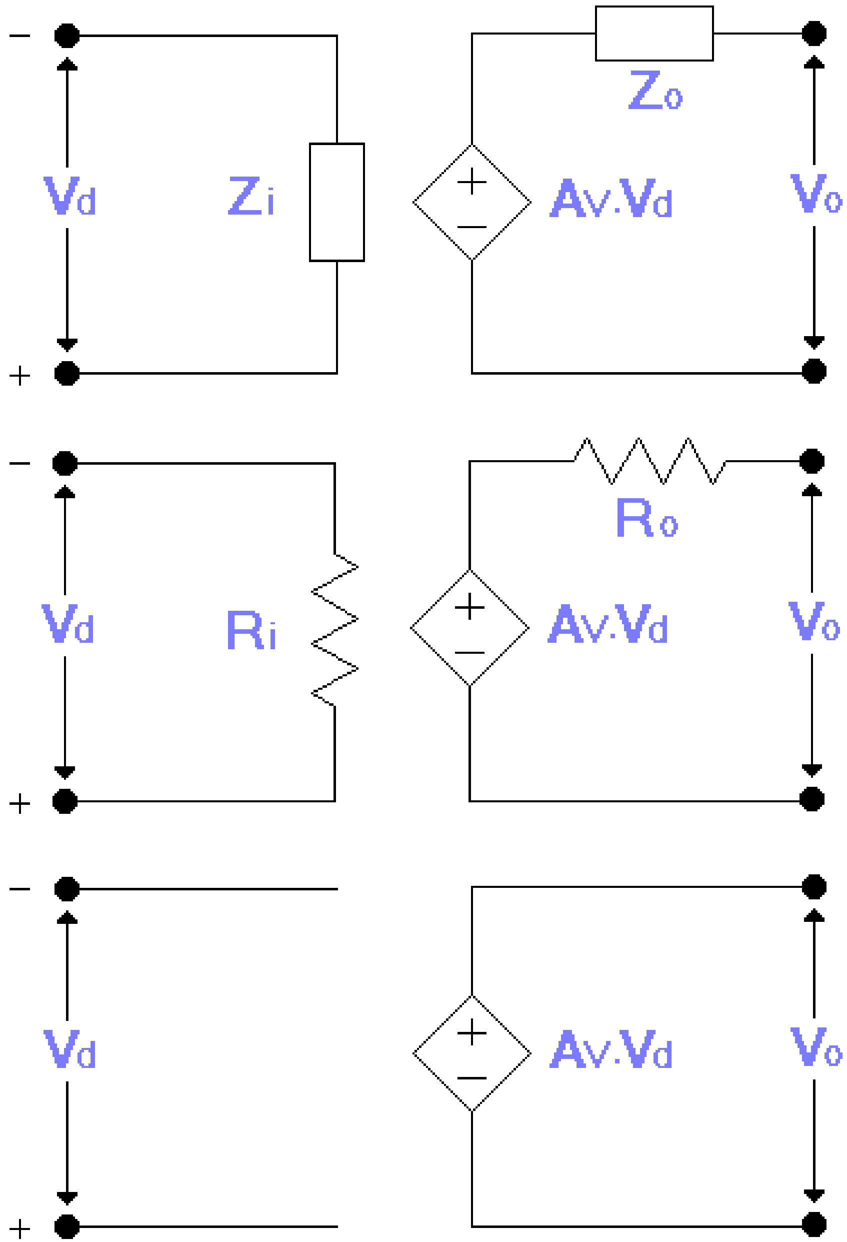


Exemplo: 741

Circuito elétrico equivalente

Sendo $\mathbf{V_d = V_n - V_i}$, podemos representar um AOP por seu modelo elétrico equivalente, tal como ilustrado ao lado.





Em muitos casos, na faixa de freqüências de interesse (baixas), as componentes reativas de **Zi** e **Zo** podem ser desprezadas. De fato, a maior contribuição é dada pelas capacitancias de entrada (**Zi**) e saída (**Zo**) que sõ da ordem de nF's ou mesmo pF's. Portanto, podemos adotar, $\mathbf{Z_i \cong R_i}$ e $\mathbf{Z_o \cong R_o}$.

Como **Ri** (**Zi**) é muito grande e **Ro** (**Zo**) muito pequeno, então o caso ideal pode ser representado pelo circuito ao lado. Na pratica **Ri** é da ordem de MΩ's e **Ro** da ordem Ω's.

Modo diferencial e modo comum

O **Ganho de Tensão em Malha Aberta**, **Av**, possui em geral um valor bastante elevado, da ordem de 200×10^3. Esta grandeza corresponde ao ganho de tensão diferencial do AOP, ou seja,

pois

$$\Rightarrow \quad A_V = \frac{V_o}{V_d} \quad \text{ou} \quad A_V = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{V_o}{V_d}\right)[dB]$$

Sendo assim, teremos:

Saída com polaridade invertida

$$V_i = +V \quad V_n = 0 \quad \Rightarrow \quad V_o = -A_V \cdot V$$

$$V_i = 0 \quad V_n = +V \quad \Rightarrow \quad V_o = +A_V \cdot V$$

Saída com polaridade não invertida

Idealmente, no caso onde temos a mesma tensão aplicada em ambas as entradas, ou seja,

$$V_i = V_n \quad \Rightarrow \quad V_d = 0 \quad \Rightarrow \quad V_o = 0 \qquad \textbf{MODO COMUM}$$

a tensão de saída será evidentemente nula. Contudo, devido a limitações de ordem pratica relacionados à construção real do AOP, teremos uma tensão de saída não nula. A expressão para a tensão de saída deve, na pratica, ser então generalizada. Isto pode ser escrito na forma

$$\left.\begin{aligned} V_d &= V_n - V_i \\ V_c &= \frac{1}{2}\left(V_n + V_i\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad V_o = A_V \cdot V_d + A_C \cdot V_c$$

onde:

Vd = tensão de entrada em modo diferencial

Vc = tensão de entrada em modo comum

Av = ganho de tensão em malha aberta (em modo diferencial)

Ac = ganho de tensão em modo comum

Desta maneira, definimos:

$$\boxed{\mathrm{CMRR} \equiv \frac{A_V}{A_C} \quad \text{ou} \quad \mathrm{CMRR} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{A_V}{A_C}\right)[dB]}$$

Este quociente é chamado **Razão de Rejeição de Modo Comum** (Common Mode Rejection Ratio) e constitui um importante parâmetro a ser considerado na escolha de um AOP para aplicações praticas.

A partir destas expressões podemos facilmente deduzir a expressão:

$$V_o = A_V \cdot V_d + A_C \cdot V_c = A_V \cdot V_d \cdot \left(1 + \frac{A_C}{A_V} \cdot \frac{V_c}{V_d}\right)$$

ou seja:

$$\boxed{V_o = A_V \cdot V_d \cdot \left(1 + \frac{1}{\mathrm{CMRR}} \cdot \frac{V_c}{V_d}\right)}$$

Parâmetros de desequilíbrio (offset's)

Consideremos agora o caso onde:

$$\boxed{V_n = V_i = 0,}$$

ou seja, ambas as entradas estão conectadas a um potencial nulo (terra).

O fato dos componentes do estagio diferencial de entrada, usualmente transistores, não serem realmente idênticos, provoca um desbalanceamento interno do qual resulta uma tensão na saída denominada **tensão de desequilíbrio de saída**,**V_{off}**, também chamada **offset de saída**. A magnitude desta tensão é determinada por:

- **Tensão de desequilíbrio (offset) de entrada**, **V_{io}**, cuja origem esta na diferença entre os VBE's dos transistores que compõem o estagio de entrada do AOP.
- **Corrente de desequilíbrio (offset) de entrada**, **I_{io}**, que é definida como a diferença entre as correntes de polarização das entradas inversora (**I_{bi}**) e não-inversora (**I_{bn}**).

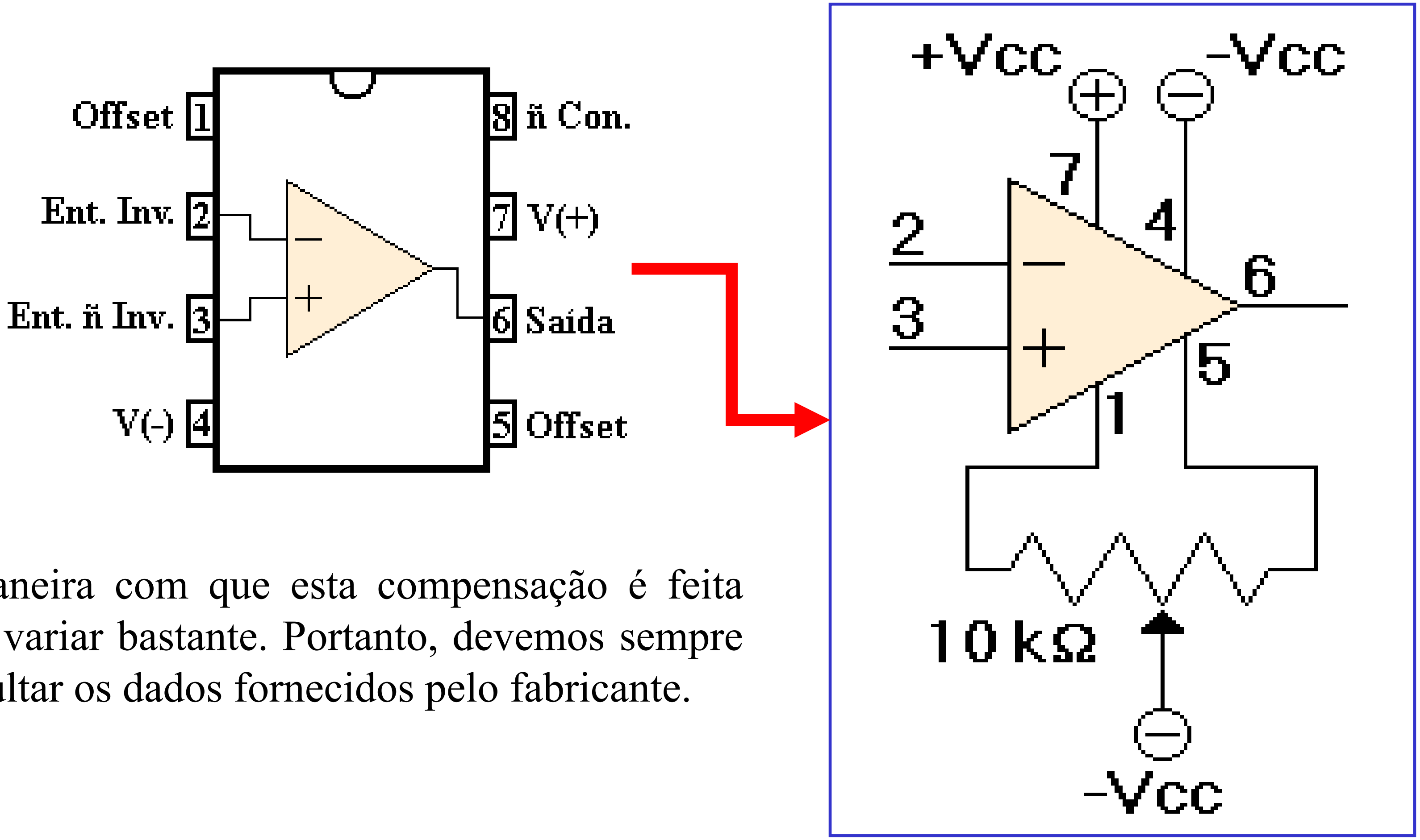
$$\boxed{I_{io} = I_{bn} - I_{bi}}$$

Cabe salientar que: $\boxed{I_b=(I_{bn}+I_{bi})/2}$ é a **corrente de polarização (bias) de entrada**.

- Ganho do AOP, conforme a conexão estabelecida no circuito pelo projetista. O caso mais critico é aquele onde o ganho é igual ao ganho de malha aberta.

Na pratica, esta tensão de offset pode provocar diversos problemas quando usamos um AOP num circuito.

Em vários AOP's comerciais existe um circuito de compensação que permite corrigirmos este problema. Alguns deles são automáticos (compensação interna) e outros feitas via um ajuste externo, por exemplo o **741** (ver figura).



A maneira com que esta compensação é feita pode variar bastante. Portanto, devemos sempre consultar os dados fornecidos pelo fabricante.

Resposta em freqüência

Em uma analise mais detalhada do comportamento de **Av** versus a freqüência do sinal aplicado à entrada do AOP, **f**, obtemos em geral um gráfico do tipo:

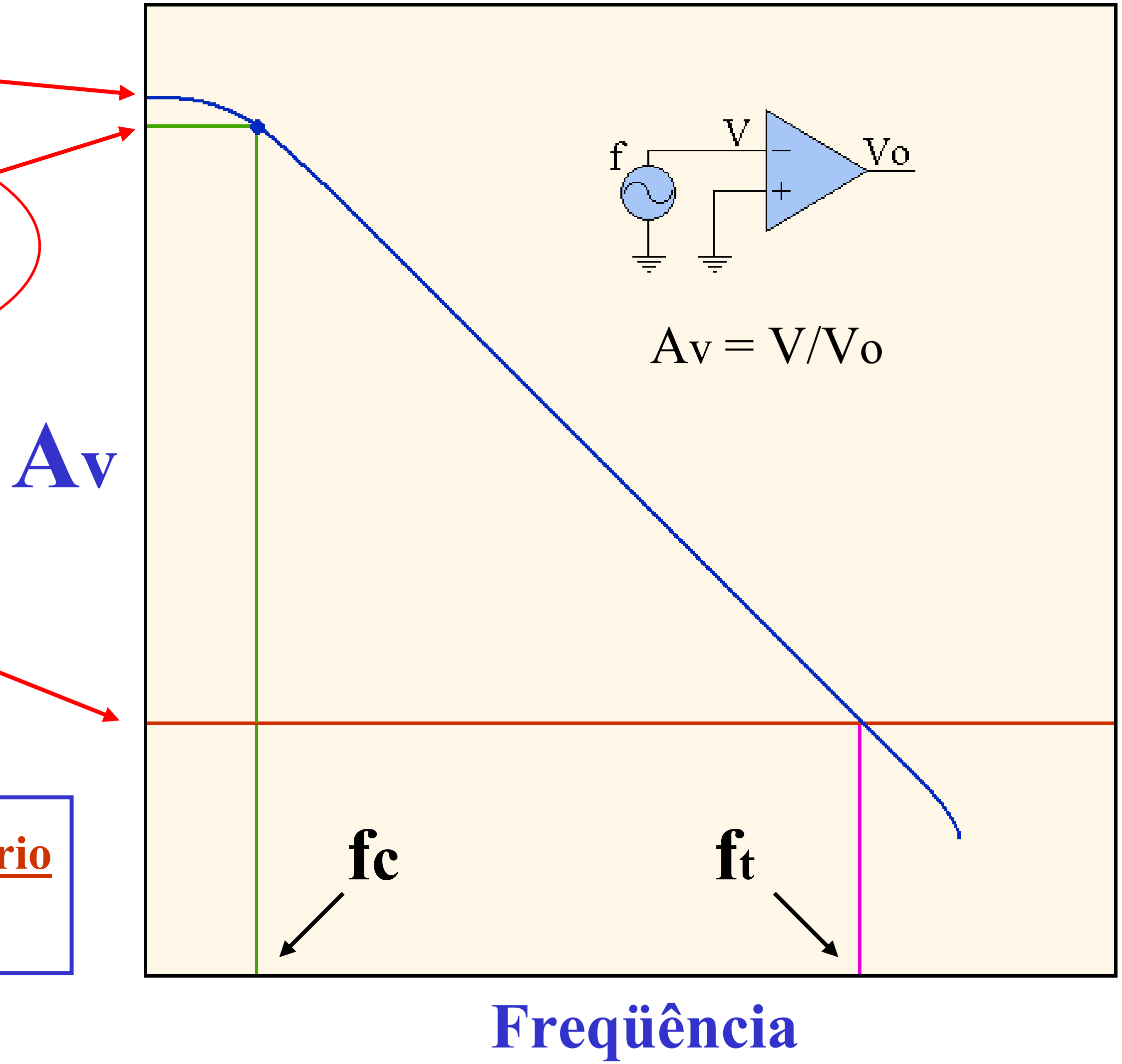
Av(max)

$$\mathbf{Av} = \frac{\mathbf{Av(max)}}{\sqrt{2}}$$

ou

$$\mathbf{Av} = \mathbf{Av(max)} - \mathbf{3dB}$$

Av = 1 ou **Av = 0** dB



onde:

ft ≡ **freqüência de ganho unitário**

fc ≡ **freqüência de corte**

No atual contexto, a freqüência **fc** corresponde a banda passante, em malha aberta

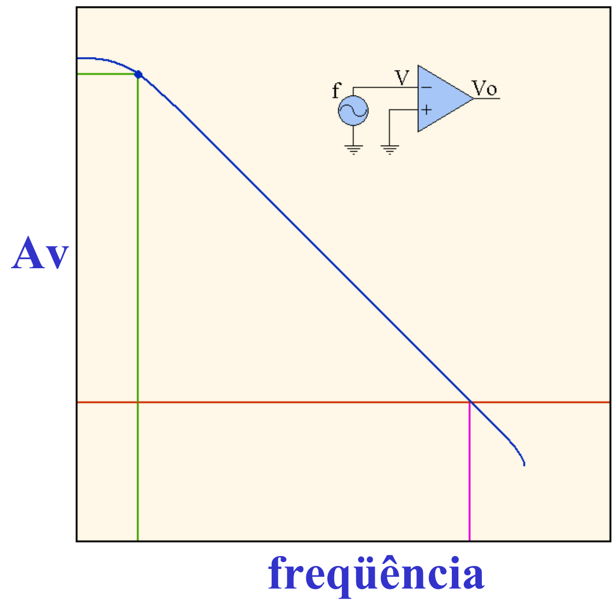
Em muitos casos, **ft** é chamada banda passante de ganho unitário.

As freqüências **fc** e **ft** estão relacionadas por:

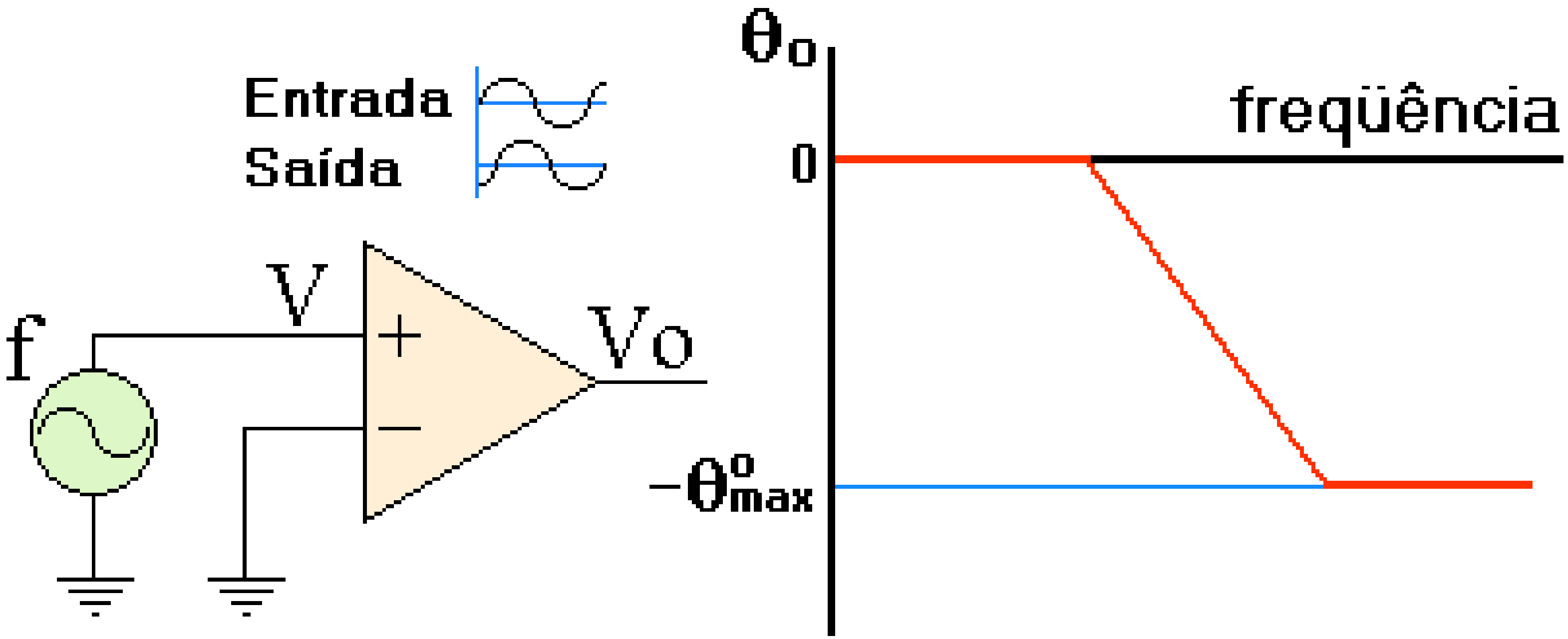
$$\mathbf{f_t = A_{v(max)} \cdot f_c},$$

ou seja, também pode ser chamada **produto ganho-banda passante** do AOP.

Como mostrado no gráfico **Av** × **f**, o ganho de malha aberta decai com a freqüência em uma taxa constante. Isto se deve, em geral, a chamada compensação interna de freqüência do AOP. Esta compensação tem por objetivo conferir estabilidade ao AOP, durante sua operação. Ela esta intimamente relacionada com a estrutura interna do AOP, e por isso sua analise não é muito simples.



Uma informação adicional sobre a compensação de freqüência pode ser obtida a partir do comportamento da diferença de fase entre o sinal de saída e o sinal de entrada, **θo**, versus a freqüência.



Rigorosamente falando, este gráfico ilustra o comportamento global do AOP e não somente as características da compensação de freqüência. De qualquer forma, esta é uma informação bastante importante sobre o AOP.

Taxa de subida (slew-rate)

É definida como a máxima taxa de variação da tensão de saída por unidade de tempo, ou seja:

$$SR = \left(\frac{dVo}{dt}\right)_{MAX}$$

para um sinal senoidal, temos:

$$\mathbf{Vo = Vp \cdot Sen(\omega \cdot t)}$$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{SR = Vp \cdot Cos(\omega \cdot t)\big|_{\omega \cdot t = 0} = Vp \cdot \omega}$$

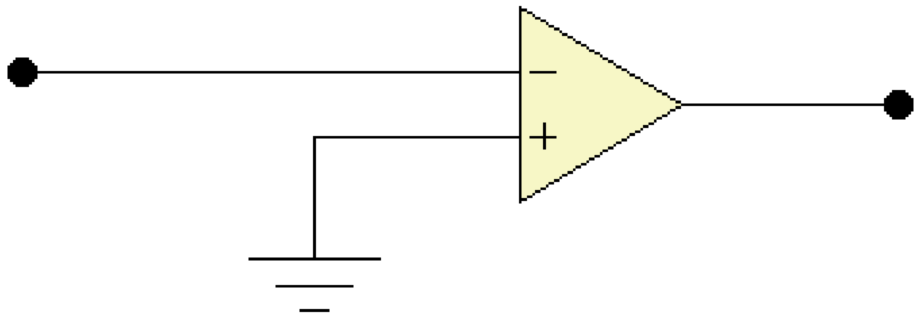
como $$\omega = 2\pi \cdot f \quad \Rightarrow \quad \boxed{f = \frac{SR}{2\pi \cdot Vp}}$$

Esta expressão relaciona a tensão de pico do sinal de saída e a freqüência máxima deste sinal, ou ainda, a freqüência do sinal e sua tensão de pico máxima.

Circuitos com AOP's

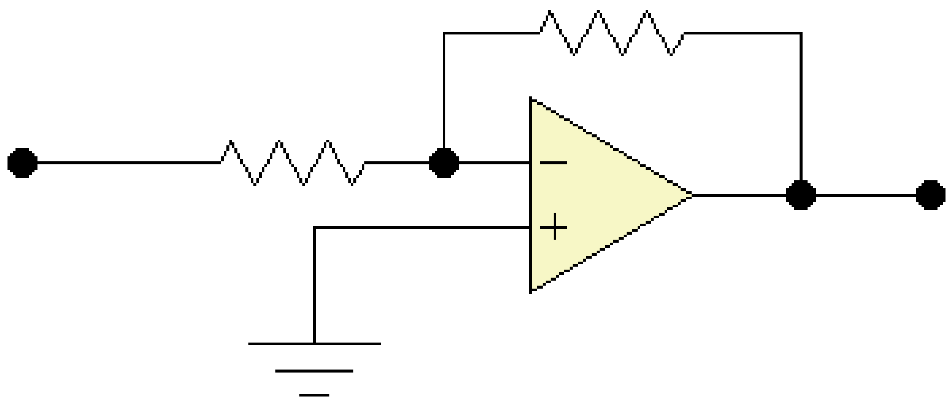
SEM REALIMENTAÇÃO

- Comparadores



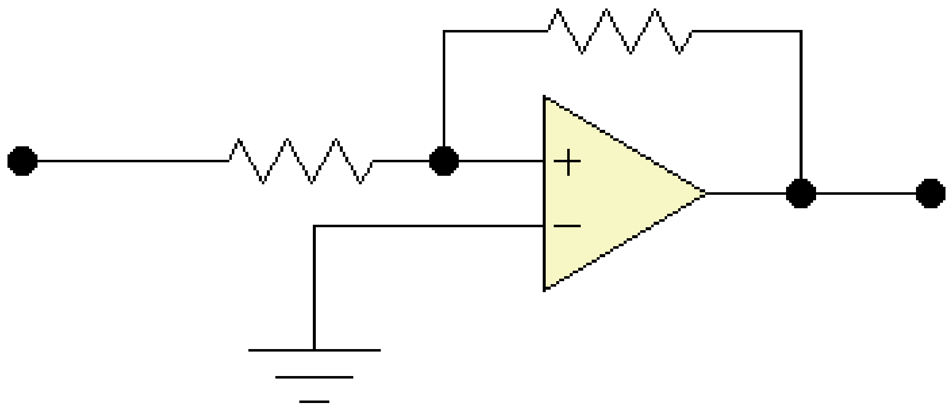
REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

- Amplificador Inversor e não Inv.
- Somadores e Subtratores
- Integradores e Diferenciadores
- Filtros, etc ...

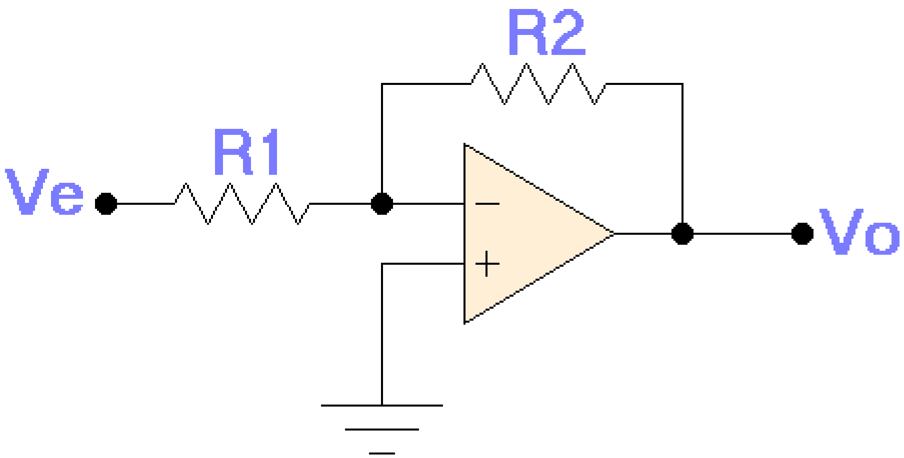


REALIMENTAÇÃO POSITIVA

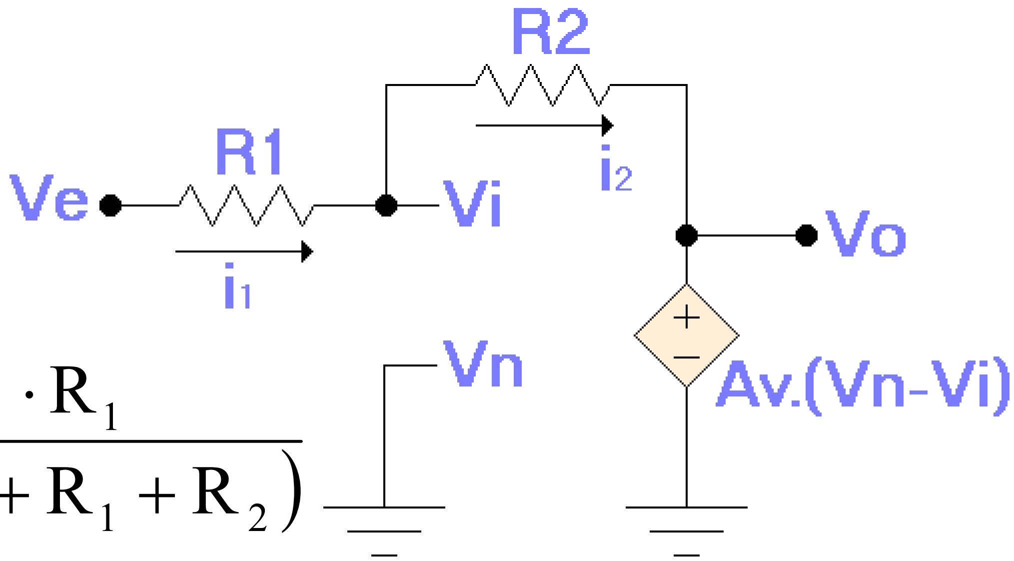
- Osciladores



Amplificador inversor



$$\begin{cases} i_1 = i_2 \\ V_o = A_V \cdot (V_n - V_i) \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dfrac{V_e - V_i}{R_1} = \dfrac{V_o - V_i}{R_2} \\ V_o = -A_V \cdot V_i \end{cases}$$

$$G = \frac{V_o}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{A_V \cdot R_1}{(A_V \cdot R_1 + R_1 + R_2)}$$

No limite $\mathbf{Av} \to \infty$ $\boxed{G = -\dfrac{R_2}{R_1}}$

Av tem que ser GRANDE !!!

... e nunca esquecer do slew-rate!

$$V_i = \frac{R_2}{\left(A_V \cdot R_1 + R_1 + R_2\right)} \cdot V_e$$

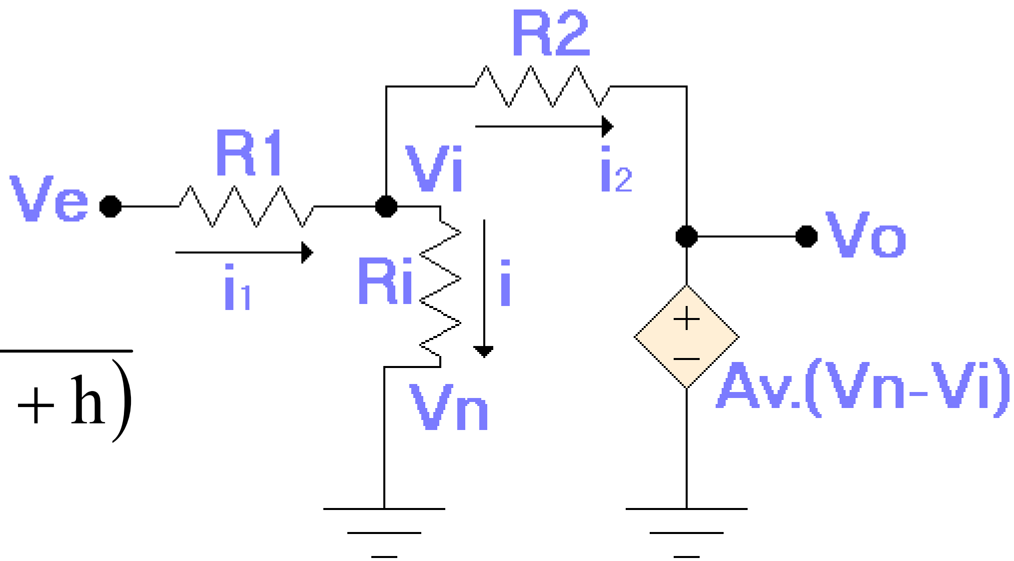
No limite $\mathbf{Av \rightarrow \infty \Rightarrow Vi \rightarrow 0}$

Isto significa que entre as entradas inversora e não-inversora temos uma diferença de potencial nulo (e corrente também nula).

TERRA VIRTUAL

Adicionalmente teremos: $R_e \approx R_1$

Agora incluindo Ri ....

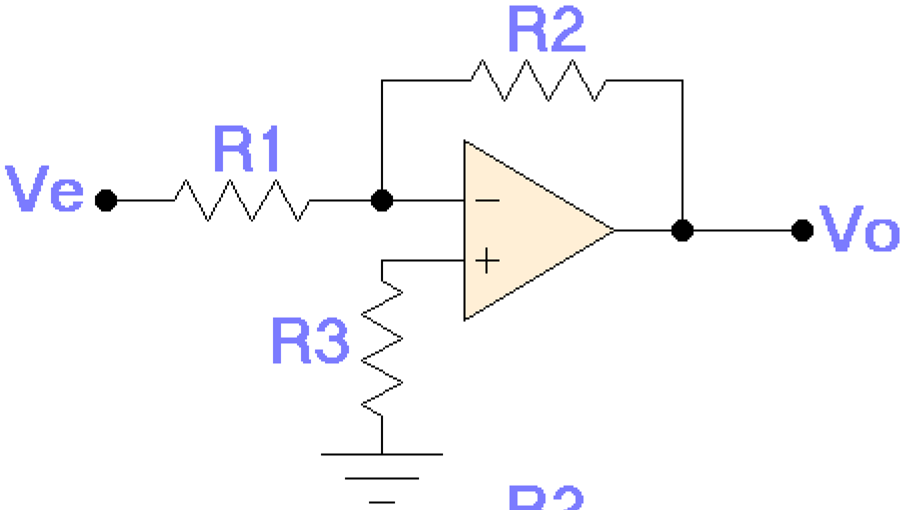


$(i = i_1 + i_2)$

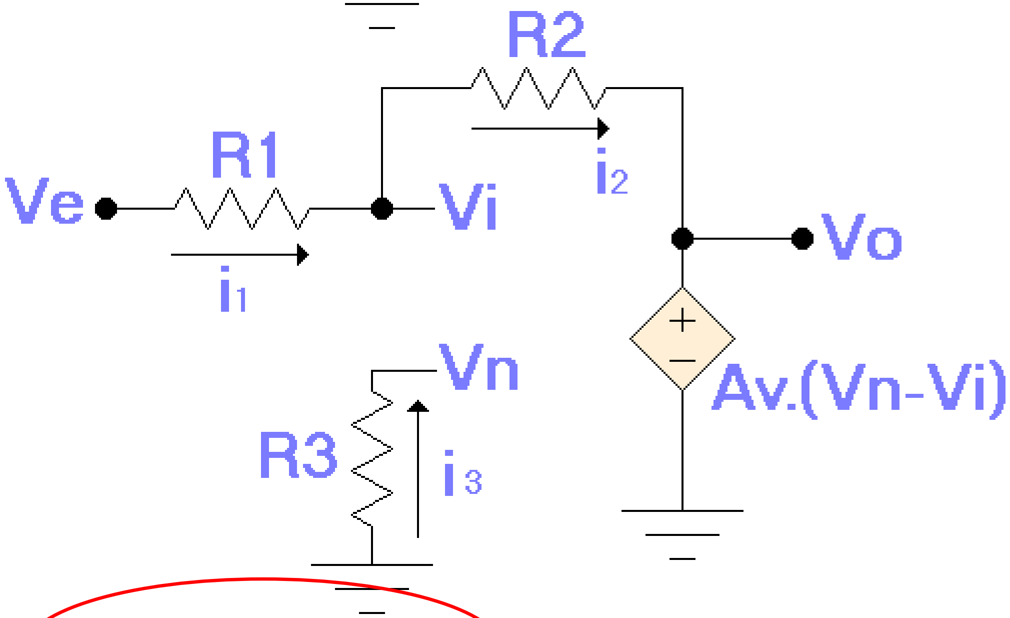
$$G = -\frac{A_V \cdot R_2}{\left(A_V \cdot R_1 + R_1 + R_2 + h\right)}$$

onde $h = \dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_i}$

Inserindo um resistor R3 e levando em consideração as correntes de polarização de entrada, obtemos:



$$\begin{cases} i_1 = \dfrac{V_e - V_i}{R_1} + i_{bi} \\[2ex] i_2 = \dfrac{V_o - V_i}{R_0} \\[2ex] i_3 = i_{bn} \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_0 = A_V \cdot \left(\overset{V_n}{V_{R3}} - V_i\right) \\ \text{onde} \quad V_{R3} = R_3 \cdot i_{bn} \end{cases}$$

$$V_o \cdot \left(A_V \cdot R_1 + R_1 + R_2\right) = -A_V \cdot k \cdot R_1 \cdot R_2 - A_V \cdot R_2 \cdot V_e$$

$$\text{com} \quad k = i_{bi} - i_{bn} \cdot R_3 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

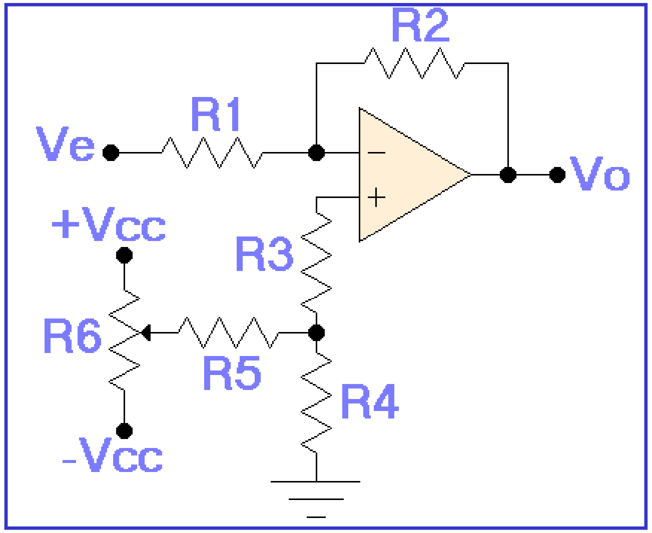
Para eliminar a contribuição devida as correntes de polarização, temos:

$$k \cdot R_1 \cdot R_2 = 0$$

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{i_{bi}}{i_{bn}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{(2 \cdot i_b + i_{io})}{(2 \cdot i_b - i_{io})}$$

sendo $\quad i_{io} \approx \dfrac{i_b}{2}$

$$\Rightarrow \quad \boxed{R_3 \cong \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \times 1.67}$$

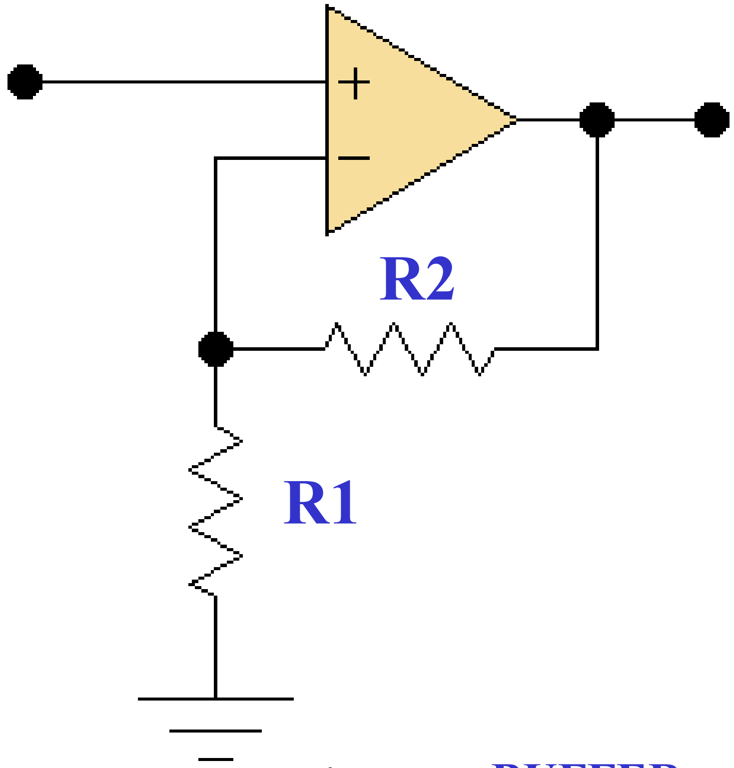


Se adicionalmente levarmos em consideração **Vio**, obteremos um termo constante adicional. Contudo, não será possível anular sua contribuição sem um circuito de compensação de offset, que insira um potencial constante em uma das entradas do AOP.

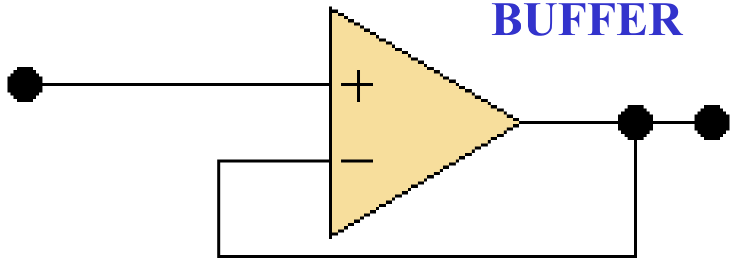
Amplificador não-inversor

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_1 // R_2$$



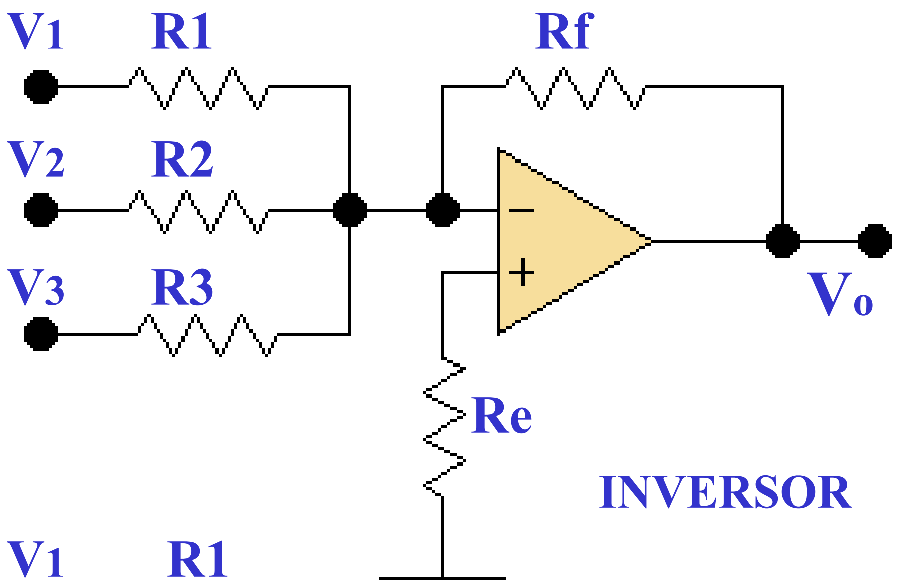
Como caso especial temos o chamado BUFFER, onde **R2 = 0** e **R1** $\rightarrow \infty$, e portanto:



$$G = 1$$

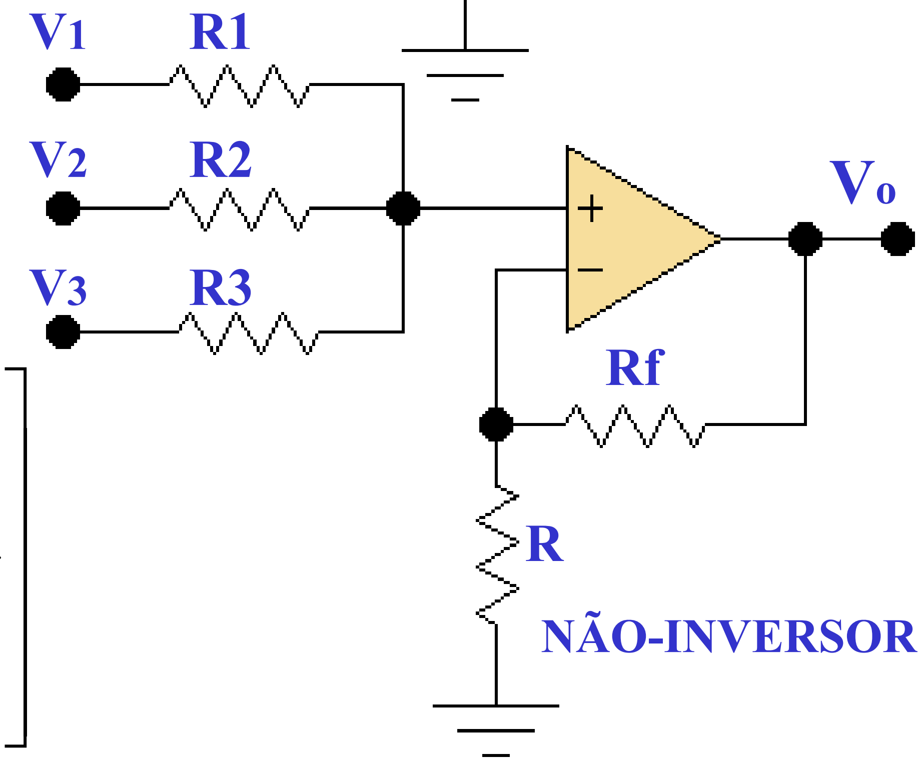
Somador

$$V_0 = -R_f \times \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$



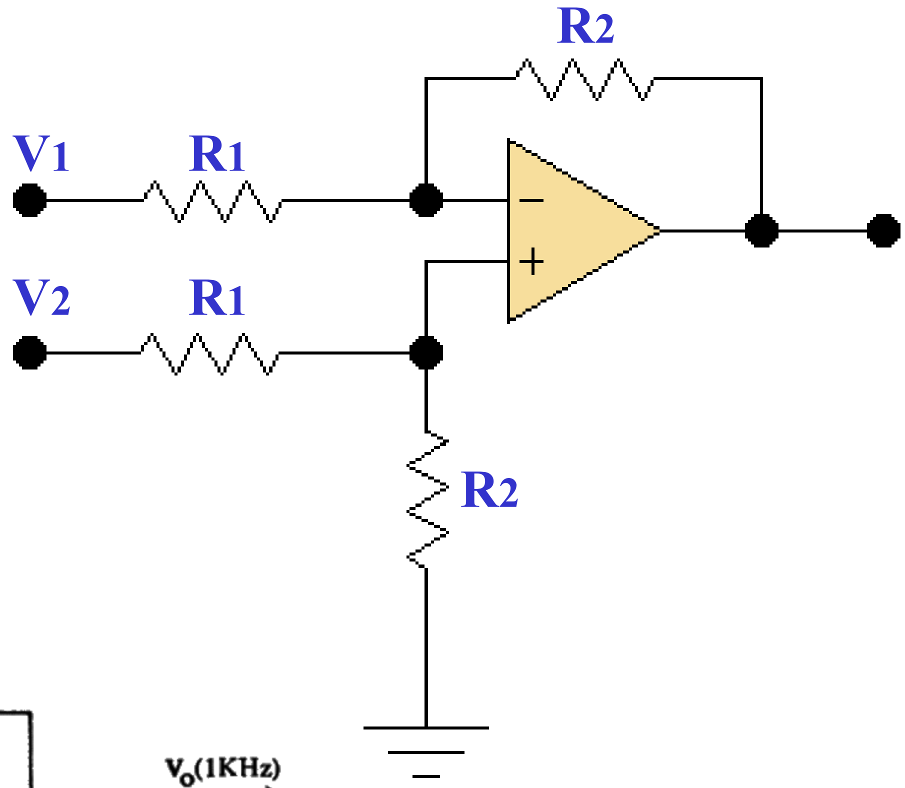
onde, para minimizar o offset fazemos:

$$R_e = R_f // R_1 // R_2 // R_3$$

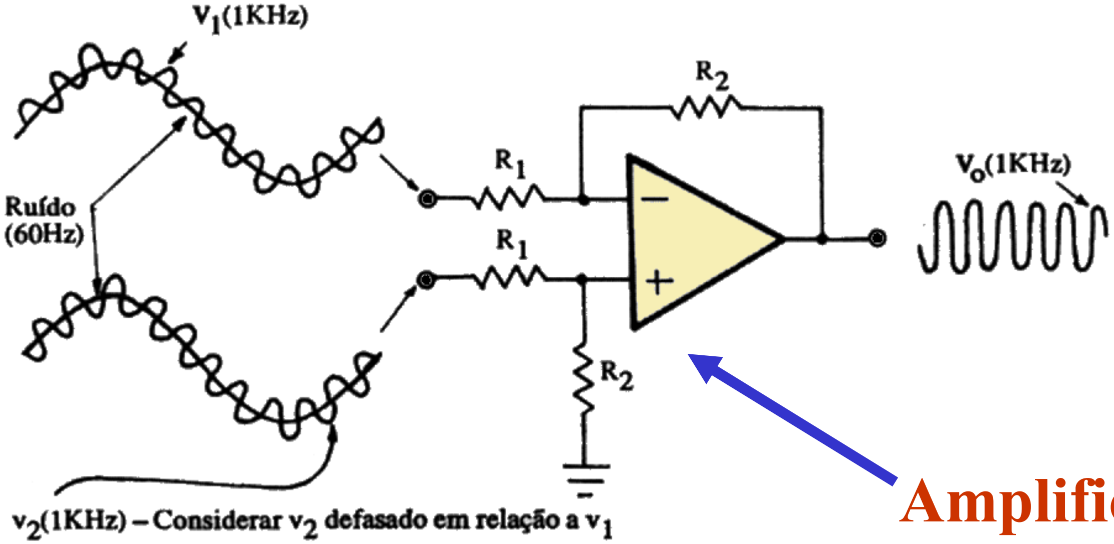


$$V_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)} \right]$$

Subtrator



$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$



Amplificador Diferencial

Referencias bibliográficas

- Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Robert Boylestad e Louis Nashelsky, 6ª edição, editora Prentice-Hall, Brasil (2000).

- Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos, Antônio Pertence Júnior, 6ª edição, editora Bookman, Brasil (2003).

- Analise de Circuitos Elétricos, Victor da Fonte Dias, Instituto Superior Técnico - IFR, disponível em http://www.estg.ipleiria.pt/~lneves/ce_eic/capa.htm, Portugal (1996/97).

Links para navegar

- http://www.epanorama.net
- http://dcoward.best.vwh.net/analog
- http://ed-thelen.org/computer.html
- http://www.techlearner.com/Library.htm