



CAPITULO 2

Amplificadores Operacionais

Aula 3

Eletrônica I – PSI3321

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Cap./pág.	Testes agendados
1ª	Introdução, O primeiro Amp Op Comercial. Encapsulamento do Amp Op, O Amp Op ideal, Análise de circuitos com Amp Ops ideais. Exemplo 2.2	Cap. 2 p. 38-46	
2ª	Somador. Configuração não inversora, seguidor, amplificador de diferenças. Exercício 2.15	Sedra, Cap. 2 p. 46-53	Teste 01 7h30-7h45
3ª	Amplificador de instrumentação, Funcionamento dos Amp Ops Não-Ideais. Exemplo 2.3 e 2.4	Sedra, Cap. 2 p. 53-59	Teste 02 7h30-7h45
4ª	Operação dos Amp Ops em grande excursão de sinal, imperfeições cc, circuitos integrador e diferenciador. Exemplo 2.6.	Sedra, Cap. 2 p. 59-73	Teste 03 9h20-9h35
5ª	Diodo ideal, características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 89-96	Teste 04 7h30-7h45
6ª	Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios	Sedra, Cap. 3 p. 96-99	Teste 05 9h20-9h35
7ª	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	Teste 06 7h30-7h45
8ª	Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8)	Sedra, Cap. 3 p. 104-106	Teste 07 9h20-9h35
9ª	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	Teste 08 7h30-7h45
10ª	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111	Teste 09 9h20-9h35
11ª	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115	Teste 10 7h30-7h45
12ª	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118	Teste 11 9h20-9h35
13ª	Aula de Exercícios		

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**

Exercício:

Um amplificador inversor com ganho nominal de -20 V/V usa um amp op com um ganho cc de 10^4 e freqüência de ganho unitário de 10^6 Hz . Qual é a freqüência de 3 dB (f_{3dB}) do amplificador em malha fechada? Qual é o ganho em $0,1 f_{3dB}$ e a $10 f_{3dB}$?

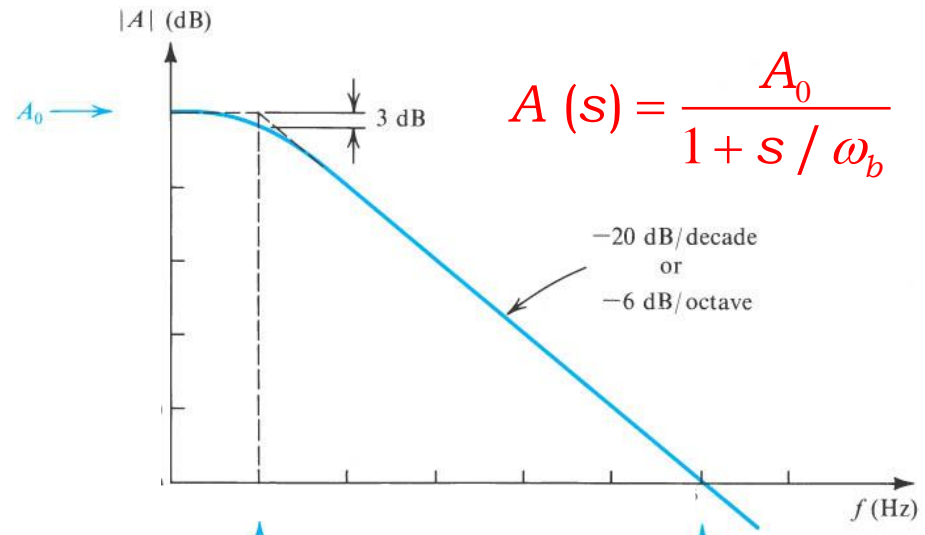
$$G = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A_{AO}(s)}$$

$$G_{inv} = - \frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}}$$

" ω_0 " DO CIRCUITO

\Rightarrow " ω_0 " = ω_{3dB} (ou ω_H) = $\omega_t / (1 + R_2 / R_1)$

$G_{inv} = \frac{A_0 \text{ DO CIRCUITO}}{1 + j\omega / \omega_0}$ com $\frac{1}{\tau_{inv}} = \omega_0 = \omega_H \text{ DO CIRCUITO} = \omega_t / (1 + R_2 / R_1)$

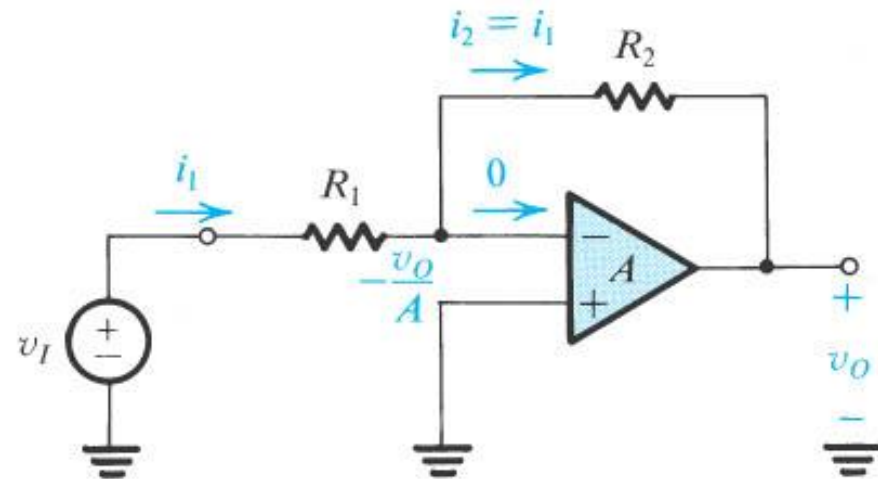


$$A_{vRC} = \frac{1}{1 + j\omega / \omega_0} \text{ com } \frac{1}{\tau_{RC}} = \omega_0 = \omega_H$$

Exercício:

Um amplificador inversor com ganho nominal de -20 V/V usa um amp op com um ganho cc de 10^4 e frequência de ganho unitário de 10^6 Hz .

Qual é o ganho em $0,1 f_{3dB}$ e a $10 f_{3dB}$?



A.O. com:

- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- mas $A \neq \infty$ (não vale c.c. virtual)

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A(s)} \quad \text{e} \quad A(s) = \frac{A_0}{1 + s / \omega_b}$$

3 minutos para fazer!

Atividade⁵

O Amp Op não ideal

Resposta em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência

Em $0,1\omega_{3dB}$ o ganho é:

- a) 40000 V/V
- b) 7000 V/V
- c) 19,82 V/V
- d) Não tenho certeza

Exercício:

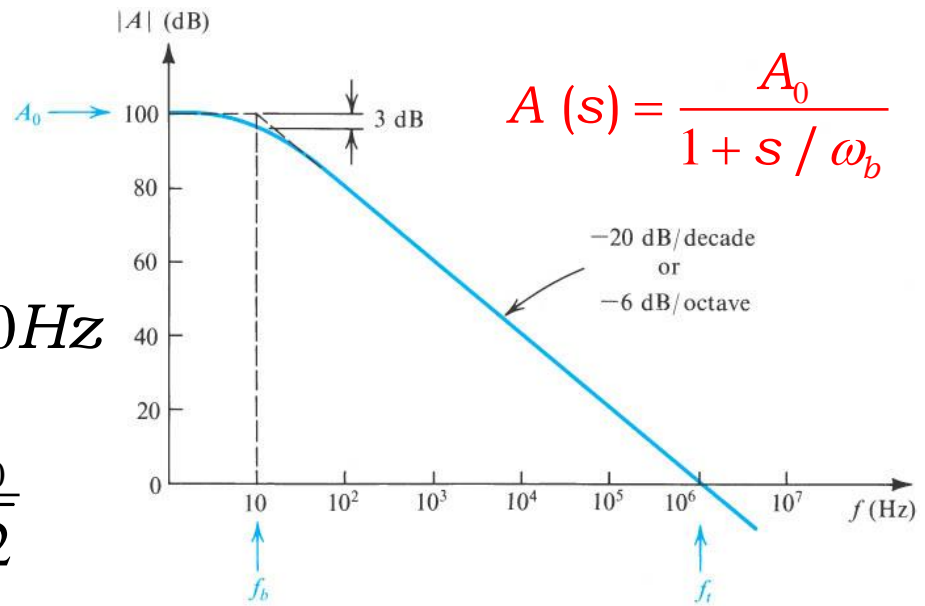
Um amplificador inversor com ganho nominal de -20 V/V usa um amp op com um ganho cc de 10^4 e freqüência de ganho unitário de 10^6 Hz . Qual é a freqüência de 3 dB (f_{3dB}) do amplificador em malha fechada? Qual é o ganho em $0,1 f_{3dB}$ e a $10 f_{3dB}$?

$$G_{inv} = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_0}$$

$$\omega_0 = \omega_H = \omega_t / (1 + R_2 / R_1) \approx 300 \text{ Hz}$$

$$\text{Em } \omega_0 \quad |G_{inv}| = \frac{A_0}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Em } 0,1 \omega_0 \quad |G_{inv}| = \frac{A_0}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{0,1\omega_0}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{A_0}{\sqrt{1,01}} = 19,82 \text{ V/V}$$



$$A_{vRC} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad \text{com} \quad \frac{1}{\tau_{RC}} = \omega_0 = \omega_H$$

Exercício:

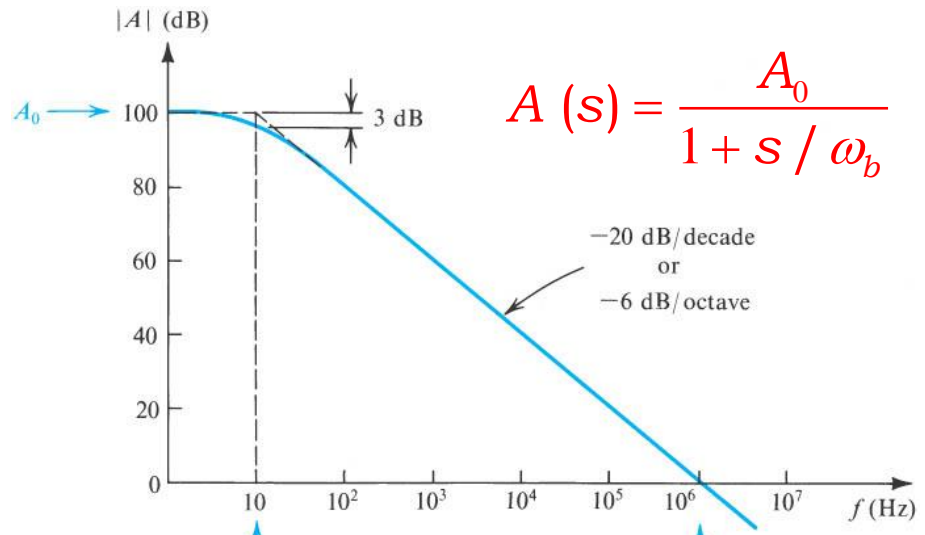
Um amplificador inversor com ganho nominal de -20 V/V usa um amp op com um ganho cc de 10^4 e freqüência de ganho unitário de 10^6 Hz . Qual é a freqüência de 3 dB ($f_{3\text{dB}}$) do amplificador em malha fechada? Qual é o ganho em $0,1 f_{3\text{dB}}$ e a $10 f_{3\text{dB}}$?

$$G_{inv} = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_0}$$

$$\omega_0 = \omega_H = \omega_t / (1 + R_2 / R_1)$$

Em $10\omega_0$

$$|G_{inv}| = \frac{A_0}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{10\omega_0}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{A_0}{\sqrt{101}} = 1,99 \text{ V/V}$$

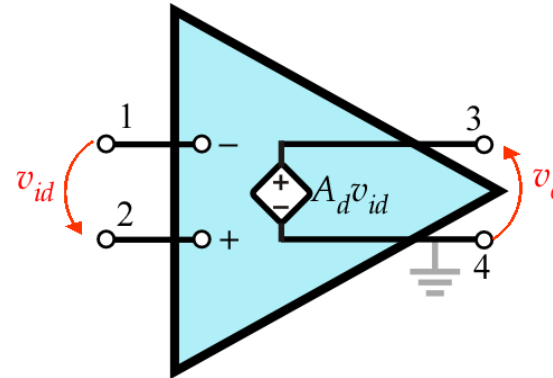


A Configuração Inversora – A.O. Ideal

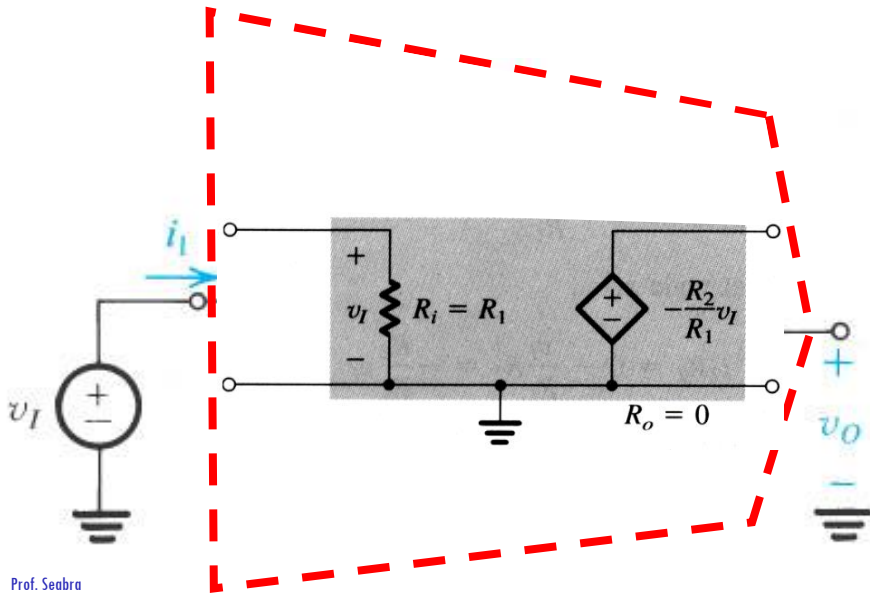
Resistências de Entrada e de Saída

O A.O. real está sendo modelado como:

- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- $A = A_d(s)$



Como podemos modelar o circuito? (inversor, somador, não-inversor, etc.)

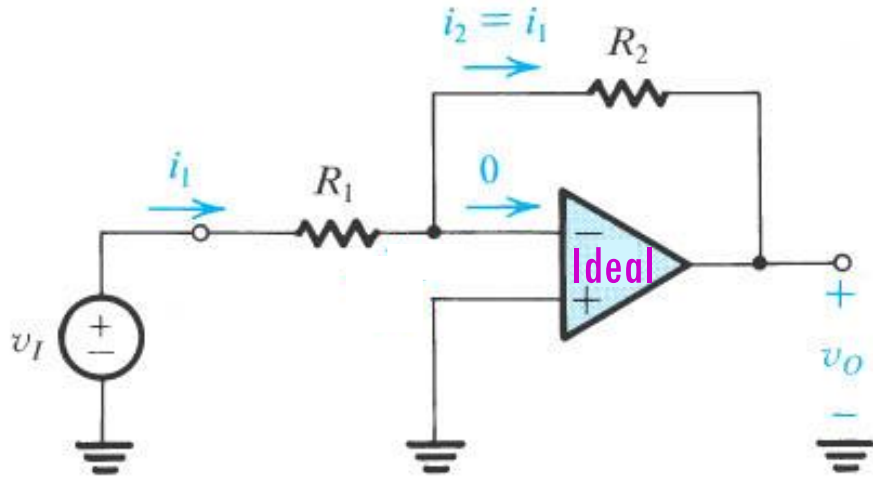


Para simplificar, vamos fazer essa análise considerando o A.O. Ideal:

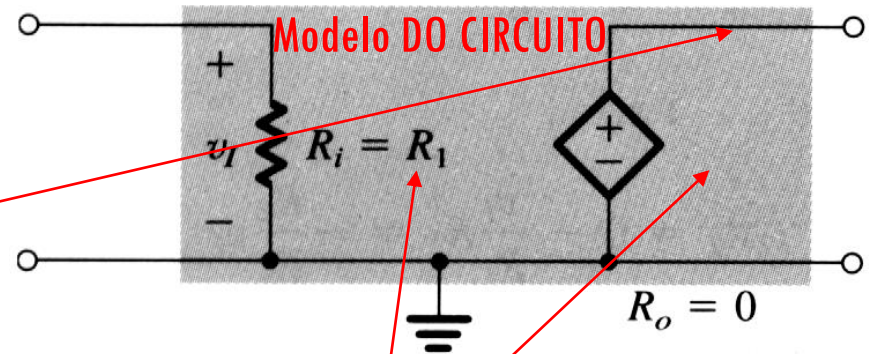
- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- $A = \infty$ (curto-circuito virtual)

A Configuração Inversora — A.O. Ideal

Resistências de Entrada e de Saída



Quando o AO ideal, a impedância de Saída DO CIRCUITO é muito pequena, podemos considerá-la zero.



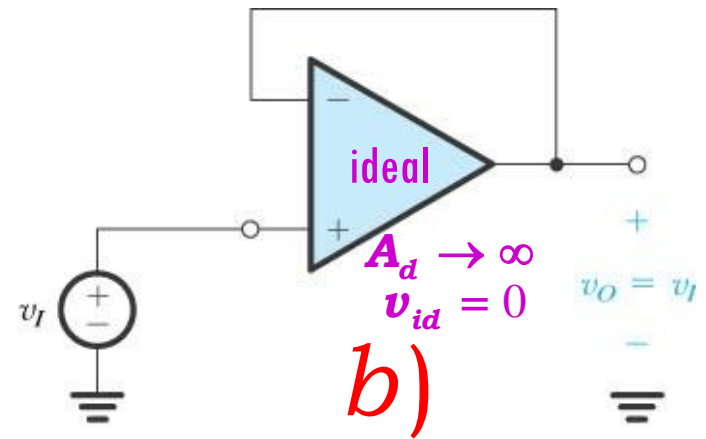
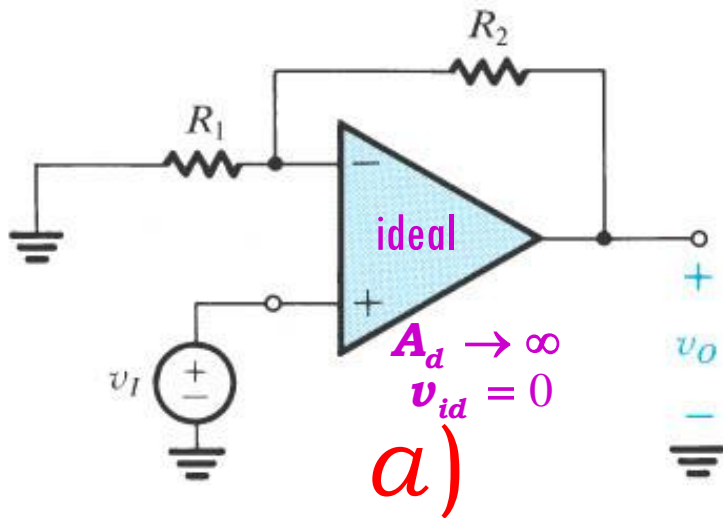
$$R_o = 0$$

Já vimos que nessa montagem o ganho de tensão é $-R_2/R_1$.

E a impedância (resistência) de entrada DO CIRCUITO, qual é?

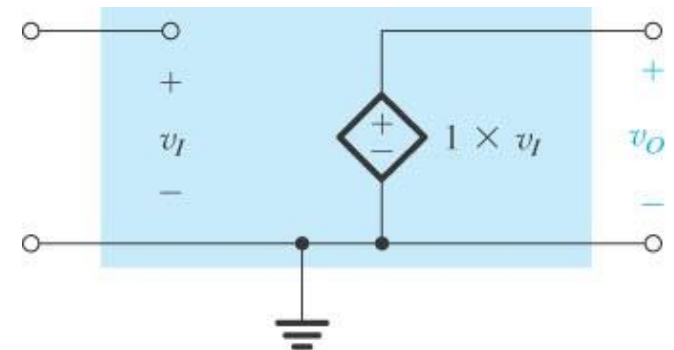
De circuitos elétricos $R_i \equiv \frac{v_I}{i_1(\text{ou } I_I)} = \frac{v_I}{v_I/R_1} = R_1$

A Configuração seguidora



$R_1 \rightarrow \infty$ e $R_2 = 0$
 G_v (ou A_v) = +1
 $R_{in} \rightarrow \infty$ e $R_{out} \rightarrow 0$

- 1) Quais os valores de R_1 e R_2 em b)?
- 2) Qual o ganho de tensão em b)?
- 3) Quais as impedâncias de entrada e de saída do circuito em b)?
- 4) Apresente um circuito equivalente para o circuito em b)

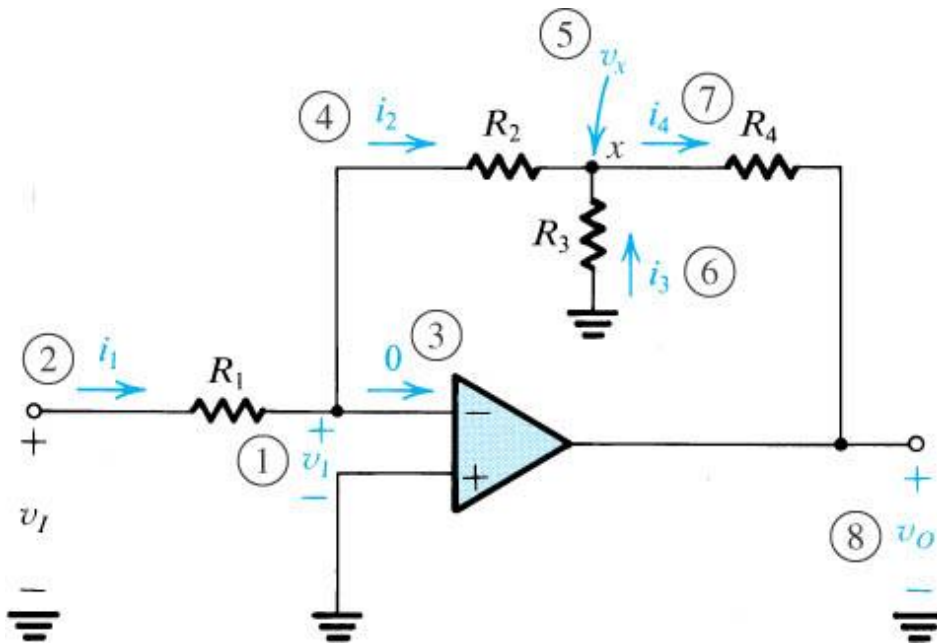


Atividade⁶

Atividade 3 (https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6047498/mod_resource/content/128/PSI3321-A02PA.pdf)

EXEMPLO 2.2

Supondo o amp op ideal, deduza uma expressão para o ganho em malha fechada v_O/v_I do circuito mostrado na Figura 2.8.



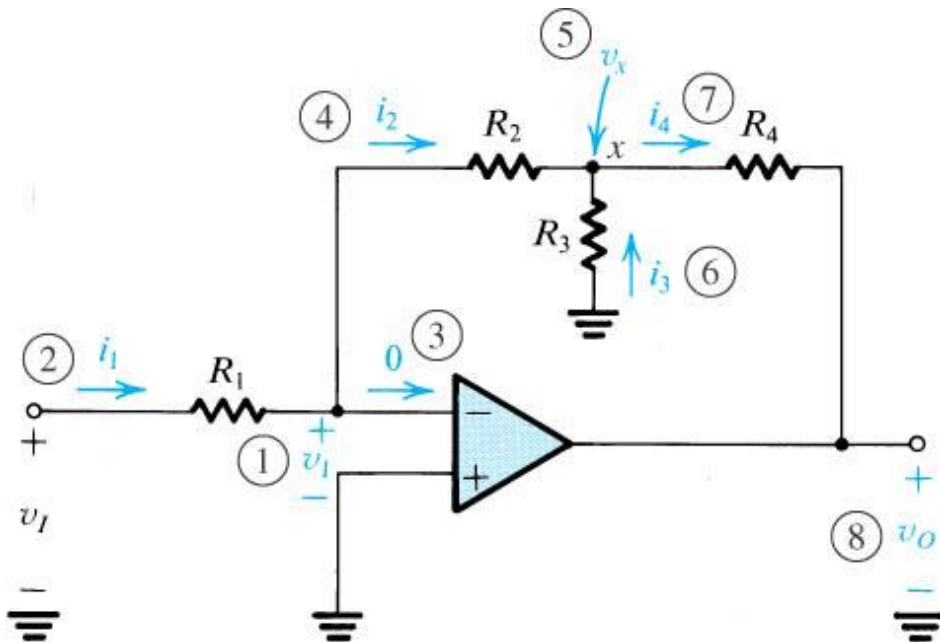
4 minutos para fazer!

Atividade⁷

Exemplo 2.2: A Configuração Inversora

EXEMPLO 2.2

Supondo o amp op ideal, deduza uma expressão para o ganho em malha fechada v_O/v_I do circuito mostrado na Figura 2.8. Use esse circuito para projetar um amplificador inversor com um ganho de 100 e impedância de entrada de $1\text{ M}\Omega$. Suponha que por alguma razão prática seja exigido usar resistores que não sejam maiores do que $1\text{ M}\Omega$.

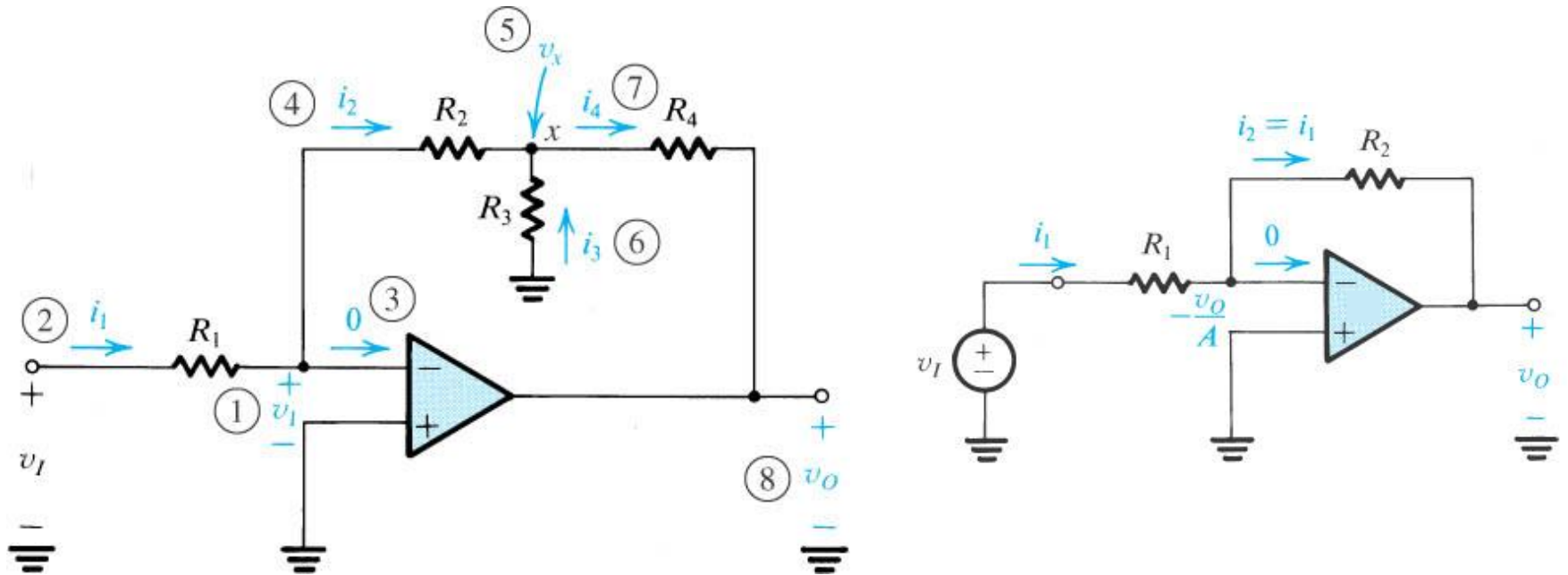


4 minutos para fazer!

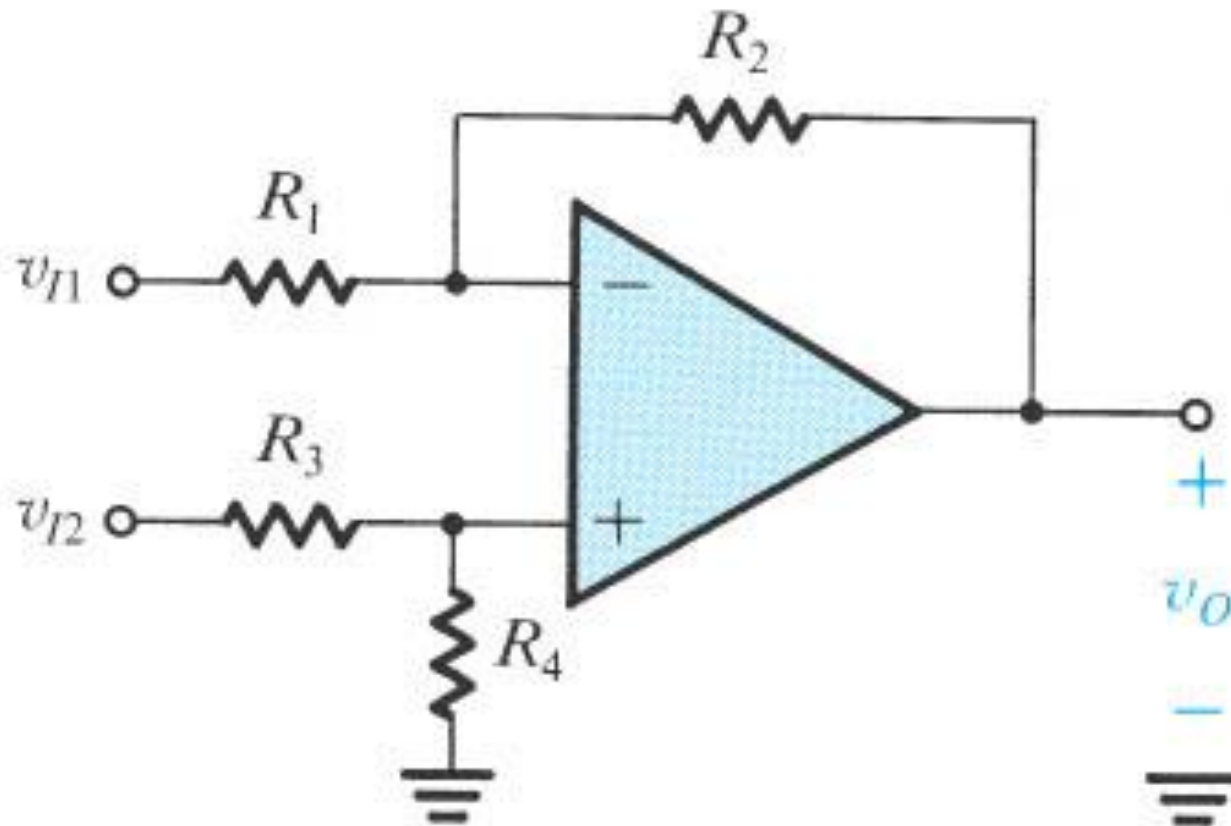
Exemplo 2.2: A Configuração Inversora

EXEMPLO 2.2

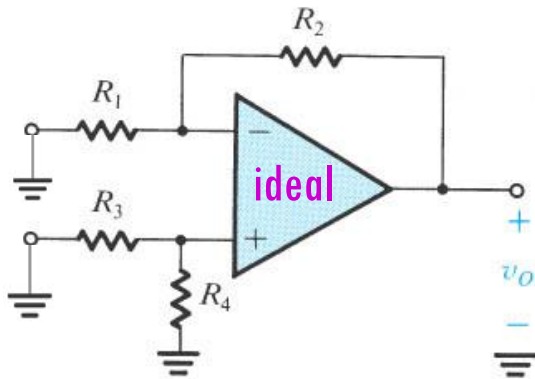
Supondo o amp op ideal, deduza uma expressão para o ganho em malha fechada v_O/v_I do circuito mostrado na Figura 2.8. Use esse circuito para projetar um amplificador inversor com um ganho de $\underline{100}$ e impedância de entrada de $1\text{ M}\Omega$. Suponha que por alguma razão prática seja exigido usar resistores que não sejam maiores do que $1\text{ M}\Omega$. Compare seu projeto com base na configuração inversora



Um Amplificador de Diferenças Simples



Um Amplificador de Diferenças Simples



superposição!!!

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

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

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

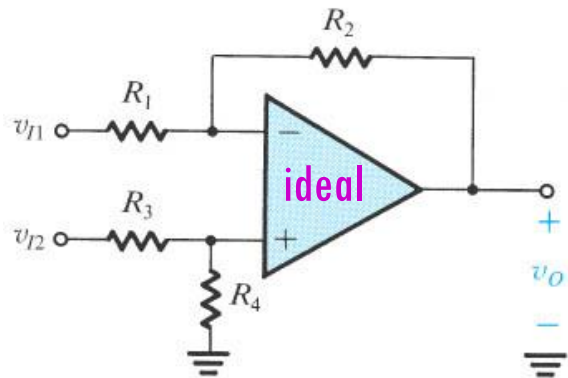
Para fazer uma diferença com ponderação 1:

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

Podemos simplesmente fazer:

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

Um Amplificador de Diferenças Simples



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

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

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

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

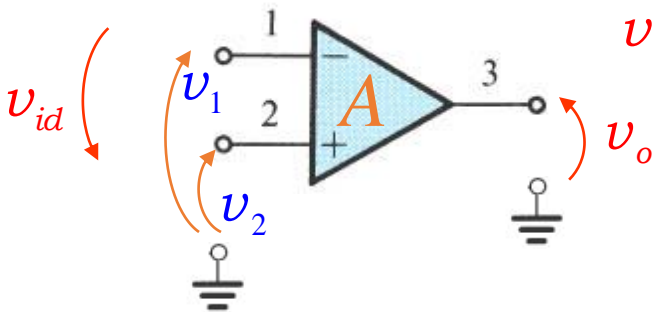
Na prática para que $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ fazemos $\begin{matrix} R_3 = R_1 \\ R_4 = R_2 \end{matrix}$

Amplificadores Operacionais

A Expressão completa do Ganho em Aberto do Amplificador Operacional

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

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

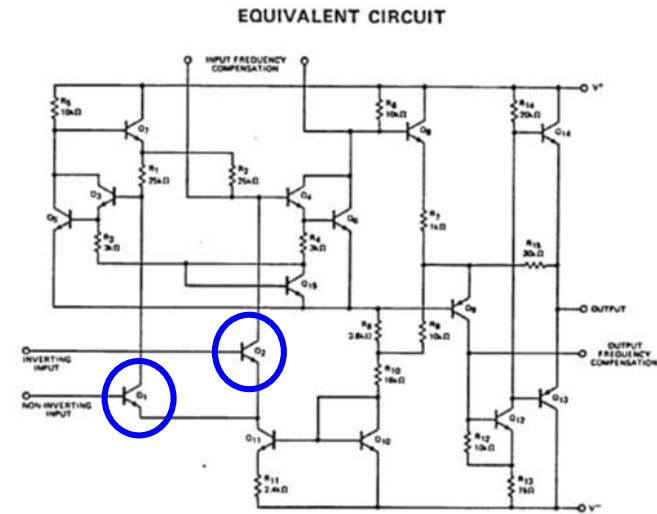


$$v_O = Av_2 - Av_1 = A(v_2 - v_1)$$

Se A não for o mesmo para as duas entradas:

$$v_O = A_2v_2 - A_1v_1$$

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



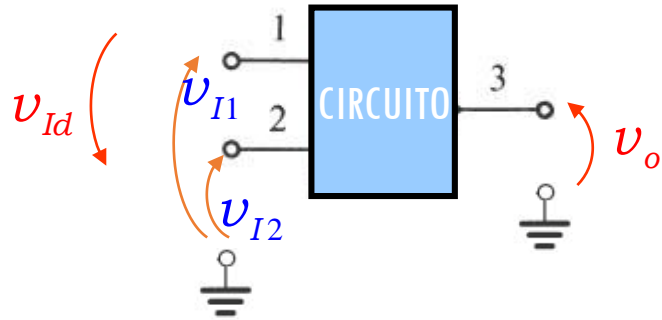
$$v_O = A_d v_{id} + A_{cm} v_{icm}$$

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

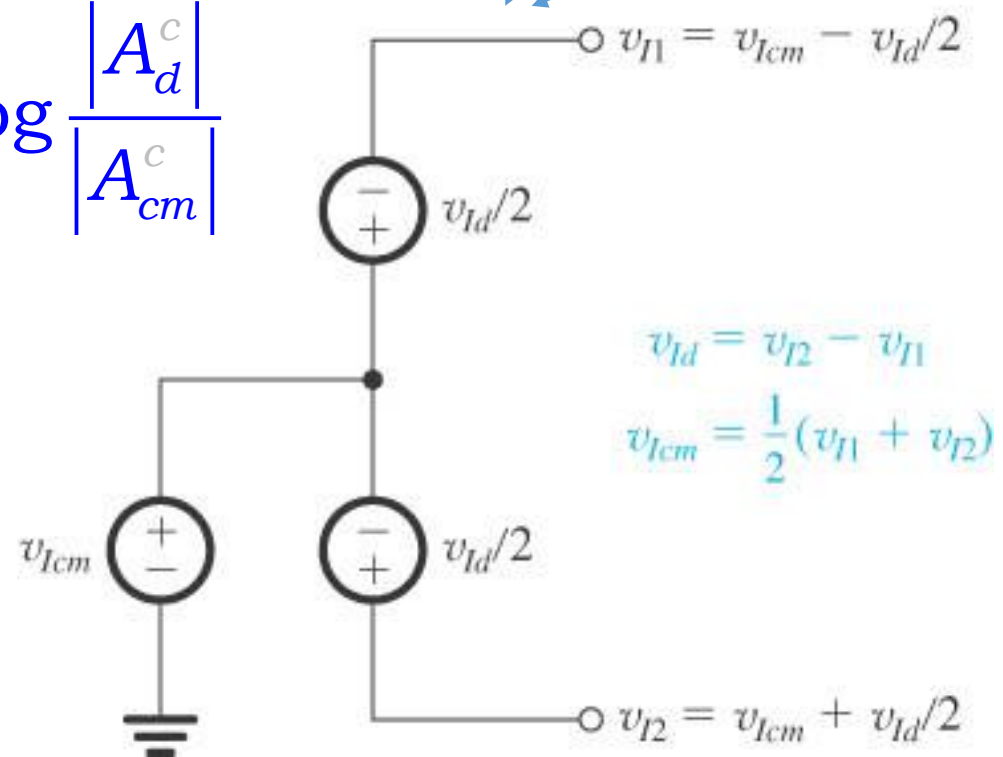


$$v_o = A_d^c v_{Id} + A_{cm}^c v_{Icm}$$

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

identidade

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



$$v_{Id} = v_{I2} - v_{I1}$$

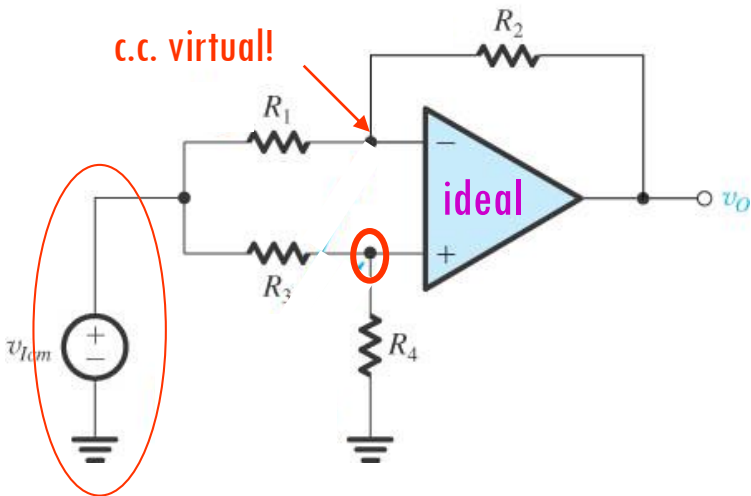
$$v_{Icm} = \frac{1}{2}(v_{I1} + v_{I2})$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise do Ganho de Modo Comum do Circuito

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

$$v_o = \text{[hatched box]} + A_{cm}^c v_{Icm}$$



como $i_2 = i_1$:

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

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

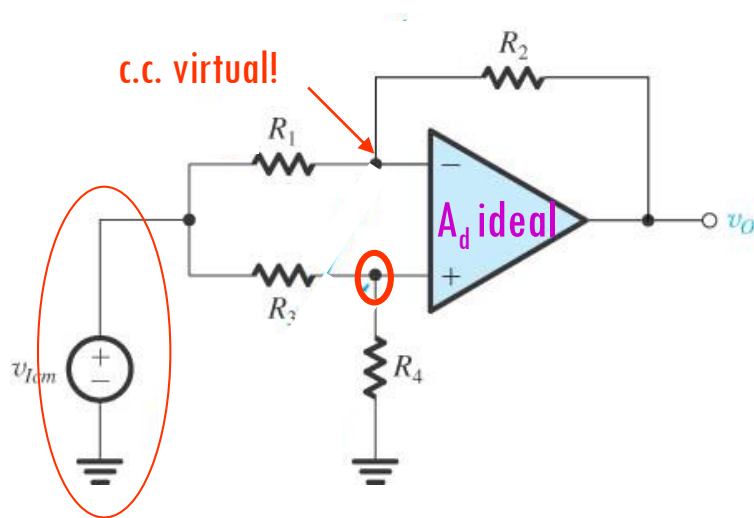
$$v_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} v_{Icm} - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{Icm}$$

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

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):

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

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

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

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

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

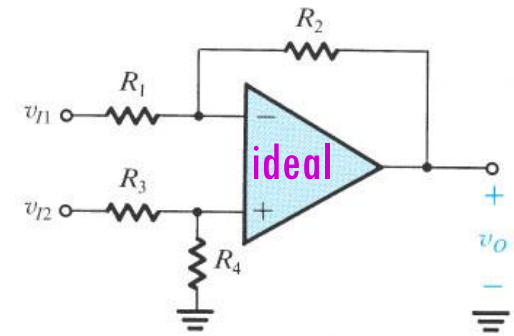
$$A_{cm}^c \equiv \frac{v_o}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Supondo pior caso: $R_4 = 105k\Omega$ e $R_2 = 95k\Omega$

$$R_1 = 1050\Omega \text{ e } R_3 = 950\Omega$$

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

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



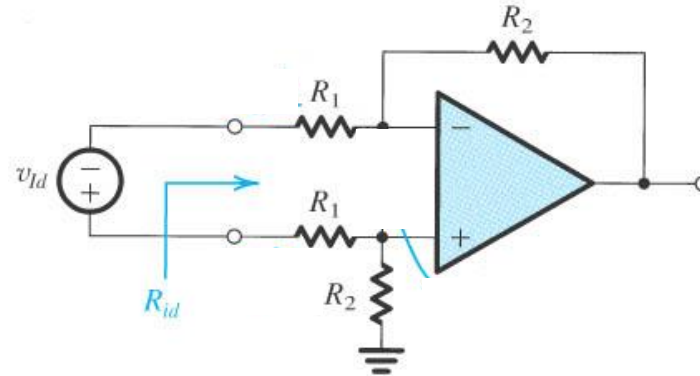
$$v_o = A_d v_{Id} + A_{cm} v_{Icm}$$

$$v_o = 100 \times 1mV + 0,18 \times 5V \\ = 100mV + 0,9V !!!$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Análise da Resistência Diferencial de Entrada do Circuito

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



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

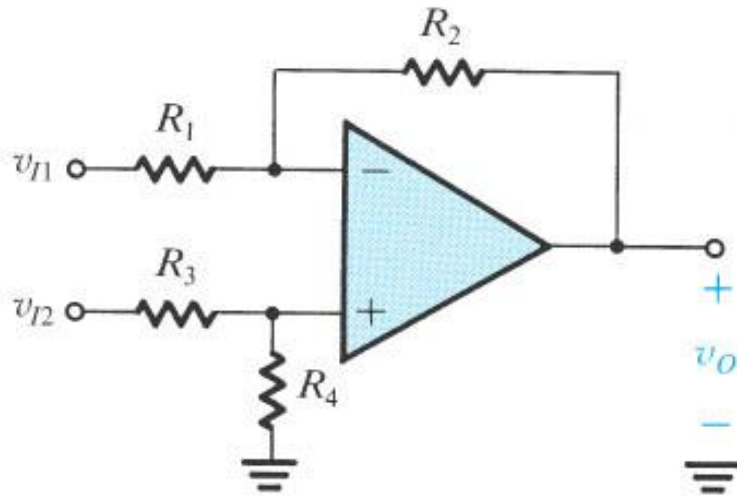
$$v_{Id} = R_1 i_i + 0 + R_1 i_i$$

$$R_{id} = 2R_1$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

EXERCÍCIO 2.15

Considere o circuito do amplificador de diferenças para o caso em 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.



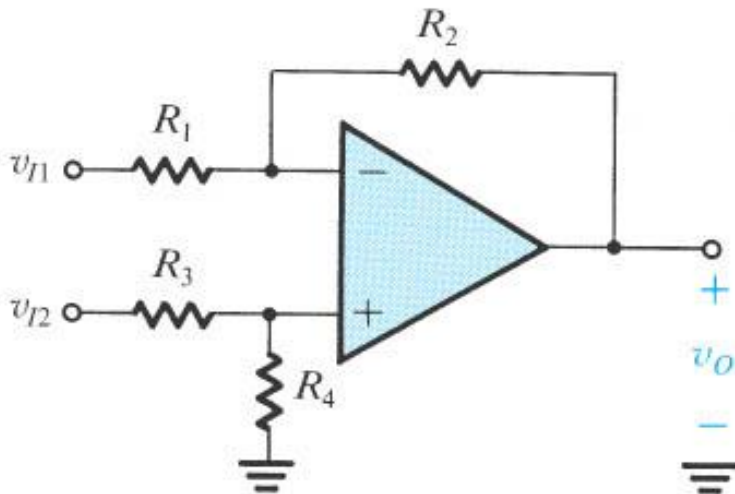
$$A_{cm}^c \equiv \frac{v_o}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Resp.: 100 V/V (40dB); 4k Ω , 0 Ω ; 0,04 V/V, 68dB

Um Amplificador de Diferenças Simples

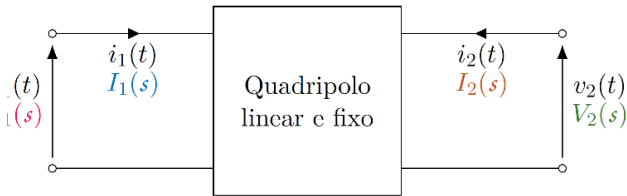
EXERCÍCIO 2.15

Considere o circuito do amplificador de diferenças para o caso em 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.



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

Resp.: 100 V/V (40dB); 4k Ω , 0 Ω ; 0,04 V/V, 68dB



Quadripolos

Equações dos terminais

Cálculo dos parâmetros

MATRIZES DE IMITÂNCIA

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$$

matriz de admitâncias

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

Parâmetros y

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Parâmetros g

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

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

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

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

Representação por Parâmetros Híbridos Invertidos (Parâmetros G)



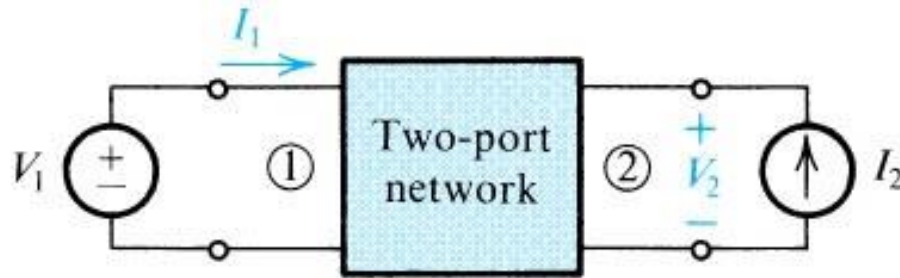
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$$

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

Parâmetros g

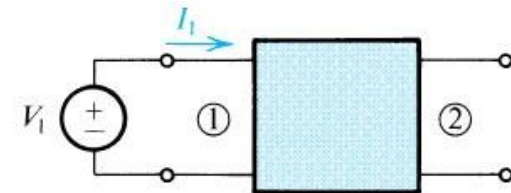
$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0} \quad g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

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

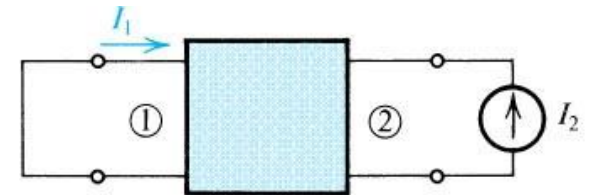


$$I_1 = g_{11}V_1 + g_{12}I_2$$

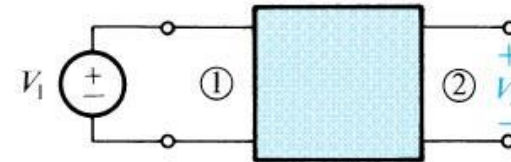
$$V_2 = g_{21}V_1 + g_{22}I_2$$



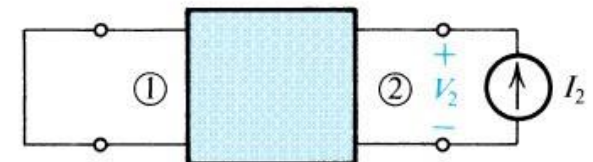
$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0}$$



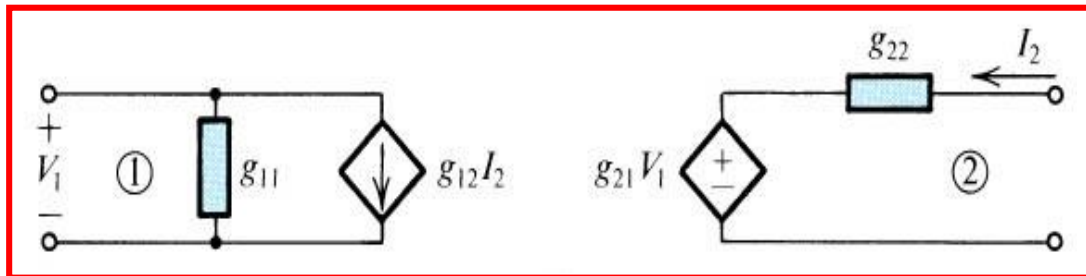
$$g_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_1=0}$$



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

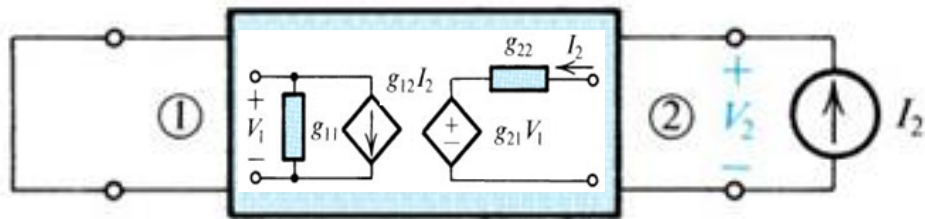


$$g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$



Um Amplificador de Diferenças Simples

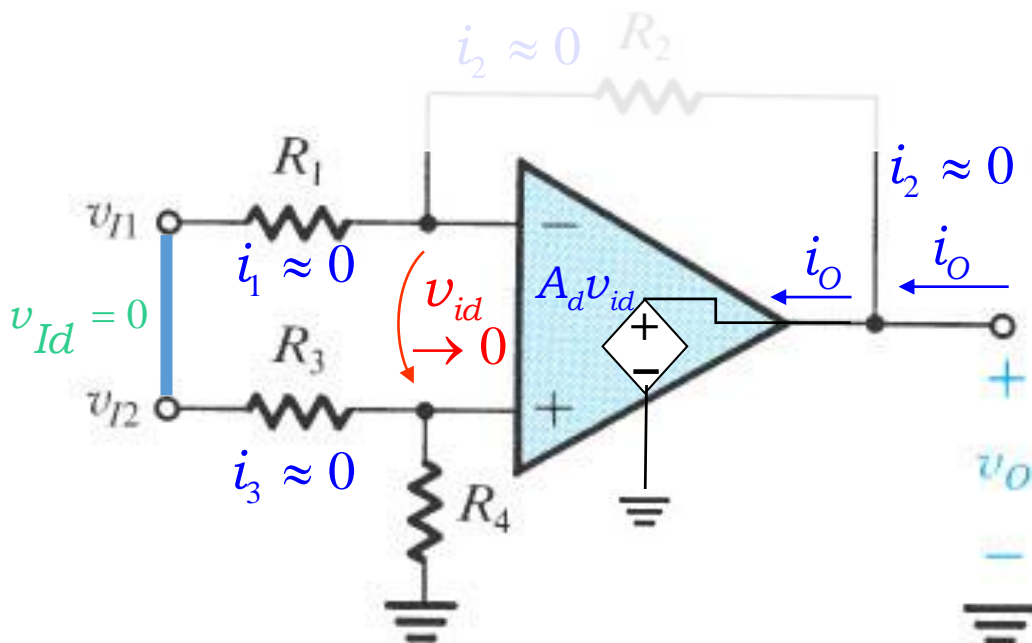
Análise da Resistência de Saída do Circuito



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

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

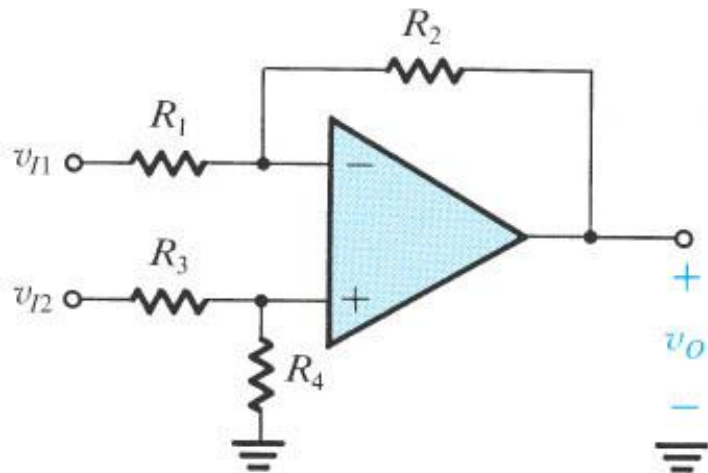
- Curto a entrada
- Injeto uma corrente na saída
- Determino a tensão de saída resultante



$$R_o = 0$$

Um Amplificador de Diferenças Simples

Características Gerais



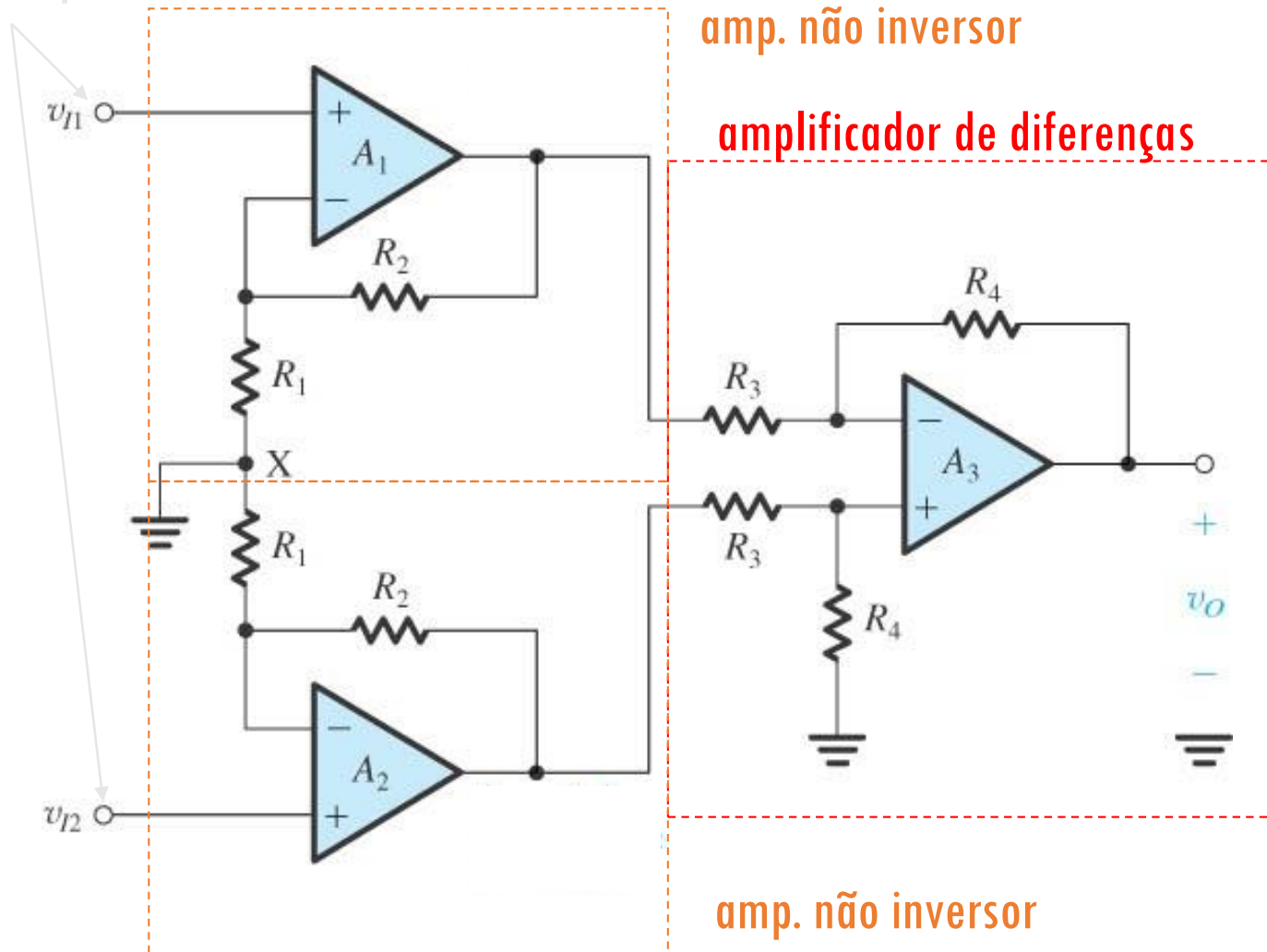
- O Amplificador de Diferenças simples possui duas deficiências:
 - Baixa impedância de entrada para altos ganhos ($R_{id} = 2R_1$)
 - Não é fácil variar o ganho diferencial, pois precisamos variar as resistências aos pares (p.ex. R_2 e R_4)
 - Difícil manter CMRR elevado

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

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

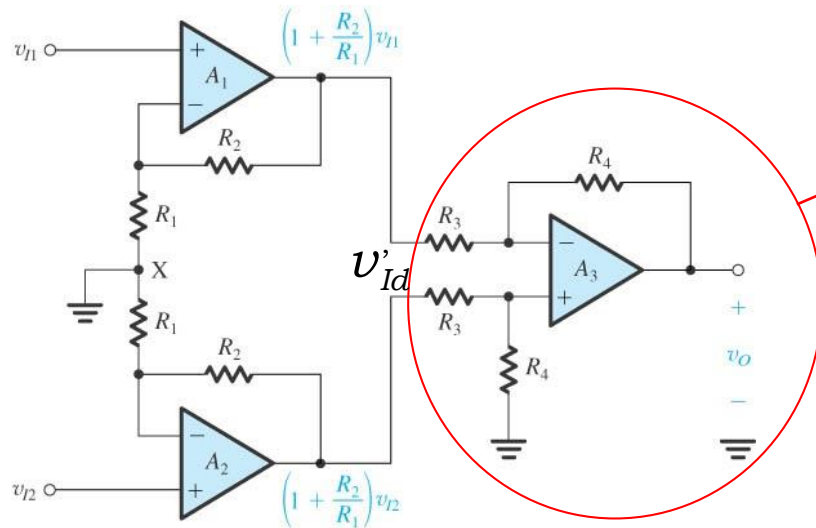
Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

elevada impedância de entrada



1º estágio: impedância e ganho!!!

Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação



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

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

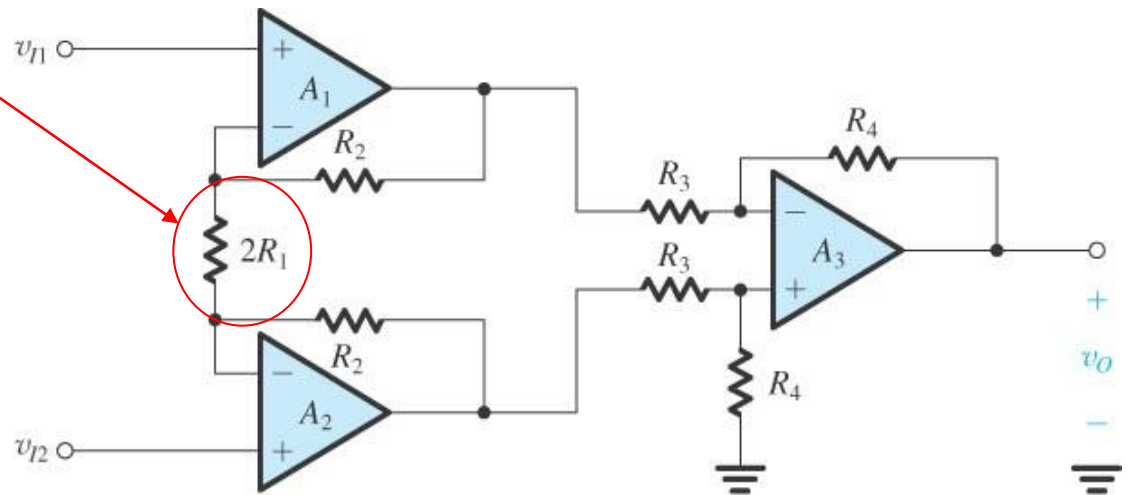
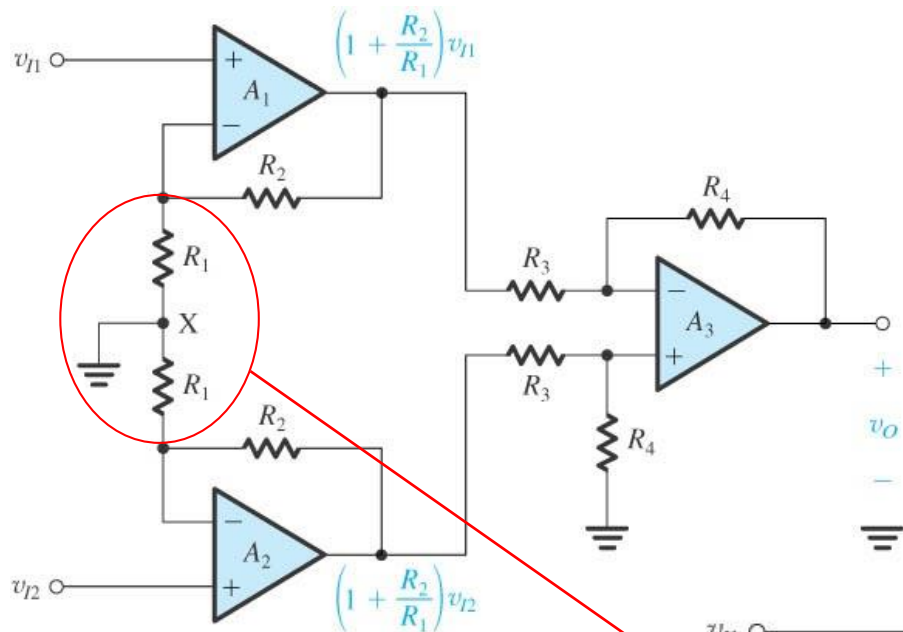
$$v_O = \underbrace{\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}_{A_d} v_{Id}$$

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

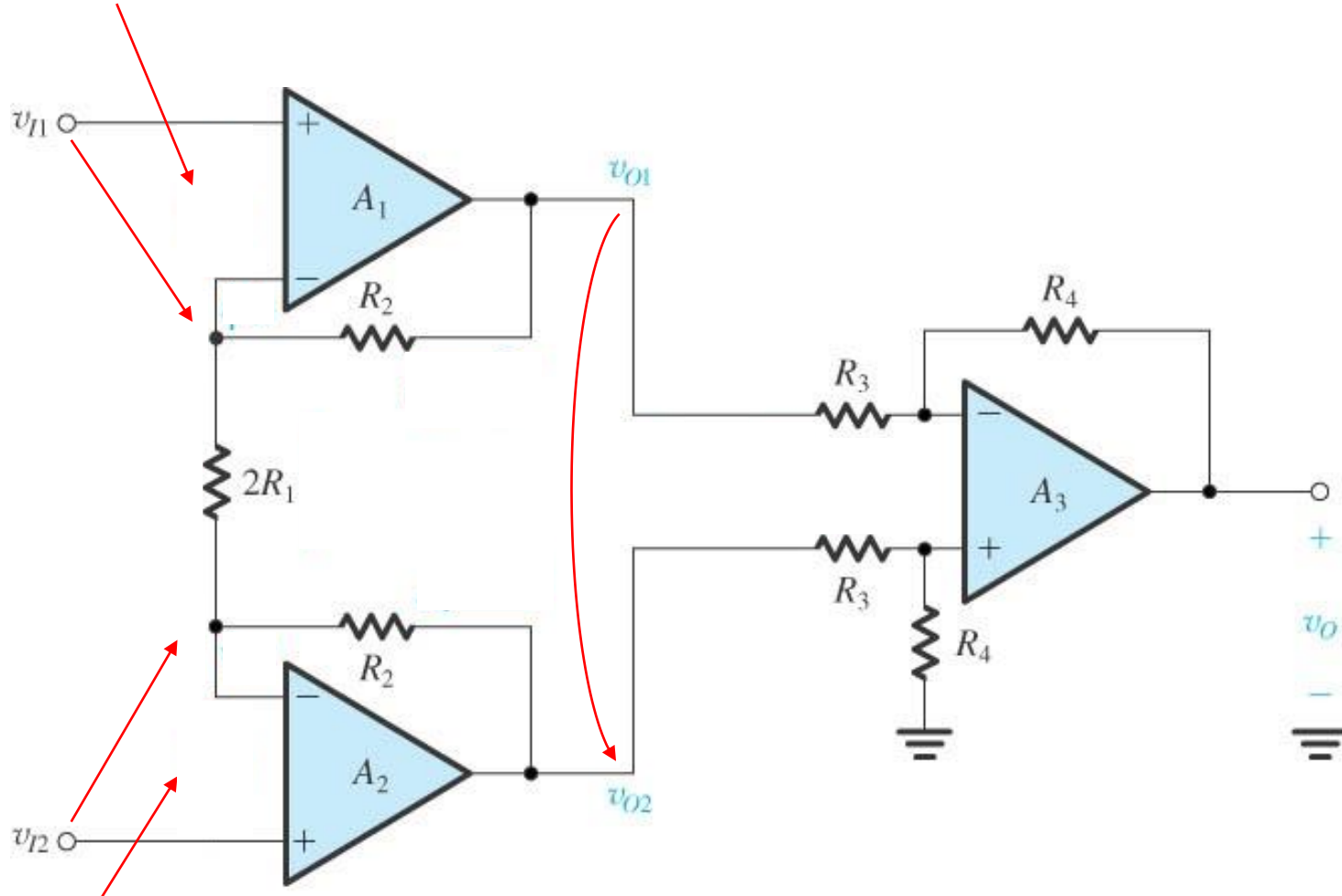
Uma mudança sutil e de amplas implicações



Um Circuito Melhor: O Amplificador de Instrumentação

Uma mudança sutil e de amplas implicações

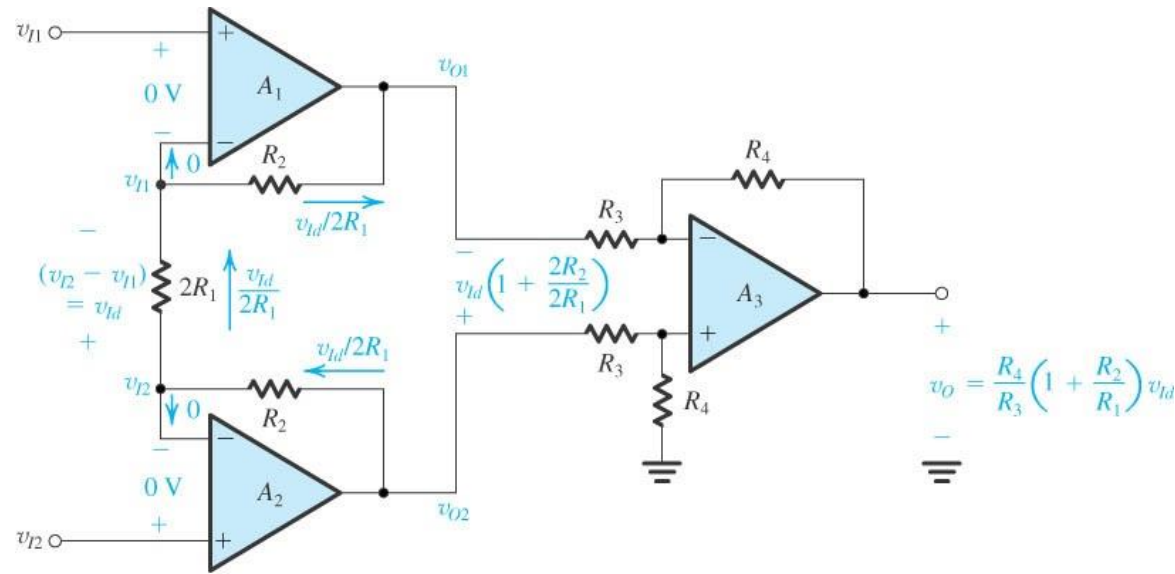
curto-circuito virtual



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 .

