



Universidade Federal do Ceará  
Instituto de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

# Circuitos Elétricos – Aula 13

## Capítulo 5 – Amplificadores Operacionais



**Prof. Fabrício Nogueira**



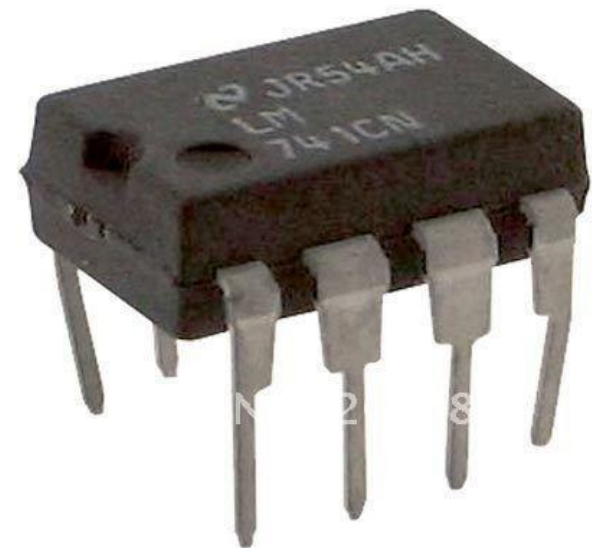
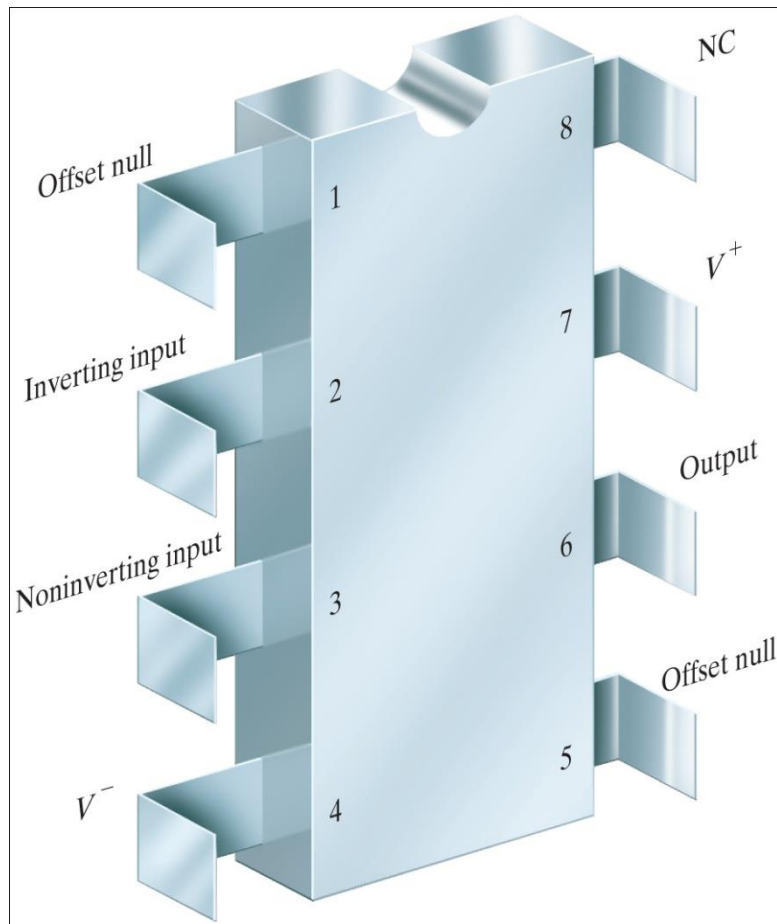
# Amplificadores Operacionais

## Introdução

- ⚡ O AMPlificador OPeracional (AMPOP) é um circuito eletrônico composto por duas entradas e uma saída.
- ⚡ A combinação do AMPOP com resistores possibilita a realização de funções úteis, tais como soma, subtração e multiplicação de sinais elétricos.
- ⚡ Muito utilizado em processamento/condicionamento de sinais.



## Terminais do amplificador operacional





## Terminais do amplificador operacional

⚡ Simbologias de AMPOPS:

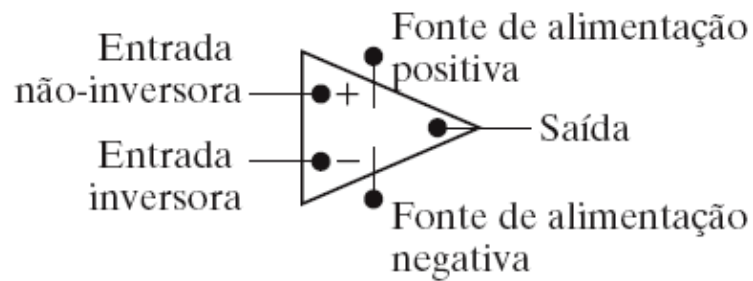


Figura 5.2 ▲ Símbolo de circuito para um amp op.

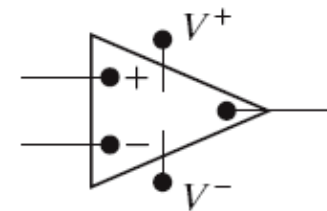


Figura 5.3 ▲ Símbolo de circuito simplificado para um amp op.



## Tensões e correntes terminais

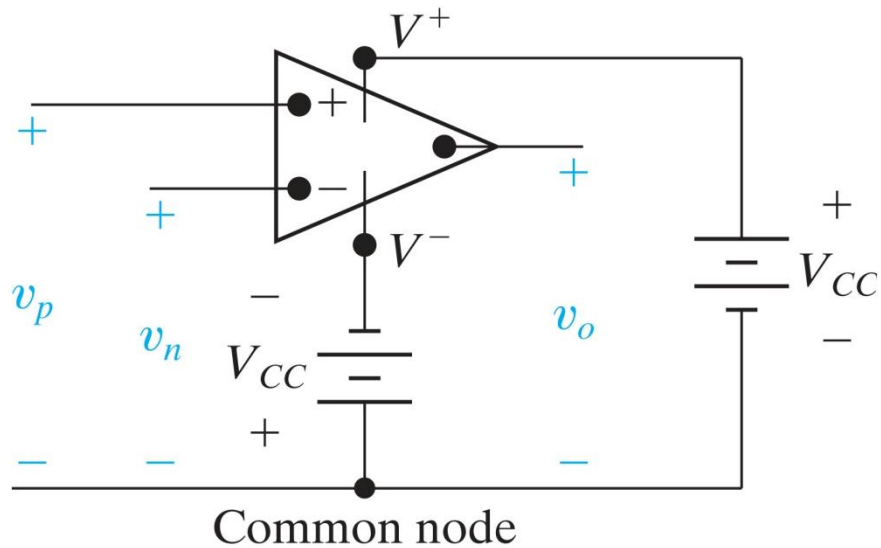


Figure: 05-04

Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

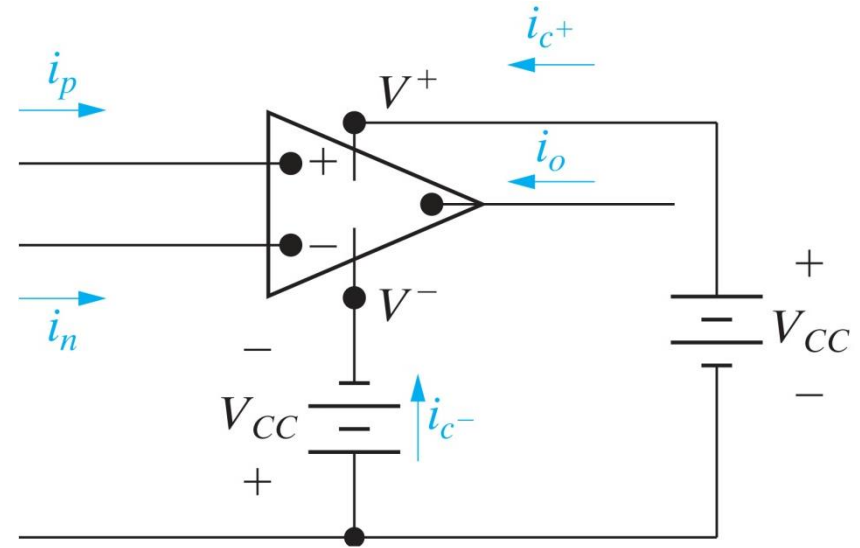


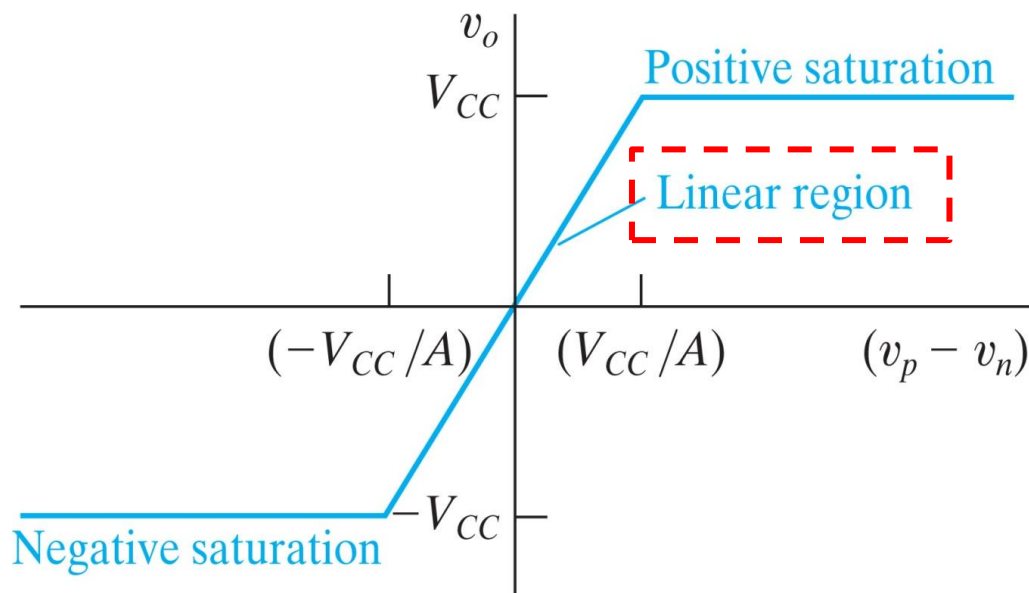
Figure: 05-05

Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.



## Característica de transferência de tensão

⚡ Tensão de saída é uma função da diferença de tensões de entrada  $v_p - v_n$ .



$$v_0 = \begin{cases} -V_{cc} & A(v_p - v_n) < -V_{cc} \\ A(v_p - v_n) & -V_{cc} \leq A(v_p - v_n) \leq +V_{cc} \\ +V_{cc} & A(v_p - v_n) > +V_{cc} \end{cases}$$



## Considerações

⚡ Para trabalhar na região linear:

$$v_n \cong v_p \quad (\text{curto circuito virtual})$$

⚡ A resistência de entrada é muito elevada, então:

$$i_p \cong i_n \cong 0$$

Característica (malha aberta)	ampop ideal	ampop real
ganho tensão	$\infty$	$10^6$ a $10^8$
impedância de entrada	$\infty$	<i>alguns <math>M\Omega</math></i>
impedância de saída	0	<i>dezenas de <math>\Omega</math></i>
largura de banda	$\infty$	<i>dezenas de Hz</i>

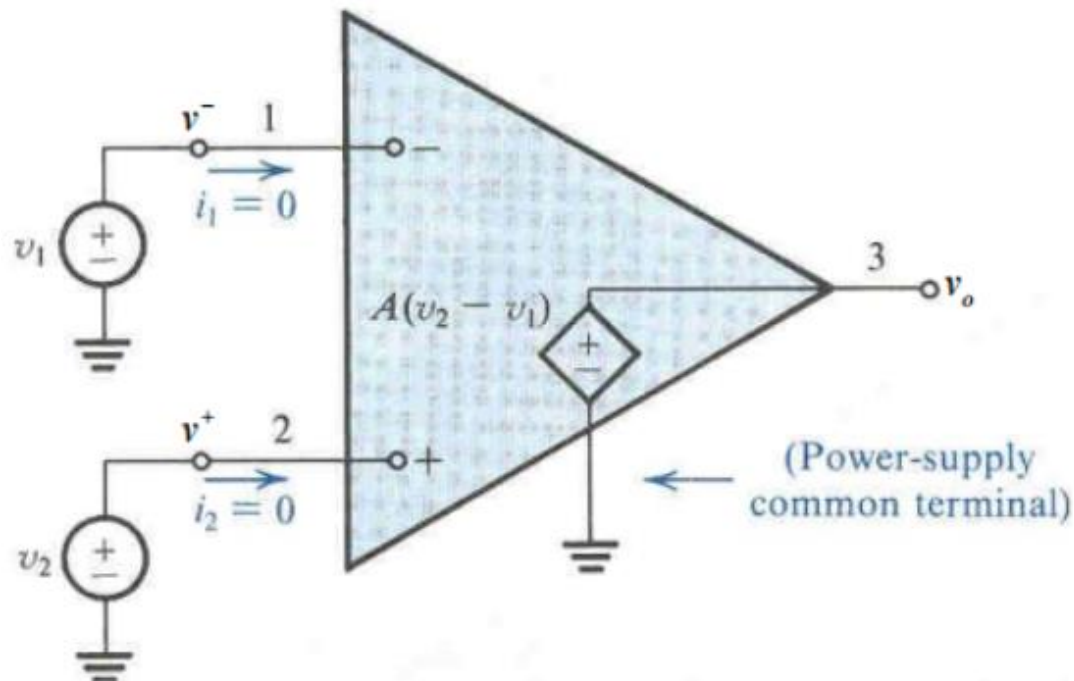




## Modelo ideal

### ⚡ Características:

- Ganho de tensão de entrada é infinito;
- A resistência de entrada é infinita;
- A resistência de saída é nula.







## Modelo ideal

⚡ Restrição de tensão de entrada (condição de curto circuito virtual):

$$v_n = v_p$$

⚡ Restrição de corrente de entrada:

$$i_p = i_n = 0$$

$$i_p + i_n + i_0 + i_c^+ + i_c^- = 0$$

$$i_0 = -(i_c^+ + i_c^-)$$



### Exemplo:

⚡ a) Calcule  $v_o$  se  $v_a = 1\text{ V}$  e  $v_b = 0\text{ V}$

Realimentação negativa  região linear

A tensão da entrada inversora é 0, já que:

$$v_p = v_b = 0 \quad v_n = v_p$$

Equação de tensão do nó para a entrada inversora é:

$$i_{25} + i_{100} = i_n$$

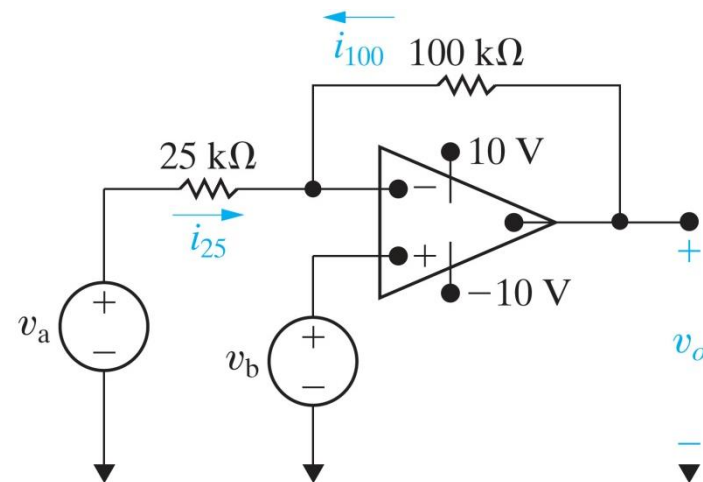
Pela lei de ohm:

$$i_{25} = \frac{(v_a - v_n)}{25 \times 10^3} = \frac{1}{25} \text{ mA} \quad i_{100} = \frac{(v_o - v_n)}{100 \times 10^3} = \frac{v_o}{100} \text{ mA}$$

Restrição em relação a corrente:  $i_n = 0$

$$\frac{1}{25 \times 10^3} + \frac{v_o}{100 \times 10^3} = i_n \quad v_o = -4\text{ V}$$

Região linear, se encontra entre  $\pm 10\text{ V}$





### Exemplo:

⚡ b) Calcule  $v_o$  se  $v_a = 1\text{ V}$  e  $v_b = 2\text{ V}$

Realimentação negativa  região linear

A tensão da entrada inversora é 0, já que:

$$v_p = v_b = v_n = 2\text{ V} \quad v_n = v_p$$

Equação de tensão do nó para a entrada inversora é:

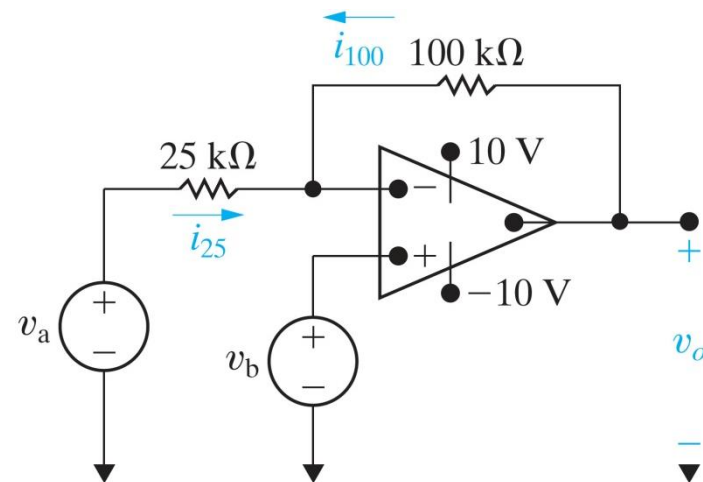
$$i_{25} = -i_{100}$$

Pela lei de ohm:

$$i_{25} = \frac{(v_a - v_n)}{25 \times 10^3} = -\frac{1}{25} \text{ mA} \quad i_{100} = \frac{(v_o - v_n)}{100 \times 10^3} = \frac{v_o - 2}{100} \text{ mA}$$

Restrição em relação a corrente:  $i_n = 0$

$$-\frac{1}{25 \times 10^3} + \frac{v_o - 2}{100 \times 10^3} = i_n \quad v_o = 6\text{ V} \quad \text{Região linear, se encontra entre } \pm 10\text{ V}$$





# Amplificadores Operacionais

### Exemplo:

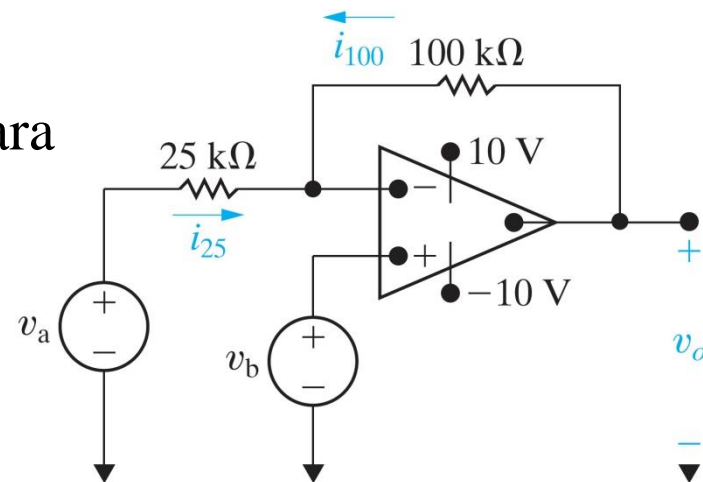
⚡ c) Se  $v_a = 1,5$  V, determine a faixa de  $v_b$  para operar na região linear (sem saturação) .

Como antes:  $v_p = v_n = v_b$

$$i_{25} = -i_{100}$$

$$i_{25} = \frac{(1,5 - v_b)}{25 \times 10^3} \text{ mA}$$

$$i_{100} = \frac{(v_0 - v_b)}{100 \times 10^3} \text{ mA}$$



Resolvendo  $v_b$  como uma função de  $v_0$  temos:  $v_b = \frac{1}{5}(6 + v_0)$   $v_0 = 5v_b - 6$

Se o amplificador estiver operando na faixa linear:  $-10V \leq v_0 \leq 10V$

Então  $v_b$  está limitada a:  $-0,8V \leq v_b \leq 3,2V$



## Circuito Amplificador Inversor:

⚡ Equação de tensão no nó inversor:

$$i_s + i_f = i_n$$

$$i_s = \frac{v_s}{R_s}$$

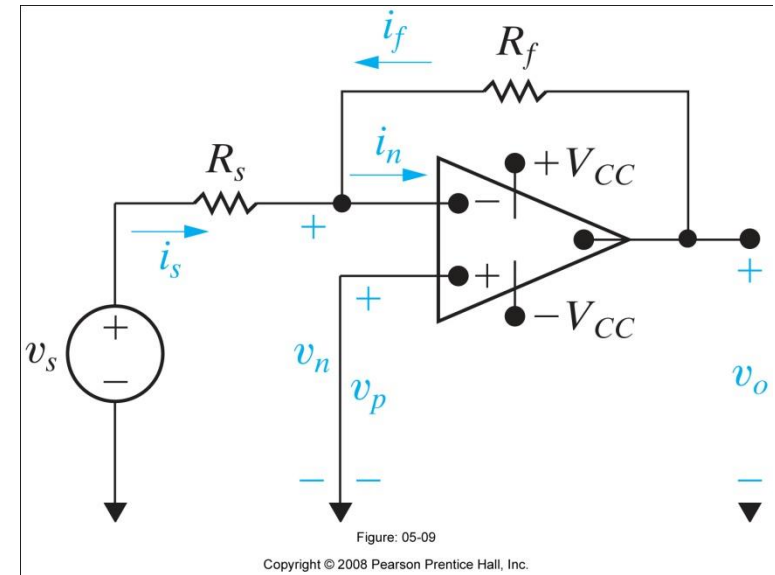
$$i_f = \frac{v_o}{R_f}$$

$$i_n = 0$$

$$\frac{v_s}{R_s} + \frac{v_o}{R_f} = 0$$

$$\frac{v_o}{R_f} = -\frac{v_s}{R_s}$$

$$v_o = -\frac{R_f}{R_s} v_s$$



Válido se o AMPOP for ideal (ganho A e a resistência de entrada são infinitas).



## Circuito Amplificador Inversor:

⚡ O limite superior para o ganho  $R_f/R_s$  é determinado pelas tensões da fonte de alimentação e pelo valor da tensão  $v_s$ .

⚡ Se admitirmos tensões iguais das fontes de alimentação:

⚡ Temos:

$$|v_o| \leq V_{cc},$$

$$\left| \frac{R_f}{R_s} v_s \right| \leq V_{cc}$$

$$\frac{R_f}{R_s} \leq \left| \frac{V_{cc}}{v_s} \right|$$

⚡ Se:  $V_{cc} = 15V$  e  $v_s = 10mV$

Então:  $\frac{R_f}{R_s} \leq 1500$

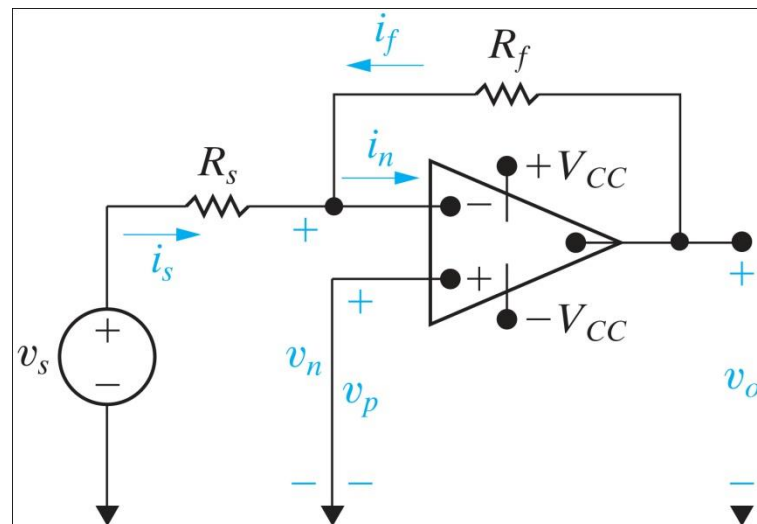


Figure: 05-09

Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.



## Circuito Amplificador Inversor:

⚡ Exercício:

⚡ Calcule o valor de  $v_o$  para os seguintes valores de  $v_s$ :

a)  $v_s = 0,4V$

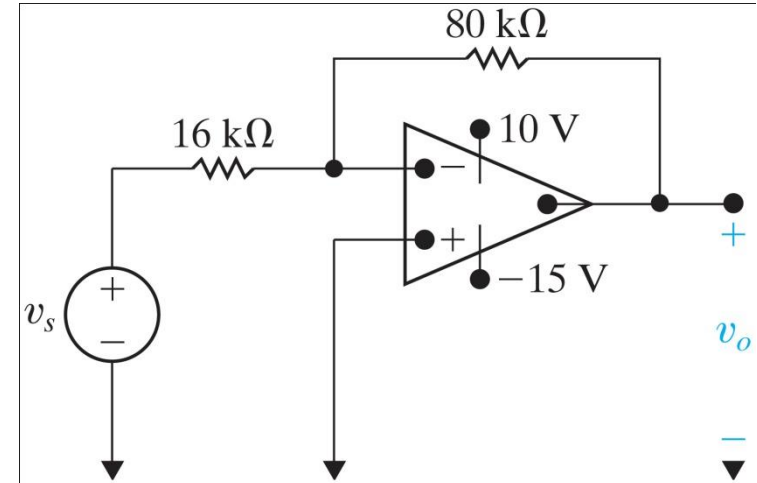
$$\frac{(v_s - v_n)}{16k} + \frac{(v_o - v_n)}{80k} = 0$$
$$v_n = v_p = 0$$

$$\frac{0,4}{16k} + \frac{v_o}{80k} = 0 \quad v_o = -2V$$

ou

$$v_o = -\frac{R_f}{R_s} v_s \quad v_o = -\frac{80k}{16k} 0,4 = -2V$$

a)  $v_s = 2,0V, 3,5V, -0,6V, -1,6V$







## Circuito Amplificador Inversor:

⚡ Exercício:

b) Determine a faixa de  $v_s$  que não sature o amplificador

$$-15 \leq v_o \leq 10$$

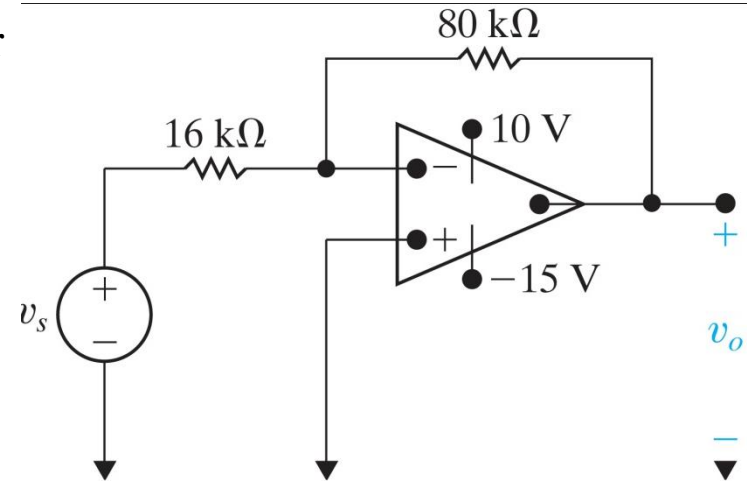
$$\frac{v_s}{16k} + \frac{v_o}{80k} = 0$$

$$v_s = -16k \frac{v_o}{80k}$$

$$p / v_o = -15V \quad v_s = -16k \frac{-15}{80k} = 3V$$

$$p / v_o = 10V \quad v_s = -16k \frac{10}{80k} = -2V$$

$$-2 \leq v_s \leq 3$$





## Referências Bibliográficas:

Nilsson, J.W. e Riedel, S.A., Circuitos Elétricos, 8<sup>a</sup> Edição, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2009.

Svoboda, J.A. and Dorf, R.C., Introduction to Electric Circuits, 9th edition, Wiley, 2011.