Universidade Federal do Ceará
Instituto de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Circuitos Elétricos

Capítulo B – Amplificadores Operacionais

Circuito Amplificador Somador Inversor

- A tensão de saída de um amplificador somador é uma soma, multiplicada por um fator de escala negativo, invertida, das tensões aplicadas à entrada do amplificador.

$$-\frac{v_a - v_n}{R_a} - \frac{v_b - v_n}{R_b} - \frac{v_c - v_n}{R_c} - \frac{v_o - v_n}{R_f} + i_n = 0$$

- Admitindo que o AMPOP é ideal:

$$v_n = v_p = 0 \; e \; i_n = 0$$

- Então:

$$\frac{v_a}{R_a} + \frac{v_b}{R_b} + \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_o}{R_f} = 0$$

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_a} v_a + \frac{R_f}{R_b} v_b + \frac{R_f}{R_c} v_c\right)$$

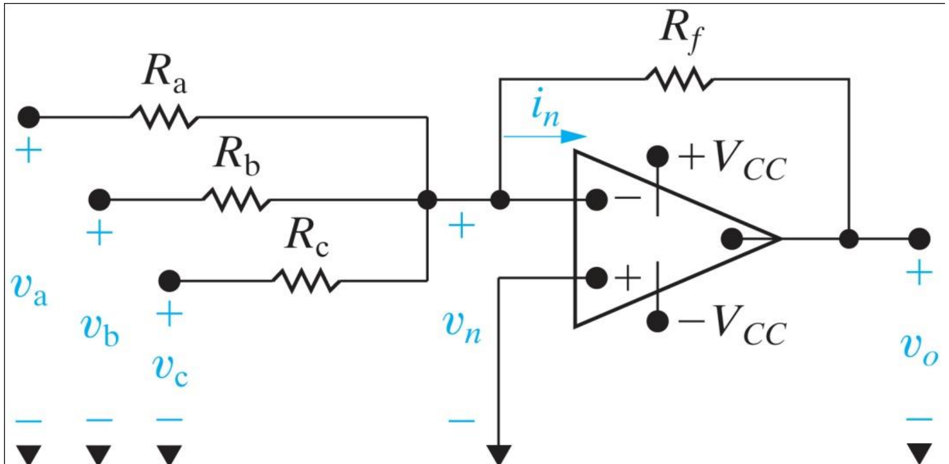


Figure: 05-11

Circuito Amplificador Somador Inversor

- Se $R_a = R_b = R_c = R_f$

$$v_o = -(v_a + v_b + v_c)$$

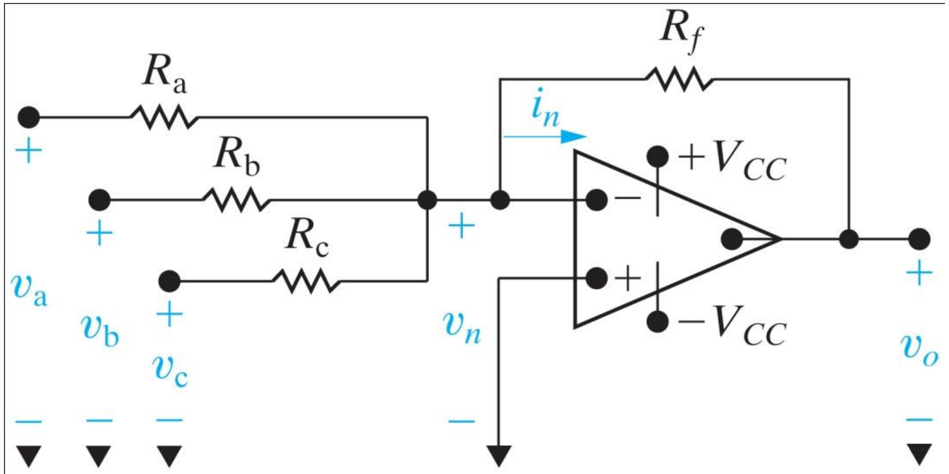
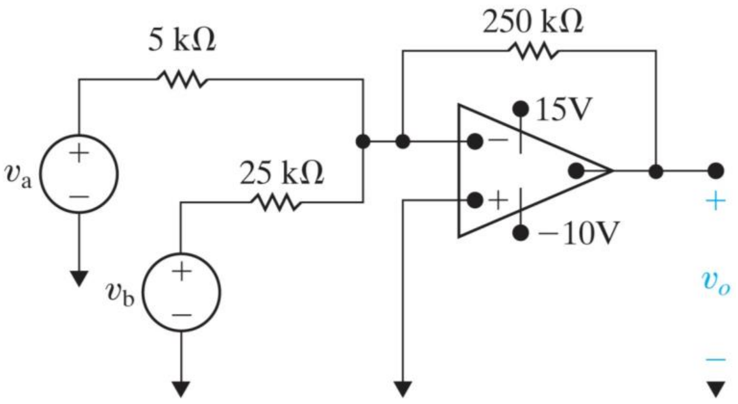


Figure: 05-11

Circuito Amplificador Somador Inversor

- Exemplo:

a) Determine v_o se $v_a = 0{,}1$ V e $v_b = 0{,}25$ V.



$$v_o = -\left(\frac{250k\Omega}{5k\Omega}0{,}1 + \frac{250k\Omega}{25k\Omega}0{,}25\right)$$

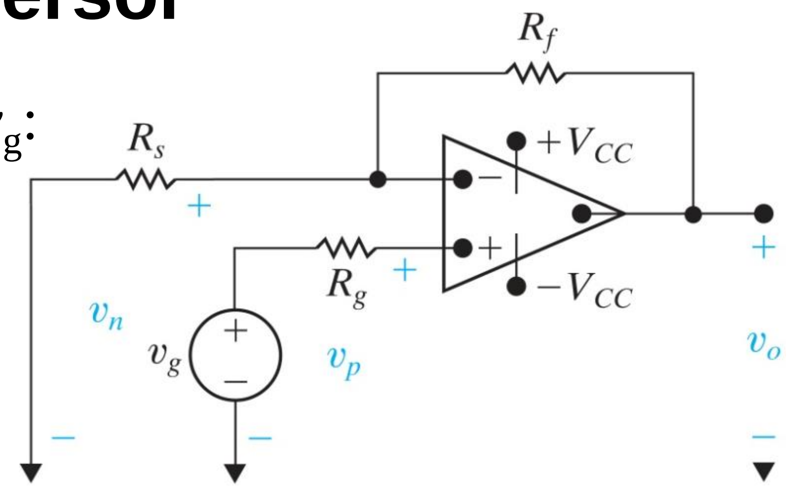
$$v_o = -(50 \times 0{,}1 + 10 \times 0{,}25) = -7{,}5V$$

b) Para $v_b = 0{,}25$ V, qual o maior valor de v_a antes da saturação?

$p/v_o = 15V \qquad 15 = -(50 \times v_a + 10 \times 0{,}25) \qquad v_a = -0{,}35V$

$p/v_o = -10V \qquad -10 = -(50 \times v_a + 10 \times 0{,}25) \qquad \boxed{v_a = 0{,}15V}$

Circuito Amplificador Não-Inversor



- Cálculo da saída v_o em função da entrada v_g:

$$-\left(\frac{v_o - v_n}{R_f}\right) + \frac{v_n}{R_s} = 0$$

- Admitindo que o AMPOP é ideal: $v_n = v_g$

$$\frac{v_g}{R_f} + \frac{v_g}{R_s} = \frac{v_o}{R_f} \Rightarrow v_g\left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_s}\right) = \frac{v_o}{R_f} \Rightarrow v_o = v_g\left(\frac{R_f + R_s}{R_s}\right)$$

- A operação na região linear requer que:

$$\frac{R_f + R_s}{R_s} < \left|\frac{V_{cc}}{v_g}\right|$$

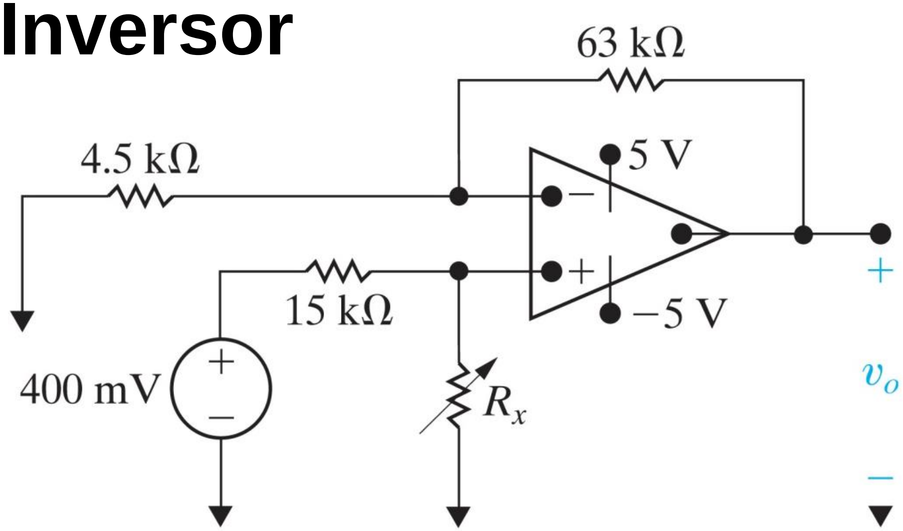
Ex.: $V_{cc} = \pm 10V$

$v_g = 2{,}5$

$$\frac{R_f + R_s}{R_s} < 4$$

- Obs.: O menor ganho é 1.

Circuito Amplificador Não-Inversor



- Exercício:

a) Determine v_o quando R_x= 60kΩ :

$$\frac{0{,}4-v_p}{15000}=\frac{v_p}{60000} \Rightarrow \frac{v_p}{60}+\frac{v_p}{15}=\frac{0{,}4}{15}$$

$$v_p=0{,}32V$$

$$\frac{v_n}{4500}-\frac{v_o-v_n}{63000}+i_n=0 \qquad ,\ i_n=0$$

$$\frac{v_o}{630}=\frac{v_n}{45}+\frac{v_n}{630}$$

$$v_o=14v_p+v_p \qquad ,v_p=v_n$$

$$v_o=15v_p \Rightarrow v_o=15(0{,}32)=4{,}8V$$

b) Qual o valor máximo de R_x antes que sature:

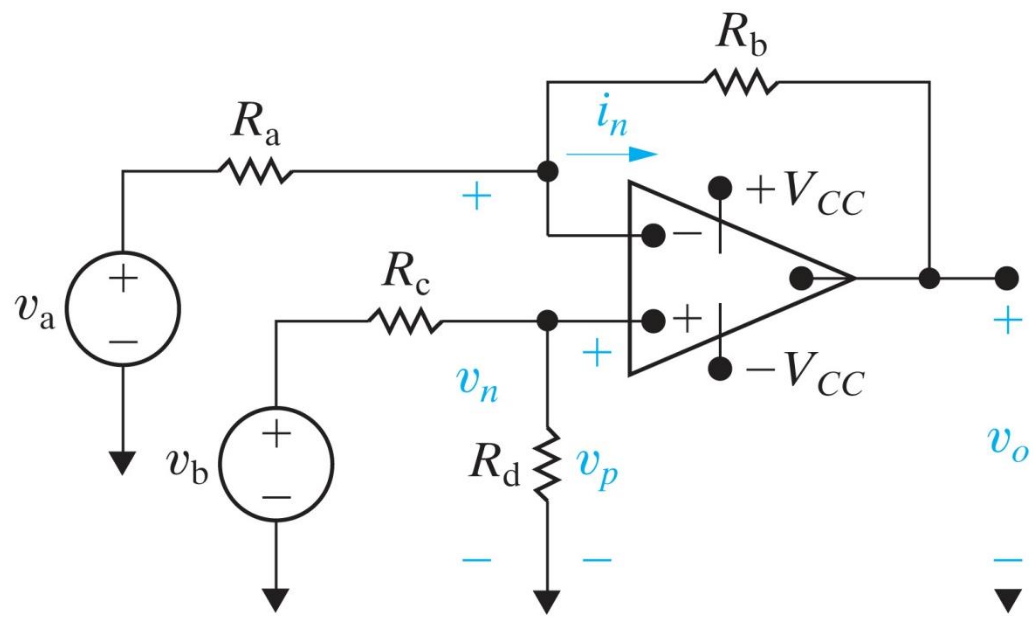
$$\frac{15000v_p}{R_x}+v_p=0{,}4 \Rightarrow v_p=\frac{0{,}4R_x}{15000+R_x}$$

$$v_o=15\times\left(\frac{0{,}4R_x}{15000+R_x}\right) \xrightarrow{v_o=5} 5=15\times\left(\frac{0{,}4R_x}{15000+R_x}\right)$$

$$5\times 15000+R_x=15\times 0{,}4R_x \qquad R_x=75k\Omega$$

Circuito Amplificador Diferencial

- A tensão de saída é proporcional à diferença entre as duas tensões de entrada.



$$-\frac{(v_a - v_n)}{R_a} - \frac{(v_o - v_n)}{R_b} + i_n = 0$$

$Se \quad i_n = 0$

$$-\frac{(v_a - v_n)}{R_a} R_a R_b - \frac{(v_o - v_n)}{R_b} R_a R_b = 0$$

$$-(v_a - v_n)R_b - (v_o - v_n)R_a = 0$$

$Como \; v_n = v_p,$

$$v_p = v_b \frac{R_d}{R_d + R_c}$$

$$v_o R_a = -v_a R_b + v_n R_b + v_n R_a$$

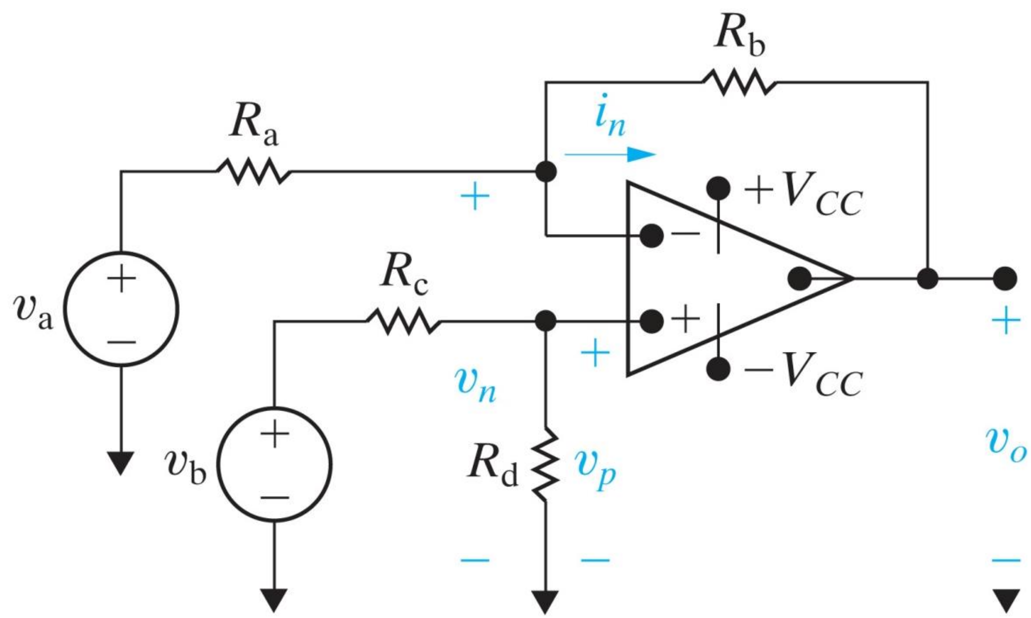
$$v_o R_a = -v_a R_b + v_p (R_b + R_a)$$

$$\boxed{v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_d (R_a + R_b)}{R_a (R_c + R_d)}}$$

Circuito Amplificador Diferencial

A partir da equação abaixo, a tensão de saída é proporcional à diferença entre as duas tensões de entrada, v_a e v_b, multiplicadas por fatores de escala.

$$v_o = -v_a \boxed{\frac{R_b}{R_a}} + v_b \boxed{\frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a(R_c + R_d)}}$$



$$Se \ \frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d}$$

$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a R_c + R_a R_d}$$

$$Como: \ R_a R_d = R_c R_b$$

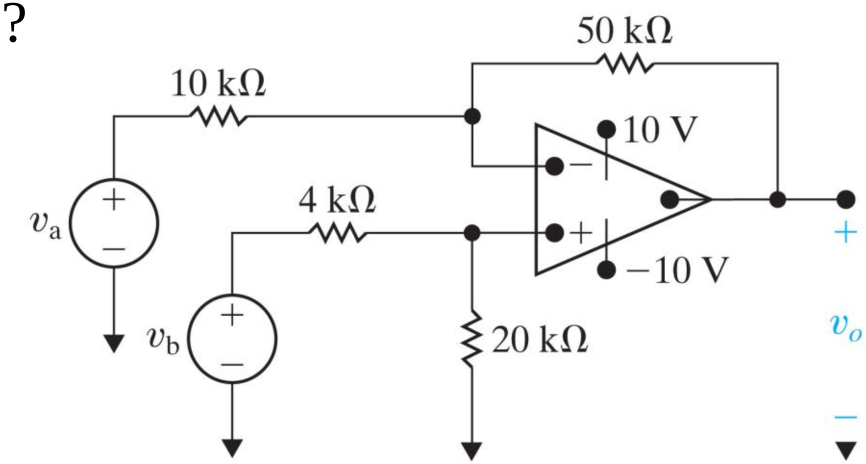
$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a R_c + R_b R_c}$$

$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{\boxed{R_d}(R_a + R_b)}{\boxed{R_c}(R_a + R_b)}$$

$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_b}{R_a} \Rightarrow \boxed{v_o = \frac{R_b}{R_a}(v_b - v_a)}$$

Circuito Amplificador Diferencial

Exemplo: Considerando que v_b=4,0 V, qual a faixa de valores de v_a que resulta em uma operação linear do ampop?



$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_d(R_a + R_b)}{R_a(R_c + R_d)}$$

$$v_o = -v_a \frac{50k}{10k} + v_b \frac{20k(10k + 50k)}{10k(4k + 20k)}$$

$$v_o = 5(v_b - v_a)$$

$$p / v_o = 10V \, e \, v_b = 4{,}0V$$

$$10 = 5(4{,}0 - v_a) \Rightarrow v_a = 2V$$

$$p / v_o = -10V \, e \, v_b = 4{,}0V$$

$$-10 = 5(4{,}0 - v_a) \Rightarrow v_a = 6V$$

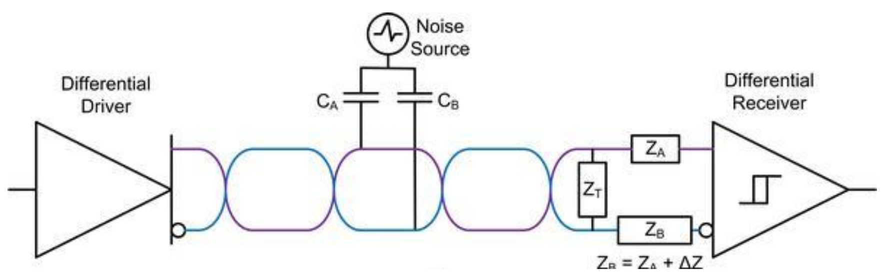
$$2V \leq v_a \leq 6V$$

Circuito Amplificador Diferencial

- Importância do amplificador diferencial:

- Em muitos casos a informação útil do sinal de entrada está no modo diferencial.

- O modo comum é ruído.



Circuito Amplificador Diferencial

A entrada de um amplificador diferencial pode ser decomposta em duas componentes:

- Tensão de modo diferencial: diferença entre as duas tensões de entrada.

$$v_{md} = v_b - v_a$$

- Tensão de modo comum: média das tensões de entrada.

$$v_{mc} = \frac{(v_a + v_b)}{2}$$

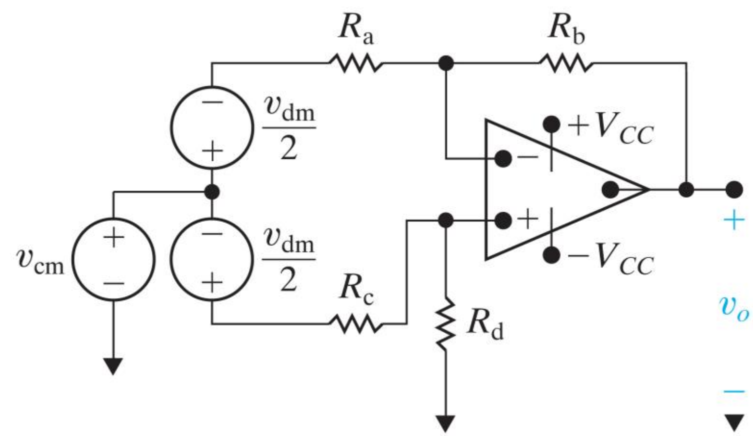


Figure: 05-14

Circuito Amplificador Diferencial

Podemos representar as tensões de entrada originais, v_a e v_b, em termos de tensões de modo diferencial e de modo comum.

$$v_{md} = v_b - v_a \qquad v_{mc} = \frac{(v_a + v_b)}{2}$$

$$\begin{cases} v_a = v_b - v_{md} \\ v_a = 2v_{mc} - v_b \end{cases} \qquad \begin{cases} v_b = v_a + v_{md} \\ v_b = 2v_{mc} - v_a \end{cases}$$

$$v_b - v_{md} = 2v_{mc} - v_b$$

$$2v_b = 2v_{mc} + v_{md}$$

$$\boxed{v_b = v_{mc} + \frac{1}{2}v_{md}}$$

$$v_a + v_{md} = 2v_{mc} - v_a$$

$$2v_a = 2v_{mc} - v_{md}$$

$$\boxed{v_a = v_{mc} - \frac{1}{2}v_{md}}$$

Circuito Amplificador Diferencial

- Substituindo:

$$v_b = v_{mc} + \frac{1}{2} v_{md} \qquad v_a = v_{mc} - \frac{1}{2} v_{md}$$

- Em:

$$v_o = -v_a \frac{R_b}{R_a} + v_b \frac{R_d\left(R_a + R_b\right)}{R_a\left(R_c + R_d\right)}$$

- Resulta:

$$v_o = \left[\frac{R_a R_d - R_b R_c}{R_a\left(R_c + R_d\right)}\right] v_{mc} + \left[\frac{R_d\left(R_a + R_b\right) + R_b\left(R_c + R_d\right)}{2R_a\left(R_c + R_d\right)}\right] v_{md}$$

$$v_o = A_{mc} v_{mc} + A_{md} v_{md}$$

- Onde: A_{mc} é o ganho de modo comum e A_{md} é o ganho de modo diferencial.

Circuito Amplificador Diferencial

- Se: $R_c = R_a \;\; e \;\; R_d = R_b$

$$\left(\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d} \right)$$

- A equação: $$v_o = \left[\frac{R_a R_d - R_b R_c}{R_a (R_c + R_d)} \right] v_{mc} + \left[\frac{R_d (R_a + R_b) + R_b (R_c + R_d)}{2R_a (R_c + R_d)} \right] v_{md}$$

- Simplifica para:

$$v_o = (0) v_{mc} + \left(\frac{R_b}{R_a} \right) v_{md}$$

- Portanto, um amplificador diferencial ideal tem ganho de modo comum $A_{mc} = 0$, amplificando apenas a porção de modo diferencial da tensão de entrada e eliminando a porção de modo comum.

Circuito Amplificador Diferencial

Fator de Rejeição de Modo Comum (FRMC)

- Um amplificador diferencial ideal tem ganho nulo de modo comum e ganho não-nulo de modo diferencial.

- O FRMC pode ser usado para medir quão próximo do ideal está um amplificador diferencial.

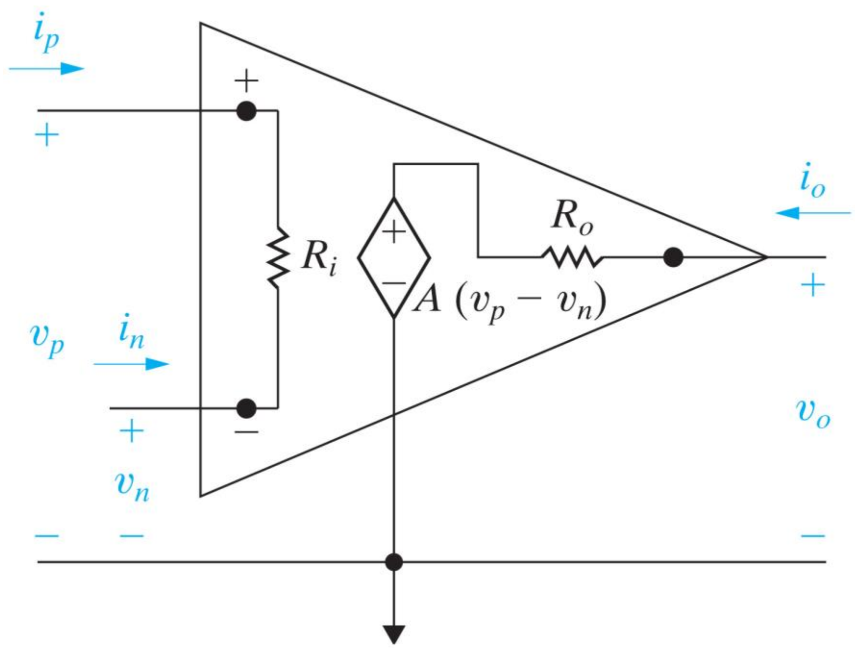
$$FRMC = \left| \frac{A_{md}}{A_{mc}} \right|$$

- Quanto maior o FRMC, mais proximo do ideal está um amplificador diferencial.

Modelo não-ideal

Três modificações no modelo ideal:

- Resistência de entrada finita, R_i;
- Ganho de malha aberta finito, A;
- Resistência de saída não-nula, R_o.



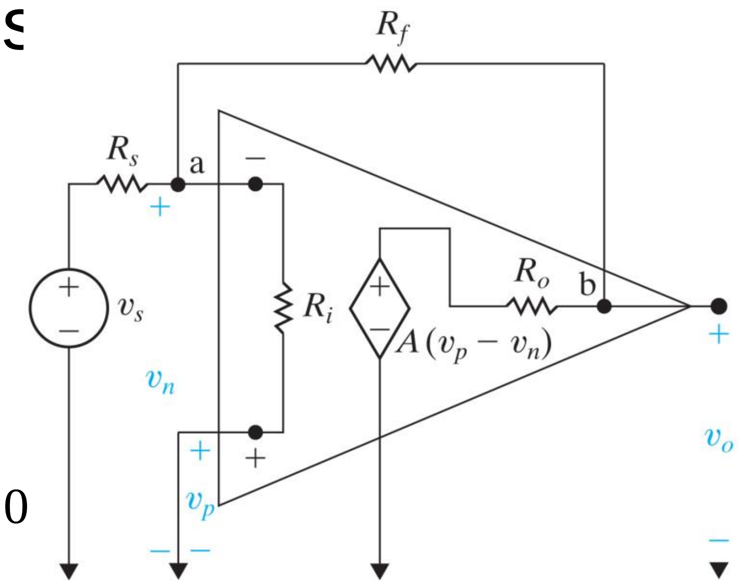
Devem ser desconsideradas:

$$\cancel{v_n = v_p}$$

$$\cancel{i_n = i_p = 0}$$

Modelo não-ideal

Amplificador inversor:



- Equações dos nós *a* e *b*:

$$\frac{v_n - v_s}{R_s} + \frac{v_n}{R_i} + \frac{v_n - v_o}{R_f} = 0 \qquad \frac{v_o - v_n}{R_f} + \frac{v_o - A(-v_n)}{R_o} = 0$$

- Reorganizando:

$$\left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f}\right)v_n - \frac{1}{R_f}v_o = \frac{1}{R_s}v_s \qquad \left(\frac{A}{R_o} - \frac{1}{R_f}\right)v_n - \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_o}\right)v_o = 0$$

- Resolvendo para v_o:

$$v_o = \frac{-A + (R_o/R_f)}{\frac{R_s}{R_f}\left(1 + A + \frac{R_o}{R_i}\right) + \left(\frac{R_s}{R_i} + 1\right) + \frac{R_o}{R_f}} v_s$$

Circuitos Resistivos

Referências Bibliográficas:

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

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