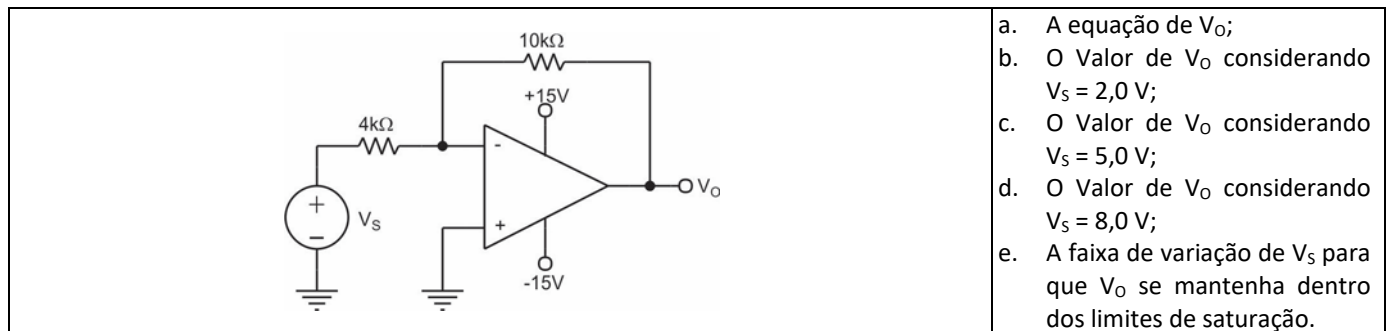


## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

1) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$\frac{V_s - 0}{4\text{k}\Omega} = \frac{0 - V_o}{10\text{k}\Omega} \Rightarrow V_o = -\frac{10\text{k}\Omega}{4\text{k}\Omega} \cdot V_s \Rightarrow V_o = -2,5 \cdot V_s$$

b) Para  $V_s = 2,0\text{ V}$ :

$$V_o = -2,5 \cdot (2,0) \Rightarrow V_o = -5,0\text{ V}$$

c) Para  $V_s = 5,0\text{ V}$ :

$$V_o = -2,5 \cdot (5,0) \Rightarrow V_o = -12,5\text{ V}$$

d) Para  $V_s = 8,0\text{ V}$ :

$$V_o = -2,5 \cdot (8,0) \Rightarrow V_o = -20,0\text{ V (Saturação)} \therefore V_o = -15,0\text{ V}$$

e) Para  $V_o = 15,0\text{ V}$ :

$$V_s = -\frac{V_o}{2,5} \Rightarrow V_s = -6,0\text{ V}$$

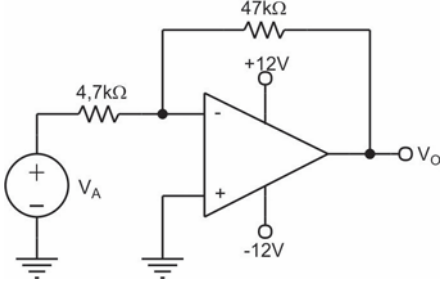
Para  $V_o = -15,0\text{ V}$ :

$$V_s = -\frac{V_o}{2,5} \Rightarrow V_s = 6,0\text{ V}$$

$$-6,0\text{ V} \leq V_s \leq 6,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

2) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:

|   |   |
|---|---|
|  | <p>a. A equação de <math>V_O</math>;</p> <p>b. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = 0,2 \text{ V}</math>;</p> <p>c. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = -0,9 \text{ V}</math>;</p> <p>d. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = 2,0 \text{ V}</math>;</p> <p>e. A faixa de variação de <math>V_A</math> para que <math>V_O</math> se mantenha dentro dos limites de saturação.</p> |
|---|---|

a) Aplicando a equação do **Amplificador Inversor**:

$$V_O = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_A \Rightarrow V_O = -\frac{47\text{k}\Omega}{4,7\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_O = -10,0 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_O = -10,0 \cdot (0,2) \Rightarrow V_O = -2,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -0,9 \text{ V}$ :

$$V_O = -10,0 \cdot (-0,9) \Rightarrow V_O = 9,0 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_O = -10,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_O = -20,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = -12,0 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 12,0 \text{ V}$ :

$$V_A = -\frac{V_O}{10,0} \Rightarrow V_A = -1,2 \text{ V}$$

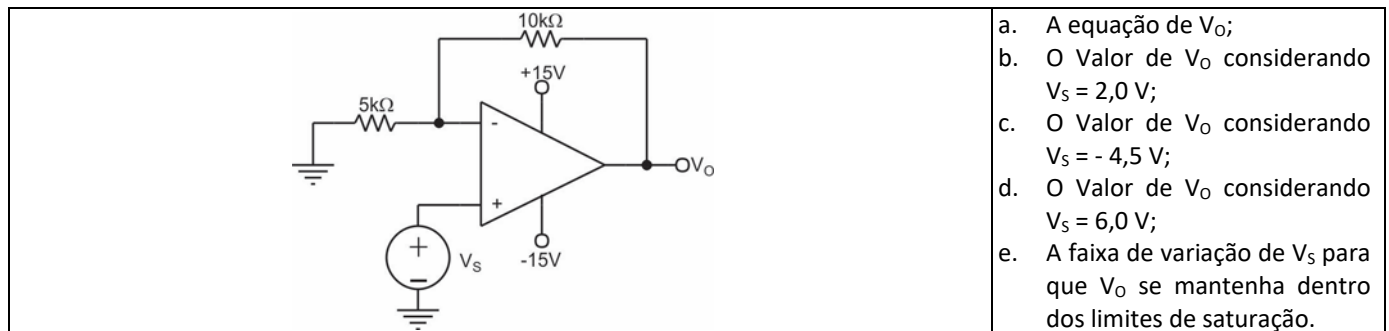
Para  $V_O = -12,0 \text{ V}$ :

$$V_A = -\frac{V_O}{10,0} \Rightarrow V_A = 1,2 \text{ V}$$

$$-1,2 \text{ V} \leq V_A \leq 1,2 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

3) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$\frac{0 - V_S}{5k\Omega} = \frac{V_S - V_O}{10k\Omega} \Rightarrow V_S - V_O = -\frac{10k\Omega}{5k\Omega} \cdot V_S \Rightarrow -V_O = -2,0 \cdot V_S - V_S \Rightarrow V_O = 3,0 \cdot V_S$$

b) Para  $V_S = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 3,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_O = 6,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_S = -4,5 \text{ V}$ :

$$V_O = 3,0 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_O = -13,5 \text{ V}$$

d) Para  $V_S = 6,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 3,0 \cdot (6,0) \Rightarrow V_O = 18,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = 15,0 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_S = \frac{V_O}{3,0} \Rightarrow V_S = 5,0 \text{ V}$$

Para  $V_O = -15 \text{ V}$ :

$$V_S = \frac{V_O}{3,0} \Rightarrow V_S = -5,0 \text{ V}$$

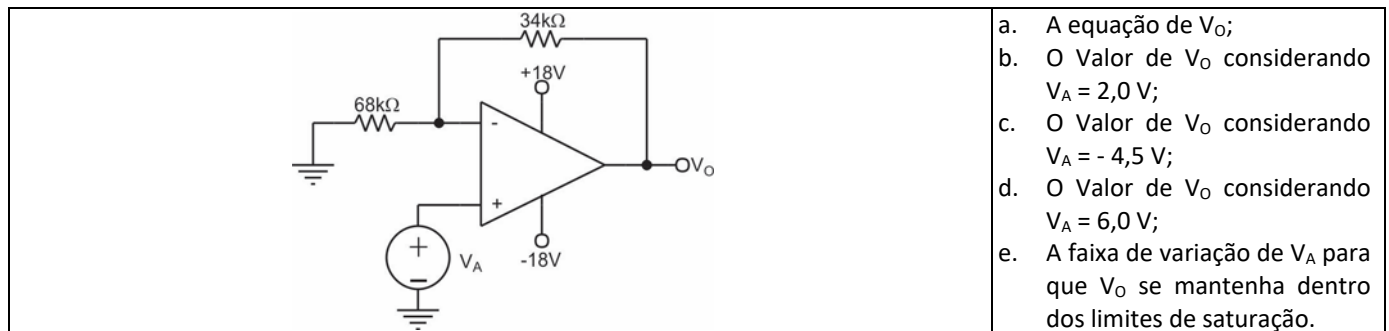


$$-5,0 \text{ V} \leq V_S \leq 5,0 \text{ V}$$



## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

4) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a equação do **Amplificador Não Inversor**:

$$V_O = \frac{R_f + R_s}{R_s} \cdot V_s \Rightarrow V_O = \frac{34 \text{ k}\Omega + 68 \text{ k}\Omega}{68 \text{ k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_O = 1,5 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 1,5 \cdot (2,0) \Rightarrow V_O = 3,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -4,5 \text{ V}$ :

$$V_O = 1,5 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_O = -6,75 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = 6,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 1,5 \cdot (6,0) \Rightarrow V_O = 9,0 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 18,0 \text{ V}$ :

$$V_A = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_A = 12,0 \text{ V}$$

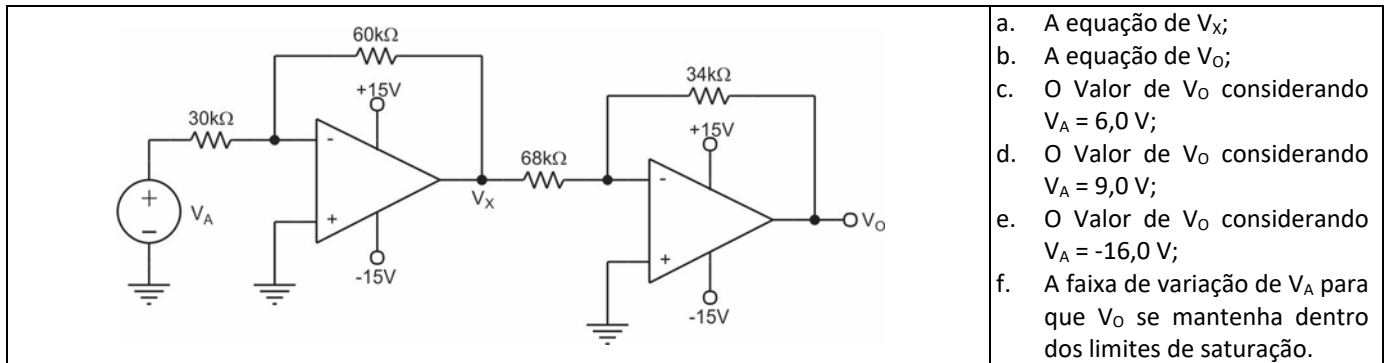
Para  $V_O = -18,0 \text{ V}$ :

$$V_A = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_A = -12,0 \text{ V}$$

$$-12,0 \text{ V} \leq V_A \leq 12,0 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

5) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_x = -\frac{60\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_x = -2,0 \cdot V_A$$

b) Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_o = -\frac{34\text{k}\Omega}{68\text{k}\Omega} \cdot V_x \Rightarrow V_o = -0,5 \cdot V_x$$

Substituindo  $V_x$  na equação de  $V_o$ :

$$V_o = -0,5 \cdot (-2,0 \cdot V_A) \Rightarrow V_o = V_A$$

c) Para  $V_A = 6,0\text{ V}$ :

$$V_x = -2,0 \cdot (6,0) \Rightarrow V_x = -12,0\text{ V}$$

$$V_o = -0,5 \cdot (-12,0) \Rightarrow V_o = 6,0\text{ V}$$

d) Para  $V_A = 9,0\text{ V}$ :

$$V_x = -2,0 \cdot (9,0) \Rightarrow V_x = -18,0\text{ V} \text{ (Saturação)} \therefore V_x = -15,0\text{ V}$$

$$V_o = -0,5 \cdot (-15,0) \Rightarrow V_o = 7,5\text{ V}$$

e) Para  $V_A = -16,0\text{ V}$ :

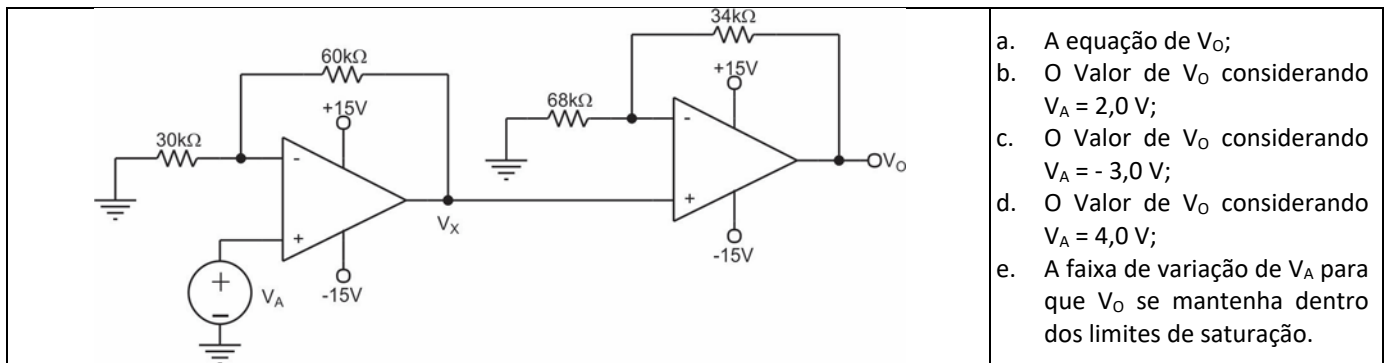
$$V_x = -2,0 \cdot (-16,0) \Rightarrow V_x = 32,0\text{ V} \text{ (Saturação)} \therefore V_x = 15,0\text{ V}$$

$$V_o = -0,5 \cdot (15,0) \Rightarrow V_o = -7,5\text{ V}$$

f)  $V_o$  nunca vai saturar. Devido a saturação do primeiro amplificador,  $V_x$  vai limitar a entrada do segundo amplificador em  $\pm 15\text{ V}$ , dessa forma, a saída  $V_o$  nunca ultrapassará os limites de  $+ 7,5\text{ V}$  e  $- 7,5\text{ V}$ .

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

6) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_X = \frac{60\text{k}\Omega + 30\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_X = 3,0 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_O = \frac{34\text{k}\Omega + 68\text{k}\Omega}{68\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = 1,5 \cdot V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = 3,0 \cdot (1,5 \cdot V_A) \Rightarrow V_O = 4,5 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 3,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_X = 6,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (6,0) \Rightarrow V_O = 9,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -3,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 3,0 \cdot (-3,0) \Rightarrow V_X = -9,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (-9,0) \Rightarrow V_O = -13,5 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = 4,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 3,0 \cdot (4,0) \Rightarrow V_X = 12,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (12,0) \Rightarrow V_O = 18 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = 15 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_X = 10,0 \text{ V} \therefore V_A = \frac{V_X}{3,0} \Rightarrow V_A = 3,33 \text{ V}$$

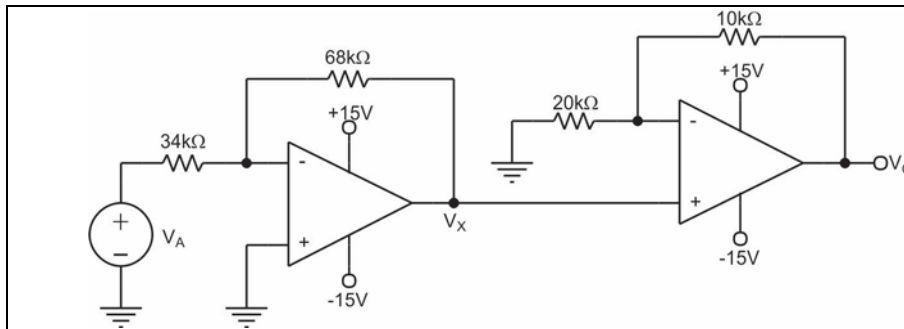
Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$

$$V_X = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_X = -10,0 \text{ V} \therefore V_A = \frac{V_X}{3,0} \Rightarrow V_A = -3,33 \text{ V}$$

$$-3,33 \text{ V} \leq V_A \leq 3,33 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

7) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



- A equação de  $V_O$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = 2,0 \text{ V}$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = -4,5 \text{ V}$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = 6,0 \text{ V}$ ;
- A faixa de variação de  $V_A$  para que  $V_O$  se mantenha dentro dos limites de saturação.

a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_X = -\frac{68\text{k}\Omega}{34\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_X = -2,0 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_O = \frac{10\text{k}\Omega + 20\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = 1,5 \cdot V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = 1,5 \cdot (-2,0 \cdot V_A) \Rightarrow V_O = -3 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -2,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_X = -4,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (-4,0) \Rightarrow V_O = -6,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -4,5 \text{ V}$ :

$$V_X = -2,0 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_X = 9,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (9,0) \Rightarrow V_O = 13,5 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = 6,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -2,0 \cdot (6,0) \Rightarrow V_X = -12,0 \text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (-12,0) \Rightarrow V_O = -18 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = -15 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_X = 10,0 \text{ V} \therefore V_A = \frac{V_X}{-2,0} \Rightarrow V_A = -5,0 \text{ V}$$

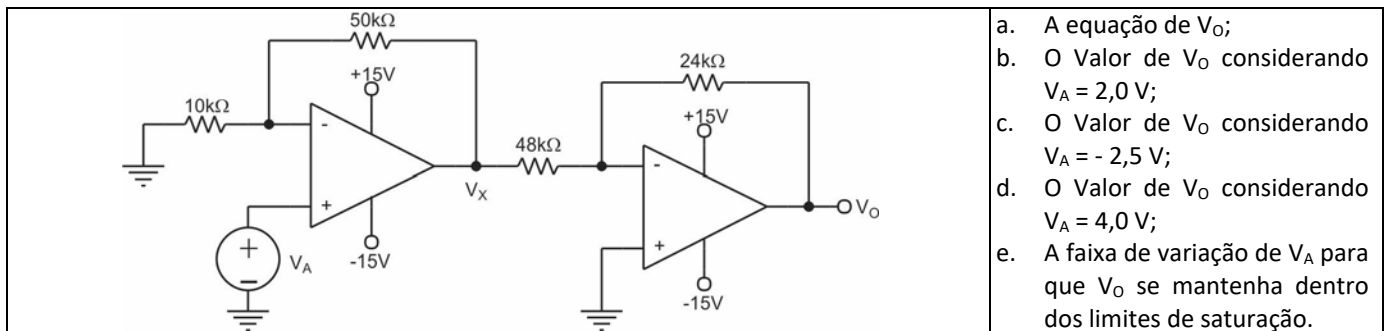
Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$

$$V_X = \frac{V_O}{1,5} \Rightarrow V_X = -10,0 \text{ V} \therefore V_A = \frac{V_X}{-2,0} \Rightarrow V_A = 5,0 \text{ V}$$

$$-5,0 \text{ V} \leq V_A \leq 5,0 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

8) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_X = \frac{50\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_X = 6,0 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_O = -\frac{24\text{k}\Omega}{48\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = -0,5 \cdot V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = -0,5 \cdot (6,0 \cdot V_A) \Rightarrow V_O = -3 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 6,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_X = 12,0 \text{ V}$$

$$V_O = -0,5 \cdot (12,0) \Rightarrow V_O = -6,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -2,5 \text{ V}$ :

$$V_X = 6,0 \cdot (-2,5) \Rightarrow V_X = -15,0 \text{ V}$$

$$V_O = -0,5 \cdot (-15,0) \Rightarrow V_O = 7,5 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = 4,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 6,0 \cdot (4,0) \Rightarrow V_X = 24,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_X = 15 \text{ V}$$

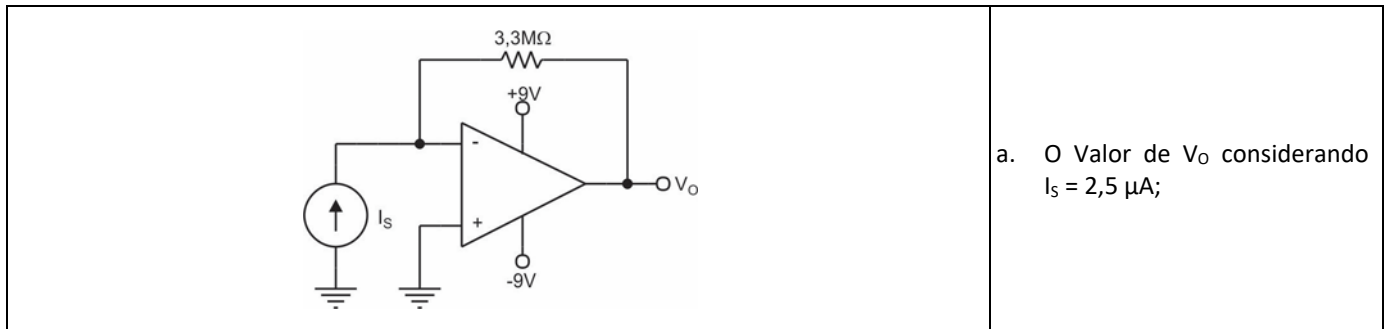
$$V_O = -0,5 \cdot (15,0) \Rightarrow V_O = -7,5 \text{ V}$$

e)  $V_O$  nunca vai saturar. Devido a saturação do primeiro amplificador,  $V_X$  vai limitar a entrada do segundo amplificador em  $\pm 15 \text{ V}$ , dessa forma, a saída  $V_O$  nunca ultrapassará os limites de  $+7,5 \text{ V}$  e  $-7,5 \text{ V}$ .



## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

9) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:

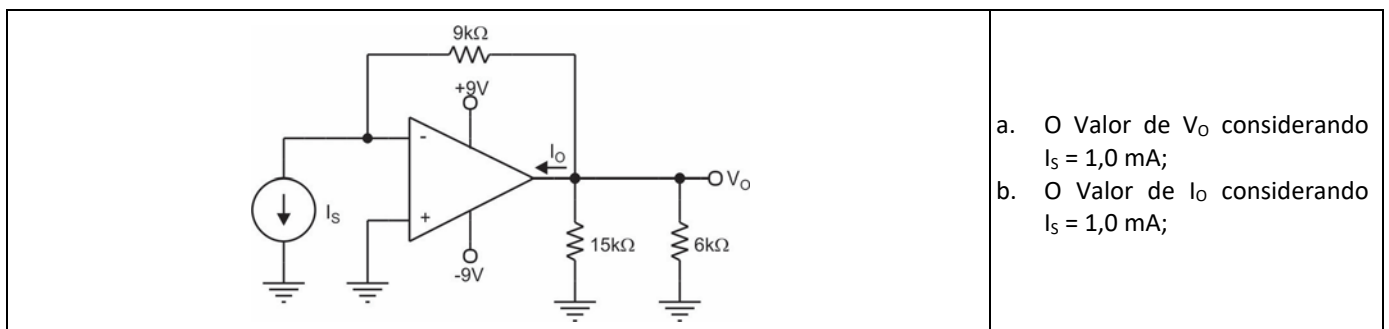


a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$I_s = \frac{0 - V_o}{3,3M\Omega} \Rightarrow V_o = -3,3M\Omega \cdot I_s$$

$$V_o = -3,3 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \Rightarrow V_o = -8,25V$$

10) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$\frac{V_o - 0}{9,0k\Omega} = I_s \Rightarrow V_o = 9,0k\Omega \cdot I_s$$

$$V_o = 9,0 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \Rightarrow V_o = 9,0V$$

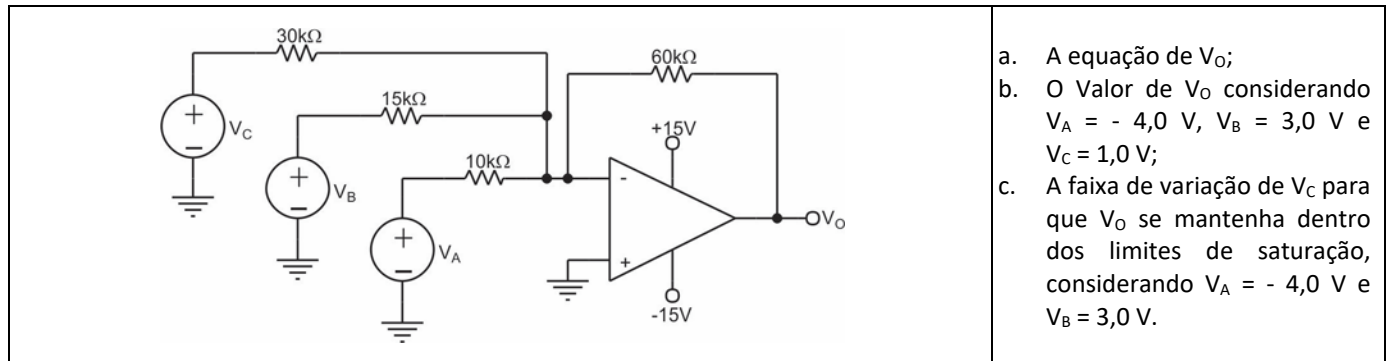
b) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de saída:

$$I_o + I_s + \frac{V_o - 0}{15k\Omega} + \frac{V_o - 0}{6k\Omega} = 0 \Rightarrow I_o = -I_s - \frac{V_o}{15k\Omega} - \frac{V_o}{6k\Omega}$$

$$I_o = -1,0 \cdot 10^{-3} - \frac{9,0}{15,0 \cdot 10^3} - \frac{9,0}{6,0 \cdot 10^3} \Rightarrow I_o = -3,1 \text{ mA}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

11) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$\frac{V_A - 0}{10\text{k}\Omega} + \frac{V_B - 0}{15\text{k}\Omega} + \frac{V_C - 0}{30\text{k}\Omega} = \frac{0 - V_O}{60\text{k}\Omega} \Rightarrow V_O = \frac{60\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_A + \frac{60\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} \cdot V_B + \frac{60\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega} \cdot V_C$$

$$V_O = 6,0 \cdot V_A + 4,0 \cdot V_B + 2,0 \cdot V_C$$

b) Para  $V_A = -4,0\text{ V}$ ,  $V_B = 3,0\text{ V}$  e  $V_C = 1,0\text{ V}$ :

$$V_O = 6,0 \cdot (-4,0) + 4,0 \cdot (3,0) + 2,0 \cdot (1,0) \Rightarrow V_O = -10\text{ V}$$

c) Isolando  $V_C$ :

$$V_C = \frac{V_O - 6,0 \cdot V_A - 4,0 \cdot V_B}{2}$$

Para  $V_O = 15,0\text{ V}$ :

$$V_C = \frac{15,0 - 6,0 \cdot (-4,0) - 4,0 \cdot (3,0)}{2} \Rightarrow V_C = 13,5\text{ V}$$

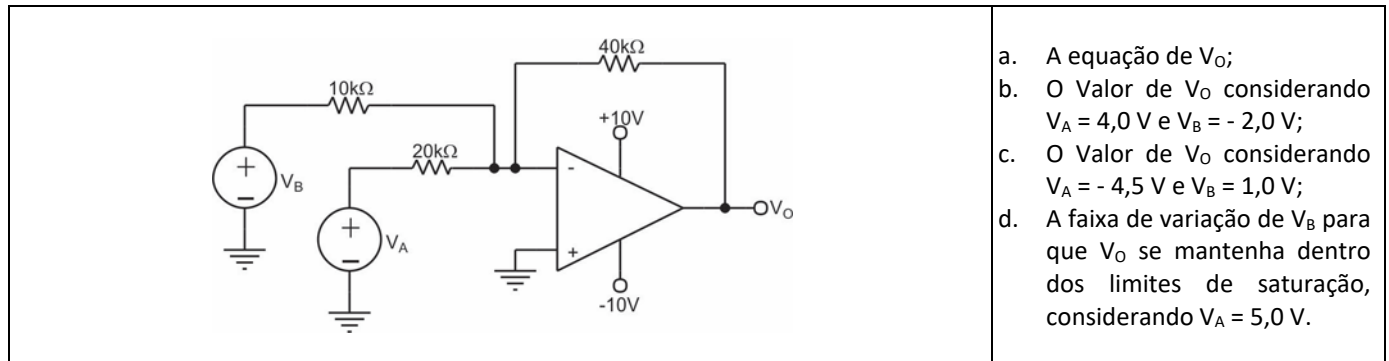
Para  $V_O = -15,0\text{ V}$ :

$$V_C = \frac{-15,0 - 6,0 \cdot (-4,0) - 4,0 \cdot (3,0)}{2} \Rightarrow V_C = -1,5\text{ V}$$

$$-1,5\text{ V} \leq V_C \leq 13,5\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

12) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



- A equação de  $V_O$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = 4,0\text{ V}$  e  $V_B = -2,0\text{ V}$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = -4,5\text{ V}$  e  $V_B = 1,0\text{ V}$ ;
- A faixa de variação de  $V_B$  para que  $V_O$  se mantenha dentro dos limites de saturação, considerando  $V_A = 5,0\text{ V}$ .

a) Aplicando a equação do **Amplificador Somador Inversor**:

$$V_O = -\frac{R_f}{R_A} \cdot V_A - \frac{R_f}{R_B} \cdot V_B \Rightarrow V_O = -\frac{40\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot V_A - \frac{40\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_B \Rightarrow V_O = -2,0 \cdot V_A - 4,0 \cdot V_B$$

b) Para  $V_A = 4,0\text{ V}$  e  $V_B = -2,0\text{ V}$ :

$$V_O = -2,0 \cdot (4,0) - 4,0 \cdot (-2,0) \Rightarrow V_O = 0,0\text{ V}$$

c) Para  $V_A = -4,5\text{ V}$  e  $V_B = 1,0\text{ V}$ :

$$V_O = -2,0 \cdot (-4,5) - 4,0 \cdot (1,0) \Rightarrow V_O = 5,0\text{ V}$$

d) Isolando  $V_B$ :

$$V_B = -\frac{V_O + 2,0 \cdot V_A}{4,0}$$

Para  $V_O = 10,0\text{ V}$ :

$$V_B = -\frac{10 + 2,0 \cdot (5,0)}{4,0} \Rightarrow V_B = -5,0\text{ V}$$

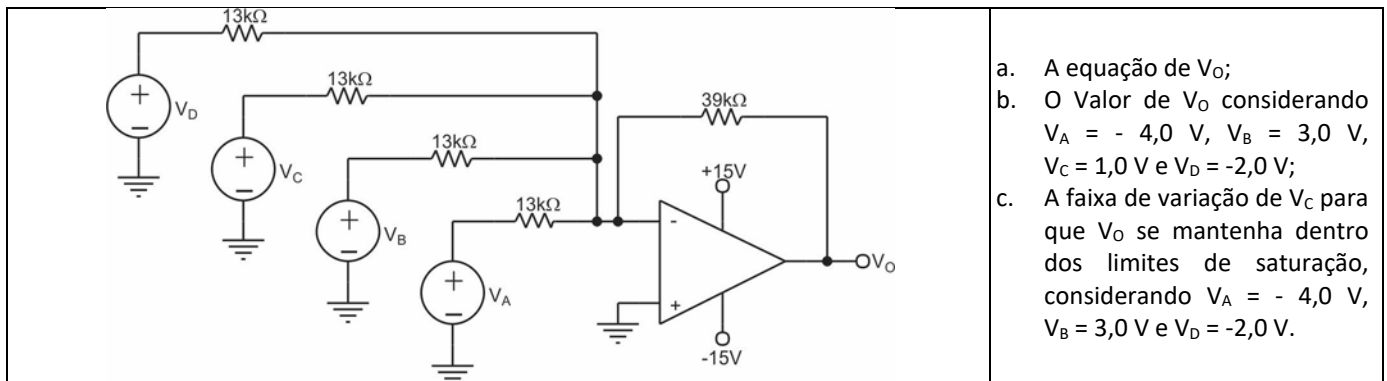
Para  $V_O = -10,0\text{ V}$ :

$$V_B = -\frac{-10 + 2,0 \cdot (5,0)}{4,0} \Rightarrow V_B = 0,0\text{ V}$$

$$-5,0\text{ V} \leq V_B \leq 0,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

13) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a equação do **Amplificador Somador Inversor com resistências de entrada iguais**:

$$V_O = -\frac{R_f}{R_x} \cdot (V_A + V_B + V_C + V_D) \Rightarrow V_O = -\frac{39\text{k}\Omega}{13\text{k}\Omega} \cdot (V_A + V_B + V_C + V_D)$$

$$V_O = -3,0 \cdot (V_A + V_B + V_C + V_D)$$

b) Para  $V_A = -4,0\text{ V}$ ,  $V_B = 3,0\text{ V}$ ,  $V_C = 1,0\text{ V}$  e  $V_D = -2,0\text{ V}$ :

$$V_O = -3,0 \cdot ((-4) + 3 + 1 + (-2)) \Rightarrow V_O = 6,0\text{ V}$$

c) Isolando  $V_C$ :

$$V_C = -\frac{V_O}{3,0} - V_A - V_B - V_D$$

Para  $V_O = 15,0\text{ V}$ :

$$V_C = -\frac{15,0}{3,0} - (-4,0) - 1,0 - (-2,0) \Rightarrow V_C = 0,0\text{ V}$$

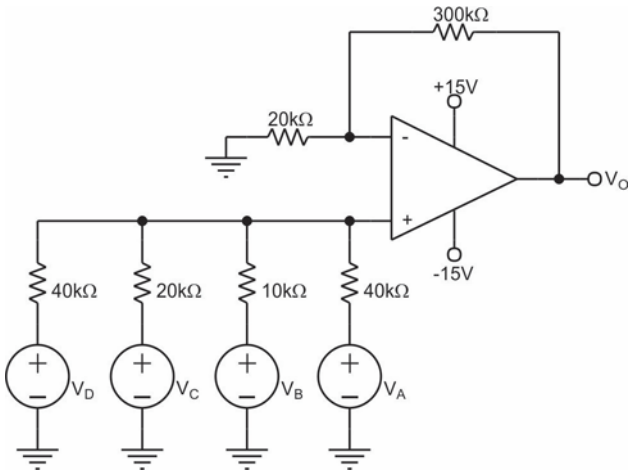
Para  $V_O = -15,0\text{ V}$ :

$$V_C = -\frac{-15,0}{3,0} - (-4,0) - 1,0 - (-2,0) \Rightarrow V_C = 10,0\text{ V}$$

$$0,0\text{ V} \leq V_C \leq 10,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

14) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:

|   |  |
|---|--|
|  | <p>a. A equação de <math>V_O</math>;</p> <p>b. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = 2,0 \text{ V}</math>, <math>V_B = 2,0 \text{ V}</math>, <math>V_C = -3,0 \text{ V}</math> e <math>V_D = -4,0 \text{ V}</math>;</p> <p>c. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = -4,0 \text{ V}</math>, <math>V_B = 3,0 \text{ V}</math>, <math>V_C = 5,0 \text{ V}</math> e <math>V_D = -6,0 \text{ V}</math>;</p> <p>d. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = -3,0 \text{ V}</math>, <math>V_B = 4,0 \text{ V}</math>, <math>V_C = -2,0 \text{ V}</math> e <math>V_D = -7,0 \text{ V}</math>;</p> <p>e. A faixa de variação de <math>V_B</math> para que <math>V_O</math> se mantenha dentro dos limites de saturação, considerando <math>V_A = -4,0 \text{ V}</math>, <math>V_C = 5,0 \text{ V}</math> e <math>V_D = -6,0 \text{ V}</math>.</p> |
|---|--|

a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada **não inversor**:

$$\frac{V_A - V^+}{40\text{k}\Omega} + \frac{V_B - V^+}{10\text{k}\Omega} + \frac{V_C - V^+}{20\text{k}\Omega} + \frac{V_D - V^+}{40\text{k}\Omega} = 0$$

$$\frac{V_A}{40\text{k}\Omega} + \frac{V_B}{10\text{k}\Omega} + \frac{V_C}{20\text{k}\Omega} + \frac{V_D}{40\text{k}\Omega} = \frac{V^+}{40\text{k}\Omega} + \frac{V^+}{10\text{k}\Omega} + \frac{V^+}{20\text{k}\Omega} + \frac{V^+}{40\text{k}\Omega}$$

$$V^+ \cdot \left( \frac{1}{40} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{40} \right) = \frac{V_A}{40} + \frac{V_B}{10} + \frac{V_C}{20} + \frac{V_D}{40}$$

$$V^+ = \left( \frac{V_A}{40} + \frac{V_B}{10} + \frac{V_C}{20} + \frac{V_D}{40} \right) \cdot \left( \frac{40 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 40}{40 \cdot 10 \cdot 20 + 40 \cdot 10 \cdot 40 + 40 \cdot 20 \cdot 40 + 10 \cdot 20 \cdot 40} \right)$$

$$V^+ = \left( \frac{V_A}{40} + \frac{V_B}{10} + \frac{V_C}{20} + \frac{V_D}{40} \right) \cdot 5 \Rightarrow V^+ = \frac{V_A}{8} + \frac{V_B}{2} + \frac{V_C}{4} + \frac{V_D}{8}$$

Agora é possível equacionar o circuito restante como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_O = \frac{R_f + R_s}{R_s} \cdot V^+ \Rightarrow V_O = \frac{300\text{k}\Omega + 20\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot V^+ \Rightarrow V_O = 16 \cdot V^+$$

$$V_O = 16 \cdot \left( \frac{V_A}{8} + \frac{V_B}{2} + \frac{V_C}{4} + \frac{V_D}{8} \right) \Rightarrow V_O = 2 \cdot V_A + 8 \cdot V_B + 4 \cdot V_C + 2 \cdot V_D$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 2,0 \text{ V}$ ,  $V_C = -3,0 \text{ V}$  e  $V_D = -4,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 2 \cdot (2,0) + 8 \cdot (2,0) + 4 \cdot (-3,0) + 2 \cdot (-4,0) \Rightarrow V_O = 0,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -4,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 3,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 5,0 \text{ V}$  e  $V_D = -6,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 2 \cdot (-4,0) + 8 \cdot (3,0) + 4 \cdot (5,0) + 2 \cdot (-6,0) \Rightarrow V_O = 24,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = 15,0 \text{ V}$$

d) Para  $V_A = -3,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 4,0 \text{ V}$ ,  $V_C = -2,0 \text{ V}$  e  $V_D = -7,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 2 \cdot (-3,0) + 8 \cdot (4,0) + 4 \cdot (-2,0) + 2 \cdot (-7,0) \Rightarrow V_O = 4,0 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

d) Isolando  $V_C$ :

$$V_C = \frac{V_O - 2 \cdot V_A - 8 \cdot V_B - 2 \cdot V_D}{4}$$

Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_B = \frac{15,0 - 2 \cdot (-4,0) - 4 \cdot (5,0) - 2 \cdot (6,0)}{8} \Rightarrow V_B = -1,125 \text{ V}$$

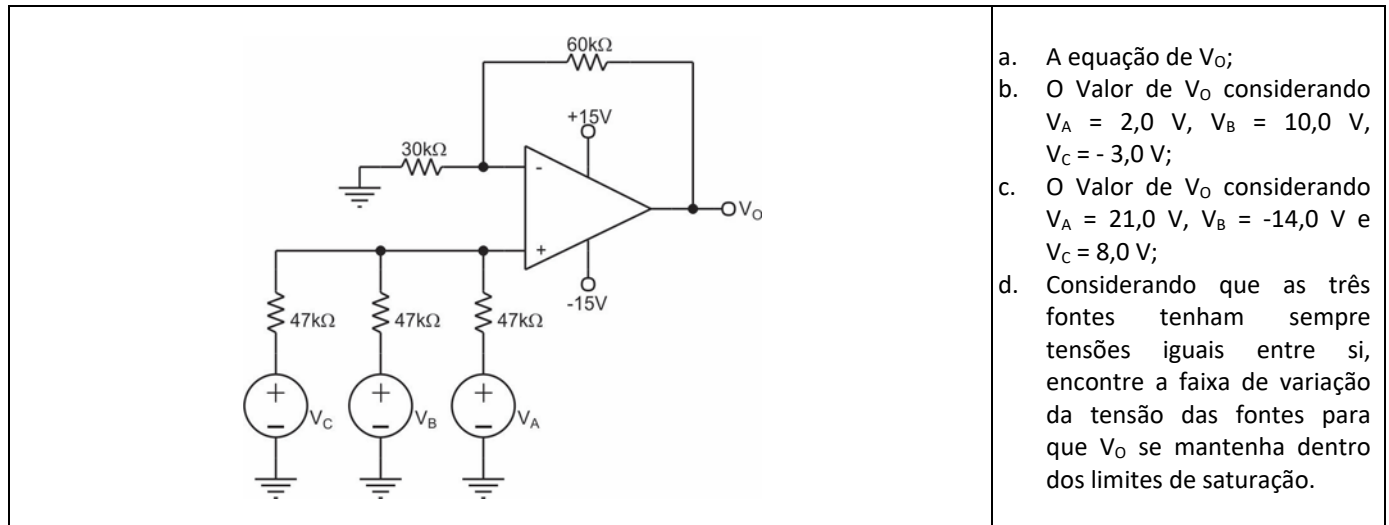
Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$ :

$$V_B = \frac{-15,0 - 2 \cdot (-4,0) - 4 \cdot (5,0) - 2 \cdot (6,0)}{8} \Rightarrow V_B = -4,875 \text{ V}$$

$$-4,875 \text{ V} \leq V_B \leq -1,125 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

15) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a equação do **Amplificador Somador Não Inversor com resistências de entrada iguais**:

$$V_O = \frac{R_f + R_S}{R_S} \cdot \frac{(V_A + V_B + V_C)}{3} \Rightarrow V_O = \frac{60 \text{ k}\Omega + 30 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega} \cdot \frac{(V_A + V_B + V_C)}{3}$$

$$V_O = V_A + V_B + V_C$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 10,0 \text{ V}$  e  $V_C = -3,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 2,0 + 10,0 + (-3,0) \Rightarrow V_O = 9,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = 21,0 \text{ V}$ ,  $V_B = -14,0 \text{ V}$  e  $V_C = 8,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 21,0 + (-14,0) + 8,0 \Rightarrow V_O = 15,0 \text{ V}$$

d) Considerando  $V_A = V_B = V_C = V_X$ :

$$V_O = V_X + V_X + V_X \Rightarrow V_O = 3,0 \cdot V_X$$

Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = \frac{V_O}{3,0} \Rightarrow V_X = 5,0 \text{ V}$$

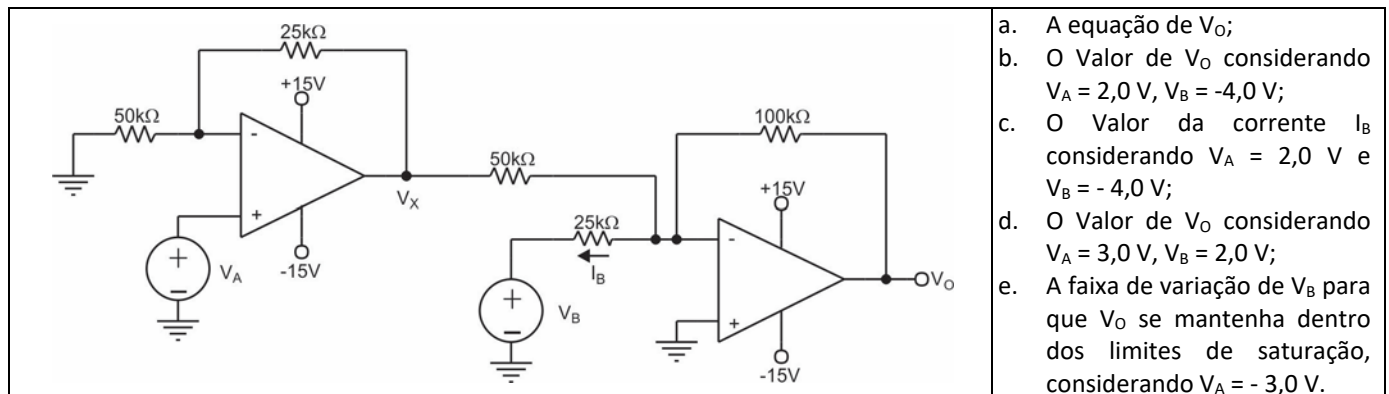
Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = \frac{V_O}{3,0} \Rightarrow V_X = -5,0 \text{ V}$$

$$-5,0 \text{ V} \leq V_X \leq 5,0 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

16) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_X = \frac{25 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_X = 1,5 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Somador Inversor**:

$$V_O = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \cdot V_X - \frac{100 \text{ k}\Omega}{25 \text{ k}\Omega} \cdot V_B \Rightarrow V_O = -2,0 \cdot V_X - 4,0 \cdot V_B$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = -2,0 \cdot (1,5 \cdot V_A) - 4,0 \cdot V_B \Rightarrow V_O = -3,0 \cdot V_A - 4,0 \cdot V_B$$

b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$  e  $V_B = -4,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 1,5 \cdot (2,0) \Rightarrow V_X = 3,0 \text{ V}$$

$$V_O = -2,0 \cdot (3,0) - 4,0 \cdot (-4,0) \Rightarrow V_O = 10,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$  e  $V_B = -4,0 \text{ V}$ :

$$i_B = \frac{0 - V_B}{25 \text{ k}\Omega} \Rightarrow i_B = -\frac{-4,0}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_B = 160 \mu\text{A}$$

d) Para  $V_A = 3,0 \text{ V}$  e  $V_B = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 1,5 \cdot (3,0) \Rightarrow V_X = 4,5 \text{ V}$$

$$V_O = -2,0 \cdot (4,5) - 4,0 \cdot (2,0) \Rightarrow V_O = -17,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = -15,0 \text{ V}$$

e) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -4,5 \text{ V} \therefore V_B = -\frac{15,0 + 2,0 \cdot (-4,5)}{4,0} \Rightarrow V_B = -1,5 \text{ V} \searrow$$

Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$

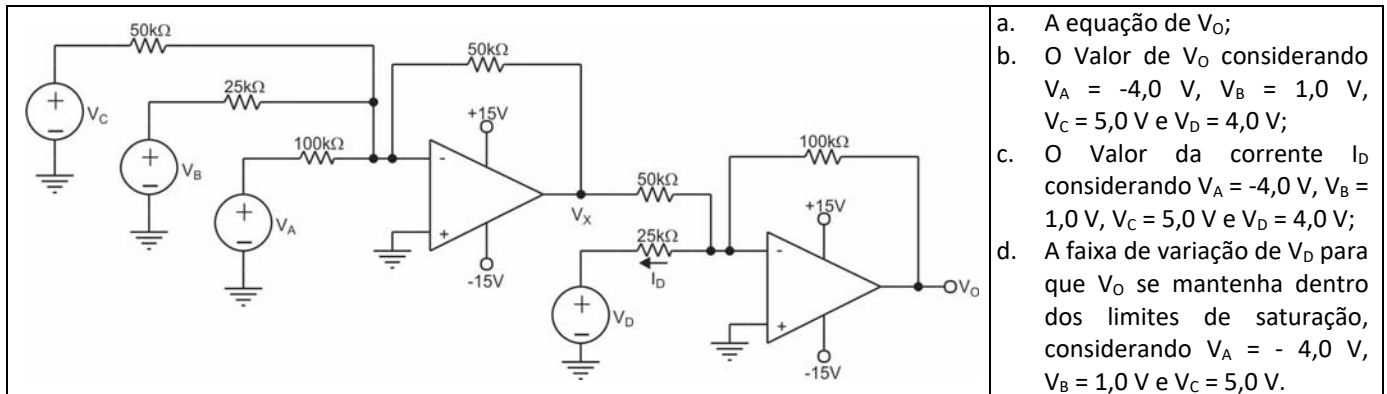
$$V_X = -4,5 \text{ V} \therefore V_B = -\frac{(-15,0) + 2,0 \cdot (-4,5)}{4,0} \Rightarrow V_B = 6,0 \text{ V} \nearrow$$

$$-1,5 \text{ V} \leq V_B \leq 6,0 \text{ V}$$



## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

17) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Somador Inversor**:

$$V_X = -\frac{50 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} \cdot V_A - \frac{50 \text{ k}\Omega}{25 \text{ k}\Omega} \cdot V_B - \frac{50 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \cdot V_C \Rightarrow V_X = -0,5 \cdot V_A - 2,0 \cdot V_B - 1,0 \cdot V_C$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Somador Inversor**:

$$V_O = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \cdot V_X - \frac{100 \text{ k}\Omega}{25 \text{ k}\Omega} \cdot V_D \Rightarrow V_O = -2,0 \cdot V_X - 4,0 \cdot V_D$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = -2,0 \cdot (-0,5 \cdot V_A - 2,0 \cdot V_B - 1,0 \cdot V_C) - 4,0 \cdot V_D \Rightarrow V_O = V_A + 4,0 \cdot V_B + 2,0 \cdot V_C - 4,0 \cdot V_D$$

b) Para  $V_A = -4,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 1,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 5,0 \text{ V}$  e  $V_D = 4,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -0,5 \cdot (-4,0) - 2,0 \cdot (1,0) - 1,0 \cdot (5,0) \Rightarrow V_X = -5,0 \text{ V}$$

$$V_O = -2,0 \cdot (-5,0) - 4,0 \cdot (4,0) \Rightarrow V_O = -6,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -4,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 1,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 5,0 \text{ V}$  e  $V_D = 4,0 \text{ V}$ :

$$i_D = \frac{0 - V_D}{25 \text{ k}\Omega} \Rightarrow i_D = -\frac{4,0}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_D = -160 \mu\text{A}$$

d) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -5,0 \text{ V} \therefore V_D = -\frac{15,0 + 2,0 \cdot (-5,0)}{4,0} \Rightarrow V_D = -1,25 \text{ V}$$

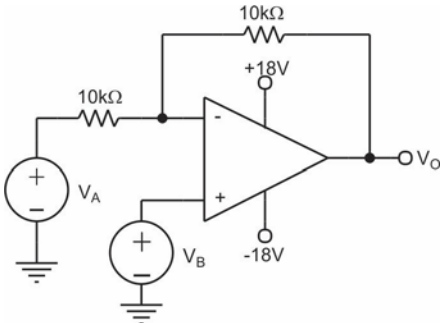
Para  $V_O = -15,0 \text{ V}$

$$V_X = -5,0 \text{ V} \therefore V_D = -\frac{(-15,0) + 2,0 \cdot (-5,0)}{4,0} \Rightarrow V_D = 6,25 \text{ V}$$

$$\rightarrow -1,25 \text{ V} \leq V_D \leq 6,25 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

18) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:

|   |   |
|---|---|
|  | <p>a. A equação de <math>V_O</math>;</p> <p>b. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = 2,0\text{ V}</math> e <math>V_B = 5,0\text{ V}</math>;</p> <p>c. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = -5,0\text{ V}</math>, <math>V_B = 6,0\text{ V}</math>;</p> <p>d. O Valor de <math>V_O</math> considerando <math>V_A = 6,0\text{ V}</math>, <math>V_B = -7,0\text{ V}</math>;</p> <p>e. A faixa de variação de <math>V_A</math> para que <math>V_O</math> se mantenha dentro dos limites de saturação, considerando <math>V_B = 5,0\text{ V}</math>.</p> |
|---|---|

a) Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes no nó do pino de entrada inversor:

$$\frac{V_A - V_B}{10k\Omega} = \frac{V_B - V_O}{10k\Omega} \Rightarrow V_O = 2,0 \cdot V_B - V_A$$

b) Para  $V_A = 2,0\text{ V}$  e  $V_B = 5,0\text{ V}$ :

$$V_O = 2,0 \cdot (5,0) - (2,0) \Rightarrow V_O = 8,0\text{ V}$$

c) Para  $V_A = -5,0\text{ V}$  e  $V_B = 6,0\text{ V}$ :

$$V_O = 2,0 \cdot (-5,0) - (6,0) \Rightarrow V_O = -16,0\text{ V}$$

d) Para  $V_A = 6,0\text{ V}$  e  $V_B = -7,0\text{ V}$ :

$$V_O = 2,0 \cdot (6,0) - (-7,0) \Rightarrow V_O = 19,0\text{ V} \text{ (Saturação)} \therefore V_O = 18,0\text{ V}$$

e) Para  $V_O = 15,0\text{ V}$ :

$$V_A = 2,0 \cdot (5,0) - 18,0 \Rightarrow V_A = -8,0$$



Para  $V_O = -15,0\text{ V}$ :

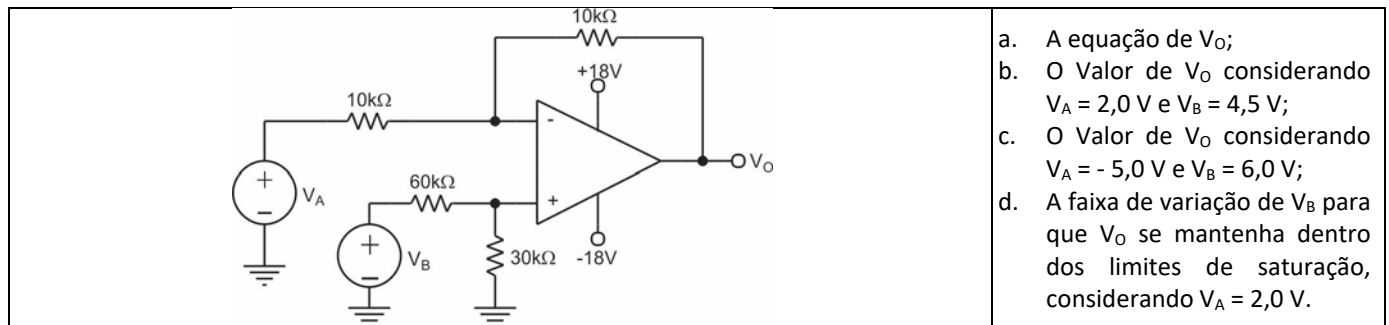
$$V_A = 2,0 \cdot (5,0) - (-18,0) \Rightarrow V_A = 28,0$$



$$-8,0\text{ V} \leq V_A \leq 28,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

19) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Aplicando a equação do **Amplificador Subtrator com resistências  $R_A$  e  $R_B$** :

$$V_O = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_A + \frac{R_f + R_s}{R_s} \cdot \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot V_B$$

$$V_O = -\frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_A + \frac{10\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot \frac{30\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega + 60\text{k}\Omega} \cdot V_B \Rightarrow V_O = -V_A + \frac{2}{3} \cdot V_B$$

b) Para  $V_A = 2,0\text{ V}$  e  $V_B = 4,5\text{ V}$ :

$$V_O = -(2,0) + \frac{2}{3} \cdot (4,5) \Rightarrow V_O = 1,0\text{ V}$$

c) Para  $V_A = -5,0\text{ V}$  e  $V_B = 6,0\text{ V}$ :

$$V_O = -(-5,0) + \frac{2}{3} \cdot (6,0) \Rightarrow V_O = 9,0\text{ V}$$

d) Para  $V_O = 18,0\text{ V}$ :

$$V_B = \frac{3 \cdot (18,0 + 2,0)}{2} \Rightarrow V_A = 30,0\text{ V}$$

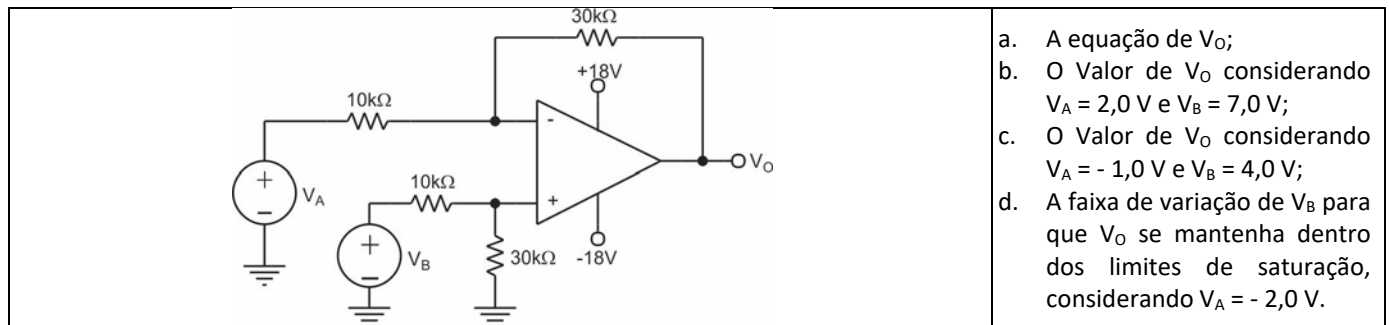
Para  $V_O = -18,0\text{ V}$ :

$$V_B = \frac{3 \cdot (-18,0 + 2,0)}{2} \Rightarrow V_A = -24,0\text{ V}$$

$$-24,0\text{ V} \leq V_A \leq 30,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

20) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



e) Aplicando a equação do **Amplificador Subtrator com resistências  $R_A$  e  $R_B$  iguais a  $R_S$  e  $R_f$** :

$$V_O = \frac{R_f}{R_S} \cdot (V_B - V_A) \Rightarrow V_O = \frac{30\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot (V_B - V_A) \Rightarrow V_O = 3 \cdot (V_B - V_A)$$

f) Para  $V_A = 2,0\text{ V}$  e  $V_B = 7,0\text{ V}$ :

$$V_O = V_O = 3 \cdot (7,0 - 2,0) \Rightarrow V_O = 15,0\text{ V}$$

g) Para  $V_A = -1,0\text{ V}$  e  $V_B = 4,0\text{ V}$ :

$$V_O = V_O = 3 \cdot (4,0 - (-1,0)) \Rightarrow V_O = 15,0\text{ V}$$

h) Para  $V_O = 18,0\text{ V}$ :

$$V_B = \frac{(18,0)}{3} + (-2,0) \Rightarrow V_A = 4,0\text{ V}$$

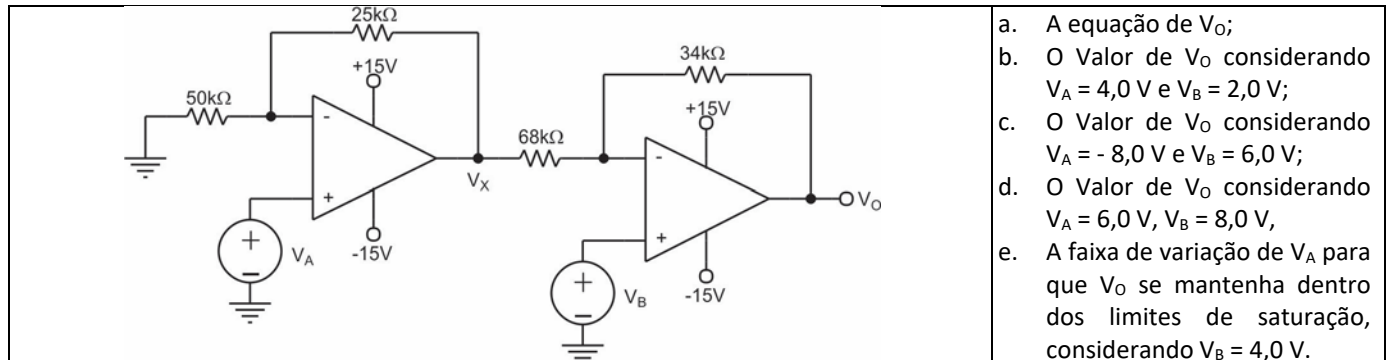
Para  $V_O = -18,0\text{ V}$ :

$$V_B = \frac{(-18,0)}{3} + (-2,0) \Rightarrow V_A = -8,0\text{ V}$$

$$-8,0\text{ V} \leq V_B \leq 4,0\text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

21) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Não Inversor**:

$$V_X = \frac{25\text{k}\Omega + 50\text{k}\Omega}{50\text{k}\Omega} \cdot V_A \Rightarrow V_X = 1,5 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Subtrator**:

$$V_O = \frac{34\text{k}\Omega + 68\text{k}\Omega}{68\text{k}\Omega} \cdot V_B - \frac{34\text{k}\Omega}{68\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = 1,5 \cdot V_B - 0,5 \cdot V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = 1,5 \cdot V_B - 0,5 \cdot (1,5 \cdot V_A) \Rightarrow V_O = 1,5 \cdot V_B - 0,75V_A$$

b) Para  $V_A = 4,0\text{ V}$  e  $V_B = 2,0\text{ V}$ :

$$V_X = 1,5 \cdot (4,0) \Rightarrow V_X = 6,0\text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (2,0) - 0,5 \cdot (6,0) \Rightarrow V_O = 0,0\text{ V}$$

c) Para  $V_A = -8,0\text{ V}$  e  $V_B = 6,0\text{ V}$ :

$$V_X = 1,5 \cdot (-8,0) \Rightarrow V_X = -12,0\text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (6,0) - 0,5 \cdot (-12,0) \Rightarrow V_O = 15,0\text{ V}$$

d) Para  $V_A = 6,0\text{ V}$  e  $V_B = 8,0\text{ V}$ :

$$V_X = 1,5 \cdot (6,0) \Rightarrow V_X = 9,0\text{ V}$$

$$V_O = 1,5 \cdot (8,0) - 0,5 \cdot (9,0) \Rightarrow V_O = 7,5\text{ V}$$

i) Para  $V_O = 15,0\text{ V}$ :

$$V_X = -\frac{(15,0) - 1,5 \cdot (4,0)}{0,5} \Rightarrow V_X = -18,0\text{ V} \quad (\text{impossível})$$

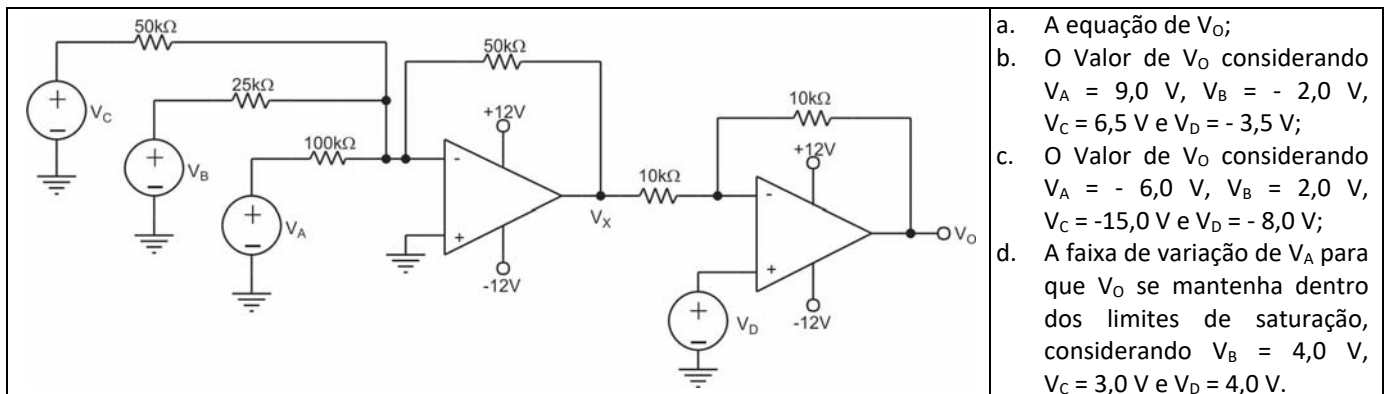
Para  $V_O = -15,0\text{ V}$ :

$$V_X = -\frac{(-15,0) - 1,5 \cdot (4,0)}{0,5} \Rightarrow V_X = 42,0\text{ V} \quad (\text{impossível})$$

$V_O$  nunca irá saturar, pois para que isso ocorra, os valores de  $V_X$  teriam que ultrapassar os limites de alimentação dos amplificadores operacionais.

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

22) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Somador Inversor**:

$$V_X = -\frac{50\text{k}\Omega}{100\text{k}\Omega} \cdot V_A - \frac{50\text{k}\Omega}{25\text{k}\Omega} \cdot V_B - \frac{50\text{k}\Omega}{50\text{k}\Omega} \cdot V_C \Rightarrow V_X = -0,5 \cdot V_A - 2,0 \cdot V_B - V_C$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Subtrator**:

$$V_O = \frac{10\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_D - \frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = 2,0 \cdot V_D - V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = 2,0 \cdot V_D - (-0,5 \cdot V_A - 2,0 \cdot V_B - V_C) \Rightarrow V_O = 0,5 \cdot V_A + 2,0 \cdot V_B + V_C + 2,0 \cdot V_D$$

b) Para  $V_A = 9,0 \text{ V}$ ,  $V_B = -2,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 6,5 \text{ V}$  e  $V_D = -3,5 \text{ V}$ :

$$V_X = -0,5 \cdot (9,0) - 2,0 \cdot (-2,0) - (6,5) \Rightarrow V_X = -7,0 \text{ V}$$

$$V_O = 2,0 \cdot (-3,5) - (-7,0) \Rightarrow V_O = 0,0 \text{ V}$$

c) Para  $V_A = -6,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 2,0 \text{ V}$ ,  $V_C = -15,0 \text{ V}$  e  $V_D = -8,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -0,5 \cdot (-6,0) - 2,0 \cdot (2,0) - (-15,0) \Rightarrow V_X = -16,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_X = -12,0 \text{ V}$$

$$V_O = 2,0 \cdot (-8,0) - (-12,0) \Rightarrow V_O = -4,0 \text{ V}$$

d) Para  $V_B = 4,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 3,0 \text{ V}$  e  $V_D = 4,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 2,0 \cdot V_D - V_O \Rightarrow V_X = 8,0 - V_O$$

$$V_A = \frac{-V_X - 2,0 \cdot V_B - V_C}{0,5} \Rightarrow V_A = -2,0 \cdot V_X - 4,0 \cdot (4,0) - 2,0 \cdot (3,0)$$

Para  $V_O = 12,0 \text{ V}$ :

$$V_X = -4,0 \Rightarrow V_A = -2,0 \cdot (-4,0) - 22,0 \Rightarrow V_A = -14,0 \text{ V}$$

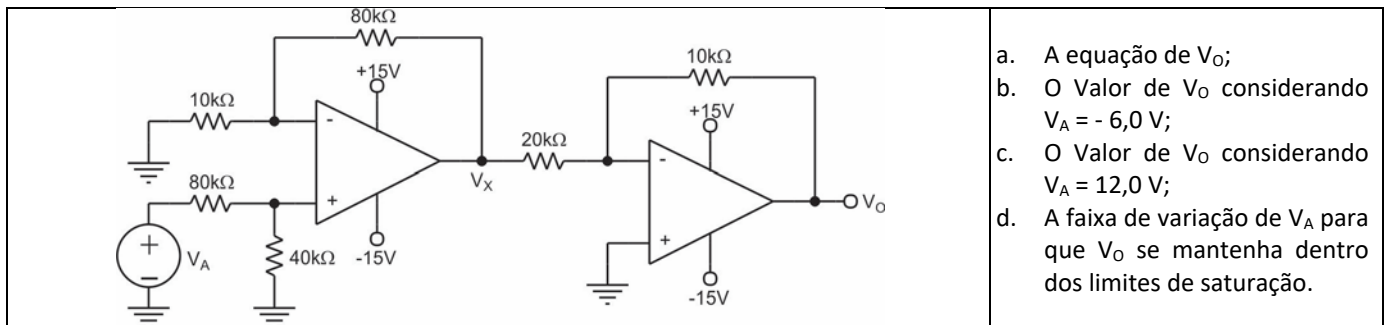
Para  $V_O = -12,0 \text{ V}$ :

$$V_X = 20,0 \text{ (impossível)}$$

$V_O$  nunca irá saturar em  $+12 \text{ V}$  porque é impossível  $V_X$  atingir  $20,0 \text{ V}$ . Assim só existe o limite de saturação para  $V_O = +12,0 \text{ V}$ .

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

23) Para o Circuito Amplificador a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Subtrator com Resistores  $R_A$  e  $R_B$** :

$$V_X = \frac{80\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot \frac{40\text{k}\Omega}{40\text{k}\Omega + 80\text{k}\Omega} V_A - \frac{80\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot (0,0) \Rightarrow V_X = 3,0 \cdot V_A$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_O = -\frac{10\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = -0,5 \cdot V_X$$

Substituindo  $V_X$  na equação de  $V_O$ :

$$V_O = -0,5 \cdot (3,0 \cdot V_A) \Rightarrow V_O = -1,5 \cdot V_A$$

b) Para  $V_A = -6,0\text{ V}$ :

$$V_X = 3,0 \cdot (-6,0) \Rightarrow V_X = -18,0\text{ V} \text{ (Saturação)} \therefore V_X = -15,0\text{ V}$$

$$V_O = -0,5 \cdot (-15,0) \Rightarrow V_O = 7,5\text{ V}$$

c) Para  $V_A = 12,0\text{ V}$ :

$$V_X = 3,0 \cdot (12,0) \Rightarrow V_X = 36,0\text{ V} \text{ (Saturação)} \therefore V_X = 15,0\text{ V}$$

$$V_O = -0,5 \cdot (15,0) \Rightarrow V_O = -7,5\text{ V}$$

d) Para  $V_O = 15,0\text{ V}$ :

$$V_X = -\frac{(15,0)}{0,5} \Rightarrow V_X = -30,0\text{ V} \text{ (impossível)}$$

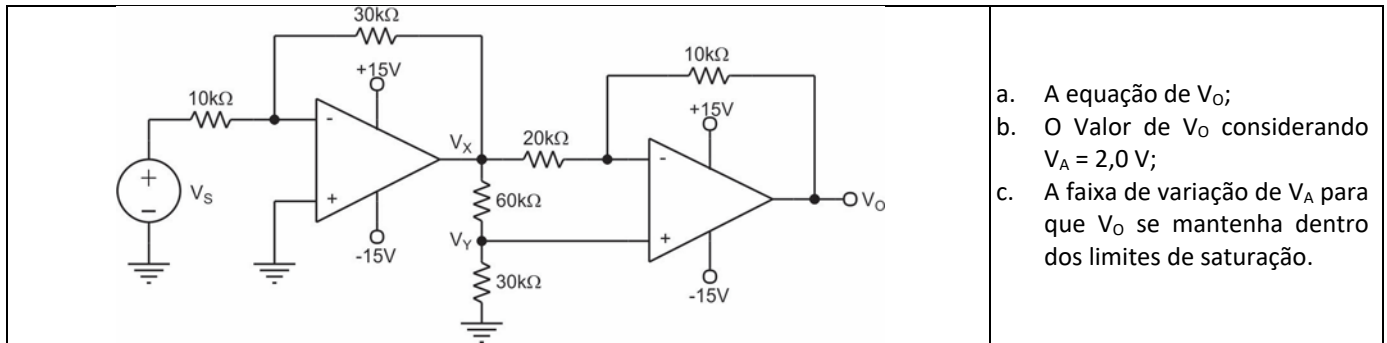
Para  $V_O = -15,0\text{ V}$ :

$$V_X = -\frac{(-15,0)}{0,5} \Rightarrow V_X = 30,0\text{ V} \text{ (impossível)}$$

$V_O$  nunca irá saturar porque é impossível  $V_X$  atingir  $\pm 30,0\text{ V}$ .

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

24) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



a) Equacionando o primeiro AMPOP como um **Amplificador Inversor**:

$$V_X = -\frac{30\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_S \Rightarrow V_X = -3,0 \cdot V_S$$

Equacionando o segundo AMPOP como um **Amplificador Subtrator**:

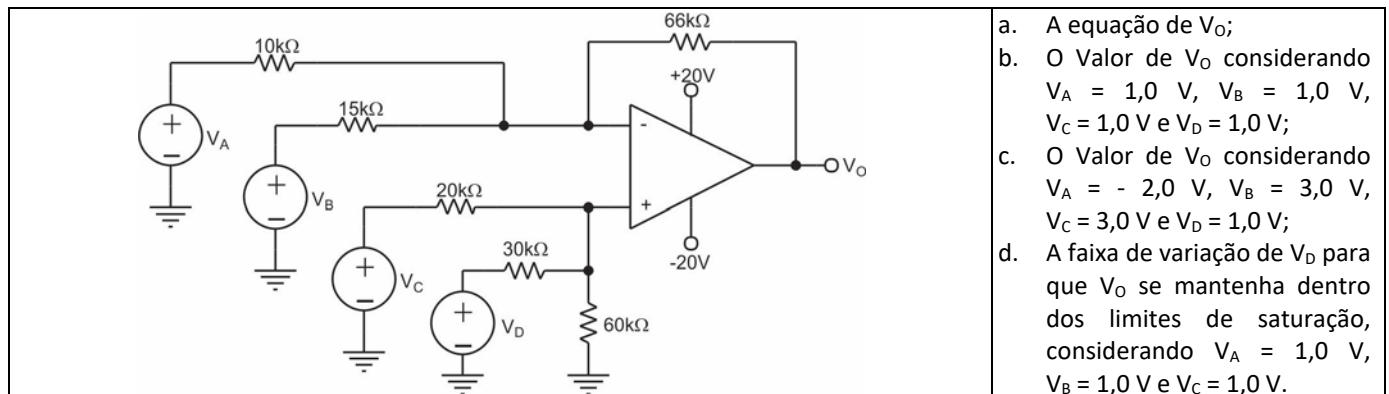
$$V_O = \frac{10\text{k}\Omega + 20\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot \frac{30\text{k}\Omega}{30\text{k}\Omega + 60\text{k}\Omega} \cdot V_X - \frac{10\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} \cdot V_X \Rightarrow V_O = 0,5V_X - 0,5 \cdot V_X \therefore V_O = 0,0\text{V}$$

b) Dado o valor encontrado, a saída do circuito será sempre igual a zero para qualquer valor de  $V_A$ , não permitindo que este circuito sature. Desta forma, não faz sentido resolver os itens b) e c), pois a resposta de b) é zero e o item c) não tem solução.



## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

25) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



- a) Este circuito é a junção de dois circuitos. Um somador Inversor e um somador não inversor. A forma mais rápida de resolvê-lo é pela técnica da superposição. Neste caso, eliminam-se as fontes  $V_C$  e  $V_D$ , fazendo com que o circuito seja apenas um **Amplificador Somador Inversor**, e dessa forma tem-se uma parcela da equação de  $V_O$ :

$$V_O' = -\frac{66\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \cdot V_A - \frac{66\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} \cdot V_B \Rightarrow V_O' = -6,6 \cdot V_A - 4,4 \cdot V_B$$

Em seguida, elimina-se do circuito as fontes  $V_A$  e  $V_B$ , obtendo um circuito equivalente a um **Amplificador Somador não Inversor**. Nesta situação as resistências de  $10 \text{ k}\Omega$  e  $15 \text{ k}\Omega$  ficam em paralelo, formando uma resistência equivalente de  $6 \text{ k}\Omega$ .

$$V_O'' = \frac{66\text{k}\Omega + 6\text{k}\Omega}{6\text{k}\Omega} \cdot \left( \frac{V_C}{20\text{k}\Omega} + \frac{V_D}{30\text{k}\Omega} \right) \cdot \left( \frac{20\text{k}\Omega \cdot 30\text{k}\Omega \cdot 60\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega \cdot 30\text{k}\Omega + 20\text{k}\Omega \cdot 60\text{k}\Omega + 30\text{k}\Omega \cdot 60\text{k}\Omega} \right)$$

$$V_O'' = 12 \cdot \left( \frac{V_C}{20\text{k}\Omega} + \frac{V_D}{30\text{k}\Omega} \right) \cdot (10\text{k}\Omega) \Rightarrow V_O'' = 6 \cdot V_C + 4 \cdot V_D$$

Juntando as duas parcelas de  $V_O$ , tem-se a equação final:

$$V_O = V_O' + V_O'' \therefore V_O = -6,6 \cdot V_A - 4,4 \cdot V_B + 6 \cdot V_C + 4 \cdot V_D$$

- b) Para  $V_A = 1,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 1,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 1,0 \text{ V}$  e  $V_D = 1,0 \text{ V}$ :

$$V_O = -6,6 \cdot (1,0) - 4,4 \cdot (1,0) + 6 \cdot (1,0) + 4 \cdot (1,0) \Rightarrow V_O = -1,0 \text{ V}$$

- c) Para  $V_A = -2,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 3,0 \text{ V}$ ,  $V_C = 3,0 \text{ V}$  e  $V_D = 1,0 \text{ V}$ :

$$V_O = -6,6 \cdot (-2,0) - 4,4 \cdot (3,0) + 6 \cdot (3,0) + 4 \cdot (1,0) \Rightarrow V_O = 22,0 \text{ V (Saturação)} \therefore V_O = 20,0 \text{ V}$$

- d) Para  $V_O = 20,0 \text{ V}$ :

$$V_D = \frac{(20,0) + 5,0}{4,0} \Rightarrow V_D = 6,25 \text{ V}$$

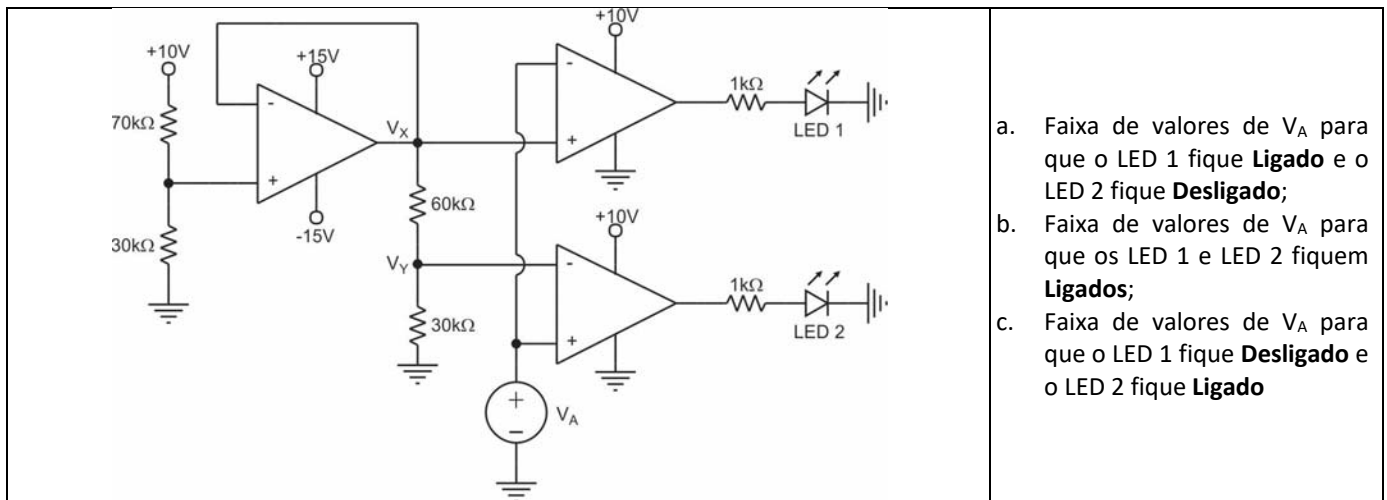
Para  $V_O = -20,0 \text{ V}$ :

$$V_D = \frac{(-20,0) + 5,0}{4,0} \Rightarrow V_D = -3,75 \text{ V}$$

$$-3,75 \text{ V} \leq V_D \leq 6,25 \text{ V}$$

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

26) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



Determinando a tensão no ponto  $V_x$ , considerando que o primeiro AMPOP é um buffer:

$$V_x = \frac{30k\Omega}{30k\Omega + 70k\Omega} \cdot 10,0 \Rightarrow V_x = 3,0V$$

Em seguida é possível determinar a tensão no ponto  $V_y$ , por meio do divisor de tensão formado pelos resistores de 60 kΩ e 30 kΩ:

$$V_y = \frac{30k\Omega}{30k\Omega + 60k\Omega} \cdot V_x \Rightarrow V_y = 1,0V$$

Analisando os circuitos comparadores de saída é possível observar que:

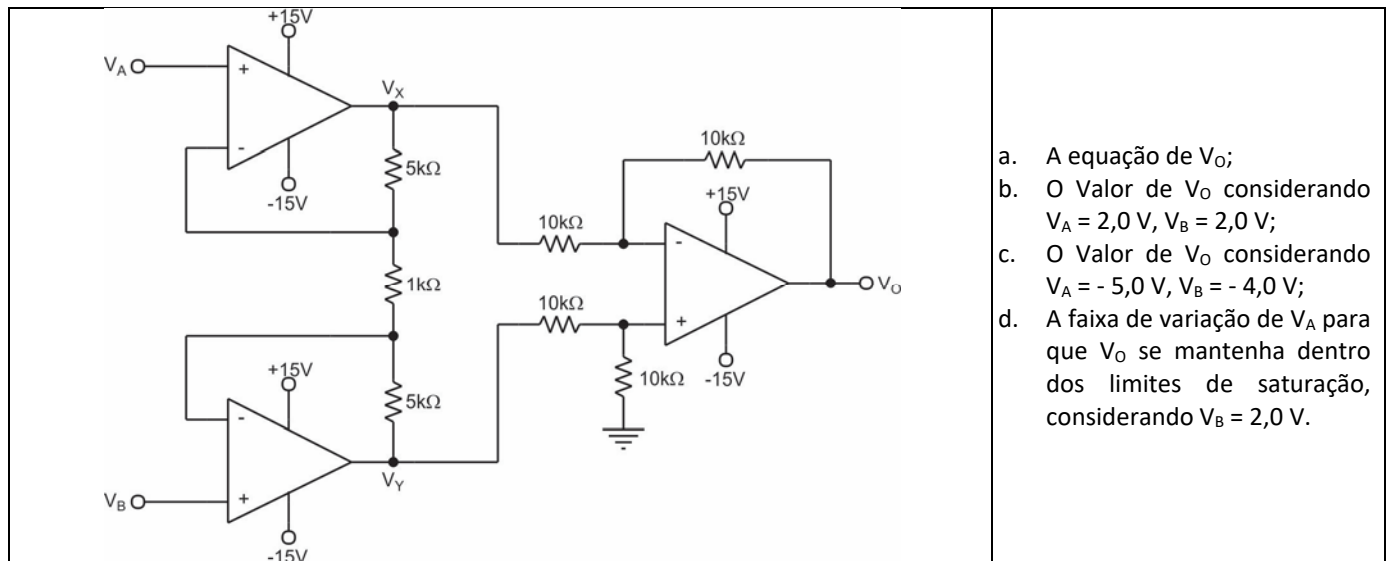
- O LED 1 fica ligado sempre que  $V_A$  for menor que 3,0V.
- O LED 2 fica ligado sempre que  $V_A$  for maior que 1,0V.

Diante destes fatos é possível afirmar que:

- a) Para:  $V_A < 1,0V \rightarrow$  LED 1 Ligado e LED 2 Desligado;
- b) Para:  $1,0V \leq V_A < 3,0V \rightarrow$  LED 1 Ligado e LED 2 Ligado;
- c) Para:  $V_A \geq 3,0V \rightarrow$  LED 1 Desligado e LED 2 Ligado.

## EXERCÍCIOS - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

27) Para o **Circuito Amplificador** a seguir determine:



- A equação de  $V_O$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = 2,0 \text{ V}$ ,  $V_B = 2,0 \text{ V}$ ;
- O Valor de  $V_O$  considerando  $V_A = -5,0 \text{ V}$ ,  $V_B = -4,0 \text{ V}$ ;
- A faixa de variação de  $V_A$  para que  $V_O$  se mantenha dentro dos limites de saturação, considerando  $V_B = 2,0 \text{ V}$ .

O circuito proposto é conhecido como “Amplificador de Instrumentação”, e este circuito precisa ser equacionado de acordo com as propriedades do AMPOP.

- a) Aplicando a propriedade das tensões de entrada do AMPOP, é possível verificar que no lado superior do resistor de  $1 \text{ k}\Omega$  tem-se a tensão  $V_A$ , assim como no lado inferior deste resistor tem-se a tensão  $V_B$ . Assim é possível equacionar os três resistores entre os pontos  $V_X$  e  $V_Y$ :

$$\frac{V_X - V_A}{5 \text{ k}\Omega} = \frac{V_A - V_B}{1 \text{ k}\Omega} \Rightarrow V_X = 6,0 \cdot V_A - 5,0 \cdot V_B$$

$$\frac{V_A - V_B}{1 \text{ k}\Omega} = \frac{V_B - V_Y}{5 \text{ k}\Omega} \Rightarrow V_Y = -5,0 \cdot V_A + 6,0 \cdot V_B$$

O amplificador de saída é um **Amplificador Substrator** com  $R_A$  e  $R_B$  iguais a  $R_f$  e  $R_s$ , portanto:

$$V_O = \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \cdot (V_Y - V_X) \Rightarrow V_O = (-5,0 \cdot V_A + 6,0 \cdot V_B) - (6,0 \cdot V_A - 5,0 \cdot V_B)$$

$$V_O = (-5,0 \cdot V_A - 6,0 \cdot V_A + 6,0 \cdot V_B + 5,0 \cdot V_B) \Rightarrow V_O = 11,0 \cdot (V_B - V_A)$$

- b) Para  $V_A = 2,0 \text{ V}$  e  $V_B = 2,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 11,0 \cdot ((2,0) - (2,0)) \Rightarrow V_O = 0,0 \text{ V}$$

- c) Para  $V_A = -5,0 \text{ V}$  e  $V_B = -4,0 \text{ V}$ :

$$V_O = 11,0 \cdot ((-4,0) - (-5,0)) \Rightarrow V_O = 11,0 \text{ V}$$

- d) Para  $V_O = 15,0 \text{ V}$ :

$$V_A = V_B - \frac{V_O}{11,0} \Rightarrow V_A = 2,0 - \frac{(15,0)}{11,0} \Rightarrow V_A = 0,636 \text{ V}$$

$$0,636 \text{ V} \leq V_A \leq 3,363 \text{ V}$$

$$V_A = V_B - \frac{V_O}{11,0} \Rightarrow V_A = 2,0 - \frac{(-15,0)}{11,0} \Rightarrow V_A = 3,363 \text{ V}$$