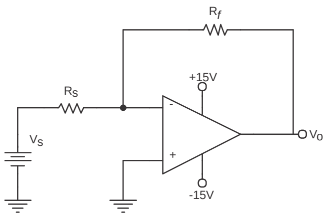
Lista de Exercícios 01 – Amplificadores Operacionais

Professor José Flavio Dums

1) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo, considerando Rf = 10,0 kΩ e Rs = 4,0 kΩ;
   b. O valor de Vo para Vs = 2V;
   c. O valor de Vo para Vs = -5V;
   d. O valor de Vo para Vs = 8V;
   e. Os limites de variação de Vs para que a saída Vo não sature.



Resolução:

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

$$\frac{V_S-0}{R_S}=\frac{0-V_0}{R_F} \Rightarrow \frac{R_F\cdot V_S}{R_S}=-V_0 \Rightarrow V_0=-\frac{R_F}{R_S}\cdot V_S$$

Substituindo os valores de Rf e Rs, tem-se:

$$V_0=-\frac{10\cdot 10^3}{4\cdot 10^3}\cdot V_S \Rightarrow V_0=-2{,}5\cdot V_S$$

b) Substituindo Vs = 2V:

$$V_0=-2{,}5\cdot(2) \Rightarrow V_0=-5{,}0V$$

c) Substituindo Vs = -5V:

$$V_0=-2{,}5\cdot(-5) \Rightarrow V_0=12{,}5V$$

d) Substituindo Vs = 8V:

$$V_0=-2{,}5\cdot(8) \Rightarrow V_0=-20{,}0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0=-15V$$

e) Substituindo Vo = 15V:

$$V_S=-\frac{V_0}{2{,}5} \Rightarrow V_S=-\frac{15}{2{,}5} \Rightarrow V_S=-6{,}0V \quad \searrow$$

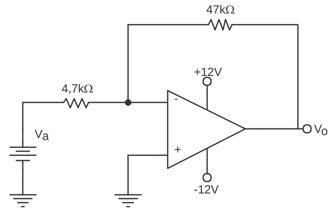
Substituindo Vo = -15V:

$$-6{,}0V \le V_S \le 6{,}0V$$

$$V_S=-\frac{V_0}{2{,}5} \Rightarrow V_S=-\frac{(-15)}{2{,}5} \Rightarrow V_S=6{,}0V \quad \nearrow$$

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

2) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = 2V;
   c. O valor de Vo para Va = -4,5V;
   d. O valor de Vo para Va = 6V;
   e. Os limites de variação de Va para que a saída Vo não sature.



Resolução:

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

$$V_0=-\frac{R_F}{R_S}\cdot V_S \Rightarrow V_0=-\frac{47\cdot 10^3}{4{,}7\cdot 10^3}\cdot V_a \Rightarrow V_0=-10\cdot V_a$$

b) Substituindo Va = 2V:

$$V_0=-10\cdot(2) \Rightarrow V_0=-20{,}0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0=-12V$$

c) Substituindo Va = -4,5V:

$$V_0=-10\cdot(-4{,}5) \Rightarrow V_0=45V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0=12V$$

d) Substituindo Va = 6V:

$$V_0=-10\cdot(6) \Rightarrow V_0=-60{,}0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0=-12V$$

e) Substituindo Vo = 12V:

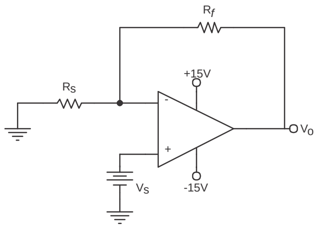
$$V_a=-\frac{V_0}{10} \Rightarrow V_a=-\frac{12}{10} \Rightarrow V_a=-1{,}2V \quad \searrow$$

Substituindo Vo = -12V:

$$-1{,}2V \le V_a \le 1{,}2V$$

$$V_a=-\frac{V_0}{10} \Rightarrow V_a=-\frac{(-12)}{10} \Rightarrow V_a=1{,}2V \quad \nearrow$$

3) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo, considerando Rf = 10,0 kΩ e Rs = 5,0 kΩ;
   b. O valor de Vo para Vs = 2V;
   c. O valor de Vo para Vs = -4,5V;
   d. O valor de Vo para Vs = 6V;
   e. Os limites de variação de Vs para que a saída Vo não sature.



Resolução:

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

$$\frac{0-V_S}{R_S}=\frac{V_S-V_0}{R_F} \Rightarrow \frac{-R_F\cdot V_S}{R_S}=V_S-V_0 \Rightarrow V_0=\frac{R_F}{R_S}\cdot V_S+V_S$$

$$V_0=\left(1+\frac{R_F}{R_S}\right)\cdot V_S \quad ou \quad V_0=\left(\frac{R_F+R_S}{R_S}\right)\cdot V_S$$

Substituindo os valores de Rf e Rs, tem-se:

$$V_0=\frac{10\cdot 10^3+5\cdot 10^3}{5\cdot 10^3}\cdot V_S \Rightarrow V_0=3,0\cdot V_S$$

b) Substituindo Vs = 2V:

$$V_0=3\cdot(2) \Rightarrow V_0=6,0V$$

c) Substituindo Vs = -4,5V:

$$V_0=3\cdot(-4,5) \Rightarrow V_0=-13,5V$$

d) Substituindo Vs = 6V:

$$V_0=3\cdot(6) \Rightarrow V_0=18,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0=15V$$

e) Substituindo Vo = 15V:

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

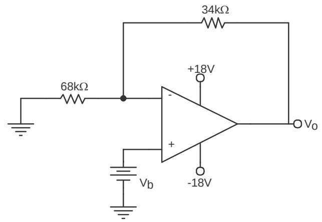
Substituindo Vo = -15V:

$$-5,0V\le V_S\le 5,0V$$

$$V_S=\frac{V_0}{3,0} \Rightarrow V_S=\frac{(-15)}{5,0} \Rightarrow V_S=-5,0V \quad \nearrow$$

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

4) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Vb = 2V;
   c. O valor de Vo para Vb = -4,5V;
   d. O valor de Vo para Vb = 6V;
   e. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature.



Resolução:

a) Aplicando a equação do Amplificador Não Inversor:

$$V_0=\frac{34\cdot 10^3+68\cdot 10^3}{68\cdot 10^3}\cdot V_b \Rightarrow V_0=1,5\cdot V_b$$

b) Substituindo Vs = 2V:

$$V_0=1,5\cdot(2) \Rightarrow V_0=3,0V$$

c) Substituindo Vb = -4,5V:

$$V_0=1,5\cdot(-4,5) \Rightarrow V_0=-6,75V$$

d) Substituindo Vb = 6V:

$$V_0=1,5\cdot(6) \Rightarrow V_0=9,0V$$

e) Substituindo Vo = 18V:

$$V_b=\frac{V_0}{1,5} \Rightarrow V_b=\frac{18}{1,5} \Rightarrow V_b=12,0V \quad \searrow$$

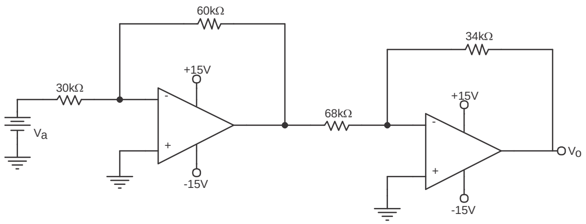
Substituindo Vo = -18V:

$$-12,0V\le V_b\le 12,0V$$

$$V_b=\frac{V_0}{1,5} \Rightarrow V_b=\frac{(-18)}{1,5} \Rightarrow V_b=-12,0V \quad \nearrow$$

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

5) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = 8V;
   c. O valor de Vo para Va = 16V;
   d. Os limites de variação de Va para que a saída Vo 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:

$$V_0 = -\frac{34\cdot 10^3}{68\cdot 10^3}\cdot V_X \Rightarrow V_0 = -\frac{V_X}{2}$$

Substituindo V_X na equação de V_0, tem-se:

$$V_0 = -\frac{(-2\cdot V_a)}{2} \Rightarrow V_0 = V_a$$

b) Substituindo Va = 8V:

$$V_X = -2\cdot(8) \Rightarrow V_X = -16,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_X = -15,0V$$

$$V_0 = -\frac{V_X}{2} \Rightarrow V_0 = -\frac{-15}{2} \Rightarrow V_0 = 7,5V$$

c) Substituindo Va = 16V:

$$V_X = -2\cdot(16) \Rightarrow V_X = -32,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_X = -15,0V$$

$$V_0 = -\frac{V_X}{2} \Rightarrow V_0 = -\frac{-15}{2} \Rightarrow V_0 = 7,5V$$

d) Para este circuito, Vo nunca satura. Quem satura é V_X. Os limites de Va para que V_X sature são obtidos por:
Substituindo V_X = 15V:

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

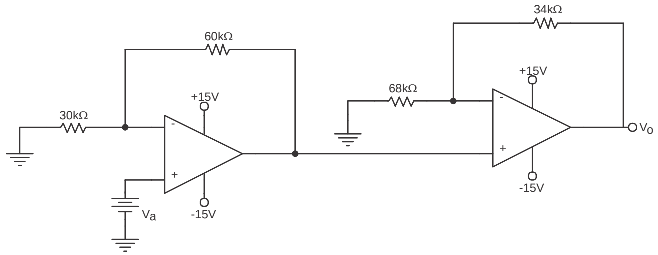
Substituindo V_X = -15V:

$$-7,5V \le V_a \le 7,5V$$

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

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

6) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = 2V;
   c. O valor de Vo para Va = -3V;
   d. O valor de Vo para Va = 4V;
   e. Os limites de variação de Va para que a saída Vo 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:

$$V_0 = \frac{34\cdot 10^3 + 68\cdot 10^3}{68\cdot 10^3}\cdot V_X \Rightarrow V_0 = 1,5\cdot V_X$$

Substituindo V_X na equação de V_0, tem-se:

$$V_0 = 1,5\cdot(3\cdot V_a) \Rightarrow V_0 = 4,5\cdot V_a$$

b) Substituindo Va = 2V:

$$V_0 = 4,5\cdot(2) \Rightarrow V_0 = 9,0V$$

c) Substituindo Va = -3V:

$$V_0 = 4,5\cdot(-3) \Rightarrow V_0 = 13,5V$$

d) Substituindo Va = 4V:

$$V_0 = 4,5\cdot(4) \Rightarrow V_0 = 18,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

e) Substituindo Vo = 15V:

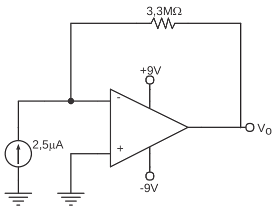
$$V_a = \frac{V_0}{4,5} \Rightarrow V_a = \frac{15}{4,5} \Rightarrow V_a = 3,33V \quad \searrow$$

Substituindo Vo = -15V:

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

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

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

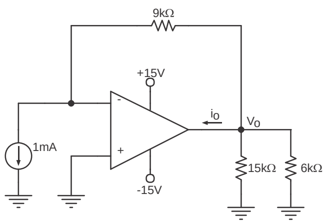


Resolução:

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:

$$2,5\cdot 10^{-6} = \frac{0-V_0}{3,3\cdot 10^{6}} \quad \Rightarrow \quad 2,5\cdot 10^{-6}\cdot 3,3\cdot 10^{6} = -V_0 \quad \Rightarrow \quad V_0 = -8,25V$$

8) Para o circuito a segur, determine:
   a. O valor de Vo;
   b. O valor de io;



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:

$$\frac{V_0-0}{9\cdot 10^{3}} = 1,0\cdot 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad V_0 = 1,0\cdot 10^{-3}\cdot 9\cdot 10^{3} \quad \Rightarrow \quad V_0 = 9,0V$$

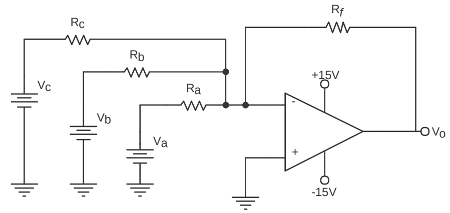
b) Para encontrar o valor de io é preciso equacionar o nó de saída do circuito. Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes, tem-se:

$$\frac{9-0}{9\cdot 10^{3}} + i_0 + \frac{9-0}{15\cdot 10^{3}} + \frac{9-0}{6\cdot 10^{3}} = 0,0 \quad \Rightarrow \quad i_0 = -\frac{9}{9\cdot 10^{3}} - \frac{9}{15\cdot 10^{3}} - \frac{9}{6\cdot 10^{3}}$$

$$i_0 = -1\cdot 10^{-3} - 0,6\cdot 10^{-3} - 1,5\cdot 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad i_0 = -3,1mA$$

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

9) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo, considerando Ra = 10kΩ, Rb = 15kΩ, Rc = 30kΩ e Rf = 60kΩ;
   b. O valor de Vo para Va = -4V, Vb = 3V, Vc = 1V;
   c. Os limites de variação de Vc para que a saída Vo não sature, considerando Va = -4V e Vb = 3V.



Resolução:

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

$$\frac{V_a-0}{R_a} + \frac{V_b-0}{R_b} + \frac{V_c-0}{R_c} = \frac{0-V_0}{R_F} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_F\cdot V_a}{R_a} + \frac{R_F\cdot V_b}{R_b} + \frac{R_F\cdot V_c}{R_c} = -V_0$$

$$V_0 = -\frac{R_F}{R_a}\cdot V_a - \frac{R_F}{R_b}\cdot V_b - \frac{R_F}{R_c}\cdot V_c$$

Substituindo os valores de Rf, Rs, Ra, Rb e Rc, tem-se:

$$V_0 = -\frac{60\cdot 10^{3}}{10\cdot 10^{3}}\cdot V_a - \frac{60\cdot 10^{3}}{15\cdot 10^{3}}\cdot V_b - \frac{60\cdot 10^{3}}{30\cdot 10^{3}}\cdot V_c \quad \Rightarrow \quad V_0 = -6\cdot V_a - 4\cdot V_b - 2\cdot V_c$$

b) Substituindo Va = -4V, Vb = 3V, Vc = 1V:

$$V_0 = -6\cdot(-4) - 4\cdot(3) - 2\cdot(1) \quad \Rightarrow \quad V_0 = 10,0V$$

c) Substituindo Vo = 15V, Va = -4V e Vb = 3V:

$$V_c = \frac{V_0 + 6\cdot V_a + 4\cdot V_b}{-2}$$

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

Substituindo Vo = -15V, Va = -4V e Vb = 3V:

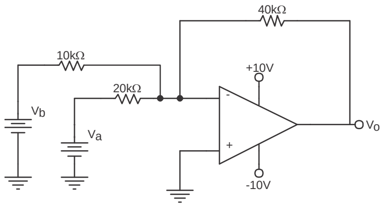
$$V_c = \frac{V_0 + 6\cdot V_a + 4\cdot V_b}{-2}$$

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

$$-13,5V \le V_c \le -1,5V$$

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

10) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = 4V e Vb = -2V;
   c. O valor de Vo para Va = -4,5V e Vb = 1V;
   d. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature, considerando Va = 5V.



Resolução:

a) Aplicando a equação do Amplificador Somador Inversor:

$$V_0 = -\frac{40\cdot 10^3}{20\cdot 10^3}\cdot V_a - \frac{40\cdot 10^3}{10\cdot 10^3}\cdot V_b \;\Rightarrow\; V_0 = -2\cdot V_a - 4\cdot V_b$$

b) Substituindo Va = 4V e Vb = -2V:

$$V_0 = -2\cdot(4) - 4\cdot(-2) \;\Rightarrow\; V_0 = 0{,}0V$$

c) Substituindo Va = -4,5V e Vb = 1V:

$$V_0 = -2\cdot(-4{,}5) - 4\cdot(1) \;\Rightarrow\; V_0 = 5{,}0V$$

d) Substituindo Vo = 10V e Va = 5V:

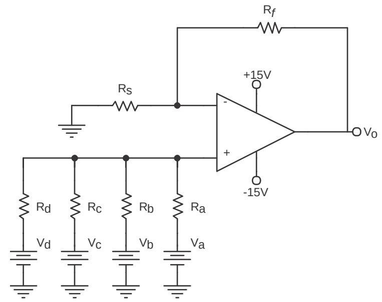
$$V_b = \frac{V_0 + 2\cdot V_a}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = \frac{10 + 2\cdot(5)}{-4} \;\Rightarrow V_b = -5{,}0V$$

Substituindo Vo = -10V e Va = 5V:

$$V_b = \frac{V_0 + 2\cdot V_a}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = \frac{(-10) + 2\cdot(5)}{-4} \;\Rightarrow V_b = 0{,}0V$$

$$-5{,}0V \le V_b \le 0{,}0V$$

11) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo considerando Rf 300kΩ= , Rs = 20kΩ, Ra = 40kΩ, Rb = 10kΩ, Rc = 20kΩ e Rd = 40kΩ;
   b. O valor de Vo para Va = 2V, Vb = 2V, Vc = -3V e Vd = -4V;
   c. O valor de Vo para Va = -4V, Vb = 3V, Vc = 5V e Vd = -6V;
   d. O valor de Vo para Va = -3V, Vb = 4V, Vc = -2V e Vd = 7V;
   e. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature, considerando Va = -4V, Vc = 5V e Vd = -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:

$$\frac{0 - V^+}{R_S} = \frac{V^+ - V_0}{R_F} \;\Rightarrow\; \frac{-R_F\cdot V^+}{R_S} = V^+ - V_0 \;\Rightarrow\; V_0 = \frac{R_F}{R_S}\cdot V^+ + V^+$$

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right)\cdot V^+ \quad ou \quad V_0 = \left(\frac{R_F + R_S}{R_S}\right)\cdot V^+$$

Substituindo V+ na equação anterior tem-se:

$$V_0 = \left(\frac{R_F + R_S}{R_S}\right)\cdot\left(\frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d}\right)\cdot\frac{1}{\left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d}\right)}$$

Substituindo Rf 300kΩ= , Rs = 20kΩ, Ra = 40kΩ, Rb = 10kΩ, Rc = 20kΩ e Rd = 40kΩ:

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

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

b) Substituindo Va = 2V, Vb = 2V, Vc = -3V e Vd = -4V:

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

c) Substituindo Va = -4V, Vb = 3V, Vc = 5V e Vd = -6V:

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

d) Substituindo Va = -3V, Vb = 4V, Vc = -2V e Vd = 7V:

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

e) Substituindo Vo = 15V, Va = -4V, Vc = 5V e Vd = -6V:

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

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

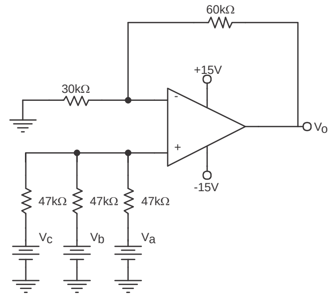
Substituindo Vo = -15V, Va = -4V, Vc = 5V e Vd = -6V:

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

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

$$-1,875V \le V_c \le 1,875V$$

12) Para o circuito a seguir, determine:
a. A equação de Vo;
b. O valor de Vo para Va = 2V, Vb = 10V e Vc = -3V;
c. O valor de Vo para Va = 21V, Vb = -14V e Vc = 8V;
d. Considerando que as três fontes tenham sempre a mesma tensão, encontre os limites de variação das fontes para que a saída Vo 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 Va = 2V, Vb = 10V e Vc = -3V:

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

c) Substituindo Va = 21V, Vb = -14V e Vc = 8V:

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

d) Considerando que as fontes são iguais (Va = Vb = Vc = Vx), a equação de Vo pode ser re-escrita por:

$$V_0 = V_X + V_X + V_X \;\Rightarrow\; V_0 = 3\cdot V_X$$

Substituindo Vo = -15V:

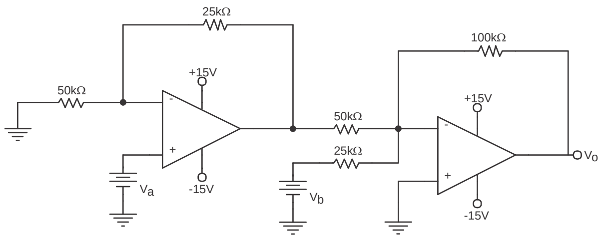
$$V_X = \frac{V_0}{3} \;\Rightarrow\; V_X = \frac{15}{3} \;\Rightarrow V_X = 5,0V$$

Substituindo Vo = -15V:

$$V_X = \frac{V_0}{3} \;\Rightarrow\; V_X = \frac{-15}{3} \;\Rightarrow V_X = -5,0V$$

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

13) Para o circuito a seguir, determine:
    a. A equação de Vo;
    b. O valor de Vo para Va = 2V e Vb = -4V;
    c. O valor da corrente no resistor de 25kΩ para Va = 2V e Vb = -4V;
    d. valor de Vo para Va = 3V e Vb = 2V;
    e. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature, considerando Va = -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:

$$V_X = \frac{25\cdot10^3 + 50\cdot10^3}{50\cdot10^3}\cdot V_a \;\Rightarrow\; V_X = 1{,}5\cdot V_a$$

Utilizando V_X como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_0 = -\frac{100\cdot10^3}{50\cdot10^3}\cdot V_X - \frac{100\cdot10^3}{25\cdot10^3}\cdot V_b \;\Rightarrow\; V_0 = -2\cdot V_X - 4\cdot V_b$$

Substituindo V_X na equação de V_0, tem-se:

$$V_0 = -2\cdot(1{,}5\cdot V_a) - 4\cdot V_b \;\Rightarrow\; V_0 = -3\cdot V_a - 4\cdot V_b$$

b) Substituindo Va = 2V e Vb = -4V:

$$V_0 = -3\cdot(2) - 4\cdot(-4) \;\Rightarrow\; V_0 = 10{,}0V$$

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

$$i_{25} = \frac{V_b - 0}{25\cdot10^3} \;\Rightarrow\; i_{25} = \frac{-4}{25\cdot10^3} \;\Rightarrow\; i_{25} = -160\mu A$$

d) Substituindo Va = 3V e Vb = 2V:

$$V_0 = -3\cdot(3) - 4\cdot(2) \;\Rightarrow\; V_0 = -17{,}0V \;\; (Saturação) \;\Rightarrow\; V_0 = 15{,}0V$$

e) Substituindo Vo = -15V e Va = -3V:

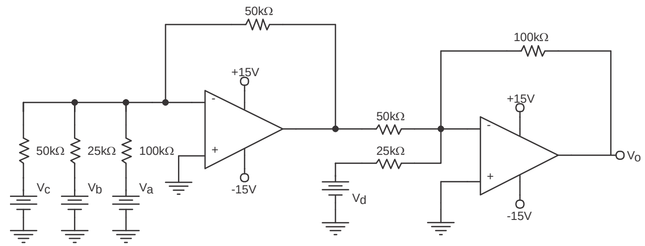
$$V_b = \frac{V_0 + 3\cdot V_a}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = \frac{15 + 3\cdot(-3)}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = -1{,}5V \;\searrow$$

Substituindo Vo = -15V e Va = -3V:

$$V_b = \frac{V_0 + 3\cdot V_a}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = \frac{-15 + 3\cdot(-3)}{-4} \;\Rightarrow\; V_b = 6{,}0V \;\nearrow$$

$$-1{,}5V \le V_b \le 6{,}0V$$

14) Para o circuito a seguir, determine:
    a. A equação de Vo;
    b. O valor de Vo para Va = -4V, Vb = 1V, Vc = 5V e Vd = 4V;
    c. O valor da corrente no resistor de 25kΩ para Va = -4V, Vb = 1V, Vc = 5V e Vd = 4V;
    d. Os limites de variação de Vd para que a saída Vo não sature, considerando Va = -4V, Vb = 1V e Vc = 5V.



Resolução:

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

$$V_X = -\frac{100\cdot10^3}{100\cdot10^3}\cdot V_a - \frac{100\cdot10^3}{25\cdot10^3}\cdot V_b - \frac{100\cdot10^3}{50\cdot10^3}\cdot V_c \;\Rightarrow\; V_X = -V_a - 4\cdot V_b - 2\cdot V_c$$

Utilizando V_X como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_0 = -\frac{100\cdot10^3}{50\cdot10^3}\cdot V_X - \frac{100\cdot10^3}{25\cdot10^3}\cdot V_d \;\Rightarrow\; V_0 = -2\cdot V_X - 4\cdot V_d$$

Substituindo V_X na equação de V_0, tem-se:

$$V_0 = -2\cdot(-V_a - 4\cdot V_b - 2\cdot V_c) - 4\cdot V_d \;\Rightarrow\; V_0 = 2\cdot V_a + 8\cdot V_b + 4\cdot V_c - 4\cdot V_d$$

b) Substituindo Va = -4V, Vb = 1V, Vc = 5V e Vd = 4V:

$$V_0 = 2\cdot(-4) + 8\cdot(1) + 4\cdot(5) - 4\cdot(4) \;\Rightarrow\; V_0 = 4{,}0V$$

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

$$i_{25} = \frac{V_d - 0}{25\cdot10^3} \;\Rightarrow\; i_{25} = \frac{4}{25\cdot10^3} \;\Rightarrow\; i_{25} = 160\mu A$$

d) Substituindo Vo = -15V e Va = -4V, Vb = 1V e Vc = 5V:

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

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

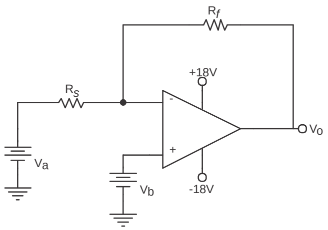
Substituindo Vo = -15V e Va = -4V, Vb = 1V e Vc = 5V:

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

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

$$1{,}25V \le V_d \le 8{,}75V$$

15) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo considerando Rf = 10kΩ e Rs = 10kΩ;
   b. O valor de Vo para Va = 2V e Vb = 5V;
   c. O valor de Vo para Va = -5V e Vb = 6V;
   d. O valor de Vo para Va = 6V e Vb = -7V;
   e. Os limites de variação de Va para que a saída Vo não sature, considerando Vb = 5V.



Resolução:

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

$$\frac{V_a - V_b}{R_S} = \frac{V_b - V_0}{R_F} \Rightarrow R_F \cdot \frac{V_a - V_b}{R_S} = V_b - V_0 \Rightarrow R_F \cdot \frac{V_a - V_b}{R_S} - V_b = -V_0$$

$$V_0 = -\frac{R_F}{R_S} \cdot V_a + \left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right) \cdot V_b \quad ou \quad V_0 = \left(\frac{R_F + R_S}{R_S}\right) \cdot V_b - \frac{R_F}{R_S} \cdot V_a$$

Substituindo os valores de Rf e Rs tem-se:

$$V_0 = \left(\frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) \cdot V_b - \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_{ac} \Rightarrow V_0 = 2 \cdot V_b - V_a$$

b) Substituindo Va = 2V e Vb = 5V:

$$V_0 = 2 \cdot (5) - (2) \Rightarrow V_0 = 8,0V$$

c) Substituindo Va = -5V e Vb = 6V:

$$V_0 = 2 \cdot (-5) - (6) \Rightarrow V_0 = -16,0V$$

d) Substituindo para Va = 6V e Vb = -7V:

$$V_0 = 2 \cdot (6) - (7) \Rightarrow V_0 = 5,0V$$

e) Substituindo Vo = 18V e Vb = 5V:

$$V_a = -V_0 + 2 \cdot V_b \Rightarrow V_a = -18 + 2 \cdot (5) \Rightarrow V_a = -8,0V \quad \searrow$$

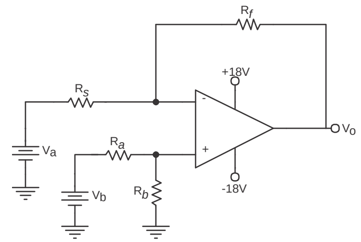
Substituindo Vo = -18V e Vb = 5V:

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

$$V_a = -V_0 + 2 \cdot V_b \Rightarrow V_a = -(-18) + 2 \cdot (5) \Rightarrow V_a = 28,0V \quad \nearrow$$

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

16) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo considerando Rf = 10kΩ e Rs = 10kΩ, Ra = 60kΩ e Rb = 30kΩ;
   b. O valor de Vo para Va = 2V e Vb = 4,5V;
   c. O valor de Vo para Va = -5V e Vb = 6V;
   d. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature, considerando Va = 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:

$$\frac{V_a - V^+}{R_S} = \frac{V^+ - V_0}{R_F} \Rightarrow R_F \cdot \frac{V_a - V^+}{R_S} = V^+ - V_0 \Rightarrow R_F \cdot \frac{V_a - V^+}{R_S} - V^+ = -V_0$$

$$V_0 = -\frac{R_F}{R_S} \cdot V_a + \left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right) \cdot V^+ \quad ou \quad V_0 = \left(\frac{R_F + R_S}{R_S}\right) \cdot V^+ - \frac{R_F}{R_S} \cdot V_a$$

Substituindo V^+ na equação acima tem-se:

$$V_0 = \left(\frac{R_F + R_S}{R_S}\right) \cdot \left(\frac{R_b}{R_a + R_b}\right) \cdot V_b - \frac{R_F}{R_S} \cdot V_a$$

Substituindo os valores de Rf, Rs, Ra e Rb tem-se:

$$V_0 = \left(\frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) \cdot \left(\frac{30 \cdot 10^3}{60 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3}\right) V_b - \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot V_a \Rightarrow V_0 = \frac{2}{3} \cdot V_b - V_a$$

b) Substituindo Va = 2V e Vb = 4,5V:

$$V_0 = \frac{2}{3} \cdot (4,5) - 2 \Rightarrow V_0 = 1,0V$$

c) Substituindo Va = -5V e Vb = 6V:

$$V_0 = \frac{2}{3} \cdot (6) - (-5) \Rightarrow V_0 = 9,0V$$

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

d) Substituindo Vo = 18V e Va = 2V:

$$V_b = \frac{3\cdot(V_0+V_a)}{2} \Rightarrow V_b = \frac{3\cdot(18+2)}{2} \Rightarrow V_b = 30,0V \searrow$$

Substituindo Vo = -18V e Va = 2V:

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

$$V_b = \frac{3\cdot(V_0+V_a)}{2} \Rightarrow V_b = \frac{3\cdot((-18)+2)}{2} \Rightarrow V_b = -24,0V \nearrow$$

17) Para o circuito anterior, determine:

a. A equação de Vo considerando Rf = 30kΩ e Rs = 10kΩ, Ra = 10kΩ e Rb = 30kΩ;
b. O valor de Vo para Va = 2V e Vb = 7V;
c. O valor de Vo para Va = -1V e Vb = 4V;
d. Os limites de variação de Vb para que a saída Vo não sature, considerando Va = -2V.

Resolução:

a) Utilizando a equação encontrada no exercício anterior:

$$V_0 = \left(\frac{R_F+R_S}{R_S}\right)\cdot\left(\frac{R_b}{R_a+R_b}\right)\cdot V_b - \frac{R_F}{R_S}\cdot V_a$$

Substituindo os valores de Rf, Rs, Ra e Rb tem-se:

$$V_0 = \left(\frac{30\cdot10^3+10\cdot10^3}{10\cdot10^3}\right)\cdot\left(\frac{30\cdot10^3}{10\cdot10^3+30\cdot10^3}\right)V_b - \frac{30\cdot10^3}{10\cdot10^3}\cdot V_a$$

$$V_0 = 3\cdot V_b - 3\cdot V_a \Rightarrow V_0 = 3\cdot(V_b - V_a)$$

b) Substituindo Va = 2V e Vb = 7V:

$$V_0 = 3\cdot(7-2) \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

c) Substituindo Va = -1V e Vb = 4V:

$$V_0 = 3\cdot(4-(-1)) \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

d) Substituindo Vo = 18V e Va = -2V:

$$V_b = \frac{V_0}{3}+V_a \Rightarrow V_b = \frac{18}{3}+(-2) \Rightarrow V_b = 4,0V \searrow$$

Substituindo Vo = -18V e Va = -2V:

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

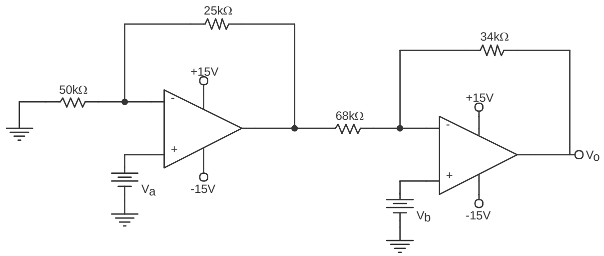
$$V_b = \frac{V_0}{3}+V_a \Rightarrow V_b = \frac{-18}{3}+(-2) \Rightarrow V_b = -8,0V \nearrow$$

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

18) Para o circuito a seguir, determine:

a. A equação de Vo;
b. O valor de Vo para Va = 4V e Vb = 2V;
c. O valor de Vo para Va = -8V e Vb = 6V;
d. O valor de Vo para Va = 6V e Vb = 8V;
e. Os limites de variação de Va para que a saída Vo não sature, considerando Vb = 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:

$$V_X = \frac{25\cdot10^3+50\cdot10^3}{50\cdot10^3}\cdot V_a \Rightarrow V_X = 1,5\cdot V_a$$

Utilizando V_X como uma entrada do segundo amplificador:

$$V_0 = -\frac{34\cdot10^3}{68\cdot10^3}\cdot V_X + \frac{34\cdot10^3+68\cdot10^3}{68\cdot10^3}\cdot V_b \Rightarrow V_0 = -\frac{V_X}{2}+1,5\cdot V_b$$

Substituindo V_X na equação de V_0, tem-se:

$$V_0 = -\frac{1,5\cdot V_a}{2}+1,5\cdot V_b \Rightarrow V_0 = -0,75\cdot V_a + 1,5\cdot V_b$$

b) Substituindo Va = 4V e Vb = 2V:

$$V_0 = -0,75\cdot(4)+1,5\cdot(2) \Rightarrow V_0 = 0,0V$$

c) Substituindo Va = -8V e Vb = 6V:

$$V_0 = -0,75\cdot(-8)+1,5\cdot(6) \Rightarrow V_0 = 15,0V$$

d) Substituindo Va = 6V e Vb = 8V:

$$V_0 = -0,75\cdot(6)+1,5\cdot(8) \Rightarrow V_0 = 7,5V$$

e) Substituindo Vo = 15V e Vb = 4V:

$$V_a = \frac{V_0-1,5\cdot V_b}{-0,75} \Rightarrow V_a = \frac{15-1,5\cdot(4)}{-0,75} \Rightarrow V_a = -12,0V$$

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

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

Substituindo Vo = -15V e Vb = 4V:

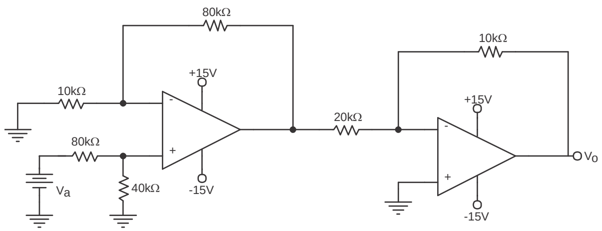
$$V_a = \frac{V_0 - 1,5 \cdot V_b}{-0,75} \Rightarrow V_a = \frac{-15 - 1,5 \cdot (4)}{-0,75} \Rightarrow V_a = 28,0V$$

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

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

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

19) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = -6V;
   c. O valor de Vo para Va = 12V;
   d. Os limites de variação de Va para que a saída Vo 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:

$$V_0 = -\frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} V_X \Rightarrow V_0 = -\frac{V_X}{2}$$

Substituindo V_X na equação de Vo, tem-se:

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

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

b) Substituindo Va = -6V:

$$V_0 = -1,5 \cdot (-6) \Rightarrow V_0 = 9,0V$$

O problema é que Va = -6V leva o primeiro amplificador a saturação. Sendo assim é preciso resolver primeiro V_X, para então encontrar Vo. Sendo assim:

$$V_X = 3 \cdot (-6) \Rightarrow V_X = -18,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_X = -15,0V$$

$$V_0 = -\frac{(-15)}{2} \Rightarrow V_0 = 7,5V$$

c) Substituindo Va = 12V:

$$V_0 = -1,5 \cdot (12) \Rightarrow V_0 = -18,0V \Rightarrow (Saturação) \Rightarrow V_0 = -15,0V$$

O problema da resposta acima é que Va = 12V leva o primeiro amplificador a saturação. Sendo assim é preciso resolver primeiro V_X, para então encontrar Vo. Sendo assim:

$$V_X = 3 \cdot (12) \Rightarrow V_X = 36,0V \quad (Saturação) \Rightarrow V_X = 15,0V$$

$$V_0 = -\frac{(15)}{2} \Rightarrow V_0 = -7,5V$$

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

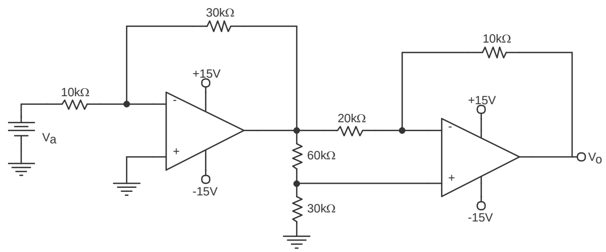
$$V_a = \frac{V_X}{3} \Rightarrow V_a = \frac{15}{3} \Rightarrow V_a = 5,0V \quad \searrow$$

Substituindo Vo = -15V: $\qquad -5,0V \le V_a \le 5,0V$

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

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

20) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo;
   b. O valor de Vo para Va = 2V;
   c. Os limites de variação de Va para que a saída Vo 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 Vx como uma fonte de tensão e V^+ como outra fonte de tensão, pode-se equacionar o circuito subtrator como:

$$V_0 = -\frac{10\cdot 10^3}{20\cdot 10^3}\cdot V_X + \frac{10\cdot 10^3 + 20\cdot 10^3}{20\cdot 10^3}\cdot V^+ \;\Rightarrow\; V_0 = -\frac{V_X}{2} + 1{,}5\cdot V^+$$

Substituindo V_X e V^+ na equação de V_0, tem-se:

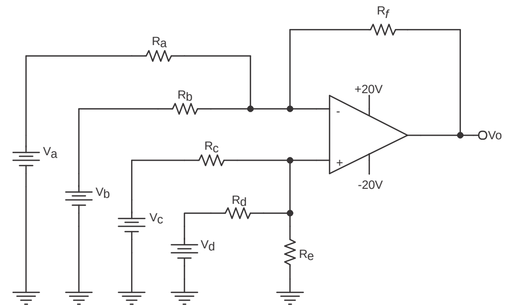
$$V_0 = -\frac{(-3\cdot V_a)}{2} + 1{,}5\cdot(-V_a) \;\Rightarrow\; V_0 = 1{,}5\cdot V_a - 1{,}5\cdot V_a \;\Rightarrow\; V_0 = 0{,}0V$$

Dado o valor encontrado, a saída do circuito será sempre igual a zero para qualquer valor de Va, não permitindo que este circuito sature.

Desta forma, não faz sentido resolver os intens b) e c), pois a resposta de b) é zero e o item c) não tem solução.

INSTITUTO FEDERAL SANTA CATARINA
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

21) Para o circuito a seguir, determine:
   a. A equação de Vo considerando Rf = 66kΩ, Ra = 10kΩ, Rb = 15kΩ, Rc = 20kΩ, Rd = 30kΩ e Re = 60kΩ;
   b. O valor de Vo para Va = 1V, Vb = 1V, Vc = 1V e Vd = 1V;
   c. O valor de Vo para Va = -2V, Vb = 3V, Vc = 3V e Vd = 1V;
   d. Os limites de variação de Vd para que a saída Vo não sature, considerando Va = 1V, Vb = 1V e Vc = 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 Vc e Vd, o circuito se transforma eu um Somador Inveror, onde as resistências Rc, Rd e Re ficam em paralelo. Assim a saída pode ser equacionada por:

$$V_0' = -\frac{R_F}{R_a}\cdot V_a - \frac{R_F}{R_b}\cdot V_b \;\Rightarrow\; V_0' = -\frac{66\cdot 10^3}{10\cdot 10^3}\cdot V_a - \frac{66\cdot 10^3}{15\cdot 10^3}\cdot V_b \;\Rightarrow\; V_0' = -6{,}6\cdot V_a - 4{,}4\cdot V_b$$

Matando agora as fontes Va e Vb, os resitores Ra e Rb ficam em paralelo, e seu valor equivalente passa a ser Rx = 6kΩ. Com isso a saída pode ser equacionada por:

$$V_0'' = \frac{R_F + R_X}{R_X}\cdot\left(\frac{V_c}{R_c} + \frac{V_d}{R_d}\right)\cdot\frac{1}{\left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_e}\right)}$$

$$V_0'' = \frac{66\cdot 10^3 + 6\cdot 10^3}{6\cdot 10^3}\cdot\left(\frac{V_c}{20\cdot 10^3} + \frac{V_d}{30\cdot 10^3}\right)\cdot\frac{1}{\left(\frac{1}{20\cdot 10^3} + \frac{1}{30\cdot 10^3} + \frac{1}{60\cdot 10^3}\right)}$$

$$V_0'' = 12\cdot\left(\frac{V_c}{20\cdot 10^3} + \frac{V_d}{30\cdot 10^3}\right)\cdot 10\cdot 10^3 \;\Rightarrow\; V_0'' = 6{,}0\cdot V_c + 4{,}0\cdot V_d$$

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

$$V_0 = -6{,}6\cdot V_a - 4{,}4\cdot V_b + 6{,}0\cdot V_c + 4{,}0\cdot V_d$$

b) Substituindo Va = 1V, Vb = 1V, Vc = 1V e Vd = 1V:

$$V_0 = -6{,}6\cdot(1) - 4{,}4\cdot(1) + 6{,}0\cdot(1) + 4{,}0\cdot(1) \;\Rightarrow\; V_0 = -1{,}0V$$

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

c) Substituindo Va = -2V, Vb = 3V, Vc = 3V e Vd = 1V:

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

$$V_0 = 22,0V \;\Rightarrow\; (Saturação) \;\Rightarrow\; V_0 = 20,0V$$

d) Substituindo Vo = 20V, Va = 1V, Vb = 1V e Vc = 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 Vo = -15V:

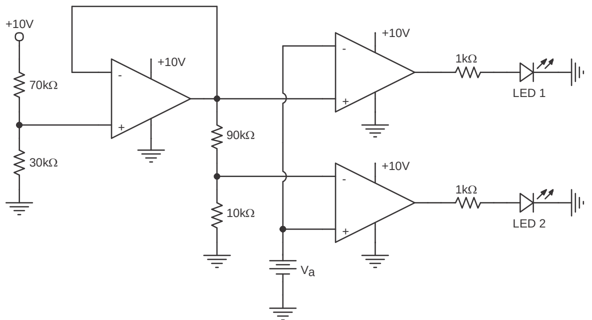
$$V_d = \frac{V_0 + 6,6\cdot V_a + 4,4\cdot V_b - 6,0\cdot V_c}{4} \;\Rightarrow\; V_d = \frac{-20 + 6,6\cdot(1) + 4,4\cdot(1) - 6,0\cdot(1)}{4}$$

$$V_d = -3,75V$$

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

22) Para o circuito a seguir, determine:

a. A faixa de valores de Va que faz com que o LED 1 fique apagado;
b. A faixa de valores de Va 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:

$$V_X = \frac{30\cdot10^3}{30\cdot10^3 + 70\cdot10^3}\cdot10 \;\Rightarrow\; V_X = 3,0V$$

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 mantar apagado, a tensão da fonte Va tem que ser maior que V_X. Assim, a faixa de valores pode ser escrita por:

$$V_a \ge 3,0V$$

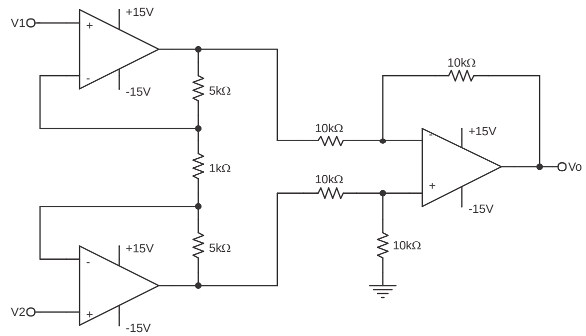
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

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 Va é maior que V_X. Desta forma a faixa de valores de Va é obtida por:

$$V_a \ge 3,0V$$

23) Para o circuito a seguir, determine:

a. A equação de Vo;
b. O valor de Vo para V1 = 2V e V2 = 2V;
c. O valor de Vo para V1 = -5V e V2 = -4V;



Resolução:

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

$$i_{1k\Omega} = \frac{V_1 - V_2}{1\cdot10^3}$$

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:

$$V_X - V_1 = 5\cdot10^3\cdot i_{1k\Omega} \;\Rightarrow\; V_X = V_1 + 5\cdot10^3\cdot\frac{V_1 - V_2}{1\cdot10^3} \;\Rightarrow\; V_X = 6\cdot V_1 - 5\cdot V_2$$

$$V_2 - V_Y = 5\cdot10^3\cdot i_{1k\Omega} \;\Rightarrow\; -V_Y = -V_2 + 5\cdot10^3\cdot\frac{V_1 - V_2}{1\cdot10^3} \;\Rightarrow\; V_Y = -5\cdot V_1 + 6\cdot V_2$$

Utilizando V_X e VY 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:

$$V_0 = \frac{R_F}{R_S}\cdot(V_Y - V_X) \;\Rightarrow\; V_0 = \frac{10\cdot10^3}{10\cdot10^3}\cdot\left((-5\cdot V_1 + 6\cdot V_2) - (6\cdot V_1 - 5\cdot V_2)\right)$$

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

b) Substituindo V1 = 2V e V2 = 2V:

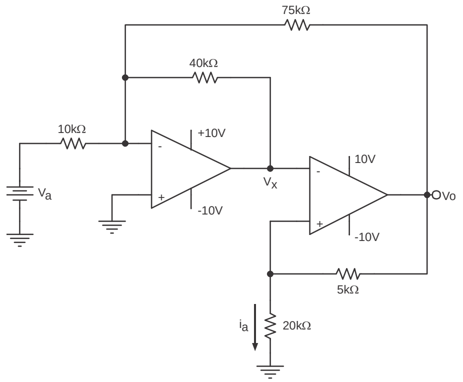
$$V_0 = 11 \cdot \left((2) - (2) \right) \quad \Rightarrow \quad V_0 = 0,0V$$

c) Substituindo V1 = -5V e V2 = -4V:

$$V_0 = 11 \cdot \left((-5) - (-4) \right) \quad \Rightarrow \quad V_0 = -11,0V$$

24) Para o circuito a seguir, determine:

a. A equação de Vo;
b. O valor de Vo, Vx e ia para Va = 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:

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

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

Como esta equação possui duas incógnitas, é impossível resolve-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:

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

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

Substituindo V_X na equação de Vo acima, e isolando novamente o Vo, tem-se:

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

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

b) Substituindo Va = 1,2V:

$$V_0 = -3 \cdot (1,2) \quad \Rightarrow \quad V_0 = 3,6V$$

Utilizando a equação de Vx:

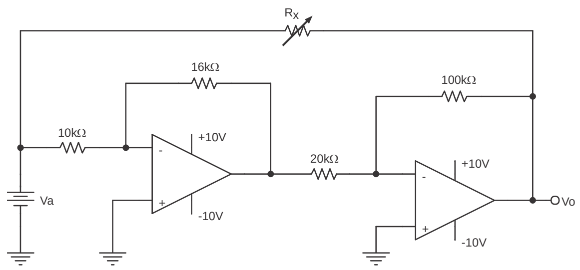
$$V_X = 0,8 \cdot (3,6) \quad \Rightarrow \quad V_X = 2,88V$$

A partir de Vx é possível calcular i_a:

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

25) Para o circuito a seguir, determine:

a. A equação de Vo;
b. O valor da resistência Rx, para que a corrente na fonte Va seja nula;



Resolução:

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

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

A saída Vo é então calculada, considerando Vx como a fonte de entrada do circuito:

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

Substituindo V_X na equação acima:

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

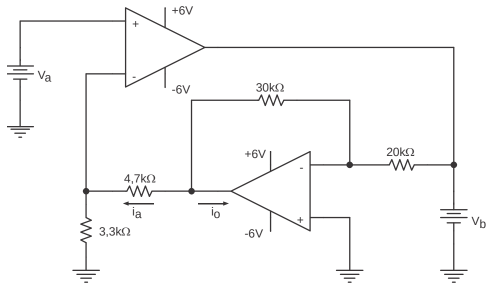
b) Para encontrar o valor do resistor R_X que faz com que a corrente na fonte Va seja igual a zero, basta equacionar as correntes no nó da fonte Va:

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

Substituindo Vo pela equação de Vo 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 Va = 1,98V determine:
   a. O valor da corrente ia;
   b. O valor da tensão Vb;
   c. O valor da corrente io;



Resolução:

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

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

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 ia é possível calcular a tensão de saída do amplificador de baixo:

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

$$V_0=4,8V$$

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

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

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

Substituindo o valor de Vo já conhecido, tem-se Vb:

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

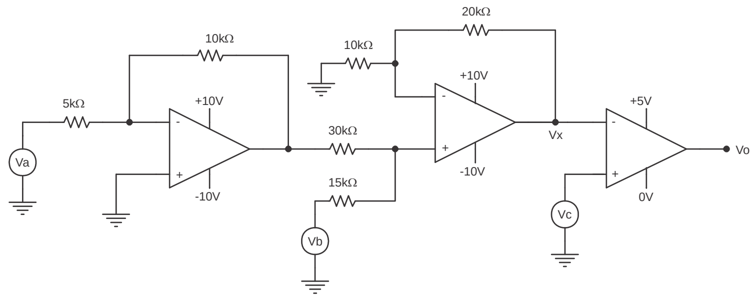
c) Equacionando as correntes no ponto de saída do amplificador de baixo, é possível encontrar io:

$$\frac{0-V_0}{30\cdot 10^3}=i_a+i_0 \Rightarrow i_0=-\frac{V_0}{30\cdot 10^3}-i_a$$

Substituindo os valores de Vo e ia já conhecidos:

$$i_0=-\frac{4,8}{30\cdot 10^3}-600\cdot 10^{-6} \Rightarrow i_0=-760\mu A$$

27) Para o circuito a seguir, desenhe:
   a. A forma de onda da tensão Vx. (Desenhe esta forma de onda em escala, sobre a forma de onda da tensão VC);
   b. A forma de onda da tensão de saída Vo. Indique as escalas de tensão;



Resolução:

a) Para desenhar as formas de onda, primeiro é preciso conhecer as equações de V_X e de Vo.
Para encontrar a equação de VX, 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:

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

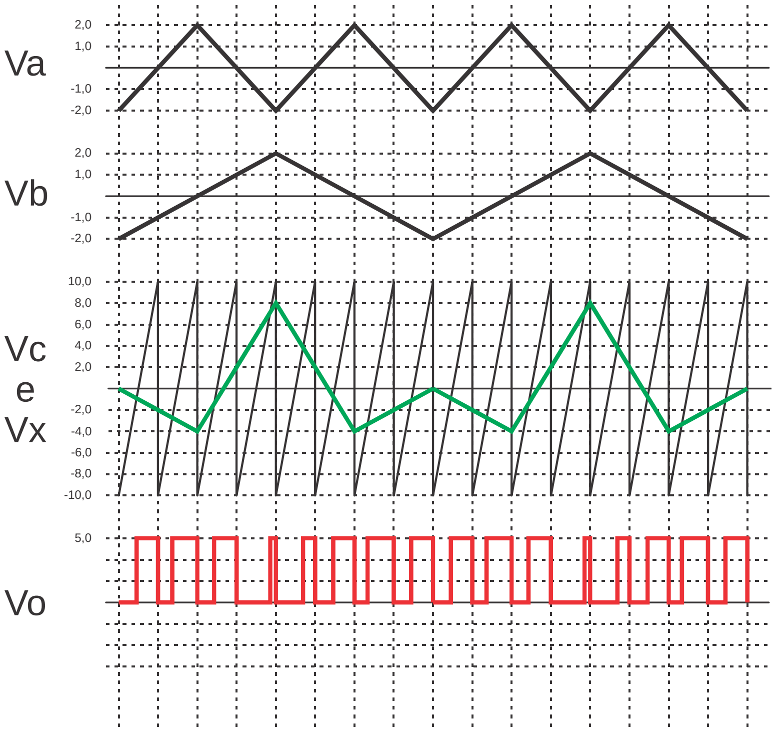
$$V_X=3\cdot\left(\frac{V_Y}{30\cdot 10^3}+\frac{V_B}{15\cdot 10^3}\right)\cdot 10\cdot 10^3 \Rightarrow V_X=V_Y+2\cdot V_B$$

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

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

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

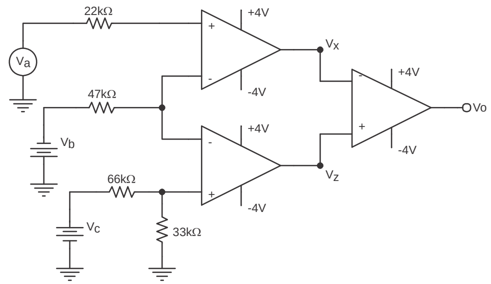
b) Para desenhar Vo, basta fazer a análise do comparador de saída, entre a tensão V_X encontrada e a tensão Vb dada:



28) Para o circuito a seguir, considerando que Va é a fonte senoidal apresentada abaixo, Vb uma fonte de tensão contínua Vb = 2V e Vc uma fonte de tensão contínua de Vc = 4V, desenhe:

a. A tensão no ponto Vx;
b. A tensão no ponto Vz;
c. A tensão de saída Vo.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

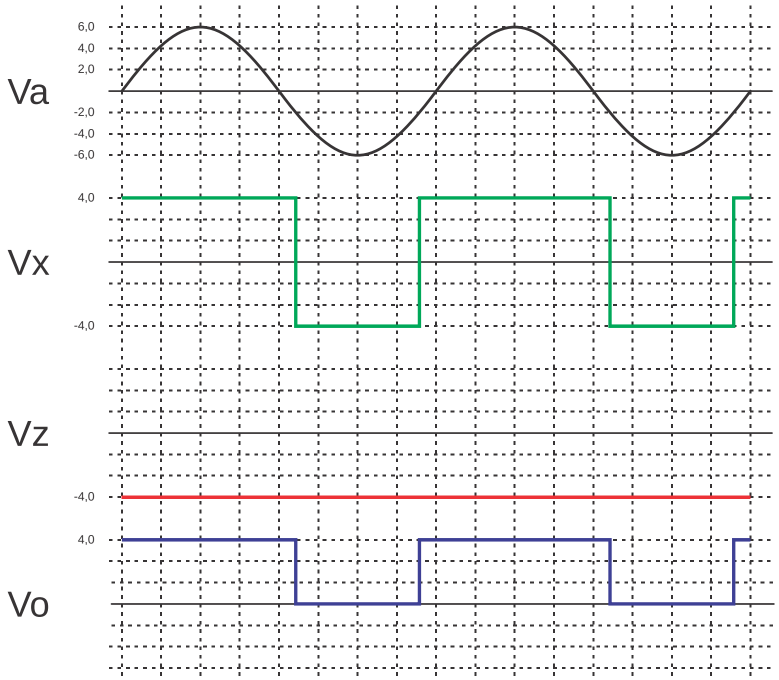


Resolução:

a) A tensão Vx é obtida pela comparação do sinal Senoidal com uma tensão contínua de -Vb. Se a senoide for maior que -2V, satura em +4V, senão satura em -4V.

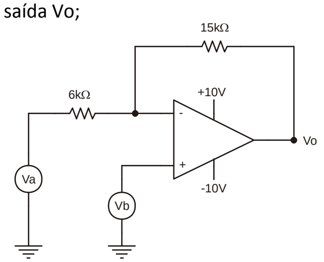
b) A tensão no ponto Vz é dada pela comparação de Vc/3 com -Vb. Como Vc/3 é sempre maior que –Vb, a saída esta sempre saturada em -4V.

c) A saída Vo é dada pela comparação de Vx com Vz. Quando Vx é maior que Vz, satura em +4V. Quando são iguais, a saída é igual a zero.



Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br

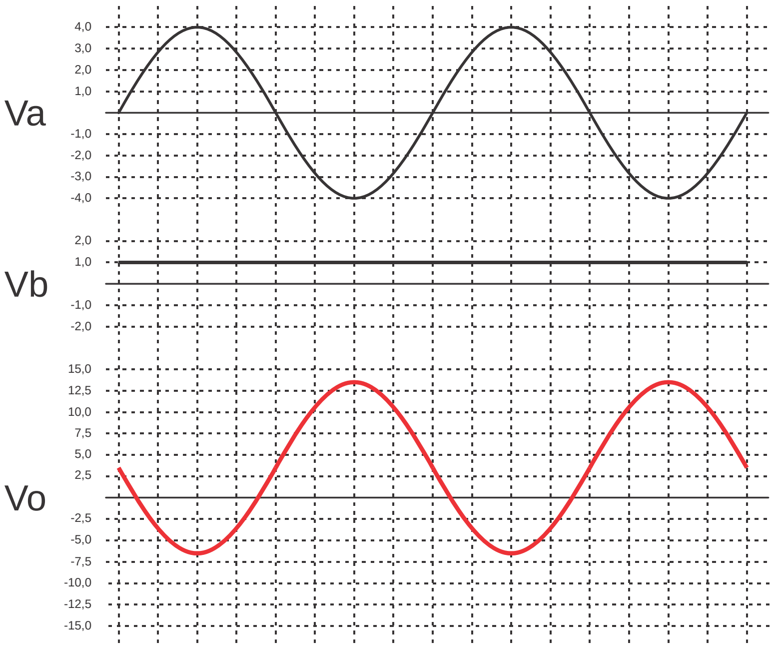
29) Para o circuito a seguir, desenhe:
   a. A tensão de saída Vo;



Resolução:

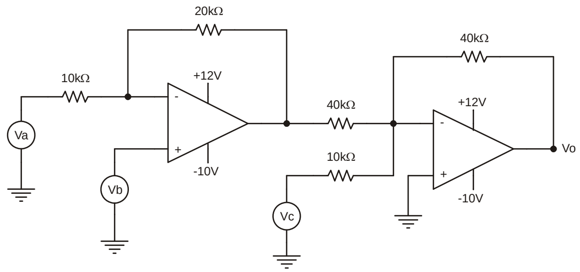
a) Para poder desenhar a tensão de saída é preciso encontrar a equação de Vo. Este circuito é um amplificador subtrator. Então a equação de saída é dada por:

$$V_0 = -\frac{15\cdot 10^3}{6\cdot 10^3}\cdot V_a + \frac{15\cdot 10^3 + 6\cdot 10^3}{6\cdot 10^3}\cdot V_b \quad \Rightarrow \quad V_0 = -2{,}5\cdot V_a + 3{,}5\cdot V_b$$



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

30) Para o circuito a seguir, desenhe:
   a. A tensão de saída Vo.



Resolução:

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

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

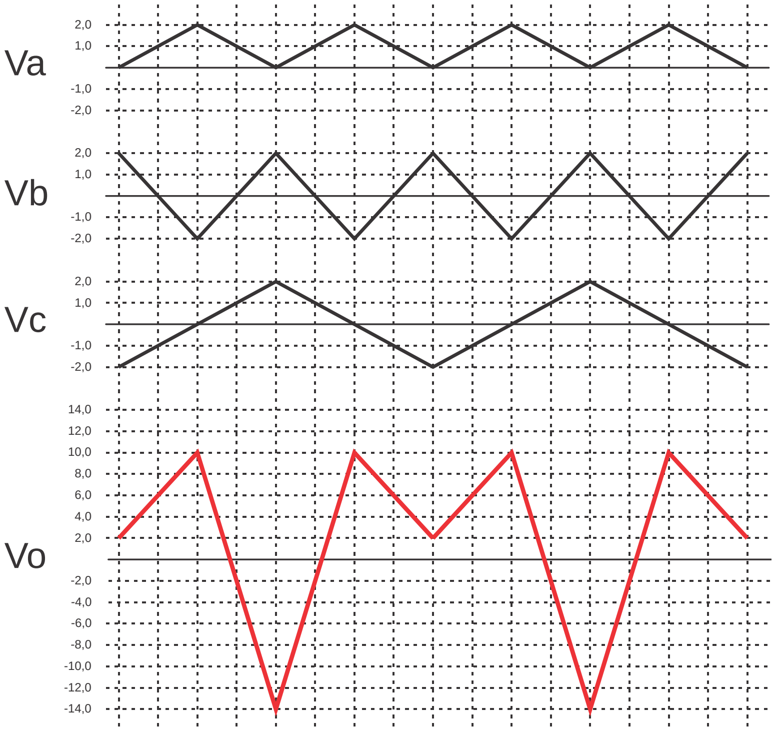
Utilizando V_X como uma fonte de tensão para o segundo circuito, este pode ser equacionado por:

$$V_0 = -\frac{40\cdot 10^3}{40\cdot 10^3}\cdot V_X - \frac{40\cdot 10^3}{10\cdot 10^3}\cdot V_c \quad \Rightarrow \quad V_0 = -V_X - 4{,}0\cdot V_c$$

Substituindo a equação de V_X na equação de Vo tem-se:

$$V_0 = -\left(-2{,}0\cdot V_a + 3{,}0\cdot V_b\right) - 4{,}0\cdot V_c \quad \Rightarrow \quad V_0 = 2{,}0\cdot V_a - 3{,}0\cdot V_b - 4{,}0\cdot V_c$$

Rua Pavão, 1337 – Costa e Silva
89220-200 – Joinville/SC
Fone: (47) 3431-5610
www.joinville.ifsc.edu.br


Va
2,0
1,0
-1,0
-2,0
Vb
2,0
1,0
-1,0
-2,0
Vc
2,0
1,0
-1,0
-2,0
Vo
14,0
12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
-2,0
-4,0
-6,0
-8,0
-10,0
-12,0
-14,0