

Aula 3

Amplificador Operacional Introdução

Circuitos Elétricos II

Prof. Henrique Amorim - UNIFESP - ICT

Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

Definição: O amplificador operacional (AmpOp) é um amplificador de múltiplos estágios, de elevado ganho, alta impedância de entrada e com entrada diferencial.

Amplificador: Baseado em circuitos amplificadores transistorados.

Operacional: Permite realizar operações matemáticas (soma, subtração, multiplicação, divisão, média, log, exp, integral, derivada...)

Múltiplos estágios: Internamente possui múltiplos estágios de amplificação

Ganho elevado: A maioria dos amplificadores operacionais possuem ganhos superiores a 10K.

Alta impedância de entrada: Alta resistência de entrada.

Diferencial: A saída é uma função da diferença entre as entradas

Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

Exemplo da aplicação de amplificadores operacionais (instrumentação) no registro de biopotenciais (ECG)

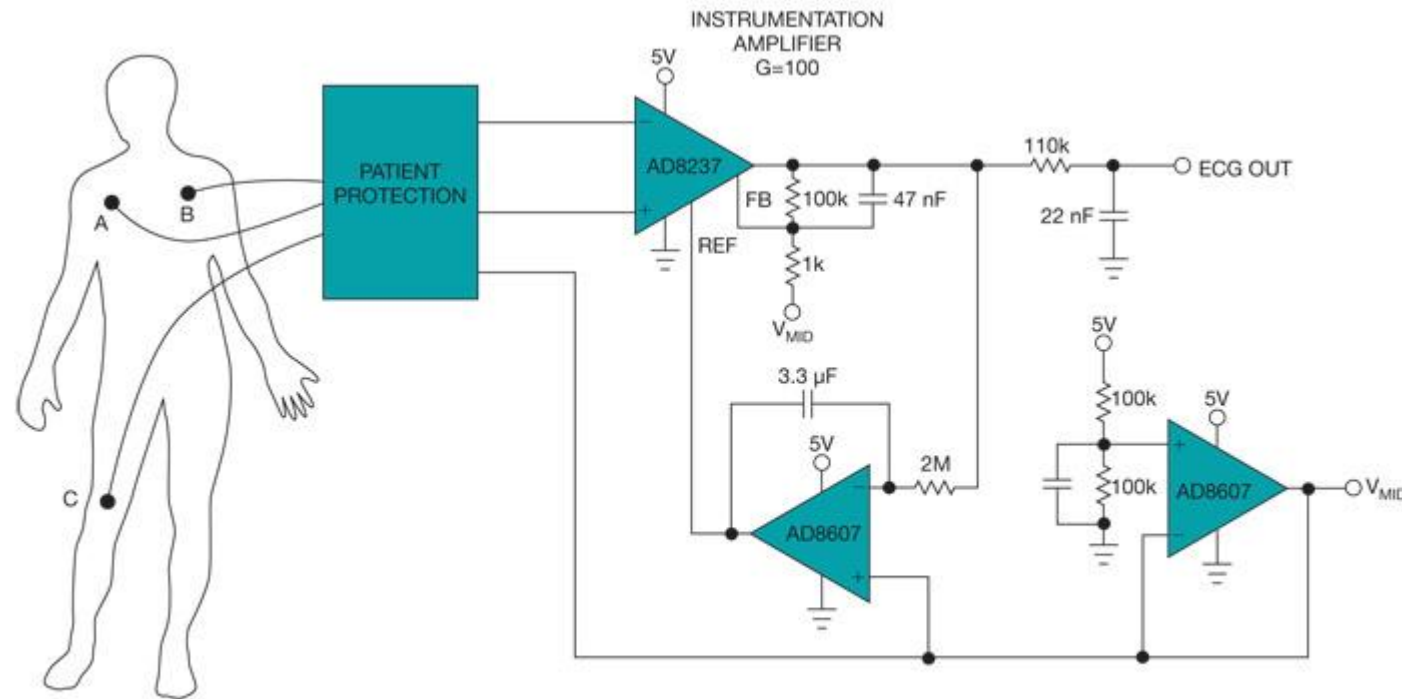
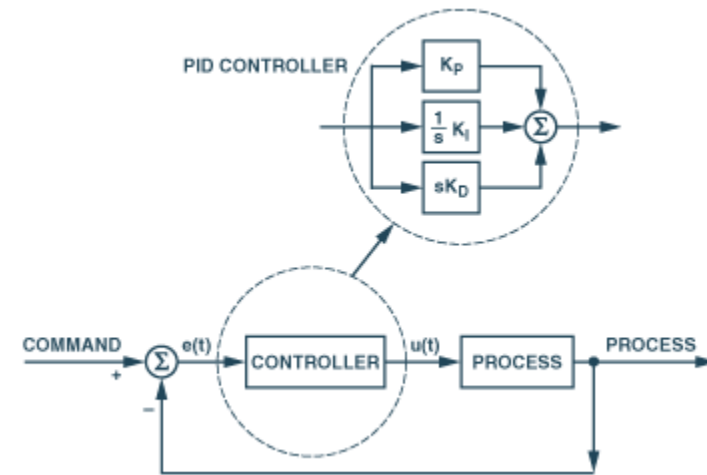
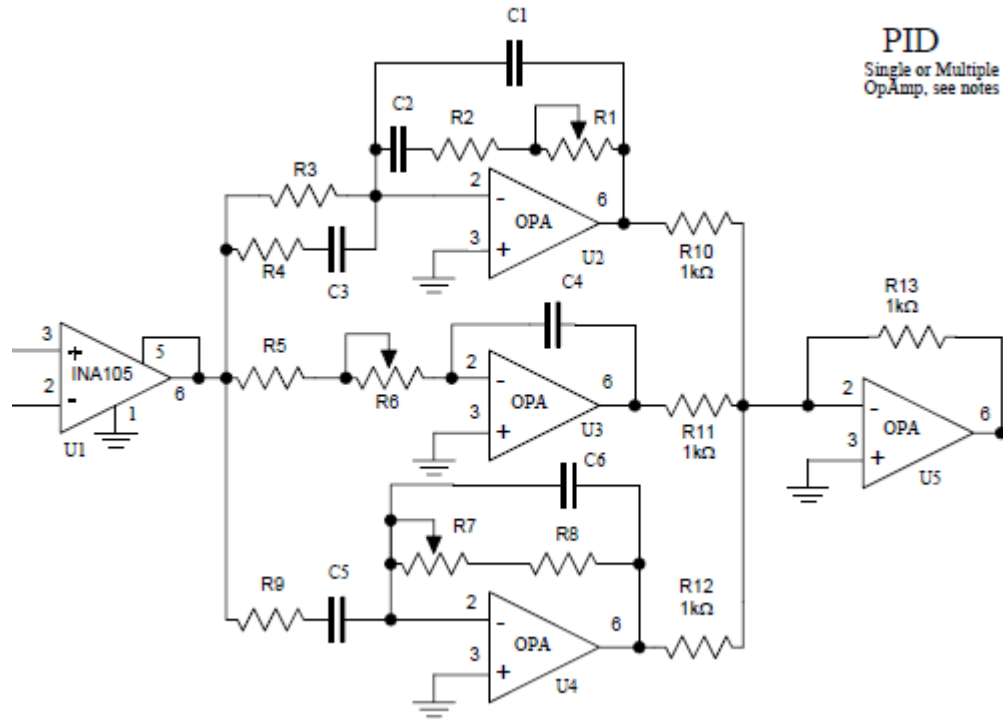


Figure 2 The AD8607 dual micropower instrumentation amplifier is used for integration, buffering, and level shifting in this zero-drift signal-conditioning circuit for an ECG application (courtesy Analog Devices).

Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

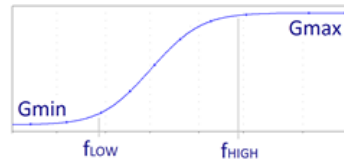
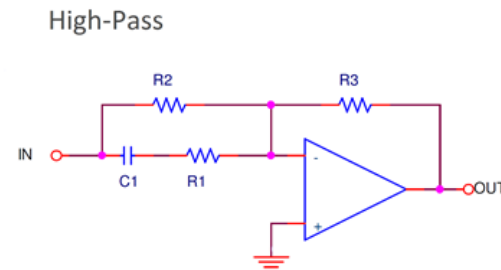
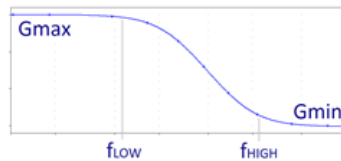
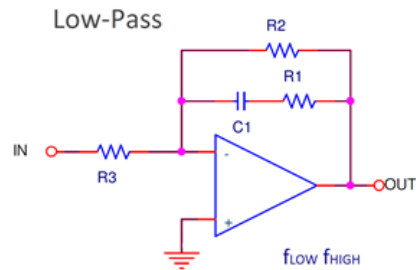
Exemplo da aplicação de amplificadores operacionais em sistemas de controle (PID)



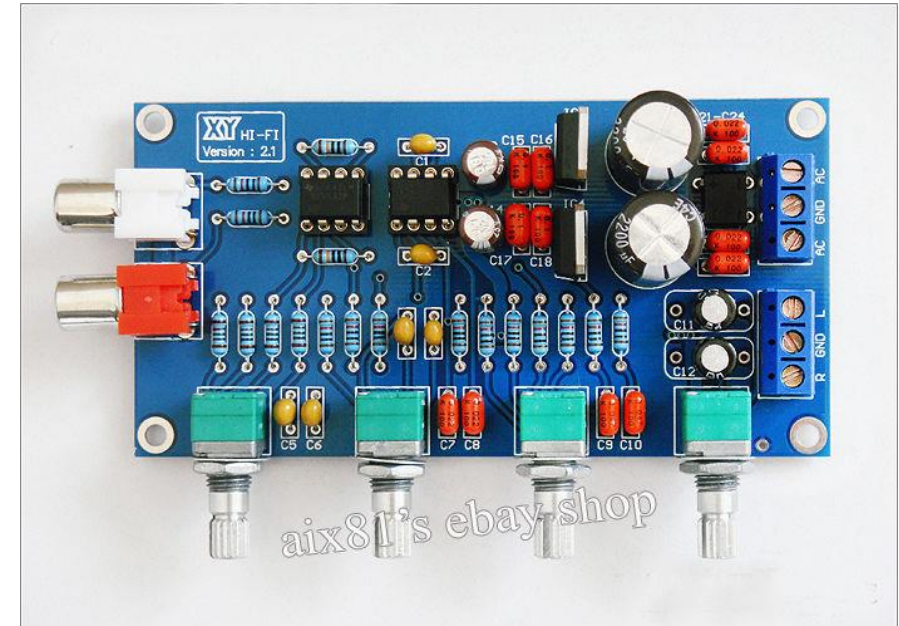
Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

Exemplo da aplicação de amplificadores operacionais em filtro ativos

Inverting OpAmp Shelving Filters

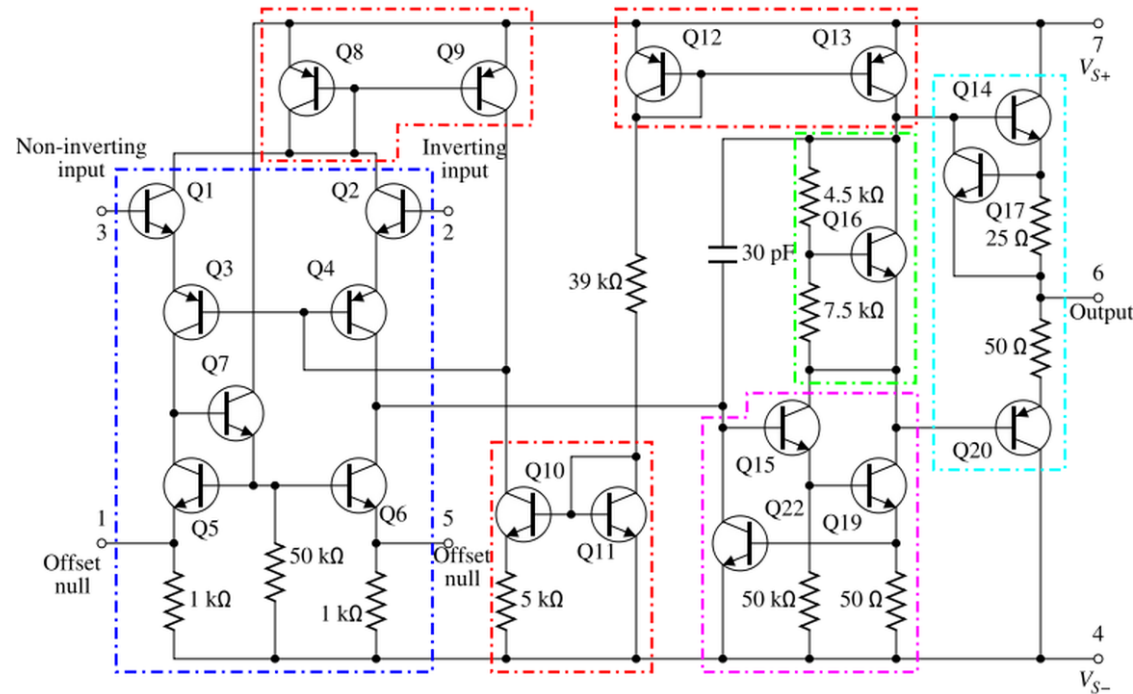


Shelving Filter Architectures ElectroSmash.com

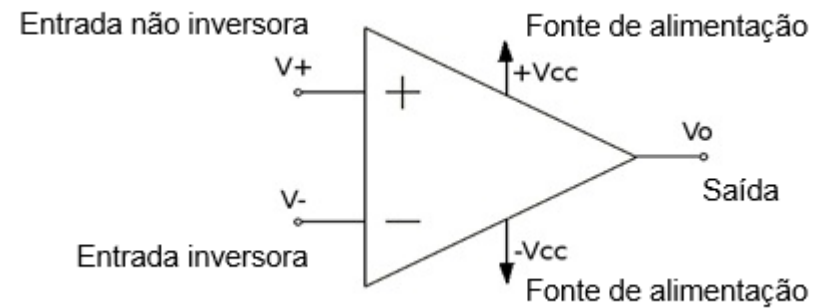


Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

Estágios de amplificação



Simbologia do amplificador operacional

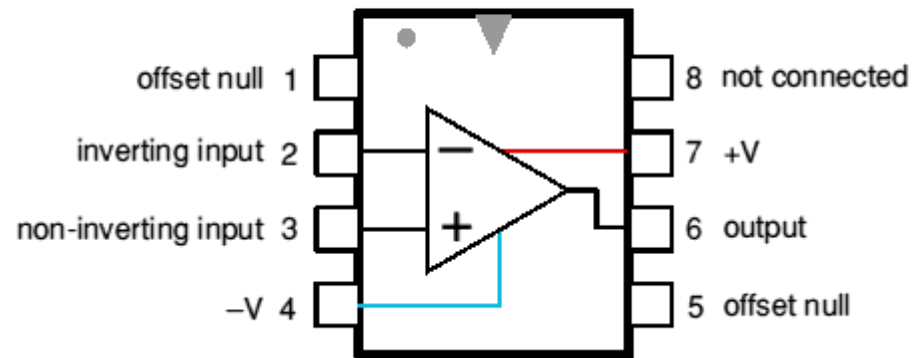


Amplificadores Operacionais (Amp. Op.)

Encapsulamento DIP de um amplificador operacional $\mu 741$

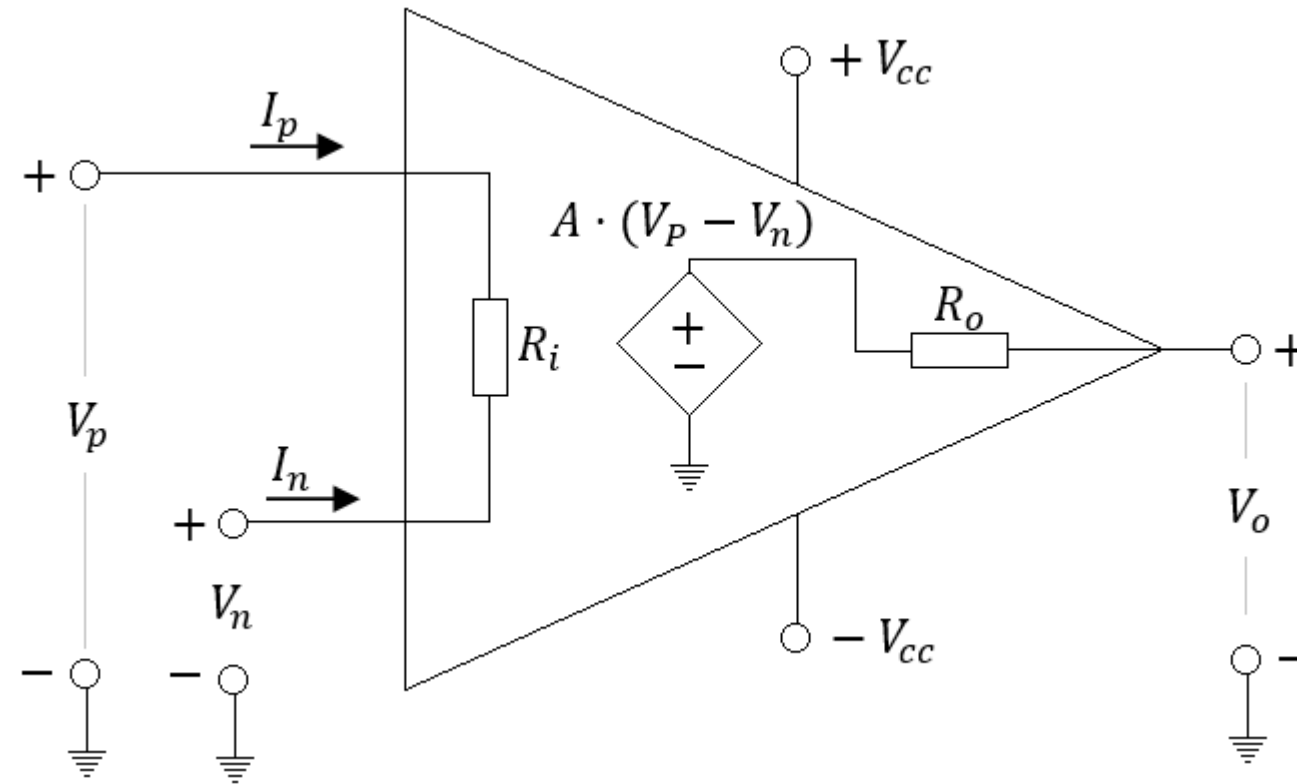
Modelo mais clássico de Amp Op

741 in 8-pin DIL (Dual In Line) pack



Ps. Existem diversos modelos de Amp Op

Modelo de um amplificador operacional



Modelo de um amplificador operacional

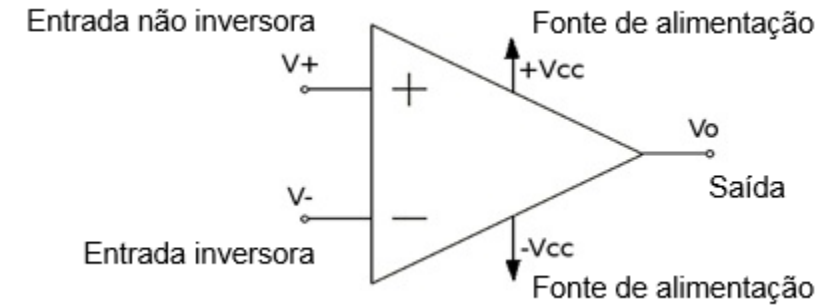
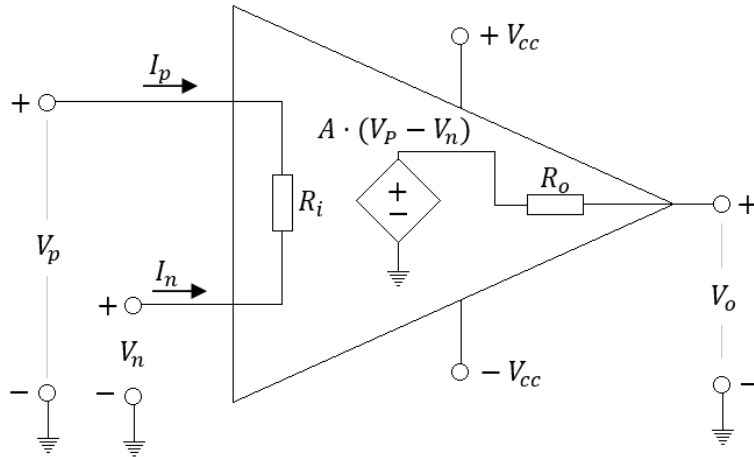


TABELA COMPARATIVA

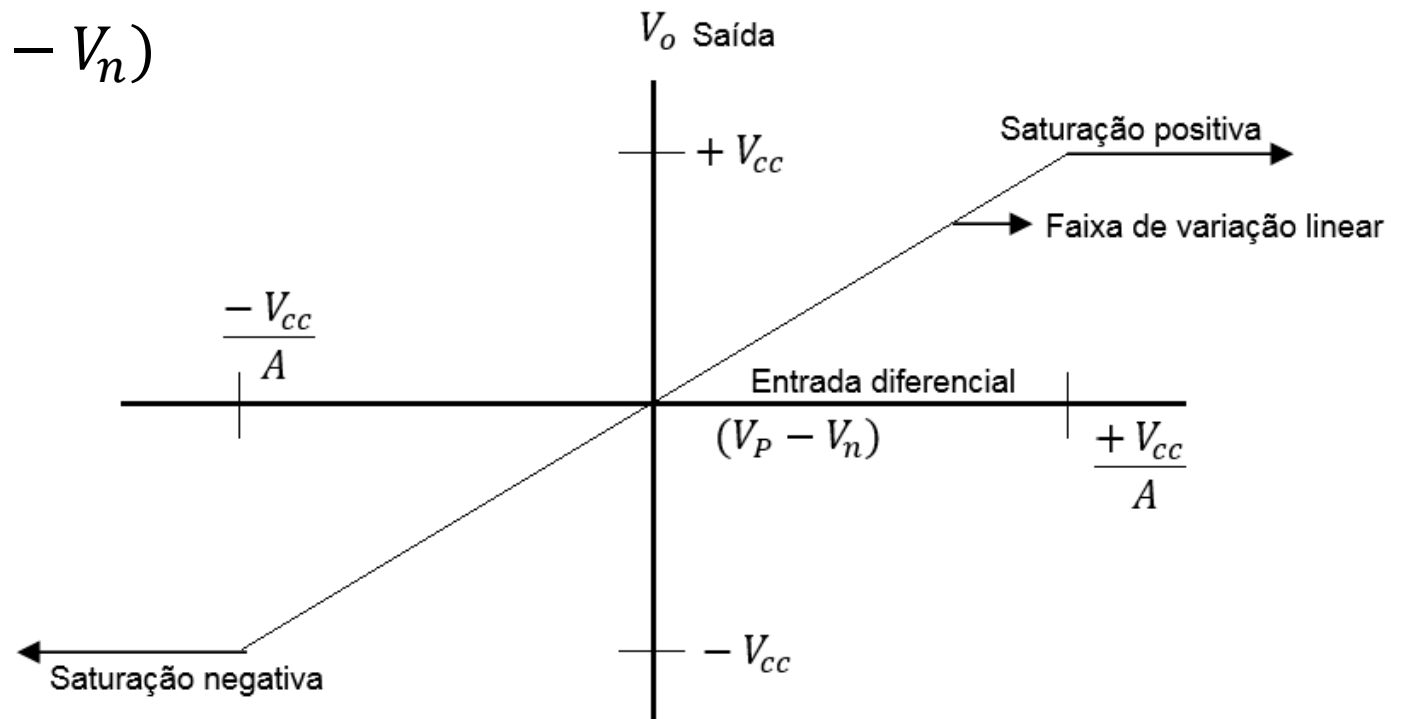
AmpOp Ideal	CI $\mu 741$
$R_i \rightarrow \infty$	$R_i = 2M$
$R_o \rightarrow 0$	$R_o = 75\Omega$
$A \rightarrow \infty$	$A = 10^5$

Faixa de operação de um AmpOp

Considerando as relações do componente $\mu 741$ (desconsiderando a queda de tensão no resistor de saída R_o)

$$A = 10^5 \quad V_o = A \cdot (V_p - V_n)$$

$$\frac{V_o}{10^5} = V_p - V_n$$



A tensão de saída não tem magnitude superior a alimentação ($+V_{cc}$ e $-V_{cc}$)

Faixa de operação de um AmpOp

Exemplo: Considerando o componente 741 com alimentação simétrica de +20 e -20.

$$\frac{V_o}{10^5} = V_p - V_n$$

Saturação Positiva	Saturação Negativa
$\frac{20}{10^5} = V_p - V_n$	$-\frac{20}{10^5} = V_p - V_n$
$0,2 \cdot 10^{-3} = V_p - V_n$	$-0,2 \cdot 10^{-3} = V_p - V_n$

Interpretando: O amplificador Operacional, em malha aberta, trabalha praticamente sempre saturado. Neste exemplo, o AmpOp só não irá saturar se a diferença entre V_p e V_n não ultrapassar **0,0002V**

Primeira restrição para um AmpOp ideal

Para que o amplificador operacional opere na faixa de variação linear, em malha aberta, os valores de entrada devem ser muito próximos. Portanto o circuito se comporta como um comparador.

$$A \rightarrow \infty$$

$$\frac{V_o}{\infty} = V_p - V_n$$

$$V_p = V_n$$

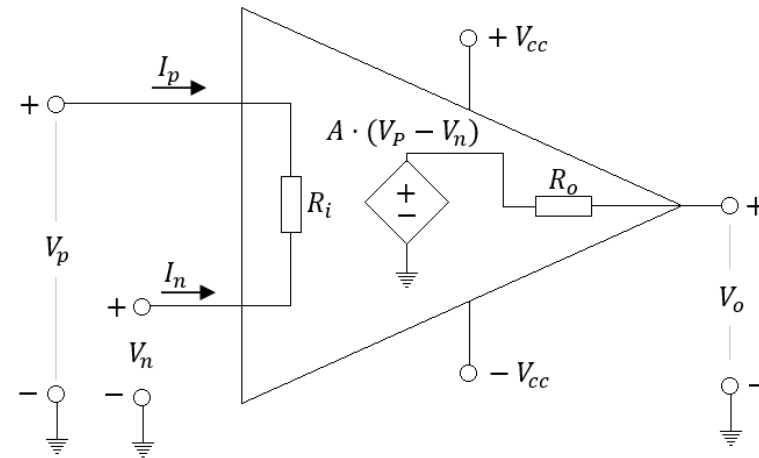


TABELA COMPARATIVA

AmpOp Ideal	CI $\mu 741$
$A \rightarrow \infty$	$A = 10^5$

Segunda restrição para um AmpOp ideal

Considerando que a impedância de entrada de um amplificador operacional é alta, a corrente de entrada é baixa. Um modelo ideal de amplificador operacional considera que as correntes de entrada do AmpOp são iguais a zero.

$$R_i \rightarrow \infty$$

$$i_p = 0 ; i_n = 0$$

$$i_p = i_n = 0$$

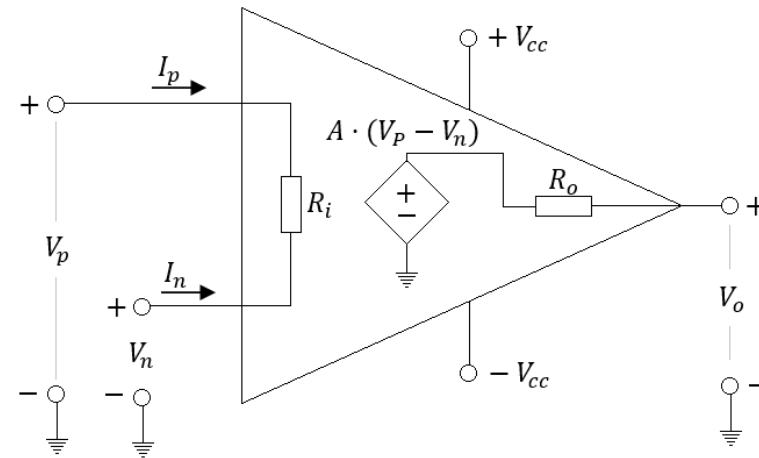
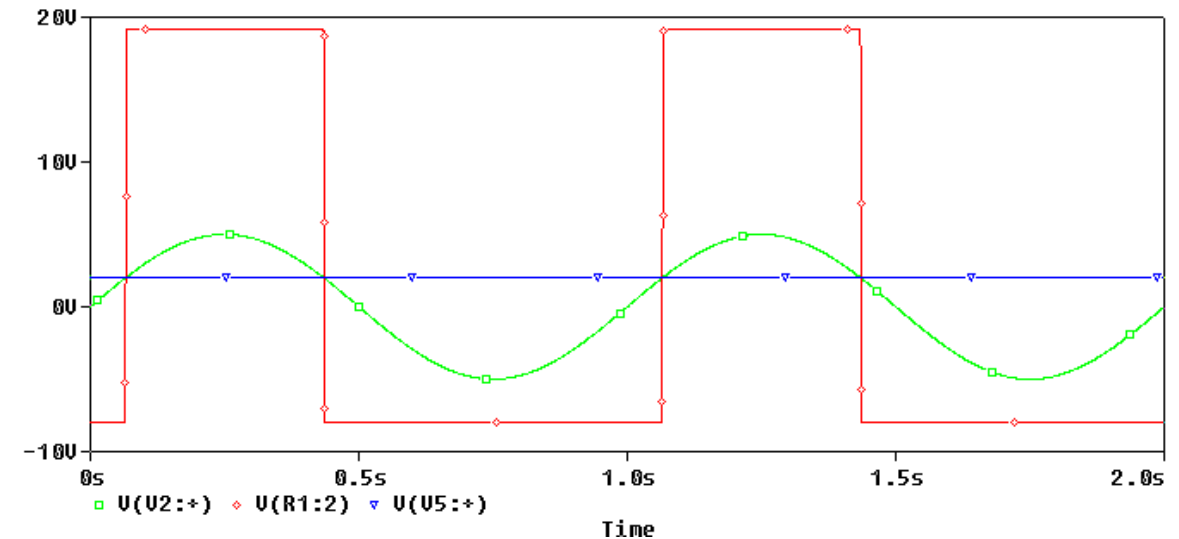
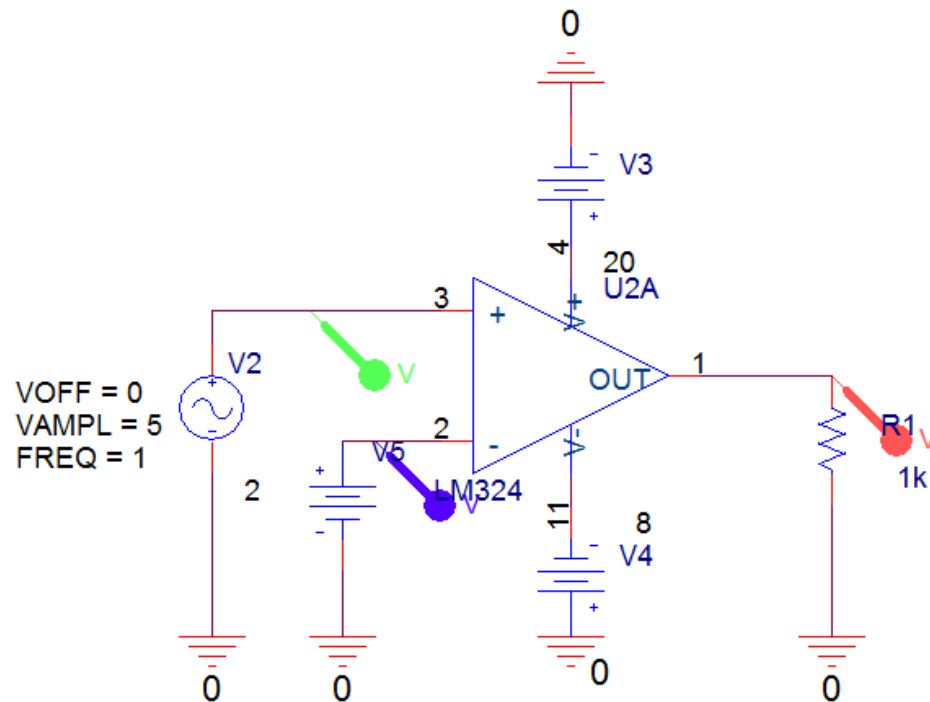


TABELA COMPARATIVA

AmpOp Ideal	CI $\mu 741$
$R_i \rightarrow \infty$	$R_i = 2M$

AmpOp em malha aberta

Exemplo: Analise a resposta de um amplificador operacional em malha aberta, ou seja, um comparador.



Exemplo Extra: <http://everycircuit.com/circuit/5931284239220736>

AmpOp com malha fechada

Para tornarmos o amplificador operacional um elemento com configurações funcionais, precisamos adicionar uma realimentação negativa de saída, com isso expandimos a faixa de variação linear. A realimentação deve ser posicionada na **entrada inversora**, futuramente iremos explorar as implicações de realimentação na entrada não inversora.

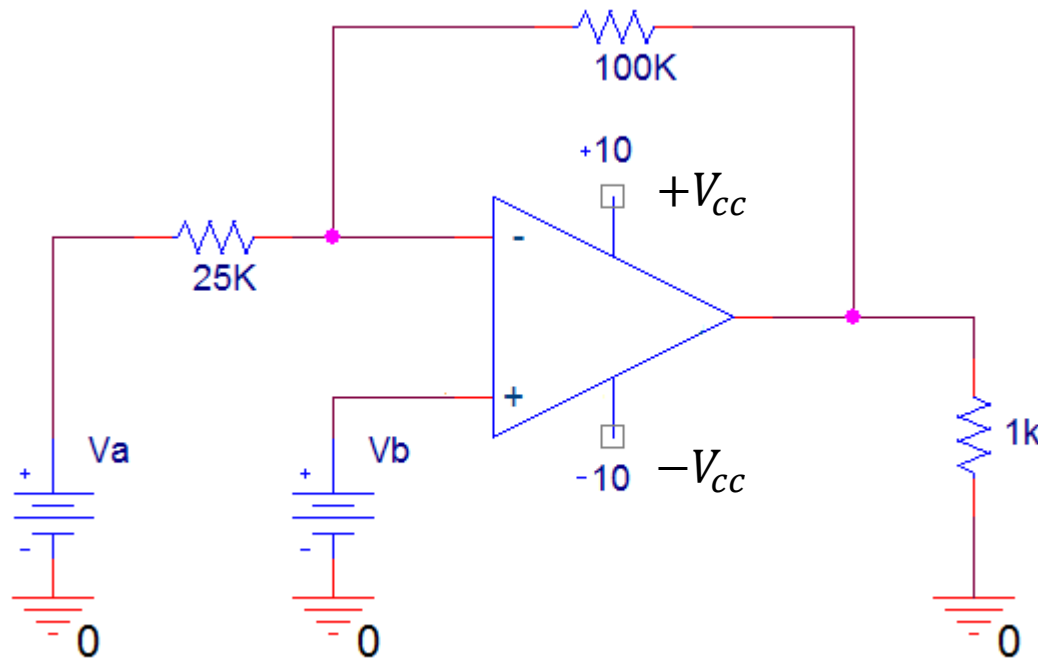


Amplificador Operacional – Malha fechada

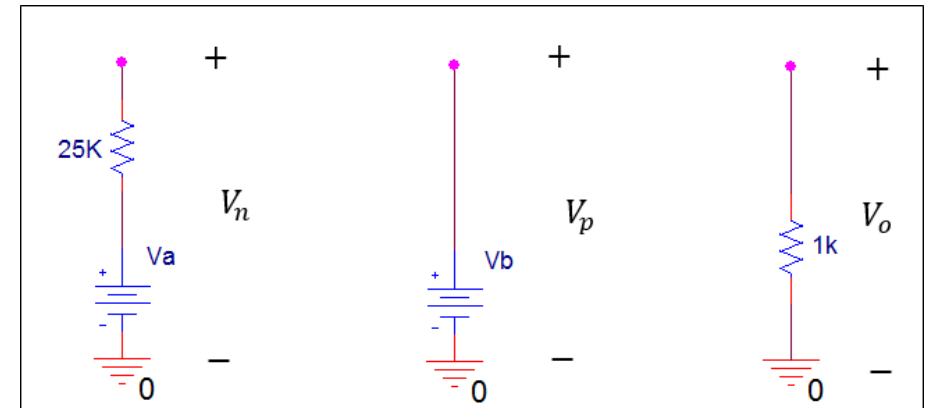
Resolução intuitiva

Exercício: Responda os itens abaixo (Nilsson 5.1)

- a) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 0V$
- b) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 2V$
- c) Se $v_a = 1,5V$, especifique a faixa de v_b que impeça a saturação do amplificador.

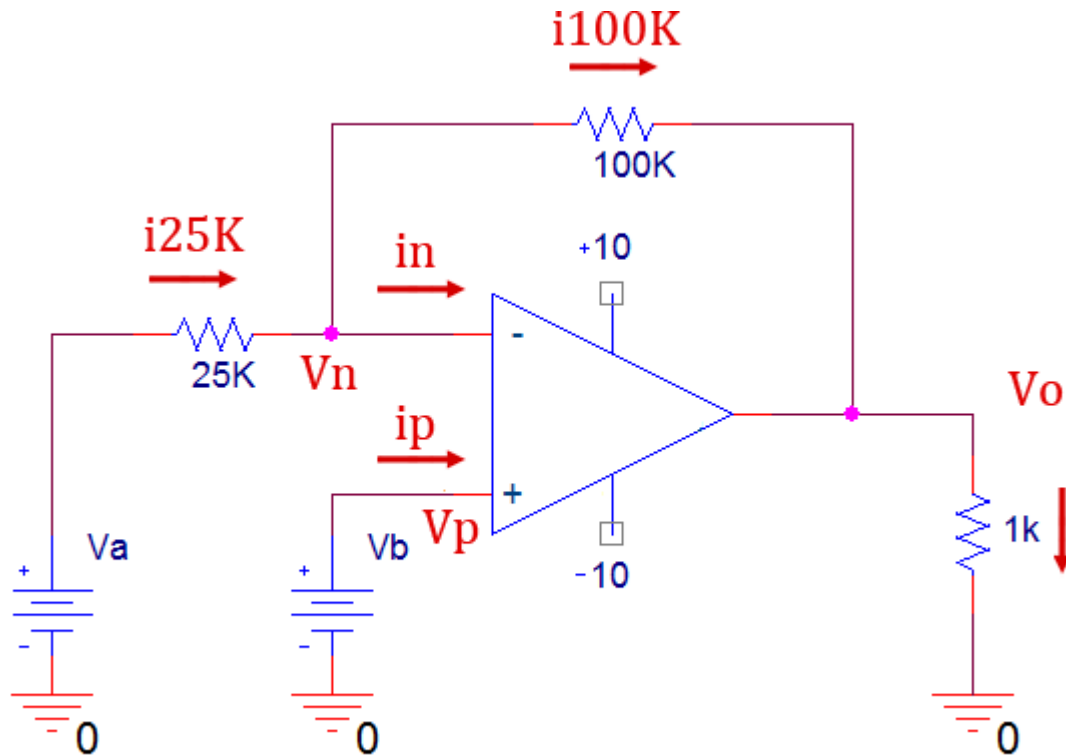


**** Dica**



Amplificador Operacional – Malha fechada

a) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 0V$



Sempre começar com as restrições

$$V_p = V_n \quad i_p = i_n = 0$$

$$V_n = v_a - 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K} \quad (v_a = 1V)$$

$$V_p = v_b \quad (v_b = 0V)$$

$$V_p = V_n$$

$$0 = 1 - 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K}$$

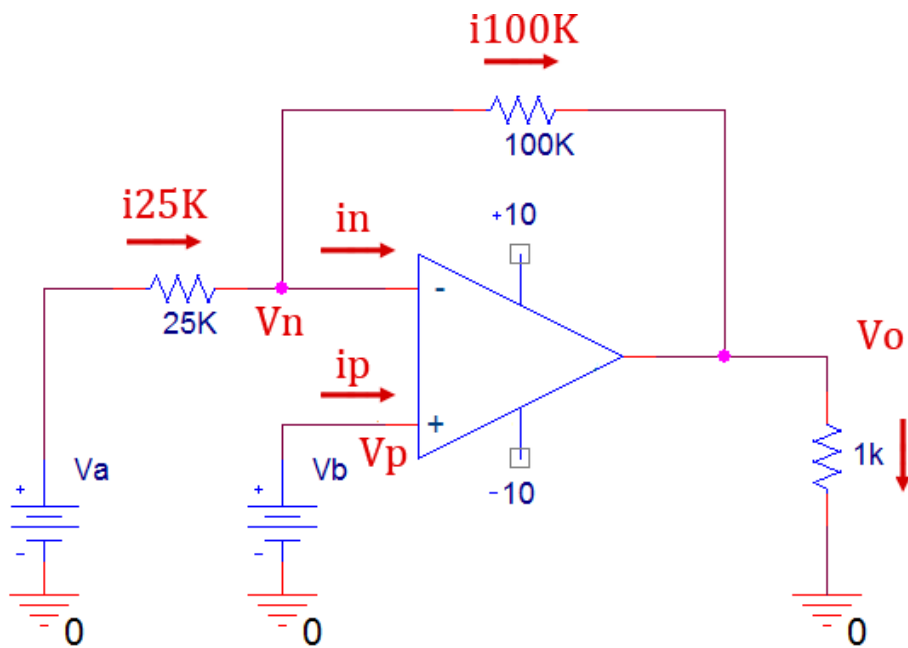
$$i_{25K} = \frac{1}{25 \cdot 10^3} = 0,04mA$$

$$i_{25K} = i_{100K} + i_n \quad (i_n \text{ sempre} = 0)$$

$$i_{100K} = 0,04mA$$

Amplificador Operacional – Malha fechada

a) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 0V$



Correntes calculadas

$$i_{25K} = 0,04mA$$

$$i_{100K} = 0,04mA$$

Resolvendo a malha:

$$-v_a + 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K} + 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K} + v_o = 0$$

$$-1 + 25 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} + 100 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} + v_o = 0$$

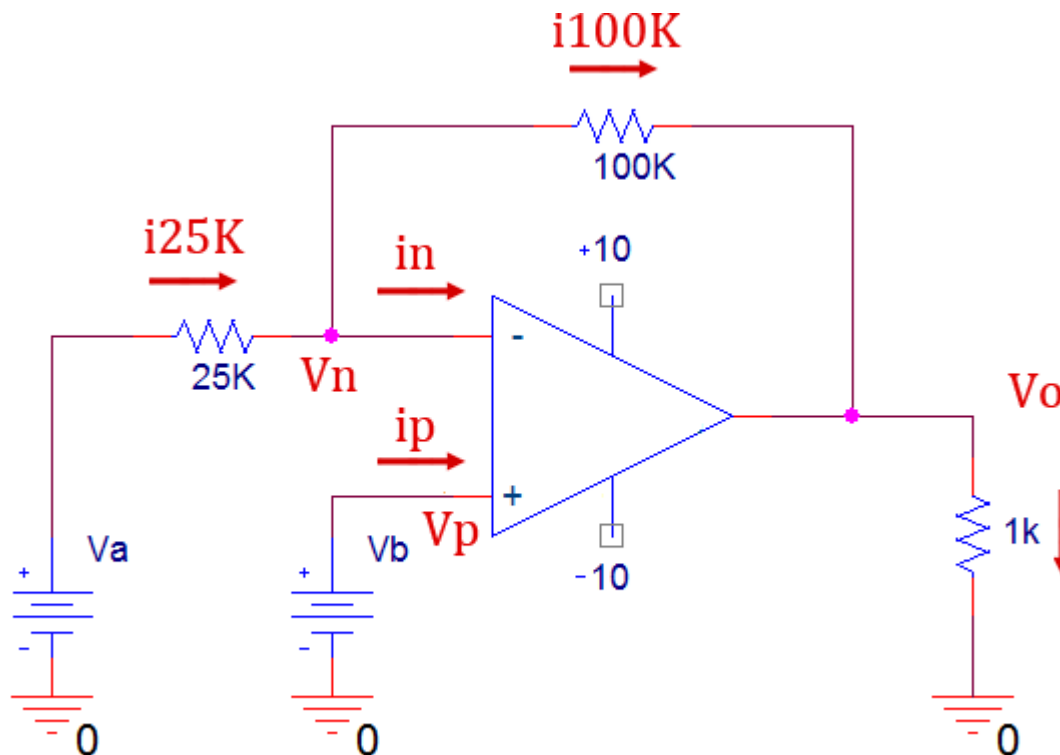
$$-1 + 1 + 4 + v_o = 0$$

$$v_o = -4V$$

Ok está entre 10V e -10V

Amplificador Operacional – Malha fechada

b) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 2V$



Sempre começar com as restrições

$$V_p = V_n \quad i_p = i_n = 0$$

$$V_n = v_a - 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K} \quad (v_a = 1V)$$

$$V_p = v_b \quad (v_b = 2V)$$

$$V_p = V_n$$

$$2 = 1 - 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K}$$

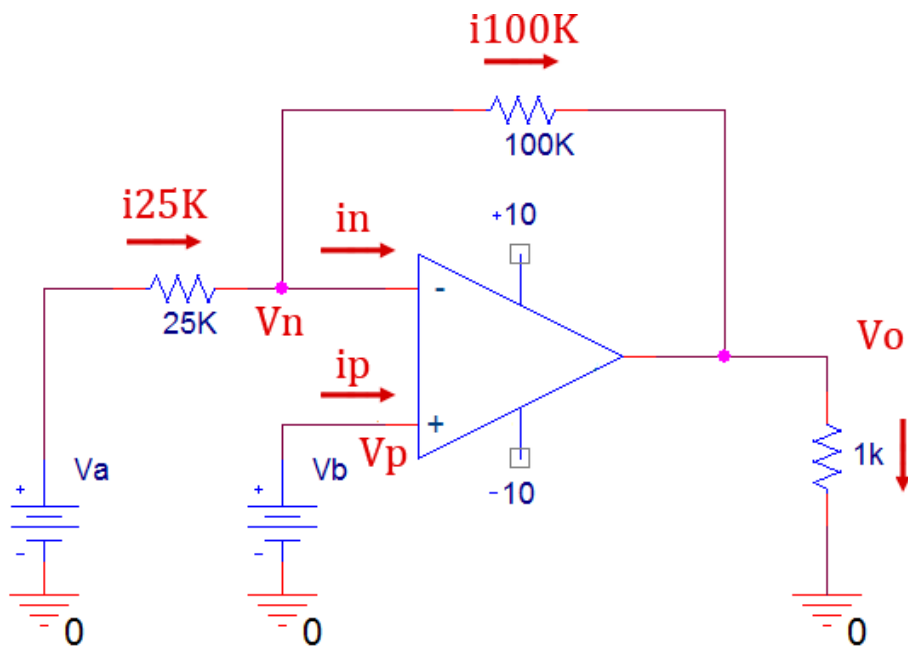
$$i_{25K} = \frac{-1}{25 \cdot 10^3} = -0,04mA$$

$$i_{25K} = i_{100K} + i_n \quad (i_n \text{ sempre} = 0)$$

$$i_{100K} = -0,04mA$$

Amplificador Operacional – Malha fechada

b) Calcule v_o para $v_a = 1V$ e $v_b = 2V$



Correntes calculadas

$$i_{25K} = -0,04mA$$

$$i_{100K} = -0,04mA$$

Resolvendo a malha:

$$-v_a + 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K} + 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K} + v_o = 0$$

$$-1 - 25 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} - 100 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} + v_o = 0$$

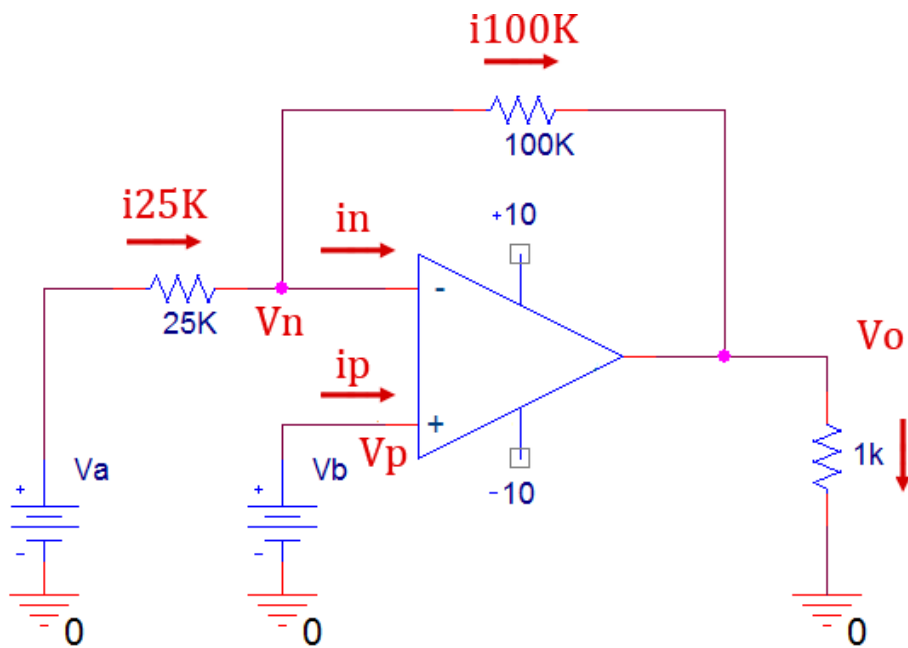
$$-1 - 1 - 4 + v_o = 0$$

$$v_o = +6V$$

Ok está entre 10V e -10V

Amplificador Operacional – Malha fechada

c) Se $v_a = 1,5V$, especifique a faixa de v_b que impeça a saturação do amplificador.



$$v_a = 1,5V \text{ para } \begin{cases} v_o = -10V \\ v_o = 10V \end{cases}$$

$$-v_n + 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K} + v_o = 0$$

$$v_n = v_p = v_b \quad (\text{restrição})$$

$$-v_b + 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K} + v_o = 0$$

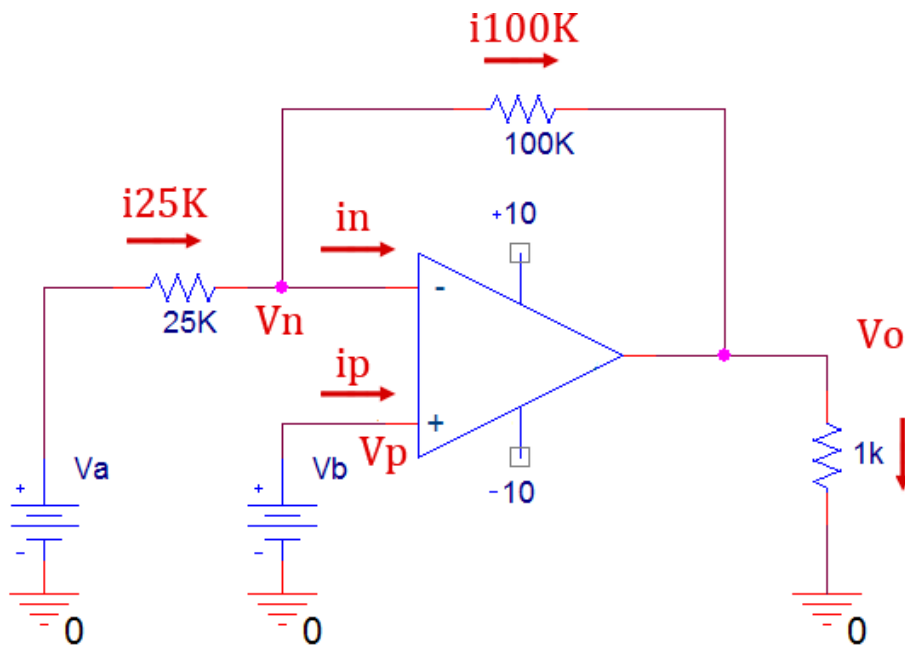
$$i_{25K} = i_{100K} \quad (i_n = i_p = 0)$$

$$v_n = v_a - 25 \cdot 10^3 \cdot i_{25K}$$

$$i_{25K} = \frac{v_a - v_n}{25 \cdot 10^3} \quad \text{ou} \quad i_{100K} = \frac{v_a - v_b}{25 \cdot 10^3}$$

Amplificador Operacional – Malha fechada

c) Se $v_a = 1,5V$, especifique a faixa de v_b que impeça a saturação do amplificador.



$$v_a = 1,5V \text{ para } \begin{cases} v_o = -10V \\ v_o = 10V \end{cases}$$

$$-v_b + 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K} + v_o = 0$$

$$i_{100K} = \frac{v_a - v_b}{25 \cdot 10^3}$$

$$v_o = v_b - 100 \cdot 10^3 \cdot i_{100K}$$

$$v_o = v_b - 100 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{v_a - v_b}{25 \cdot 10^3} \right)$$

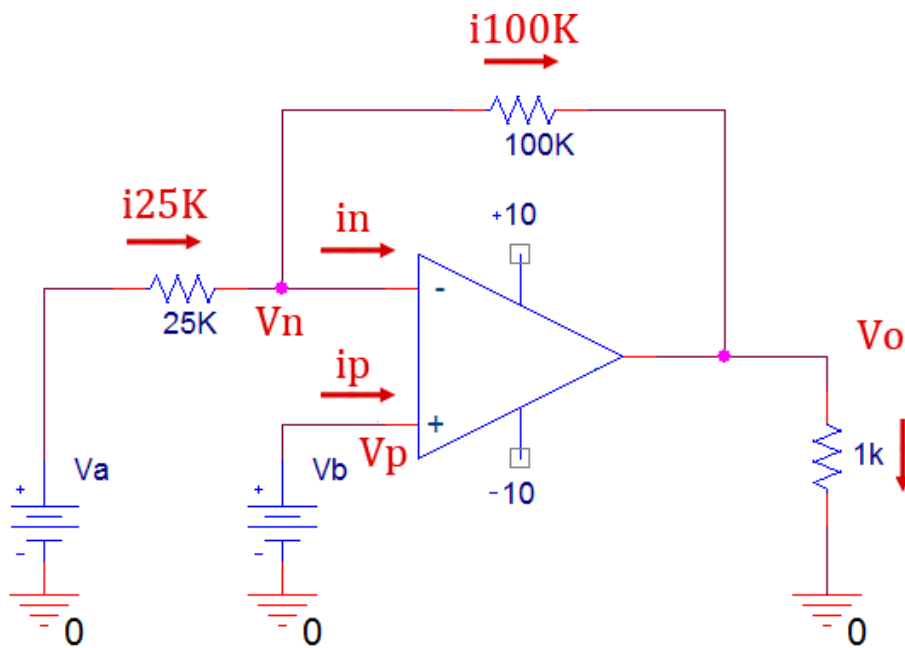
$$v_o = v_b - 4 \cdot v_a + 4 \cdot v_b$$

$$v_o = -4 \cdot v_a + 5 \cdot v_b$$

$$v_b = \frac{v_o + 4 \cdot v_a}{5}$$

Amplificador Operacional – Malha fechada

c) Se $v_a = 1,5V$, especifique a faixa de v_b que impeça a saturação do amplificador.



$$v_a = 1,5V \text{ para } \begin{cases} v_o = -10V \\ v_o = 10V \end{cases} \quad v_b = \frac{v_o + 4 \cdot v_a}{5}$$

Para $v_o = 10V$

$$v_b = \frac{10 + 4 \cdot 1,5}{5} = 3,2V$$

Para $v_o = -10V$

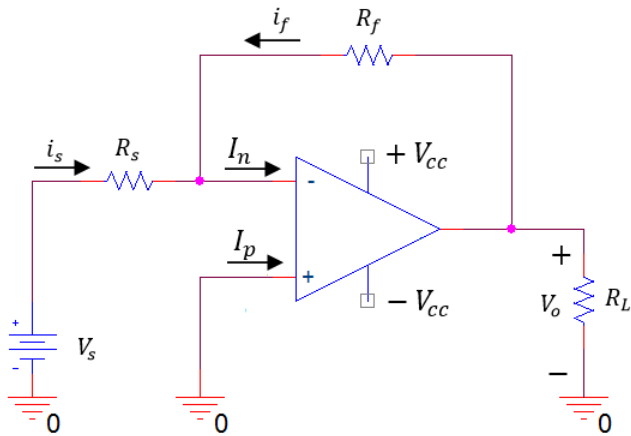
$$v_b = \frac{-10 + 4 \cdot 1,5}{5} = -0,8V$$

O intervalo de v_b para que o AmpOp trabalhe na região linear será de:

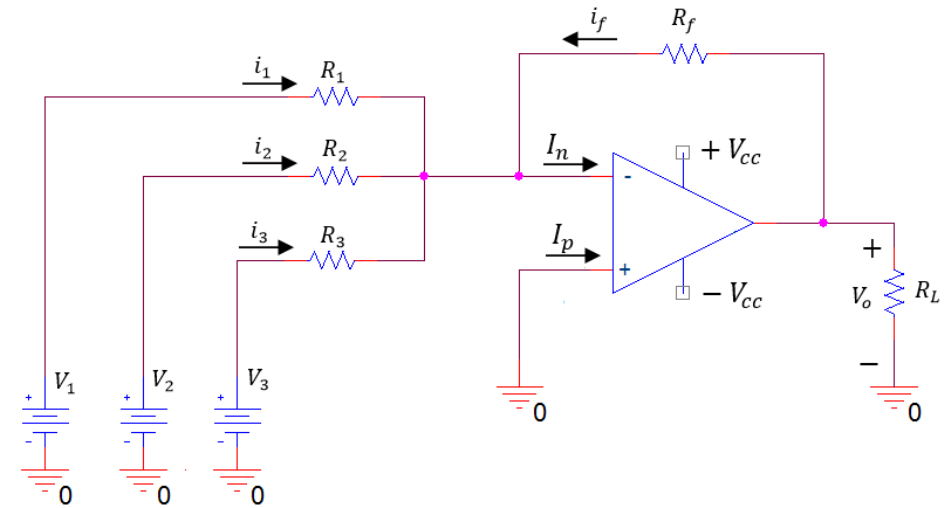
$$-0,8V \leq v_b \leq 3,2V$$

Primeiras configurações de AmpOp

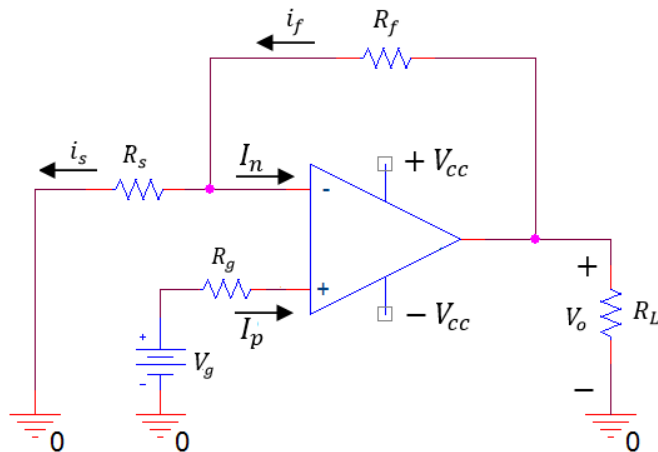
Amplificador inversor



Amplificador somador inversor



Amplificador não inversor



Amplificador da diferença

