

CAPITULO 2

Amplificadores Operacionais

Aula 3

Prof. Suelza
PSI/UFOP

44

Eletrônica I – PSI3321

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Cap./página
1ª 16/02	Introdução, Revisão de circuitos com Amp. Op. O 1º Amp Op Comercial. Encapsulamento do Amp Op, O Amp Op ideal, Análise de circuitos com Amp Ops ideais. Exemplo 2.2	Listas de Circ. Elét. Cap. 2 - p. 38-46 Apêndice B, p.810-14
2ª 19/02	Somador, Configuração não inversora, seguidor, amplificador de diferenças. Exercício 2.15	Sedra, Cap. 2 p. 46-53
3ª 23/02	Amplificador de instrumentação, Funcionamento dos Amp Ops Não-Ideais. Exemplo 2.3 e 2.4	Sedra, Cap. 2 p. 53-59
4ª 26/02	Operação dos Amp Ops em grande excursão de sinal, imperfeições cc, circuitos integrador e diferenciador. Exemplo 2.6.	Sedra, Cap. 2 p. 59-73
5ª 01/03	Diodo ideal, características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 89-96
6ª 04/03	Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios	Sedra, Cap. 3 p. 96-99
7ª 08/03	Modelo para pequenos sinais, modelos de circuitos equivalentes para pequenas variações (próximas do ponto quiescente), exercícios (exemplos 3.6 e 3.7)	Sedra, Cap. 3 p. 100-103
8ª 11/03	Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8)	Sedra, Cap. 3 p. 104-106
9ª 15/03	Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central, exercícios: 3.22.	Sedra, Cap. 3 p. 106-109
10ª 18/03	Aula de Exercícios	

Semana Santa (21/03 a 25/03/2016)

1ª. Semana de provas (28/03 a 01/04/2016)

Data: xx/xx/2016 (xxxx feira) – Horário: xx:xxh

46

3ª Aula:

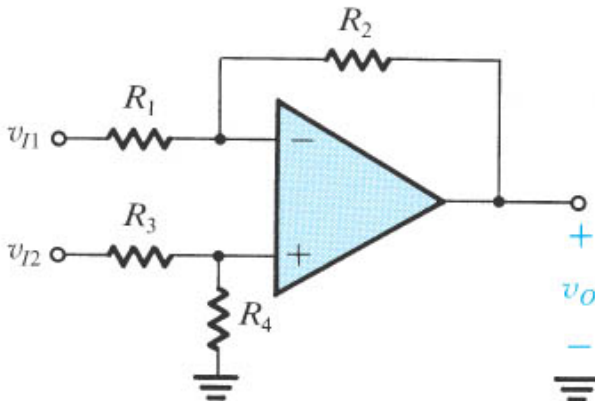
Amplificadores Operacionais

Circuitos empregando Amp Ops reais

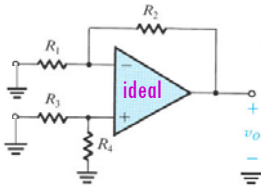
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Determinar as impedâncias (resistências) de entrada e de saída de circuitos empregando AOs
- Entender os ganhos de modo diferencial e modo comum de um circuito
- Explicar as vantagens do Amplificador de Diferenças (e seus problemas)
- Explicar o princípio de funcionamento do Amplificador de Instrumentação e suas vantagens

Um Amplificador de Diferenças Simples



Um Amplificador de Diferenças Simples



superposição!!!

$$v_{O1} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)v_{I1}$$

$$v_{O2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_+ = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_4 + R_3}v_{I2}$$

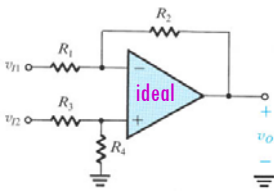
$$v_O = v_{O2} + v_{O1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_4 + R_3}v_{I2} + \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)v_{I1}$$

Para fazer uma diferença com ponderação 1:

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

Podemos simplesmente fazer: $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$

Um Amplificador de Diferenças Simples



$$v_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_4 + R_3}v_{I2} + \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)v_{I1}$$

$$e \quad \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow v_O = \frac{R_2}{R_1}v_{I2} - \frac{R_2}{R_1}v_{I1}$$

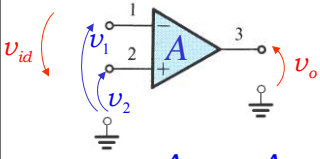
$$v_O = \frac{R_2}{R_1}v_{Id}$$

$$A_d^c = \frac{v_O}{v_{Id}} = \frac{R_2}{R_1}$$

Na prática para que $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ fazemos $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}$

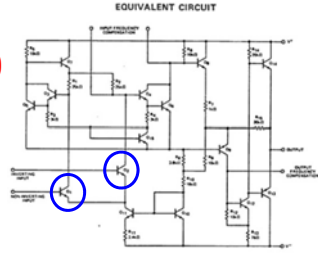
Amplificadores Operacionais

A Expressão completa do Ganho em Aberto do Amplificador Operacional



$$v_{id} = v_+ - v_- = v_2 - v_1$$

$$v_o = A_d \cdot v_{id} = A_d(v_2 - v_1)$$



$$v_o = Av_2 - Av_1 = A(v_2 - v_1)$$

Se A não for o mesmo para as duas entradas:

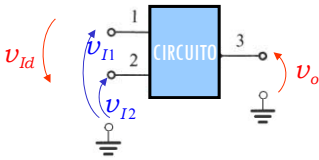
$$v_o = A_2v_2 - A_1v_1$$

$$A_2v_2 - A_1v_1 \stackrel{\text{identidade}}{=} \underbrace{\frac{A_2 + A_1}{2}}_{A_d} \underbrace{(v_2 - v_1)}_{v_{id}} + \underbrace{(A_2 - A_1)}_{A_{cm}} \underbrace{\frac{(v_2 + v_1)}{2}}_{v_{icm}}$$

$$v_o = A_d v_{id} + A_{cm} v_{icm} \quad \text{Se } A_{cm} = 0 : v_o = A_d v_{id} = A(v_2 - v_1)$$

Circuitos com Amplificadores Operacionais

A Expressão completa do Ganho em Aberto do CIRCUITO

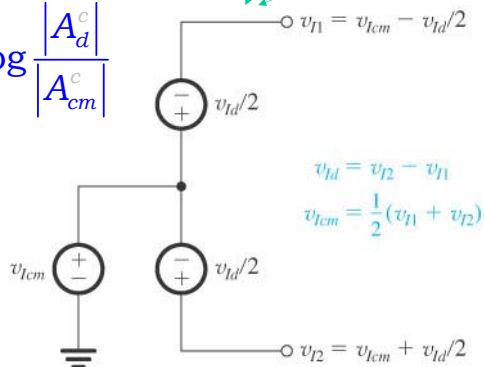


$$v_o = A_d^c v_{Id} + A_{cm}^c v_{Icm}$$

$$v_{Id} = v_{I2} - v_{I1} \quad v_{Icm} = \frac{v_{I2} + v_{I1}}{2}$$

identidade

$$CMRR_{\text{do A.O. ou do Circuito}} = 20 \log \left| \frac{A_d^c}{A_{cm}^c} \right|$$

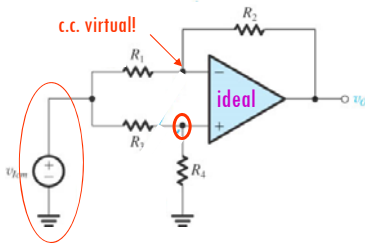


Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise do Ganho de Modo Comum do Circuito

Um único sinal de modo comum aplicado à entrada ($v_1=v_2 \neq 0$)

$$v_o = \text{///} + A_{cm}^c v_{Icm}$$



$$i_1 = \left[v_{Icm} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} v_{Icm} \right] \frac{1}{R_1} = v_{Icm} \frac{R_3}{R_4 + R_3} \frac{1}{R_1}$$

$$v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} v_{Icm} - i_2 R_2$$

como $i_2 = i_1$:

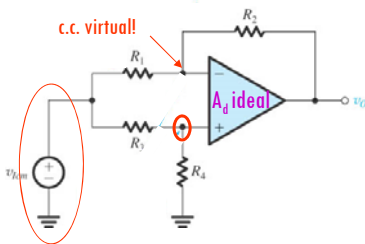
$$v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} v_{Icm} - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{Icm}$$

$$v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right) v_{Icm}$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise do Ganho de Modo Comum do Circuito

Um único sinal de modo comum aplicado à entrada ($v_1=v_2 \neq 0$)



$$v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right) v_{Icm}$$

$$A_{cm}^c \equiv \frac{v_o}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right)$$

se $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ temos $A_{cm}^c = 0$

se $\frac{R_4}{R_3} \neq \frac{R_2}{R_1}$ temos $A_{cm}^c \neq 0$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise do Ganho de Modo Comum do Circuito

Exemplo (sinais CC):

$$v_{Id} = 1mV \text{ e } v_{Icm} = 5V$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \text{ escolhemos}$$

$$R_4 = R_2 = 100k\Omega \pm 5\%$$

$$R_1 = R_3 = 1k\Omega \pm 5\%$$

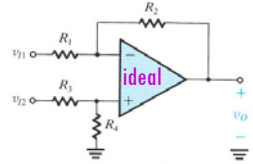
$$A_d^c = \frac{v_O}{v_{Id}} = \frac{R_2}{R_1} \text{ se } R_1 = R_3 \text{ e } R_2 = R_4$$

$$A_{cm}^c \equiv \frac{v_o}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Supondo pior caso: $R_4 = 105k\Omega$ e $R_2 = 95k\Omega$
 $R_1 = 1050\Omega$ e $R_3 = 950\Omega$

$$A_{cm}^c = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right) = 0,18$$

$$A_d^c \approx \frac{R_2}{R_1} = 100$$



$$v_O = A_d v_{Id} + A_{cm} v_{Icm}$$

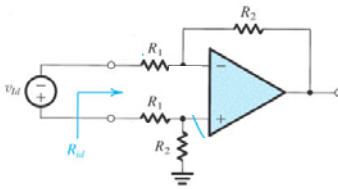
$$v_O = 100 \times 1mV + 0,18 \times 5V$$

$$= 100mV + 0,9V !!!$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise da Resistência Diferencial de Entrada do Circuito

$$R_{id} = \frac{v_{Id}}{i_i}$$



Handwritten notes in green:

$$R_i \uparrow$$

$$R_o \ll R_i$$

$$R_o = 0 \Omega$$

$$R_i = R_1$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow R_3 = R_1 \text{ e } R_4 = R_2$$

$$v_{Id} = R_1 i_i + 0 + R_1 i_i$$

$$R_{id} = 2R_1$$

Quadripolos



Equações dos terminais

Cálculo dos parâmetros

MATRIZES DE IMPEDÂNCIA

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$$

matriz de impedâncias

$$\begin{cases} V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{cases}$$

Parâmetros z

$$z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

$$z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

MATRIZES HÍBRIDAS

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \end{cases}$$

Parâmetros h

$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0}$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2=0}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

Parâmetros g

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} I_1 = g_{11}V_1 + g_{12}I_2 \\ V_2 = g_{21}V_1 + g_{22}I_2 \end{cases}$$

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0}$$

$$g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

$$g_{21} = \left. \frac{V_2}{V_1} \right|_{I_2=0}$$

$$g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

Prof. Sédra P. S. PEREIRA

Representação por Parâmetros Híbridos Invertidos (Parâmetros G)



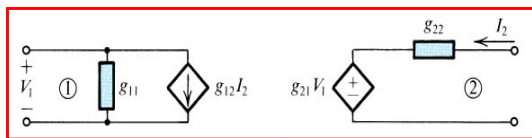
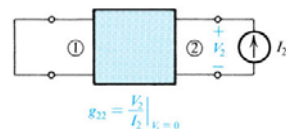
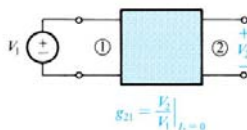
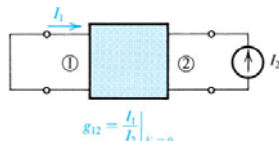
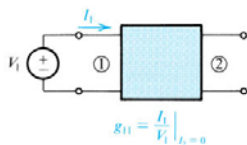
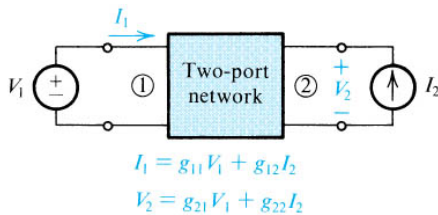
Parâmetros g

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} I_1 = g_{11}V_1 + g_{12}I_2 \\ V_2 = g_{21}V_1 + g_{22}I_2 \end{cases}$$

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0} \quad g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

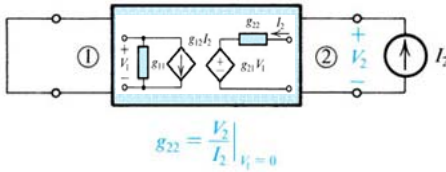
$$g_{21} = \left. \frac{V_2}{V_1} \right|_{I_2=0} \quad g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$



Prof. Sédra P. S. PEREIRA

Um Amplificador de Diferenças Simples

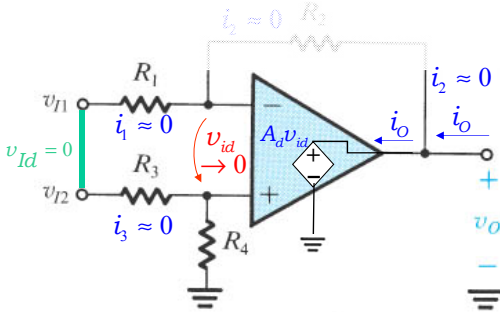
Análise da Resistência de Saída do Circuito



$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \Big|_{v_i = v_{id} = 0}$$

- Curto a entrada
- Injeto uma corrente na saída
- Determino a tensão de saída resultante

$$g_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

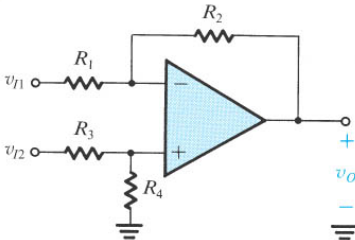


$$R_o = 0$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

EXERCÍCIO 2.15

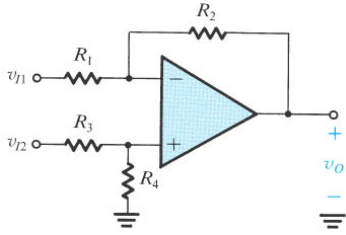
Considere o circuito do amplificador de diferenças para o caso em $R_1=R_3=2\text{k}\Omega$ e $R_2=R_4=200\text{k}\Omega$. (a) Obtenha o valor do ganho diferencial A_d . (b) Ache o valor da resistência de entrada diferencial R_{id} e a resistência de saída R_o . (c) Se os resistores tiverem tolerância de 1%, obtenha o pior caso de ganho de modo comum A_{cm} e o correspondente valor de CMRR.



$$A_{cm}^c \equiv \frac{v_o}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Características Gerais



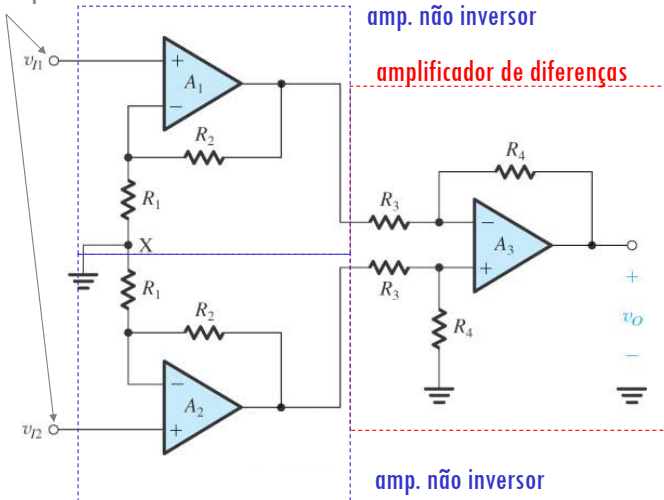
- O Amplificador de Diferenças simples possui duas deficiências:
 - Baixa impedância de entrada para altos ganhos ($R_{id} = 2R_1$)
 - Não é fácil variar o ganho diferencial, pois precisamos variar as resistências aos pares (p.ex. R_2 e R_4)
 - Difícil manter CMRR baixo

$$v_O = \frac{R_2}{R_1} v_{Id} \quad \text{se } R_4 = R_2 \text{ e } R_3 = R_1$$

- Resolveremos estes problemas a seguir, através do Amplificador de Instrumentação

Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

elevada impedância de entrada



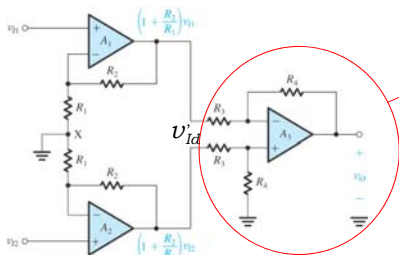
amp. não inversor

amplificador de diferenças

amp. não inversor

1º estágio: impedância e ganho!!!

Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação



$$v_O = \frac{R_4}{R_3} v'_{Id}$$

$$v_O = \frac{R_4}{R_3} \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{I2} - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{I1} \right]$$

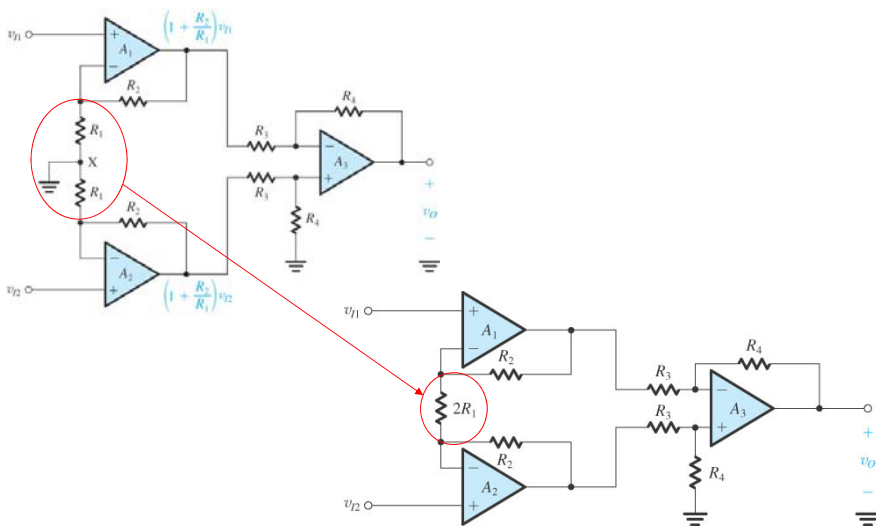
$$v_O = \underbrace{\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}_{A_d} v_{Id}$$

Resolvemos alguns problemas, criamos outros...

- v_{Icm} é amplificado no 1º estágio
- amplificadores do 1º estágio tem que ser perfeitamente casados
- ganho ainda é difícil de variar

Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

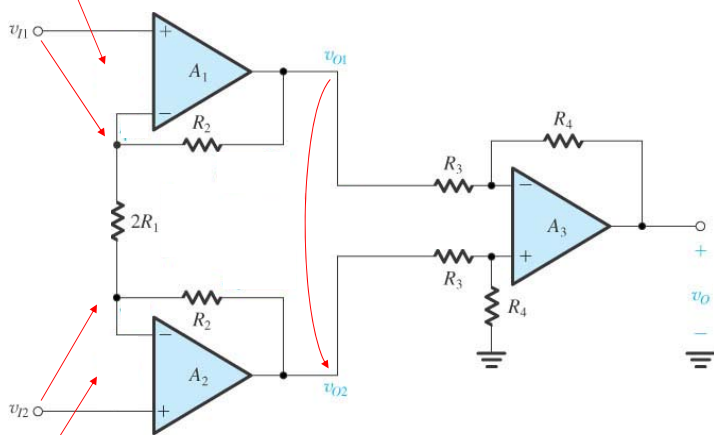
Uma mudança sutil e de amplas implicações



Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

Uma mudança sutil e de amplas implicações

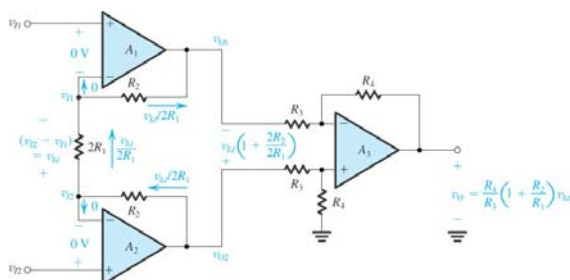
curto-circuito virtual



curto-circuito virtual

Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

Uma mudança sutil e de amplas implicações

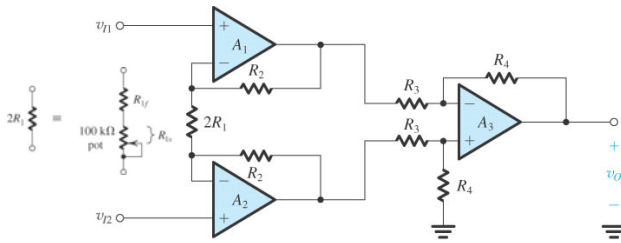


Observe que:

- Não depende do casamento dos resistores R_2
- v_{lcm} s resultam em corrente nula através de $2R_1$:
 - v_{lcm} passa ao 2º estágio sem amplificar, v_{ld} passa amplificando
- Ganho pode ser variado apenas modificando o resistor $2R_2$

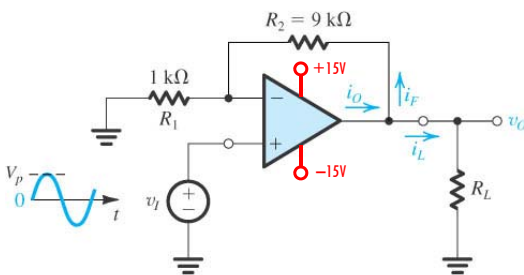
EXEMPLO 2.3

Projeto o circuito amplificador de instrumentação da figura abaixo de forma a ter um ganho que possa variar de 2 a 1000, utilizando uma resistência variável de 100 k Ω .



O Amp Op não ideal

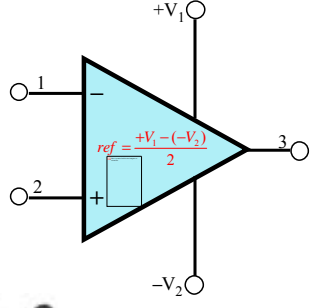
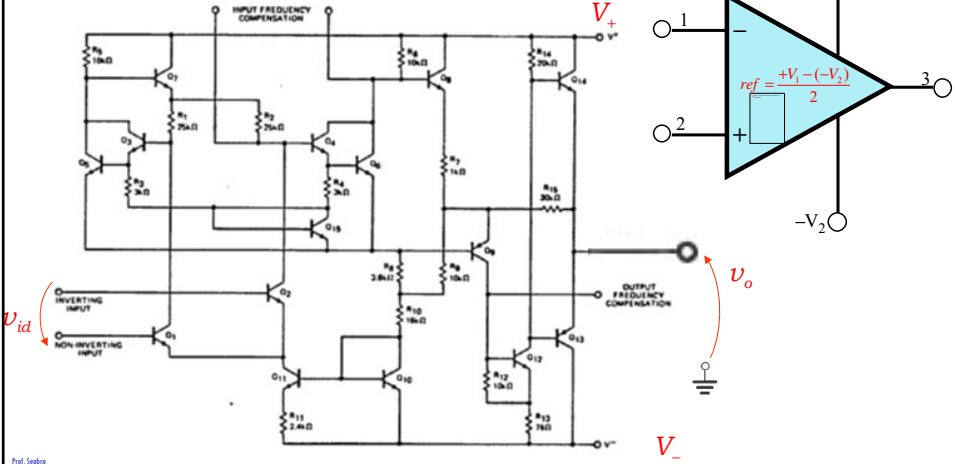
Operações com Grandes Sinais: A saturação



(a)

Amplificadores Operacionais ($\mu A 709$)

EQUIVALENT CIRCUIT



Amplificadores Operacionais ($\mu A 709$)

