Aula 6

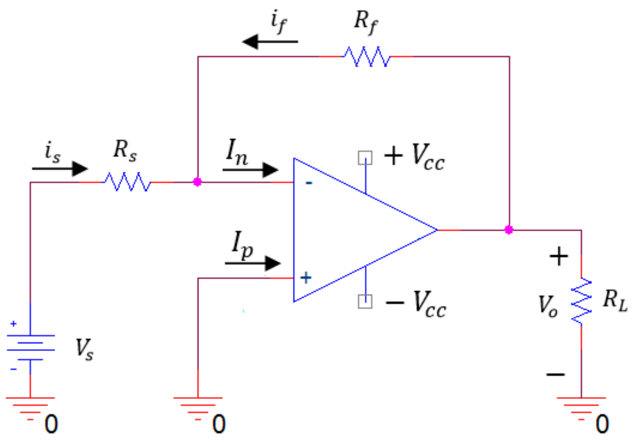
Amplificador Operacional
Configurações III

Circuitos Elétricos II

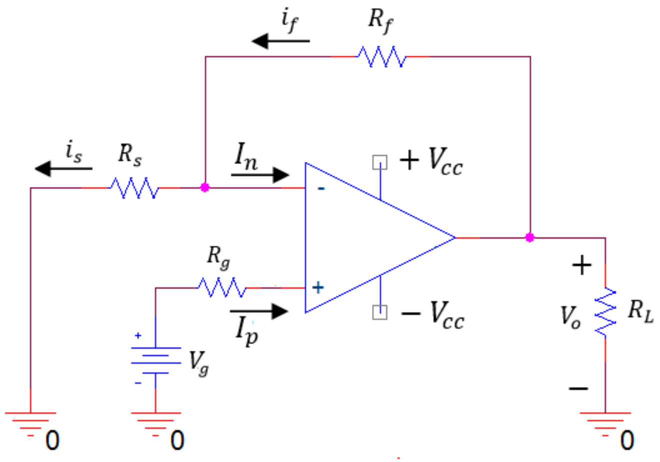
Prof. Henrique Amorim - UNIFESP - ICT

Revisão AmpOps

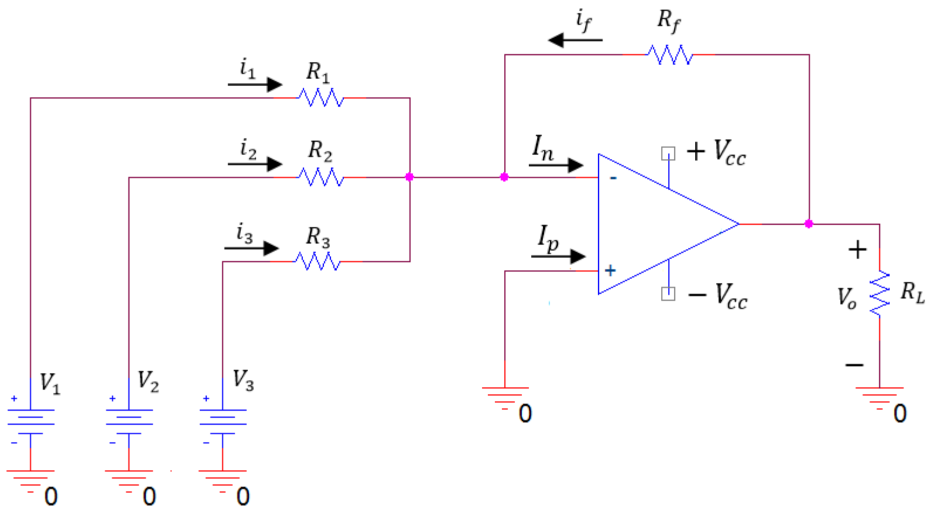
Amplificador inversor



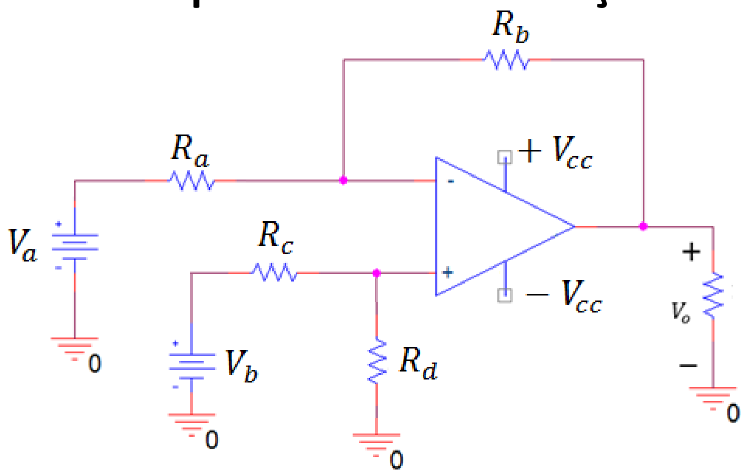
Amplificador não inversor



Amplificador somador inversor

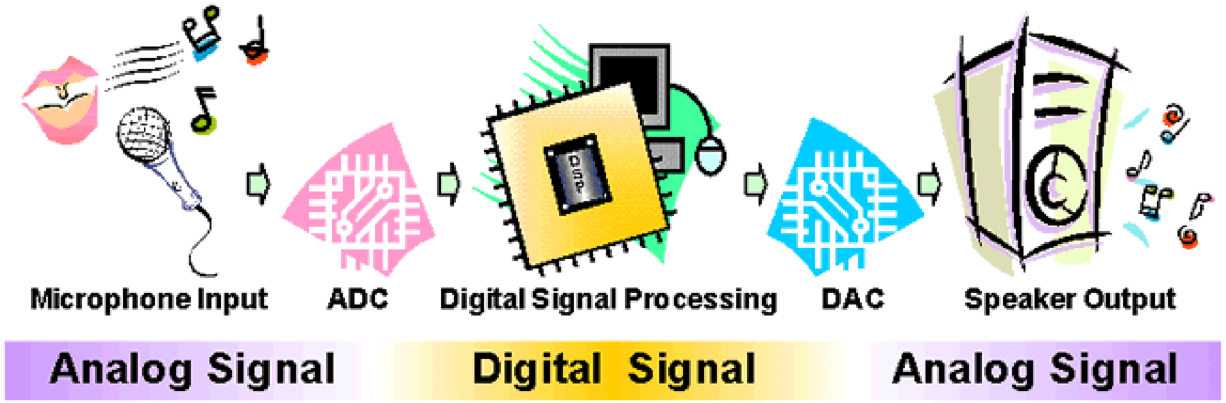


Amplificador da diferença



DAC – Estudo de caso

Segundo estudo de caso: aplicação de amplificadores operacionais para realizar conversão Digital Analógico



DAC – Estudo de caso

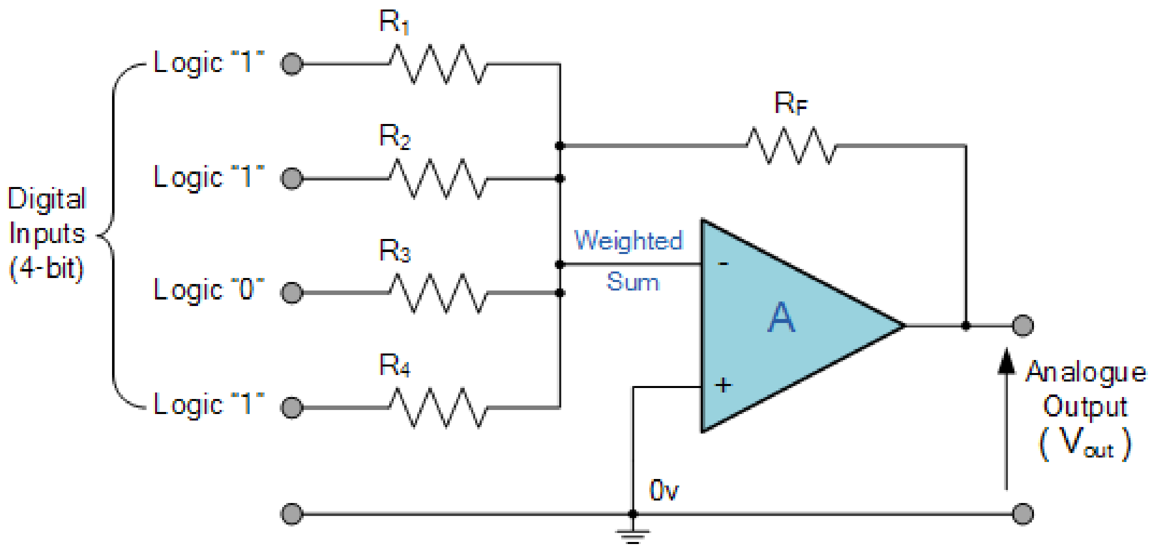
Analisando o exemplo ao lado temos:

- Um conversor DAC de 4 bits
- As entradas podem ser nível alto ou nível baixo (para facilitar o exemplo vamos considerar **nível alto 1V** e **nível baixo 0V**)
- Caso todas as entradas sejam nível baixo, a saída Vo será de **0V**
- Caso todas as entradas sejam nível alto, a saída Vo será **1,875V**
- A resolução do sinal é igual a 0,125V, ou seja, a menor variação.

Representação binária	Representação decimal	-Vo
0000	0	0,000
0001	1	0,125
0010	2	0,250
0011	3	0,375
0100	4	0,500
0101	5	0,650
0110	6	0,750
0111	7	0,875
1000	8	1,000
1001	9	1,125
1010	10	1,250
1011	11	1,375
1100	12	1,500
1101	13	1,650
1110	14	1,750
1111	15	1,875
4 bits	$4^2 - 1 = 15$	

DAC – Estudo de caso

Podemos representar um DAC por um amplificador somador inversor (está é uma possível configuração de DAC, porém não a única)



Para deduzirmos as relações vamos utilizar apenas a lógica:

Sabemos que a equação que define o comportamento do amplificador não inversor é:

$$-V_o = R_f \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} \right)$$

DAC – Estudo de caso

$$-V_o = R_f \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4}\right)$$

Portanto:

$$0{,}125 = R_f \cdot \left(\frac{1}{R_4}\right) \quad \therefore \quad R_f = 0{,}125 \cdot R_4$$

$$0{,}250 = R_f \cdot \left(\frac{1}{R_3}\right) \quad \therefore \quad R_f = 0{,}250 \cdot R_3$$

$$0{,}500 = R_f \cdot \left(\frac{1}{R_2}\right) \quad \therefore \quad R_f = 0{,}500 \cdot R_2$$

$$1{,}000 = R_f \cdot \left(\frac{1}{R_1}\right) \quad \therefore \quad R_f = 1{,}000 \cdot R_1$$

Representação binária	Representação decimal	-Vo
0000	0	**0,000**
0001	1	**0,125**
0010	2	**0,250**
0011	3	**0,375**
0100	4	**0,500**
0101	5	**0,650**
0110	6	**0,750**
0111	7	**0,875**
1000	8	**1,000**
1001	9	**1,125**
1010	10	**1,250**
1011	11	**1,375**
1100	12	**1,500**
1101	13	**1,650**
1110	14	**1,750**
1111	15	**1,875**
4 bits	$\mathbf{2^4 - 1 = 15}$	

DAC – Estudo de caso

Se $R_f = 10K\Omega$, então:

$$R_f = 0{,}125 \cdot R_4 \quad \therefore \quad R_4 = 80K\Omega$$

$$R_f = 0{,}250 \cdot R_3 \quad \therefore \quad R_3 = 40K\Omega$$

$$R_f = 0{,}500 \cdot R_2 \quad \therefore \quad R_2 = 20K\Omega$$

$$R_f = 1{,}000 \cdot R_1 \quad \therefore \quad R_1 = 10K\Omega$$

Se $R_f = 5K\Omega$, então:

$$R_f = 0{,}125 \cdot R_4 \quad \therefore \quad R_4 = 40K\Omega$$

$$R_f = 0{,}250 \cdot R_3 \quad \therefore \quad R_3 = 20K\Omega$$

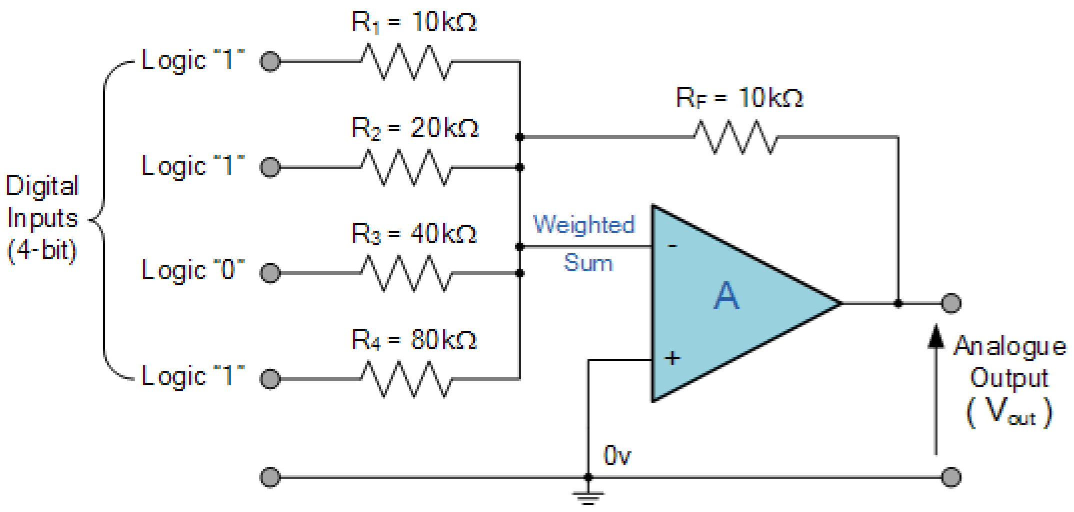
$$R_f = 0{,}500 \cdot R_2 \quad \therefore \quad R_2 = 10K\Omega$$

$$R_f = 1{,}000 \cdot R_1 \quad \therefore \quad R_1 = 5K\Omega$$

Representação binária	Representação decimal	-Vo
0000	0	0,000
0001	1	0,125
0010	2	0,250
0011	3	0,375
0100	4	0,500
0101	5	0,650
0110	6	0,750
0111	7	0,875
1000	8	1,000
1001	9	1,125
1010	10	1,250
1011	11	1,375
1100	12	1,500
1101	13	1,650
1110	14	1,750
1111	15	1,875
4 bits	$\mathbf{2^4 - 1 = 15}$	

DAC – Estudo de caso

Note que temos um padrão:
R1 é o peso do bit mais significativo, uma vez definido o valor de R1, os demais são o dobro do bit menos significativo (ver imagem ao lado)



Neste caso Rf = R1 pois os níveis lógicos são **1V** e **0V**

A resolução pode ser calculada por:

$$V_{min} = V_4 \cdot \left(\frac{R_f}{R_4}\right) = 1 \cdot \left(\frac{10K}{80K}\right) = 0{,}125V$$

De forma genérica:

$$\boldsymbol{V_{min} = V_i \cdot \left(\frac{R_f}{2^{nbits-1} \cdot R}\right)}$$

Onde **R** é o valor da resistência **mais significativa** e $\boldsymbol{V_i}$ tensão que representa o **valor lógico alto**

DAC – Estudo de caso

Concluímos que quanto maior o número de bits menor a mínima variação, ou seja, maior a resolução do sinal.

Também podemos manipular o valor máximo de tensão (representado por 1111), alterando o valor da resistência de Rf. Notem que quanto maior o valor máximo de tensão, maior do degrau da mínima variação de tensão.

Na tabela anterior o máximo valor de –Vo é 1,875V, esse valor varia uniformemente de 0 a 1,875V em 15 degraus. Se dividirmos o número de degraus (representação decimal), pelo valor máximo de tensão, obtemos novamente o valor da mínima variação de tensão:

$$\boldsymbol{V_{min} = V_i \cdot \left(\frac{R_f}{2^{nbits-1} \cdot R}\right)}$$

ou

$$\boldsymbol{\frac{1,875V}{15} = 0,125V}$$

O valor 15 é a representação decimal de 1111, ou:

$$2^{nbits} - 1$$

DAC – Estudo de caso

$$\boldsymbol{V_{min} = V_i \cdot \left(\frac{R_f}{2^{nbits-1} \cdot R}\right)}$$

$$\boldsymbol{\frac{1,875V}{15} = 0,125V}$$

O valor 15 é a representação decimal de 1111, ou:

$$2^{nbits} - 1$$

$$\frac{V_{max}}{2^{nbits} - 1} = V_i \cdot \left(\frac{R_f}{2^{nbits-1} \cdot R}\right)$$

$$\boldsymbol{R_f = \frac{V_{max} \cdot \left(2^{nbits-1} \cdot R\right)}{2^{nbits} - 1} \cdot \frac{1}{V_i}}$$

Primeiras configurações de AmpOp

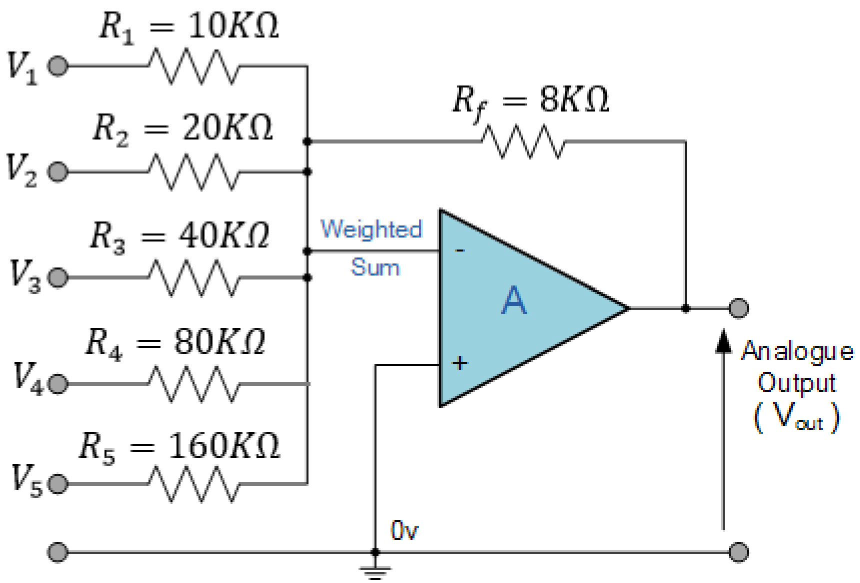
Exercício: Projete um DAC com 5 bits que cobre um intervalo de tensão de 0 a 7,75V. Os valores de tensão para a entrada assumem os valores 0 ou 5V. Considere que a resistência do bit mais significativo é igual a 10K.

Representação binária	Representação decimal	-Vo
00000	0	0,000
00005	1	0,250
00050	2	0,500
00055	3	0,750
00500	4	1,000
...	...	...
55505	29	7,250
55550	30	7,500
55555	31	7,750

Primeiras configurações de AmpOp

Exercício: Projete um DAC com 5 bits que cobre um intervalo de tensão de 0 a 7,75V. Os valores de tensão para a entrada assumem os valores 0 ou 5V. Considere que a resistência do bit mais significativo é igual a 10K.

$$v_{max} = 7,75V \qquad v_i = 5V \qquad n_{bits} = 5 \qquad R_1 = 10K\Omega$$



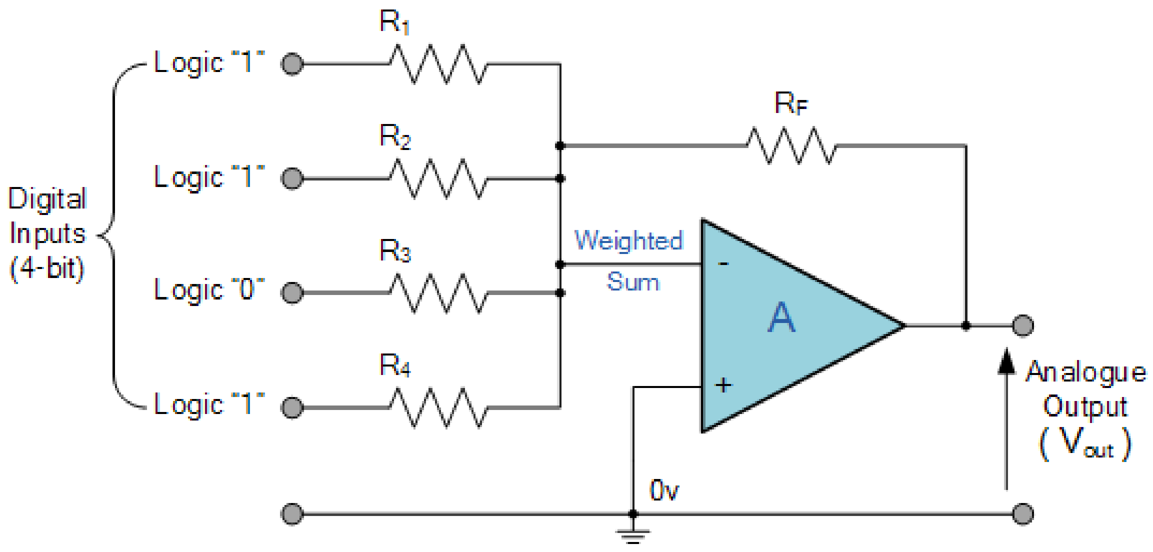
Representação binária	Representação decimal	-Vo
00000	0	0,000
00005	1	0,250
00050	2	0,500
00055	3	0,750
00500	4	1,000
...	...	...
55505	29	7,250
55550	30	7,500
55555	31	7,750

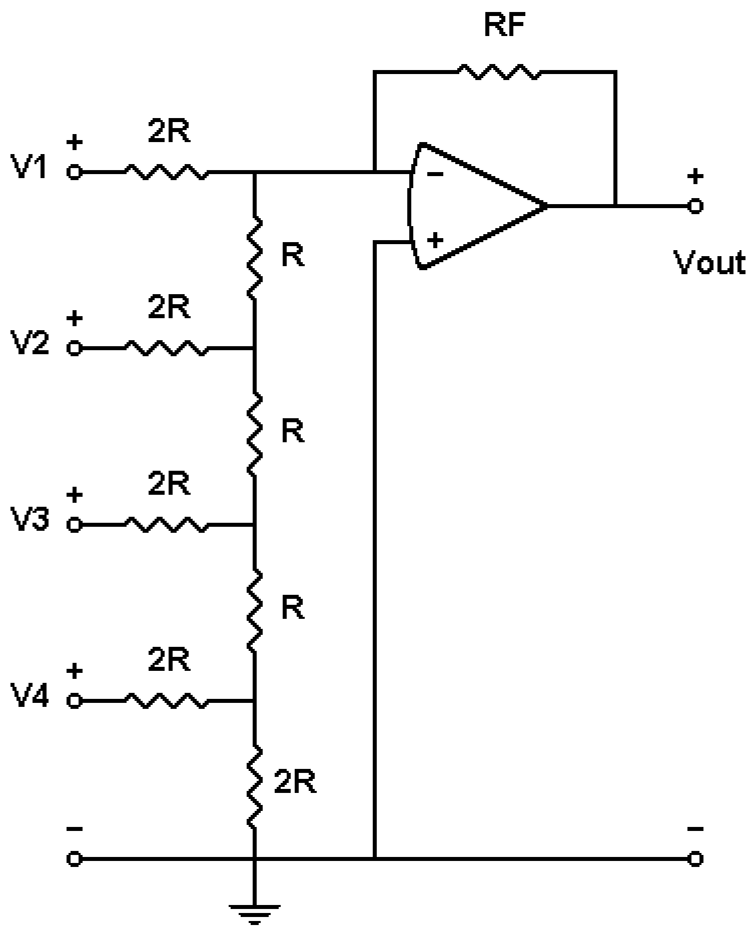
Ps. O uso da fórmula é desnecessário, use a lógica

$$R_f = \frac{V_{max} \cdot \left(2^{nbits-1} \cdot R\right)}{2^{nbits} - 1} \cdot \frac{1}{V_i} = \frac{7,75 \cdot \left(2^{5-1} \cdot 10 \cdot 10^3\right)}{2^5 - 1} \cdot \frac{1}{5} = 8K\Omega$$

DAC – Estudo de caso

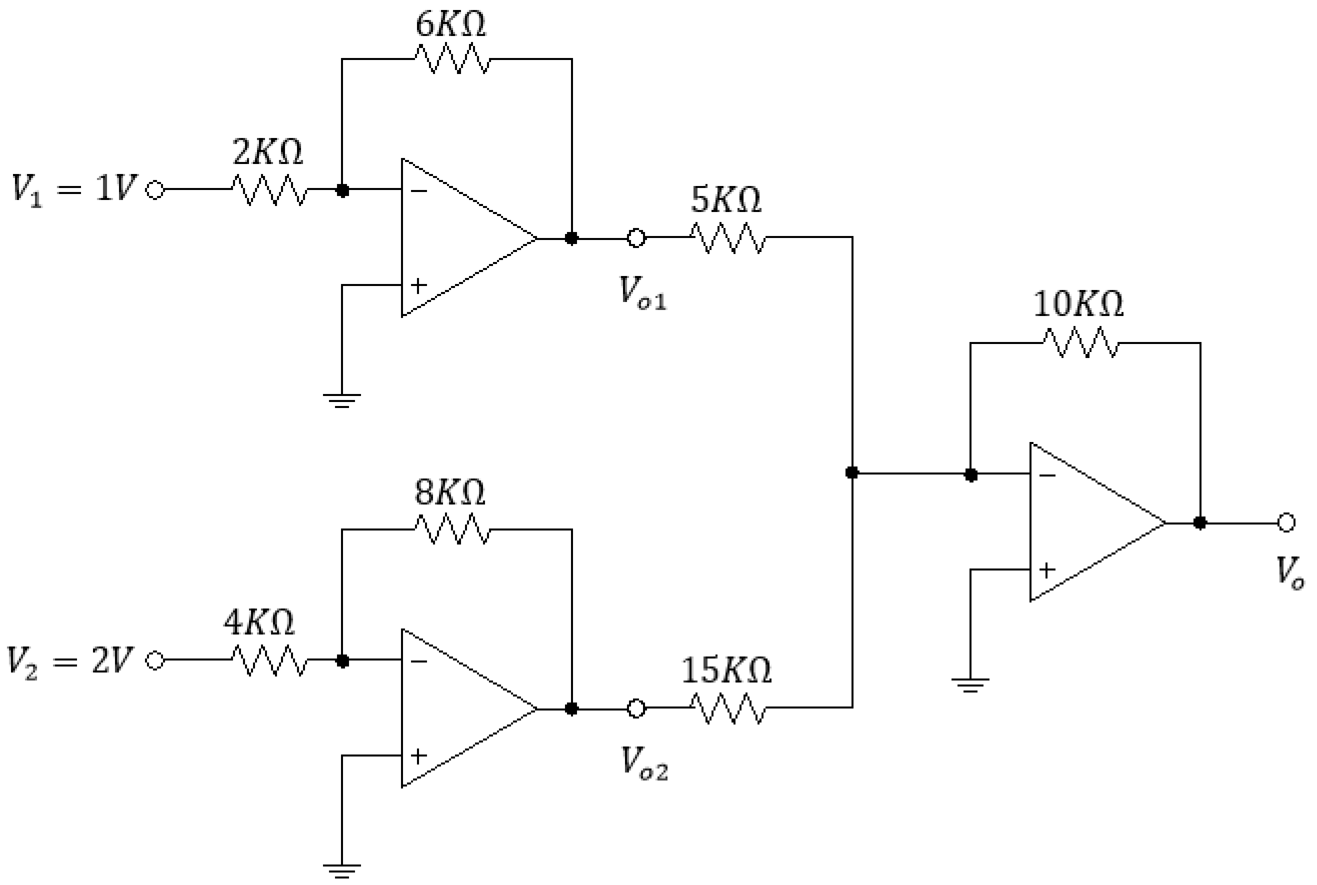
Prove a equivalência das configurações DAC





Exercícios – Cascata de AmpOps

Exercício: Identifique as configurações e calcule Vo.



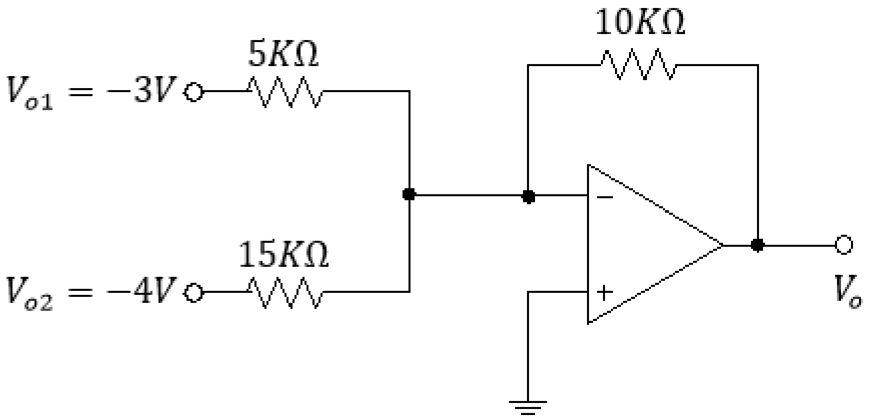
$$\boldsymbol{V_o = 8,67V}$$

Exercícios – Cascata de AmpOps

Neste exercício temos duas configurações de amplificadores inversores e uma de somador inversor

$$V_{o1} = -\frac{R_f}{R_g} \cdot V_{g1} = -\frac{6 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot 1 = -3V$$

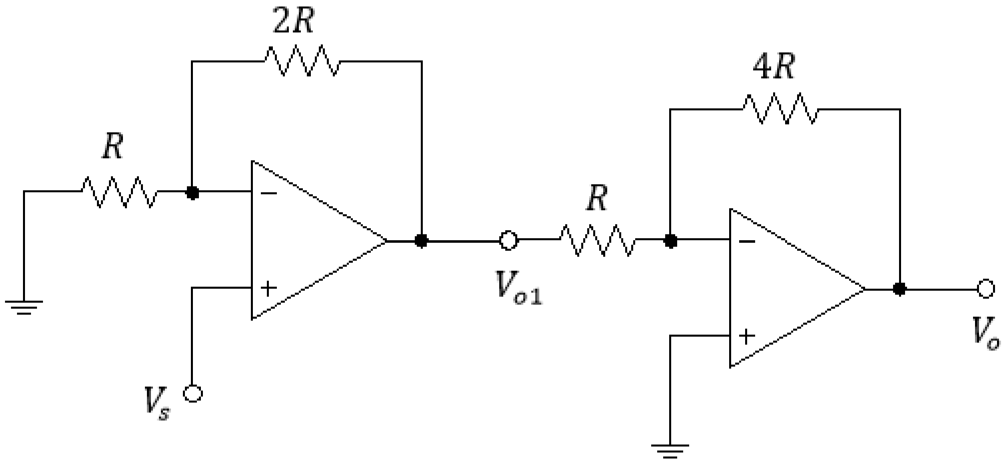
$$V_{o2} = -\frac{R_f}{R_g} \cdot V_{g2} = -\frac{8 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} \cdot 2 = -4V$$



$$\boldsymbol{V_o = -10 \cdot 10^3 \left(\frac{-3}{5 \cdot 10^3} + \frac{-4}{15 \cdot 10^3}\right) = 8,67V}$$

Exercícios – Cascata de AmpOps

Exercício: Determine o ganho de tensão Vo/Vs e simplifique a cascata.



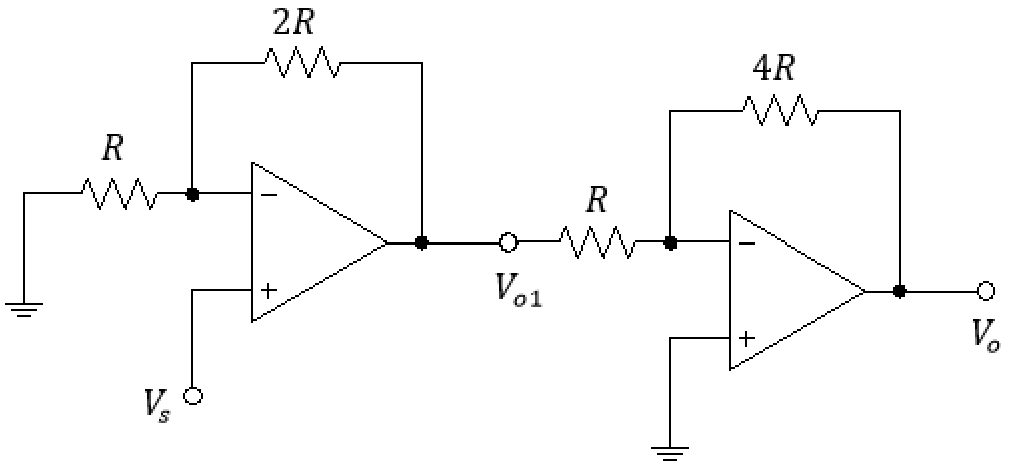
$$ganho = \frac{V_{saida}}{V_{entrada}} = -12$$

Exercícios – Cascata de AmpOps

Neste exemplo temos uma configuração de amplificador não inversor e uma de amplificador inversor.

$$V_{o1} = V_s \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) = V_s \cdot \left(1 + \frac{2R}{R}\right)$$

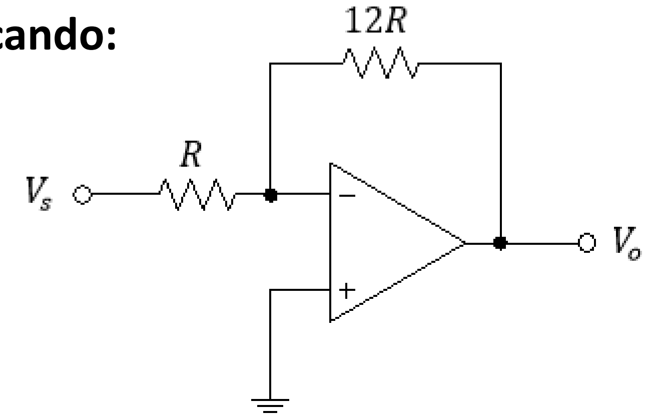
$$V_{o1} = 3 \cdot V_s$$



$$V_o = -V_{o1} \cdot \frac{R_f}{R_s} = -3 \cdot V_s \cdot \frac{4R}{R} =$$

$$V_o = -12 \cdot V_s$$

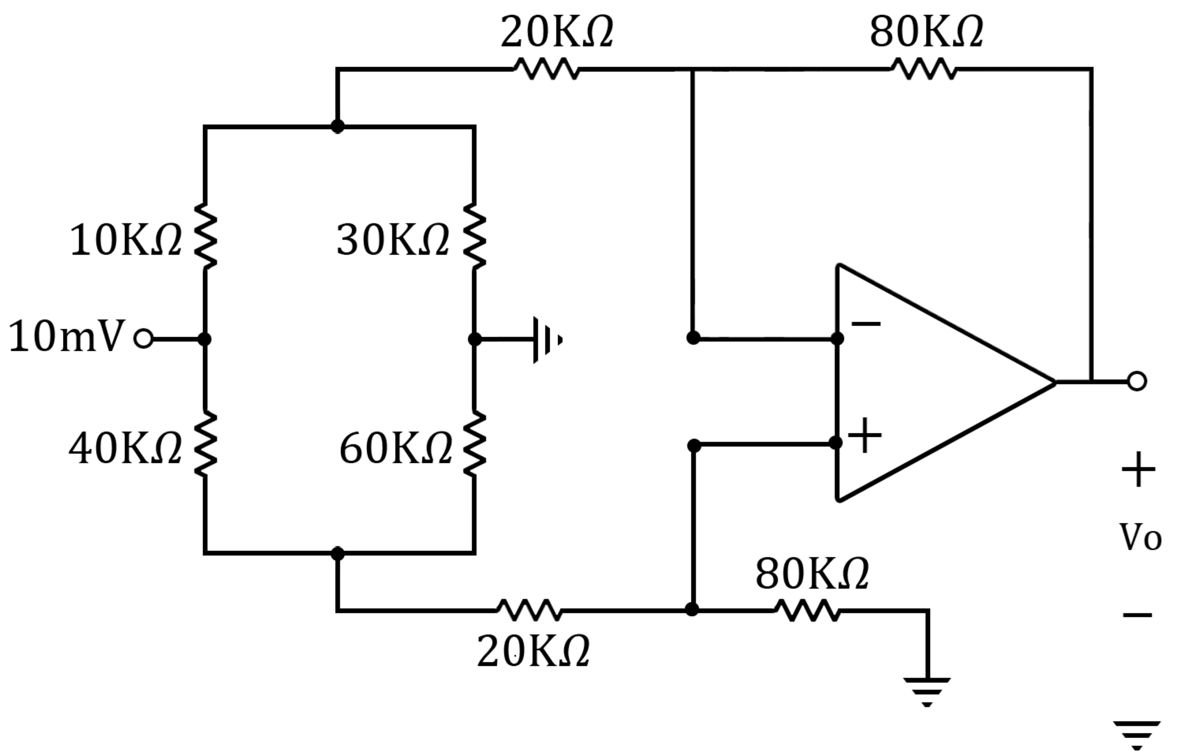
Simplificando:



$$\boldsymbol{ganho = \frac{V_{saida}}{V_{entrada}} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{-12 \cdot V_s}{V_s} = -12}$$

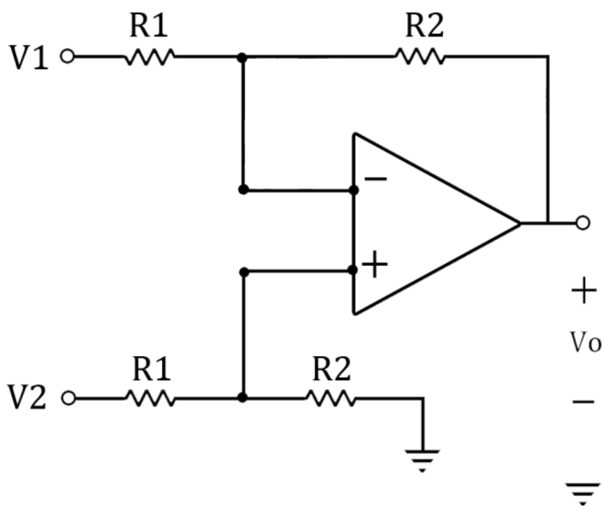
Exercício

Exercício: O circuito abaixo é um amplificador da diferença acionado por uma ponte. Determine Vo
Exercício 5.48 – Sadiku 5ed



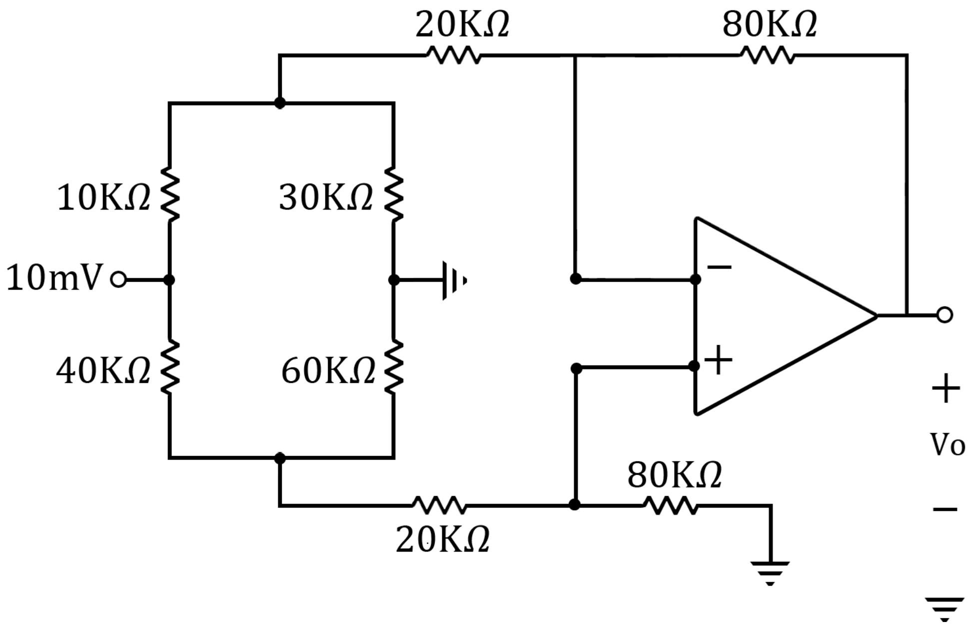
$$V_o = -6,68mV$$

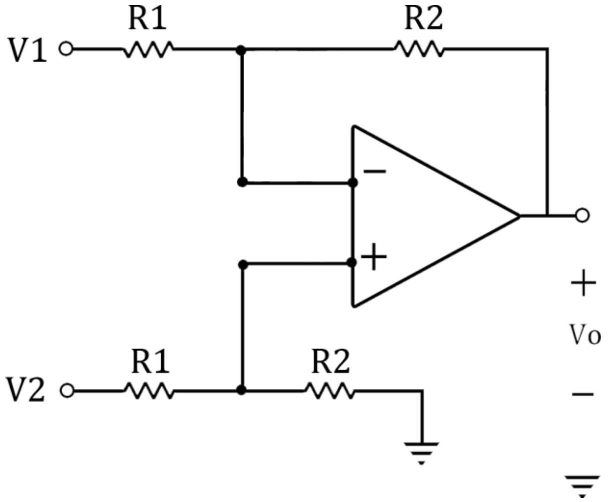
Dica



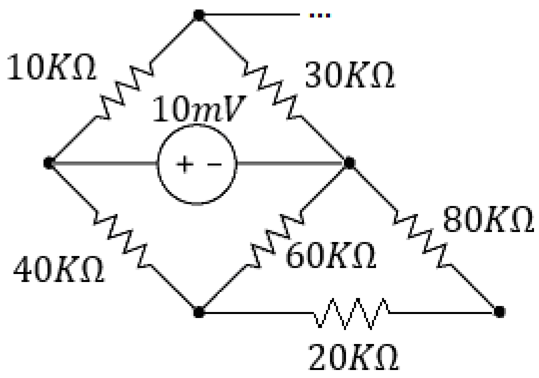
$$V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$$

Exercício





Note que V2 pode ser calculado se associarmos os resistores de da parte inferior do circuito.

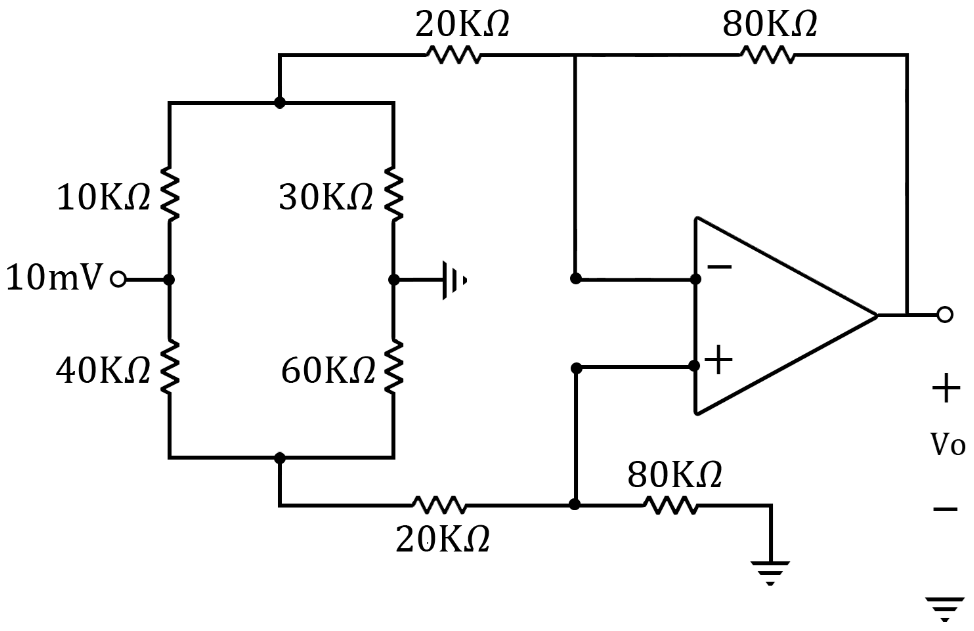


$$R_{eq} = (80\text{K} + 20\text{K})||60K = 37{,}5K\Omega$$

$$V_2 = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 37{,}5 \cdot 10^3}{37{,}5 \cdot 10^3 + 40 \cdot 10^3} = 4{,}84\text{mV}$$

$$V_p = \frac{4{,}84 \cdot 10^{-3} \cdot 80 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 80 \cdot 10^3} = 3{,}87\text{mV}$$

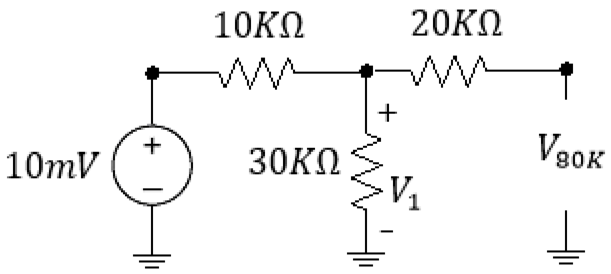
Exercício



$$\frac{V_1 - 10 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3} + \frac{V_1}{30 \cdot 10^3} + \frac{V_1 - V_n}{20 \cdot 10^3} = 0$$

$$\frac{V_1 - 10 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3} + \frac{V_1}{30 \cdot 10^3} + \frac{V_1 - 3{,}87 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^3} = 0$$

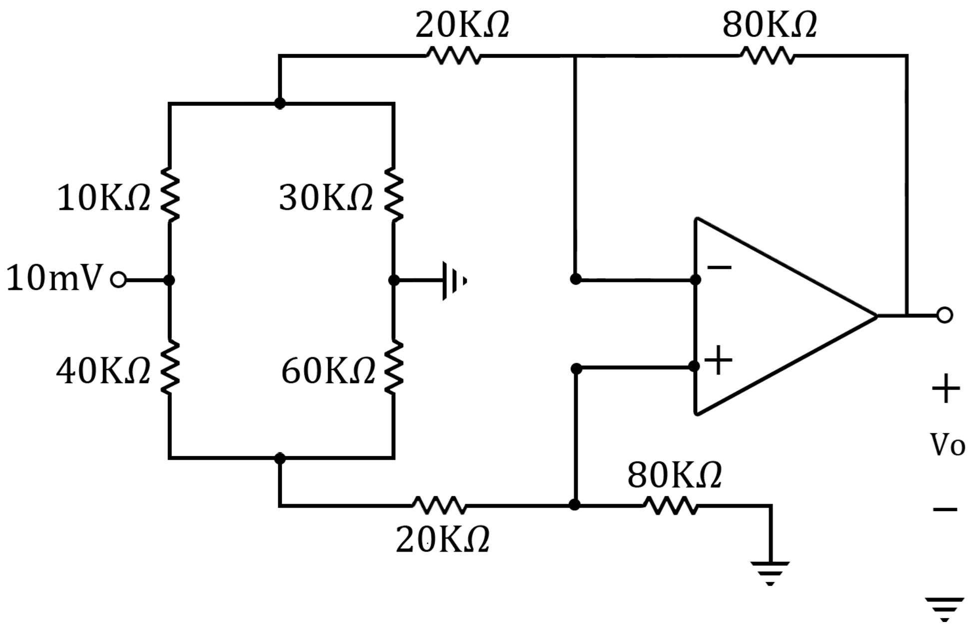
Sabemos que $V_p = V_n = 3{,}87mV$

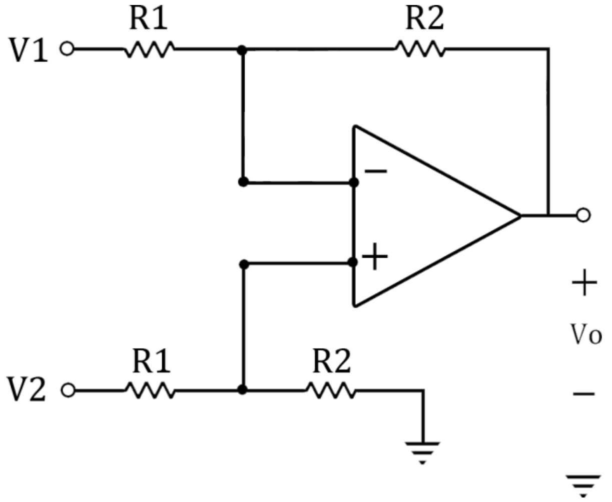


$$V_1\left(\frac{1}{10K} + \frac{1}{30K} + \frac{1}{20K}\right) = \frac{10m}{10K} + \frac{3{,}87m}{20K}$$

$$V_1 = 6{,}51mV$$

Exercício





$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

$$\boldsymbol{V_o = \frac{80 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot \left(4,84 \cdot 10^{-3} - 6,51 \cdot 10^{-3}\right) = -6,68mV}$$