

# CAPITULO 2

## Amplificadores Operacionais Aula 4

Prof. Sedra  
PSI3321

### 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

# 4ª Aula:

## Amplificadores Operacionais

### Imperfeições e Circuitos RC com AO

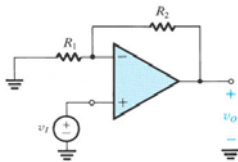
Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Apresentar as principais imperfeições dos AOs
- Explicar a influência das imperfeições dos AOs em aplicações CC
- Explicar a influência das imperfeições dos AOs em aplicações CA, determinando seu efeito no desempenho em frequência
- Analisar circuitos integradores e diferenciadores com AOs, explicando as imperfeições desses circuitos e como contorná-las

Prof. Sédra  
FALOP/UFPA

## O Amp Op não ideal

A Configuração Não-Inversora com 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)

Já vimos que na Conf. Não Inversora:

$$G_{inv} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_2/R_1}{A(s)}} \Leftrightarrow$$

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

Sabemos que na Conf. Inversora:

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

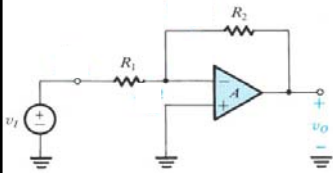
Prof. Sédra  
FALOP/UFPA

# O Amp Op não ideal

As Configurações Inversora e Não-inversora com Ganho A Finito e dependente da Frequência

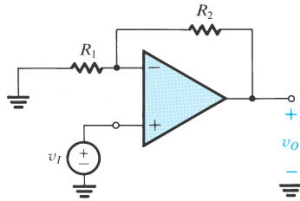
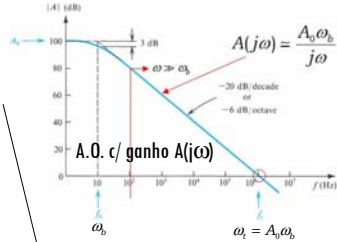
## EXEMPLO 2.4

Considere um A.O. com  $f_t = 1\text{MHz}$ . Calcule fcs para amplificadores não inversores e inversores com  $G = 1000, 100, 10, 1, -1, -10, -100, -1000$ . Esboce a resposta para  $G = 10$  e  $-10$ .



se  $f \gg f_b$  (se  $f \geq 10f_b$ )

$$G \approx \frac{-R_2 / R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}}$$



$$G \approx \frac{1 + R_2 / R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}}$$

$$\omega_{3dB} = \omega_t / (1 + R_2 / R_1)$$

$$f_{3dB} = f_t / (1 + R_2 / R_1)$$

# O Amp Op não ideal

As Configurações Inversora e Não-inversora com Ganho A Finito e dependente da Frequência

## EXEMPLO 2.4

Considere um A.O. com  $f_t = 1\text{MHz}$ . Calcule fci para amplificadores não inversores e inversores com  $G = 1000, 100, 10, 1, -1, -10, -100, -1000$ . Esboce a resposta para  $G = 10$  e  $-10$ .

Ganho em malha fechada	$R_2/R_1$	$f_{3dB} = f_t / (1 + R_2/R_1)$
+1.000	999	1 kHz
+100	99	10 kHz
+10	9	100 kHz
+1	0	1 MHz
-1	1	0,5 MHz
-10	10	90,9 kHz
-100	100	9,9 kHz
-1.000	1.000	≈ 1 kHz

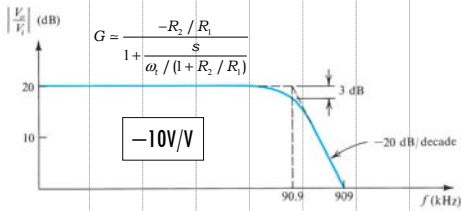
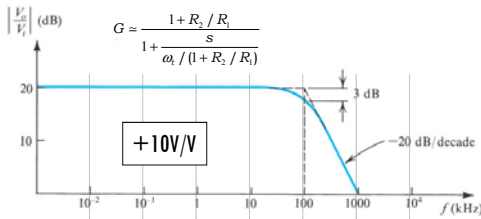
$$G \approx \frac{1 + R_2 / R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t / (1 + R_2 / R_1)}}$$

# O Amp Op não ideal

As Configurações Inversora e Não-inversora com Ganho A Finito e dependente da Frequência

## EXEMPLO 2.4

Considere um A.O. com  $f_t = 1\text{MHz}$ . Calcule  $f_{ci}$  para amplificadores não inversores e inversores com  $G = 1000, 100, 10, 1, -1, -10, -100, -1000$ . Esboce a resposta para  $G = 10$  e  $-10$ .

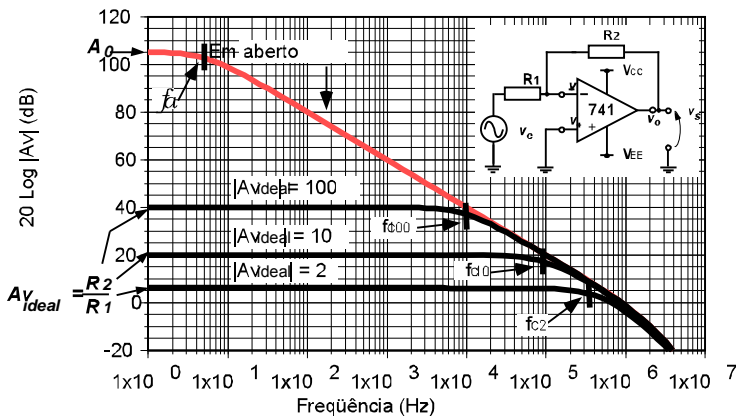


# O Amp Op não ideal

As Configurações Inversora e Não-inversora com Ganho A Finito e dependente da Frequência

## EXEMPLO 2.4

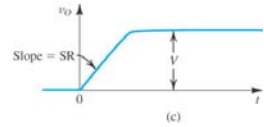
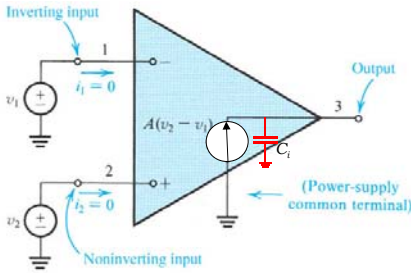
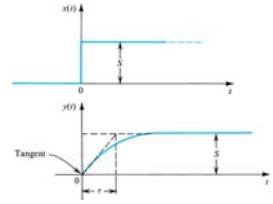
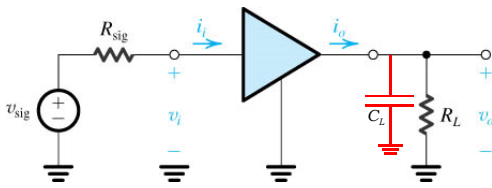
Considere um A.O. com  $f_t = 1\text{MHz}$ . Calcule  $f_{ci}$  para amplificadores não inversores e inversores com  $G = 1000, 100, 10, 1, -1, -10, -100, -1000$ . Esboce a resposta para  $G = 10$  e  $-10$ .



# O Amp Op não ideal

## Operações com Grandes Sinais:

### Slew Rate (SR) ou Taxa Máxima de Variação da Tensão de Saída



Prof. Sédson FALCÃO

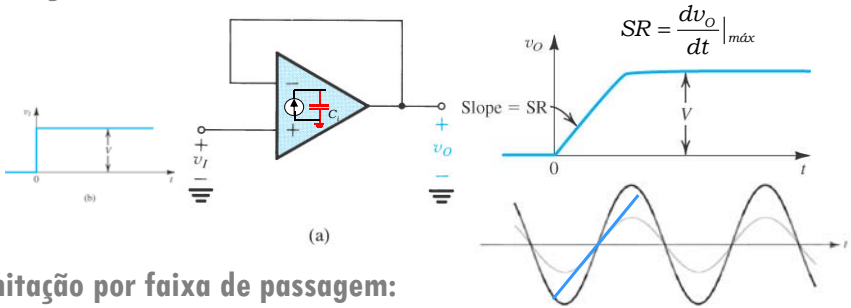
86

# O Amp Op não ideal

## Operações com Grandes Sinais:

### Slew Rate (SR) ou Taxa Máxima de Variação da Tensão de Saída

#### Limitação por Slew Rate:

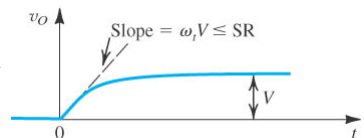
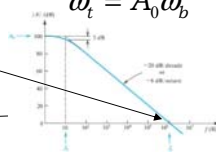


#### Limitação por faixa de passagem:

$$G = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_0}{1 + s/\omega_t}$$

$$\omega_t = A_0 \omega_b$$

$$v_o(t) = A_0 \hat{V}_{ID} (1 - e^{-\omega_t t})$$



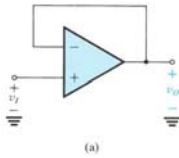
Prof. Sédson FALCÃO

5

# O Amp Op não ideal

## Operações com Grandes Sinais: Slew Rate (SR) e a Faixa de Passagem a Plena Potência

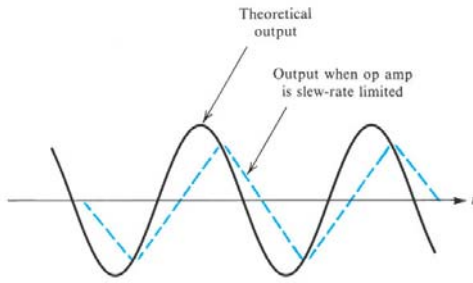
$$v_i = \hat{V}_i \sin \omega t$$



$$\frac{dv_i}{dt} = \omega \hat{V}_i \cos \omega t$$

$$\text{se } \omega \hat{V}_i > SR$$

sinal de saída distorcido!



**Faixa de passagem a plena potência:**  
-Frequência onde  $V_{O \max}$  passa a ser distorcida por SR:

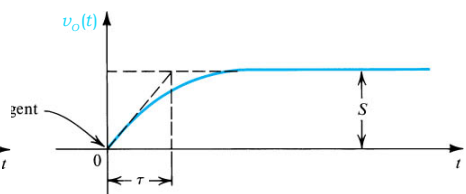
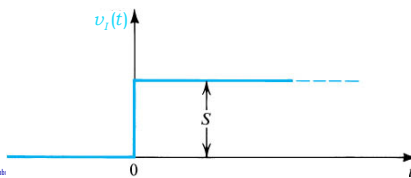
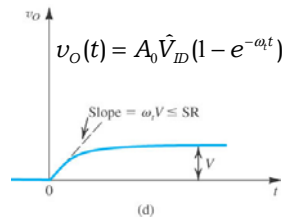
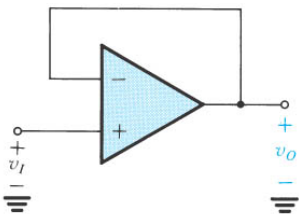
$$\omega V_{O \max} = SR \Rightarrow f_M = \frac{SR}{2\pi V_{O \max}}$$

Note que para  $f > f_M$  a distorção ocorre para amplitudes menores que  $V_{O \max}$ :

$$V_O = V_{O \max} \left( \frac{\omega_M}{\omega} \right)$$

88

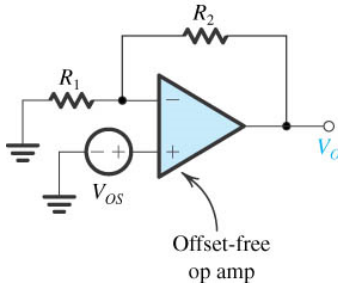
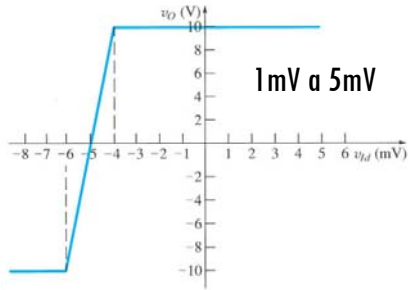
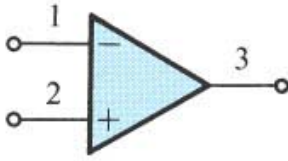
**Exercício 2.21** Um amp op com taxa máxima de variação da tensão de saída de  $1 \text{ V}/\mu\text{s}$  e faixa de passagem de ganho unitário  $f_t$  de  $1 \text{ MHz}$  está conectado na configuração seguidora de ganho unitário. Calcule o maior valor possível para o degrau de tensão na entrada para o qual a forma de onda de saída ainda é dada pela rampa exponencial da Equação (2.32). Com essa tensão de entrada, qual é o tempo de subida de 10% a 90% para a forma de onda de saída? Se for aplicado um degrau de entrada 10 vezes maior, calcule o tempo de subida de 10% a 90% para a forma de onda de saída.



# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Tensão de Offset de Entrada

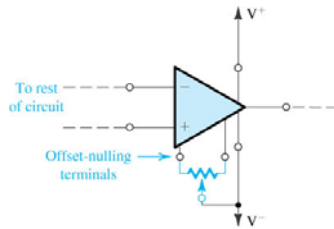
Tensão de Offset de entrada:



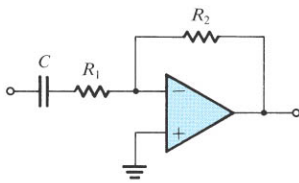
# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Tensão de Offset de Entrada

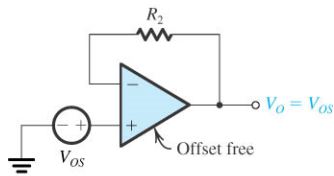
Correção da Tensão de Offset de entrada:



Se não precisa amplificar desde CC...



(a)

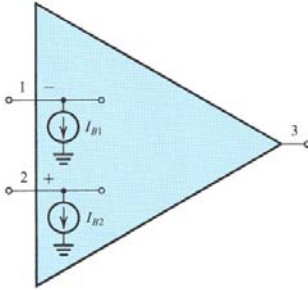


(b)

# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Correntes de Offset e de Polarização de Entrada

Para um Amp Op operar ele necessita de correntes de entrada, por menor que elas sejam.



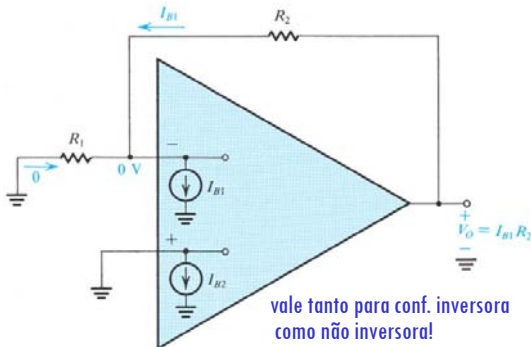
$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Correntes de Offset e de Polarização de Entrada

Qual o efeito em um circuito em malha fechada?



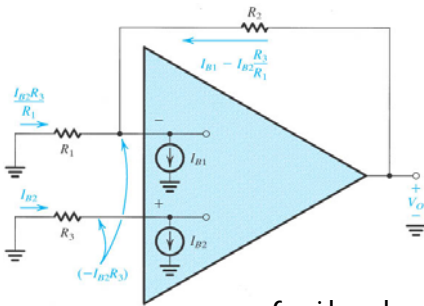
$$V_O = I_{B1} R_2 \cong I_B R_2$$



# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Correntes de Offset e de Polarização de Entrada

Introduzindo um resistor  $R_3$ :



$$V_O = -I_{B2}R_3 + R_2(I_{B1} - I_{B2}R_3 / R_1)$$

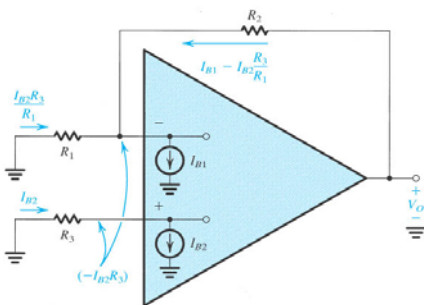
Considerando apenas o efeito de  $I_B$  ( $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ )

$$V_O = I_B [R_2 - R_3(1 + R_2 / R_1)]$$

$$R_3 = \frac{R_2}{1 + R_2 / R_1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

# O Amp Op não ideal

## Imperfeições CC: Correntes de Offset e de Polarização de Entrada



Com isso, também podemos analisar o efeito de  $I_{OS}$

$$V_O = -I_{B2}R_3 + R_2(I_{B1} - I_{B2}R_3 / R_1)$$

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| \quad I_{B1} = I_B + I_{OS} / 2$$

$$I_{B2} = I_B - I_{OS} / 2$$

$$V_O = I_{OS}R_2$$

**CONCLUSÃO:** No terminal positivo devemos colocar uma resistência CC igual àquela vista pelo terminal negativo!!

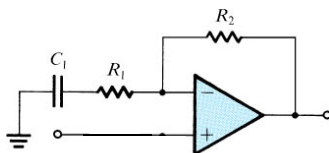
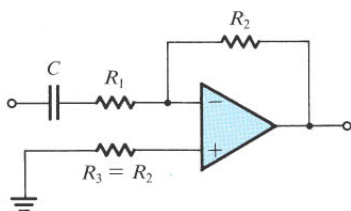
Devemos SEMPRE garantir um caminho para a corrente CC!!!

## O Amp Op não ideal

### Imperfeições CC: Correntes de Offset e de Polarização de Entrada

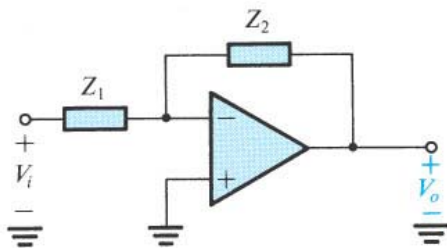
**CONCLUSÃO:** No terminal positivo devemos colocar uma resistência CC igual àquela vista pelo terminal negativo!!

Devemos SEMPRE garantir um caminho para a corrente CC!!!

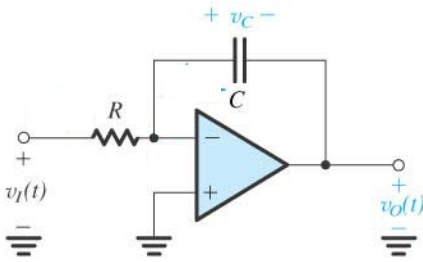


## Integradores e Diferenciadores

### A configuração inversora generalizada



## O Circuito Integrador Inversor

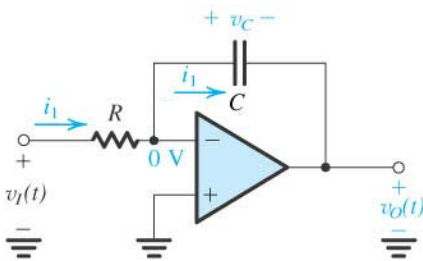


se o circuito começa a operar em  $t=0$ :

$$v_C(t) = V_C + \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt$$

$$\text{como } v_O(t) = -v_C(t) \rightarrow v_O(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t v_I(t) dt - V_C$$

## O Circuito Integrador



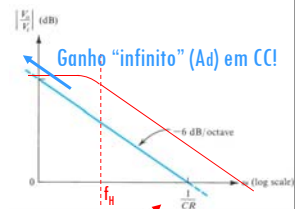
$$v_O(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t v_I(t) dt$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sCR}$$

(a)

ou, no domínio das frequências:

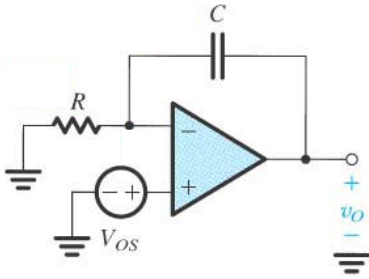
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{sCR} = -\frac{1}{j\omega CR} \rightarrow \begin{cases} \left| \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \right| = \frac{1}{\omega CR} \\ \phi = +90^\circ \end{cases}$$



# O Circuito Integrador

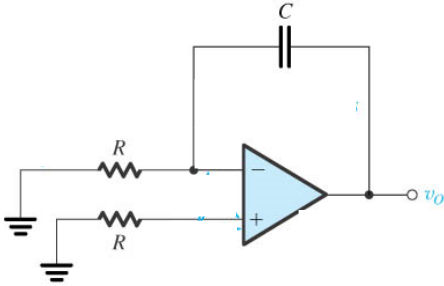
O efeito da corrente ou tensão de offset na entrada

$V_{OS}$



aumenta linearmente com o tempo, até saturar!

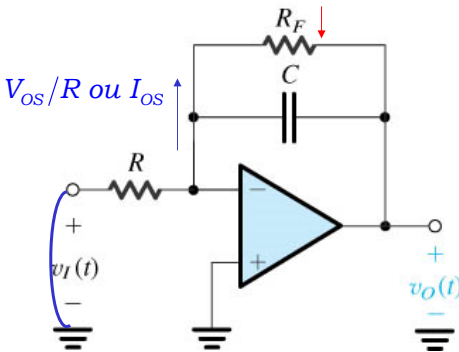
$I_{OS}$



aumenta linearmente com o tempo, até saturar!

# O Circuito Integrador

Atenuando o efeito da corrente ou tensão de offset na entrada



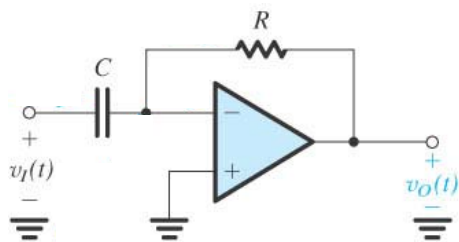
$$v_{O|CC} = V_{OS}(1 + R_F / R) + I_{OS}R_F$$

$$\frac{V_O}{V_i} = -\frac{R_F / R}{1 + sCR_F}$$

$$v_O(t) = -\frac{1}{CR_{\text{th}}} \int v_i(t) dt$$

$$\frac{V_O}{V_i} = -\frac{1}{sCR}$$

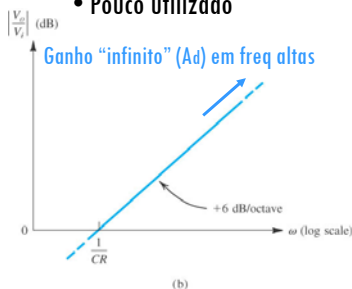
# O Circuito Diferenciador



ou, no domínio das frequências:

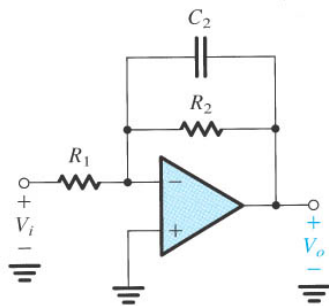
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -j\omega CR \quad \begin{cases} \left| \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \right| = \omega CR \\ \phi = -90^\circ \end{cases}$$

- Amplificador de ruídos
- Pouco utilizado



## Exemplo 2.6

Projete para  $A_{inv} = 40\text{dB}$ ,  $f_H = 1\text{kHz}$  e  $R_{in} = 1\text{k}\Omega$



$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{Z_1(s)Y_2(s)}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + sC_2R_1}$$

para  $s=0$  (CC) o ganho é  $-R_2/R_1$

**Expo: ganho de 40dB**

$$40\text{dB} = 100\text{V/V} \text{ ou } R_2 / R_1 = 100$$

$$\text{para } R_{in} = 1\text{k} \rightarrow R_1 = 1\text{k}\Omega \text{ e } \therefore R_2 = 100\text{k}\Omega$$

$$\text{se } f_0 = 1\text{kHz} \rightarrow C_2 = 1,59\text{ nF}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\overset{K}{-R_2/R_1}}{1 + sC_2R_1} \quad (\text{FPB!})$$

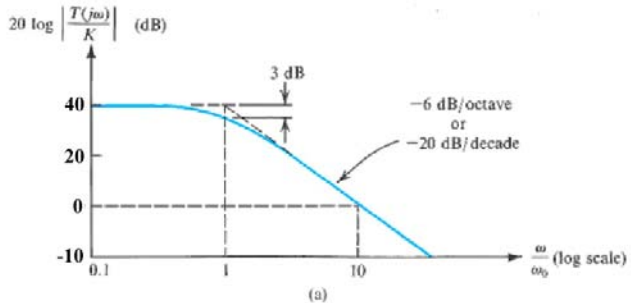
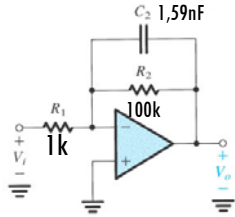
$1/\omega_0$

## Exemplo 2.6

Projete para  $A_{inv} = 40\text{dB}$ ,  $f_H = 1\text{kHz}$  e  $R_{in} = 1\text{k}\Omega$

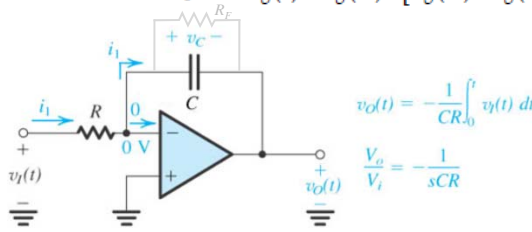
$k = 100$

$\omega_0 = 2\pi 1\text{kHz}$



Prof. Sédra  
FALOPDF

**EXEMPLO 2.7** Ache o sinal de saída produzido por um integrador Miller em resposta a um pulso de entrada com amplitude de 1 V e largura de 1 ms. Seja  $R = 10\text{ k}\Omega$  e  $C = 10\text{ nf}$ . Se o capacitor  $C$  estiver em paralelo com um resistor de  $1\text{ M}\Omega$ , como se modificará a resposta de saída? Considere a tensão inicial no capacitor como zero. Lembre-se que em um circuito RC simples:  $v_o(t) = v_o(\infty) - [v_o(\infty) - v_o(0_+)]e^{-t/CR_F}$

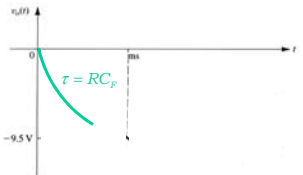
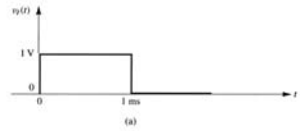


$$v_o(t) = -\frac{1}{CR} \int v_i(t) dt$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sCR}$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t 1 dt, 0 \leq t \leq 1\text{ms}$$

$$v_o(t) = -10^4 t, 0 \leq t \leq 1\text{ms}$$



Com  $R_F$  ( $p / 0 \leq t \leq 1\text{ms}$ )  $v_o(t) = v_o(\infty) - [v_o(\infty) - v_o(0_+)](1 - e^{-t/CR_F})$

$$v_o(\infty) = -i_1 R_F = -0,1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^6 = -100\text{ V}$$

$$v_o(t) = -100 - [-100 + 0]e^{-t/10\text{ms}} = -100(1 - e^{-t/10\text{ms}})$$

$$v_o(1\text{ms}) = -100(1 - e^{-0,1}) = -9,5\text{ V}$$

( $p / t \geq 1\text{ms}$ )  $v_o(1\text{ms}_+) = -9,5\text{ V}$  e  $v_o(\infty) = 0$

$$v_o(t) = 0 - [0 - (-9,5)]e^{-t/10\text{ms}} = -9,5e^{-t/10\text{ms}}$$

Prof. Sédra  
FALOPDF