



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Docente: Rildo Afonso de Almeida**

**Eletrônica Aplicada**  
**Aula 07 – 19/10/2023**



# 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  $\mu$ A702, bastante precário;
- ❖ Em 1965 a equipe chefiada por Robert Widlar na mesma Fairchild criou o  $\mu$ A709, considerado o primeiro OPAMP realmente confiável disponível no mercado;
- ❖ A equipe de Widlar também é a responsável por criar o consagrado  $\mu$ 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

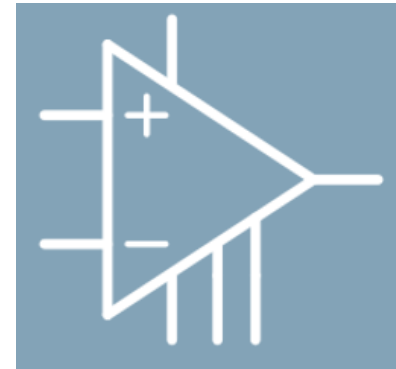
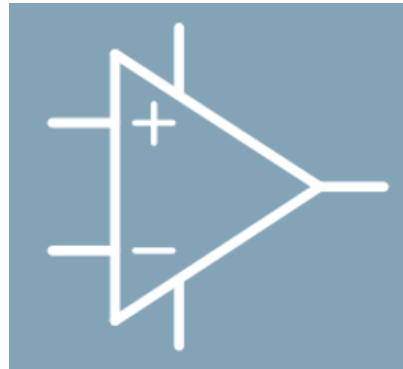
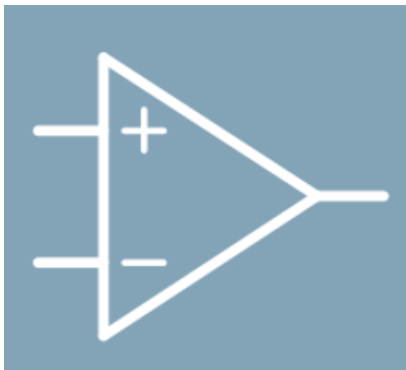


# O Amplificador Operacional

## Símbolo esquemático

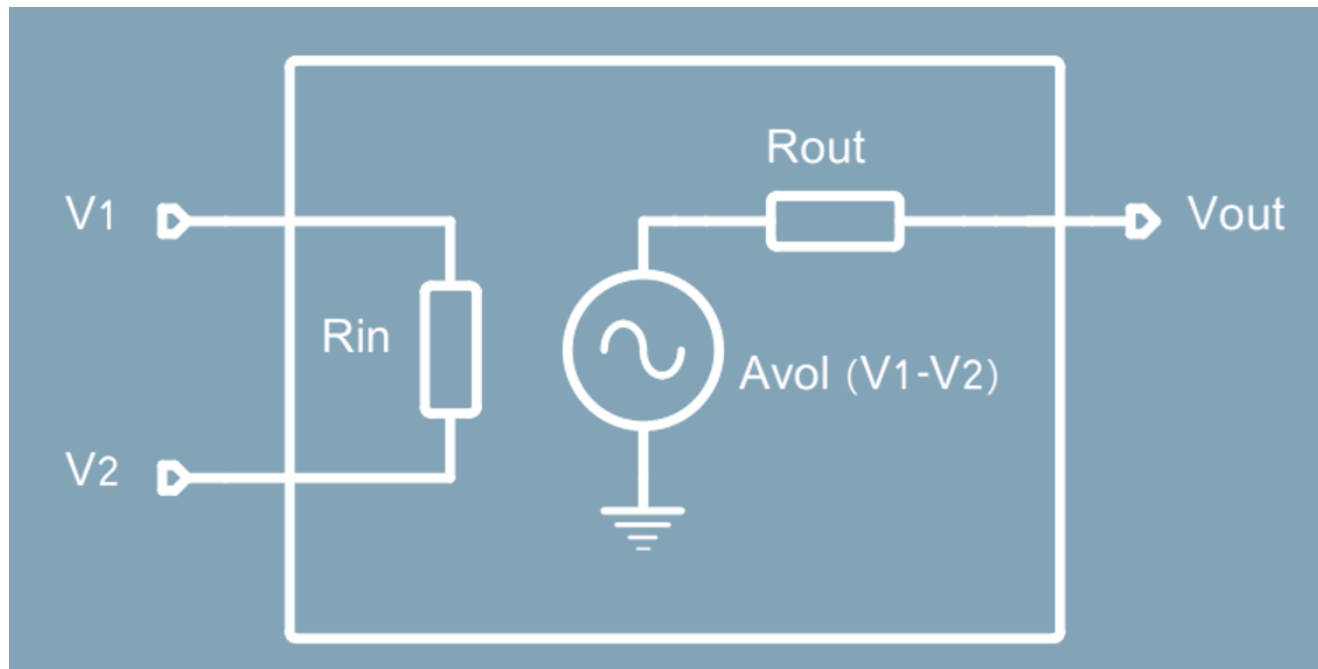
Apresenta o símbolo conforme as figuras abaixo.

- 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

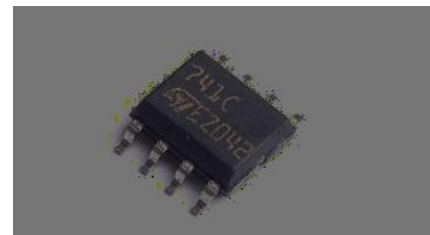
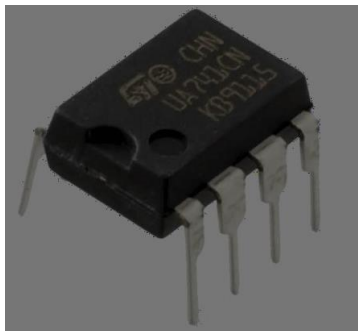
## Circuito Equivalente



# O Amplificador Operacional

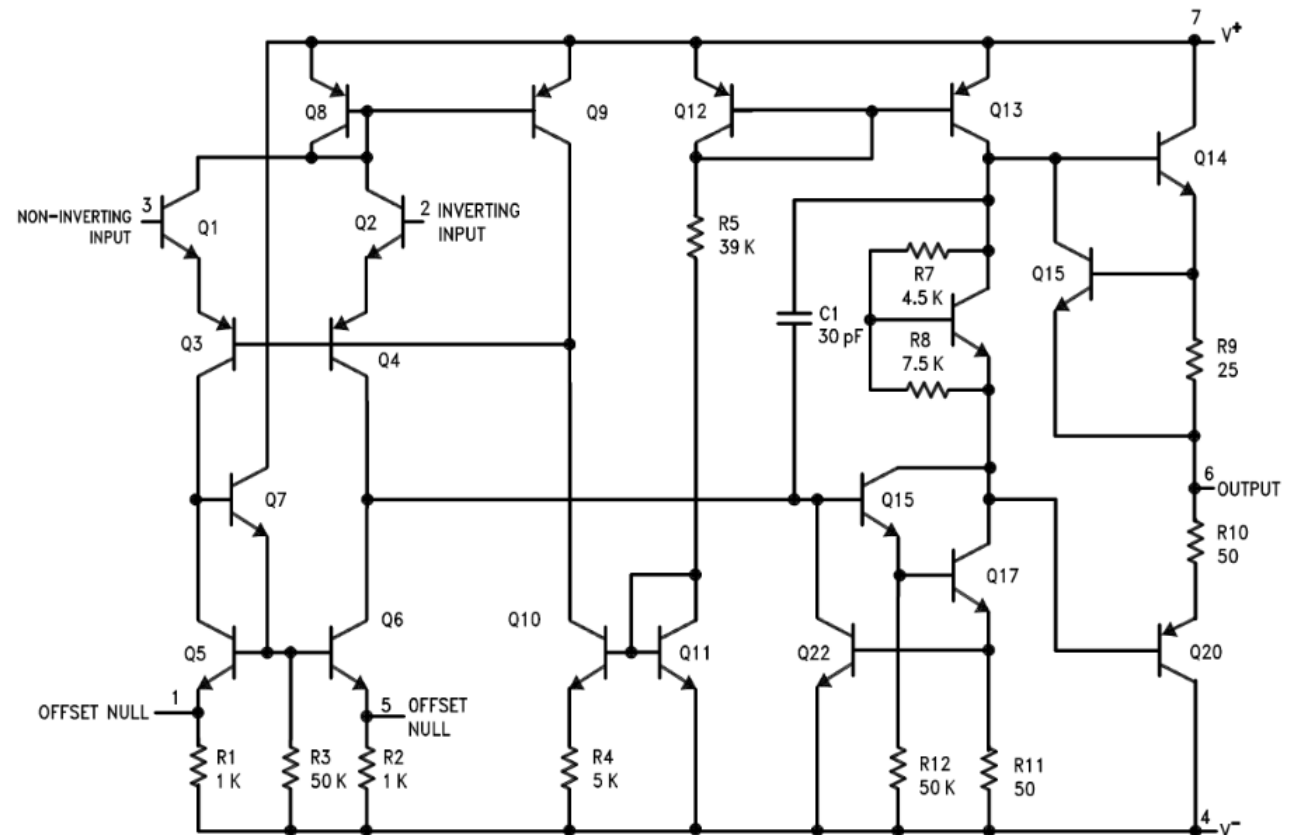
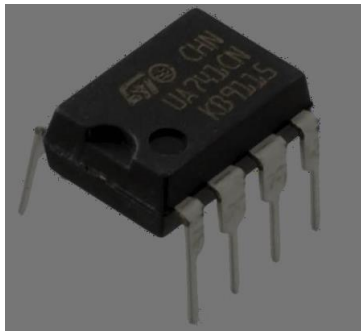
## Aspecto físico do componente

- ▶ 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:
- ▶  $\mu$ A741 (Fairchild);
- ▶ LM741 (National);
- ▶ MC741 (Motorola);
- ▶ CA741 (RCA);
- ▶ SN741 (Texas);
- ▶ AD741 (Analog Devices);
- ▶ SA741 (Signetics).

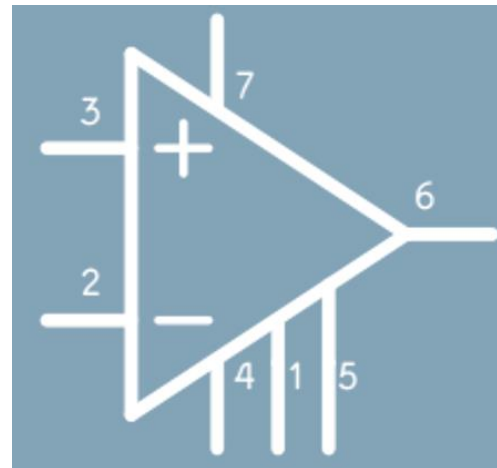


# O Amplificador Operacional

## 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)*



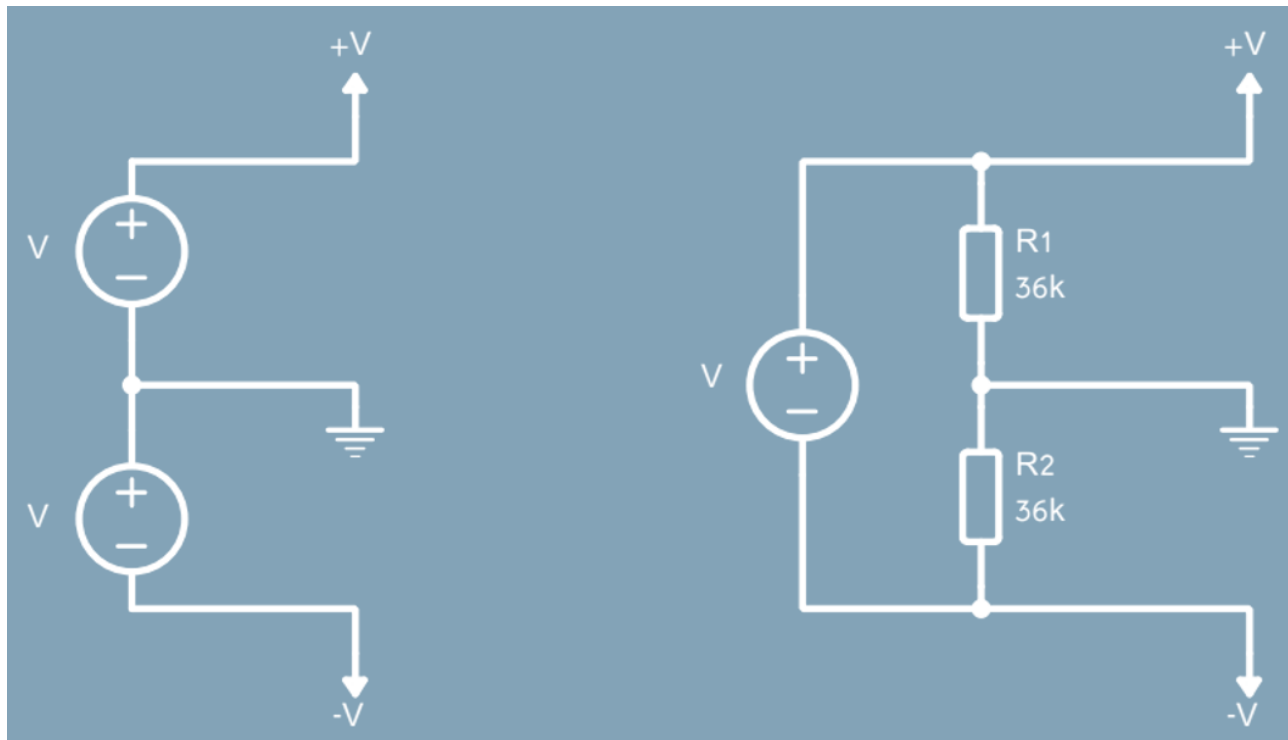
# O Amplificador Operacional

## 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

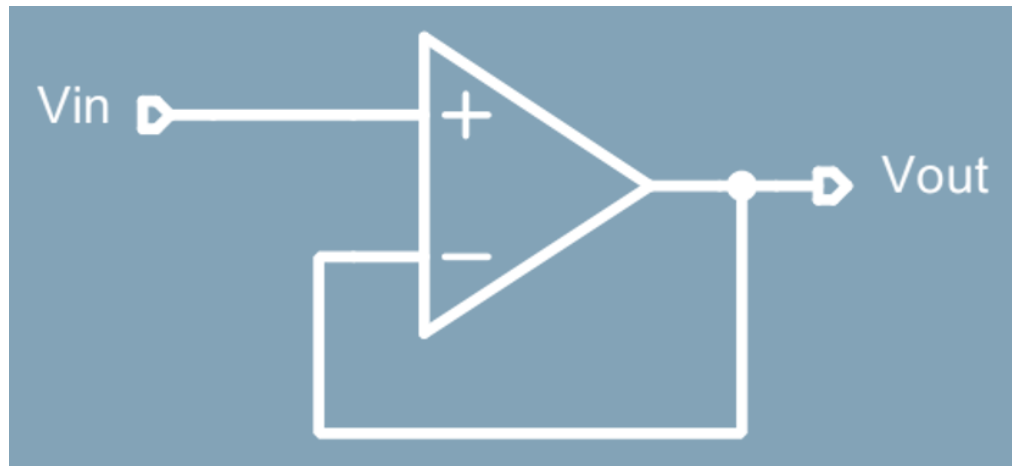
## A Regra de Ouro para entender OPAMPs

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 Buffer

## O Buffer Analógico (seguidor de tensão)

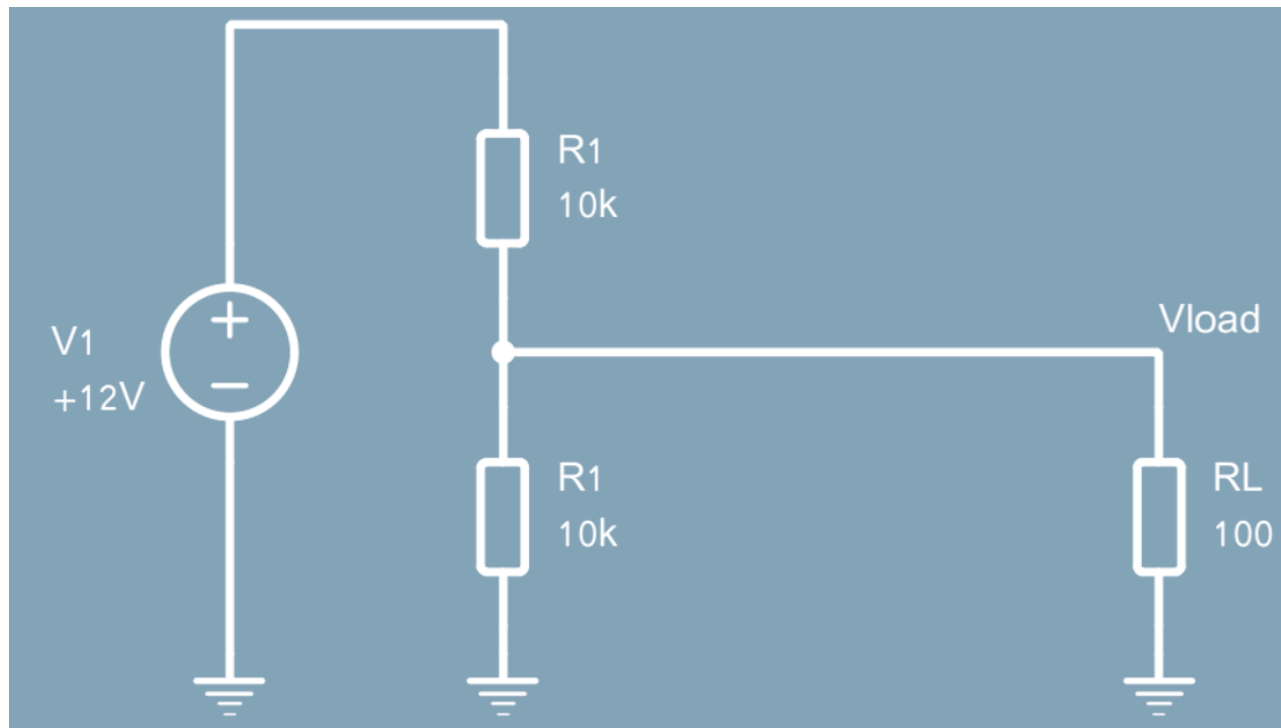
- ✓ Casamento impedância;
- ✓ Reforço de um sinal;
- ✓ Isolamento de estágios;
- ✓ Acionamento de cargas;
- ✓ Leitura de sensores.





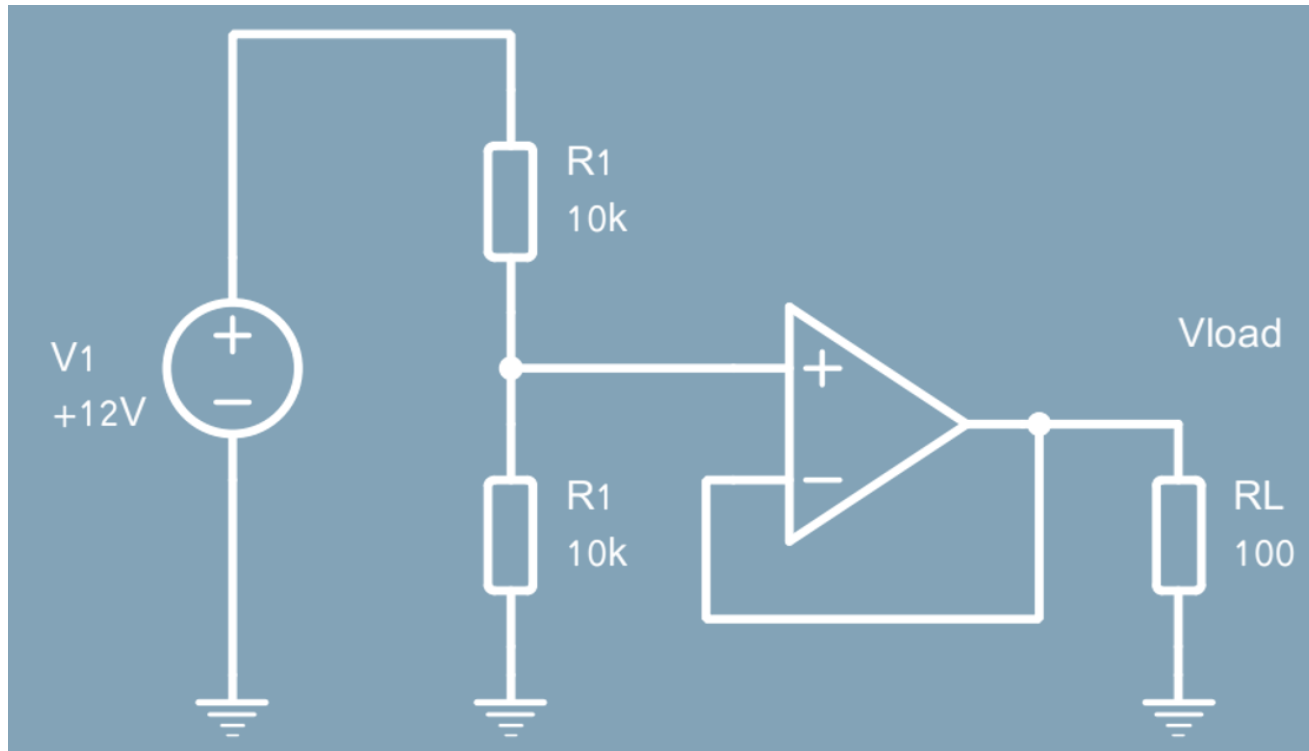
# O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



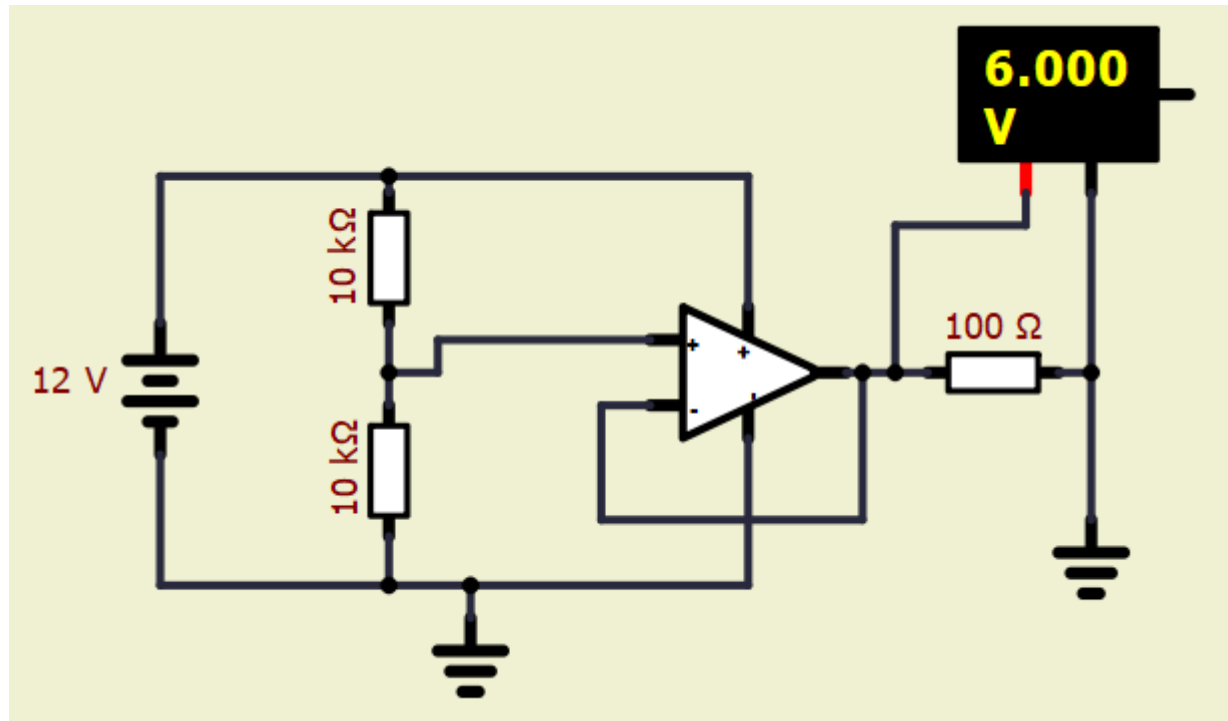
# O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



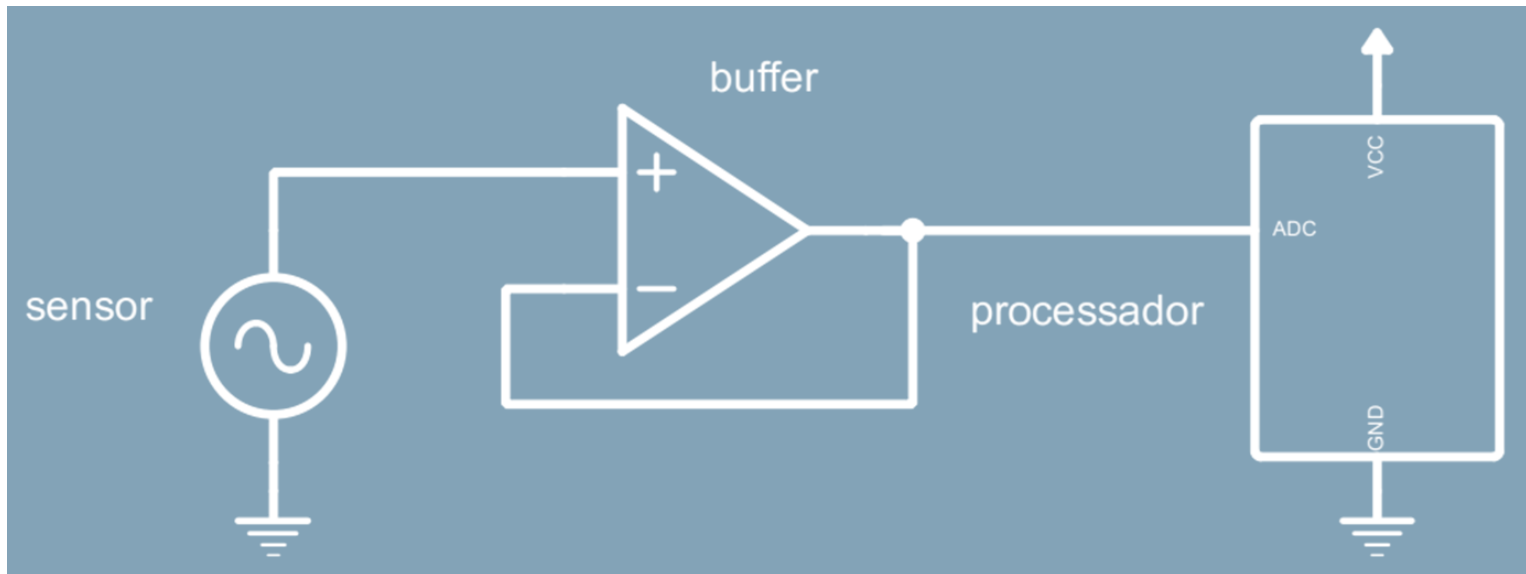
# O Amplificador Buffer

Divisor de tensão com carga



# O Amplificador Buffer

Leitura de sensores





## O Amplificador 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

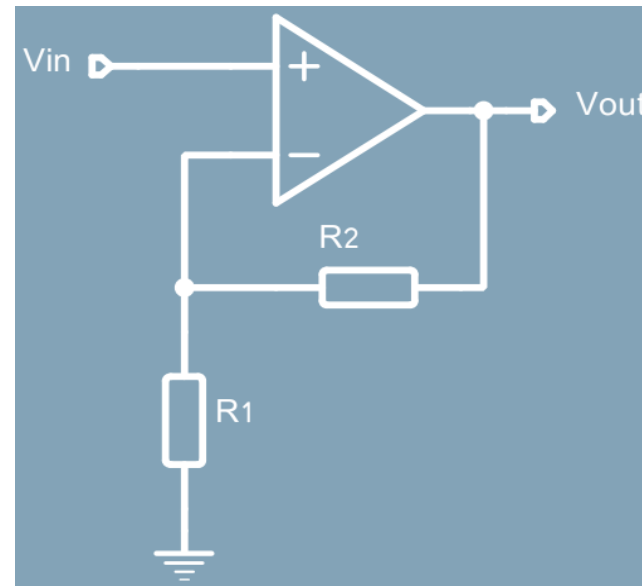
# Ganho de tensão de um Amp.

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

## O Amplificador Operacional

# Topologia e equação para projeto

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

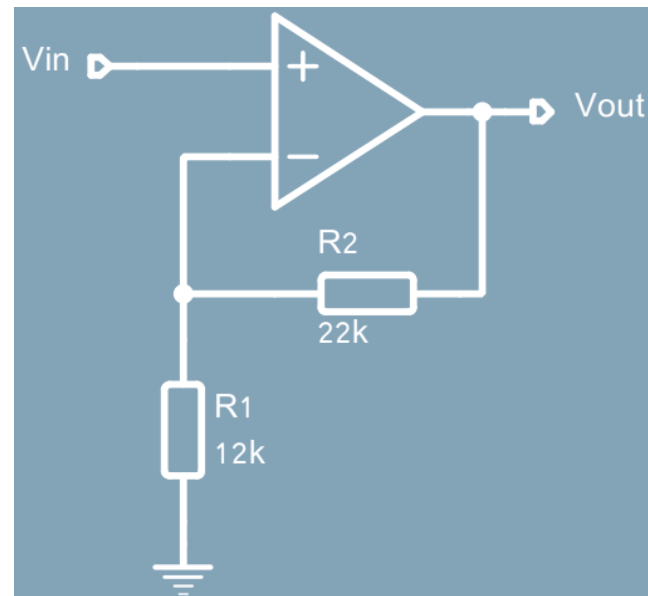




## O Amplificador Operacional

### Calculando o ganho

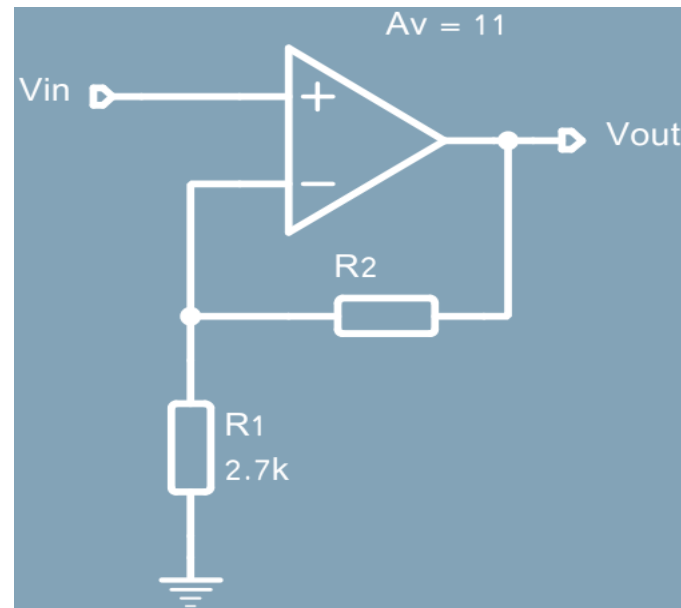
- ▶  $A_V = \frac{R_2}{R_1} + 1$
- ▶  $A_V = \frac{22000}{12000} + 1$
- ▶  $A_V = 2,8333$



## O Amplificador Operacional

### Calculando o valor de R2

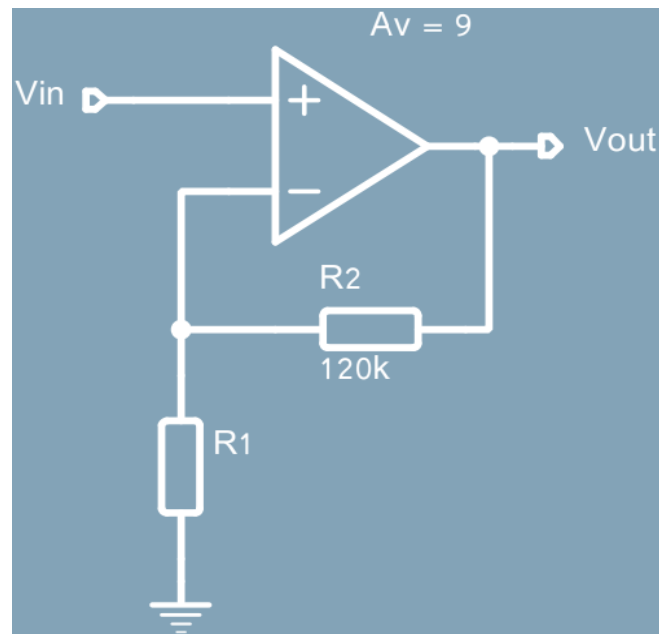
- ▶  $R_2 = A_V - 1 \times R_1$
- ▶  $R_2 = 11 - 1 \times 2700$
- ▶  $R_2 = 27k\Omega$



## O Amplificador Operacional

### Calculando o valor de R1

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





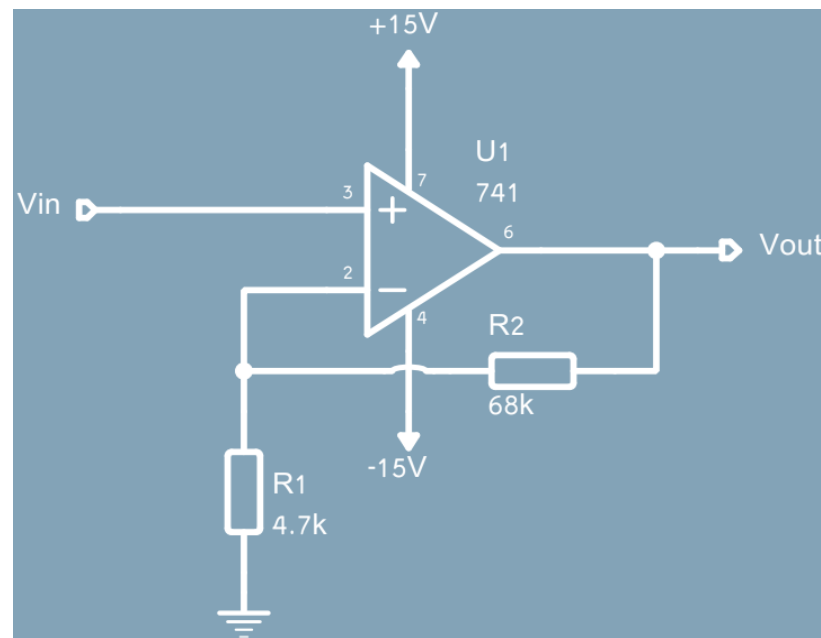
## O Amplificador Operacional

# 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

O Amplificador Inversor



## O Amplificador Operacional

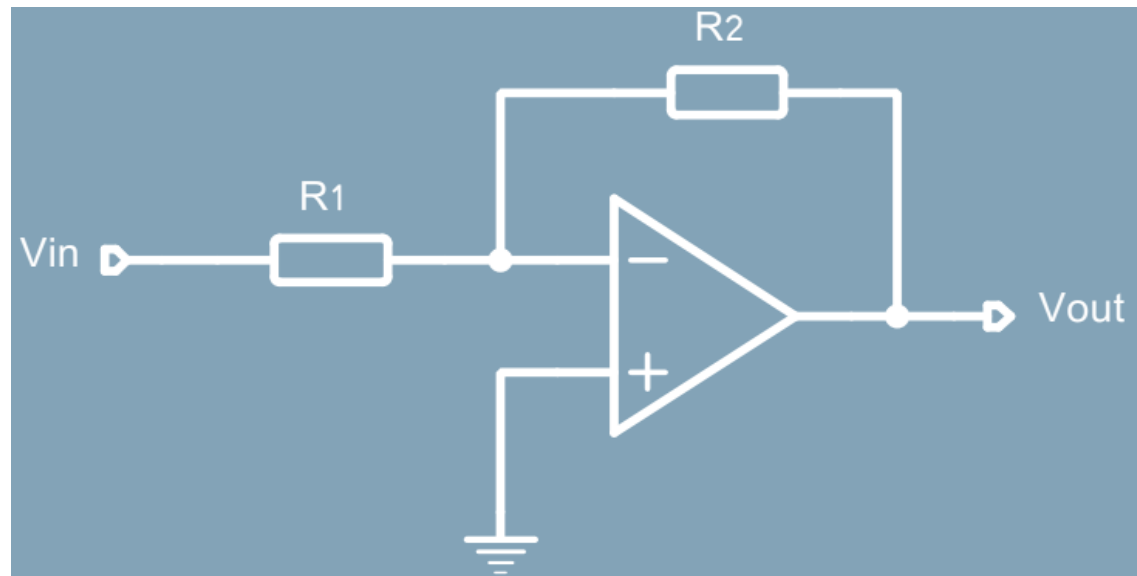
# Características do Amp. Inversor

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

## O Amplificador Operacional

### Topologia e equação para projeto

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

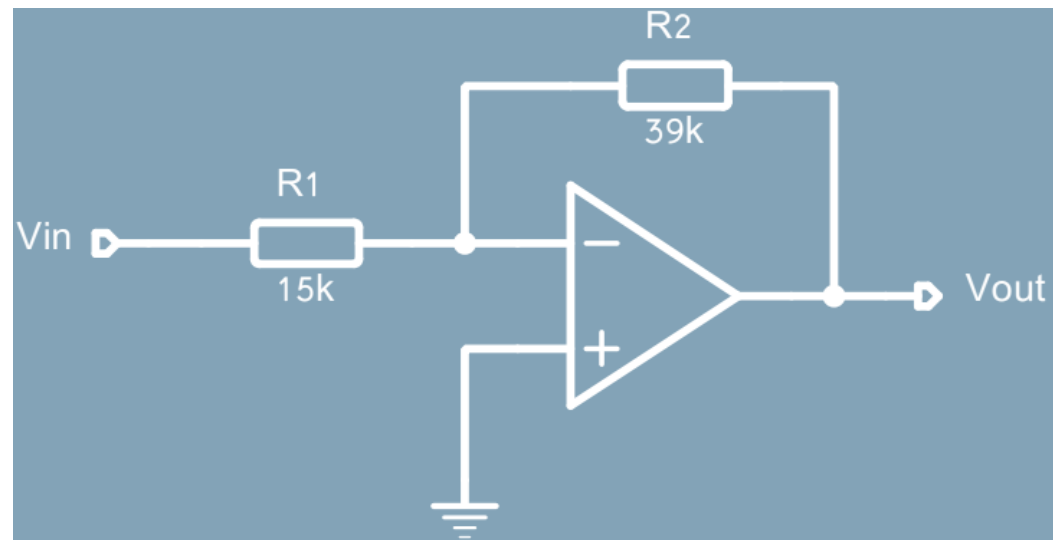




## O Amplificador Operacional

### Calculando o ganho

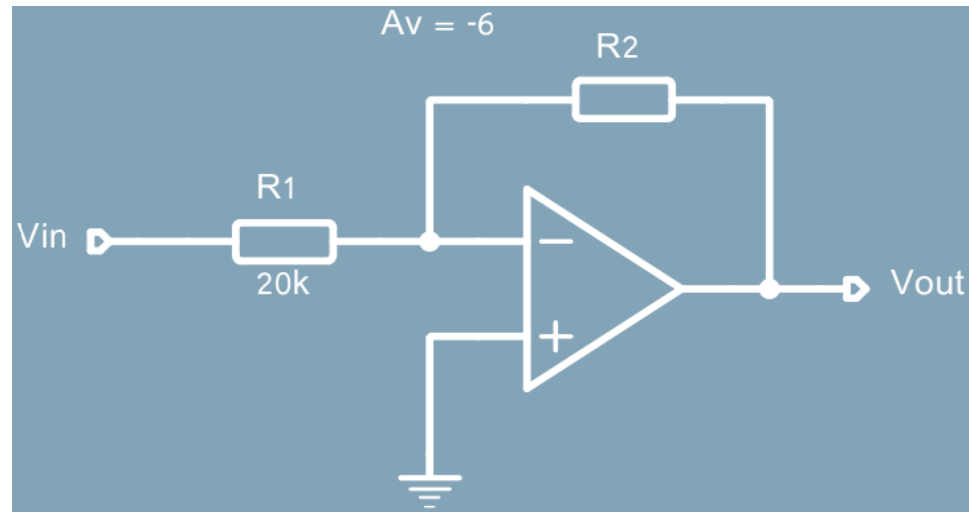
- ▶  $A_V = -\frac{R_2}{R_1}$
- ▶  $A_V = -\frac{39000}{15000}$
- ▶  $A_V = -2,6$



## O Amplificador Operacional

### Calculando o valor de R2

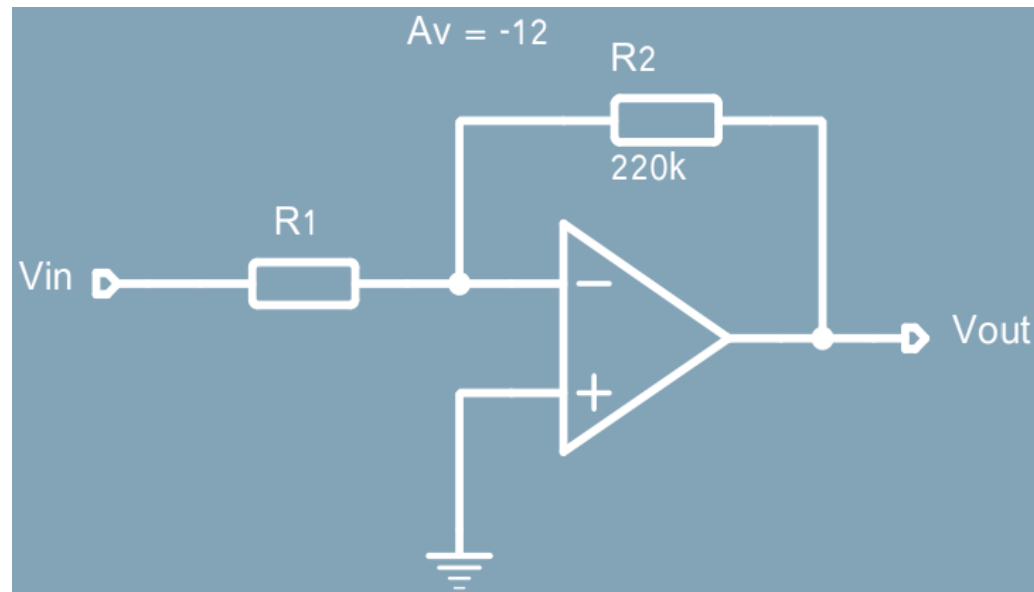
- ▶  $R_2 = -A_V R_1$
- ▶  $R_2 = -(-6 \times 20000)$
- ▶  $R_2 = 120k\Omega$



## 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

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)

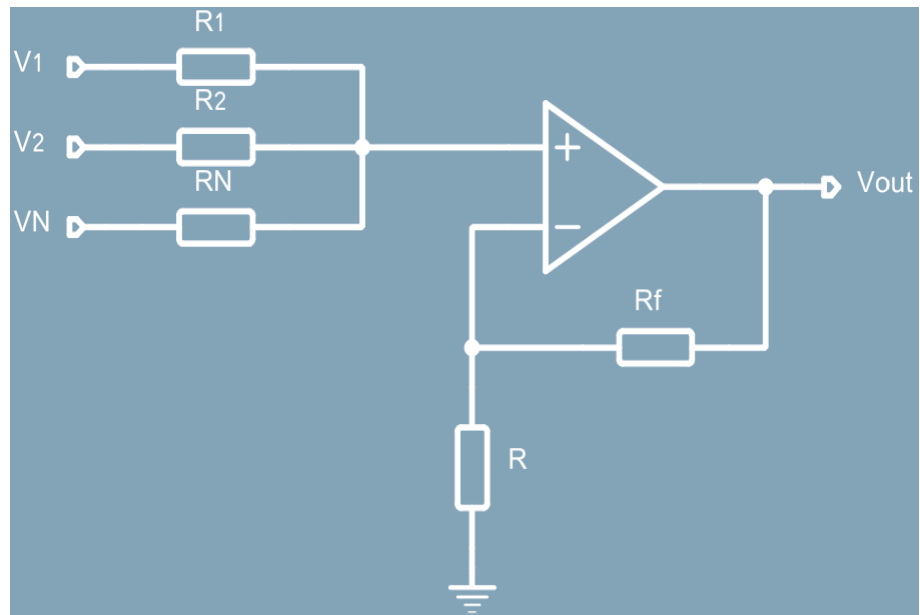
▶ 
$$V_{OUT} = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}} \times \frac{R_f}{R} + 1$$

- ▶ Se todos os resistores de entrada forem iguais:

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

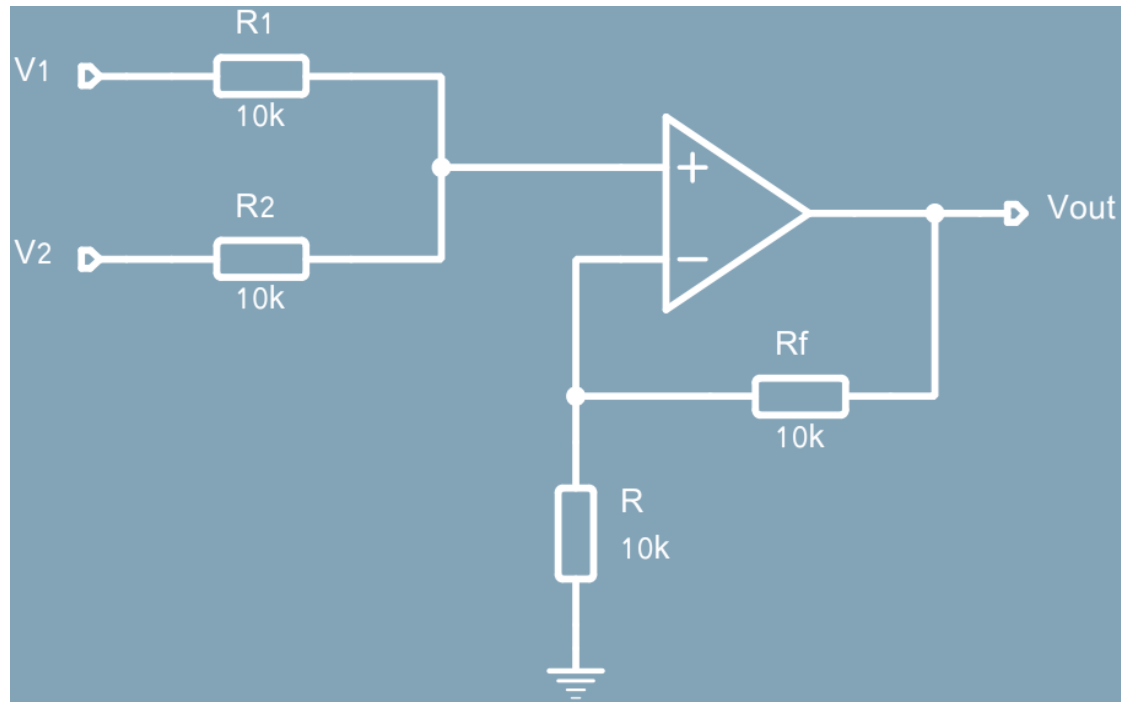
- ▶ Se todos os resistores forem iguais:

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



## O Amplificador Operacional

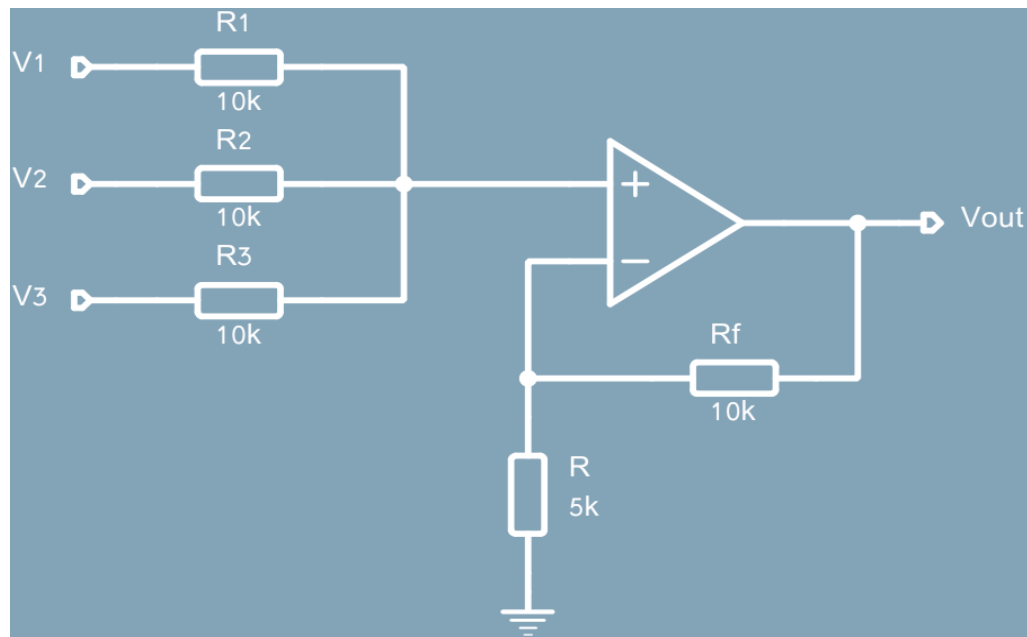
### Circuito somador de duas entradas





## O Amplificador Operacional

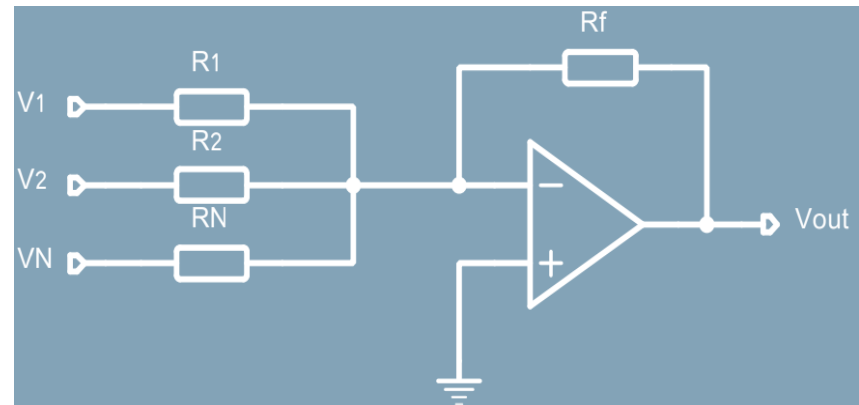
### Circuito somador de três entradas



## O Amplificador Operacional

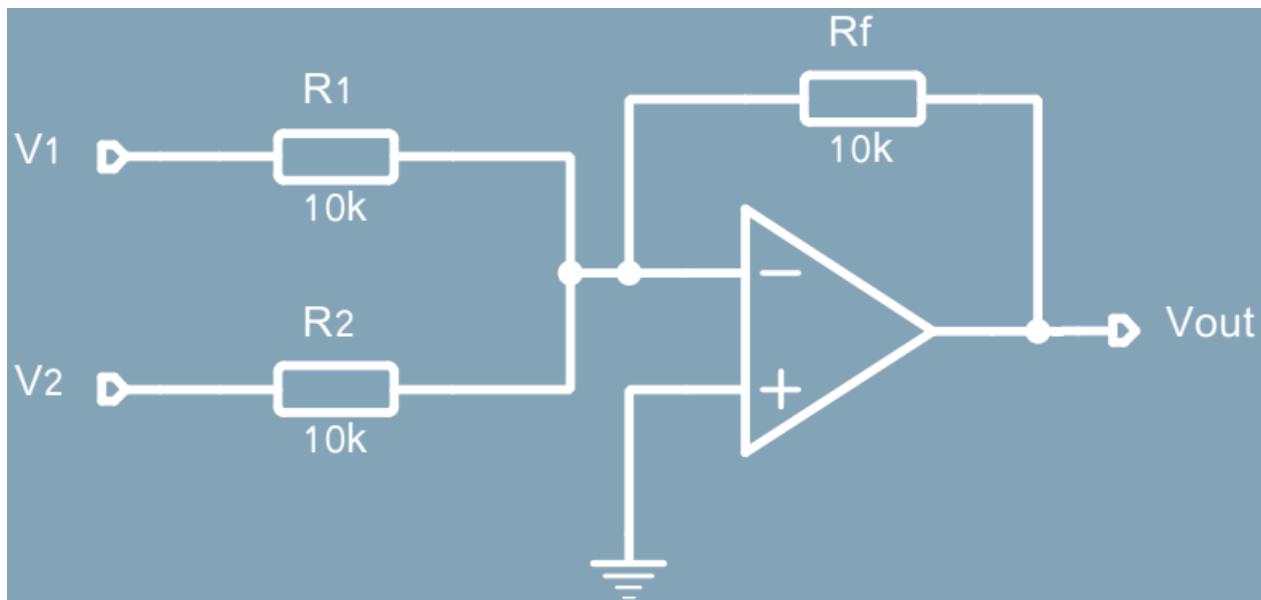
# Topologia e equação (somador inversor)

- ▶  $V_{OUT} = -R_f \times \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N}$
- ▶ 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:
- ▶  $V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N)$



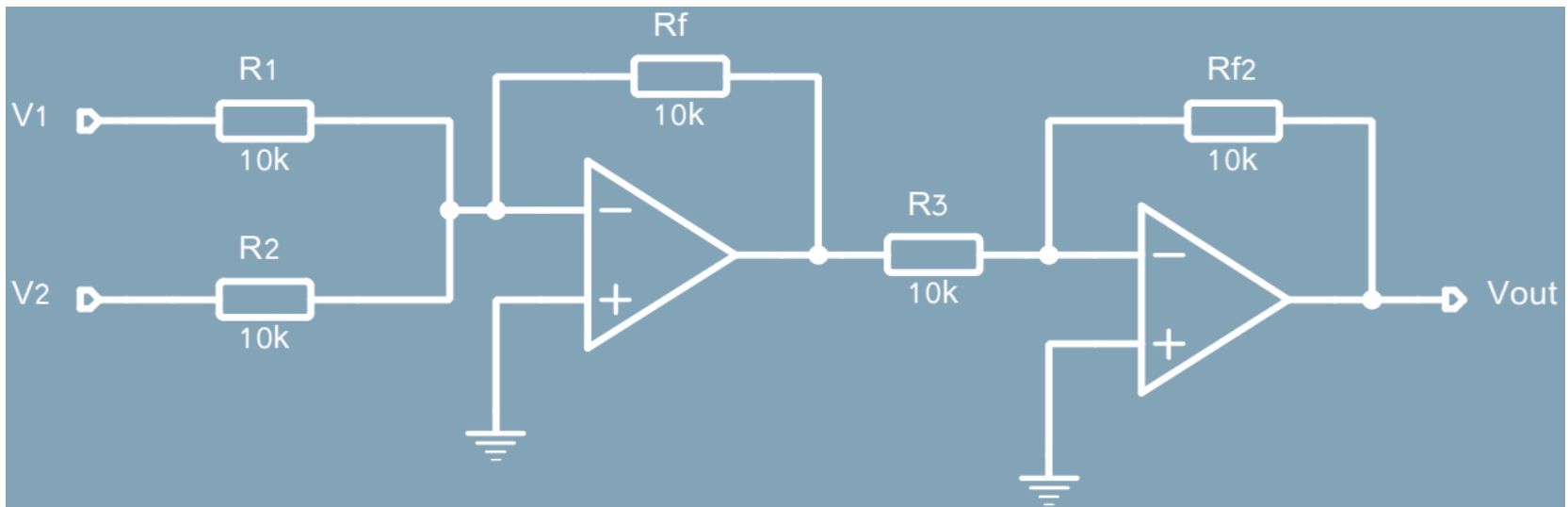
## O Amplificador Operacional

### Circuito somador inversor de duas entradas



## O Amplificador Operacional

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





O Amplificador Operacional

O Amplificador Subtrator



## O Amplificador Operacional

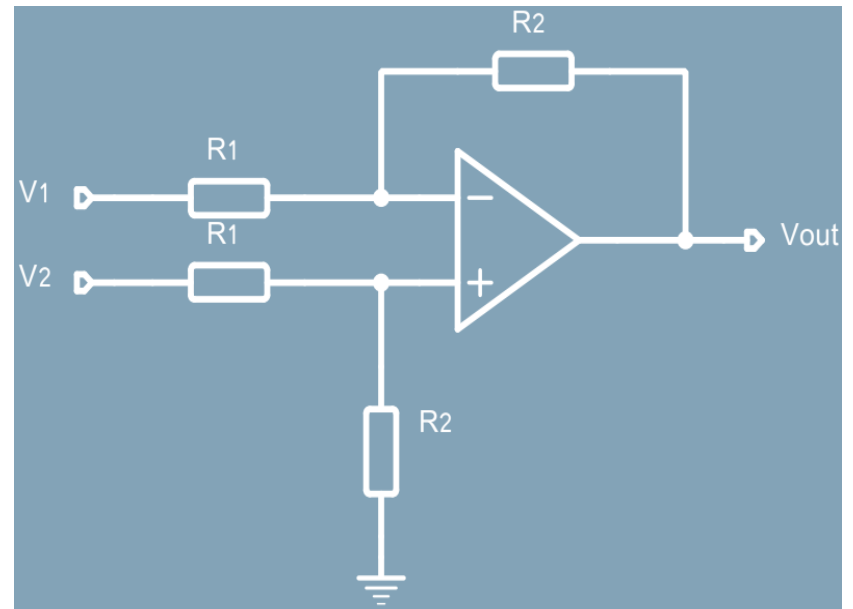
# Características do Amp. Subtrator

- ▶ 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
- ▶  $V_{OUT} = V_2 - V_1$





## 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