

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula 01 - Apresentação

UNIP - Engenharia Elétrica

7/8 - Semestre

Disciplina: Eletrônica Aplicada

Prof. Luís Caldas

TEORIA

Plataforma ZOOM

Id: 1º horário: 19h10 - 20h25, ID: 921 6565 1988
2º horário: 20h45 - 22h00, ID: 934 5744 6145

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

1. AULAS Teoria e Laboratório

6.a feira das 19h10 às 20h:25 semanalmente - Teoria online

6.a feira das 20h45 às 22:00hs quinzenalmente - Teoria online

5.a feira das 7h10 às 22:00hs - quinzenal intercaladamente turma A e B - Lab. .

2. CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO

A = Nota Teoria + Nota de Laboratório + Nota de Exercícios

3. MATERIAL DIDÁTICO

Consultar disciplina online - Site Unip - disciplina Eletrônica IV

Consultar site: luisaldas.com.br - UNIP/Eletronica Aplicada.

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

4. EMENTAS Teoria e Laboratório - Livro Texto: R. Boylestad - 11.a ed.

4.1 TEORIA

CAP. 01 - Apresentação do amplificador operacional

- Modelo ideal de um amplificador operacional;
- Curva de transferência entrada e saída do OPAMP;
- Modelo de estudo do operacional;
- Funcionamento e operação do operacional;
- Realimentação negativa do amplificador;
- Montagens inversor e não inversor;
- Cálculo do ganho e resistência de entrada das montagens do operacional;
- Exemplos e exercícios.

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

CAP. 02 - Limitações do amplificador operacional

- Produto ganho x largura de faixa;
- Slew-rate do operacional;
- Exemplos e exercícios;

CAP. 03 - Funções matemáticas - Somador e Subtrator amplificador operacional

- Somador analógico expressão matemática de saída;
- Subtrator analógico expressão matemática de saída;
- Condições de contorno para o projeto de subtratores;
- Exemplos e exercícios;

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

CAP. 04 - Estudo do integrador e diferenciador ativo c/amplificador operacional;

- Integrador Miller analógico;
- Integrador real;
- Definição da função de transferência entrada e saída do integrador real;
- Análise em frequência módulo e fase do integrador;
- Diferenciador ideal;
- Diferenciador real;
- Definição da função de transferência entrada e saída do diferenciador real;
- Análise em frequência módulo e fase do diferenciador;
- Exemplos e exercícios.

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

CAP. 05 - Computação analógica c/amplificador operacional;

- Definição dos blocos matemáticos analógicos;
- Determinação de soluções expressões matemáticas;
- Solução de equações diferenciais;
- Cálculo das tensões CC e eficaz das expressões matemáticas;
- Exemplos e exercícios.

CAP. 06 - Comparação analógica c/amplificador operacional;

- Estudo do comparador de amplitude com amplificador operacional;
- Tipos de comparadores analógicos;
- Projeto de comparadores e curvas entrada saída e histerese;
- Exemplos e exercícios.

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

CAP. 07 - Osciladores harmônicos c/amplificador operacional;

- Oscilador astável;
- Osciladores por: deslocamento, ponte de Wien, Colpits, Hartley, cristal;
- Exemplos e exercícios.

CAP. 08 - Dissipação em potência para transistores de potência

- Modelo de estudo do sistema térmico de um semicondutor de potência;
- Projeto de um dissipador de potência;
- Utilização de gráfico de operação segura transistor de potência SOA;
- Análise de manual das especificações e parâmetros do transistor de potência;
- Exemplos e exercícios.

CURSO DE ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

PROGRAMAÇÃO DO CURSO

CAP. 09 - Classes de amplificadores de potência;

- Definição classe A, rendimento e operação;
- Definição classe B, rendimento e operação;
- Definição classe AB, rendimento e operação;
- Definição classe D, rendimento e operação;
- Aplicações classe D e introdução ao PWM;
- Exemplos e exercícios.

CAP. 10 - Apresentação de dispositivos eletro-eletrônicos;

- Curva de $V \times I$ de cada dispositivo e suas equações e fundamentos.

CAP. 01 - ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

1 - Estudo do amplificador Operacional

1.1 Elemento ativo + importante da eletrônica analógica aplicações:

- Amplificador de tensão e de corrente;
- Funções matemáticas: Soma, Subtração, Multiplicação, Divisão, Logarítmo, Exponencial, Integral, Diferencial entre outras;
- Supervisão de tensão e corrente: Comparador de Amplitude;
- Geradores de formas de ondas: Oscilador harmônico, triangular, onda quadrada;
- Filtro de ordem n: Passa-Baixa, Passa-Alta, Passa-Faixa;
- Fontes de tensão e de corrente;
- Outros.

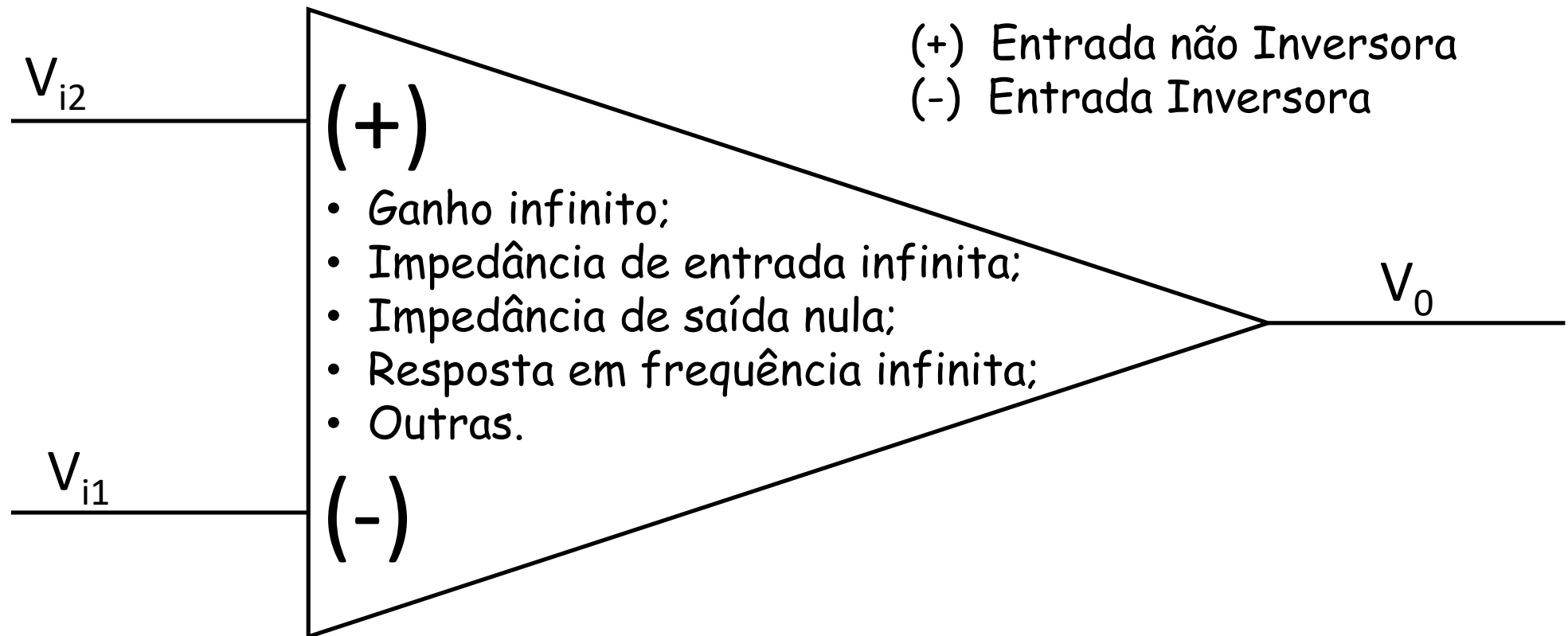
CAP. 01 - ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Apresentação

1 - Estudo do amplificador Operacional

1.1 Características de um elemento ideal.

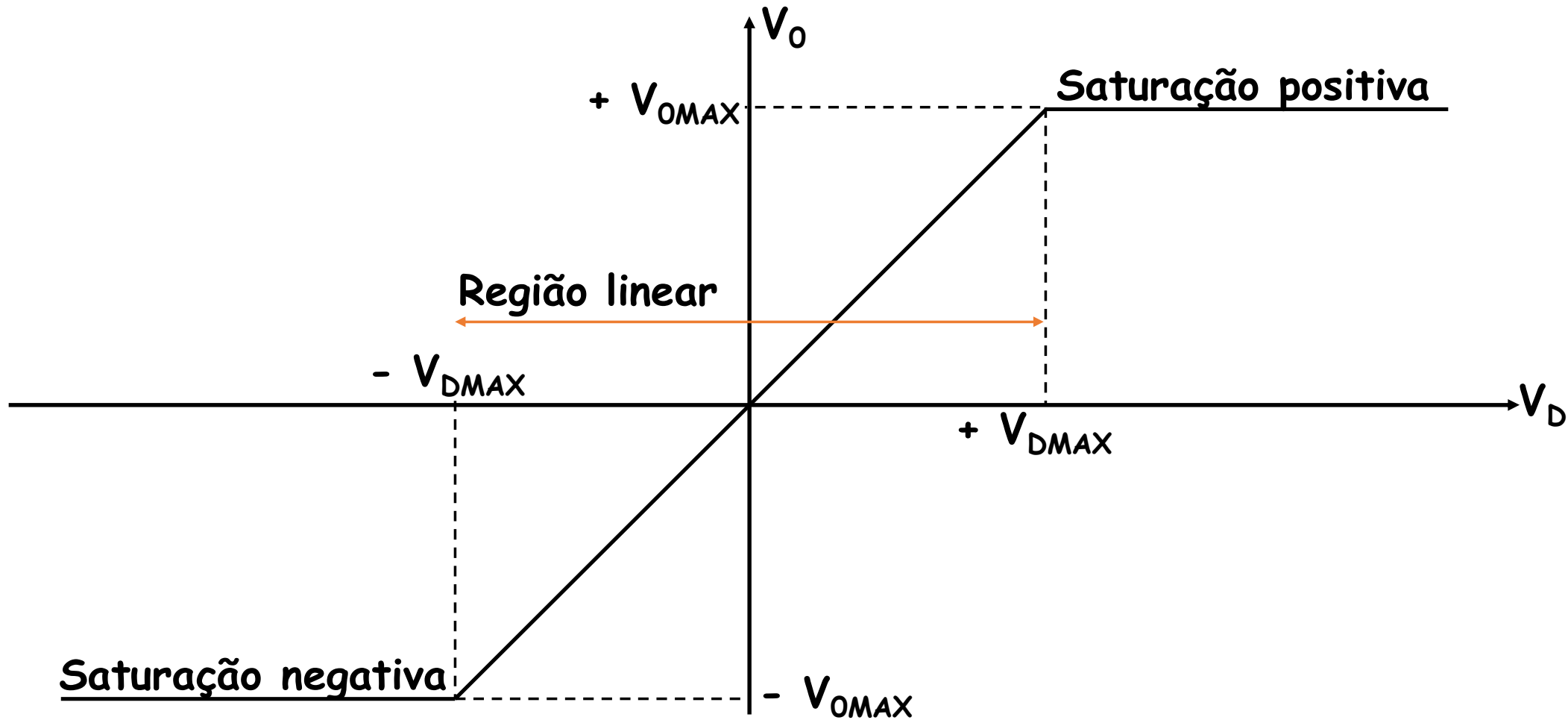


ELETRÔNICA APLICADA



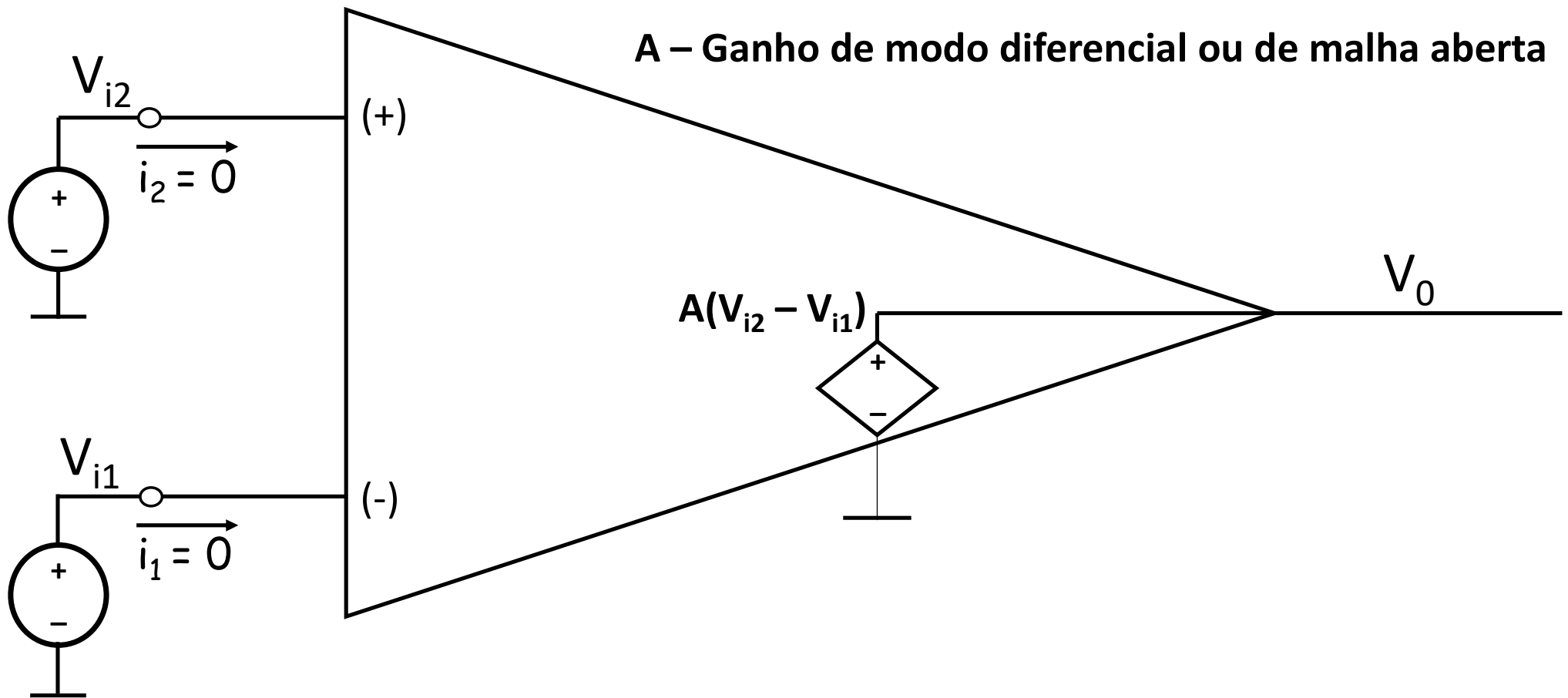
Prof. Luis Caldas
Aula - Funcionalidade

1.2 - Curva de transferência do Amp-Operacional.



1.3 - Modelo do amplificador Operacional

A – Ganho de modo diferencial ou de malha aberta



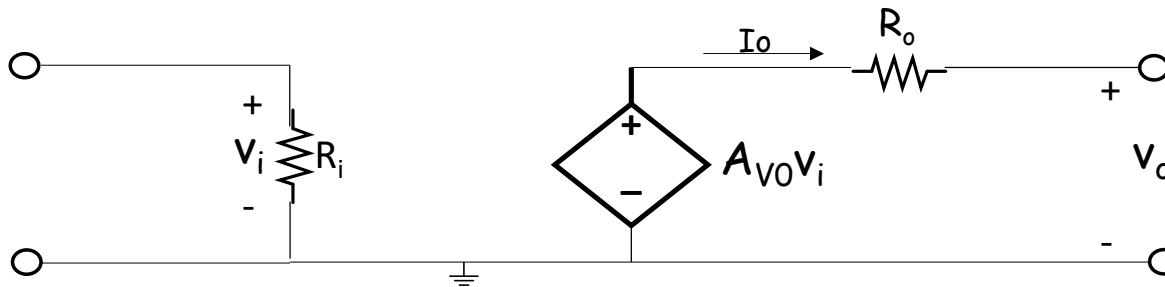
ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula - Fundamentos

1.4 - Tipos de amplificadores

Amplificador
de tensão



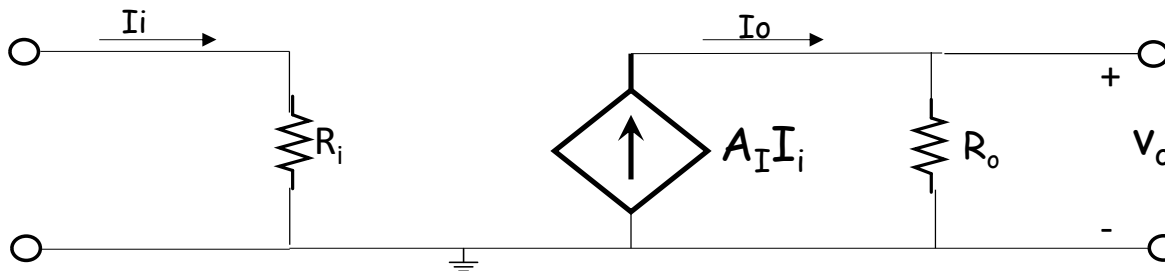
Ganho de tensão em
circuito aberto

$$A_{v_o} \equiv \frac{V_o}{V_i} \Big|_{i_o=0} \quad (\text{V/V})$$

Caracter.

$$R_i = \infty \\ R_o = 0$$

Amplificador
de corrente



Ganho de tensão em
circuito aberto

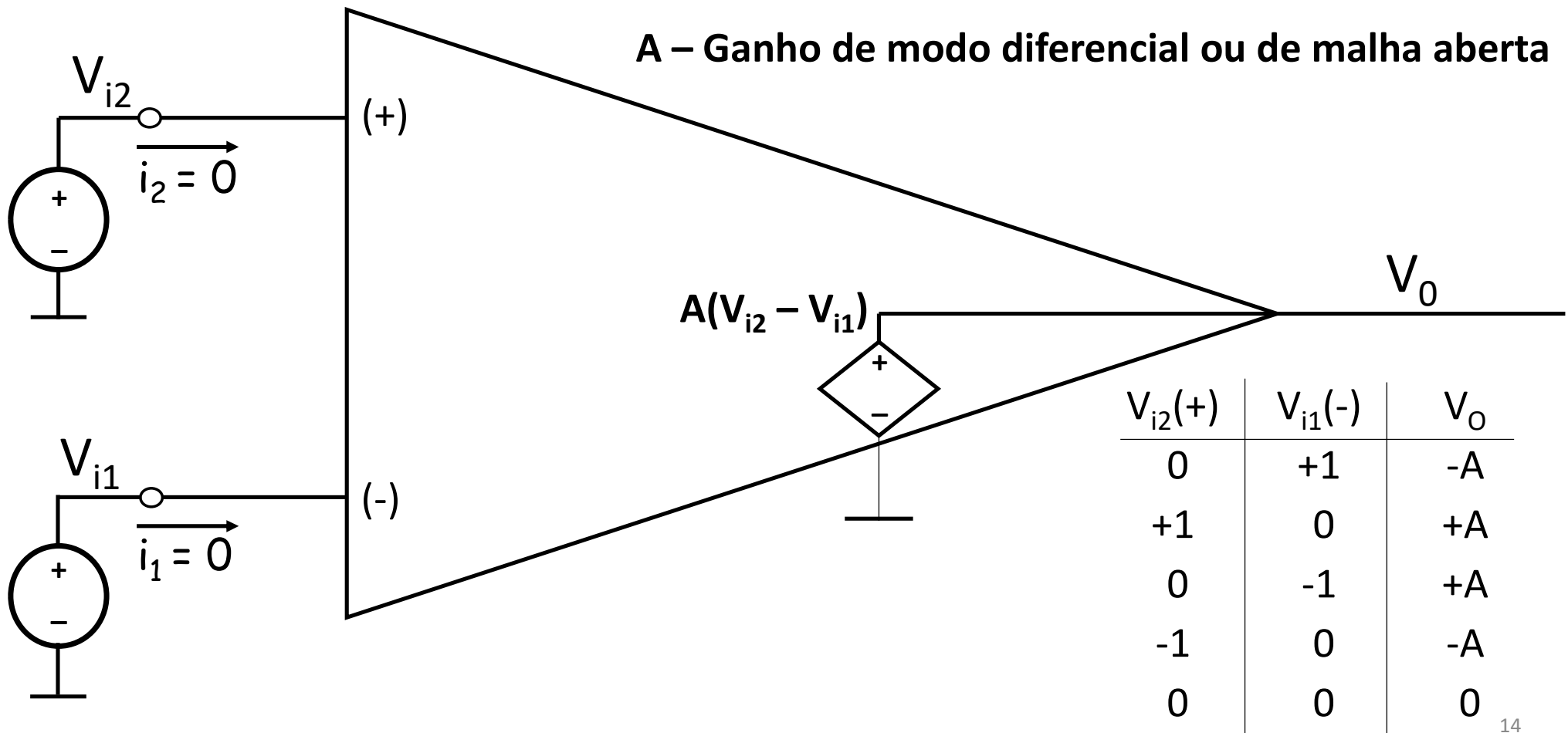
$$A_I \equiv \frac{I_o}{I_i} \Big|_{v_o=0} \quad (\text{A/A})$$

Caracter.

$$R_i = 0 \\ R_o = \infty$$

1.4 - Funcionamento

A – Ganho de modo diferencial ou de malha aberta

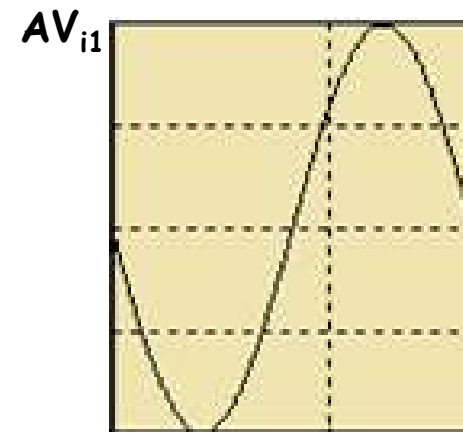
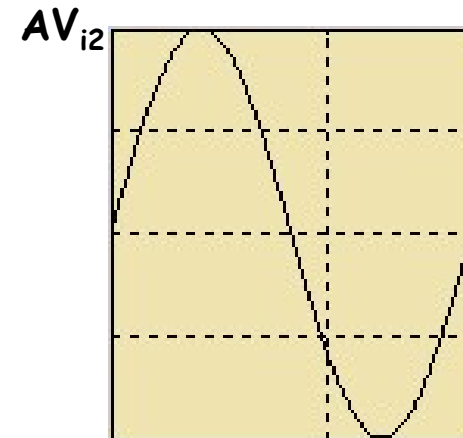
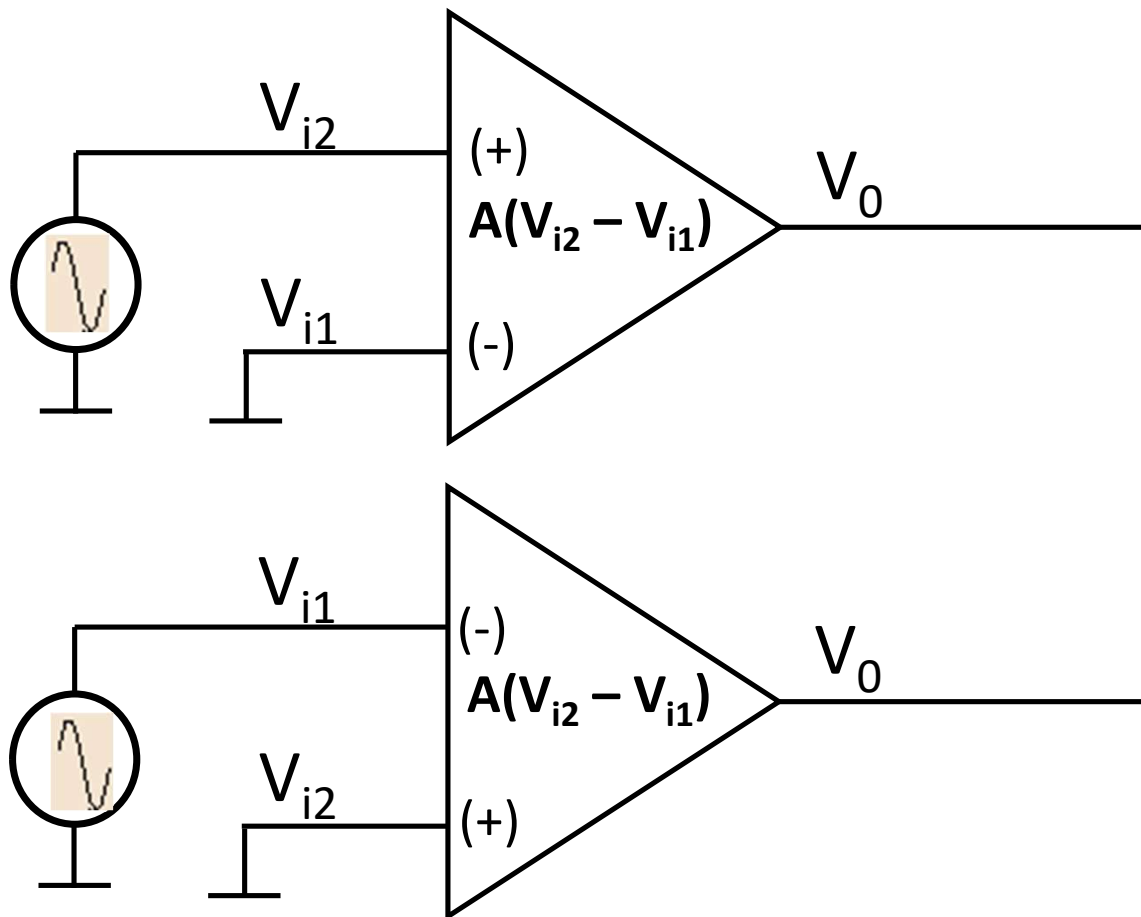


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Operação

1.5 - Operação com entrada simples

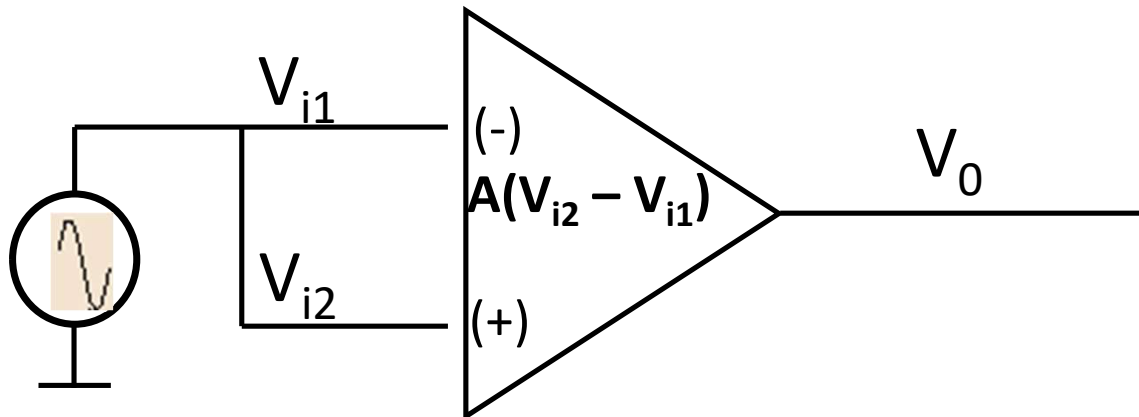
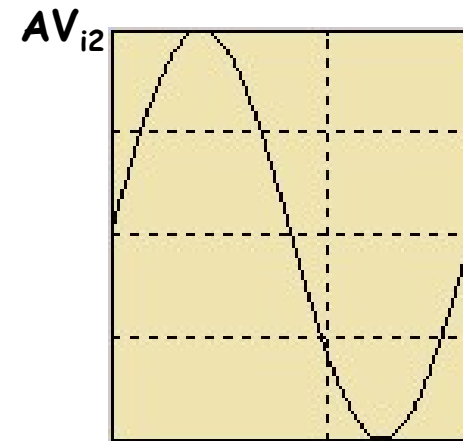
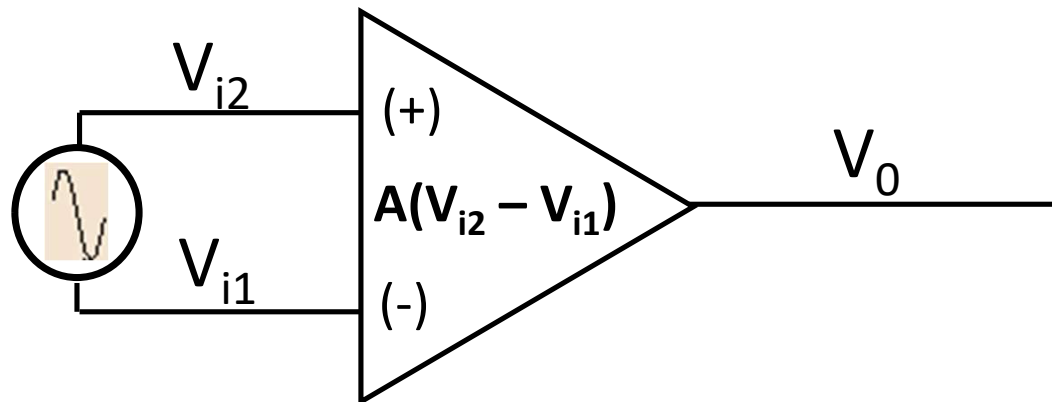


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Operação

1.6 - Operação com entrada dupla

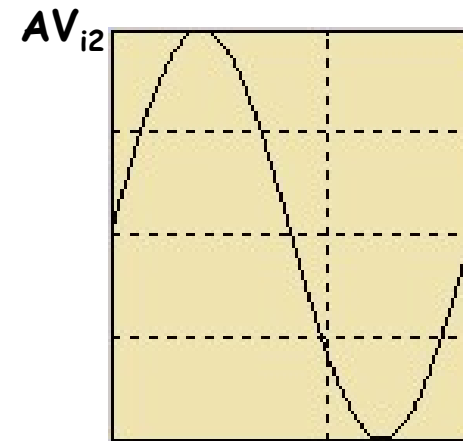
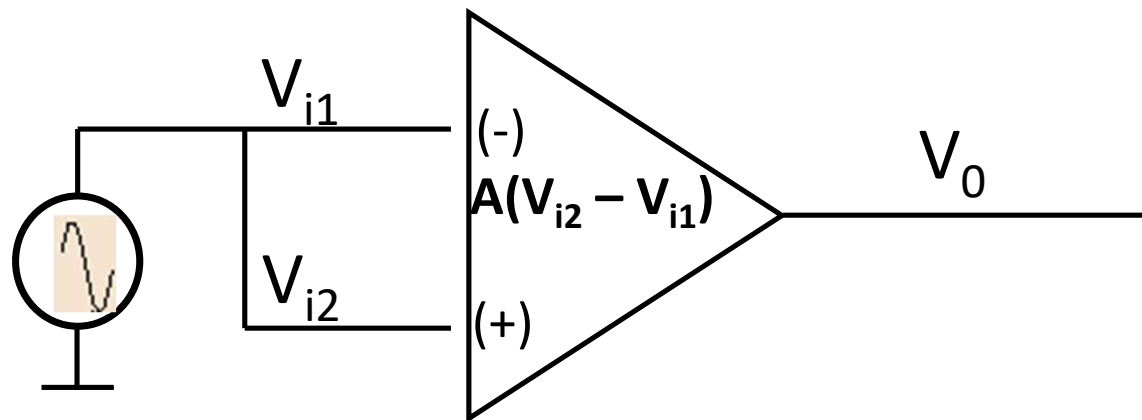
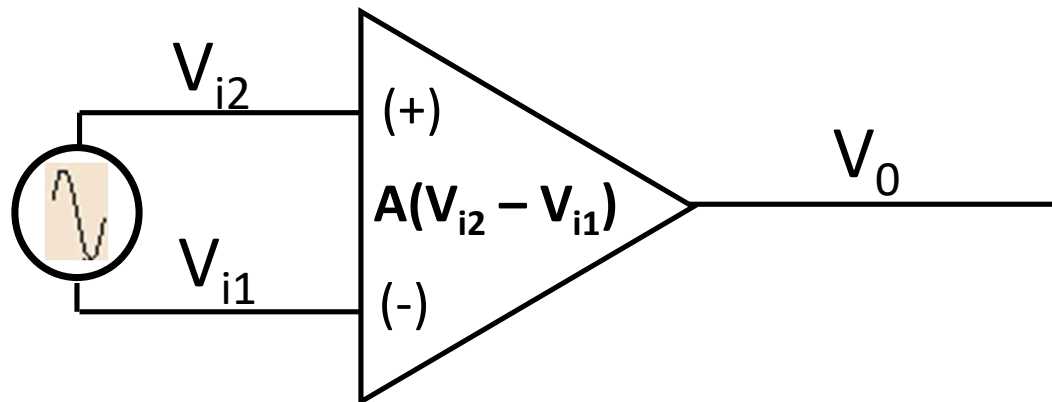


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Operação

1.6 - Operação com entrada dupla

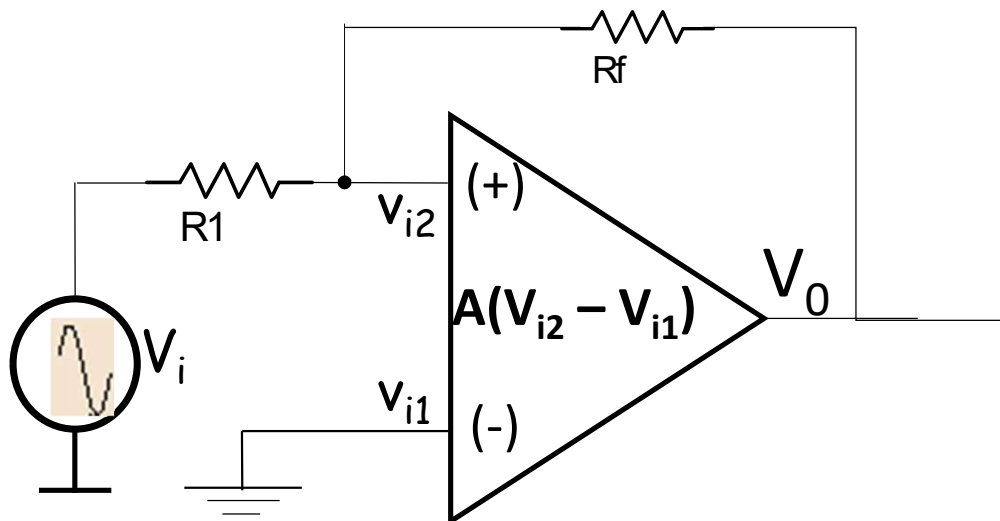


1.7 DIFICULDADE: OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA.

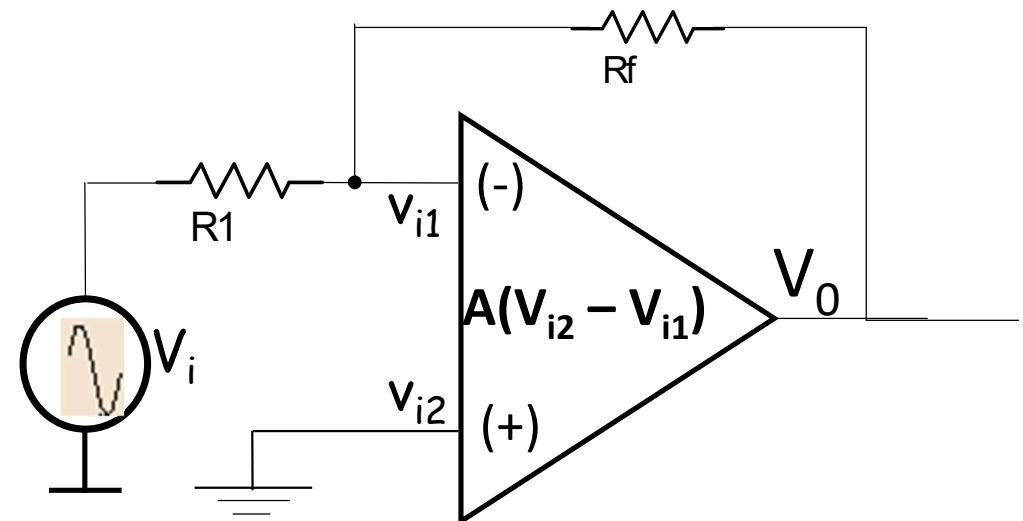
SOLUÇÃO: Criar uma realimentação que possa controlar o ganho do circuito.

Que tipo de realimentação positiva ou negativa?

POSITIVA



NEGATIVA





Realimentação positiva: Na realimentação positiva o Operacional opera nas regiões de saturação positiva e negativa.

Aplicação: Circuitos que requerem realimentação positiva.

1. Comparador de amplitude: Onde a na comparação de dois sinais sendo um sinal de referência e outro sinal de medida, a saída é gerada com valor de saturação máxima ou positiva ou negativa, de acordo com o sinal da comparação.
2. Oscilador Astável: Onde a instabilidade do circuito gera na saída periodicamente uma onda quadrada cuja amplitude máxima é de saturação ou positiva ou negativa.



Realimentação negativa: Na realimentação negativa o Operacional opera na região linear da curva de transferência entrada e saída. Se aplicada no amplificador, um sinal diferencial de entrada \times ganho de malha fechada for maior que duas vezes V_{cc} , a saída do amplificador produz um sinal na região de saturação ou positiva e negativa de acordo com a polaridade do sinal diferencial.

Aplicação: Circuitos que requerem realimentação negativa.

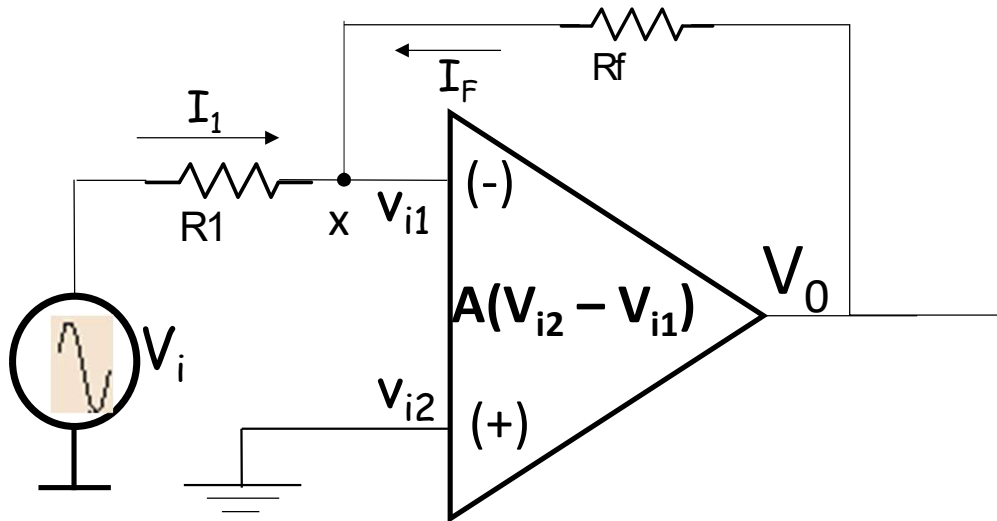
1. Amplificador operando na região linear: Onde o sinal diferencial de entrada do operacional multiplicado pelo ganho de malha fechada produz uma saída linear positiva ou negativa.
2. Amplificador operando na região de saturação: Quando se deseja produzir na saída sinais máximos e mínimos o projeto é utilizar ganhos elevados. Nesse caso não é necessário realimentação em malha fechada e a melhor solução é deixar o operacional em malha aberta.

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Realimentação

1.8 - Realimentação negativa - Malha fechada.



1. Realim. Negativa $\Rightarrow V_{i1} = V_{i2} \cong 0$ ($A = \infty$)

2. A resistência R_i de entrada é igual a R_1 .

Obs.: Em virtude da impedância alta de entrada dos operacionais, a corrente de entrada é igual a zero.

A somatória das correntes do nó $X = 0$
 $V_0 = -AV_{i1}$ então para $A = \infty$, $V_X = 0$.

X é um ponto de terra virtual

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1} \quad e \quad I_F = \frac{V_0}{R_F} \Rightarrow \frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

Exemplo: Para $R_1 = 10K$ e $R_f = 100K$, o valor do ganho de malha fechada A_{CL} será:

Montagem Inversor.

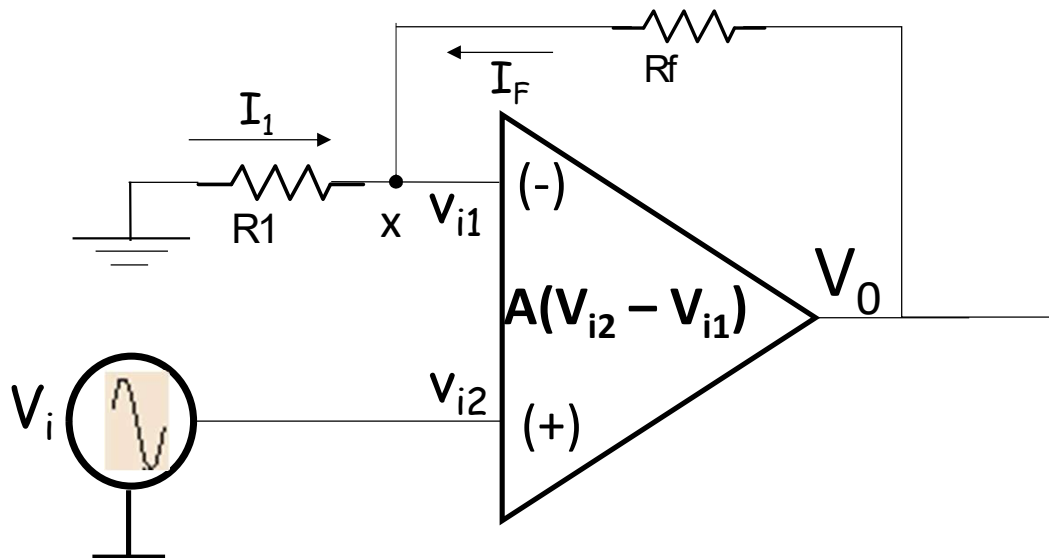
$$A_{CL} = -R_f / R_1 = -100K / 10K = -10.$$

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Realimentação

1.9 - Realimentação negativa - Malha fechada.



1. Realim. Negativa $\Rightarrow V_{i-1} = V_{i2} \cong 0$ ($A = \infty$)

2. A resistência R_i de entrada é igual a R_1 .

Obs.: Em virtude da impedância alta de entrada dos operacionais, a corrente de entrada é igual a zero.

As tensões $V_{i2} = V_{i1}$, então Thevenin:
 $V_{i1} = V_0 R_1 / (R_1 + R_f) = V_{i2} = V_i$

$$V_0 / V_i = (1 + R_f / R_1)$$

Exemplo: Para $R_1 = 10K$ e $R_f = 90K$, o valor do ganho de malha fechada A_{CL} será:

Montagem Não Inversor.

$$A_{CL} = 1 + R_f / R_1 = 1 + 90K / 10K = + 10.$$

ELETRÔNICA APLICADA



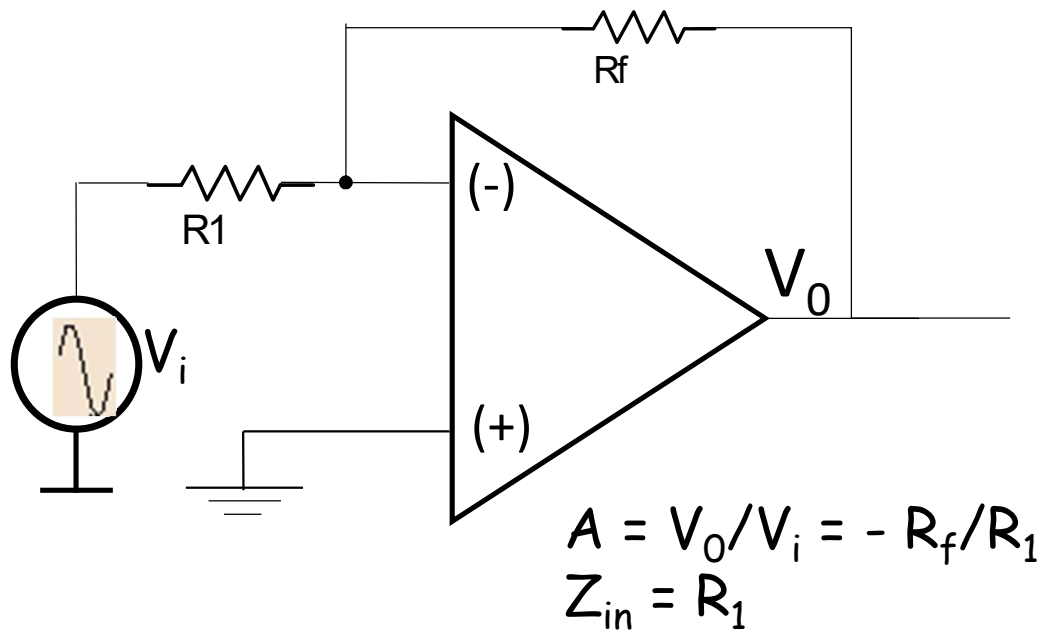
Prof. Luis Caldas
Aula – Realimentação

1.10 - Realimentação negativa - Resumo.

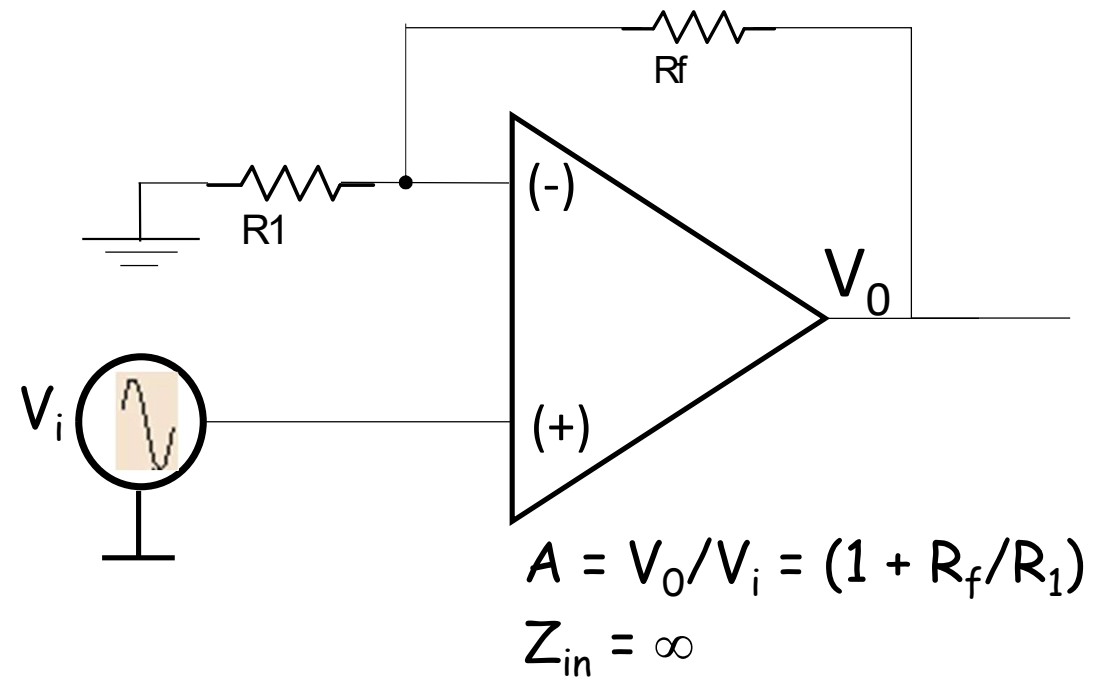
A = Ganho de tensão

Z_{in} = Impedância de entrada

A - Montagem Inversor



B - Montagem não Inversor



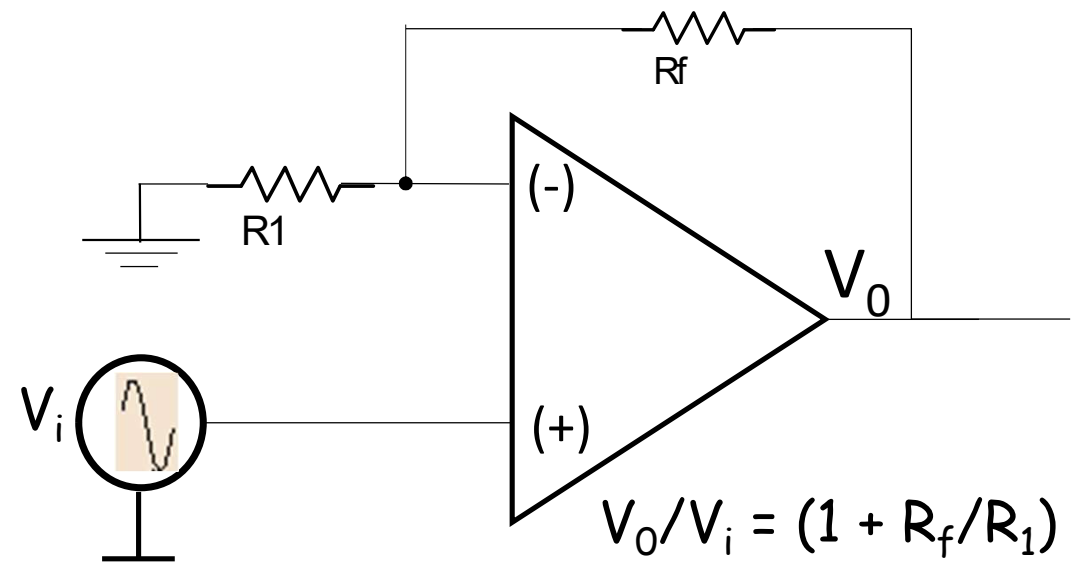
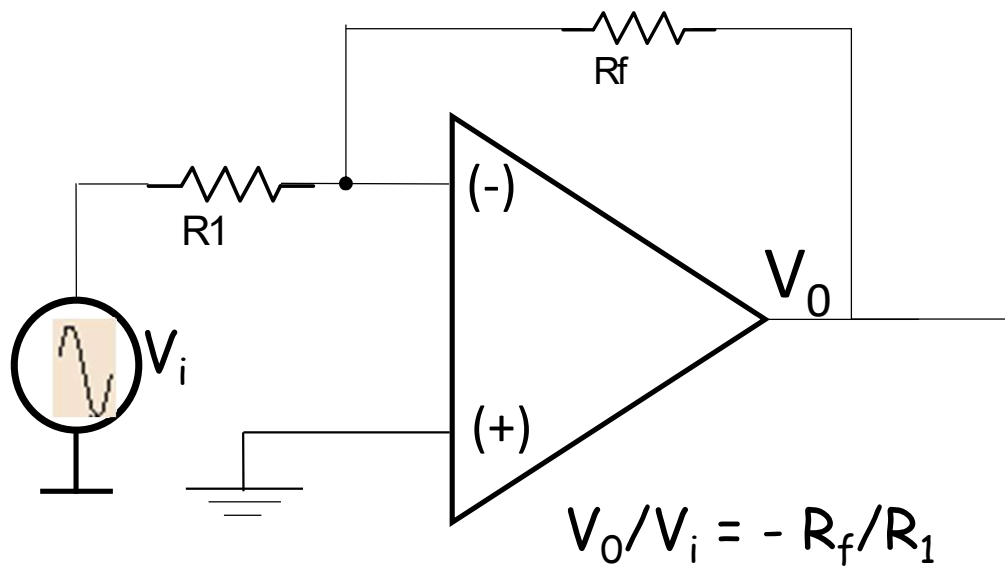
ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Realimentação

Exercício - Desenhar a forma de onda de saída conforme a entrada a seguir

Dados: $V_{in} = 0$ p/ $t < 0$ e $t > 1$ e $V_{in} = 1$ p/ $0 < t \leq 1$ e periódica para $R_1 = 1K$ e $R_f = 10K$.



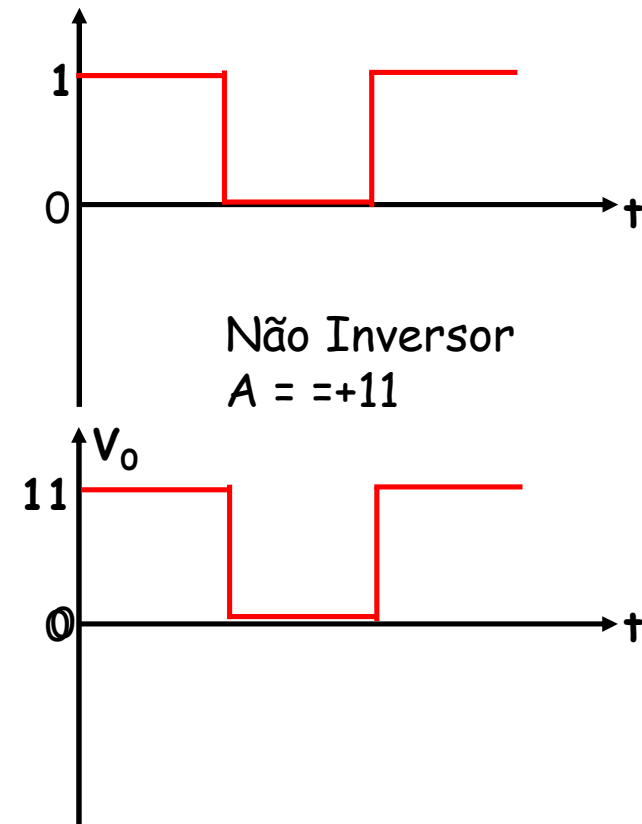
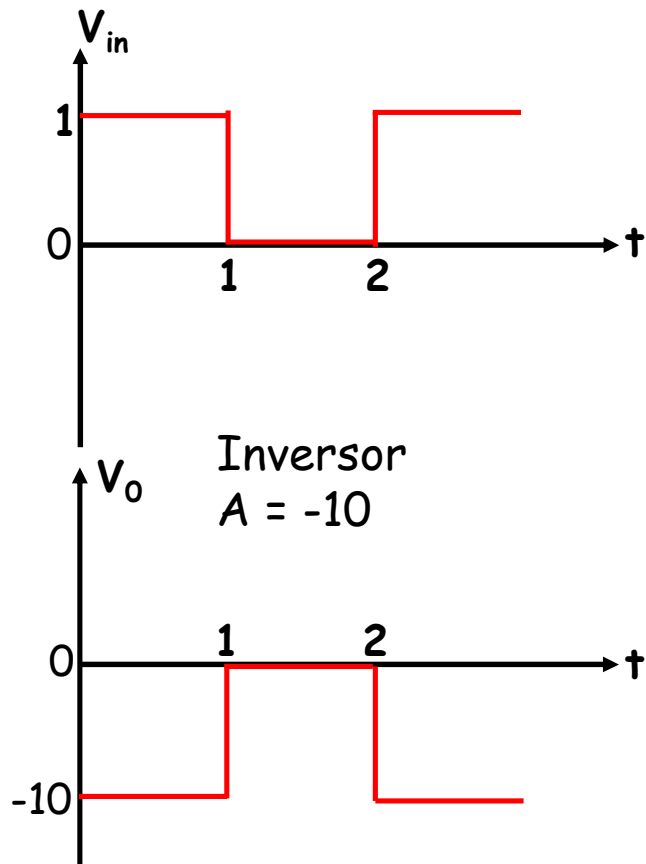
ELETRÔNICA APLICADA



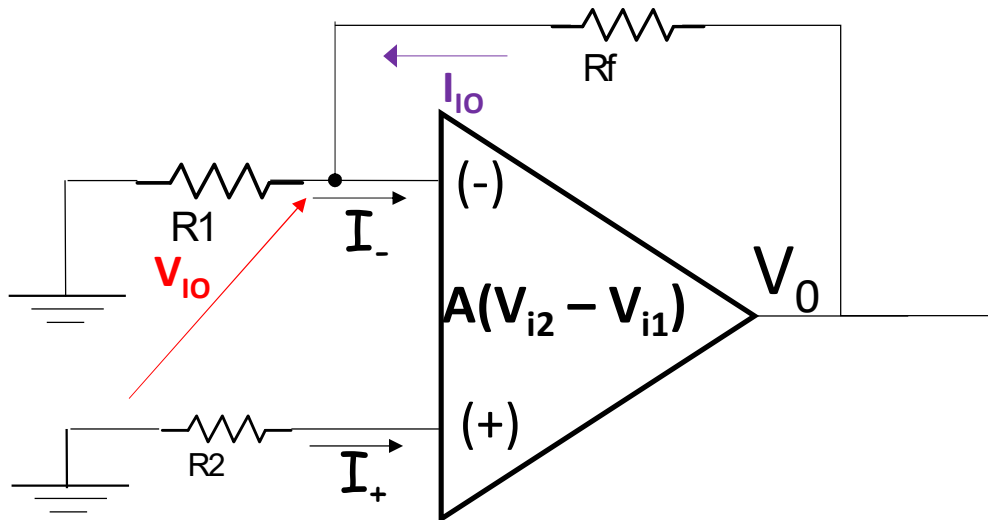
Prof. Luis Caldas
Aula – Realimentação

Exercício - Desenhar a forma de onda de saída conforme a entrada a seguir

Dados: $V_{in} = 0$ p/ $t < 0$ e $V_{in} = 1$ p/ $0 \leq t \leq 1$ e periódica para $R_1 = 1K$ e $R_f = 10K$.



1.11 - Tensão e corrente residual.



$$V_{IO} = V_O \text{ (offset) } R_1 / (R_1 + R_f)$$

Tensão e Corrente de offset

- Tensão de offset V_{IO}
- Corrente de offset I_{IO}

V_O (offset) devido a V_{IO}

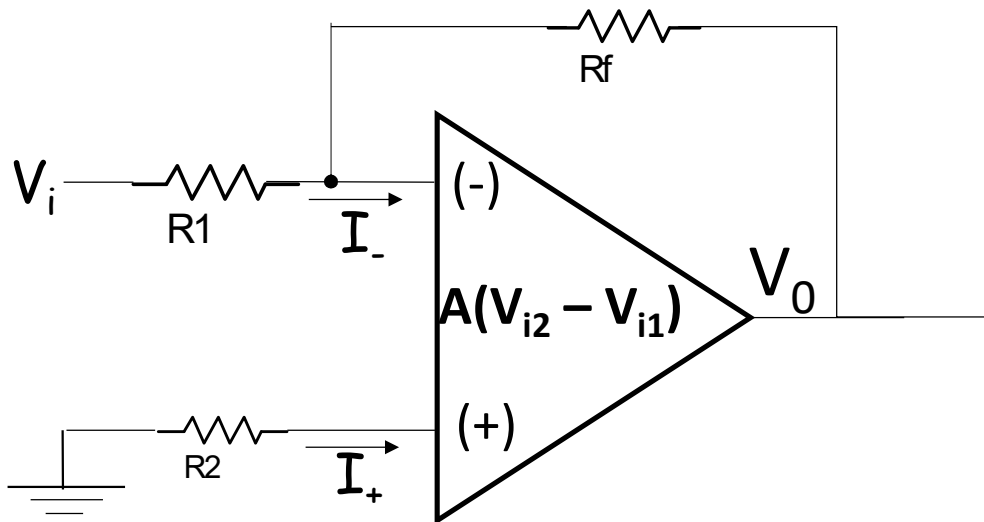
$$V_O \text{ (offset) } = V_{IO} (R_1 + R_f) / R_1$$

V_O (offset) devido a I_{IO}

$$V_O \text{ (offset) } = I_{IO} R_f$$



1.12 - Exemplo para tensão e corrente residual.



$$V_O \text{ (offset) devido a } V_{IO}$$
$$V_O \text{ (offset)} = V_{IO} (R_1 + R_f) / R_1 =$$
$$V_O \text{ (offset)} = 404\text{mV}$$

$$V_O \text{ (offset) devido a } I_{IO}$$
$$V_O \text{ (offset)} = I_{IO} R_f$$
$$V_O \text{ (offset)} = 75\text{mV}$$

Exemplo: Calcular a tensão offset total de saída para um amplificador operacional cuja especificação para $V_{IO} = 4\text{mV}$ e corrente $I_{IO} = 150\text{nA}$. **Dados:** $R_1 = 5\text{K}$, $R_f = 500\text{K}$ e $R_2 = 5\text{K}$.

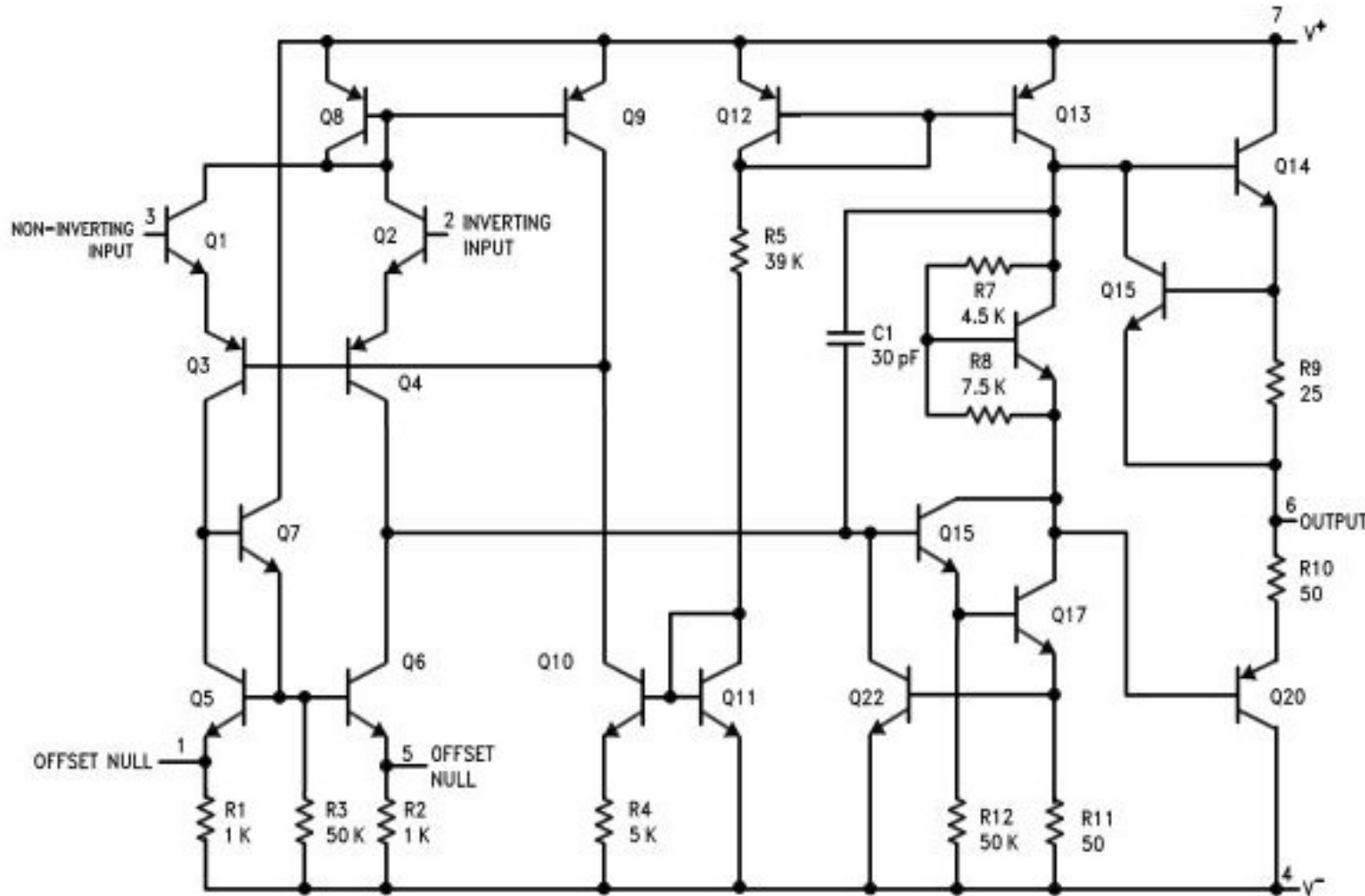
$$V_O \text{ (offset total)} = 404 + 75 = 479\text{mV}.$$

ELETRÔNICA APLICADA

Esquema interno do CI - 741 - Amplificador Operacional



Prof. Luis Caldas
Aula - Demonstrativo

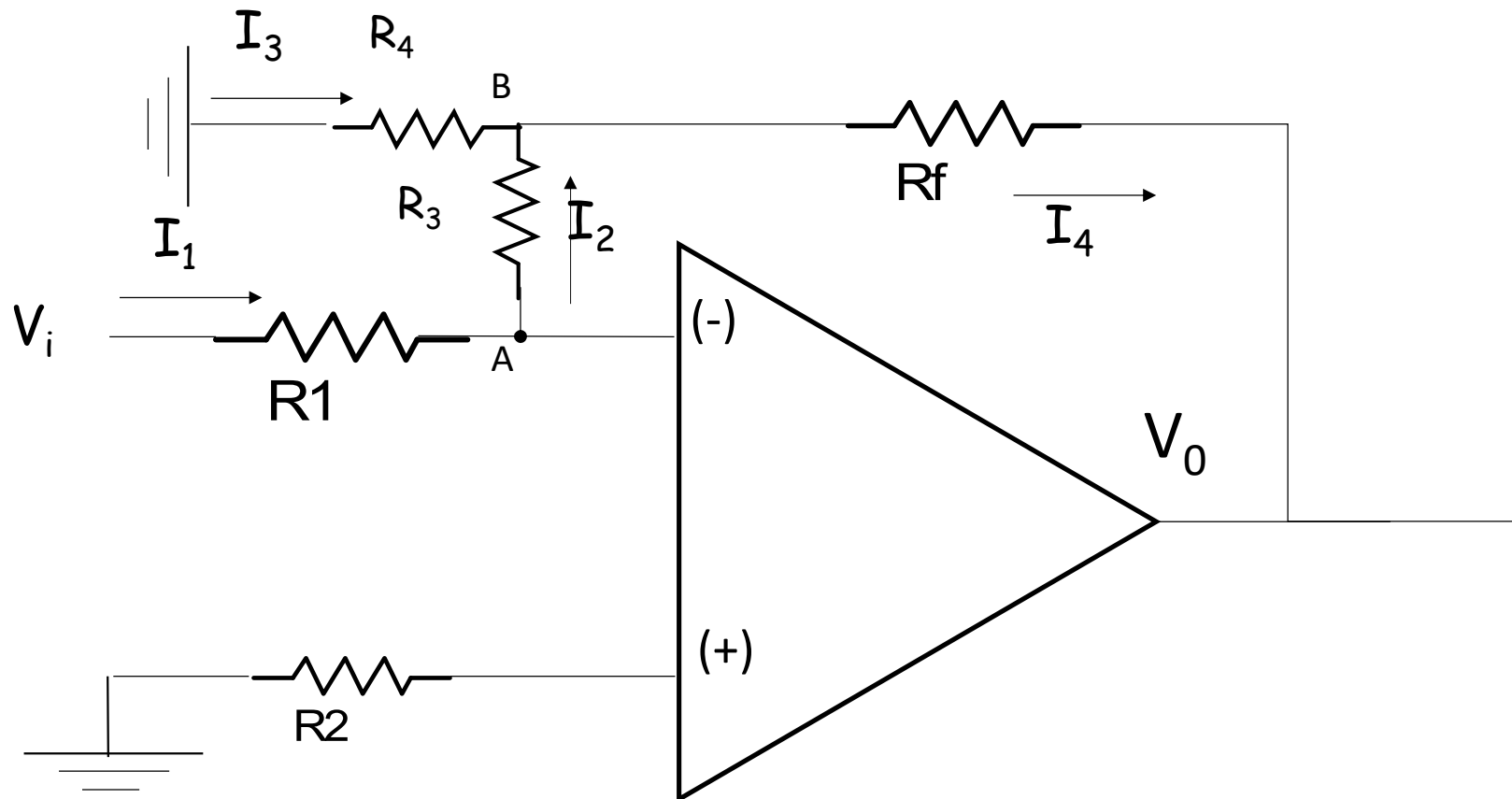


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Exemplo

1.13 - Exemplo para determinar a tensão V_0 e as correntes, sabendo-se que:
 $V_1 = 5V$ e $R_1 = 5K$, $R_3 = 2K$, $R_4 = 1K$, $R_f = 2K$.

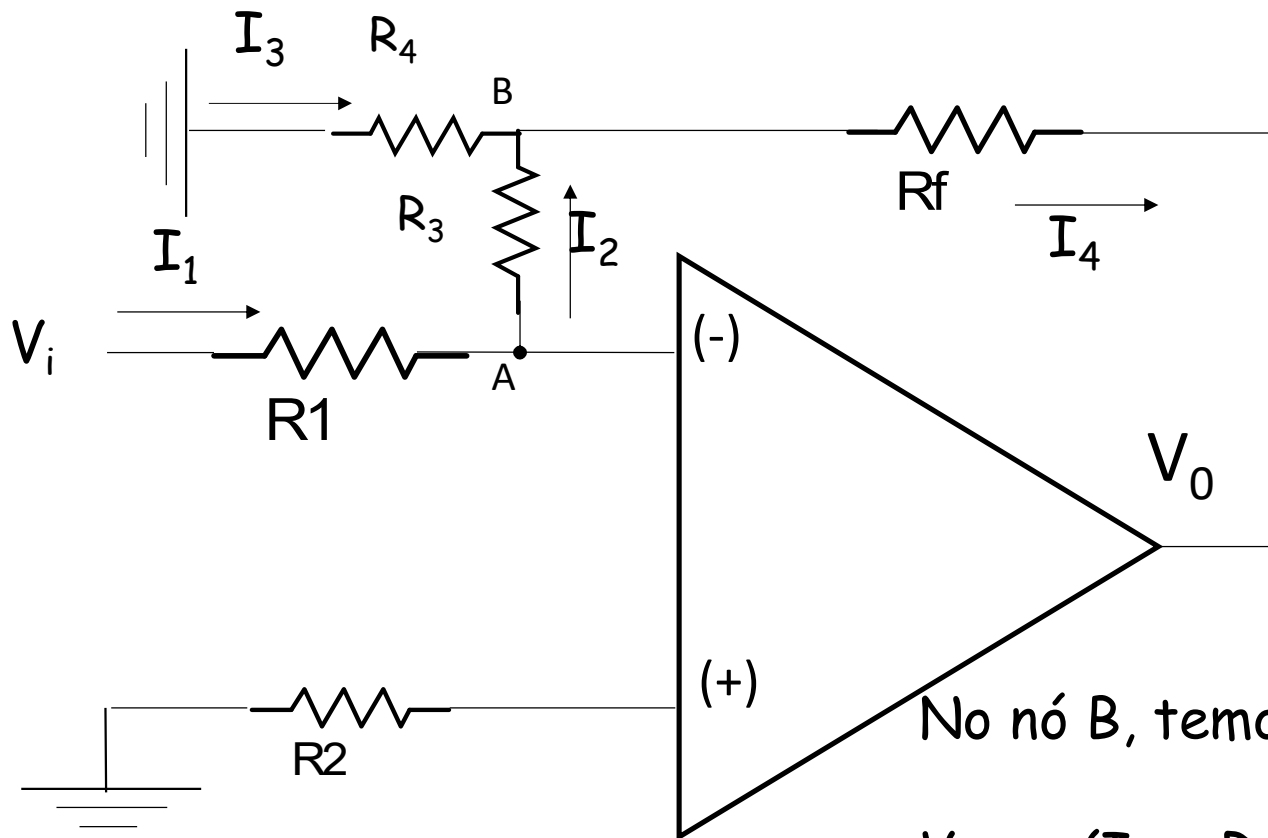


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Exemplo

1.14 - Exemplo para determinar a tensão V_0 e as correntes, sabendo-se que: $V_1 = 5V$ e $R_1 = 5K$, $R_3 = 2K$, $R_4 = 1K$, $R_f = 2K$.



O ponto A é um ponto de terra virtual e a corrente $I_1 = V_i / R_1 = 5V / 5K = 1mA$.

Como $I_1 = I_2$, a tensão no ponto B será:

$$V_B = -I_1 R_3 = -1mA \times 2K = -2V.$$

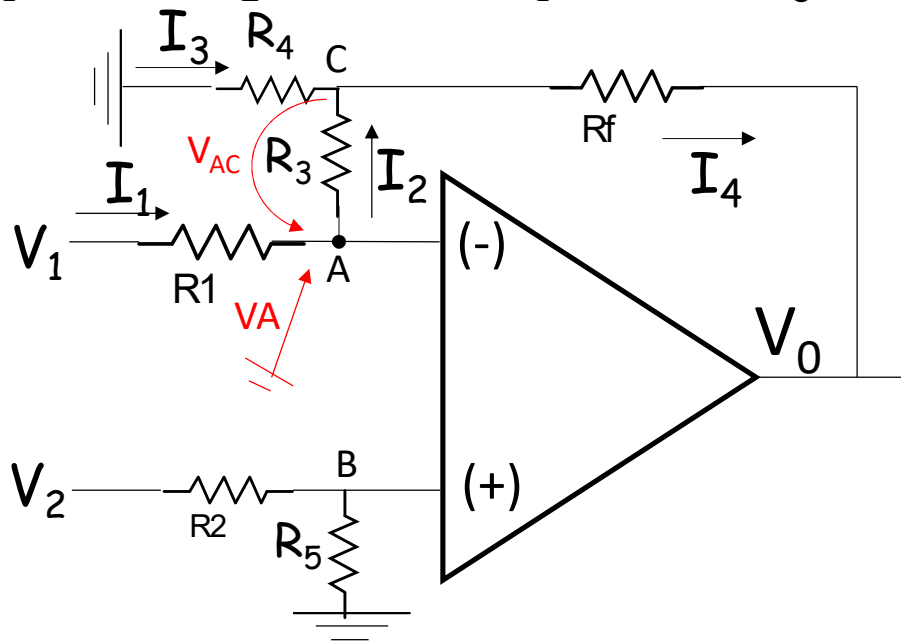
$$\text{A corrente } I_3 = -V_B / R_4 = 2V / 1K = 2mA$$

$$\text{No nó B, temos: } I_4 = I_2 + I_3 = 1mA + 2mA = 3mA$$

$$V_0 = -(I_4 \times R_f + V_B) = -(3mA \times 2K + 2V) = -8V.$$



1.15 - Exemplo para determinar a tensão V_0 e as correntes, sabendo-se que: $V_1 = 5V$, $V_2 = 4V$ e $R_1 = 3K$, $R_3 = 2K$, $R_4 = 1K$, $R_2 = 1K$, $R_5 = 1K$ e $R_f = 2K$.



Como ganho é muito alto, então a tensão no ponto A da realimentação negativa é igual a tensão no ponto B: $V_A = V_B$ e

$$V_B = V_2 \times R_5 / (R_2 + R_5) = 4 \times 1K / 1K + 1K = 2V$$
$$I_1 = (V_1 - V_A) / R_1 = (5 - 2) / 3K = 1mA$$

Como $I_1 = I_2$, ddp entre os pontos A e C será: $V_{AC} = I_2 R_3 = 1mA \times 2K = 2V$

$$V_C = V_A - V_{AC} = 2 - 2 = 0 \text{ daí } I_3 = 0.$$

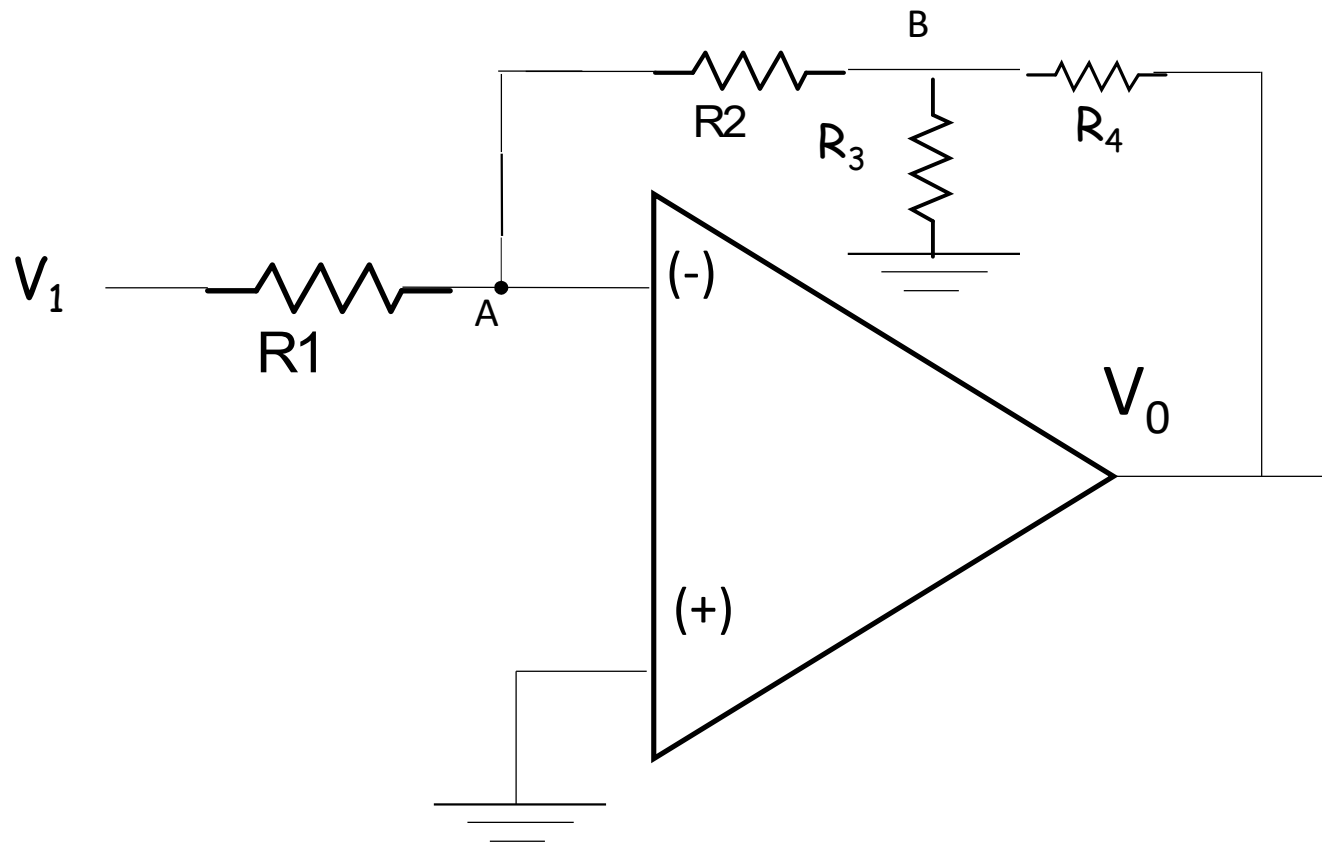
$$\text{No nó C: } I_4 = I_2 + I_3 = 1mA + 0mA = 1mA$$
$$V_0 = -(I_4 \times R_f + V_C) = -(1mA \times 2K + 0V) = -2V$$

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Desafio

1.16 - Determinar a função de transferência do circuito a seguir: sendo dados $V_1 = 0.5 \sin 1000t$ e $R_1 = 1K$, $R_2 = 2K$, $R_3 = 1K$, $R_4 = 1K$, achar V_0 .

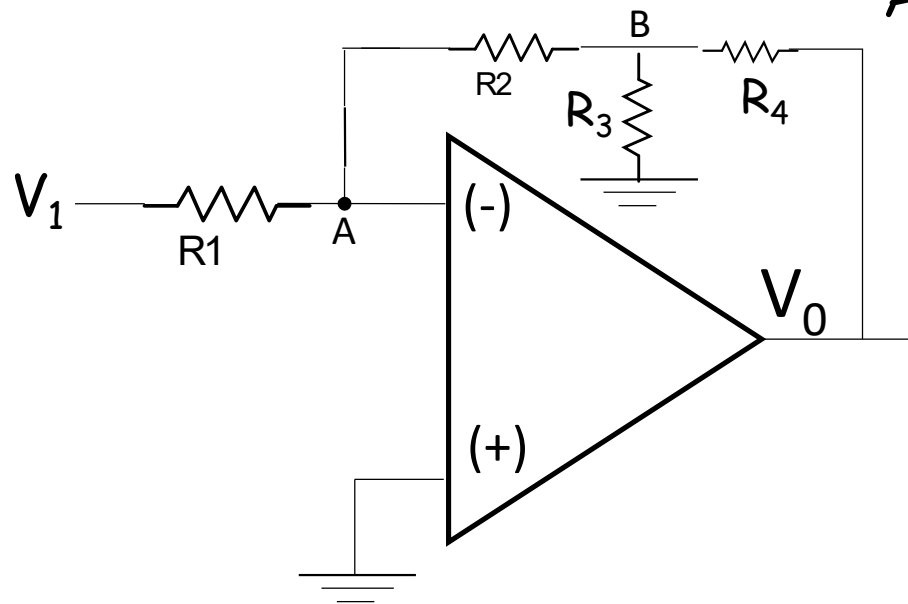


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Desafio

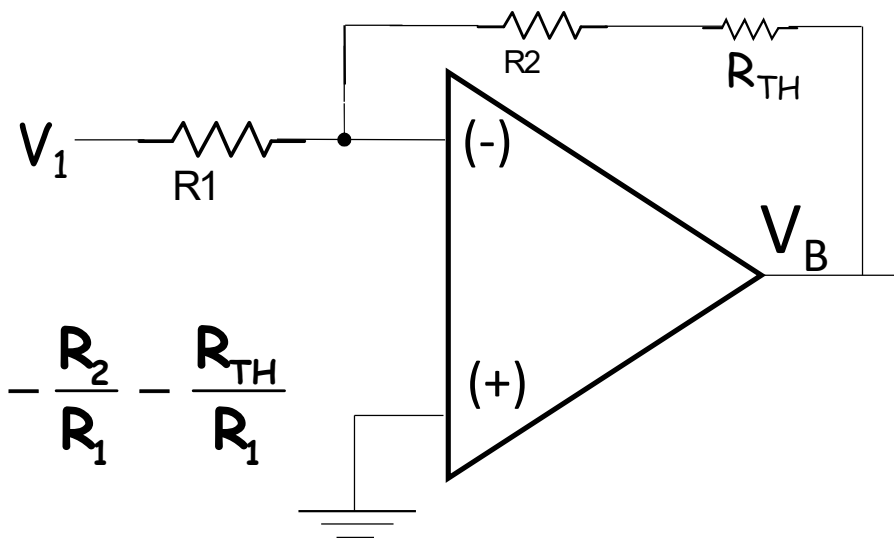
1.17 - Determinar a função de transferência do circuito a seguir: sendo dados $V_1 = 0.5 \text{ sen}1000t$ e $R_1 = 1K$, $R_2 = 2K$, $R_3 = 1K$, $R_4 = 1K$, achar V_0 .



Aplicando o gerador equivalente de Thevenin em B.

$$V_B = V_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \text{ e } R_{TH} = R_3 // R_4$$

Montando o gerador equivalente de Thevenin



$$\frac{V_B}{V_1} = - \left(\frac{R_2 + R_{TH}}{R_1} \right) = - \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_{TH}}{R_1}$$



Manipulando-se as expressões chega-se ao ganho de tensão.

$$\frac{V_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \text{II}}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_{TH}}{R_1} \quad e \quad \frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \frac{1}{R_1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) \text{II}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - \frac{R_4}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_2} \right)$$

Substituindo-se por valores numéricos a expressão do ganho.

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{2K}{1K} \left(1 + \frac{1K}{1K} + \frac{1K}{2K} \right) = -2(2.5) = -5$$

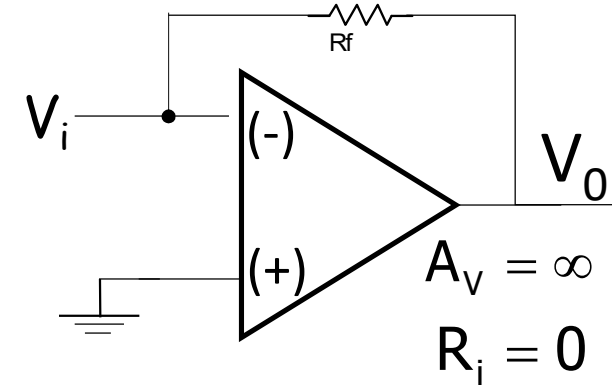
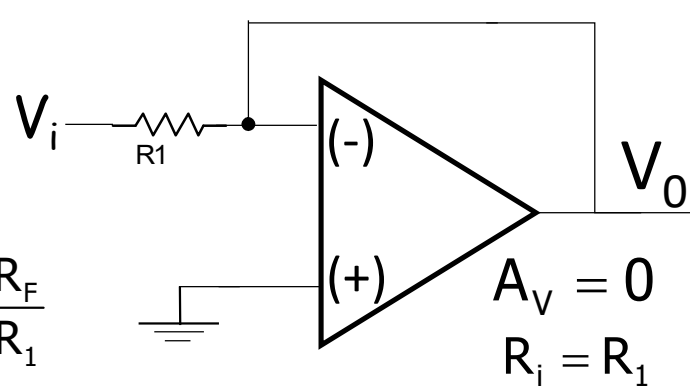
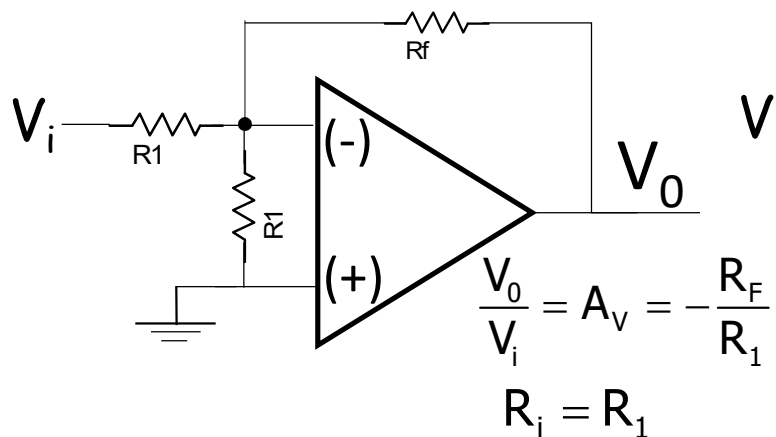
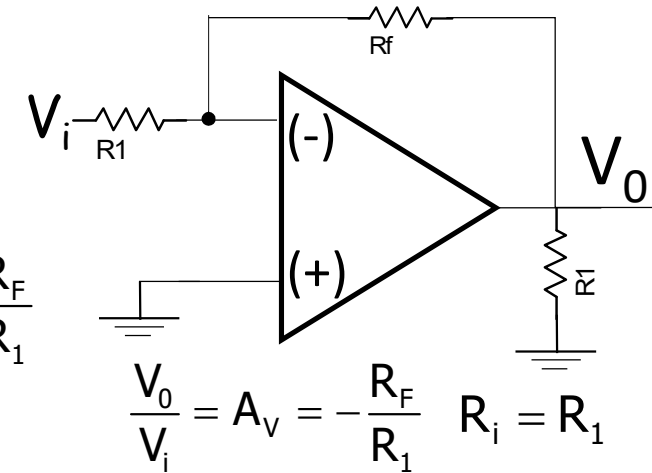
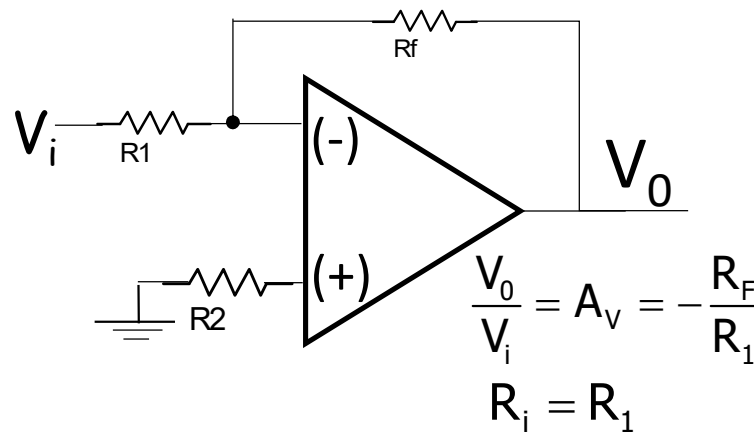
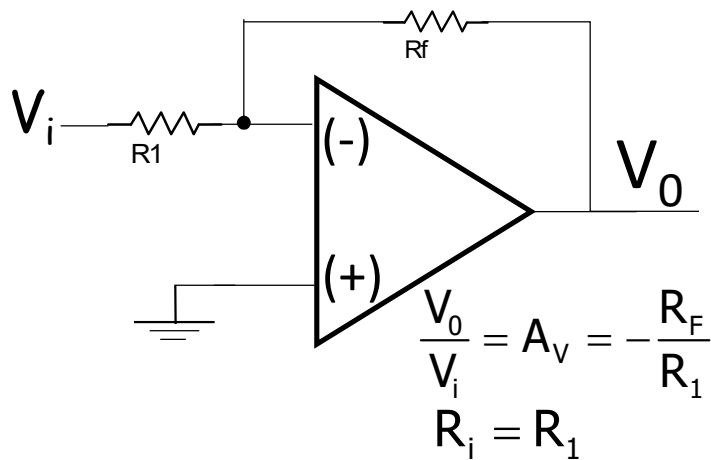
$$V_0 = -5 \times 0,5 \text{sen}1000t = 2,5 \text{sen}1000t$$

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Reforço

Exercício: Amplificadores ideais, calcular o ganho de tensão e resistência R_i

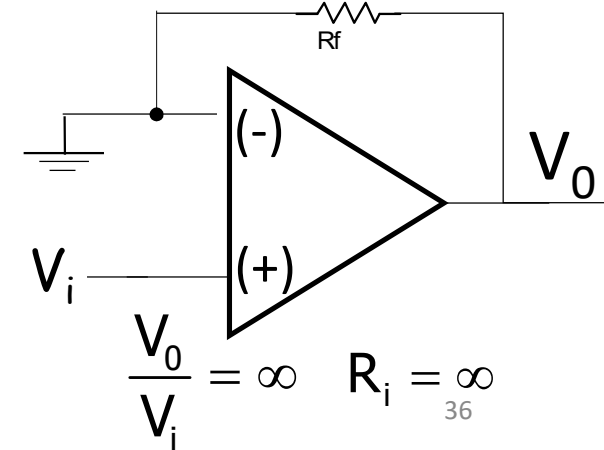
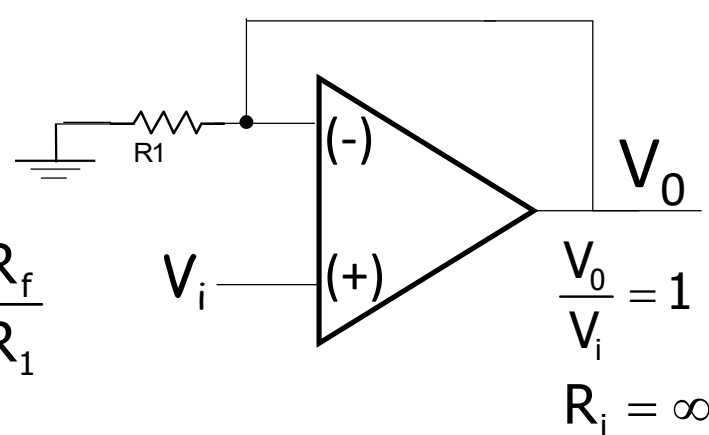
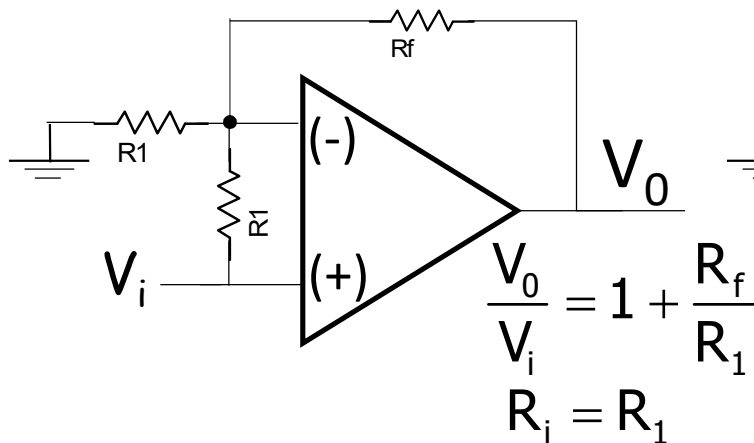
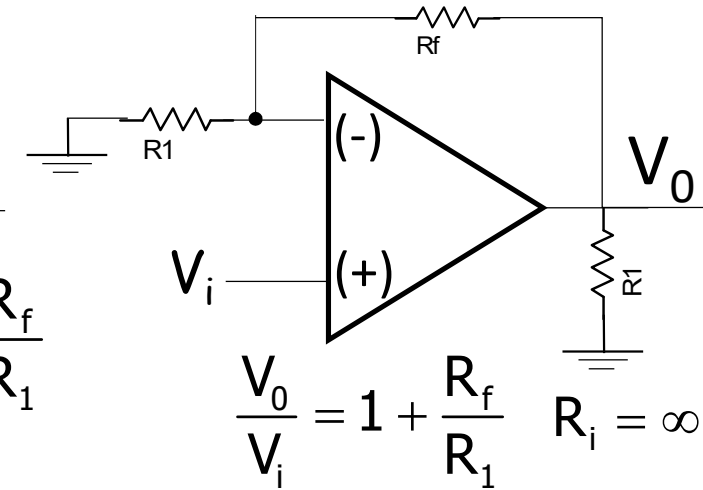
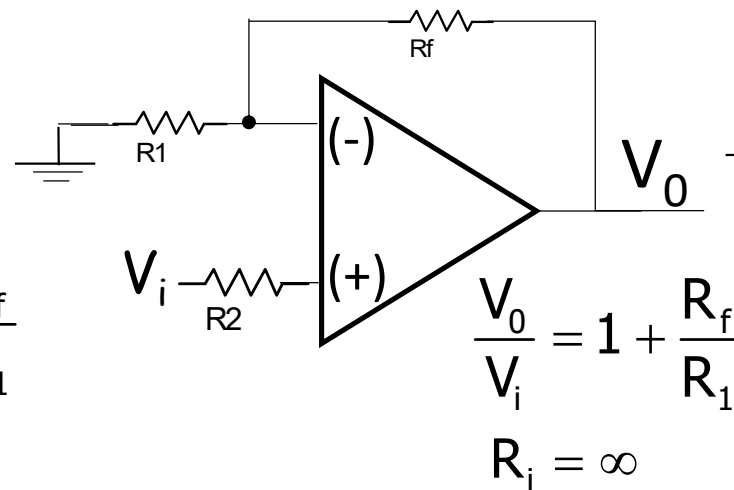
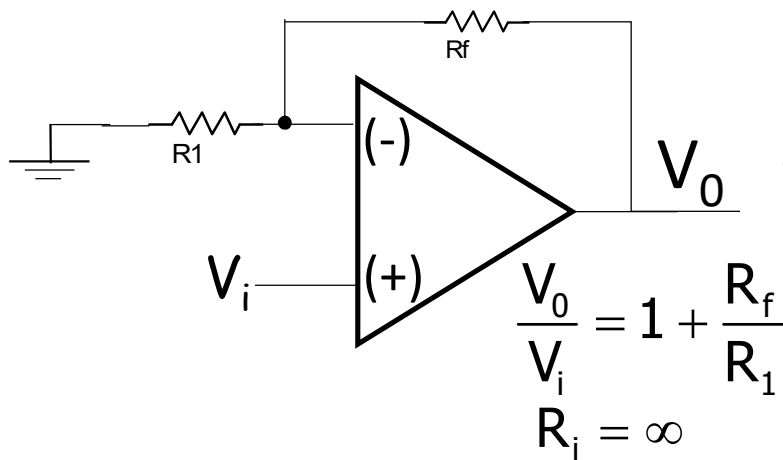


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Reforço

Exercício: Amplificadores ideais, calcular o ganho de tensão e resistência R_i

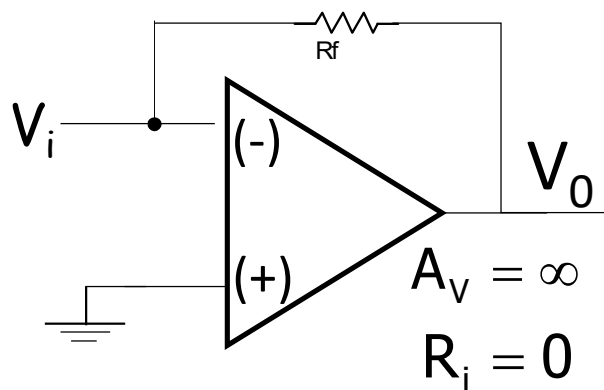


ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Aplicação

Exercício: O circuito da figura a seguir é usado para produzir uma tensão de saída V_0 proporcional a um sinal de corrente de entrada i_i . Determinar as expressões para a saída V_0 .



$$V_0 = -I_i \times R_F \quad \text{E sendo} \quad R_F = \left. \frac{V_0}{I_i} \right|_{i_0=0} \text{ transresistência}$$
$$R_i = 0$$

Aplicação: Esse circuito é utilizado na saída dos conversores DAC (veja DAC - 0808)

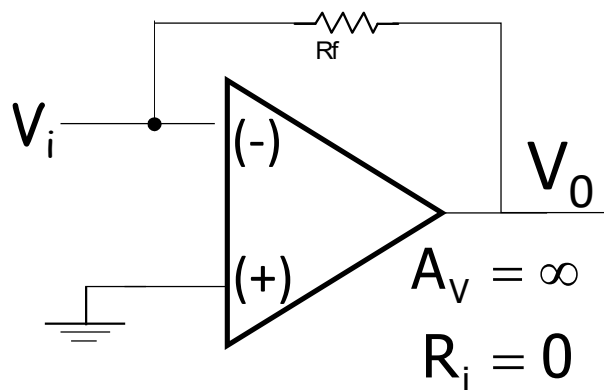
Exercício: Projetar um circuito capaz de produzir uma saída de tensão de 0 a 5V proporcional à temperatura de entrada. Um sensor de temperatura gera $10\mu\text{A}/^\circ\text{C}$, sendo a temperatura máxima a ser lida é de 100°C .

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Aplicação

Exercício: Projetar um circuito capaz de produzir uma saída de tensão de 0 a 5V proporcional à temperatura de entrada. Um sensor de temperatura gera $10\mu\text{A}/^\circ\text{C}$, sendo a temperatura máxima a ser lida é de 100°C . Qtos $\text{mV}/^\circ\text{C}$ são gerados?



$$V_0 = -I_i \times R_F \quad \text{E sendo } R_F = \left. \frac{V_0}{I_i} \right|_{i_0=0}$$

$$R_i = 0$$

Para 100°C temos: $100 \times 10\mu = 1\text{mA}/^\circ\text{C}$

$$R_F = -\frac{V_0}{I_i} = -\frac{-5\text{V}}{1\text{mA}} = 5\text{K}$$

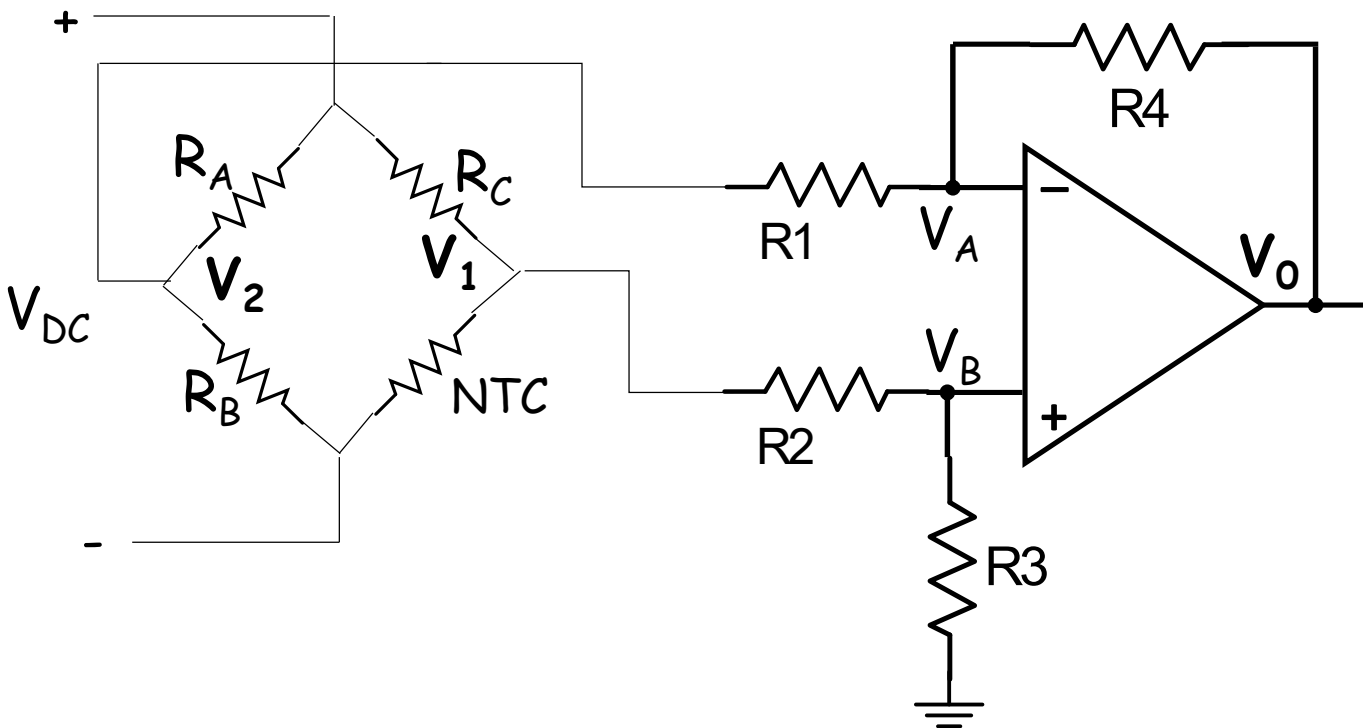
São gerados $5\text{V}/100 = 50\text{mV}/^\circ\text{C}$.

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Aplicação

Exercício: Uma ponte de Wheatstone foi utilizada para medir a temperatura de um sensor de temperatura tipo NTC (Negative Temperature Coeficient), cuja tabela a seguir apresenta os valores da resistância x temperatura. Um circuito amplificador linear deve ser escolhido para a leitura da diferença de potencial gerada na ponte de Wheatstone conectada ao amplificador. Pede-se a configuração do circuito.



As relações ponte Wheatstone equilibrada

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_C}{NTC}$$

$$V_{DC} = 12V$$

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Aplicação

A tabela de temperatura do sensor NTC é dada abaixo, sabendo-se que a equação que rege o comportamento é:

$$R = R_0 \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

Onde R_0 = Resistência do NTC a 25°C e T_0 = temperatura em Kelvin a 25 C.

T(°C)	R(Ω)	(V ₁ - V ₂)	V ₀
20	6269,101	0	0
30	4917,693	0,72V	1,34V
40	2649,080	2,435V	4,54V
50	1792,312	3.332V	6,21V
60	1241,432	4,016V	7,49V
70	878,481	4,525V	8,44V
80	633,944	4,897V	9,13V
90	465,775	5,170V	9,64V
100	347,920	5,359V	10V

Projeto: Os resistores R_A e $R_B = 1,2K$ e o valor mínimo de temperatura que é 20 C, onde NTC = 6269Ω e ajustar R_C para ter o mesmo valor do NTC, pode ser um potenciômetro em série com um resistor. O subtrator será de ganho unitário e assim $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. A saída um seguidor de tensão de ganho igual a: $A_V = 1,866$

ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas
Aula – Aplicação

A curva da temperatura x resistência ôhmica do NTC é uma exponencial

$$R = R_0 \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

NTC - Resistência x Temperatura

T(°C)	R(Ω)	(V ₁ - V ₂)	V ₀
20	6269,101	0	0
30	4917,693	0,72V	1,34V
40	2649,080	2,435V	4,54V
50	1792,312	3,332V	6,21V
60	1241,432	4,016V	7,49V
70	878,481	4,525V	8,44V
80	633,944	4,897V	9,13V
90	465,775	5,170V	9,64V
100	347,920	5,359V	10V

