



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Docente: Rildo Afonso de Almeida

XXXVIII Semana Acadêmica de Engenharia Elétrica

Mini Curso Amplificadores Operacionais



O Amplificador Operacional – 1ª Etapa

- Breve Histórico
- Definição
- Estágios de um OPAMP típico
- Símbolo esquemático
- Circuito Equivalente
- Aspecto físico do componente
- Os pinos do 741
- Características principais do 741
- Alimentação
- Duas opções de fonte simétrica
- Realimentação Negativa
- A Regra de Ouro para entender OPAMPs



O Amplificador Operacional

Breve Histórico

- ❖ Os OPAMPs surgiram na década de 1940 e eram valvulados;
- ❖ O primeiro OPAMP monolítico transistorizado foi criado pela Fairchild em 1963 e se chamava μ A702, bastante precário;
- ❖ Em 1965 a equipe chefiada por Robert Widlar na mesma Fairchild criou o μ A709, considerado o primeiro OPAMP realmente confiável disponível no mercado;
- ❖ A equipe de Widlar também é a responsável por criar o consagrado μ A741 em 1968, até hoje considerado um padrão industrial.
- ❖ A construção interna do 741 se dá por transistores bipolares de junção.
- ❖ Siglas comumente utilizadas para fazer referência a um “Amplificador Operacional”: AMPOP, AOP, OPAMP.



O Amplificador Operacional

Definição

Amplificador operacional consiste em um amplificador com entrada diferencial e vários estágios, que tem características muito próximas de um amplificador ideal:

- - Impedância de entrada muito alta;
- - Impedância de saída muito baixa;
- - Ganho muito elevado;
- - Resposta em frequência em banda larga;
- - Pouca sensibilidade à temperatura.

O Amplificador Operacional

Estágios de um OPAMP típico

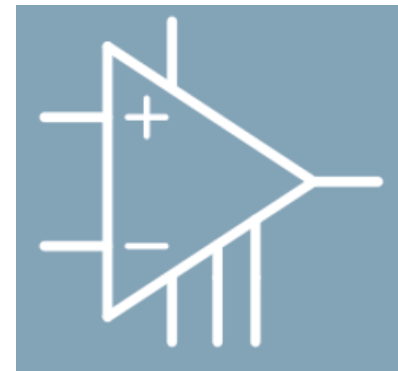
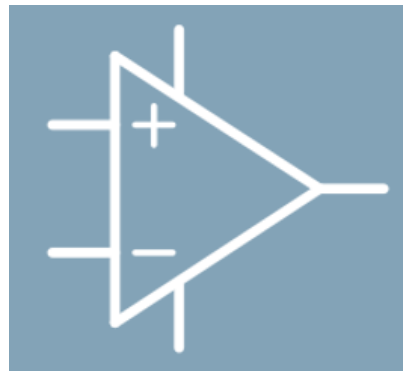
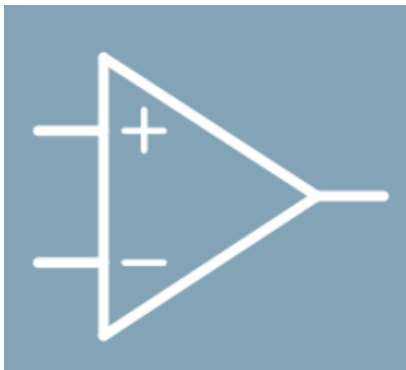


O Amplificador Operacional

Símbolo esquemático

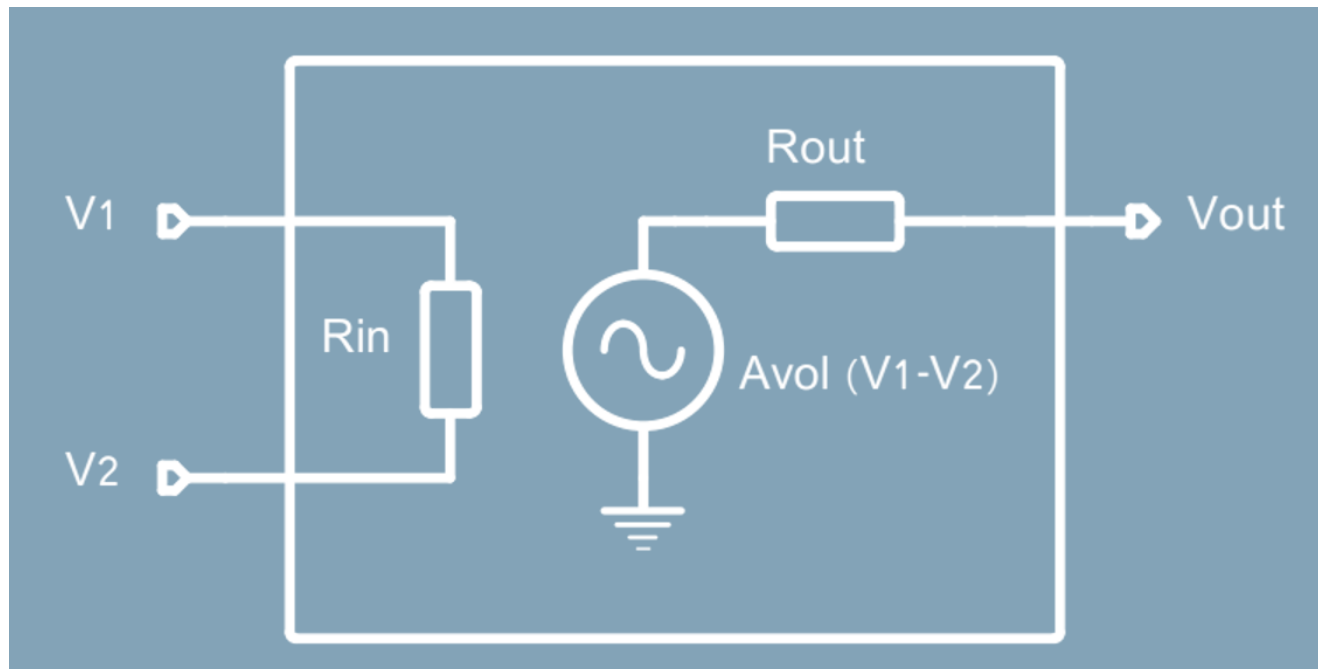
Apresenta o símbolo conforme as figuras abaixo.

- 3 terminais principais: entrada não inversora, entrada inversora e saída.
- Além dos pinos de alimentação, podem existir pinos de ajuste de offset.



O Amplificador Operacional

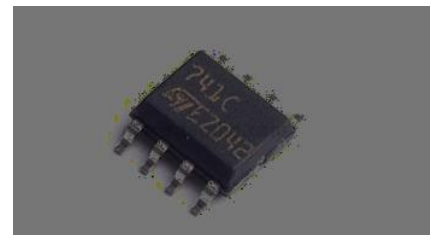
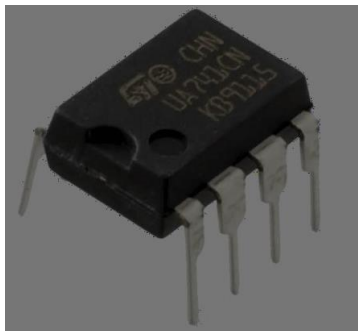
Circuito Equivalente



O Amplificador Operacional

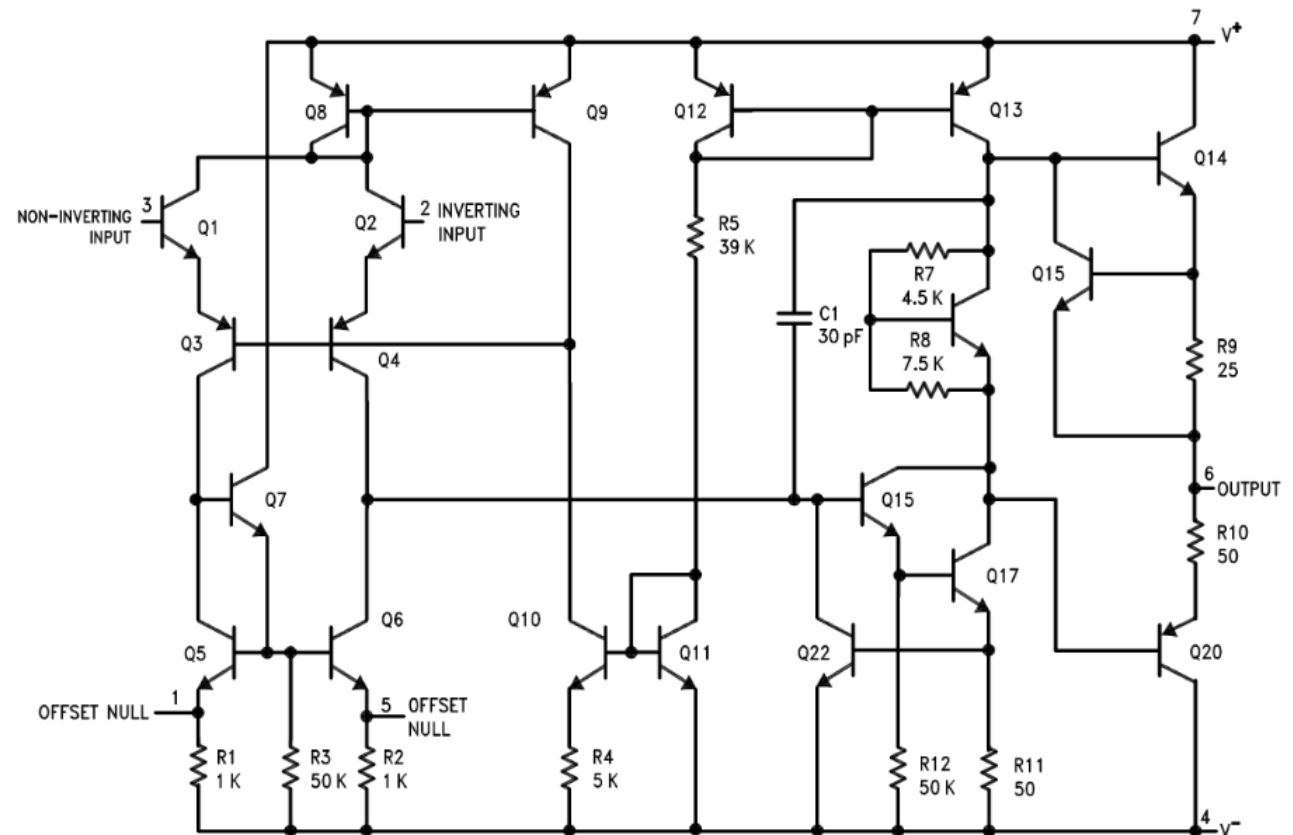
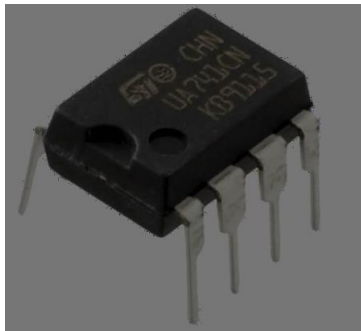
Aspecto físico do componente

- ▶ Você pode consultar o datasheet do fabricante sempre que estiver na dúvida sobre os pinos do OPAMP que for utilizar no projeto.
- ▶ Ao lado, o 741. Existem modelos que contém 2 OPAMPs em um único CI de 8 pinos, como por exemplo o NE5532.
- ▶ Também existem CIs com mais pinos, contendo 4 ou mais OPAMPs.



O Amplificador Operacional

Functional Block Diagram



O Amplificador Operacional

Letras antes do nome do OPAMP

- ▶ Por exemplo, todos os componentes a seguir são o mesmo 741:
- ▶ μ A741 (Fairchild);
- ▶ LM741 (National);
- ▶ MC741 (Motorola);
- ▶ CA741 (RCA);
- ▶ SN741 (Texas);
- ▶ AD741 (Analog Devices);
- ▶ SA741 (Signetics).

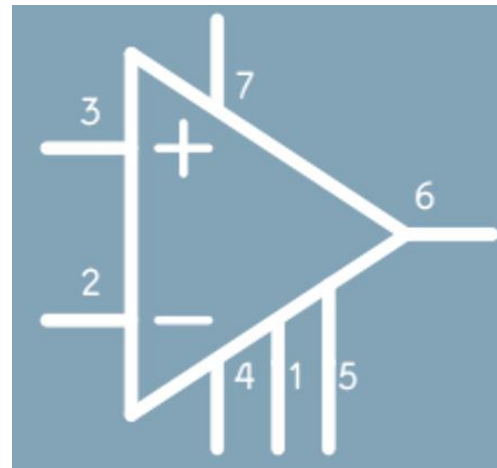


O Amplificador Operacional

Os pinos do 741

Conforme datasheet:

- ▶ 1: ajuste de offset
- ▶ 2: entrada inversora
- ▶ 3: entrada não inversora
- ▶ 4: alimentação negativa
- ▶ 5: ajuste de offset
- ▶ 6: saída
- ▶ 7: alimentação
- ▶ 8: sem conexão





O Amplificador Operacional

Características principais do 741

$$R_{IN} = 2M\Omega$$

$$R_{OUT} = 75\Omega$$

$$A_{VOL} = 100000$$

$$f_{unity} = 1MHz$$

$$CMRR = 90dB$$

(Taxa de rejeição do modo comum)



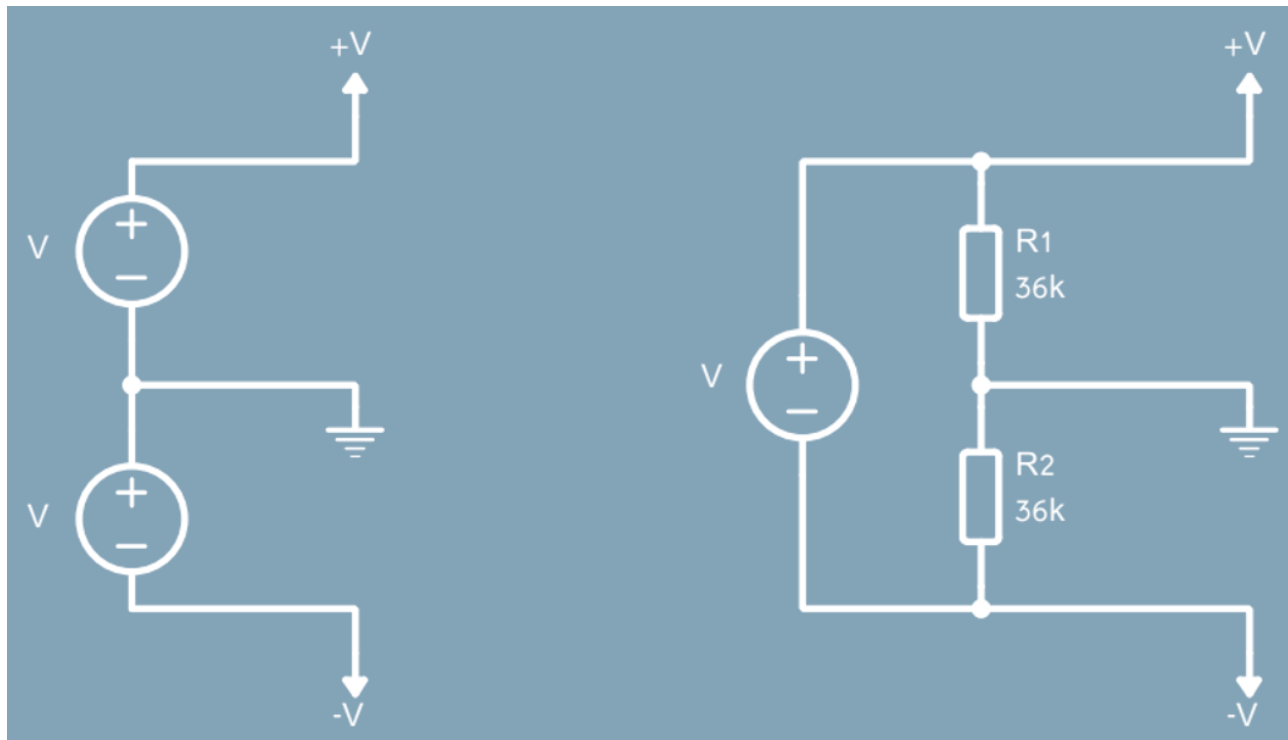
O Amplificador Operacional

Alimentação

- Em geral, os amplificadores operacionais funcionam com fonte simétrica, para poder excursionar os sinais nos ciclos positivos e negativos de tensão, dispensando o uso de capacitores de acoplamento no sinal.
- Existem modelos específicos para alimentação não simétrica e também alguns artifícios para utilizar um OPAMP convencional com fonte simples.
- Porém, em projetos sempre dê preferência para fonte simétrica, a menos que não seja necessário excursionar tensões negativas ou utilizar o amplificador no modo inversor.

O Amplificador Operacional

Duas opções de fonte simétrica





O Amplificador Buffer Realimentação Negativa

- ✓ Quando pegamos uma amostra de tensão da saída do OPAMP e inserimos na entrada inversora (que temos sinal de '-'), dizemos que o mesmo está com uma topologia em malha fechada e em realimentação negativa.
- ✓ Em outras palavras, existirá um caminho (seja por uma conexão direta, resistor ou outros componentes) entre a saída do OPAMP e a entrada inversora.
- ✓ Os modos de operação para amplificação de sinais, trabalham com realimentação negativa e na região linear.



O Amplificador Buffer

A Regra de Ouro para entender OPAMPs

Todo amplificador operacional que operar em malha fechada e realimentação negativa, estará fazendo todo o possível dentro dos seus limites para igualar a tensão em suas entradas.



O Amplificador Operacional – 2ª Etapa

➤ Apresentação da Ferramenta Simulador - SimulIDE

➤ O Amplificador Buffer

➤ O Buffer Analógico (seguidor de tensão)

➤ Divisor de tensão com carga

➤ Leitura de sensores

➤ Práticas

➤ O Amplificador Não Inversor

➤ Características do Amplificador Não Inversor

➤ Ganho de tensão de um Amplificador

➤ Topologia e equação para projeto

➤ Projeto de Amplificador Inversor

➤ Circuito Prático Amplificador Não Inversor



O Amplificador Operacional – 2ª Etapa

- **O Amplificador Inversor**
- Características do Amplificador Inversor
- Topologia e equação para projeto
- Projeto de Amplificador Inversor
- Circuito Prático Amplificador Inversor



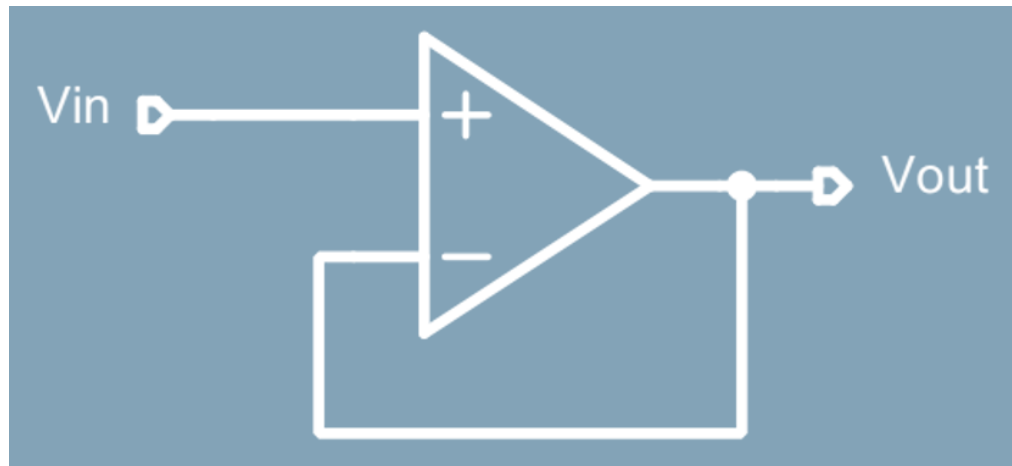
O Amplificador Operacional – 2ª Etapa

- **O Amplificador Somador**
- Características do Amplificador Somador
- Topologia e equação (somador não inversor)
- Circuito somador de duas entradas
- Circuito somador de três entradas
- Topologia e equação (somador inversor)
- Circuito somador inversor de duas entradas
- Prática – Somador de 3 entradas
- **O Amplificador Subtrator**
- Características do Amplificador Subtrator
- Topologia e equação do subtrator
- Prática - Subtrator

O Amplificador Buffer

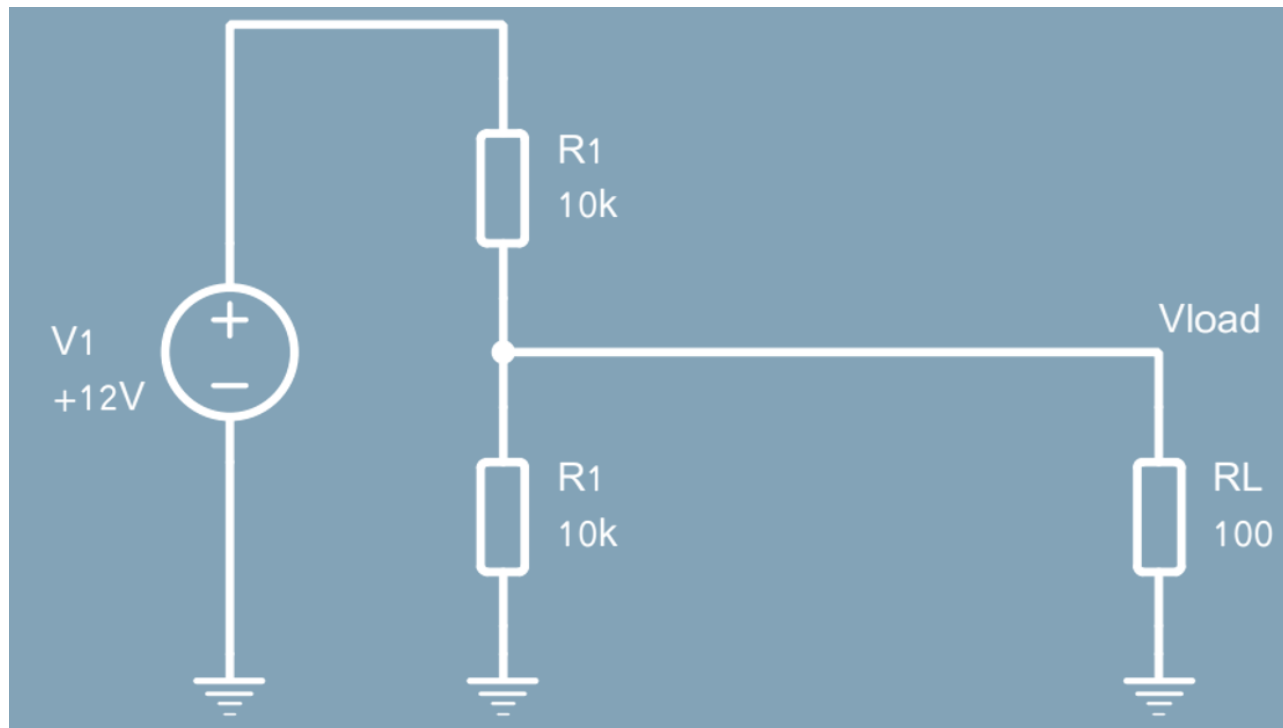
O Buffer Analógico (seguidor de tensão)

- ✓ Casamento impedância;
- ✓ Reforço de um sinal;
- ✓ Isolamento de estágios;
- ✓ Acionamento de cargas;
- ✓ Leitura de sensores.



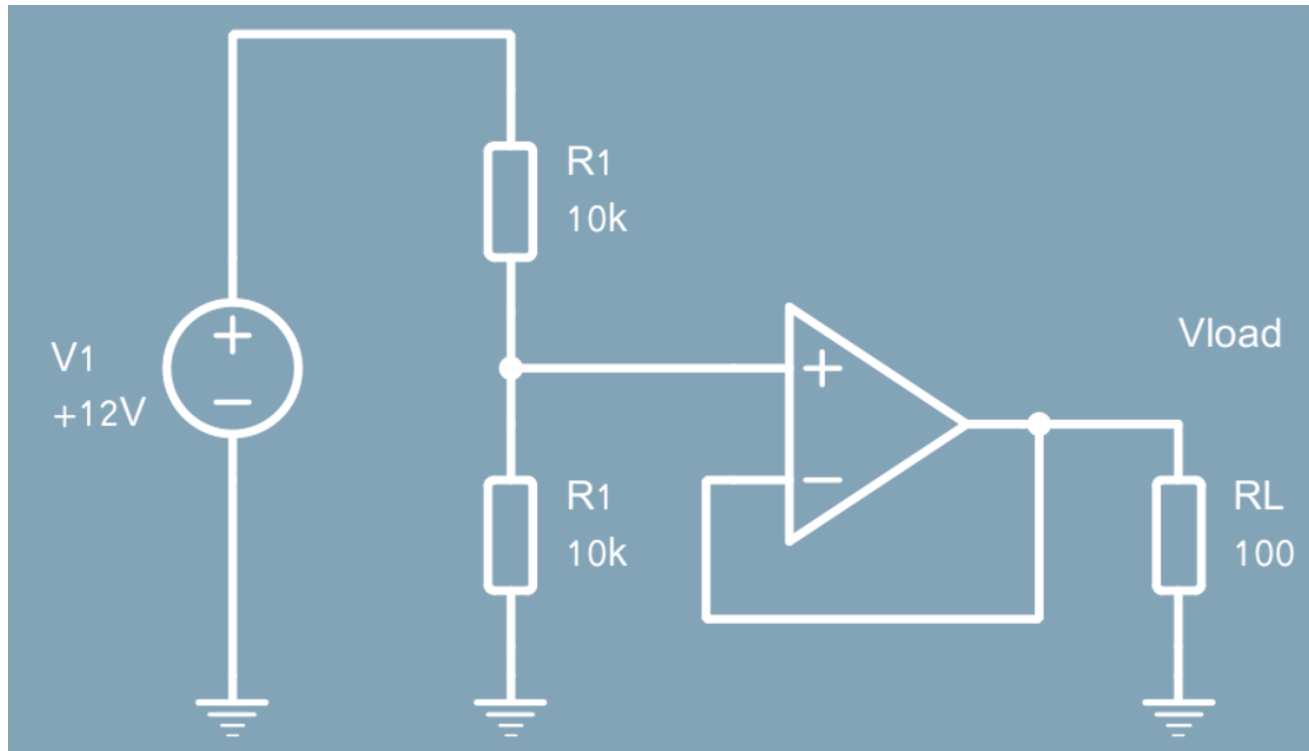
O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



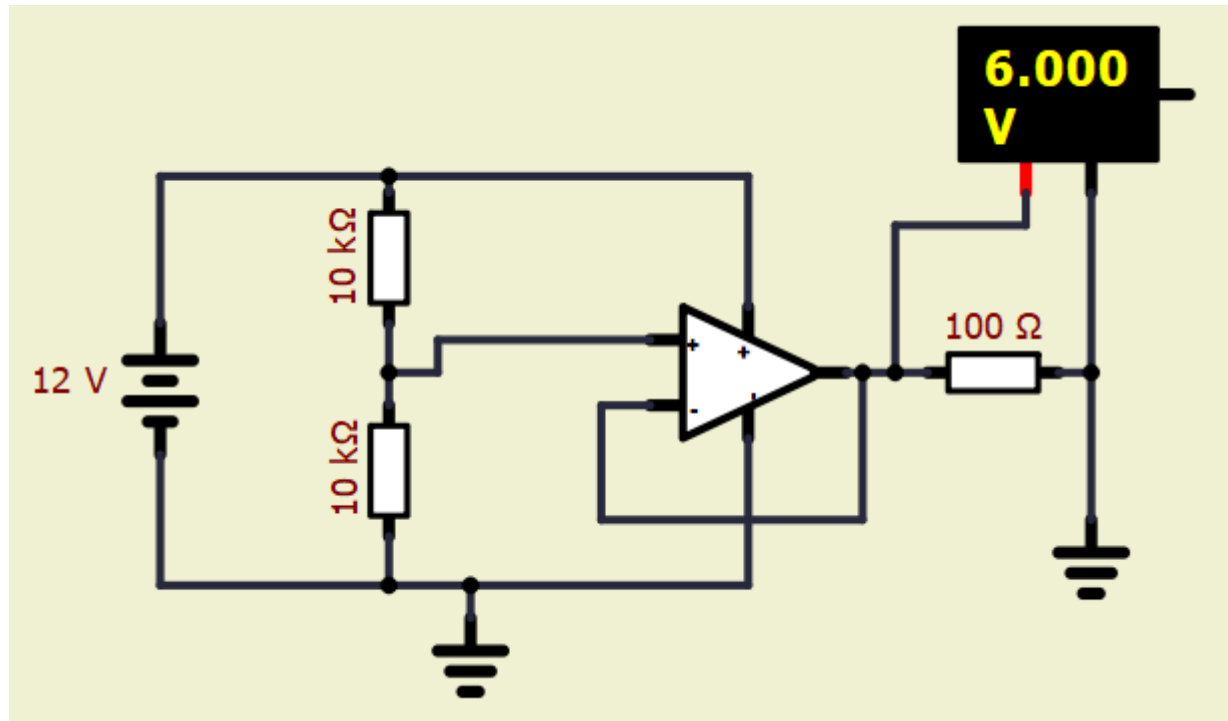
O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



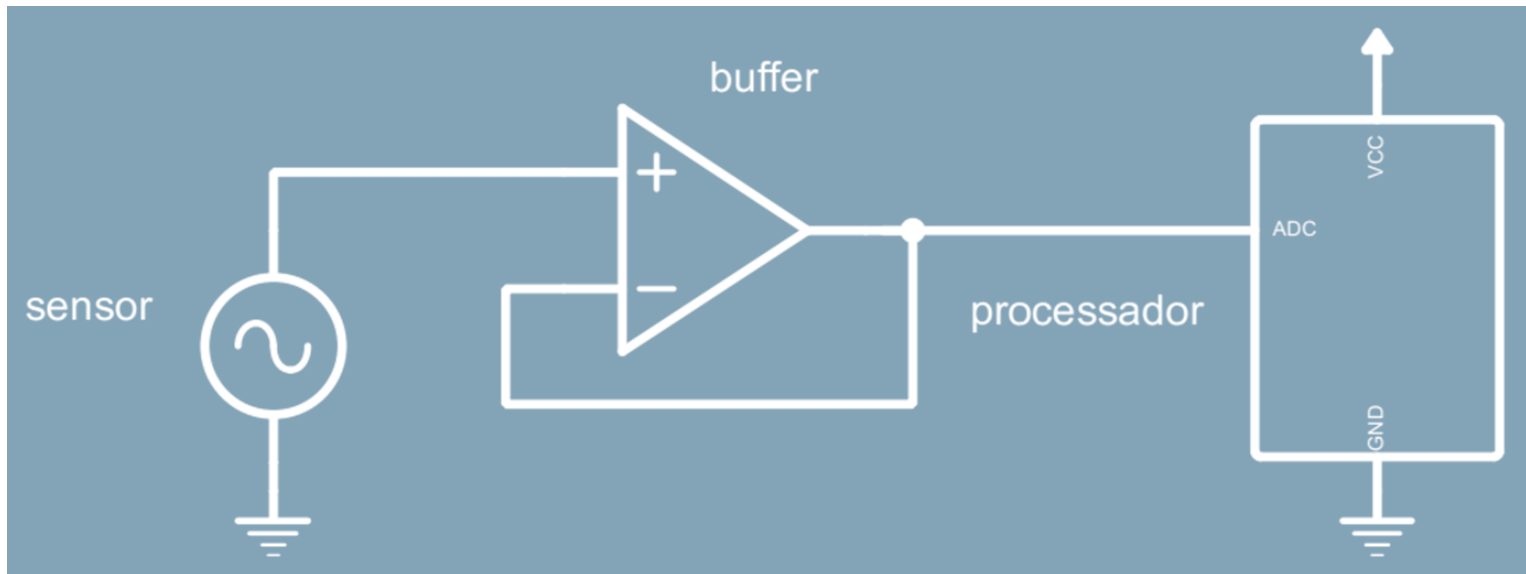
O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



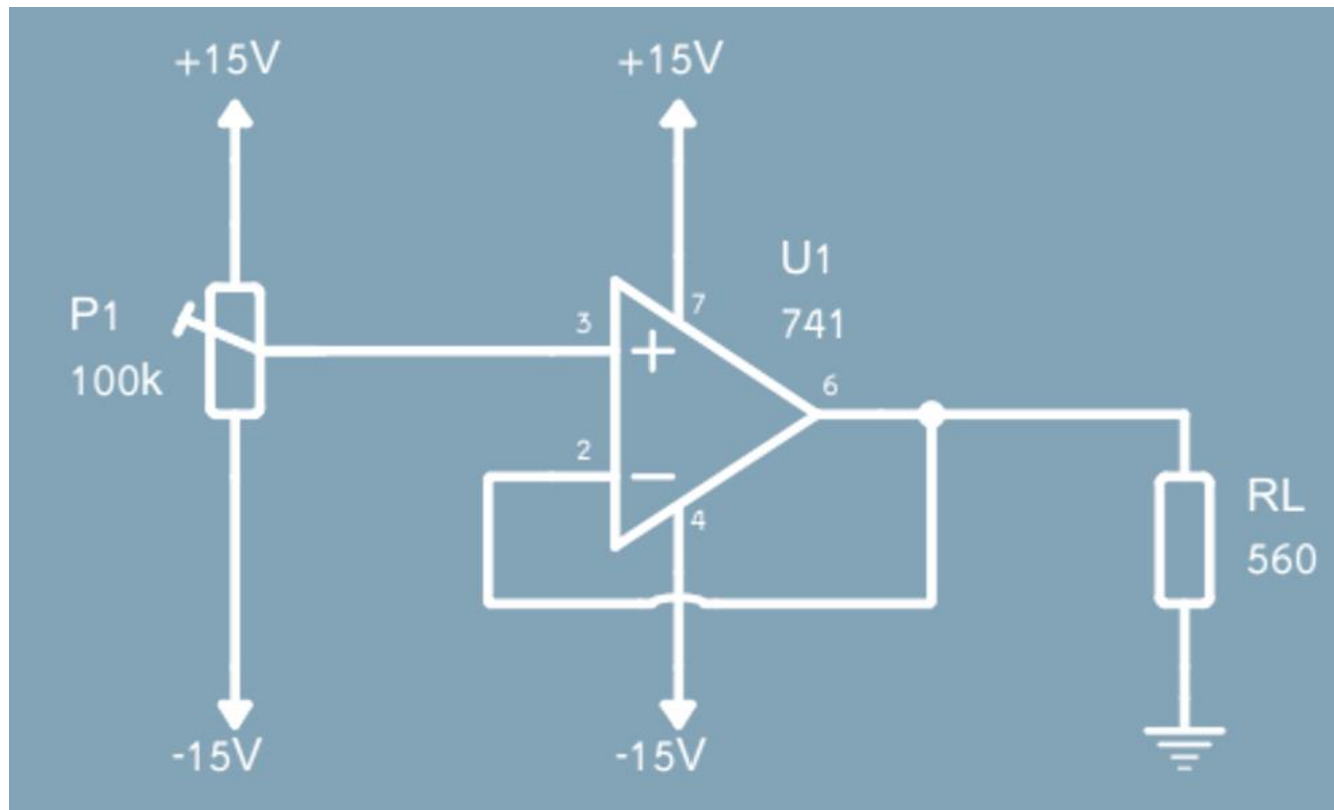
O Amplificador Buffer

Leitura de sensores



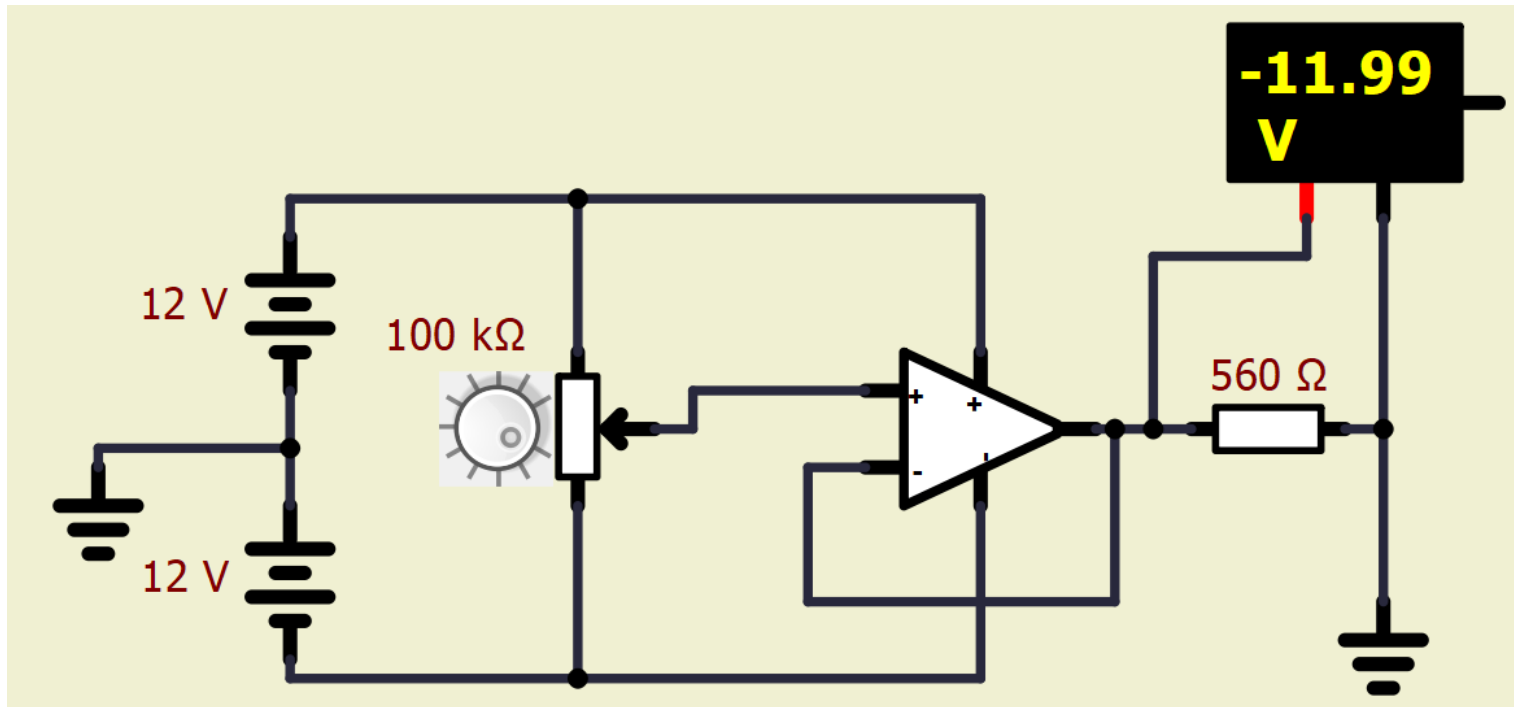
O Amplificador Buffer

Prática 1



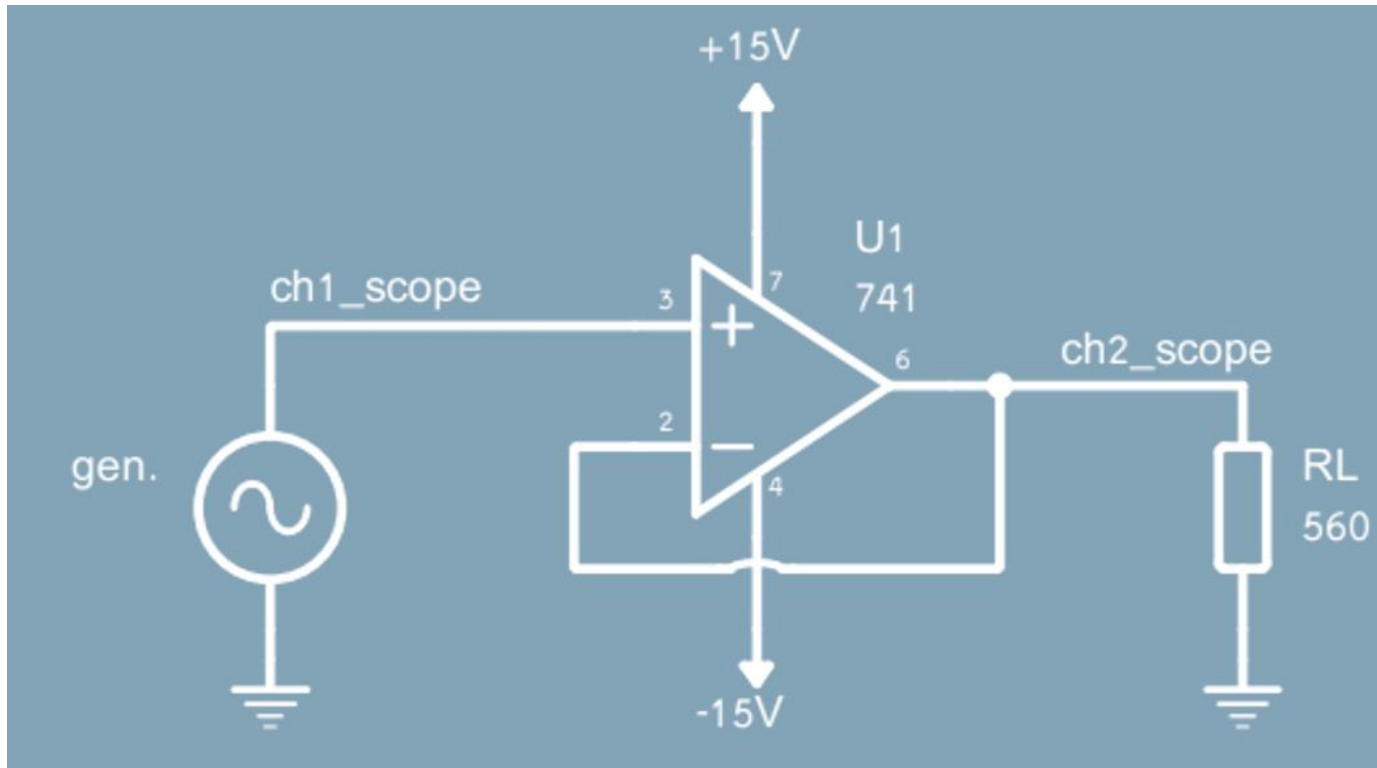
O Amplificador Buffer

Prática 1



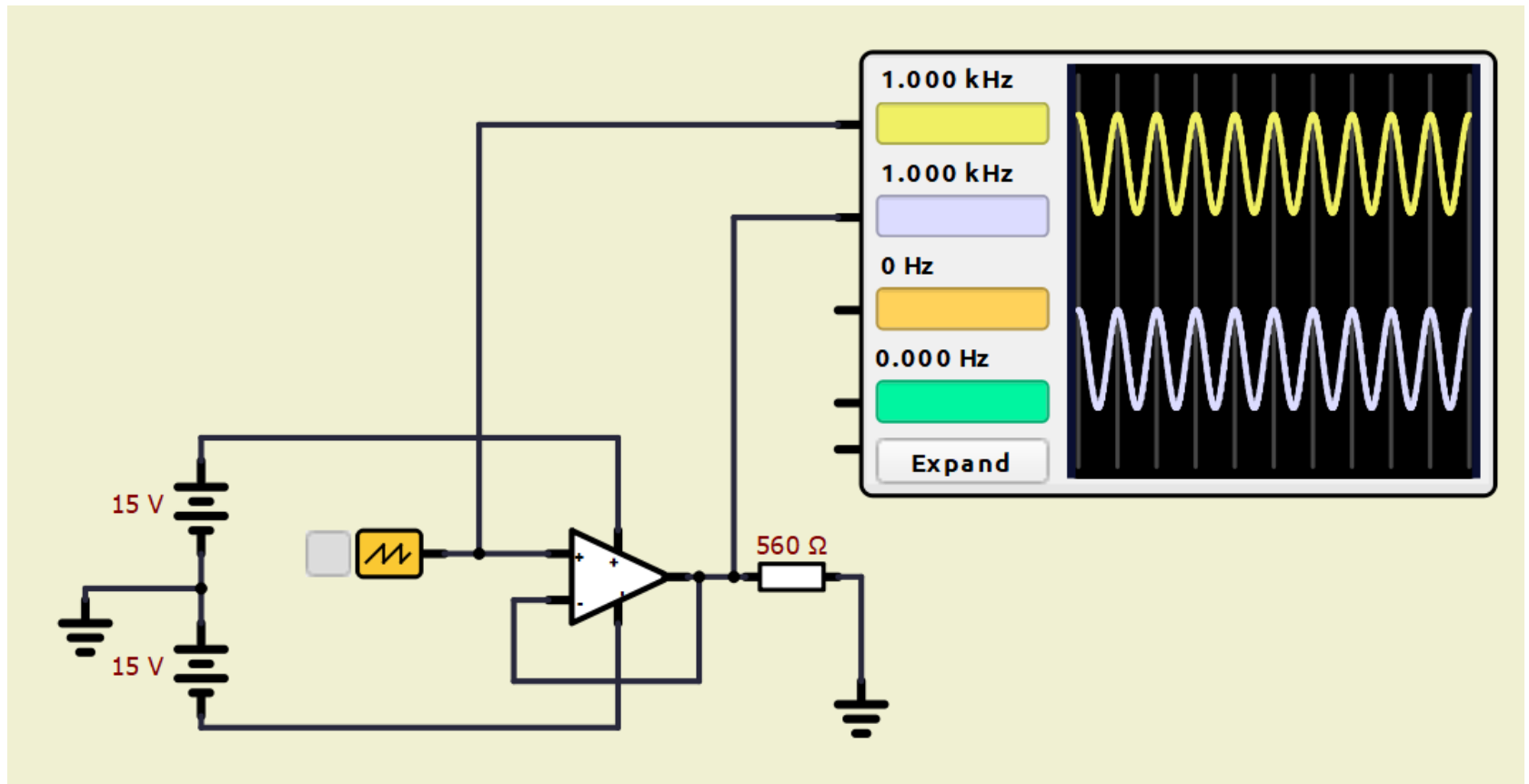
O Amplificador Buffer

Prática 2



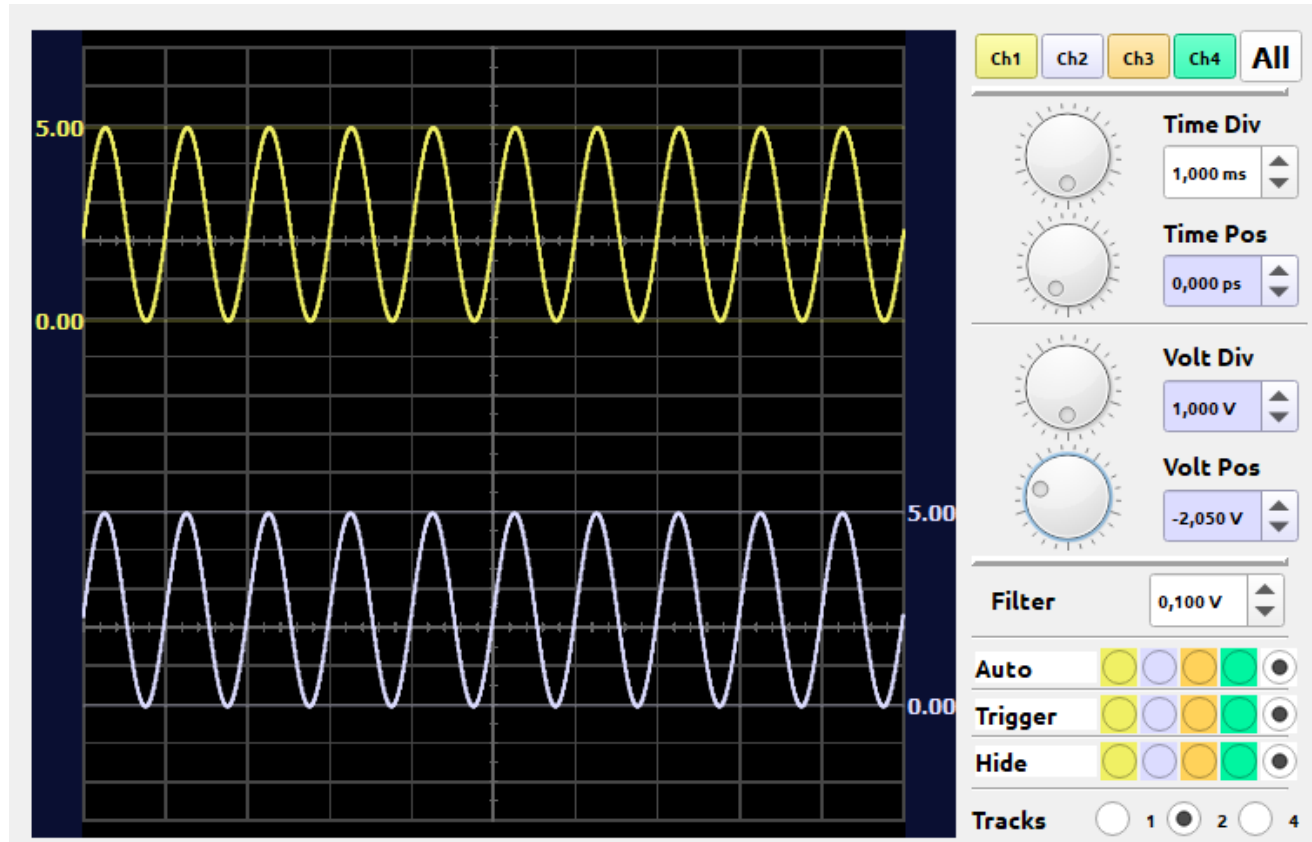
O Amplificador Buffer

Prática 2



O Amplificador Buffer

Prática 2





O Amplificador Operacional

O Amplificador Não Inversor



O Amplificador Operacional

Características do Amp. Não Inversor

- ▶ Alta impedância de entrada (igual ao valor de R_{in} do próprio OPAMP);
- ▶ Baixa impedância de saída;
- ▶ Não defasa o sinal;
- ▶ O ganho sempre será maior que 1.



O Amplificador Operacional

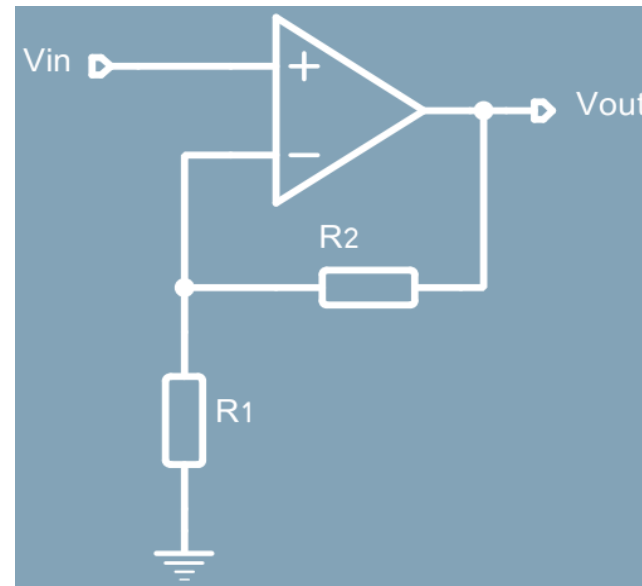
Ganho de tensão de um Amp.

- ▶ É a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada do circuito.

O Amplificador Operacional

Topologia e equação para projeto

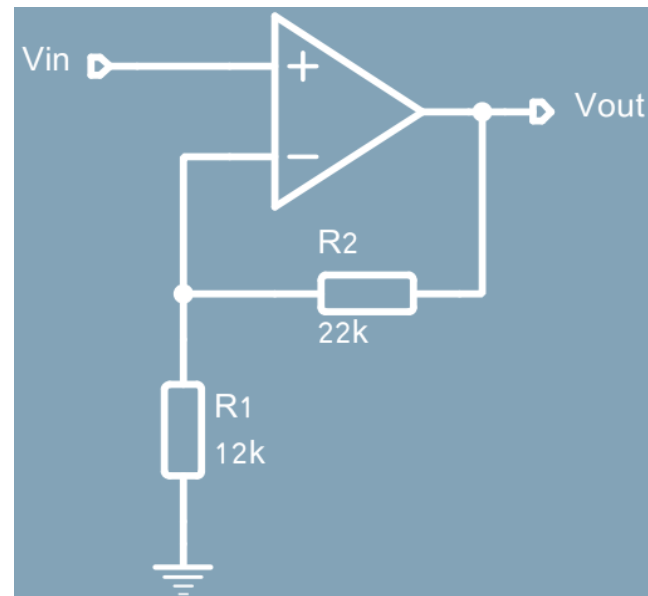
- ▶ $A_V = \frac{R_2}{R_1} + 1$
- ▶ $R_2 = A_V - 1 \times R_1$
- ▶ $R_1 = \frac{R_2}{A_V - 1}$



O Amplificador Operacional

Calculando o ganho

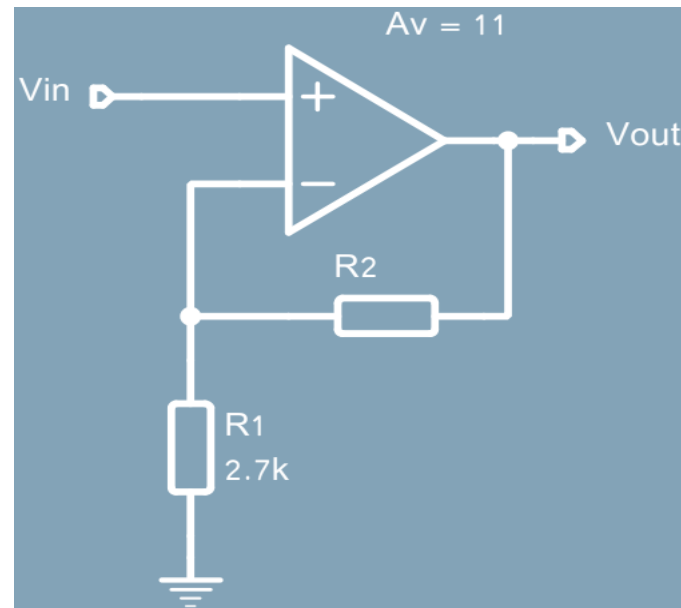
- ▶ $A_V = \frac{R_2}{R_1} + 1$
- ▶ $A_V = \frac{22000}{12000} + 1$
- ▶ $A_V = 2,8333$



O Amplificador Operacional

Calculando o valor de R2

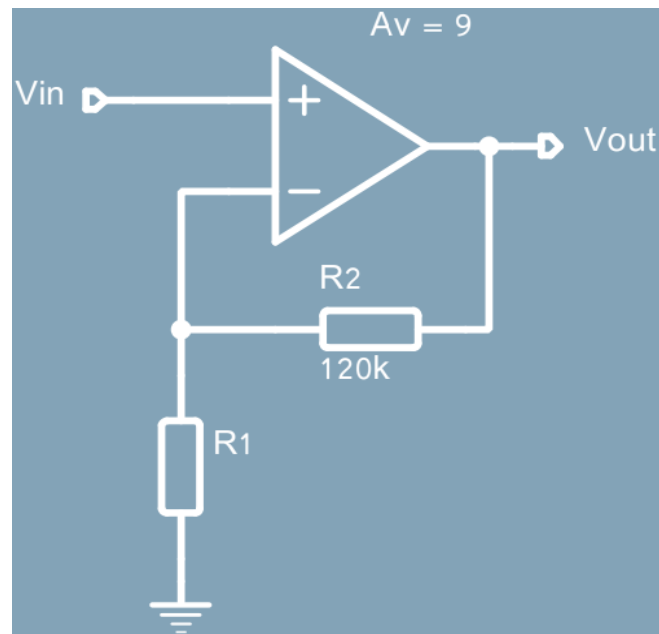
- ▶ $R_2 = A_V - 1 \times R_1$
- ▶ $R_2 = 11 - 1 \times 2700$
- ▶ $R_2 = 27k\Omega$



O Amplificador Operacional

Calculando o valor de R1

- ▶ $R_1 = \frac{R_2}{A_v - 1}$
- ▶ $R_1 = \frac{120000}{9 - 1}$
- ▶ $R_1 = 15k\Omega$





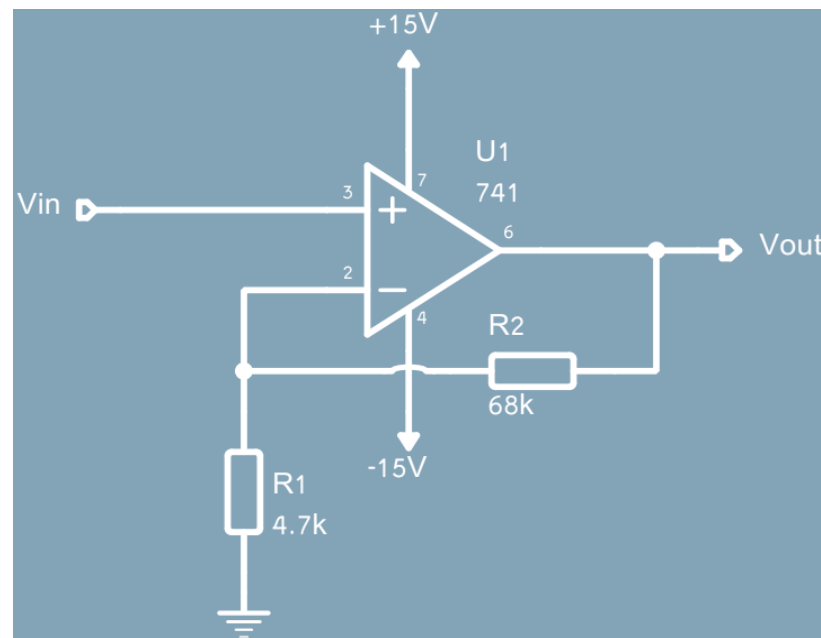
O Amplificador Operacional

Projeto de Amplificador Não Inversor

- ▶ Projete um amplificador na topologia não inversora, que contenha um ganho próximo de 15 e uma impedância de entrada elevada. O sinal de saída deverá excursionar de
 - ▶ -12V a +12V.
- ▶ Arbitraremos um valor para R2 e calcularemos R1. Normalmente selecionamos valores na faixa de quilo Ohms. Vamos arbitrar o valor de 68k.
- ▶ Podemos utilizar o valor comercial de 4,7k, fazer associação de mais resistores ou um trimpot para ajustar no valor exato do projeto.

O Amplificador Operacional

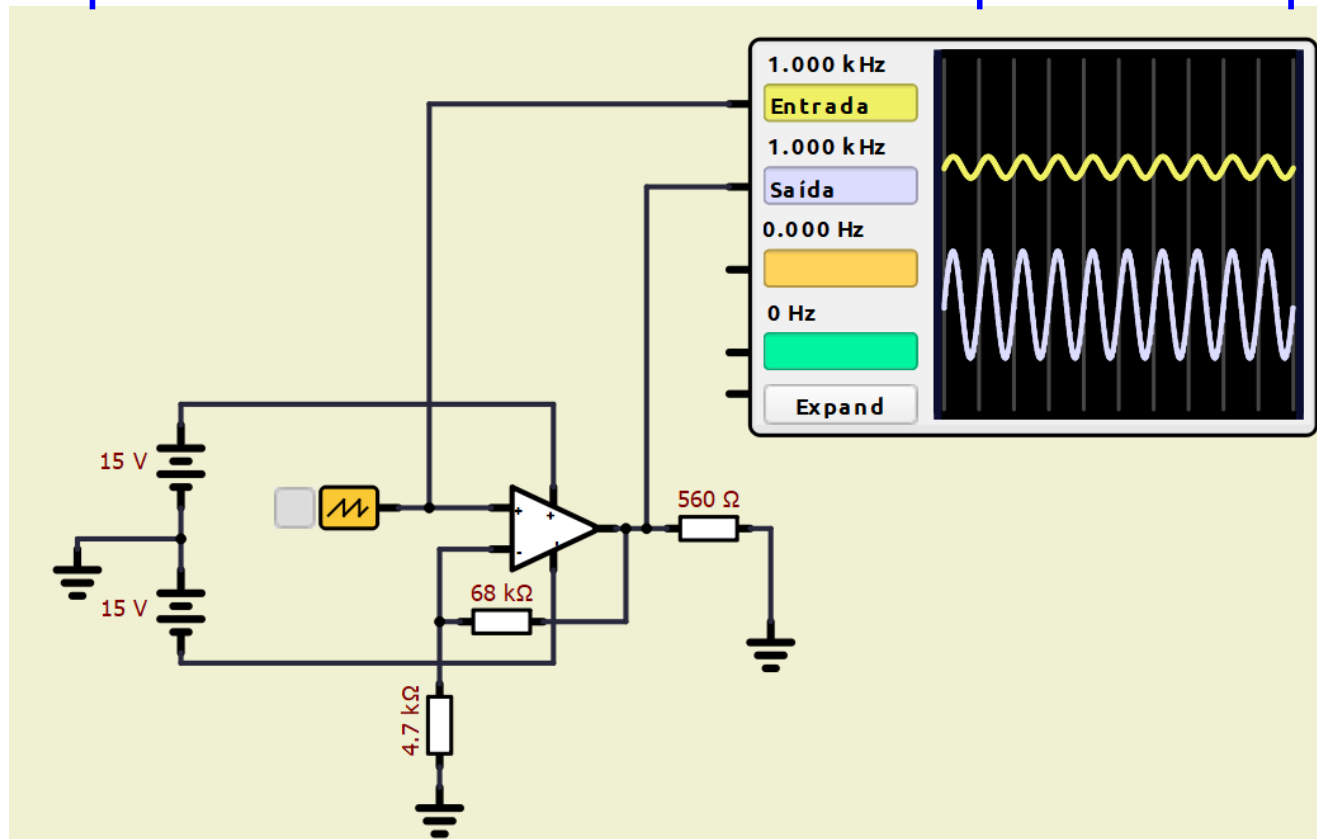
Circuito Prático Amp. Não Inversor



O Amplificador Operacional

Prática - 3

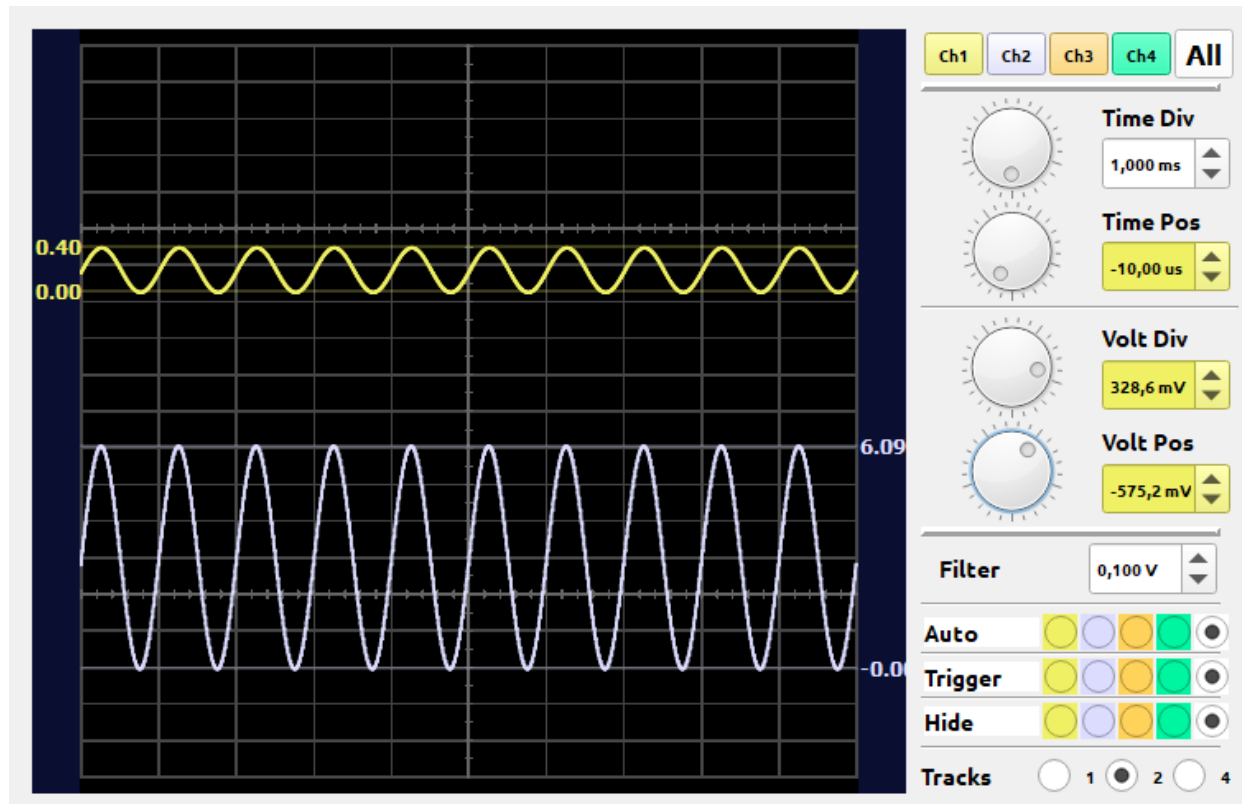
Circuito Amplificador Não Inversor com Amplificador Operacional



O Amplificador Operacional

Prática - 3

Circuito Amplificador Não Inversor com Amplificador Operacional





O Amplificador Operacional

O Amplificador Inversor



O Amplificador Operacional

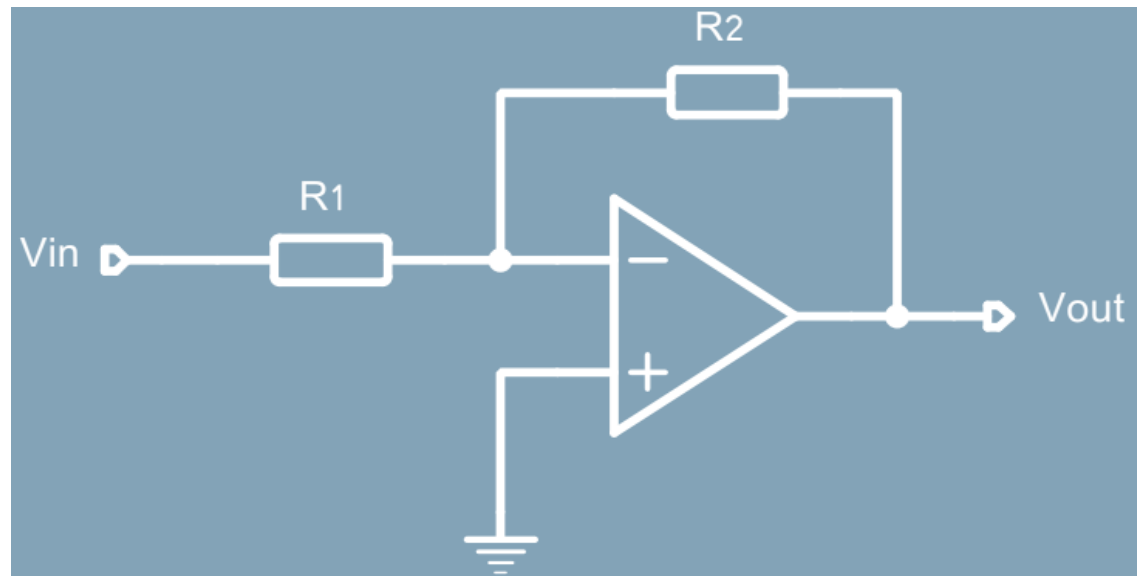
Características do Amp. Inversor

- ▶ Impedância de entrada conforme resistor utilizado (valor será bem próximo);
- ▶ Baixa impedância de saída;
- ▶ Defasa o sinal em 180° ;
- ▶ Permite ganho unitário e atenuação de sinal.

O Amplificador Operacional

Topologia e equação para projeto

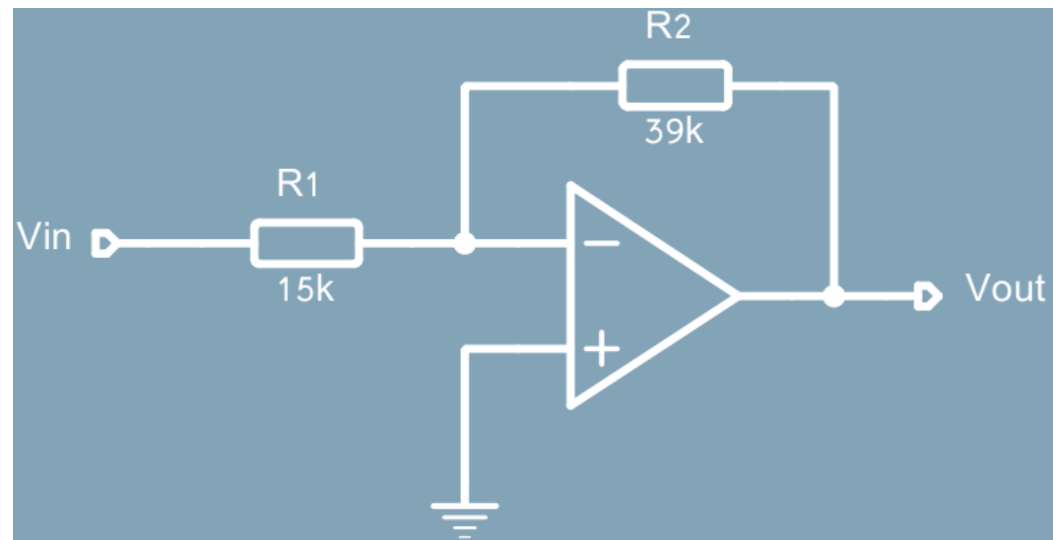
- ▶ $A_V = -\frac{R_2}{R_1}$
- ▶ $R_2 = -A_V R_1$
- ▶ $R_1 = -\frac{R_2}{A_V}$



O Amplificador Operacional

Calculando o ganho

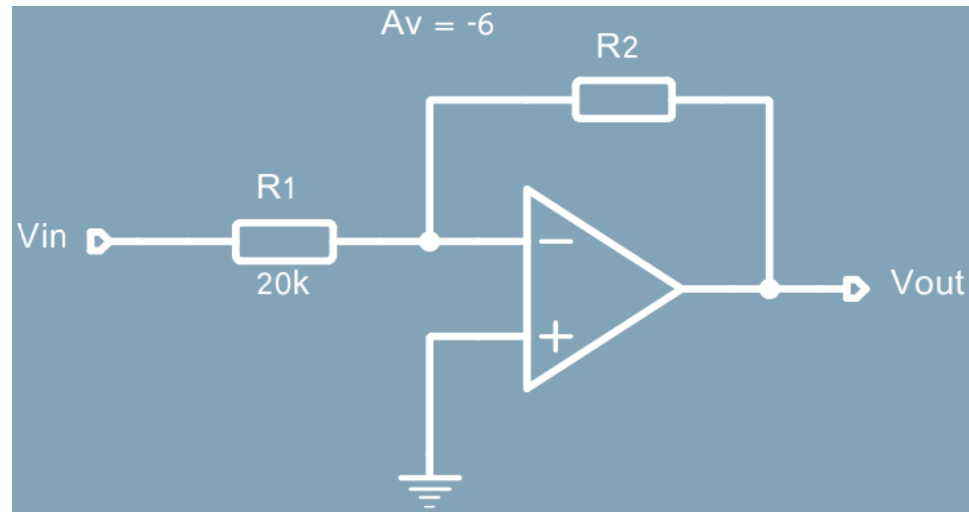
- ▶ $A_V = -\frac{R_2}{R_1}$
- ▶ $A_V = -\frac{39000}{15000}$
- ▶ $A_V = -2,6$



O Amplificador Operacional

Calculando o valor de R2

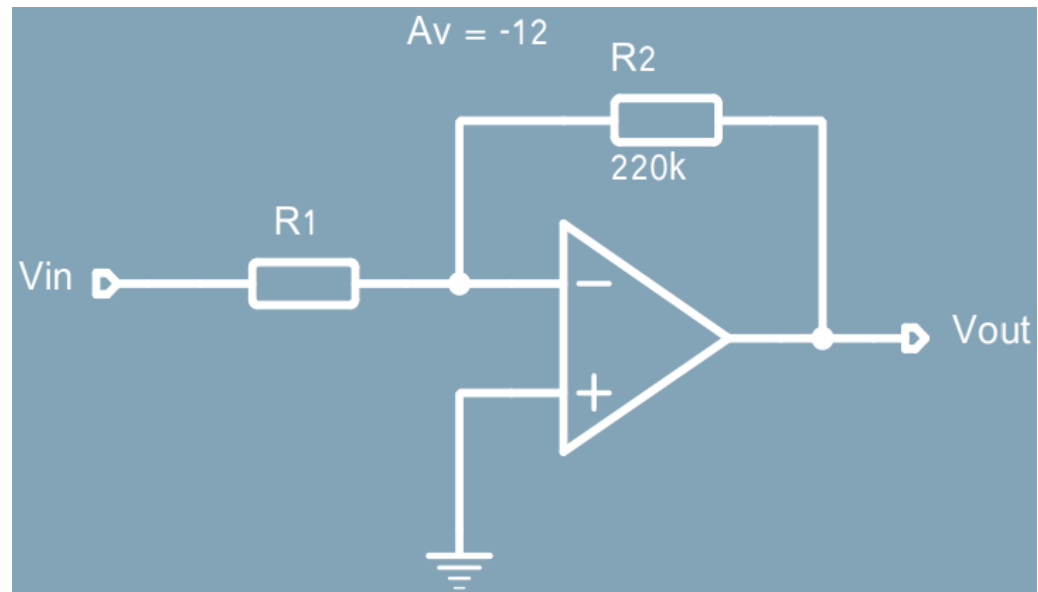
- ▶ $R_2 = -A_V R_1$
- ▶ $R_2 = -(-6 \times 20000)$
- ▶ $R_2 = 120k\Omega$



O Amplificador Operacional

Calculando o valor de R1

- ▶ $R_1 = -\frac{R_2}{A_v}$
- ▶ $R_1 = -\frac{220000}{-12}$
- ▶ $R_1 = 18,33k\Omega$



O Amplificador Operacional

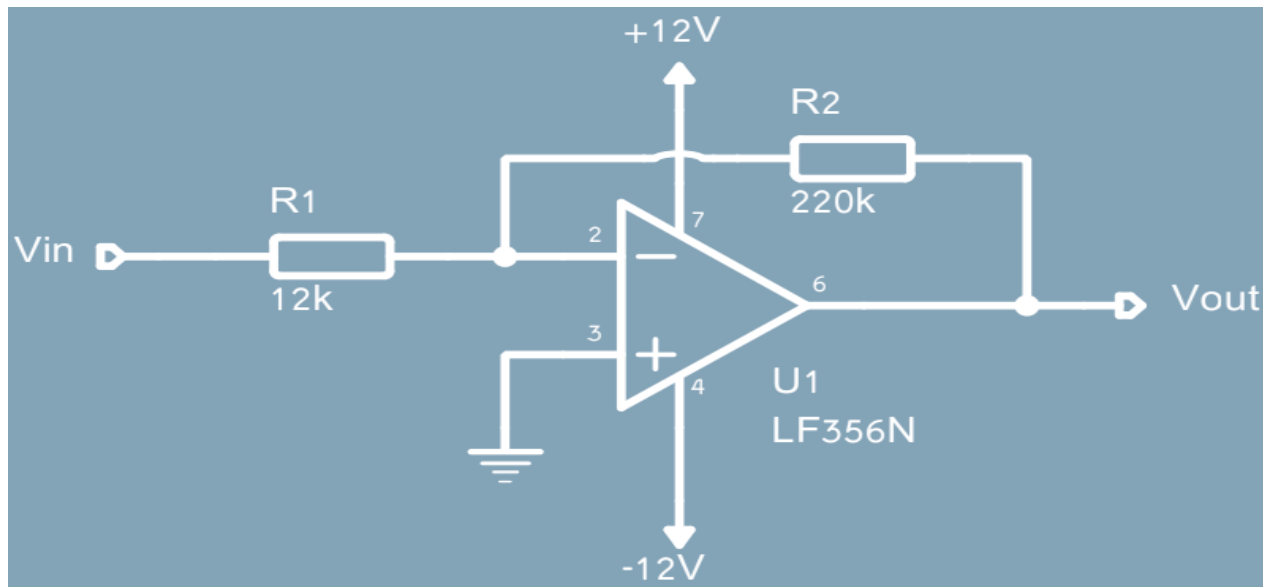
Projeto de Amplificador Inversor

- ▶ Projete um amplificador na topologia inversora, que contenha um ganho próximo de -18 e uma impedância de entrada de 12k. O sinal de saída deverá excursionar de
 - ▶ -8V a +8V.
- ▶ O valor de R1 será 12k para respeitar a impedância de entrada. Agora é só calcular R2
 - ▶ $R_2 = -A_V R_1$
 - ▶ $R_2 = - -18 \times 12000 = 216k\Omega$
 - ▶ Podemos utilizar o valor comercial de 220k, fazer associação de mais resistores ou um trimpot para ajustar no valor exato do projeto.

O Amplificador Operacional

Prática - 4

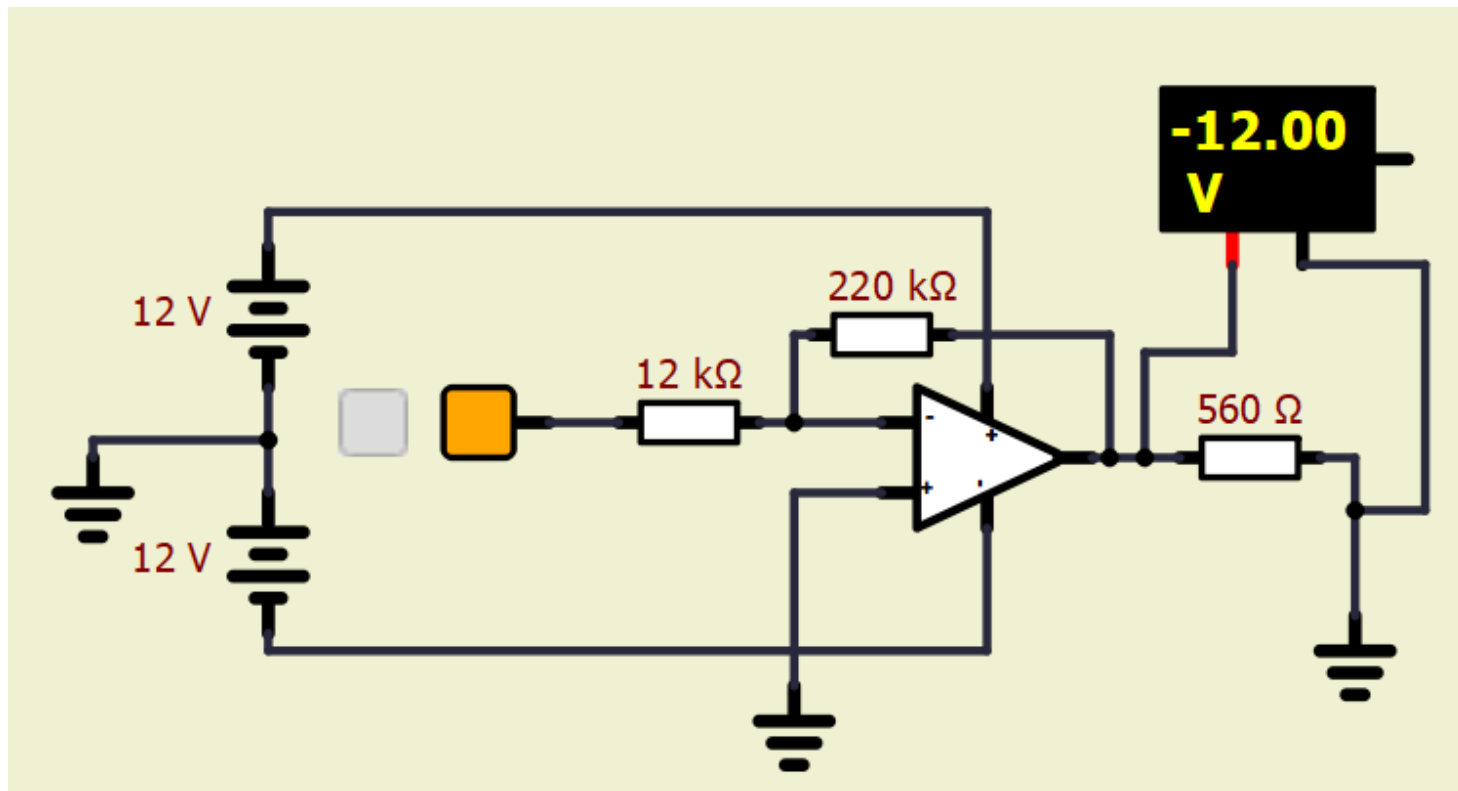
Circuito Amplificador Inversor com Amplificador Operacional



O Amplificador Operacional

Prática - 4

Circuito Amplificador Inversor com Amplificador Operacional





O Amplificador Operacional

O Amplificador Somador



O Amplificador Operacional

Características do Amp. Somador

- ▶ Impedância de entrada conforme OPAMP utilizado;
- ▶ Baixa impedância de saída;
- ▶ Faz a soma de N níveis de tensão DC ou sinais AC;
- ▶ Existe a configuração não inversora e inversora.

O Amplificador Operacional

Topologia e equação (somador não inversor)

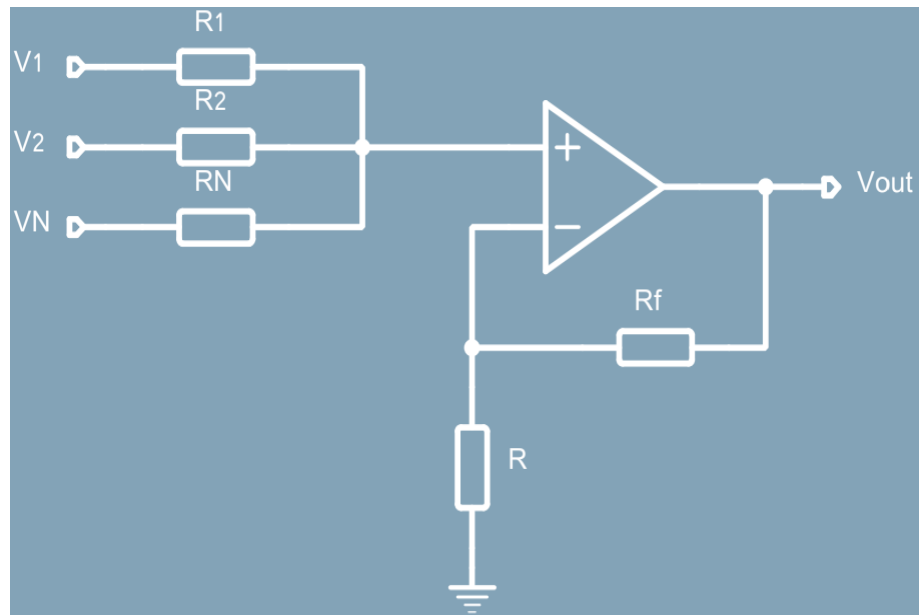
▶
$$V_{OUT} = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}} \times \frac{R_f}{R} + 1$$

- ▶ Se todos os resistores de entrada forem iguais:

▶
$$V_{OUT} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N} \times \frac{R_f}{R} + 1$$

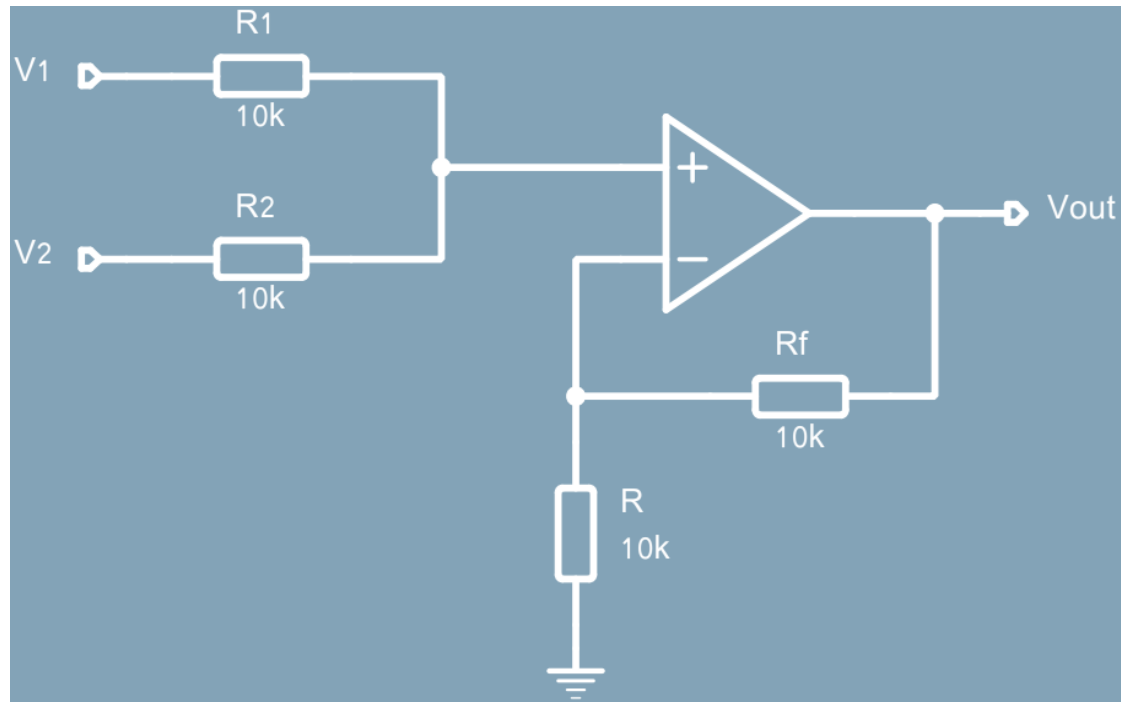
- ▶ Se todos os resistores forem iguais:

▶
$$V_{OUT} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N} \times 2$$



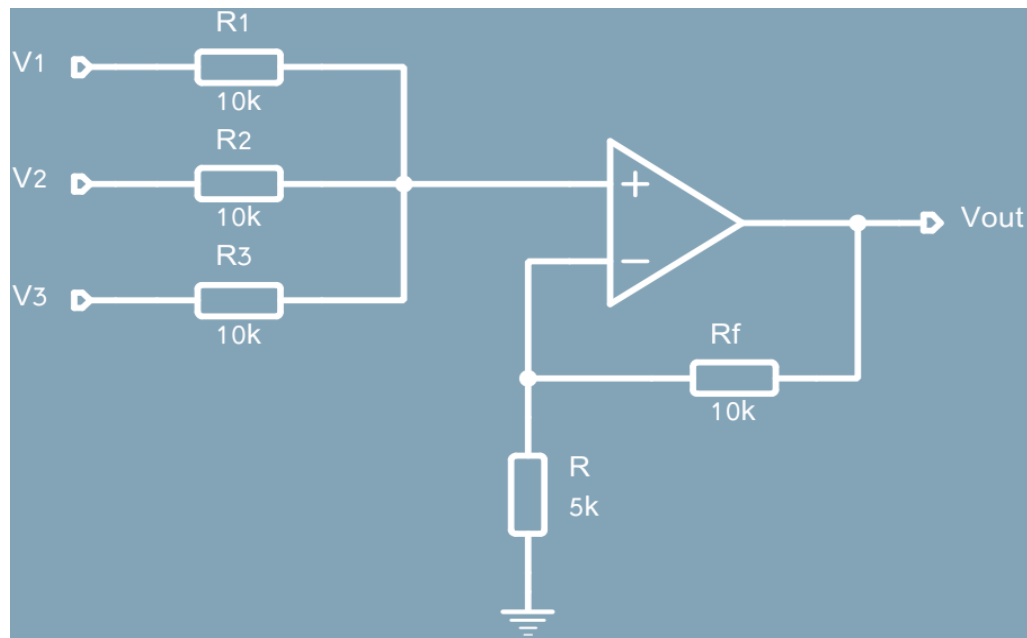
O Amplificador Operacional

Circuito somador de duas entradas



O Amplificador Operacional

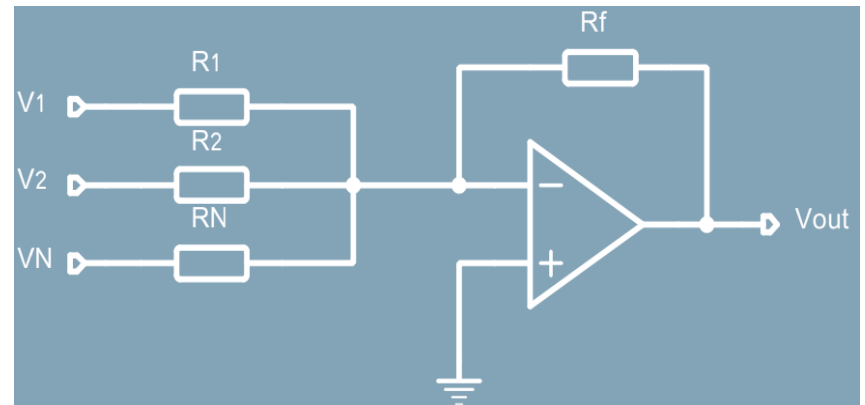
Circuito somador de três entradas



O Amplificador Operacional

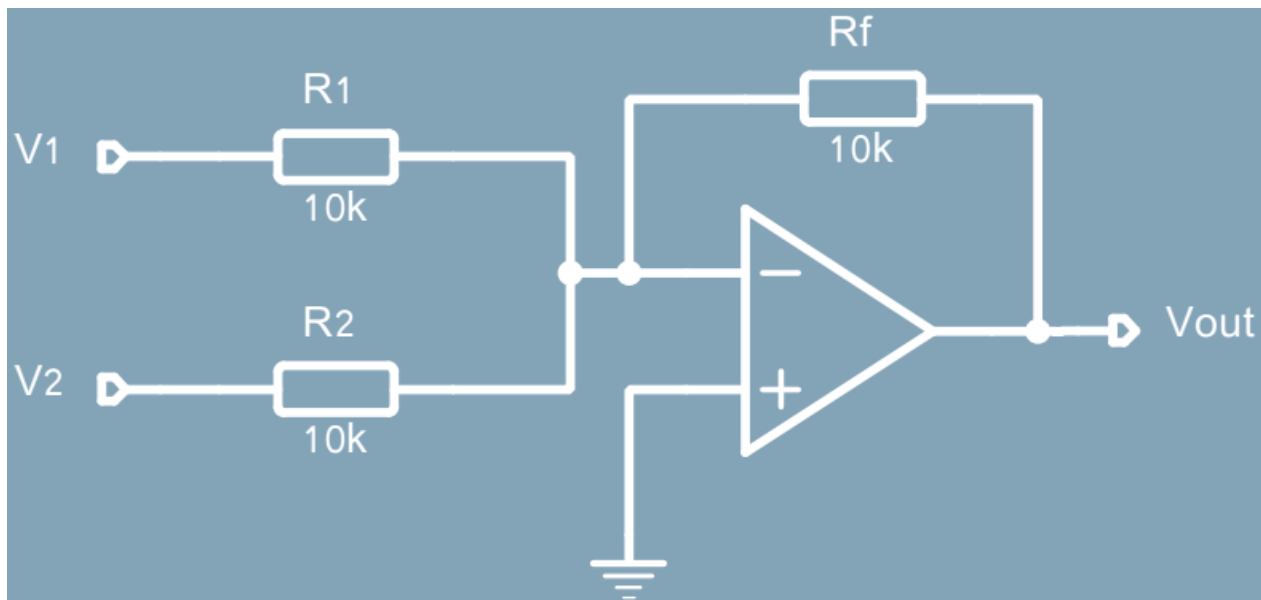
Topologia e equação (somador inversor)

- ▶ $V_{OUT} = -R_f \times \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N}$
- ▶ Se todos os resistores de entrada forem iguais a $N \times R_f$:
- ▶ $V_{OUT} = -\frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N}$
- ▶ Se todos os resistores forem iguais:
- ▶ $V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N)$



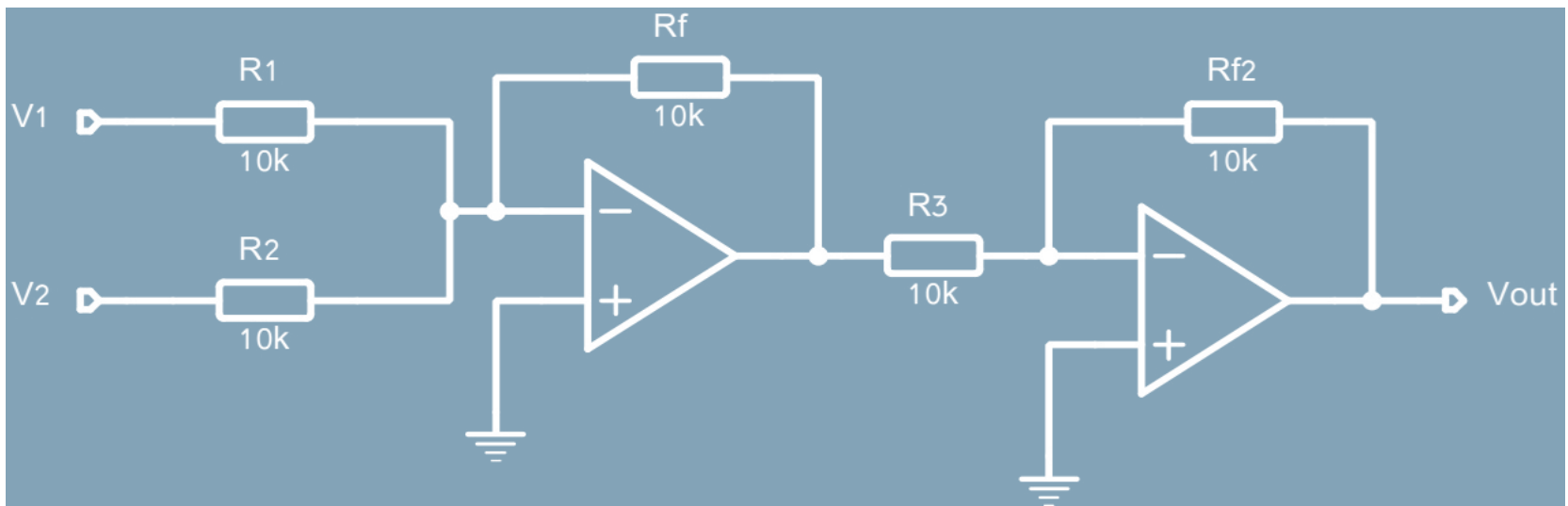
O Amplificador Operacional

Circuito somador inversor de duas entradas



O Amplificador Operacional

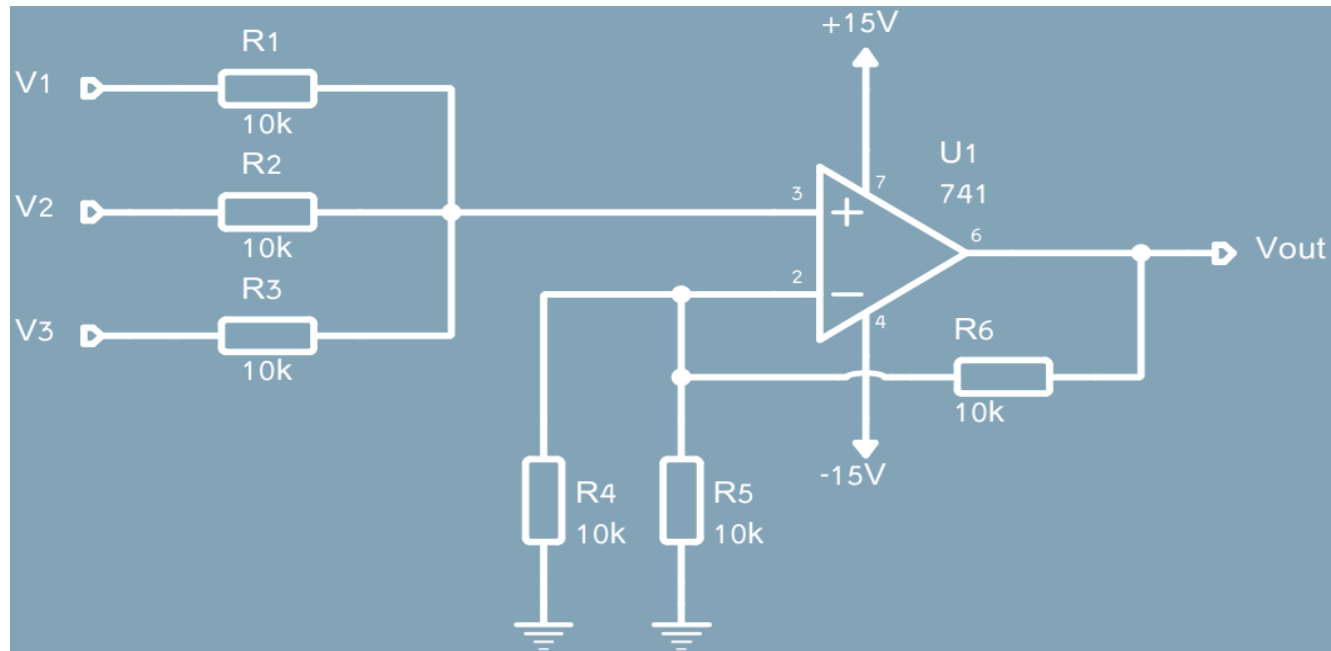
Circuito somador de duas entradas versão com 2 OPAMPs em top. inversora



O Amplificador Operacional

Prática - 5

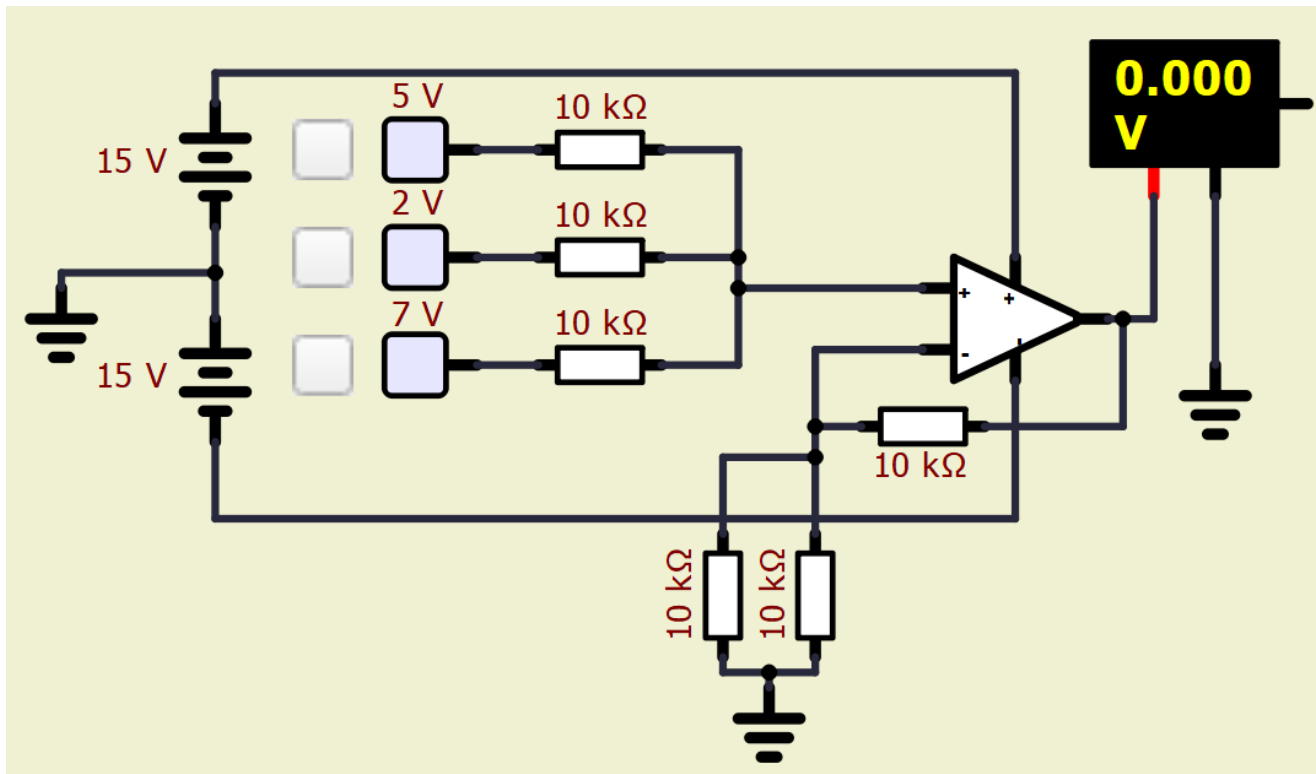
Somador de 3 entradas com Amplificador Operacional



O Amplificador Operacional

Prática - 5

Somador de 3 entradas com Amplificador Operacional





O Amplificador Operacional

O Amplificador Subtrator



O Amplificador Operacional

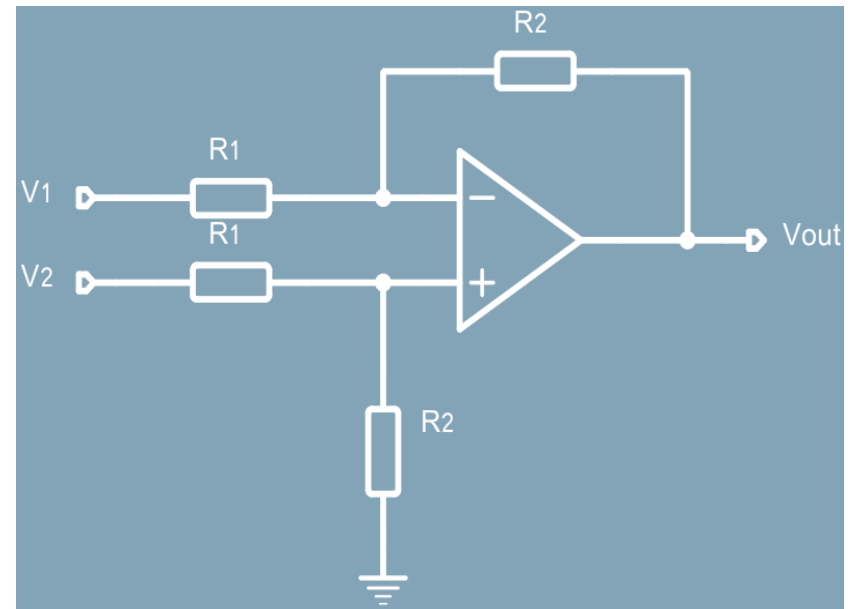
Características do Amp. Subtrator

- ▶ Impedância de entrada conforme resistores utilizados;
- ▶ Baixa impedância de saída;
- ▶ Faz a subtração de N níveis de tensão DC ou sinais AC;
- ▶ Também conhecido como Amplificador Diferencial;
- ▶ Muito utilizado em circuitos de instrumentação.

O Amplificador Operacional

Topologia e equação do subtrator

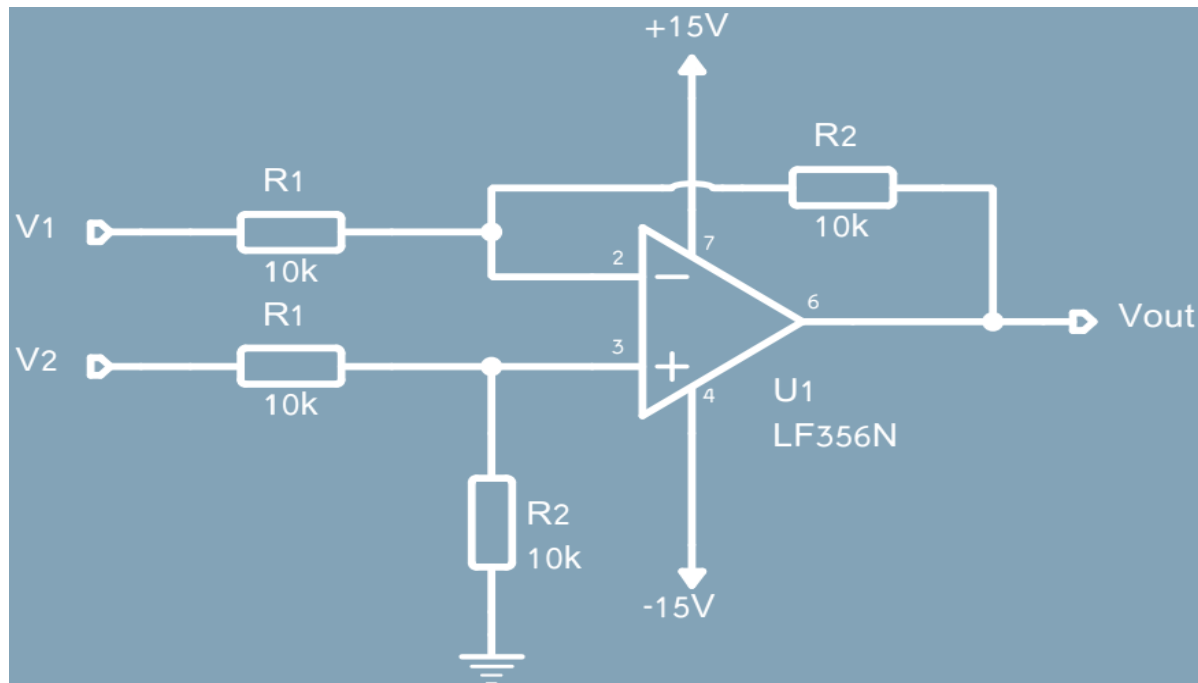
- ▶ $V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} \times V_2 - V_1$
- ▶ Se todos os resistores forem iguais
- ▶ $V_{OUT} = V_2 - V_1$



O Amplificador Operacional

Prática - 6

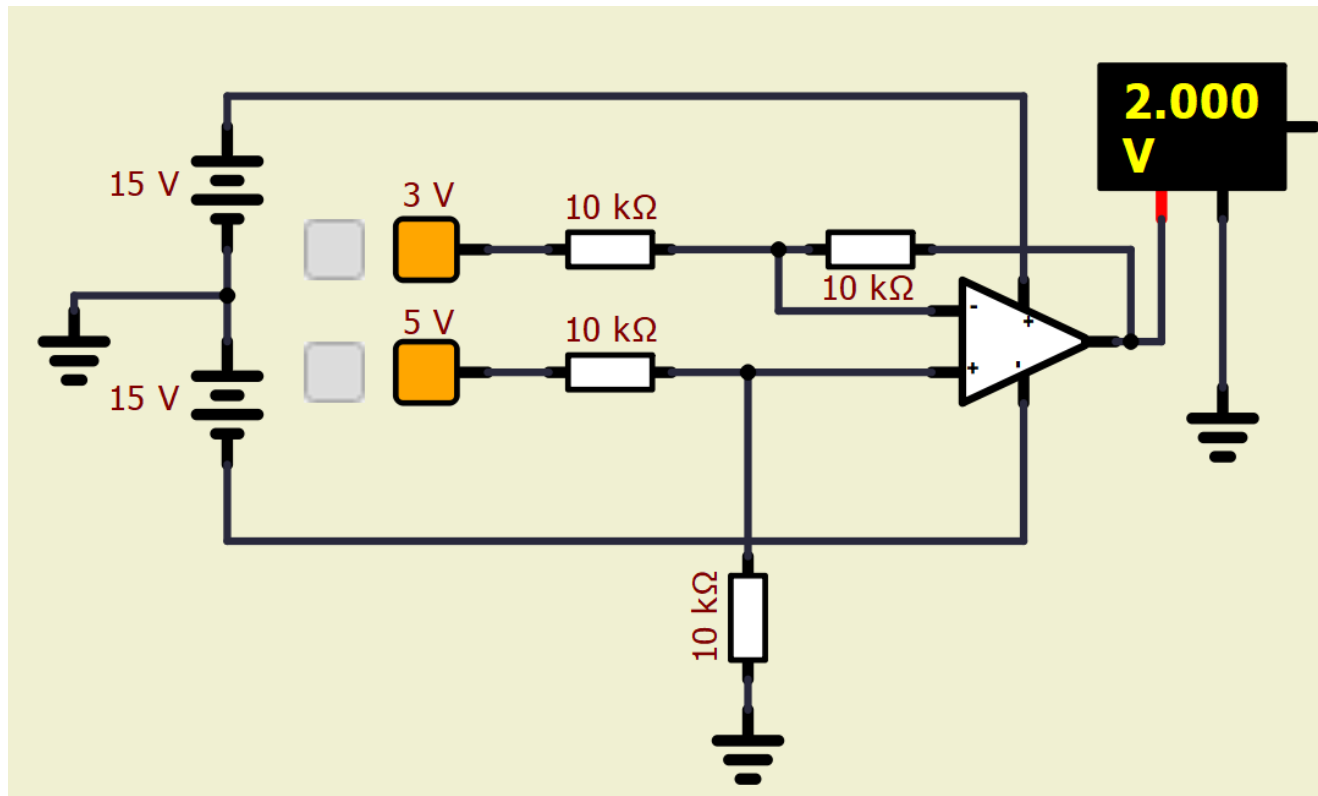
Subtrator com Amplificador Operacional



O Amplificador Operacional

Prática - 6

Subtrator com Amplificador Operacional





UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Docente: Rildo Afonso de Almeida

XXXVIII Semana Acadêmica de Engenharia Elétrica

Mini Curso Amplificadores Operacionais

MUITO OBRIGADO!!



Bibliografia Básica

- 1-SEDRA, A.S. &SMITH, C. **Microeletrônica**, 4ª ed, Makron Books,2005.
- 2-MILLMAN, J. & HALKAIS, C.C, **Eletrônica**, 2ª ed, vol ½, McGrawHill do Brasil, 1981.
- 3-RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**, 2ª ed, Prentice-Hall International, 1988.



Bibliografia Complementar

- 1-MALVINO, Albert Paul. **Electronic Principles with Simulation CD**. McGraw-Hill Professional. 7ª edição. 2006.
- 2-BOYLESTAD, Robert ; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Prentice Hall. 8a edição. , 2007.
- 3-MOHAN, N.; UNDERLAND, T. M. & ROBBINS, W.P **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, 2ª ed, John Wiley and Sons, 1995.
- 4-RESENDE, S. M. **A física de materiais e dispositivos eletrônicos**, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil, 1996