

# CAPITULO 2

## Amplificadores Operacionais Aula 2

Prof. Sábina  
PSI3321

23

### 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

24

# 1ª Aula:

## Estudo de Amplificadores Operacionais

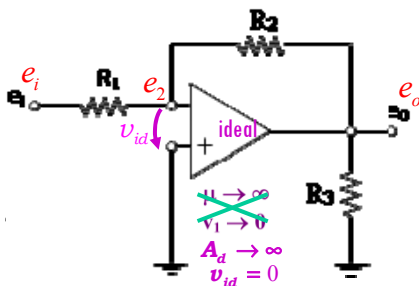
### Encapsulamento e Amp Ops Ideais

**Ao final desta aula você deverá estar apto a:**

- Analisar circuitos empregando AOs ideais e AOs reais
- Explicar o comportamento do ganho de tensão em AOs reais
- Explicar a diferença entre ganho de modo diferencial e ganho de modo comum

## O Amplificador Inversor (A.O. Ideal)

Vimos que:

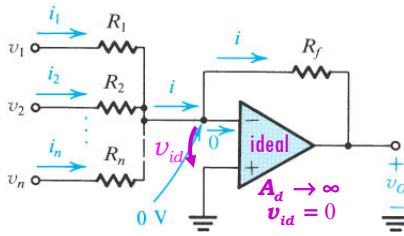


$$\frac{e_o}{e_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

**Podemos extrapolar!**

# O Somador Ponderado (A.O. Ideal)

## Uma Aplicação Importante



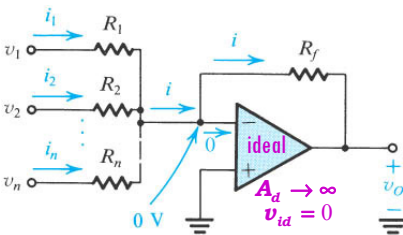
$$i_1 = \frac{v_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_2}{R_2}, \quad \dots, \quad i_n = \frac{v_n}{R_n}$$

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

$$i = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n}$$

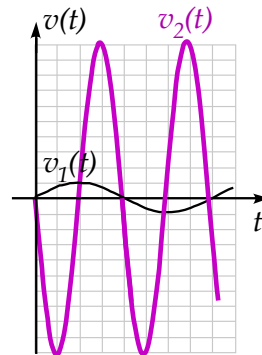
# O Somador Ponderado (A.O. Ideal)

## Uma Aplicação Importante



$$i = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_1} + \dots + \frac{v_n}{R_n}$$

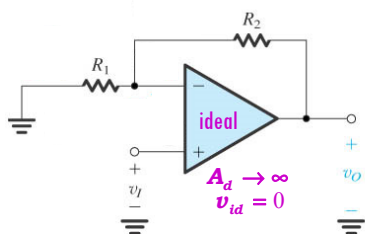
$$v_o = 0 - iR_f = -iR_f$$



Se "Rs" = 1kΩ  
Qual v\_o?

$$v_o = - \left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

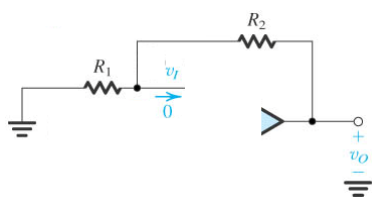
# A Configuração Não-inversora (A.O. Ideal)



$$v_O = v_I + \left(\frac{v_I}{R_1}\right)R_2$$

$$\frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Alternativamente, por divisor de tensão:



$$v_I = v_O \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$$

$$\frac{v_O}{v_I} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)$$

## Desidealizando o A.O.

A.O. Ideal:

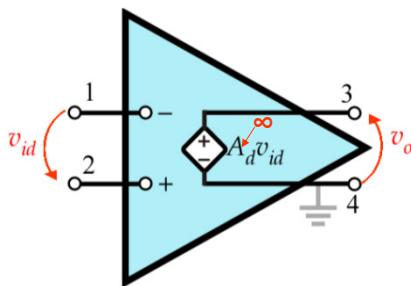
$$A_d = \infty$$

$$I_+ = I_- = 0$$

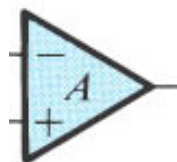
$$v_O = A_d v_{id}$$

A.O. desidealizado:

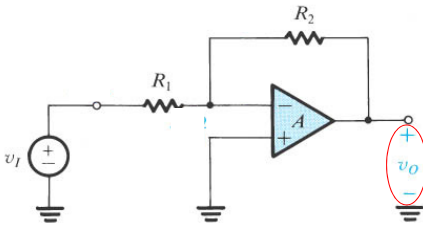
- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- mas  $A \neq \infty$  (não vale c.c. virtual)



E se  $A$  não for infinito?

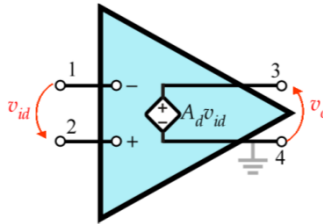


## A Configuração Inversora (A.O. com A finito)



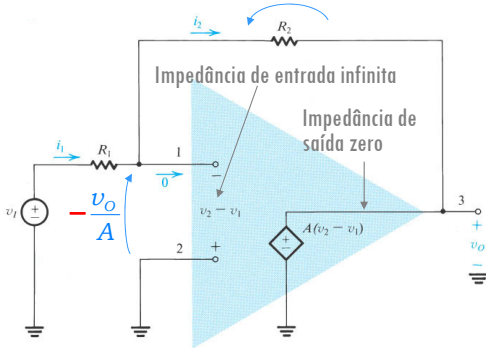
A.O. com:

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



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

## A Configuração Inversora (A.O. com A finito – NÃO IDEAL)



$$v_O = A \times v_{id}$$

$$v_{id} = \frac{v_O}{A}$$

A.O. real com:

- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- mas  $A \neq \infty$  (não vale c.c. virtual) impondo  $v_{id} = v_o / A$

$$i_1 = ? \quad i_1 = \frac{v_I - (-v_O / A)}{R_1} = \frac{v_I + v_O / A}{R_1}$$

$$v_O = ? \quad v_O = -\frac{v_O}{A} - i_1 R_2 = -\frac{v_O}{A} - \left( \frac{v_I + v_O / A}{R_1} \right) R_2$$

$$G = \frac{v_O}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A} \rightarrow A \gg 1 + \frac{R_2}{R_1} \rightarrow G = -\frac{R_2}{R_1}$$

# Exemplo 2.1: A Configuração Inversora

## EXEMPLO 2.1

Considere a configuração inversora com  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ .

- Determine o ganho em malha fechada para os casos de  $A = 10^3, 10^4, \text{ e } 10^5$ . Em cada caso, determine o erro percentual no valor de  $G$  relativo ao valor ideal  $R_2/R_1$  (obtido com  $A = \infty$ ). Calcule também a tensão  $v_1$  que aparece no terminal da entrada inversora quando  $v_i = 0,1 \text{ V}$ .
- Se o ganho em malha aberta  $A$  varia de 100.000 a 50.000, qual é a correspondente variação em percentagem, no valor do ganho em malha fechada  $G$ ?

$$\varepsilon \equiv \frac{|G| - (R_2/R_1)}{(R_2/R_1)} \times 100$$

$$G = \frac{v_O}{v_i} = - \frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A}$$

Item b) vocês fazem. Neste caso, na sua opinião,  $G$  é muito sensível a variações em  $A$ ?

A	G	$\varepsilon$	$v_1$
$10^3$	90,83	-9,17%	-9,08 mV
$10^4$	99,00	-1,00%	-0,99 mV
$10^5$	99,90	-0,10%	-0,10 mV

$$uA741 \Rightarrow A = 100.000$$

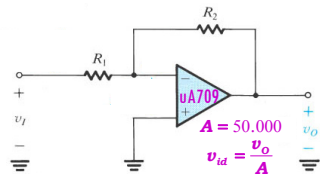
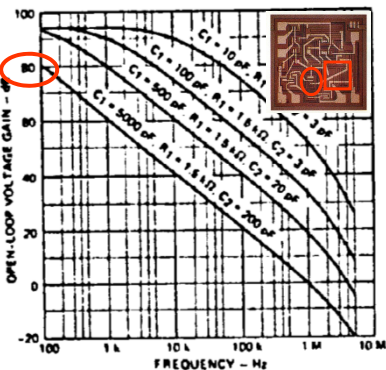
## A Configuração Inversora (A.O. com A finito)

Variação de  $A$  com a frequência

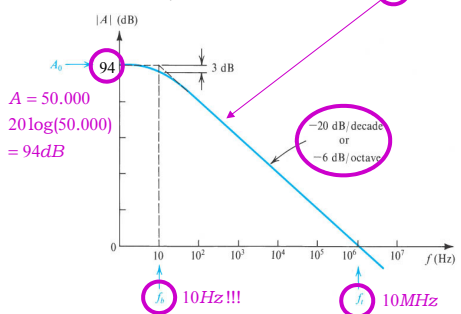
Um AO real: uA709

$$uA709 \Rightarrow A = 50.000$$

OPEN-LOOP FREQUENCY RESPONSE FOR VARIOUS VALUES OF COMPENSATION.



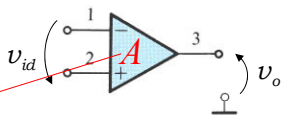
$$G = \frac{v_O}{v_i} = - \frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A}$$



# O Amp Op não ideal

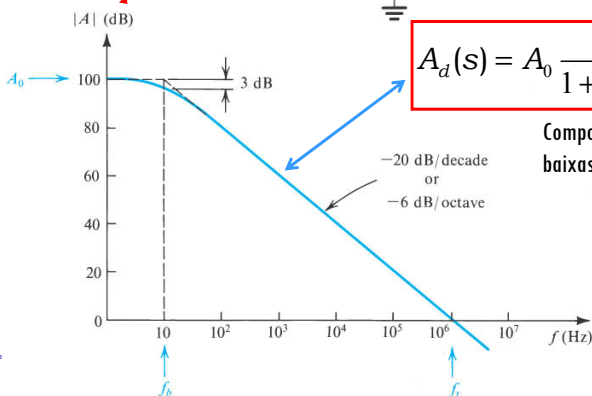
## Resposta em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência

Para entendermos a resposta em frequência da configuração inversora, vamos primeiro modelar matematicamente o A de um Amp Op real



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

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



$$A_d(s) = A_0 \frac{1}{1 + s / \omega_b} = \frac{A_0}{1 + s / \omega_b}$$

Comportamento similar a um RC passa baixas. Você sabe desenhar um?

# O Amp Op não ideal

## Resposta em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência

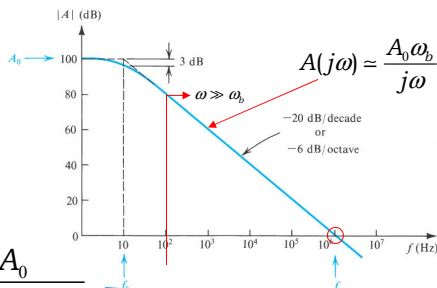
$$A_d(s) = \frac{A_0}{1 + s / \omega_b}$$

Para regime permanente senoidal:

$$A_d(s) = \frac{A_0}{1 + s / \omega_b} \rightarrow A_d(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega / \omega_b}$$

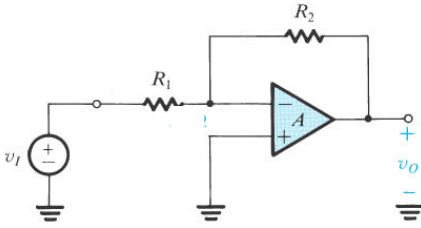
$$\omega \gg \omega_b \rightarrow A(j\omega) = \frac{A_0 \omega_b}{j\omega} \rightarrow |A(j\omega)| = \frac{A_0 \omega_b}{\omega}$$

$$|A_d| = 1 \text{ quando } \omega = \omega_t = A_0 \omega_b$$



## O Amp Op não ideal

Conf. Inversora: Resp. em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência



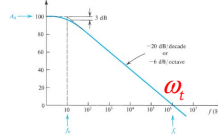
A.O. com:

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

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

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / \left(\frac{A_0}{1 + s / \omega_b}\right)} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (1 + s / \omega_b)}$$

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{1}{A_0 \omega_b} s \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

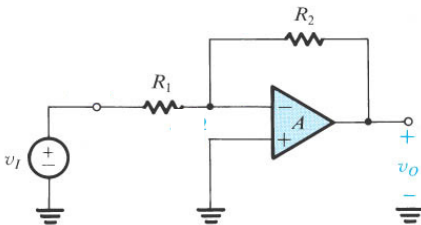


37

Prof. Seldre  
FSL/EPUSP

## O Amp Op não ideal

Conf. Inversora: Resp. em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência



A.O. com:

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

$$G_{inv} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{s}{\omega_t} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + (1 + R_2 / R_1) / A(s)} \Leftrightarrow G = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{s}{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}}$$

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

$$A_0 \gg 1 + R_2 / R_1$$

50.000... 100...  
100.000... 1.000...

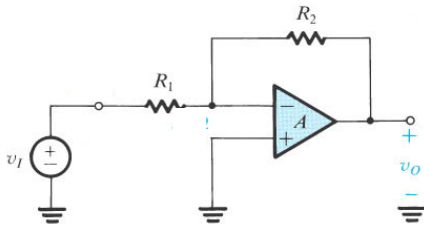
38

Prof. Seldre  
FSL/EPUSP



# O Amp Op não ideal

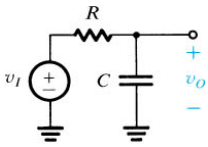
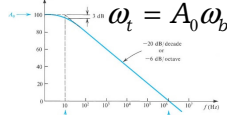
Conf. Inversora: Resp. em frequência do Ganho A Finito e dependente da Frequência



A.O. com:

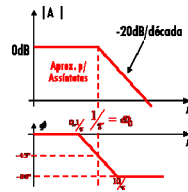
- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída zero
- mas  $A \neq \infty$  (não vale c.c. virtual)

$$G_{inv} = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \frac{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}{s}} \Rightarrow \text{"}\omega_0\text{"} = \omega_{3dB} \text{ (ou } \omega_H) = \omega_t / (1 + R_2 / R_1)$$



$$A_v = \frac{1}{1 + s/\omega_0}$$

$$A_v = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} \text{ com } 1/\tau = \omega_0 = \omega_H$$



Prof. Seldre PSI/EPUSP

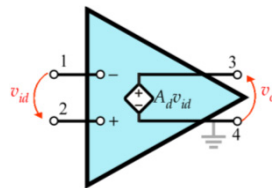
39

## A Configuração Inversora — A.O. Ideal

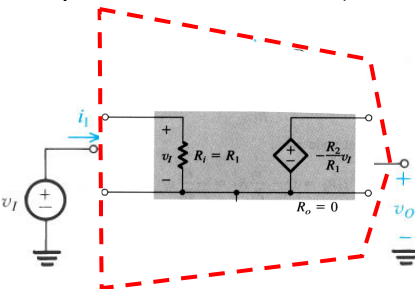
Resistências de Entrada e de Saída

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.)



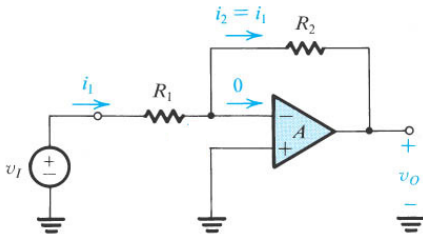
Para simplificar, vamos fazer essa análise considerando o A.O. Ideal:

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

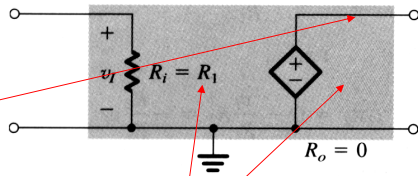
Prof. Seldre PSI/EPUSP

# 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.



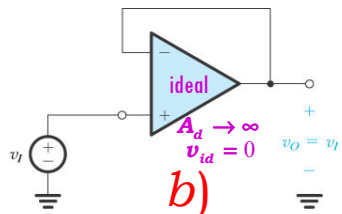
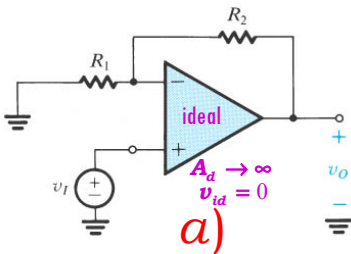
$R_o = 0$

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

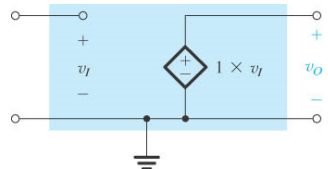
E a impedância (resistência) de entrada DO CIRCUITO, qual é?

De circuitos elétricos  $R_i \equiv \frac{v_I}{i_1} = \frac{v_I}{v_I/R_1} = R_1$

# 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)

## 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  $1\text{ M}\Omega$ . Compare seu projeto com base na configuração inversora da Figura 2.4.

