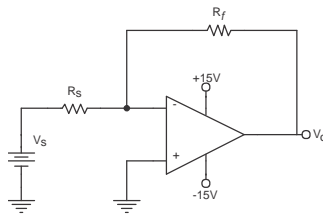


Lista de Exercícios 01 – Amplificadores Operacionais

Professor José Flavio Dums

- 1) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o , considerando $R_f = 10,0 \text{ k}\Omega$ e $R_s = 4,0 \text{ k}\Omega$;
 - O valor de V_o para $V_s = 2\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_s = -5\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_s = 8\text{V}$;
 - Os limites de variação de V_s para que a saída V_o não sature.



Resolução:

- a) Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “-” tem-se:

$$\frac{V_s - 0}{R_s} = \frac{0 - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{R_f \cdot V_s}{R_s} = -V_o \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_s$$

Substituindo os valores de R_f e R_s , tem-se:

$$V_o = -\frac{10 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} \cdot V_s \Rightarrow V_o = -2,5 \cdot V_s$$

- b) Substituindo $V_s = 2\text{V}$:

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

- c) Substituindo $V_s = -5\text{V}$:

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

- d) Substituindo $V_s = 8\text{V}$:

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

- e) Substituindo $V_o = 15\text{V}$:

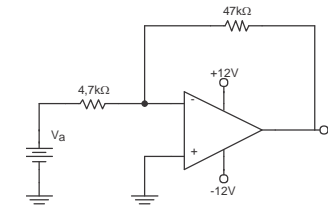
$$V_s = -\frac{V_o}{2,5} \Rightarrow V_s = -\frac{15}{2,5} \Rightarrow V_s = -6,0\text{V} \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -15\text{V}$:

$$V_s = -\frac{V_o}{2,5} \Rightarrow V_s = -\frac{(-15)}{2,5} \Rightarrow V_s = 6,0\text{V} \quad \nearrow$$

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

- 2) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o ;
 - O valor de V_o para $V_a = 2\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_a = -4,5\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_a = 6\text{V}$;
 - Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature.



Resolução:

- a) Utilizando a equação do Amplificador Inversor, tem-se:

$$V_o = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_s \Rightarrow V_o = -\frac{47 \cdot 10^3}{4,7 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_o = -10 \cdot V_a$$

- b) Substituindo $V_a = 2\text{V}$:

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

- c) Substituindo $V_a = -4,5\text{V}$:

$$V_o = -10 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_o = 45\text{V} \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_o = 12\text{V}$$

- d) Substituindo $V_a = 6\text{V}$:

$$V_o = -10 \cdot (6) \Rightarrow V_o = -60,0\text{V} \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_o = -12\text{V}$$

- e) Substituindo $V_o = 12\text{V}$:

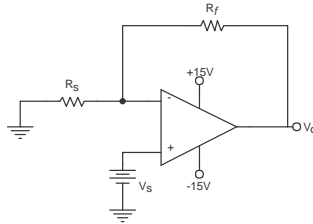
$$V_a = -\frac{V_o}{10} \Rightarrow V_a = -\frac{12}{10} \Rightarrow V_a = -1,2\text{V} \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -12\text{V}$:

$$V_a = -\frac{V_o}{10} \Rightarrow V_a = -\frac{(-12)}{10} \Rightarrow V_a = 1,2\text{V} \quad \nearrow$$

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

- 3) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o , considerando $R_f = 10,0 \text{ k}\Omega$ e $R_s = 5,0 \text{ k}\Omega$;
 - O valor de V_o para $V_s = 2\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_s = -4,5\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_s = 6\text{V}$;
 - Os limites de variação de V_s para que a saída V_o não sature.



Resolução:

- a) Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “-” tem-se:

$$\frac{0 - V_s}{R_s} = \frac{V_s - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{-R_f \cdot V_s}{R_s} = V_s - V_o \Rightarrow V_o = \frac{R_f}{R_s} \cdot V_s + V_s$$

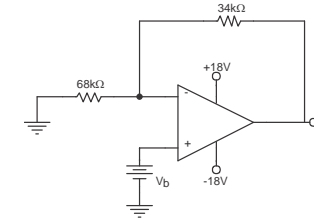
$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \cdot V_s \quad \text{ou} \quad V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s}\right) \cdot V_s$$

Substituindo os valores de R_f e R_s , tem-se:

$$V_o = \frac{10 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} \cdot V_s \Rightarrow V_o = 3,0 \cdot V_s$$

- b) Substituindo $V_s = 2\text{V}$:
 $V_o = 3 \cdot (2) \Rightarrow V_o = 6,0\text{V}$
- c) Substituindo $V_s = -4,5\text{V}$:
 $V_o = 3 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_o = -13,5\text{V}$
- d) Substituindo $V_s = 6\text{V}$:
 $V_o = 3 \cdot (6) \Rightarrow V_o = 18,0\text{V}$ (*Saturação*) $\Rightarrow V_o = 15\text{V}$
- e) Substituindo $V_o = 15\text{V}$:
 $V_s = \frac{V_o}{3,0} \Rightarrow V_s = \frac{15}{3,0} \Rightarrow V_s = 5,0\text{V}$ ↘
 Substituindo $V_o = -15\text{V}$:
 $V_s = \frac{V_o}{3,0} \Rightarrow V_s = \frac{-15}{3,0} \Rightarrow V_s = -5,0\text{V}$ ↗
 $-5,0\text{V} \leq V_s \leq 5,0\text{V}$

- 4) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o ;
 - O valor de V_o para $V_b = 2\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_b = -4,5\text{V}$;
 - O valor de V_o para $V_b = 6\text{V}$;
 - Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature.



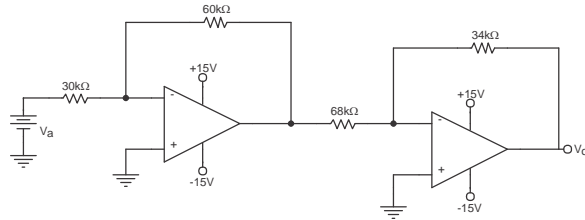
Resolução:

- a) Aplicando a equação do Amplificador Não Inversor:

$$V_o = \frac{34 \cdot 10^3 + 68 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o = 1,5 \cdot V_b$$

- b) Substituindo $V_s = 2\text{V}$:
 $V_o = 1,5 \cdot (2) \Rightarrow V_o = 3,0\text{V}$
- c) Substituindo $V_b = -4,5\text{V}$:
 $V_o = 1,5 \cdot (-4,5) \Rightarrow V_o = -6,75\text{V}$
- d) Substituindo $V_b = 6\text{V}$:
 $V_o = 1,5 \cdot (6) \Rightarrow V_o = 9,0\text{V}$
- e) Substituindo $V_o = 18\text{V}$:
 $V_b = \frac{V_o}{1,5} \Rightarrow V_b = \frac{18}{1,5} \Rightarrow V_b = 12,0\text{V}$ ↘
 Substituindo $V_o = -18\text{V}$:
 $V_b = \frac{V_o}{1,5} \Rightarrow V_b = \frac{-18}{1,5} \Rightarrow V_b = -12,0\text{V}$ ↗
 $-12,0\text{V} \leq V_b \leq 12,0\text{V}$

- 5) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o ;
 - O valor de V_o para $V_a = 8V$;
 - O valor de V_o para $V_a = 16V$;
 - Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature.



Resolução:

- a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se dois Amplificadores Inversores. Equacionando o primeiro, tem-se a saída V_x :

$$V_x = -\frac{60 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = -2 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como a entrada do segundo amplificador:

$$V_o = -\frac{34 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \cdot V_x \Rightarrow V_o = -\frac{V_x}{2}$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = -\frac{(-2 \cdot V_a)}{2} \Rightarrow V_o = V_a$$

- b) Substituindo $V_a = 8V$:

$$V_x = -2 \cdot (8) \Rightarrow V_x = -16,0V \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_x = -15,0V$$

$$V_o = -\frac{V_x}{2} \Rightarrow V_o = -\frac{-15}{2} \Rightarrow V_o = 7,5V$$

- c) Substituindo $V_a = 16V$:

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

$$V_o = -\frac{V_x}{2} \Rightarrow V_o = -\frac{-15}{2} \Rightarrow V_o = 7,5V$$

- d) Para este circuito, V_o nunca satura. Quem satura é V_x . Os limites de V_a para que V_x sature são obtidos por:

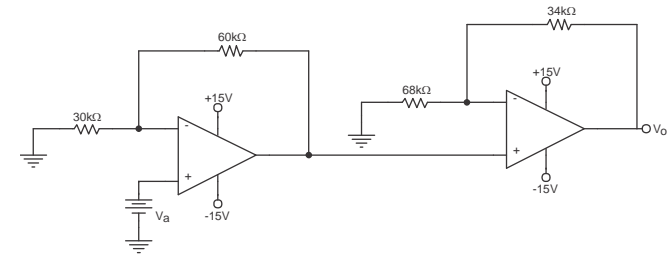
Substituindo $V_x = 15V$:

$$V_a = \frac{V_x}{-2,0} \Rightarrow V_a = \frac{15}{-2,0} \Rightarrow V_a = -7,5V \quad \searrow$$

$$\text{Substituindo } V_x = -15V: \quad -7,5V \leq V_a \leq 7,5V$$

$$V_a = \frac{V_x}{-2,0} \Rightarrow V_a = \frac{(-15)}{-2,0} \Rightarrow V_a = 7,5V \quad \nearrow$$

- 6) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_o ;
 - O valor de V_o para $V_a = 2V$;
 - O valor de V_o para $V_a = -3V$;
 - O valor de V_o para $V_a = 4V$;
 - Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature.



Resolução:

- a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se dois Amplificadores não Inversores. Equacionando o primeiro, tem-se a saída V_x :

$$V_x = \frac{60 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = 3 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como a entrada do segundo amplificador:

$$V_o = \frac{34 \cdot 10^3 + 68 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \cdot V_x \Rightarrow V_o = 1,5 \cdot V_x$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = 1,5 \cdot (3 \cdot V_a) \Rightarrow V_o = 4,5 \cdot V_a$$

- b) Substituindo $V_a = 2V$:

$$V_o = 4,5 \cdot (2) \Rightarrow V_o = 9,0V$$

- c) Substituindo $V_a = -3V$:

$$V_o = 4,5 \cdot (-3) \Rightarrow V_o = 13,5V$$

- d) Substituindo $V_a = 4V$:

$$V_o = 4,5 \cdot (4) \Rightarrow V_o = 18,0V \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_o = 15,0V$$

- e) Substituindo $V_o = 15V$:

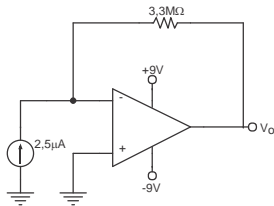
$$V_a = \frac{V_o}{4,5} \Rightarrow V_a = \frac{15}{4,5} \Rightarrow V_a = 3,33V \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -15V$:

$$V_a = \frac{V_o}{4,5} \Rightarrow V_a = \frac{(-15)}{4,5} \Rightarrow V_a = -3,33V \quad \nearrow$$

$$-3,33V \leq V_a \leq 3,33V$$

- 7) Para o circuito a seguir, determine:
a. O valor de V_o ;

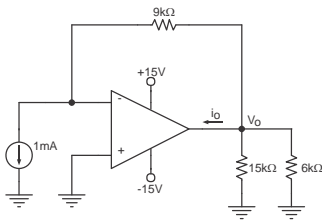


Resolução:

- a) Neste caso, a única forma de resolver o circuito é equacionando o nó de entrada do pino "-". Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes, tem-se:

$$2,5 \cdot 10^{-6} = \frac{0 - V_o}{3,3 \cdot 10^6} \Rightarrow 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,3 \cdot 10^6 = -V_o \Rightarrow V_o = -8,25V$$

- 8) Para o circuito a seguir, determine:
a. O valor de V_o ;
b. O valor de i_o ;



Resolução:

- a) Neste caso, a única forma de resolver o circuito é equacionando o nó de entrada do pino "-". Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes, tem-se:

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

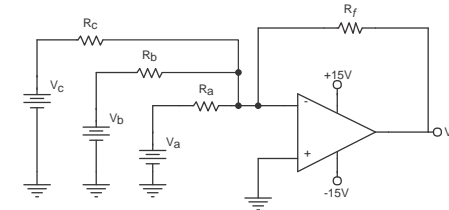
- b) Para encontrar o valor de i_o é preciso equacionar o nó de saída do circuito. Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes, tem-se:

$$\frac{9 - 0}{9 \cdot 10^3} + i_o + \frac{9 - 0}{15 \cdot 10^3} + \frac{9 - 0}{6 \cdot 10^3} = 0,0 \Rightarrow i_o = -\frac{9}{9 \cdot 10^3} - \frac{9}{15 \cdot 10^3} - \frac{9}{6 \cdot 10^3}$$

$$i_o = -1 \cdot 10^{-3} - 0,6 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow i_o = -3,1mA$$

- 9) Para o circuito a seguir, determine:

- a. A equação de V_o , considerando $R_a = 10k\Omega$, $R_b = 15k\Omega$, $R_c = 30k\Omega$ e $R_f = 60k\Omega$;
b. O valor de V_o para $V_a = -4V$, $V_b = 3V$, $V_c = 1V$;
c. Os limites de variação de V_c para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = -4V$ e $V_b = 3V$.



Resolução:

- a) Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino "-" tem-se:

$$\frac{V_a - 0}{R_a} + \frac{V_b - 0}{R_b} + \frac{V_c - 0}{R_c} = \frac{0 - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{R_f \cdot V_a}{R_a} + \frac{R_f \cdot V_b}{R_b} + \frac{R_f \cdot V_c}{R_c} = -V_o$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_a} \cdot V_a - \frac{R_f}{R_b} \cdot V_b - \frac{R_f}{R_c} \cdot V_c$$

Substituindo os valores de R_f , R_s , R_a , R_b e R_c , tem-se:

$$V_o = -\frac{60 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a - \frac{60 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} \cdot V_b - \frac{60 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3} \cdot V_c \Rightarrow V_o = -6 \cdot V_a - 4 \cdot V_b - 2 \cdot V_c$$

- b) Substituindo $V_a = -4V$, $V_b = 3V$, $V_c = 1V$:

$$V_o = -6 \cdot (-4) - 4 \cdot (3) - 2 \cdot (1) \Rightarrow V_o = 10,0V$$

- c) Substituindo $V_o = 15V$, $V_a = -4V$ e $V_b = 3V$:

$$V_c = \frac{V_o + 6 \cdot V_a + 4 \cdot V_b}{-2}$$

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

Substituindo $V_o = -15V$, $V_a = -4V$ e $V_b = 3V$:

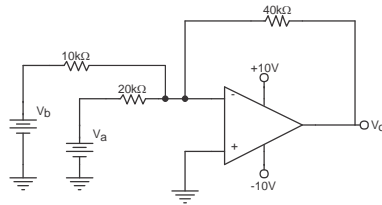
$$V_c = \frac{V_o + 6 \cdot V_a + 4 \cdot V_b}{-2}$$

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

$$\begin{aligned} &\searrow \\ &-13,5V \leq V_c \leq -1,5V \\ &\nearrow \end{aligned}$$

10) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = 4V$ e $V_b = -2V$;
- O valor de V_o para $V_a = -4,5V$ e $V_b = 1V$;
- Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = 5V$.



Resolução:

a) Aplicando a equação do Amplificador Somador Inversor:

$$V_o = -\frac{40 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot V_a - \frac{40 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o = -2 \cdot V_a - 4 \cdot V_b$$

b) Substituindo $V_a = 4V$ e $V_b = -2V$:

$$V_o = -2 \cdot (4) - 4 \cdot (-2) \Rightarrow V_o = 0,0V$$

c) Substituindo $V_a = -4,5V$ e $V_b = 1V$:

$$V_o = -2 \cdot (-4,5) - 4 \cdot (1) \Rightarrow V_o = 5,0V$$

d) Substituindo $V_o = 10V$ e $V_a = 5V$:

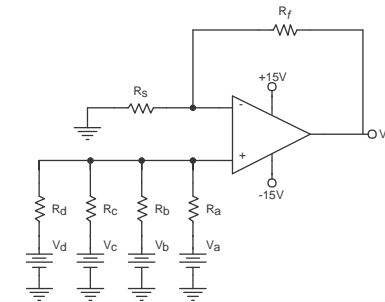
$$V_b = \frac{V_o + 2 \cdot V_a}{-4} \Rightarrow V_b = \frac{10 + 2 \cdot (5)}{-4} \Rightarrow V_b = -5,0V$$

$$\text{Substituindo } V_o = -10V \text{ e } V_a = 5V: \quad -5,0V \leq V_b \leq 0,0V$$

$$V_b = \frac{V_o + 2 \cdot V_a}{-4} \Rightarrow V_b = \frac{(-10) + 2 \cdot (5)}{-4} \Rightarrow V_b = 0,0V$$

11) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o considerando $R_f = 300k\Omega$, $R_s = 20k\Omega$, $R_a = 40k\Omega$, $R_b = 10k\Omega$, $R_c = 20k\Omega$ e $R_d = 40k\Omega$;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$, $V_b = 2V$, $V_c = -3V$ e $V_d = -4V$;
- O valor de V_o para $V_a = -4V$, $V_b = 3V$, $V_c = 5V$ e $V_d = -6V$;
- O valor de V_o para $V_a = -3V$, $V_b = 4V$, $V_c = -2V$ e $V_d = 7V$;
- Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = -4V$, $V_c = 5V$ e $V_d = -6V$.



Resolução:

a) Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “+” tem-se:

$$\frac{V_a - V^+}{R_a} + \frac{V_b - V^+}{R_b} + \frac{V_c - V^+}{R_c} + \frac{V_d - V^+}{R_d} = 0$$

$$\frac{V_a}{R_a} - \frac{V^+}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} - \frac{V^+}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} - \frac{V^+}{R_c} + \frac{V_d}{R_d} - \frac{V^+}{R_d} = 0$$

$$V^+ \cdot \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} \right) = \frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d}$$

$$V^+ = \left(\frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} \right)}$$

Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “-” tem-se:

$$0 - V^+ = \frac{V^+ - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{-R_f \cdot V^+}{R_s} = V^+ - V_o \Rightarrow V_o = \frac{R_f}{R_s} \cdot V^+ + V^+$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s} \right) \cdot V^+ \quad \text{ou} \quad V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s} \right) \cdot V^+$$

Substituindo V^+ na equação anterior tem-se:

$$V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s} \right) \cdot \left(\frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} \right)}$$

Substituindo $R_f = 300k\Omega$, $R_s = 20k\Omega$, $R_a = 40k\Omega$, $R_b = 10k\Omega$, $R_c = 20k\Omega$ e $R_d = 40k\Omega$:

$$V_0 = \left(\frac{300 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \right) \cdot \left(\frac{V_a}{40 \cdot 10^3} + \frac{V_b}{10 \cdot 10^3} + \frac{V_c}{20 \cdot 10^3} + \frac{V_d}{40 \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{40 \cdot 10^3} + \frac{1}{10 \cdot 10^3} + \frac{1}{20 \cdot 10^3} + \frac{1}{40 \cdot 10^3} \right)}$$

$$V_0 = 16 \cdot \left(\frac{V_a}{40 \cdot 10^3} + \frac{V_b}{10 \cdot 10^3} + \frac{V_c}{20 \cdot 10^3} + \frac{V_d}{40 \cdot 10^3} \right) \cdot 5 \cdot 10^3 \Rightarrow V_0 = 2 \cdot V_a + 8 \cdot V_b + 4 \cdot V_c + 2 \cdot V_d$$

b) Substituindo $V_a = 2V$, $V_b = 2V$, $V_c = -3V$ e $V_d = -4V$:

$$V_0 = 2 \cdot (2) + 8 \cdot (2) + 4 \cdot (-3) + 2 \cdot (-4) \Rightarrow V_0 = 0,0V$$

c) Substituindo $V_a = -4V$, $V_b = 3V$, $V_c = 5V$ e $V_d = -6V$:

$$V_0 = 2 \cdot (-4) + 8 \cdot (3) + 4 \cdot (5) + 2 \cdot (-6) \Rightarrow V_0 = 24,0V \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

d) Substituindo $V_a = -3V$, $V_b = 4V$, $V_c = -2V$ e $V_d = 7V$:

$$V_0 = 2 \cdot (-3) + 8 \cdot (4) + 4 \cdot (-2) + 2 \cdot (7) \Rightarrow V_0 = 32,0V \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

e) Substituindo $V_0 = 15V$, $V_a = -4V$, $V_c = 5V$ e $V_d = -6V$:

$$V_b = \frac{V_0 - 2 \cdot V_a - 4 \cdot V_c - 2 \cdot V_d}{8}$$

$$V_b = \frac{15 - 2 \cdot (-4) - 4 \cdot (5) - 2 \cdot (-6)}{8} \Rightarrow V_b = 1,875V$$

Substituindo $V_0 = -15V$, $V_a = -4V$, $V_c = 5V$ e $V_d = -6V$:

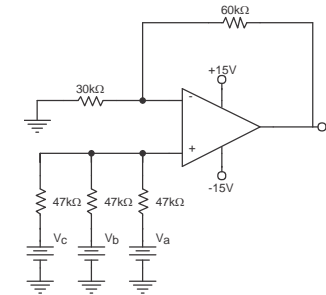
$$V_b = \frac{V_0 - 2 \cdot V_a - 4 \cdot V_c - 2 \cdot V_d}{8}$$

$$V_b = \frac{-15 - 2 \cdot (-4) - 4 \cdot (5) - 2 \cdot (-6)}{8} \Rightarrow V_b = -1,875V$$

$$\begin{matrix} \searrow \\ \nearrow \end{matrix} -1,875V \leq V_c \leq 1,875V$$

12) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_0 ;
- O valor de V_0 para $V_a = 2V$, $V_b = 10V$ e $V_c = -3V$;
- O valor de V_0 para $V_a = 21V$, $V_b = -14V$ e $V_c = 8V$;
- Considerando que as três fontes tenham sempre a mesma tensão, encontre os limites de variação das fontes para que a saída V_0 não sature.



Resolução:

a) Aplicando a equação do Amplificador Somador Não Inversor:

$$V_0 = \left(\frac{60 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3} \right) \cdot \left(\frac{V_a}{47 \cdot 10^3} + \frac{V_b}{47 \cdot 10^3} + \frac{V_c}{47 \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{47 \cdot 10^3} + \frac{1}{47 \cdot 10^3} + \frac{1}{47 \cdot 10^3} \right)}$$

$$V_0 = 3 \cdot \frac{1}{47 \cdot 10^3} (V_a + V_b + V_c) \cdot \frac{47 \cdot 10^3}{3} \Rightarrow V_0 = V_a + V_b + V_c$$

b) Substituindo $V_a = 2V$, $V_b = 10V$ e $V_c = -3V$:

$$V_0 = 2 + 10 + (-3) \Rightarrow V_0 = 9,0V$$

c) Substituindo $V_a = 21V$, $V_b = -14V$ e $V_c = 8V$:

$$V_0 = 21 + (-14) + 8 \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

d) Considerando que as fontes são iguais ($V_a = V_b = V_c = V_x$), a equação de V_0 pode ser re-escrita por:

$$V_0 = V_x + V_x + V_x \Rightarrow V_0 = 3 \cdot V_x$$

Substituindo $V_0 = -15V$:

$$V_x = \frac{V_0}{3} \Rightarrow V_x = \frac{-15}{3} \Rightarrow V_x = -5,0V \quad \searrow$$

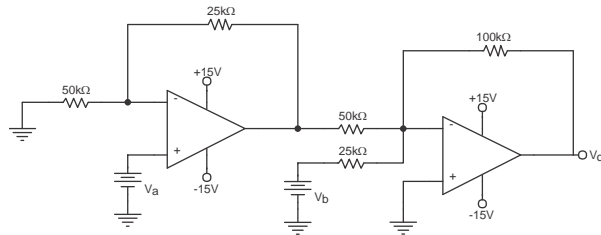
Substituindo $V_0 = 15V$:

$$V_x = \frac{V_0}{3} \Rightarrow V_x = \frac{15}{3} \Rightarrow V_x = 5,0V \quad \nearrow$$

$$-5,0V \leq (V_a = V_b = V_c) \leq 5,0V$$

13) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$ e $V_b = -4V$;
- O valor da corrente no resistor de $25k\Omega$ para $V_a = 2V$ e $V_b = -4V$;
- valor de V_o para $V_a = 3V$ e $V_b = 2V$;
- Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = -3V$.



Resolução:

a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se um Amplificador Não Inversor e um Amplificador Somador Inversor.

Equacionando o primeiro circuito, tem-se a saída V_x :

$$V_x = \frac{25 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = 1,5 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_o = -\frac{100 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \cdot V_x - \frac{100 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o = -2 \cdot V_x - 4 \cdot V_b$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = -2 \cdot (1,5 \cdot V_a) - 4 \cdot V_b \Rightarrow V_o = -3 \cdot V_a - 4 \cdot V_b$$

b) Substituindo $V_a = 2V$ e $V_b = -4V$:

$$V_o = -3 \cdot (2) - 4 \cdot (-4) \Rightarrow V_o = 10,0V$$

c) Utilizando o valor da fonte $V_b = -4V$, pode-se calcular a corrente no resistor por:

$$i_{25} = \frac{V_b - 0}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{25} = \frac{-4}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{25} = -160\mu A$$

d) Substituindo $V_a = 3V$ e $V_b = 2V$:

$$V_o = -3 \cdot (3) - 4 \cdot (2) \Rightarrow V_o = -17,0V \text{ (Saturação)} \Rightarrow V_o = 15,0V$$

e) Substituindo $V_o = -15V$ e $V_a = -3V$:

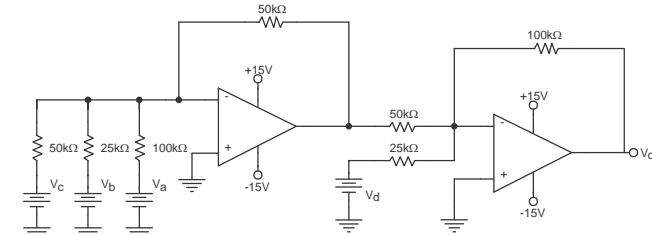
$$V_b = \frac{V_o + 3 \cdot V_a}{-4} \Rightarrow V_b = \frac{15 + 3 \cdot (-3)}{-4} \Rightarrow V_b = -1,5V \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -15V$ e $V_a = -3V$: $-1,5V \leq V_b \leq 6,0V$

$$V_b = \frac{V_o + 3 \cdot V_a}{-4} \Rightarrow V_b = \frac{-15 + 3 \cdot (-3)}{-4} \Rightarrow V_b = 6,0V \quad \nearrow$$

14) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = -4V$, $V_b = 1V$, $V_c = 5V$ e $V_d = 4V$;
- O valor da corrente no resistor de $25k\Omega$ para $V_a = -4V$, $V_b = 1V$, $V_c = 5V$ e $V_d = 4V$;
- Os limites de variação de V_d para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = -4V$, $V_b = 1V$ e $V_c = 5V$.



Resolução:

a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se dois Amplificadores Somadores Inversores.

Equacionando o primeiro circuito, tem-se a saída V_x :

$$V_x = -\frac{100 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} \cdot V_a - \frac{100 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} \cdot V_b - \frac{100 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \cdot V_c \Rightarrow V_x = -V_a - 4 \cdot V_b - 2 \cdot V_c$$

Utilizando V_x como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_o = -\frac{100 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \cdot V_x - \frac{100 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} \cdot V_d \Rightarrow V_o = -2 \cdot V_x - 4 \cdot V_d$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = -2 \cdot (-V_a - 4 \cdot V_b - 2 \cdot V_c) - 4 \cdot V_d \Rightarrow V_o = 2 \cdot V_a + 8 \cdot V_b + 4 \cdot V_c - 4 \cdot V_d$$

b) Substituindo $V_a = -4V$, $V_b = 1V$, $V_c = 5V$ e $V_d = 4V$:

$$V_o = 2 \cdot (-4) + 8 \cdot (1) + 4 \cdot (5) - 4 \cdot (4) \Rightarrow V_o = 4,0V$$

c) Utilizando o valor da fonte $V_d = 4V$, pode-se calcular a corrente no resistor por:

$$i_{25} = \frac{V_d - 0}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{25} = \frac{4}{25 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{25} = 160\mu A$$

d) Substituindo $V_o = -15V$ e $V_a = -4V$, $V_b = 1V$ e $V_c = 5V$:

$$V_d = \frac{V_o - 2 \cdot V_a - 8 \cdot V_b - 4 \cdot V_c}{-4}$$

$$V_d = \frac{15 - 2 \cdot (-4) - 8 \cdot (1) - 4 \cdot (5)}{-4} \Rightarrow V_d = 1,25V$$

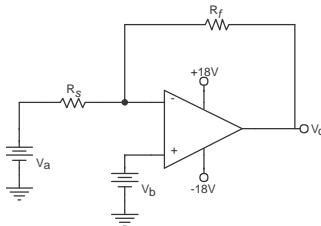
Substituindo $V_o = -15V$ e $V_a = -4V$, $V_b = 1V$ e $V_c = 5V$:

$$V_d = \frac{V_o - 2 \cdot V_a - 8 \cdot V_b - 4 \cdot V_c}{-4} \quad \searrow \quad 1,25V \leq V_d \leq 8,75V$$

$$V_d = \frac{-15 - 2 \cdot (-4) - 8 \cdot (1) - 4 \cdot (5)}{-4} \Rightarrow V_d = 8,75V \quad \nearrow$$

15) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o considerando $R_f = 10k\Omega$ e $R_s = 10k\Omega$;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$ e $V_b = 5V$;
- O valor de V_o para $V_a = -5V$ e $V_b = 6V$;
- O valor de V_o para $V_a = 6V$ e $V_b = -7V$;
- Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature, considerando $V_b = 5V$.



Resolução:

a) Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “-” tem-se:

$$\frac{V_a - V_b}{R_s} = \frac{V_b - V_o}{R_f} \Rightarrow R_f \cdot \frac{V_a - V_b}{R_s} = V_b - V_o \Rightarrow R_f \cdot \frac{V_a - V_b}{R_s} - V_b = -V_o$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_a + \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \cdot V_b \quad \text{ou} \quad V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s}\right) \cdot V_b - \frac{R_f}{R_s} \cdot V_a$$

Substituindo os valores de R_f e R_s tem-se:

$$V_o = \left(\frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) \cdot V_b - \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_o = 2 \cdot V_b - V_a$$

b) Substituindo $V_a = 2V$ e $V_b = 5V$:

$$V_o = 2 \cdot (5) - (2) \Rightarrow V_o = 8,0V$$

c) Substituindo $V_a = -5V$ e $V_b = 6V$:

$$V_o = 2 \cdot (-5) - (-6) \Rightarrow V_o = -16,0V$$

d) Substituindo para $V_a = 6V$ e $V_b = -7V$:

$$V_o = 2 \cdot (-7) - (6) \Rightarrow V_o = 5,0V$$

e) Substituindo $V_o = 18V$ e $V_b = 5V$:

$$V_a = -V_o + 2 \cdot V_b \Rightarrow V_a = -18 + 2 \cdot (5) \Rightarrow V_a = -8,0V \quad \searrow$$

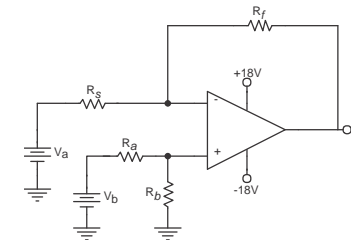
Substituindo $V_o = -18V$ e $V_b = 5V$:

$$V_a = -V_o + 2 \cdot V_b \Rightarrow V_a = -(-18) + 2 \cdot (5) \Rightarrow V_a = 28,0V \quad \nearrow$$

$$-8,0V \leq V_a \leq 28,0V$$

16) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o considerando $R_f = 10k\Omega$ e $R_s = 10k\Omega$, $R_a = 60k\Omega$ e $R_b = 30k\Omega$;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$ e $V_b = 4,5V$;
- O valor de V_o para $V_a = -5V$ e $V_b = 6V$;
- Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = 2V$.



Resolução:

a) Aplicando o divisor de tensão no pino “+” tem-se:

$$V^+ = \frac{R_b}{R_a + R_b} \cdot V_b$$

Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes no nó do pino “-” tem-se:

$$\frac{V_a - V^+}{R_s} = \frac{V^+ - V_o}{R_f} \Rightarrow R_f \cdot \frac{V_a - V^+}{R_s} = V^+ - V_o \Rightarrow R_f \cdot \frac{V_a - V^+}{R_s} - V^+ = -V_o$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_a + \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \cdot V^+ \quad \text{ou} \quad V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s}\right) \cdot V^+ - \frac{R_f}{R_s} \cdot V_a$$

Substituindo V^+ na equação acima tem-se:

$$V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s}\right) \cdot \left(\frac{R_b}{R_a + R_b}\right) \cdot V_b - \frac{R_f}{R_s} \cdot V_a$$

Substituindo os valores de R_f , R_s , R_a e R_b tem-se:

$$V_o = \left(\frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) \cdot \left(\frac{30 \cdot 10^3}{60 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3}\right) V_b - \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_o = \frac{2}{3} \cdot V_b - V_a$$

b) Substituindo $V_a = 2V$ e $V_b = 4,5V$:

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

c) Substituindo $V_a = -5V$ e $V_b = 6V$:

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

d) Substituindo $V_o = 18V$ e $V_a = 2V$:

$$V_b = \frac{3 \cdot (V_o + V_a)}{2} \Rightarrow V_b = \frac{3 \cdot (18 + 2)}{2} \Rightarrow V_b = 30,0V \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -18V$ e $V_a = 2V$:

$$V_b = \frac{3 \cdot (V_o + V_a)}{2} \Rightarrow V_b = \frac{3 \cdot ((-18) + 2)}{2} \Rightarrow V_b = -24,0V \quad \nearrow$$

$$-24,0V \leq V_b \leq 30,0V$$

17) Para o circuito anterior, determine:

- A equação de V_o considerando $R_f = 30k\Omega$ e $R_s = 10k\Omega$, $R_a = 10k\Omega$ e $R_b = 30k\Omega$;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$ e $V_b = 7V$;
- O valor de V_o para $V_a = -1V$ e $V_b = 4V$;
- Os limites de variação de V_b para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = -2V$.

Resolução:

a) Utilizando a equação encontrada no exercício anterior:

$$V_o = \left(\frac{R_f + R_s}{R_s} \right) \cdot \left(\frac{R_b}{R_a + R_b} \right) \cdot V_b - \frac{R_f}{R_s} \cdot V_a$$

Substituindo os valores de R_f , R_s , R_a e R_b tem-se:

$$V_o = \left(\frac{30 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right) \cdot \left(\frac{30 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3} \right) V_b - \frac{30 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a$$

$$V_o = 3 \cdot V_b - 3 \cdot V_a \Rightarrow V_o = 3 \cdot (V_b - V_a)$$

b) Substituindo $V_a = 2V$ e $V_b = 7V$:

$$V_o = 3 \cdot (7 - 2) \Rightarrow V_o = 15,0V$$

c) Substituindo $V_a = -1V$ e $V_b = 4V$:

$$V_o = 3 \cdot (4 - (-1)) \Rightarrow V_o = 15,0V$$

d) Substituindo $V_o = 18V$ e $V_a = -2V$:

$$V_b = \frac{V_o}{3} + V_a \Rightarrow V_b = \frac{18}{3} + (-2) \Rightarrow V_b = 4,0V \quad \searrow$$

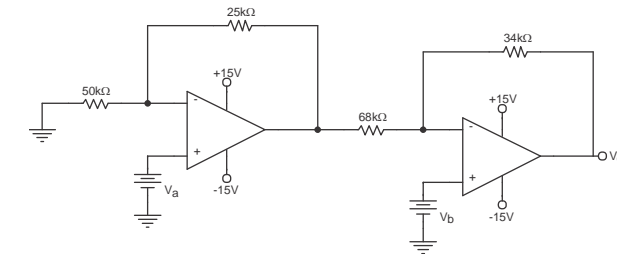
Substituindo $V_o = -18V$ e $V_a = -2V$:

$$-8,0V \leq V_b \leq 4,0V$$

$$V_b = \frac{V_o}{3} + V_a \Rightarrow V_b = \frac{-18}{3} + (-2) \Rightarrow V_b = -8,0V \quad \nearrow$$

18) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = 4V$ e $V_b = 2V$;
- O valor de V_o para $V_a = -8V$ e $V_b = 6V$;
- O valor de V_o para $V_a = 6V$ e $V_b = 8V$;
- Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature, considerando $V_b = 4V$.



Resolução:

a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se um Amplificador Não Inversor e um Subtrator. Equacionando o primeiro circuito, tem-se a saída V_x :

$$V_x = \frac{25 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = 1,5 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_o = -\frac{34 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \cdot V_x + \frac{34 \cdot 10^3 + 68 \cdot 10^3}{68 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o = -\frac{V_x}{2} + 1,5 \cdot V_b$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = -\frac{1,5 \cdot V_a}{2} + 1,5 \cdot V_b \Rightarrow V_o = -0,75 \cdot V_a + 1,5 \cdot V_b$$

b) Substituindo $V_a = 4V$ e $V_b = 2V$:

$$V_o = -0,75 \cdot (4) + 1,5 \cdot (2) \Rightarrow V_o = 0,0V$$

c) Substituindo $V_a = -8V$ e $V_b = 6V$:

$$V_o = -0,75 \cdot (-8) + 1,5 \cdot (6) \Rightarrow V_o = 15,0V$$

d) Substituindo $V_a = 6V$ e $V_b = 8V$:

$$V_o = -0,75 \cdot (6) + 1,5 \cdot (8) \Rightarrow V_o = 7,5V$$

e) Substituindo $V_o = 15V$ e $V_b = 4V$:

$$V_a = \frac{V_o - 1,5 \cdot V_b}{-0,75} \Rightarrow V_a = \frac{15 - 1,5 \cdot (4)}{-0,75} \Rightarrow V_a = -12,0V$$

O problema é que $V_a = -12V$ leva o primeiro amplificador a saturação. Portanto é necessário recalcular a saturação por meio da equação de V_x .

$$V_a = \frac{V_x}{1,5} \Rightarrow V_a = \frac{15}{1,5} \Rightarrow V_a = 10,0V$$

Substituindo $V_o = -15V$ e $V_b = 4V$:

$$V_a = \frac{V_o - 1,5 \cdot V_b}{-0,75} \Rightarrow V_a = \frac{-15 - 1,5 \cdot (4)}{-0,75} \Rightarrow V_a = 28,0V$$

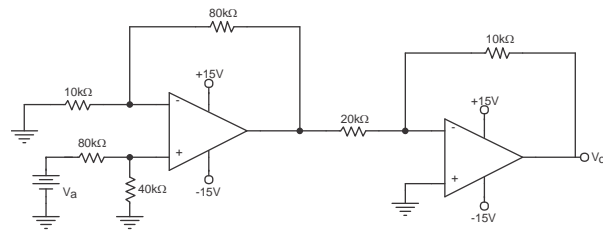
O problema é que $V_a = 28V$ leva o primeiro amplificador a saturação. Portanto é necessário recalcular a saturação por meio da equação de V_x .

$$V_a = \frac{V_x}{1,5} \Rightarrow V_a = \frac{-15}{1,5} \Rightarrow V_a = -10,0V$$

Sendo assim, a resposta da Saturação é: $-10,0V \leq V_a \leq 10,0V$

19) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = -6V$;
- O valor de V_o para $V_a = 12V$;
- Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature.



Resolução:

a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se um Amplificador Não Inversor com um divisor de tensão na entrada e um Amplificador Inversor.

Equacionando o pino “+” do primeiro circuito, tem-se a saída V^+ :

$$V^+ = \frac{40 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 + 80 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V^+ = \frac{V_a}{3}$$

Utilizando V^+ como uma fonte de entrada do primeiro amplificador:

$$V_x = \frac{80 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V^+ \Rightarrow V_x = 9 \cdot V^+$$

Substituindo V^+ na equação de V_x , tem-se:

$$V_x = 9 \cdot \frac{V_a}{3} \Rightarrow V_x = 3 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como uma fonte de entrada do segundo amplificador:

$$V_o = -\frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} V_x \Rightarrow V_o = -\frac{V_x}{2}$$

Substituindo V_x na equação de V_o , tem-se:

$$V_o = -\frac{3 \cdot V_a}{2} \Rightarrow V_o = -1,5 \cdot V_a$$

b) Substituindo $V_a = -6V$:

$$V_o = -1,5 \cdot (-6) \Rightarrow V_o = 9,0V$$

O problema é que $V_a = -6V$ leva o primeiro amplificador a saturação. Sendo assim é preciso resolver primeiro V_x , para então encontrar V_o . Sendo assim:

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

$$V_o = -\frac{(-15)}{2} \Rightarrow V_o = 7,5V$$

c) Substituindo $V_a = 12V$:

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

O problema da resposta acima é que $V_a = 12V$ leva o primeiro amplificador a saturação. Sendo assim é preciso resolver primeiro V_x , para então encontrar V_o . Sendo assim:

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

$$V_o = -\frac{(15)}{2} \Rightarrow V_o = -7,5V$$

d) Como o problema da saturação acontece no primeiro amplificador, os limites de saturação devem ser calculados pela equação de V_x . Assim, substituindo $V_o = 15V$:

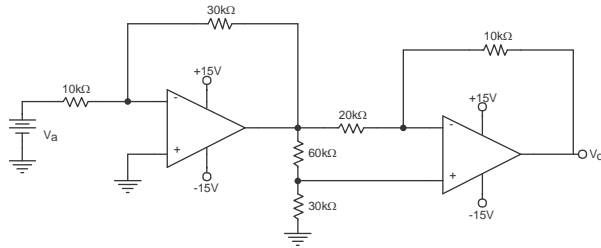
$$V_a = \frac{V_x}{3} \Rightarrow V_a = \frac{15}{3} \Rightarrow V_a = 5,0V \quad \searrow$$

Substituindo $V_o = -15V$: $-5,0V \leq V_a \leq 5,0V$

$$V_a = \frac{V_x}{3} \Rightarrow V_a = \frac{-15}{3} \Rightarrow V_a = -5,0V \quad \nearrow$$

20) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o ;
- O valor de V_o para $V_a = 2V$;
- Os limites de variação de V_a para que a saída V_o não sature.



Resolução:

a) Dividindo o circuito ao meio, tem-se um Amplificador Inversor e um Amplificador Subtrator.

Equacionando o primeiro circuito, tem-se a saída V_x :

$$V_x = -\frac{30 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = -3 \cdot V_a$$

Utilizando V_x como uma fonte para o segundo amplificador, pode-se calcular a tensão do ponto "+" pelo divisor de tensão:

$$V^+ = -\frac{30 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 + 60 \cdot 10^3} \cdot V_x \Rightarrow V^+ = \frac{V_x}{3}$$

Substituindo V_x na equação de V^+ , tem-se:

$$V^+ = \frac{-3 \cdot V_a}{3} \Rightarrow V^+ = -V_a$$

Utilizando V_x como uma fonte de tensão e V^+ como outra fonte de tensão, pode-se equacionar o circuito subtrator como:

$$V_o = -\frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot V_x + \frac{10 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot V^+ \Rightarrow V_o = -\frac{V_x}{2} + 1,5 \cdot V^+$$

Substituindo V_x e V^+ na equação de V_o , tem-se:

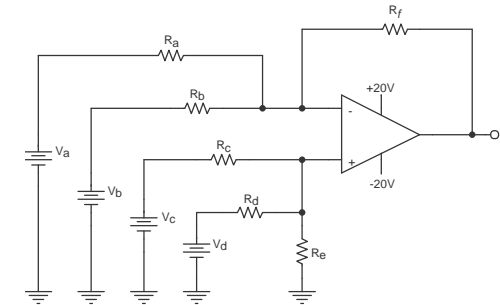
$$V_o = -\frac{(-3 \cdot V_a)}{2} + 1,5 \cdot (-V_a) \Rightarrow V_o = 1,5 \cdot V_a - 1,5 \cdot V_a \Rightarrow V_o = 0,0V$$

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.

21) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_o considerando $R_f = 66k\Omega$, $R_a = 10k\Omega$, $R_b = 15k\Omega$, $R_c = 20k\Omega$, $R_d = 30k\Omega$ e $R_e = 60k\Omega$;
- O valor de V_o para $V_a = 1V$, $V_b = 1V$, $V_c = 1V$ e $V_d = 1V$;
- O valor de V_o para $V_a = -2V$, $V_b = 3V$, $V_c = 3V$ e $V_d = 1V$;
- Os limites de variação de V_d para que a saída V_o não sature, considerando $V_a = 1V$, $V_b = 1V$ e $V_c = 1V$.



Resolução:

a) Este circuito é uma composição de um Somador Inversor com um Somador Não Inversor. Pode ser resolvido por suposição destes dois circuitos.

Matando as fontes V_c e V_d , o circuito se transforma em um Somador Inversor, onde as resistências R_c , R_d e R_e ficam em paralelo. Assim a saída pode ser equacionada por:

$$V_o' = -\frac{R_f}{R_a} \cdot V_a - \frac{R_f}{R_b} \cdot V_b \Rightarrow V_o' = -\frac{66 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a - \frac{66 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o' = -6,6 \cdot V_a - 4,4 \cdot V_b$$

Matando agora as fontes V_a e V_b , os resistores R_a e R_b ficam em paralelo, e seu valor equivalente passa a ser $R_x = 6k\Omega$. Com isso a saída pode ser equacionada por:

$$V_o'' = \frac{R_f + R_x}{R_x} \cdot \left(\frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_e} \right)}$$

$$V_o'' = \frac{66 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{V_c}{20 \cdot 10^3} + \frac{V_d}{30 \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{20 \cdot 10^3} + \frac{1}{30 \cdot 10^3} + \frac{1}{60 \cdot 10^3} \right)}$$

$$V_o'' = 12 \cdot \left(\frac{V_c}{20 \cdot 10^3} + \frac{V_d}{30 \cdot 10^3} \right) \cdot 10 \cdot 10^3 \Rightarrow V_o'' = 6,0 \cdot V_c + 4,0 \cdot V_d$$

Juntando as respostas V_o' e V_o'' , tem-se a equação de saída final:

$$V_o = -6,6 \cdot V_a - 4,4 \cdot V_b + 6,0 \cdot V_c + 4,0 \cdot V_d$$

b) Substituindo $V_a = 1V$, $V_b = 1V$, $V_c = 1V$ e $V_d = 1V$:

$$V_o = -6,6 \cdot (1) - 4,4 \cdot (1) + 6,0 \cdot (1) + 4,0 \cdot (1) \Rightarrow V_o = -1,0V$$

c) Substituindo $V_a = -2V$, $V_b = 3V$, $V_c = 3V$ e $V_d = 1V$:

$$V_0 = -6,6 \cdot (-2) - 4,4 \cdot (3) + 6,0 \cdot (3) + 4,0 \cdot (1)$$

$$V_0 = 22,0V \Rightarrow (\text{Saturação}) \Rightarrow V_0 = 20,0V$$

d) Substituindo $V_0 = 20V$, $V_a = 1V$, $V_b = 1V$ e $V_c = 1V$:

$$V_d = \frac{V_0 + 6,6 \cdot V_a + 4,4 \cdot V_b - 6,0 \cdot V_c}{4} \Rightarrow V_d = \frac{20 + 6,6 \cdot (1) + 4,4 \cdot (1) - 6,0 \cdot (1)}{4}$$

$$V_d = 6,25V$$

Substituindo $V_0 = -15V$:

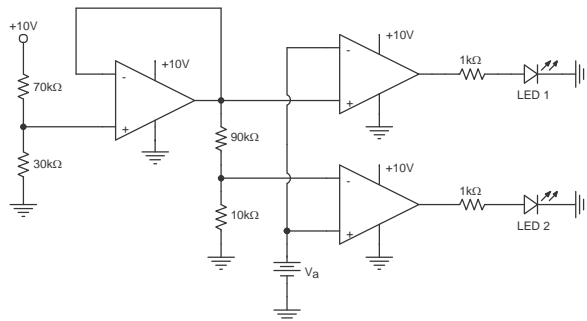
$$V_d = \frac{V_0 + 6,6 \cdot V_a + 4,4 \cdot V_b - 6,0 \cdot V_c}{4} \Rightarrow V_d = \frac{-20 + 6,6 \cdot (1) + 4,4 \cdot (1) - 6,0 \cdot (1)}{4}$$

$$V_d = -3,75V$$

Desta forma os limites de variação de V_d são dados por: $-3,75V \leq V_d \leq 6,25V$

22) Para o circuito a seguir, determine:

- A faixa de valores de V_a que faz com que o LED 1 fique apagado;
- A faixa de valores de V_a que faz com que o LED 2 fique ligado;



Resolução:

- a) O primeiro paço para encontra a resposta é determinar a tensão de saída do primeiro amplificador. Por este ser um Buffer, a tensão de saída é a mesma da entrada, que por sua vez pode ser obtida pela resolução do divisor de tensão de entrada:

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

No comparador de cima, onde esta ligado o LED 1, para que este fique apagado, é necessário que a tensão de saída seja zero. Isso é conseguido quando a tensão do pino “-” é maior que a tensão do pino “+”. Ou seja, para o Led se manter apagado, a tensão da fonte V_a tem que ser maior que V_x . Assim, a faixa de valores pode ser escrita por:

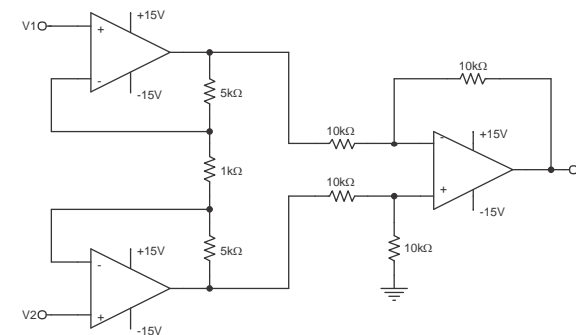
$$V_a \geq 3,0V$$

- b) Da mesma forma que no caso anterior, para que o LED 2, que esta conectado no comparador de baixo, fique ligado é preciso que a tensão do pino “+” seja maior que a do pino “-”. Isso é obtido quando V_a é maior que V_x . Desta forma a faixa de valores de V_a é obtida por:

$$V_a \geq 3,0V$$

23) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_0 ;
- O valor de V_0 para $V_1 = 2V$ e $V_2 = 2V$;
- O valor de V_0 para $V_1 = -5V$ e $V_2 = -4V$;



Resolução:

- a) Para resolver este circuito é necessário utilizar as propriedades do AMPOP, de forma a obter as tensões nos terminais do resistor de $1k\Omega$. Com estas tensões, determina-se a corrente no resistor de $1k\Omega$, de cima para baixo, por:

$$i_{1k\Omega} = \frac{V_1 - V_2}{1 \cdot 10^3}$$

Utilizando esta corrente, é possível obter a tensão na saída do ampop de cima, chamada de V_x . Da mesma forma, é possível obter a tensão na saída do ampop de baixo, chamada de V_y :

$$V_x - V_1 = 5 \cdot 10^3 \cdot i_{1k\Omega} \Rightarrow V_x = V_1 + 5 \cdot 10^3 \cdot \frac{V_1 - V_2}{1 \cdot 10^3} \Rightarrow V_x = 6 \cdot V_1 - 5 \cdot V_2$$

$$V_2 - V_y = 5 \cdot 10^3 \cdot i_{1k\Omega} \Rightarrow -V_y = -V_2 + 5 \cdot 10^3 \cdot \frac{V_1 - V_2}{1 \cdot 10^3} \Rightarrow V_y = -5 \cdot V_1 + 6 \cdot V_2$$

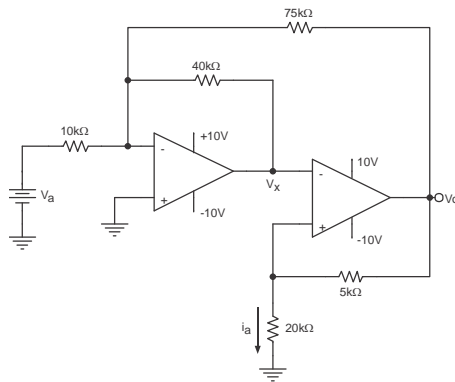
Utilizando V_x e V_y como fontes para o terceiro amplificador, pode-se calcular a tensão de saída como sendo um subtrator com resistências iguais, e cuja equação é dada por:

$$V_0 = \frac{R_F}{R_S} \cdot (V_y - V_x) \Rightarrow V_0 = \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot ((-5 \cdot V_1 + 6 \cdot V_2) - (6 \cdot V_1 - 5 \cdot V_2))$$

$$V_0 = 1 \cdot (-5 \cdot V_1 + 6 \cdot V_2 - 6 \cdot V_1 + 5 \cdot V_2) \Rightarrow V_0 = 11 \cdot (V_2 - V_1)$$

- b) Substituindo $V_1 = 2V$ e $V_2 = 2V$:
 $V_0 = 11 \cdot ((2) - (2)) \Rightarrow V_0 = 0,0V$
- c) Substituindo $V_1 = -5V$ e $V_2 = -4V$:
 $V_0 = 11 \cdot ((-5) - (-4)) \Rightarrow V_0 = -11,0V$

- 24) Para o circuito a seguir, determine:
- A equação de V_0 ;
 - O valor de V_0 , V_x e i_a para $V_a = 1,2V$;



Resolução:

- a) Para resolver este circuito é necessário utilizar as propriedades do AMPOP e equacionar o circuito por nós, porque apesar de parecer um amplificador inversor o circuito da esquerda, ele não é. Então só resta resolver por nós:

$$\frac{V_a - 0}{10 \cdot 10^3} = \frac{0 - V_x}{40 \cdot 10^3} + \frac{0 - V_0}{75 \cdot 10^3} \Rightarrow \frac{V_a}{10 \cdot 10^3} + \frac{V_x}{40 \cdot 10^3} + \frac{V_0}{75 \cdot 10^3} = 0$$

$$V_0 = \left(-\frac{V_a}{10 \cdot 10^3} - \frac{V_x}{40 \cdot 10^3} \right) \cdot 75 \cdot 10^3 \Rightarrow V_0 = -7,5 \cdot V_a - 1,875 \cdot V_x$$

Como esta equação possui duas incógnitas, é impossível resolvê-la sozinha. Para resolver, precisa-se encontrar outra equação para V_x , e então substituir na equação acima. Esta nova equação de V_x pode ser encontrada equacionando o nó do pino "+" do segundo amplificador:

$$\frac{V_0 - V_x}{5 \cdot 10^3} = \frac{V_x - 0}{20 \cdot 10^3} \Rightarrow \frac{V_0}{5 \cdot 10^3} - \frac{V_x}{5 \cdot 10^3} - \frac{V_x}{20 \cdot 10^3} = 0$$

$$V_x = \frac{V_0}{5 \cdot 10^3} \cdot 4 \cdot 10^3 \Rightarrow V_x = 0,8 \cdot V_0$$

Substituindo V_x na equação de V_0 acima, e isolando novamente o V_0 , tem-se:

$$V_0 = -7,5 \cdot V_a - 1,875 \cdot (0,8 \cdot V_0) \Rightarrow V_0 = -7,5 \cdot V_a - 1,5 \cdot V_0$$

$$V_0 + 1,5 \cdot V_0 = -7,5 \cdot V_a \Rightarrow V_0 = \frac{-7,5 \cdot V_a}{2,5} \Rightarrow V_0 = -3 \cdot V_a$$

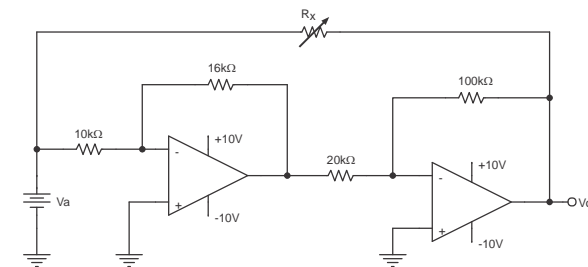
- b) Substituindo $V_a = 1,2V$:
 $V_0 = -3 \cdot (1,2) \Rightarrow V_0 = 3,6V$
- Utilizando a equação de V_x :
 $V_x = 0,8 \cdot (3,6) \Rightarrow V_x = 2,88V$

A partir de V_x é possível calcular i_a :

$$i_a = \frac{V_x - 0}{20 \cdot 10^3} \Rightarrow i_a = \frac{2,88}{20 \cdot 10^3} \Rightarrow i_a = 144 \mu A$$

- 25) Para o circuito a seguir, determine:

- A equação de V_0 ;
- O valor da resistência R_x , para que a corrente na fonte V_a seja nula;



Resolução:

- a) Para resolver este circuito é possível dividir o circuito em dois amplificadores inversores, uma vez que a resistência R_X não interfere nas correntes internas dos circuitos amplificadores. Assim, a saída do primeiro amplificador pode ser calculada:

$$V_x = -\frac{16 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_x = -1,6 \cdot V_a$$

A saída V_0 é então calculada, considerando V_x como a fonte de entrada do circuito:

$$V_0 = -\frac{100 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot V_x \Rightarrow V_0 = -5 \cdot V_x$$

Substituindo V_x na equação acima:

$$V_0 = -5 \cdot (-1,6 \cdot V_a) \Rightarrow V_0 = 8 \cdot V_a$$

- b) Para encontrar o valor do resistor R_x que faz com que a corrente na fonte V_a seja igual a zero, basta equacionar as correntes no nó da fonte V_a :

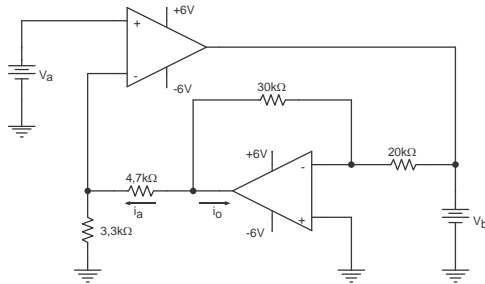
$$\frac{V_a - 0}{10 \cdot 10^3} = \frac{V_0 - V_a}{R_x} \Rightarrow R_x = \frac{(V_0 - V_a) \cdot 10 \cdot 10^3}{V_a}$$

Substituindo V_0 pela equação de V_0 tem-se:

$$R_x = \frac{((8 \cdot V_a) - V_a) \cdot 10 \cdot 10^3}{V_a} \Rightarrow R_x = \frac{(7 \cdot V_a) \cdot 10 \cdot 10^3}{V_a} \Rightarrow R_x = 70 \cdot 10^3$$

- 26) Para o circuito a seguir, considerando $V_a = 1,98V$ determine:

- O valor da corrente i_a ;
- O valor da tensão V_b ;
- O valor da corrente i_o ;



Resolução:

- a) Aplicando a propriedade dos AMPOPs que diz que $V^+ = V^-$, é possível calcular a corrente no resistor de $3,3k\Omega$:

$$i_{3,3k\Omega} = \frac{V_a - 0}{3,3 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{3,3k\Omega} = \frac{1,98}{3,3 \cdot 10^3} \Rightarrow i_{3,3k\Omega} = 600\mu A$$

Com a propriedade que diz que a corrente de entrada do AMPOP é igual a zero, é possível dizer que:

$$i_a = i_{3,3k\Omega} \Rightarrow i_a = 600\mu A$$

- b) Conhecendo a corrente i_a é possível calcular a tensão de saída do amplificador de baixo:

$$V_0 - 1,98 = i_a \cdot 4,7 \cdot 10^3 \Rightarrow V_0 = (600 \cdot 10^{-6} \cdot 4,7 \cdot 10^3) + 1,98$$

$$V_0 = 4,8V$$

O amplificador de baixo é um amplificador inversor, e com essa informação é possível equacionar a tensão V_0 , para obter a tensão V_b :

$$V_0 = -\frac{30 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_0 = -1,5 \cdot V_b \Rightarrow V_b = \frac{V_0}{-1,5}$$

Substituindo o valor de V_0 já conhecido, tem-se V_b :

$$V_b = \frac{4,8}{-1,5} \Rightarrow V_b = -3,2V$$

- c) Equacionando as correntes no ponto de saída do amplificador de baixo, é possível encontrar i_o :

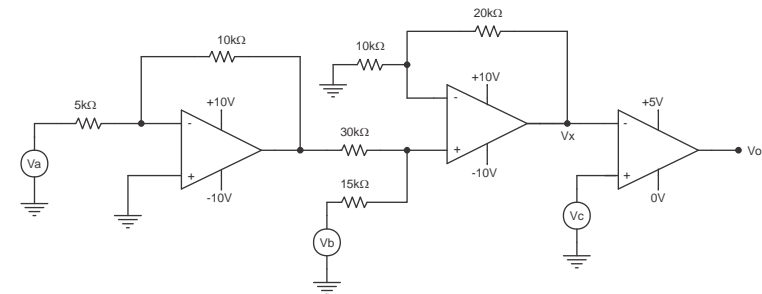
$$\frac{0 - V_0}{30 \cdot 10^3} = i_a + i_o \Rightarrow i_o = -\frac{V_0}{30 \cdot 10^3} - i_a$$

Substituindo os valores de V_0 e i_a já conhecidos:

$$i_o = -\frac{4,8}{30 \cdot 10^3} - 600 \cdot 10^{-6} \Rightarrow i_o = -760\mu A$$

- 27) Para o circuito a seguir, desenhe:

- A forma de onda da tensão V_x . (Desenhe esta forma de onda em escala, sobre a forma de onda da tensão V_C);
- A forma de onda da tensão de saída V_o . Indique as escalas de tensão;



Resolução:

- a) Para desenhar as formas de onda, primeiro é preciso conhecer as equações de V_x e de V_o .

Para encontrar a equação de V_x , resolve-se os dois primeiros circuitos, onde V_y é a tensão do primeiro amplificador:

c

Equacionando V_x , considerando V_y como uma fonte de tensão, tem-se:

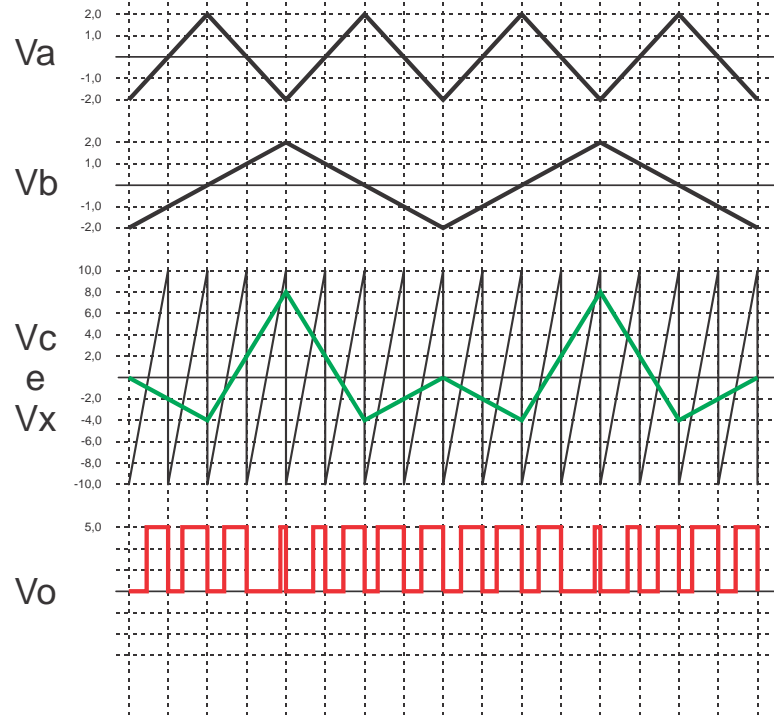
$$V_x = \frac{20 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{V_y}{30 \cdot 10^3} + \frac{V_B}{15 \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{30 \cdot 10^3} + \frac{1}{15 \cdot 10^3} \right)}$$

$$V_x = 3 \cdot \left(\frac{V_y}{30 \cdot 10^3} + \frac{V_B}{15 \cdot 10^3} \right) \cdot 10 \cdot 10^3 \Rightarrow V_x = V_y + 2 \cdot V_B$$

Substituindo a equação de V_y que é conhecida, tem-se:

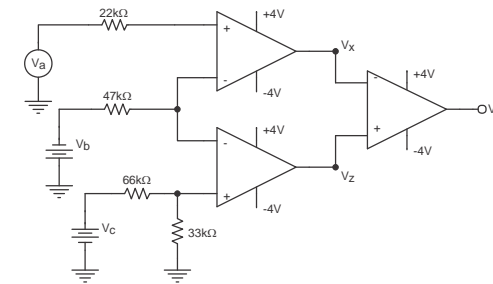
$$V_x = -2 \cdot V_a + 2 \cdot V_B$$

- b) Para desenhar V_o , basta fazer a análise do comparador de saída, entre a tensão V_x encontrada e a tensão V_b dada:



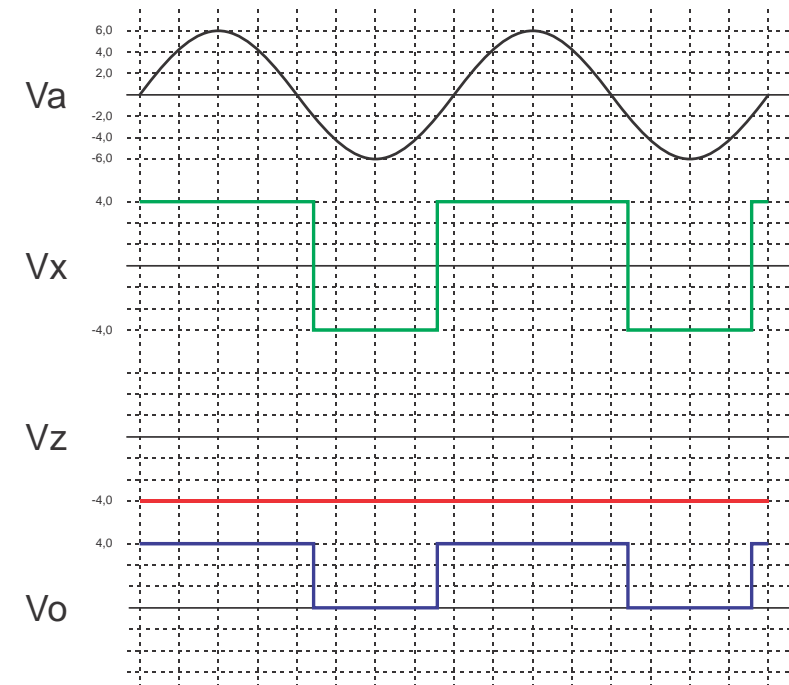
- 28) Para o circuito a seguir, considerando que V_a é a fonte senoidal apresentada abaixo, V_b uma fonte de tensão contínua $V_b = 2V$ e V_c uma fonte de tensão contínua de $V_c = 4V$, desenhe:

- A tensão no ponto V_x ;
- A tensão no ponto V_z ;
- A tensão de saída V_o .



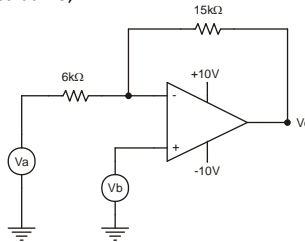
Resolução:

- A tensão V_x é obtida pela comparação do sinal Senoidal com uma tensão contínua de $-V_b$. Se a senoide for maior que $-2V$, satura em $+4V$, senão satura em $-4V$.
- A tensão no ponto V_z é dada pela comparação de $V_c/3$ com $-V_b$. Como $V_c/3$ é sempre maior que $-V_b$, a saída esta sempre saturada em $-4V$.
- A saída V_o é dada pela comparação de V_x com V_z . Quando V_x é maior que V_z , satura em $+4V$. Quando são iguais, a saída é igual a zero.



29) Para o circuito a seguir, desenhe:

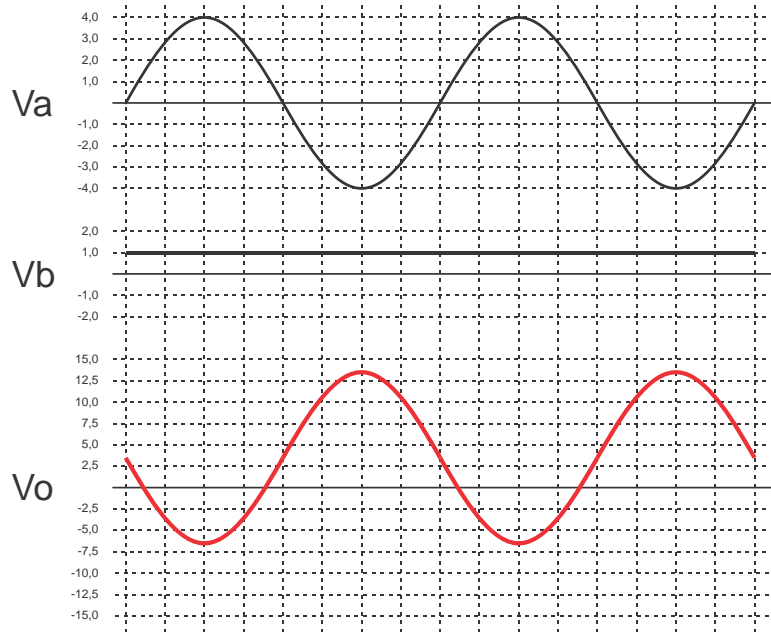
a. A tensão de saída V_o ;



Resolução:

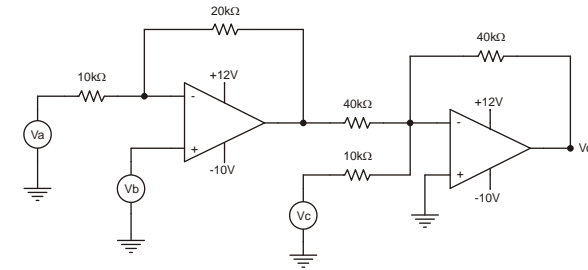
a) Para poder desenhar a tensão de saída é preciso encontrar a equação de V_o . Este circuito é um amplificador subtrator. Então a equação de saída é dada por:

$$V_o = -\frac{15 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} \cdot V_a + \frac{15 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_o = -2,5 \cdot V_a + 3,5 \cdot V_b$$



30) Para o circuito a seguir, desenhe:

a. A tensão de saída V_o .



Resolução:

b) Para poder desenhar a tensão de saída é preciso encontrar a equação de V_o . Este circuito é uma composição de um Amplificador Subtrator e um Somador Inversor. Para equacionar o circuito, pode-se separá-los e assim a saída do primeiro amplificador, chamada de V_x é dada por:

$$V_x = -\frac{20 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a + \frac{20 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_b \Rightarrow V_x = -2,0 \cdot V_a + 3,0 \cdot V_b$$

Utilizando V_x como uma fonte de tensão para o segundo circuito, este pode ser equacionado por:

$$V_o = -\frac{40 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3} \cdot V_x - \frac{40 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_c \Rightarrow V_o = -V_x - 4,0 \cdot V_c$$

Substituindo a equação de V_x na equação de V_o tem-se:

$$V_o = -(-2,0 \cdot V_a + 3,0 \cdot V_b) - 4,0 \cdot V_c \Rightarrow V_o = 2,0 \cdot V_a - 3,0 \cdot V_b - 4,0 \cdot V_c$$

