

# Circuitos Elétricos & Circuitos Eletrônicos

- ✓ **Circuitos Elétricos** – *Sistema Físico*: conexão de fios condutivos e outros dispositivos passivos (fontes de tensão, resistor, capacitor e indutor) onde ocorre um fluxo uniforme de elétrons.
- ✓ **Circuitos Elétricos** – *Modelo*: interconexão de modelos lineares de dispositivos passivos (fontes de tensão, fontes de corrente, resistência, capacitância e indutância).
- ✓ **Circuitos eletrônicos** – *Sistema Físico*: conexão de fios condutivos e outros dispositivos passivo e ativos, onde alguma forma de controle é exercido sobre o fluxo de elétrons por outro sinal elétrico, que pode ser uma corrente ou uma tensão.
- ✓ **Circuitos eletrônicos** – *Modelo*: interconexão de modelos lineares e não lineares de dispositivos passivos e ativos.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PLANO DE ENSINO DE DISCIPLINA**

| DISCIPLINA                        | CÓDIGO | Nº.CRÉDITOS  | TURMA | PERÍODO |
|-----------------------------------|--------|--------------|-------|---------|
| Circuitos Elétricos e Eletrônicos | TI006  | 180H / 5,625 | ABC   | 2005/2  |

| PROFESSOR(ES) RESPONSÁVEL(EIS)                 | TITULAÇÃO | REGIME DE TRABALHO |
|------------------------------------------------|-----------|--------------------|
| Paulo César Cortez<br>Carlos Pimentel de Sousa | Dr<br>Msc | DE<br>DE           |

| PRE-REQUISITOS EXIGIDOS | CONSTITUI PRÉ-REQUISITO PARA |
|-------------------------|------------------------------|
| CB595                   | TI013, TI015, TH165          |

| CURSOS | NÍVEL     | DEPARTAMENTO | UNID. CURRICULAR |
|--------|-----------|--------------|------------------|
| 27     | Graduação | DETI         |                  |

**OBJETIVOS DA DISCIPLINA:**

1.Analisar e projetar circuitos eletrônicos de pequenos sinais utilizando os transistores TBJ, FET, e os amplificadores operacionais.

**EMENTA DA DISCIPLINA**

Modelos de Circuitos para Amplificadores. Introdução aos Amplificadores Operacionais. Circuitos Básicos. Diodos de Junção. Circuitos a Diodos. Transistores Bipolares de Junção. Polarização e Operações com Pequenos Sinais. Transistores de Efeito de Campo. Circuitos Eletrônicos Lineares. Resposta em Freqüência. Simulação de circuito eletrônicos.

**METODOLOGIA DE ENSINO E AVALIAÇÃO**

**Metodologia:**

A abordagem utilizada no ensino do conteúdo programático compreenderá de aulas expositivas com o uso de projetor LCD, demonstrações de simulações em ambiente computacional, e atividades de laboratório.

**Avaliação:**

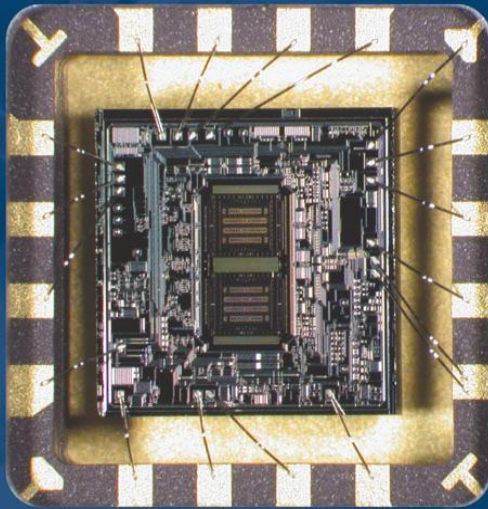
A avaliação será composta de três exames teóricos onde serão avaliados os conceitos e fundamentos das matérias ministradas na disciplina, e de um projeto prático.

| CONTEÚDO PROGRAMÁTICO: Circuitos Eletrônicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | AULAS            |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | PREVISTAS        | REALIZADAS        |
| 1. Introdução aos Circuitos Eletrônicos: modelos gerais de circuitos para amplificadores. Tipos básicos de amplificadores: amplificador de tensão, amplificador de corrente, amplificadores conversores de tensão/corrente, amplificadores conversores de corrente/tensão. Medidas de desempenho. Introdução à simulação de circuitos com o Spice.                                                                                                                                                                                             | 6                |                   |
| 2. Amplificador Operacional: Encapsulamento do Amp. Op. O Amp. Op. Ideal, configurações básicas: circuito inversor, circuito não inversor, circuito somador. Efeito do ganho finito. Resposta em frequência: largura de banda. Imperfeições dos Amp. Op. Comerciais: tensão de offset, correntes de polarização, slew-rate. Exemplos de circuitos com Amp. Op. comerciais. Atividades de laboratório.                                                                                                                                          | 15               |                   |
| 3. Diodos de Junção: características elétricas do diodo de junção. Operação física dos diodos de junção: modelo físico da junção PN. Tipos básicos de diodos de junção: diodo retificador, diodo zener, diodo emissores de luz (LED), foto diodo, diodo varicap Aplicações dos diodos de junção: circuitos retificadores, limitadores e estabilizadores de tensão.                                                                                                                                                                             | 12               |                   |
| 4. Transistores Bipolares de Junção: estrutura física e modos de operação do TJB, o transistor NPN e PNP, o efeito amplificador. Configurações básicas: emissor comum, bae comum e coletor comum. Regiões de operação: linear, corte e saturação. Circuitos básicos de polarização. Modelos para pequenos sinais: modelo híbrido, medelo $\pi$ -híbrido. Amplificadores básicos: ganho de tensão, resistência de entrada e de saída, resposta em frequência. Amplificadores de múltiplos estágios. O TBJ como chave. Atividades de laboratório | 21               |                   |
| 5. Transistores de Efeito de Campo: estrutura física e modos de operação do transistor de efeito de campo (FET) e MOSFET. Configurações básicas: fonte comum, dreno comum e porta comum. Regiões de operação: linear, corte e saturação. Circuitos básicos de polarização. Modelos para pequenos sinais. Amplificadores básicos: ganho de tensão, resistência de entrada e de saída, resposta em frequência. Comparação do FET com o TJB. Amplificadores de múltiplos estágios.                                                                | 12               |                   |
| 6. Circuitos Eletrônicos LIneares: O par diferencial com TJB: o ganho diferencial e ganho de modo comum, polarização com carga ativa e com fonte de corrente. Espelhos de corrente. Análise do amplificador operacional 741. Filtros analógicos ativos: projeto e implementação de filtros Butterworth e Chebyshev. Atividades de laboratório.                                                                                                                                                                                                 | 24               |                   |
| <b>AVALIAÇÕES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>PREVISTAS</b> | <b>REALIZADAS</b> |
| 1º Avaliação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Após U2          |                   |
| 2º Avaliação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Após U4          |                   |
| 3º Avaliação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Após U6          |                   |

# Microelectronic CIRCUITS

---

## Sedra/Smith



FIFTH EDITION



CD-ROM ENCLOSED  
NOW WITH PSPICE 9.2  
LITE EDITION

PowerPoint Overheads for

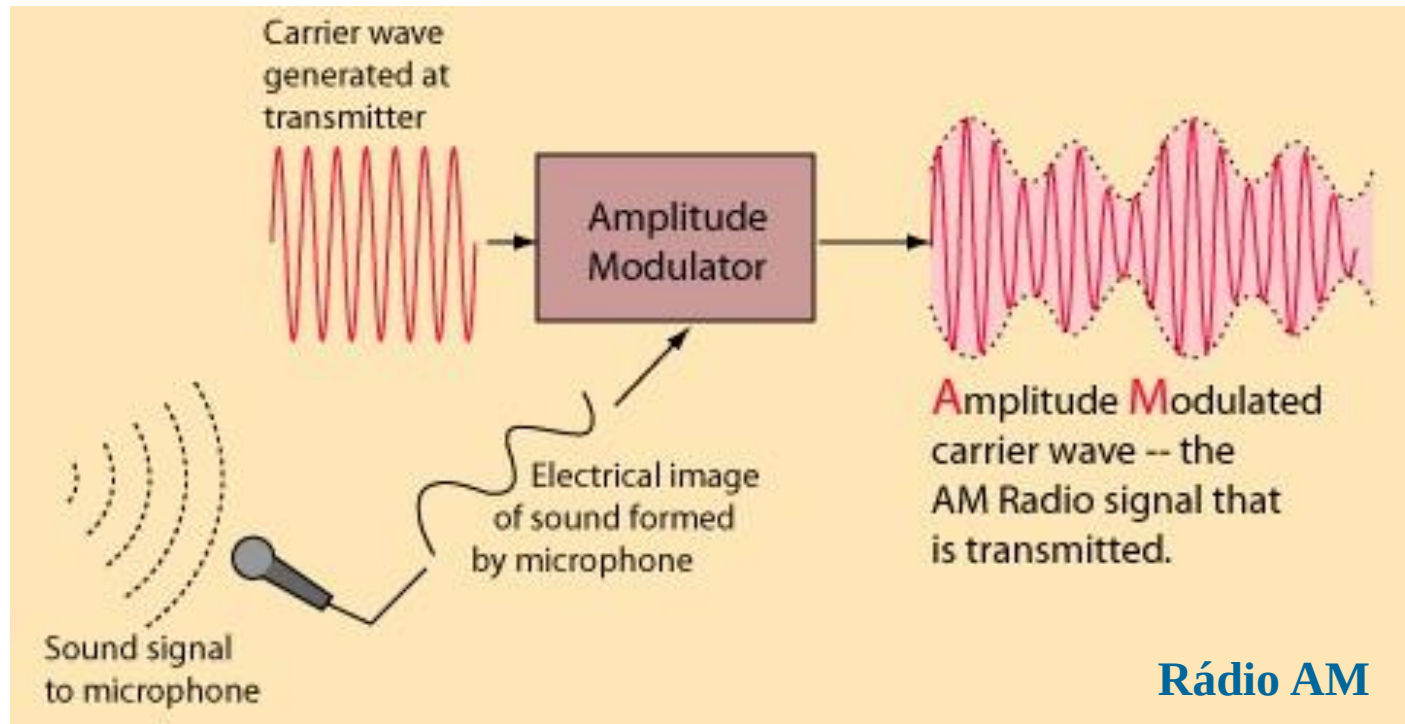
Sedra/Smith  
Microelectronic Circuits 5/e

A microscopic view of several cells, possibly sperm or oocytes, with a blue overlay. The cells are spherical and have a distinct nucleus. The background is a light blue with some darker blue lines and shapes, suggesting a biological or scientific theme.

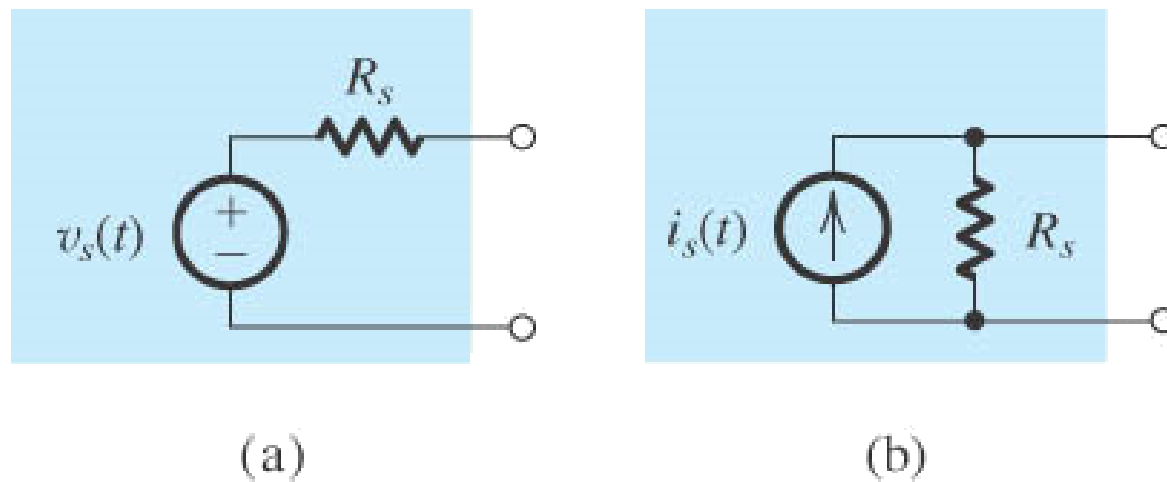
## CHAPTER 1

# Introduction to Electronics

# Sinais

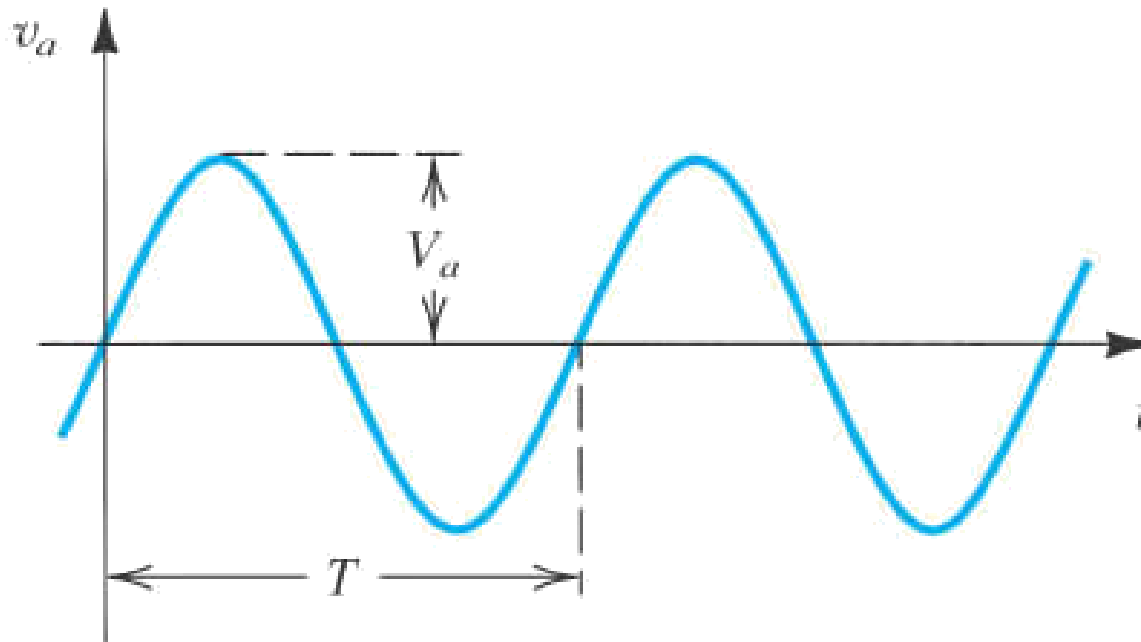


O rádio AM utiliza a imagem elétrica de uma fonte de som para modular a amplitude de uma onda portadora (carrier wave). Na saída do receptor, no processo de detecção, esta imagem é separada da portadora e torna-se novamente som por meio de um autofalante.



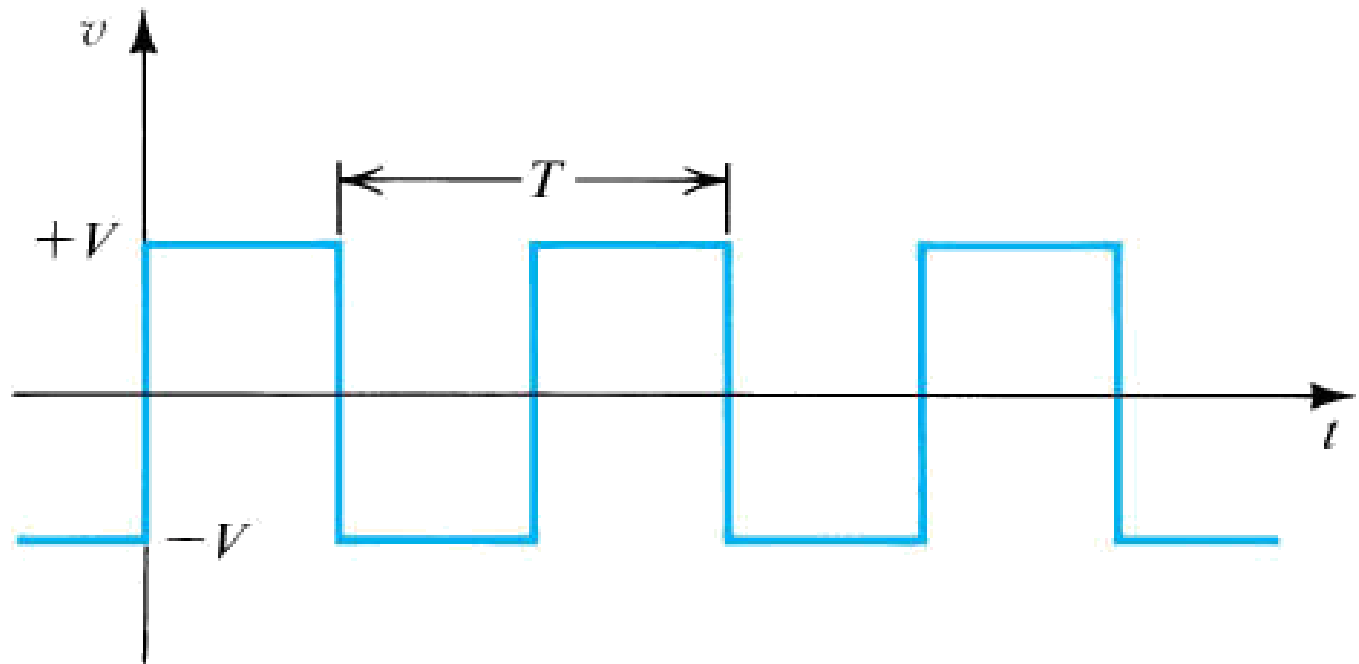
**Figure 1.1** Two alternative representations of a signal source: **(a)** the Thévenin form, and **(b)** the Norton form.

# Sinais Periódicos



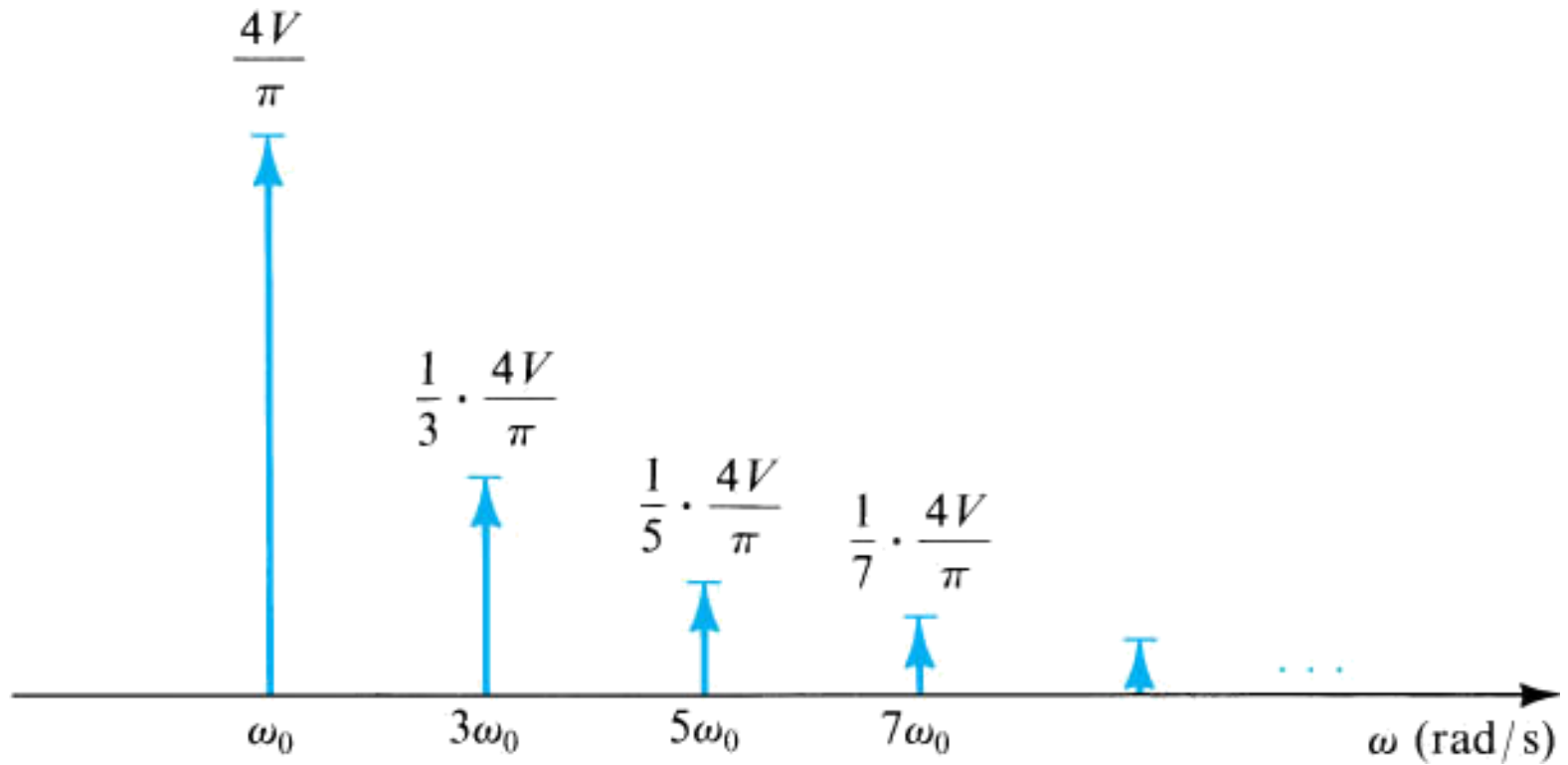
**Figure 1.3** Sine-wave voltage signal of amplitude  $V_a$  and frequency  $f = 1/T$  Hz. The angular frequency  $\omega = 2\pi f$  rad/s.



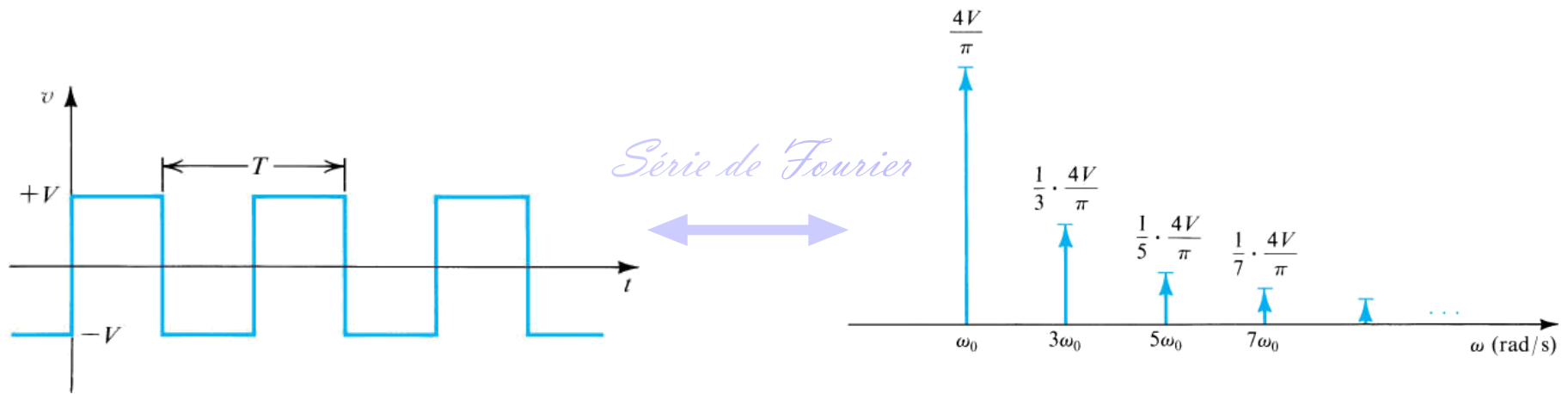


$$v(t) = \frac{4V}{\pi} \left( \sin w_0 t + \frac{1}{3} \sin 3w_0 t + \frac{1}{5} \sin 5w_0 t + \frac{1}{7} \sin 7w_0 t \dots \right)$$

**Figure 1.4** A symmetrical square-wave signal of amplitude  $V$ .

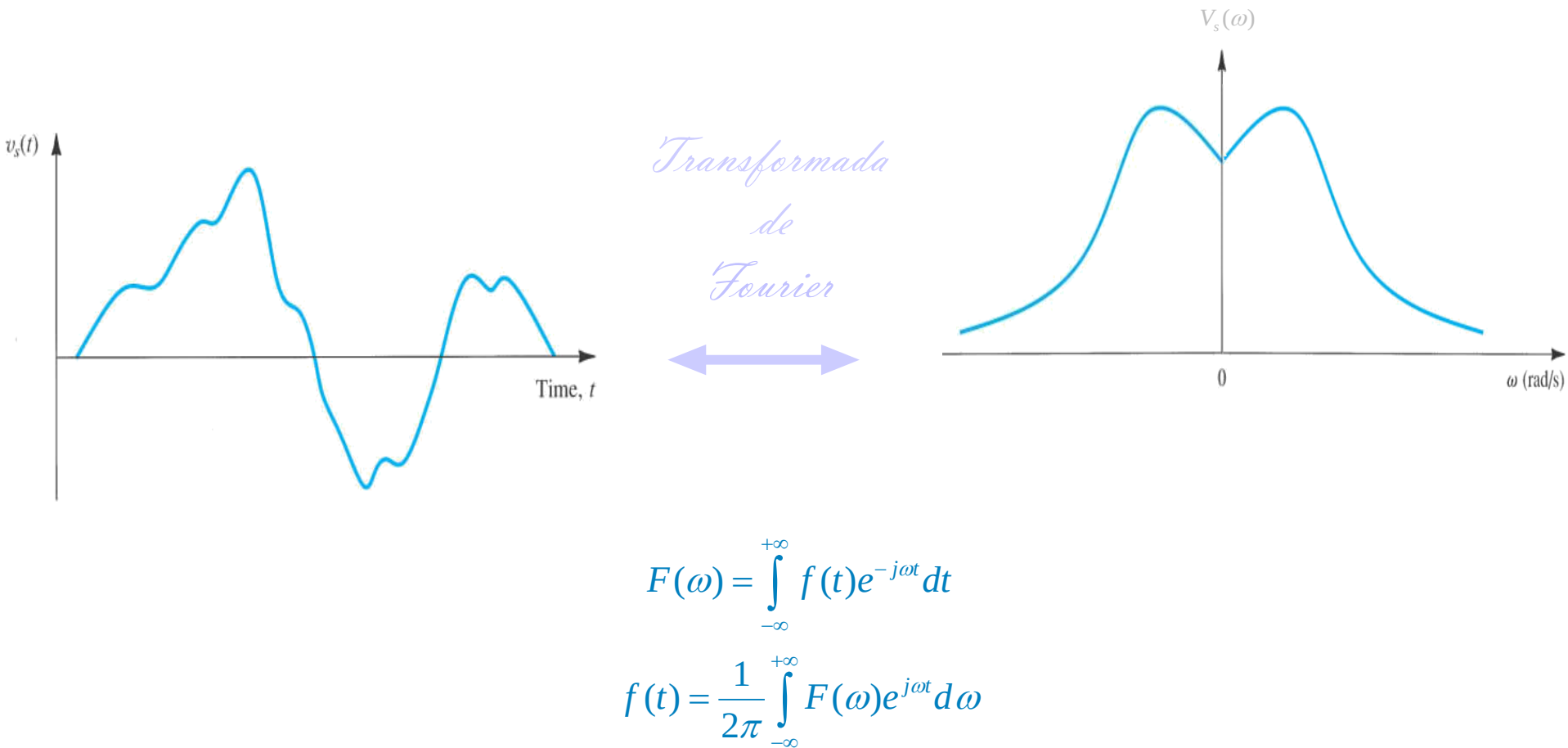


**Figure 1.5** The frequency spectrum (also known as the line spectrum) of the periodic square wave of Fig. 1.4.

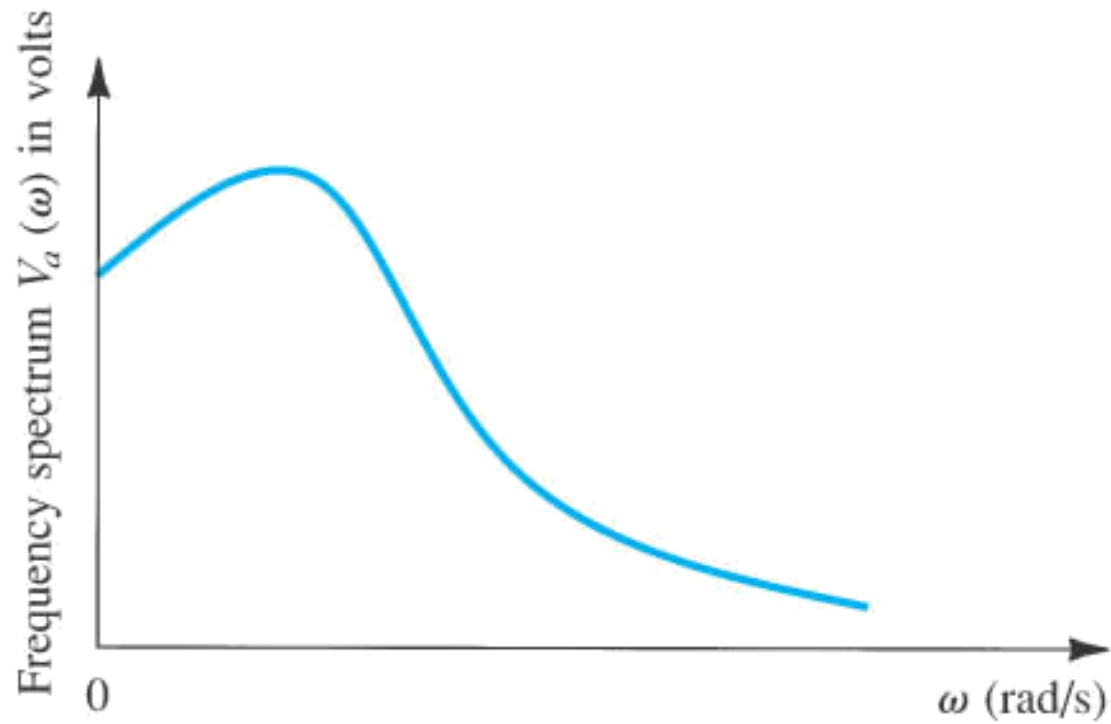


## Tempo & Frequência

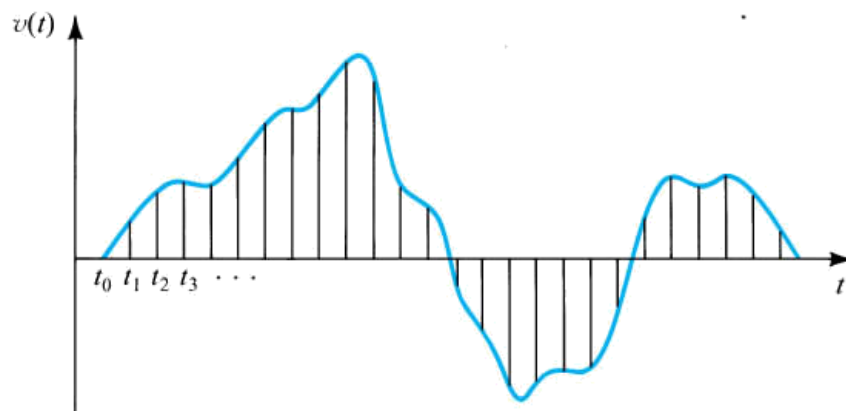
# Sinais não Periódicos



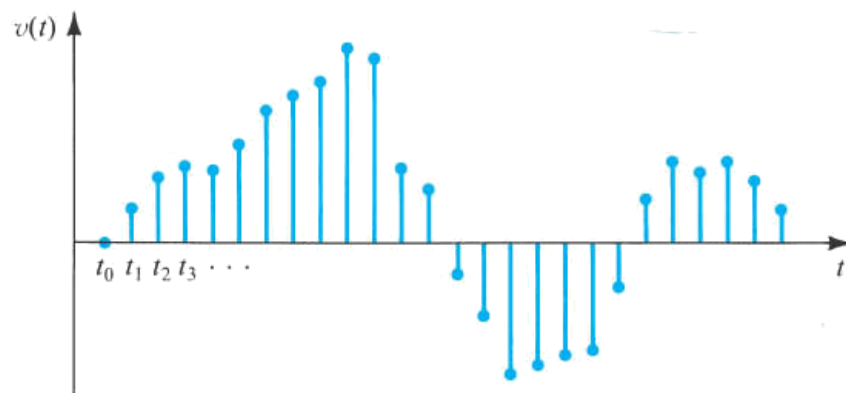
**Figure 1.2** An arbitrary voltage signal  $v_s(t)$ .



**Figure 1.6** The frequency spectrum of an arbitrary waveform such as that in Fig. 1.2.

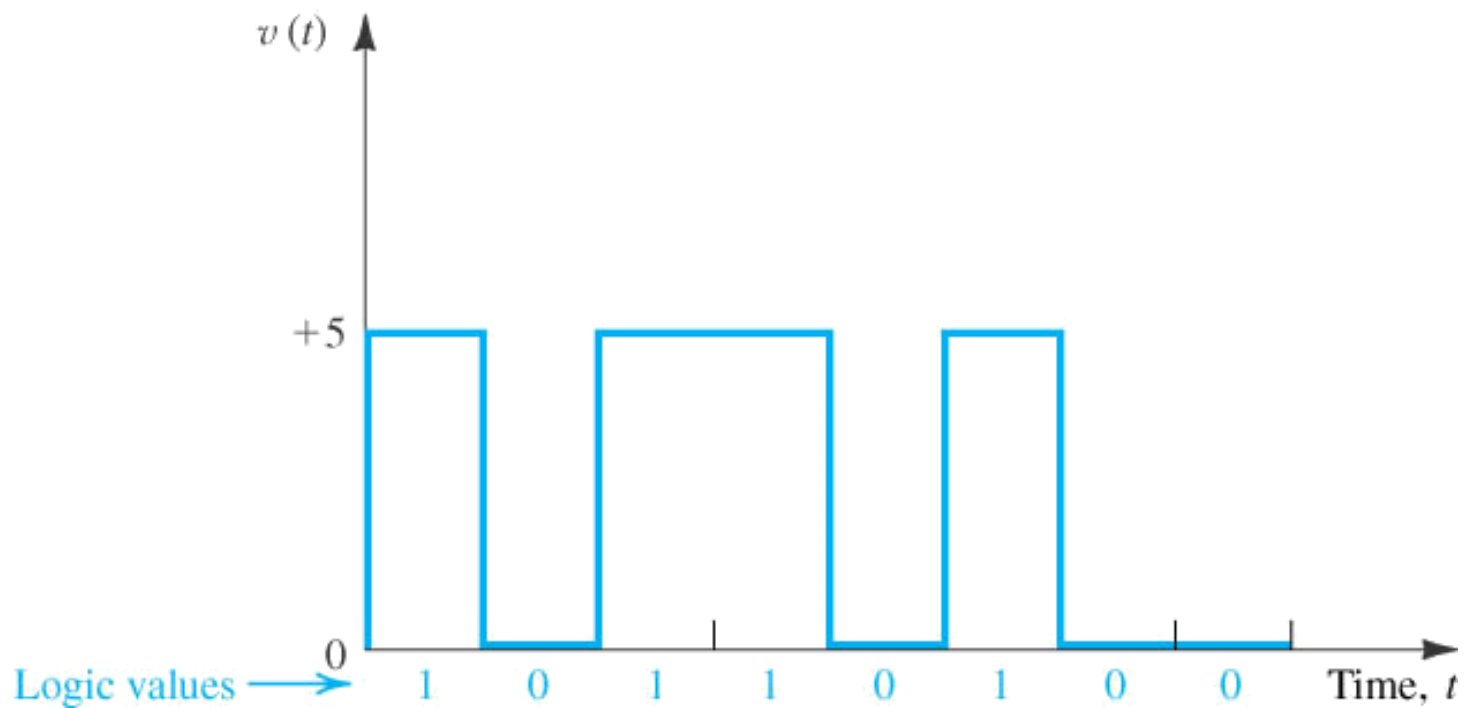


(a)

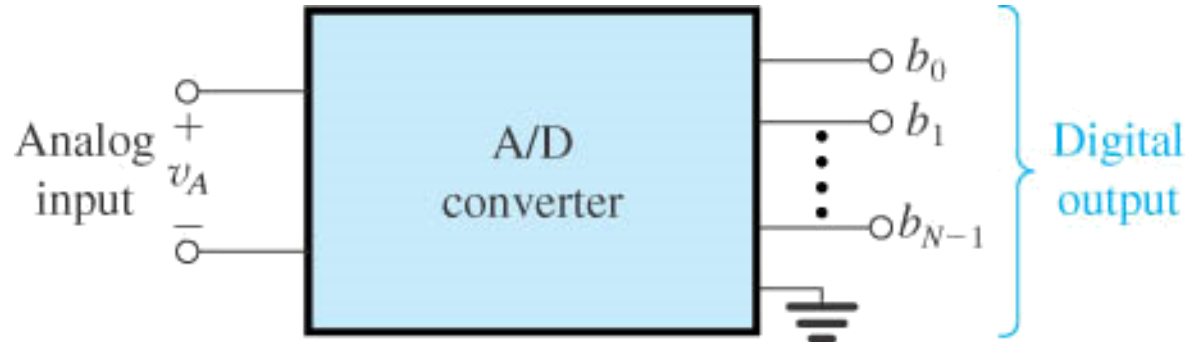


(b)

**Figure 1.7** Sampling the continuous-time analog signal in **(a)** results in the discrete-time signal in **(b)**.



**Figure 1.8** Variation of a particular binary digital signal with time.

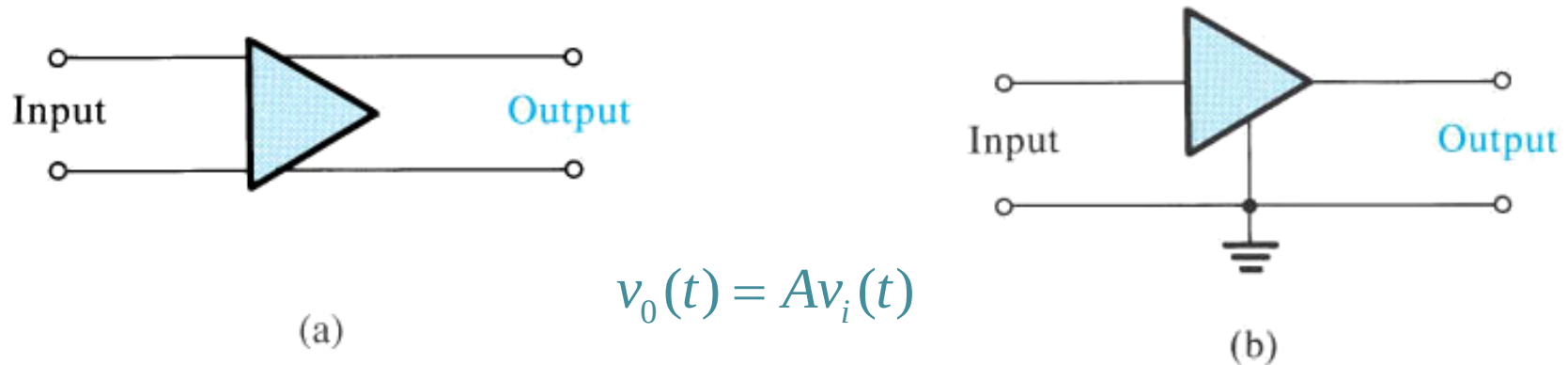


**Figure 1.9** Block-diagram representation of the analog-to-digital converter (ADC).

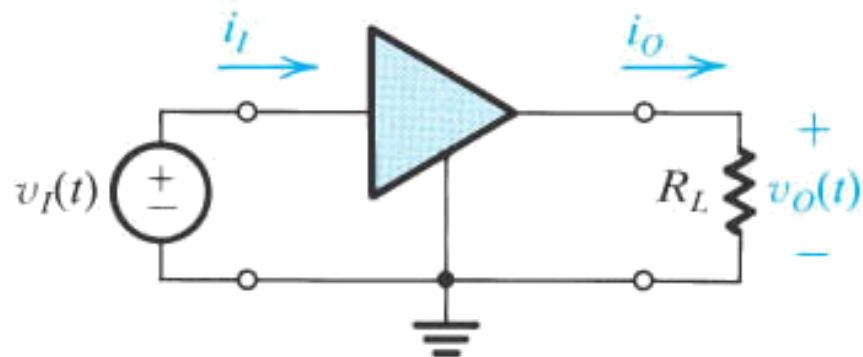


# Amplificadores de Sinais

- Amplificador: elemento básico em circuitos analógicos.
- Inversor lógico: elemento básico em circuitos digitais.
- Motivação: transdutores fornecem sinais “fracos”, na escala de  $mV$  ou  $\mu A$ , e com baixa energia.
- Amplificador linear: sinal de saída possui mesma forma do sinal de entrada, contendo as mesmas informações com um mínimo de distorção.

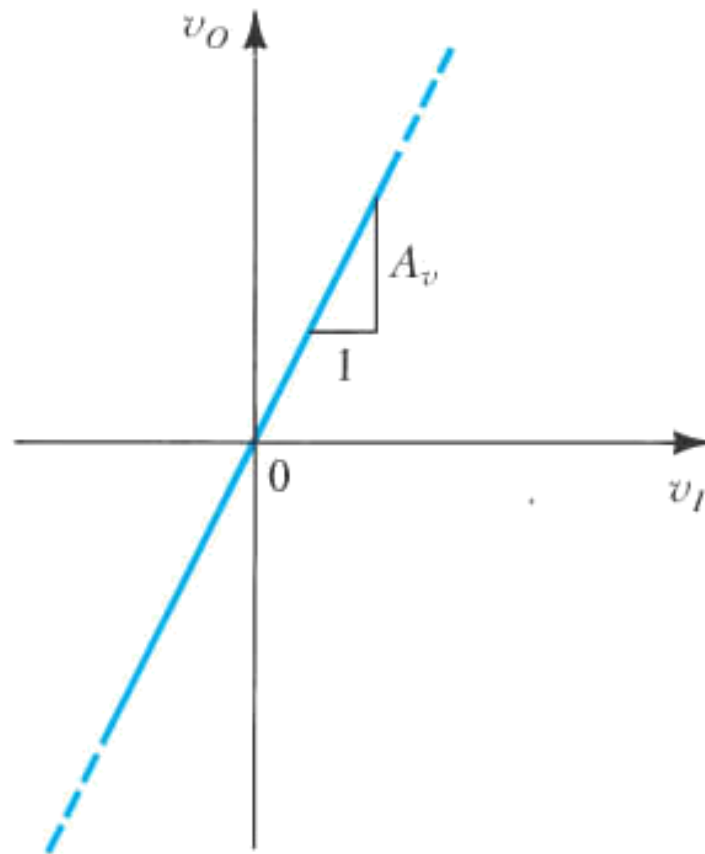


**Figure 1.10** (a) Circuit symbol for amplifier. (b) An amplifier with a common terminal (ground) between the input and output ports.



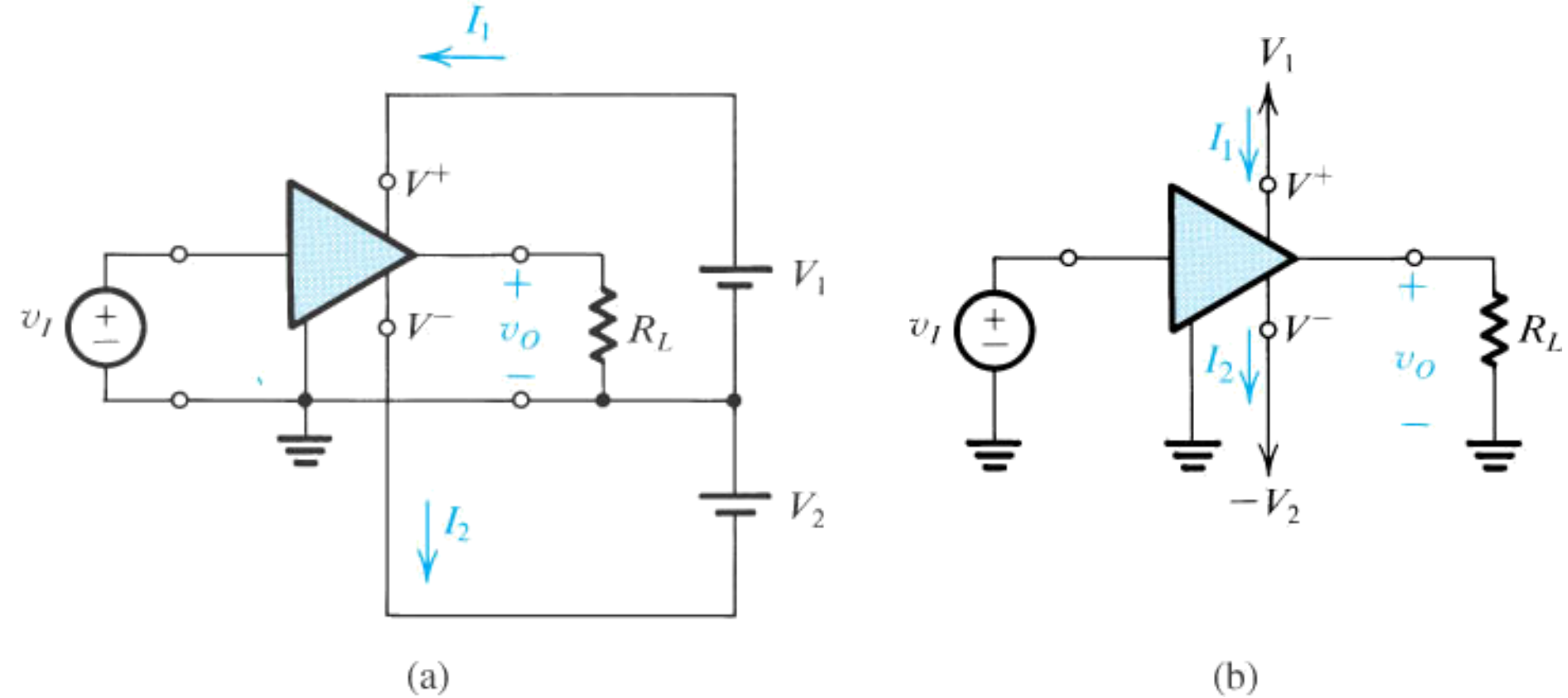
$$v_o(t) = A_v v_i(t)$$

(a)



(b)

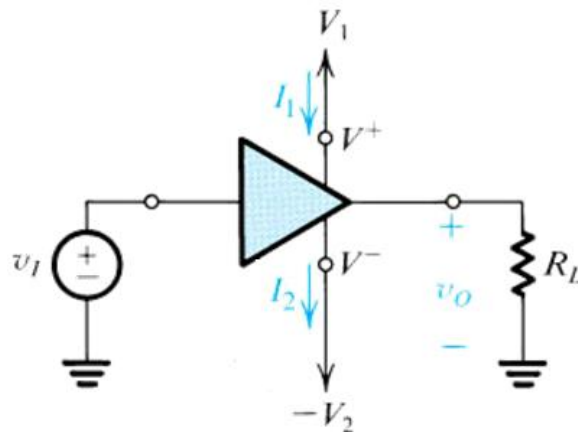
**Figure 1.11** (a) A voltage amplifier fed with a signal  $v_i(t)$  and connected to a load resistance  $R_L$ . (b) Transfer characteristic of a linear voltage amplifier with voltage gain  $A_v$ .



**Figure 1.12** An amplifier that requires two dc supplies (shown as batteries) for operation.

## EXEMPLO 1.1

Considere um amplificador operando a partir de fontes de alimentação de  $\pm 10\text{V}$ . Uma tensão senoidal de  $1\text{V}$  de pico está acoplada na entrada e uma tensão senoidal de  $9\text{V}$  de pico é fornecida na saída, a uma carga de  $1\text{k}\Omega$ . O amplificador drena uma corrente de  $9,5\text{ mA}$  de cada uma das fontes de alimentação. A corrente de entrada do amplificador é senoidal, tendo  $0,1\text{ mA}$  de pico. Calcule o ganho de tensão, o ganho de corrente, o ganho de potência, a potência drenada da fonte CC, a potência dissipada no amplificador e a eficiência.



$$A_v = \frac{9}{1} = 9\text{ V/V}$$

$$A_v = 20 \log 9 \approx 19,1\text{ dB}$$

$$\hat{I}_o = \frac{9\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 9\text{ mA}$$

$$A_i = \frac{\hat{I}_o}{\hat{I}_i} = \frac{9}{0,1} = 90\text{ A/A}$$

$$A_i = 20 \log 90 = 39,1\text{ dB}$$

$$P_L = V_{o\text{rms}} I_{o\text{rms}} = \frac{9}{\sqrt{2}} \frac{9}{\sqrt{2}} = 40,5\text{ mW}$$

$$P_I = V_{i\text{rms}} I_{i\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{0,1}{\sqrt{2}} = 0,05\text{ mW}$$

$$A_p = \frac{P_L}{P_I} = \frac{40,5}{0,05} = 810\text{ W/W}$$

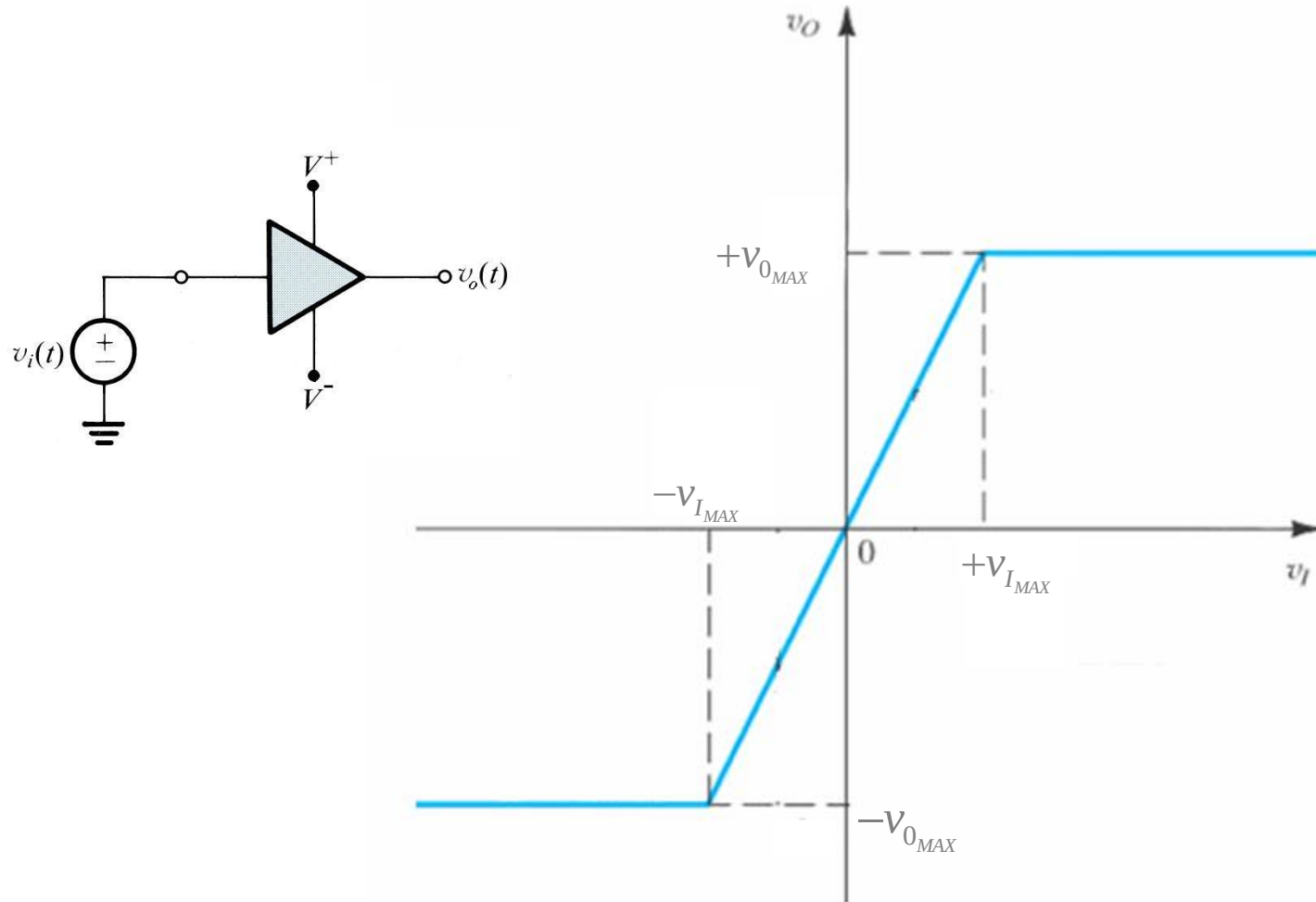
$$A_p = 10 \log 810 = 29,1\text{ dB}$$

$$P_{cc} = 10 \times 9,5 + 10 \times 9,5 = 190\text{ mW}$$

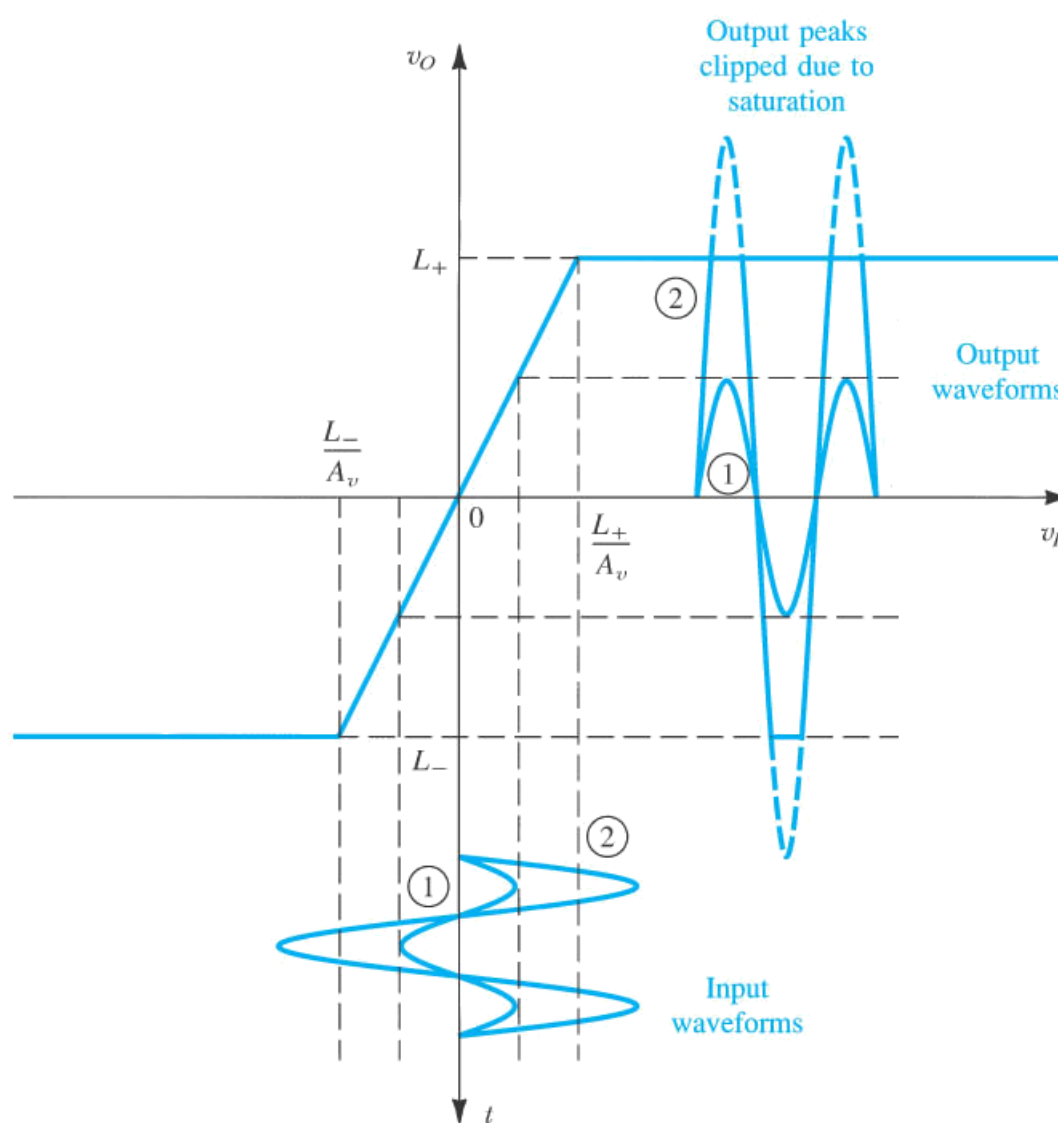
$$\begin{aligned} P_{\text{dissipada}} &= P_{cc} + P_I - P_L \\ &= 190 + 0,05 - 40,5 = 149,6\text{ mW} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_{cc}} \times 100 = 21,3\%$$

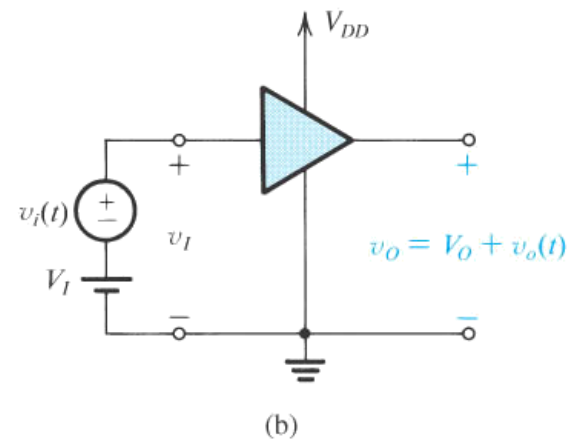
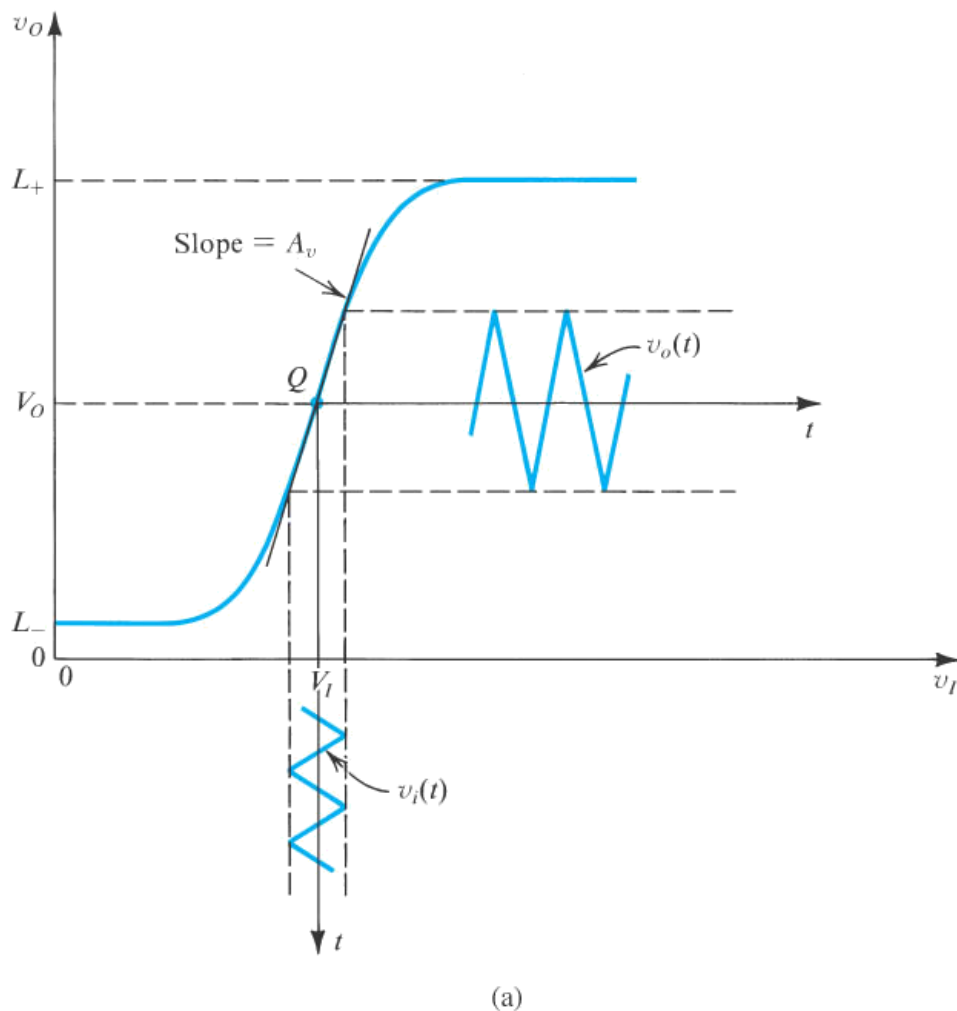
## Característica Saída x Entrada



**Figure 1.13a** An amplifier transfer characteristic that is linear except for output saturation.

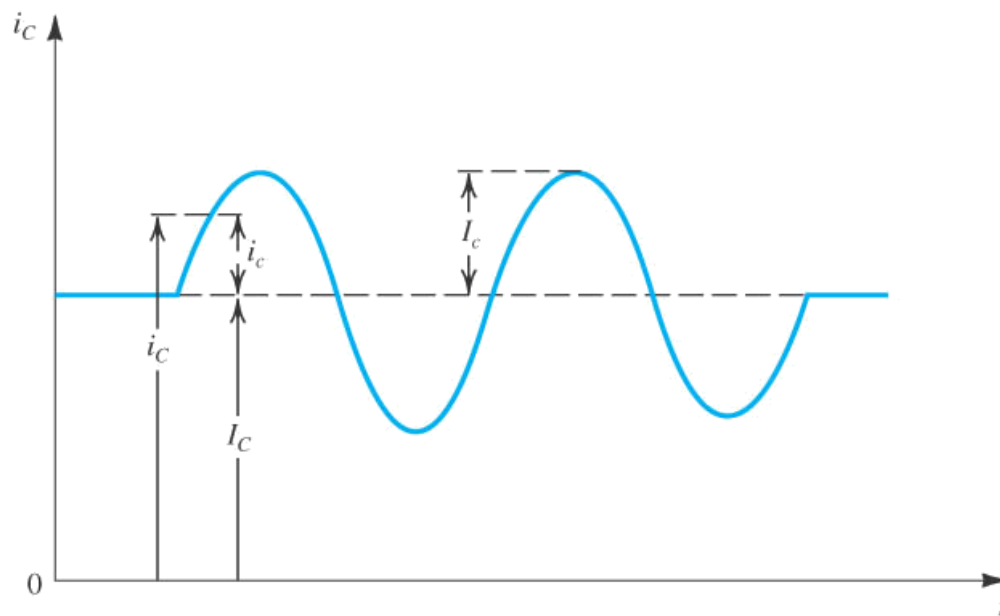


**Figure 1.13b** An amplifier transfer characteristic that is linear except for output saturation.



**Figure 1.14** (a) An amplifier transfer characteristic that shows considerable nonlinearity. (b) To obtain linear operation the amplifier is biased as shown, and the signal amplitude is kept small. Observe that this amplifier is operated from a single power supply,  $V_{DD}$ .

# Convenção de Notação

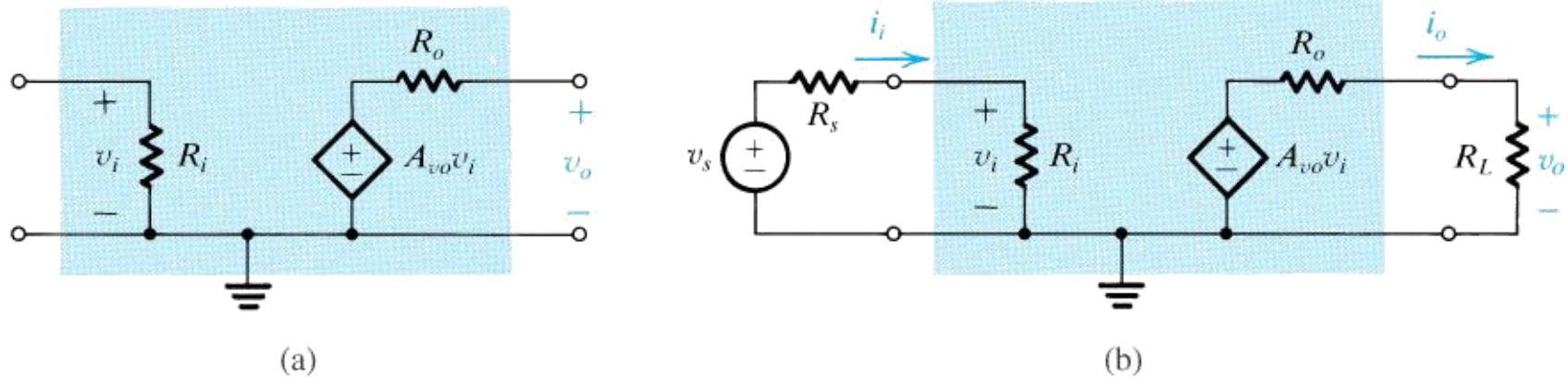


**Figure 1.16** Symbol convention employed throughout the book.



# Modelos de Circuitos para Amplificadores

## Amplificador de Tensão



Ganho de Tensão »  $A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = A_{vo}$

Impedância de Entrada »  $R_i$

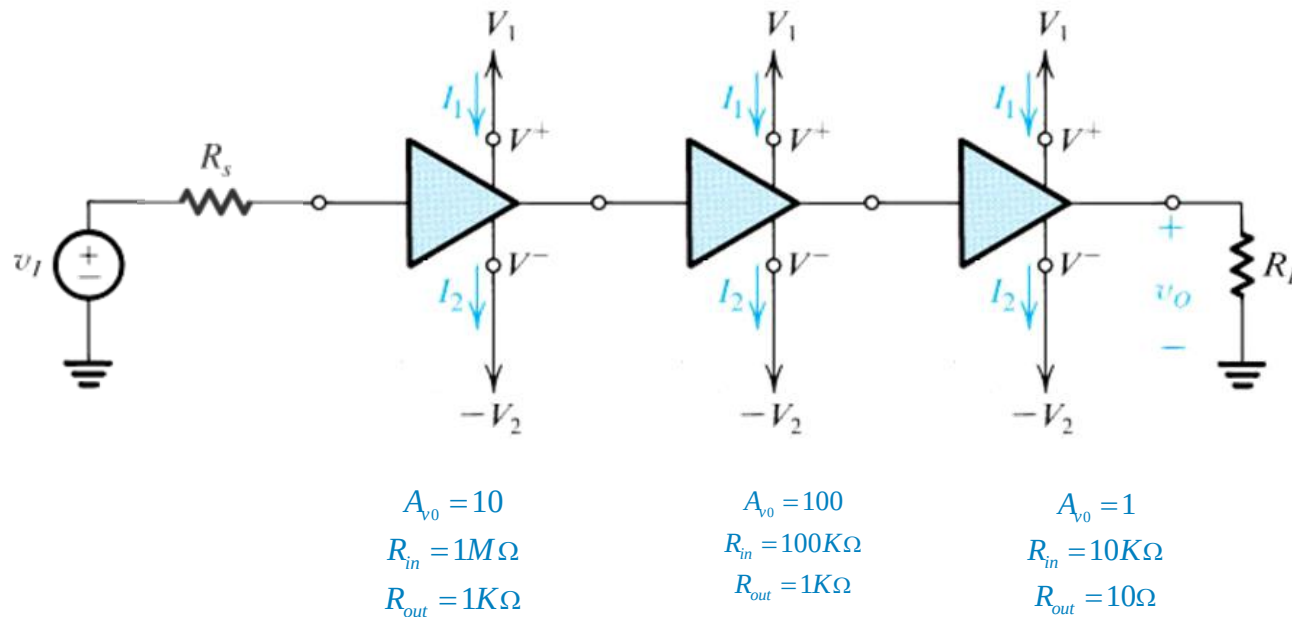
Impedância de Saída »  $R_o$

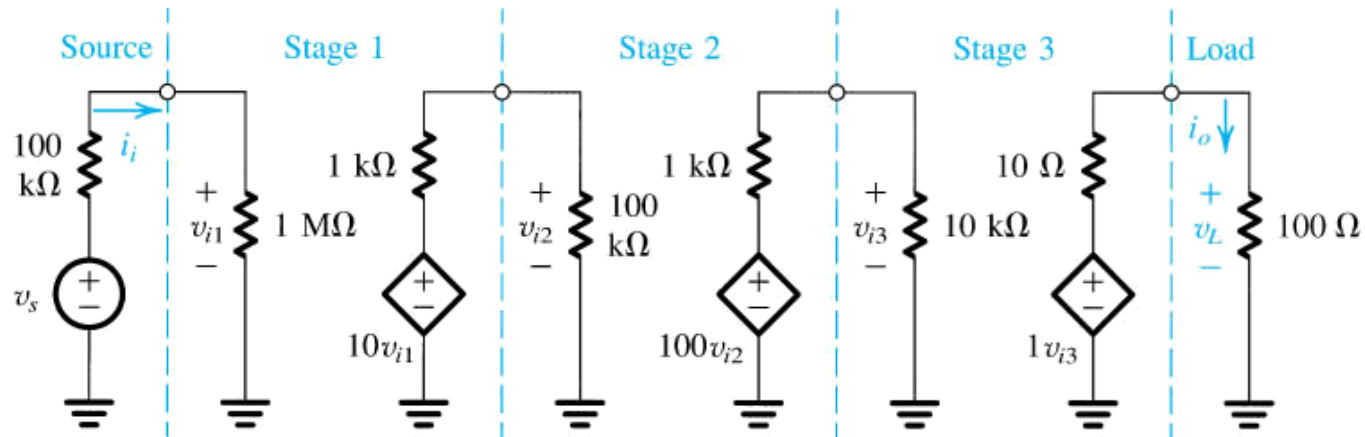
$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{vo}$$

**Figure 1.17** (a) Circuit model for the voltage amplifier. (b) The voltage amplifier with input signal source and load.

### EXEMPLO 1.3

Um amplificador é composto de três estágios em cascata. O amplificador é excitado por uma fonte de sinal com uma resistência de saída de  $100\text{K}\Omega$ . A carga na saída do amplificador é de  $100\Omega$ . Determine o ganho de tensão total, o ganho de corrente e o ganho de potência.

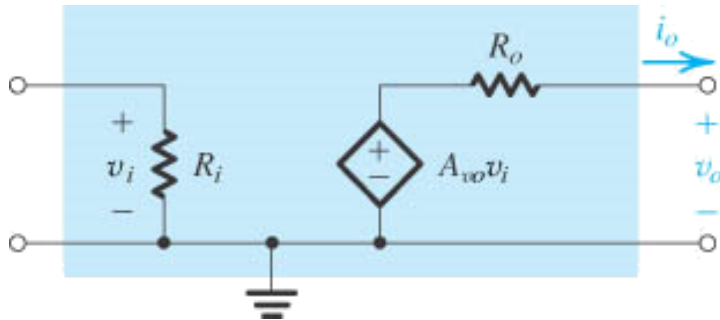




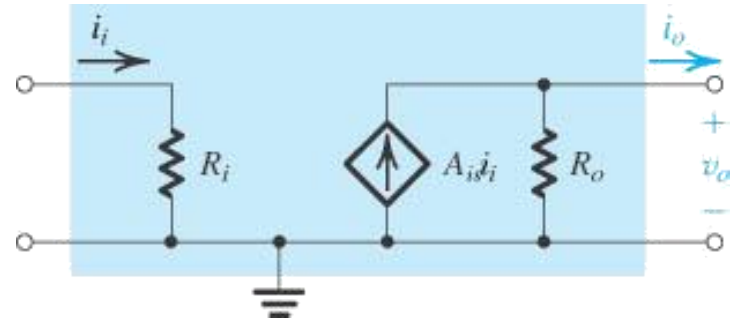
**Figure 1.18** Three-stage amplifier for Example 1.3.

# Modelos de Circuitos para Amplificadores

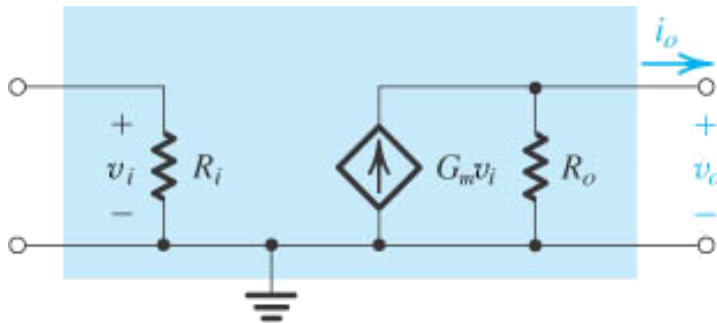
Amplificador de Tensão



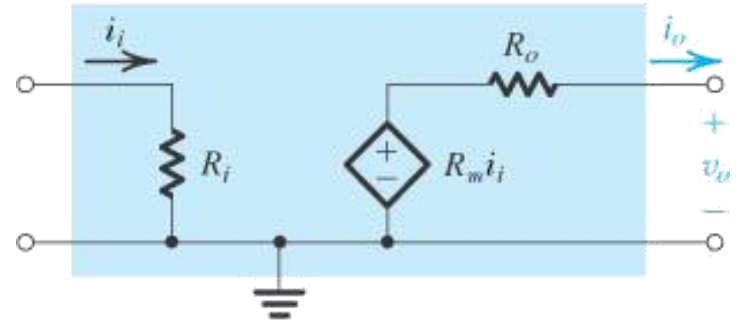
Amplificador de Corrente



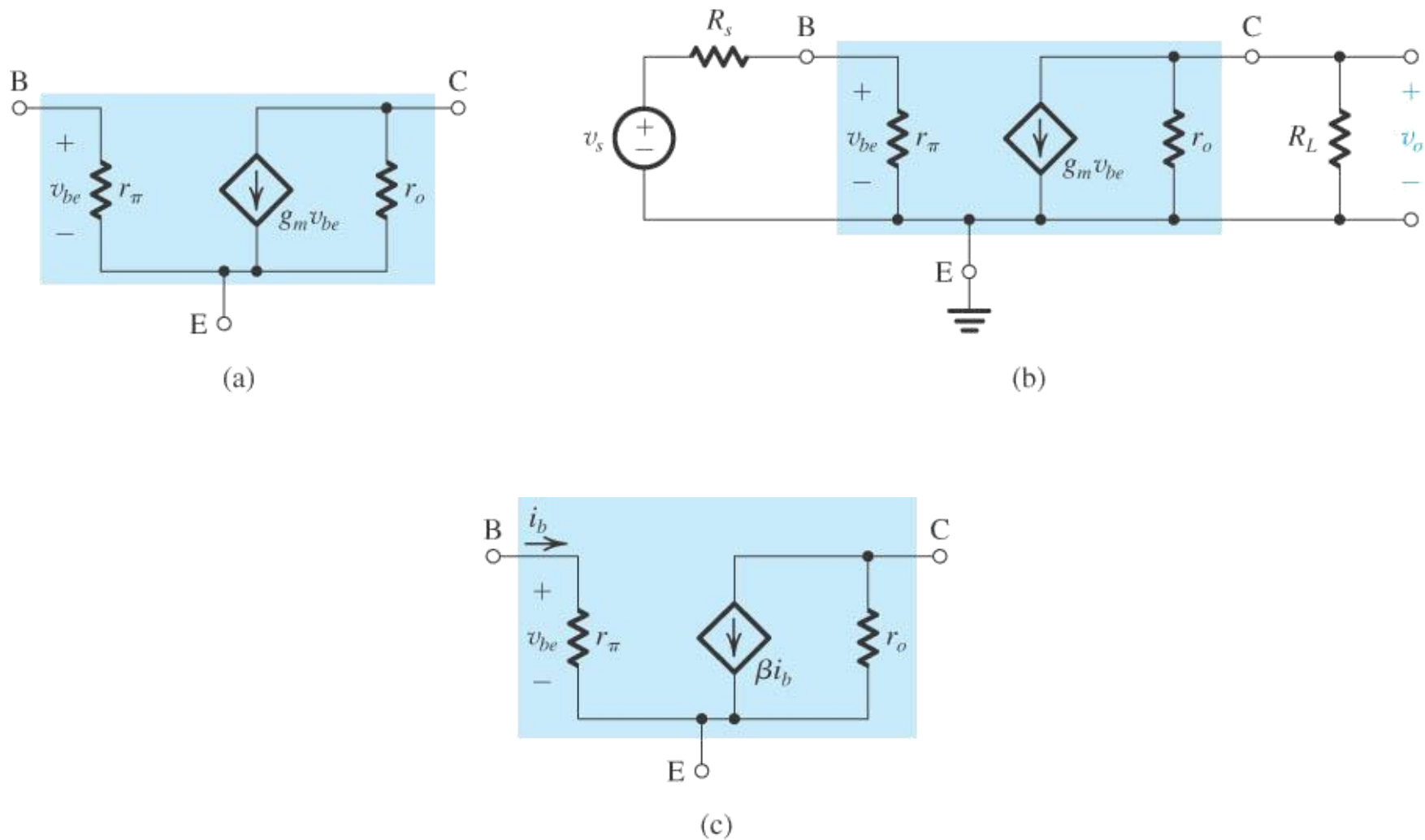
Amplificador de Transcondutância



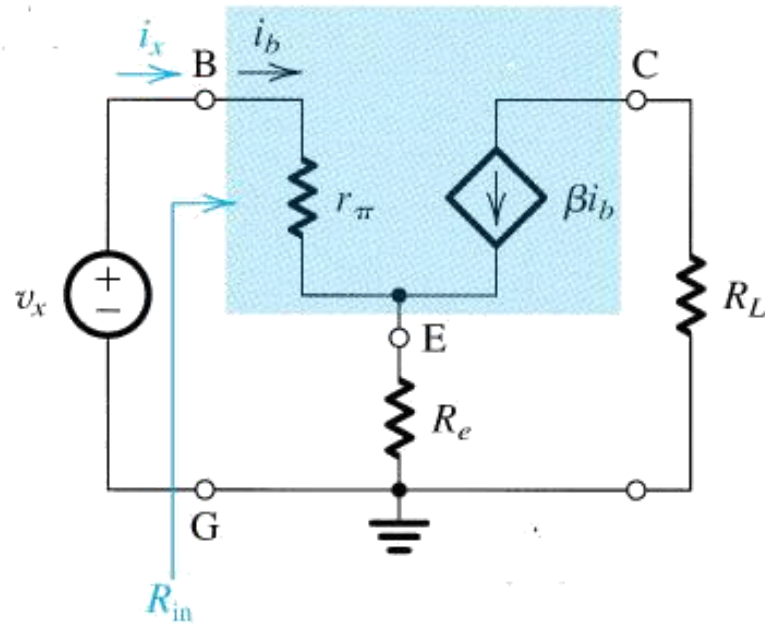
Amplificador de Transresistância



**Table 1.1** The Four Amplifier Types



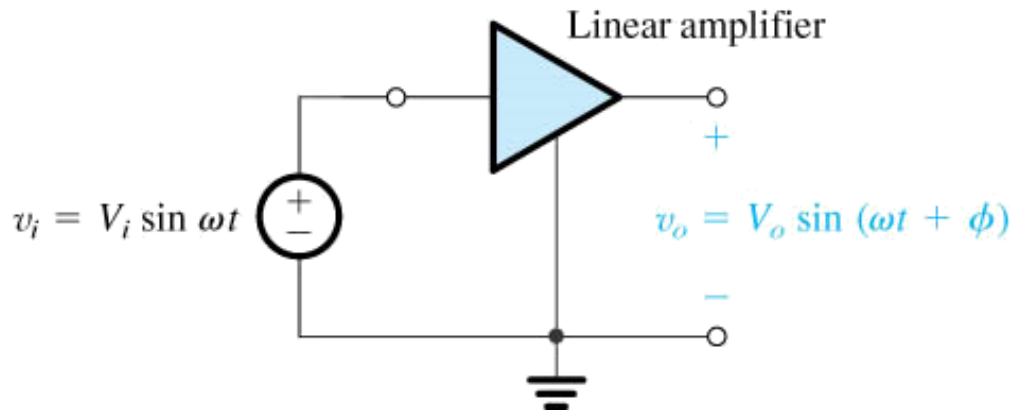
**Figure 1.19** (a) Small-signal circuit model for a bipolar junction transistor (BJT). (b) The BJT connected as an amplifier with the emitter as a common terminal between input and output (called a common-emitter amplifier). (c) An alternative small-signal circuit model for the BJT.



**Figure E1.20**

# Resposta em Frequência dos Amplificadores

Pode-se caracterizar o desempenho de um amplificador em termos de sua resposta a entradas senoidais de diferentes frequências.



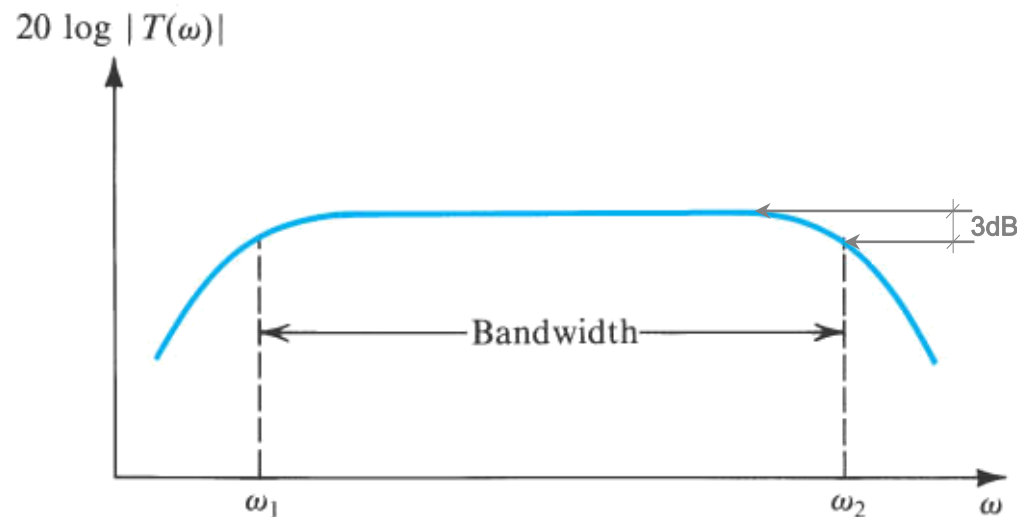
$V_o / V_i$  » magnitude do ganho do amplificador  
na frequência de teste  $\omega$

$\phi$  » fase do ganho do amplificador  
na frequência de teste  $\omega$

**Figure 1.20** Measuring the frequency response of a linear amplifier. At the test frequency  $\omega$ , the amplifier gain is characterized by its magnitude ( $V_o/V_i$ ) and phase  $\phi$ .

# Largura de Banda

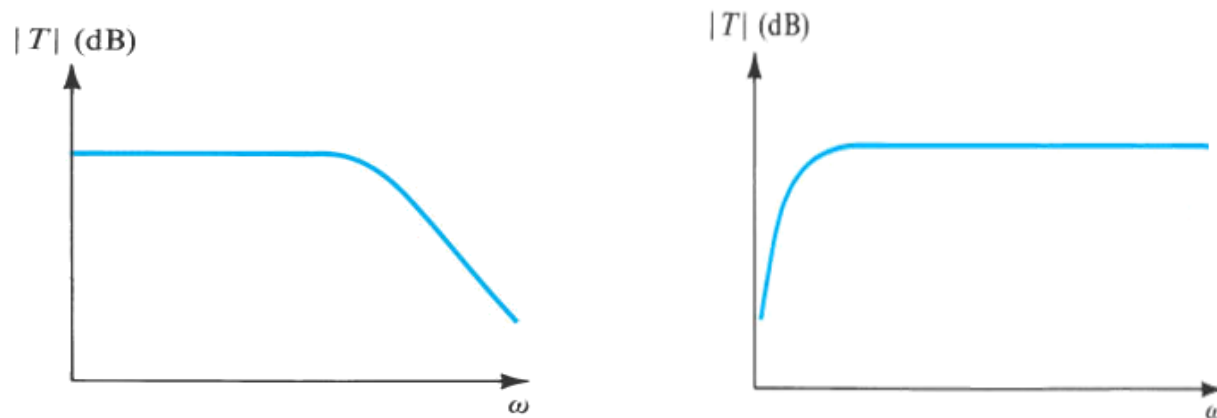
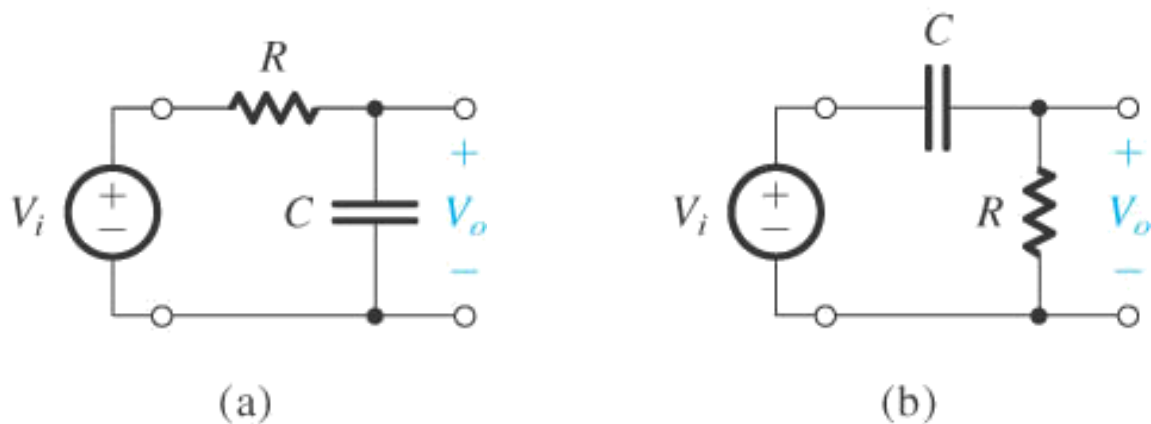
- Largura de banda (bandwidth): faixa de valores na qual o ganho do amplificador é praticamente constante, limitado a um decréscimo de 3dB.
- Deve-se projetar o amplificador de modo que sua largura de banda coincida com o espectro dos sinais que deve amplificar, caso contrário, diferentes componentes do sinal de entrada serão amplificados com ganhos distintos.



**Figure 1.21** Typical magnitude response of an amplifier.  $|T(\nu)|$  is the magnitude of the amplifier transfer function—that is, the ratio of the output  $V_o(\nu)$  to the input  $V_i(\nu)$ .

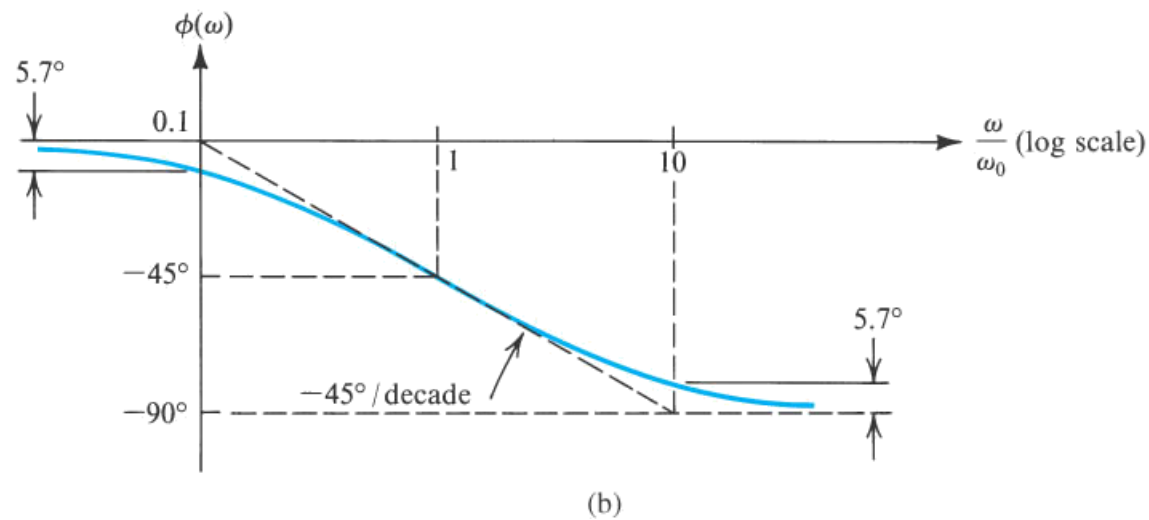
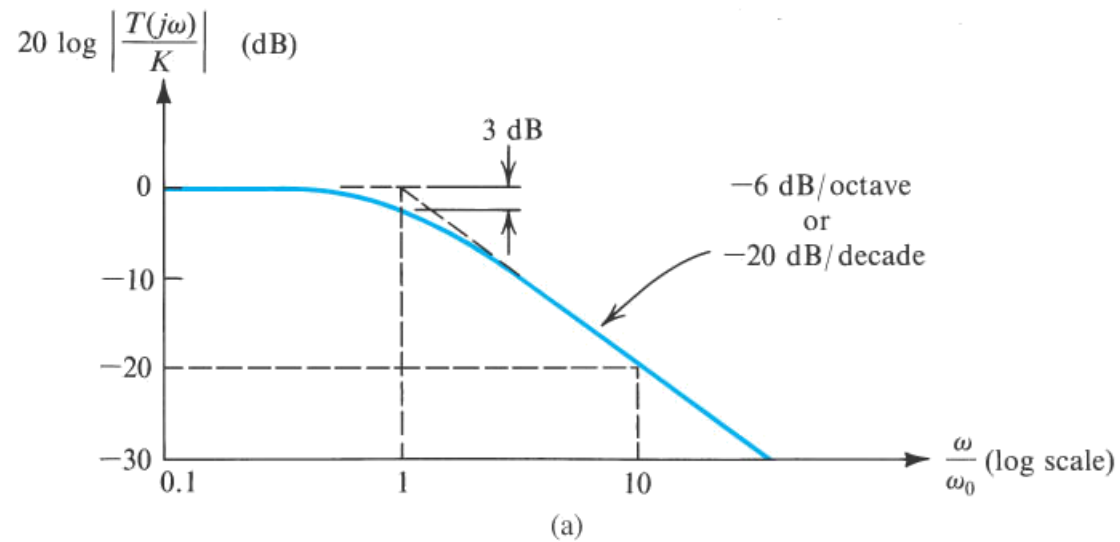


# Circuitos Passa Baixas e Passa Altas

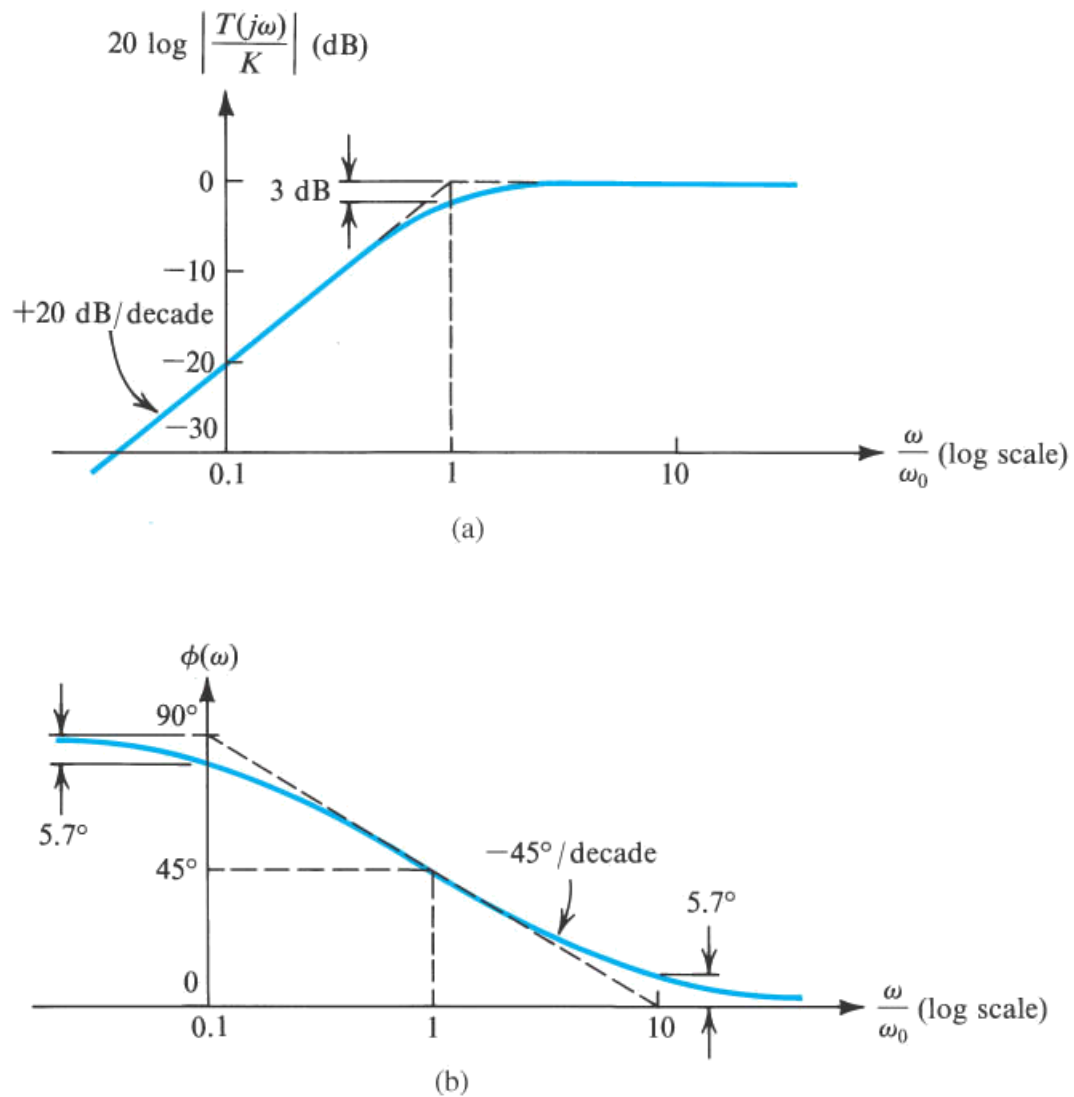


**Figure 1.22** Two examples of STC networks: **(a)** a low-pass network and **(b)** a high-pass network.

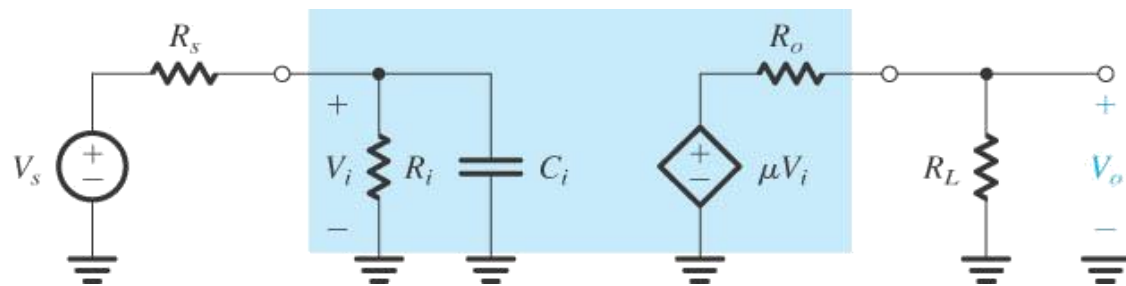
# Diagrama de Bode



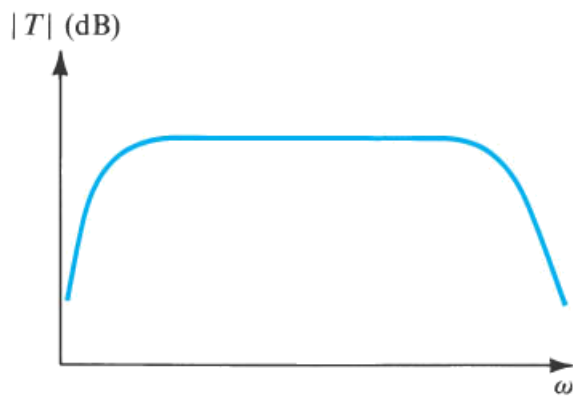
**Figure 1.23** (a) Magnitude and (b) phase response of STC networks of the low-pass type.



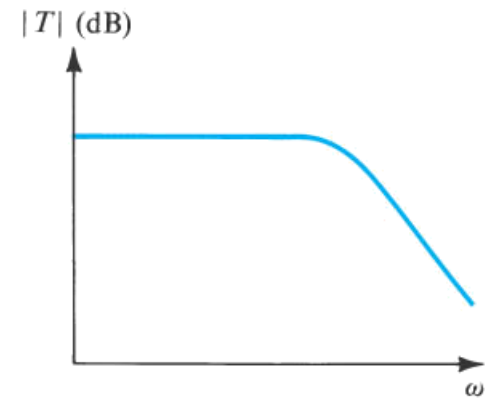
**Figure 1.24** (a) Magnitude and (b) phase response of STC networks of the high-pass type.



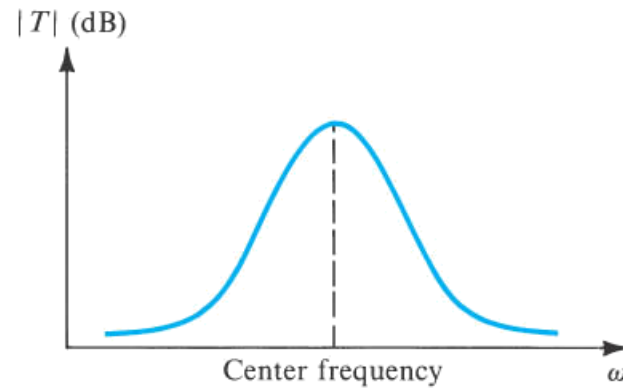
**Figure 1.25** Circuit for Example 1.5.



(a)

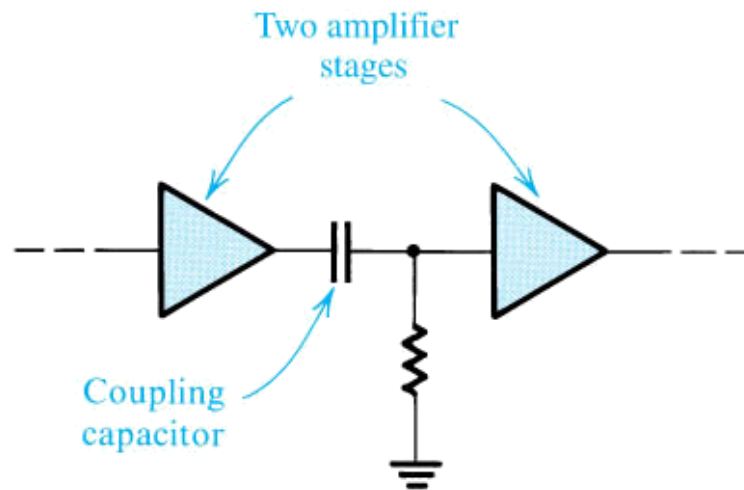


(b)

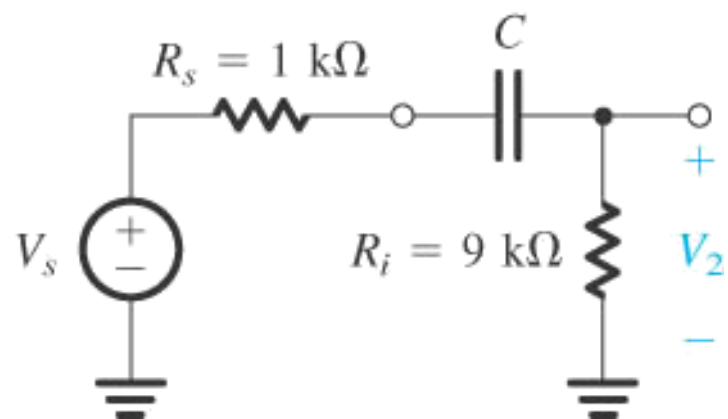


(c)

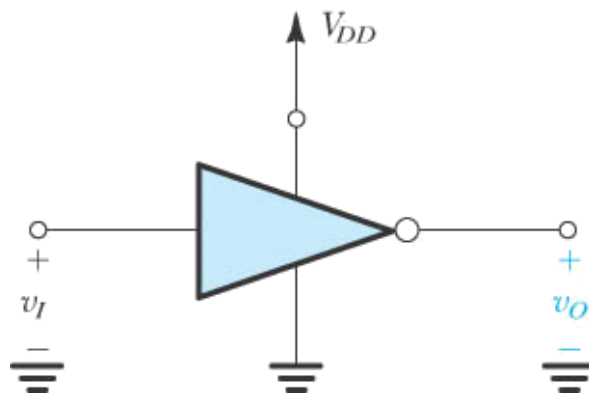
**Figure 1.26** Frequency response for **(a)** a capacitively coupled amplifier, **(b)** a direct-coupled amplifier, and **(c)** a tuned or bandpass amplifier.



**Figure 1.27** Use of a capacitor to couple amplifier stages.



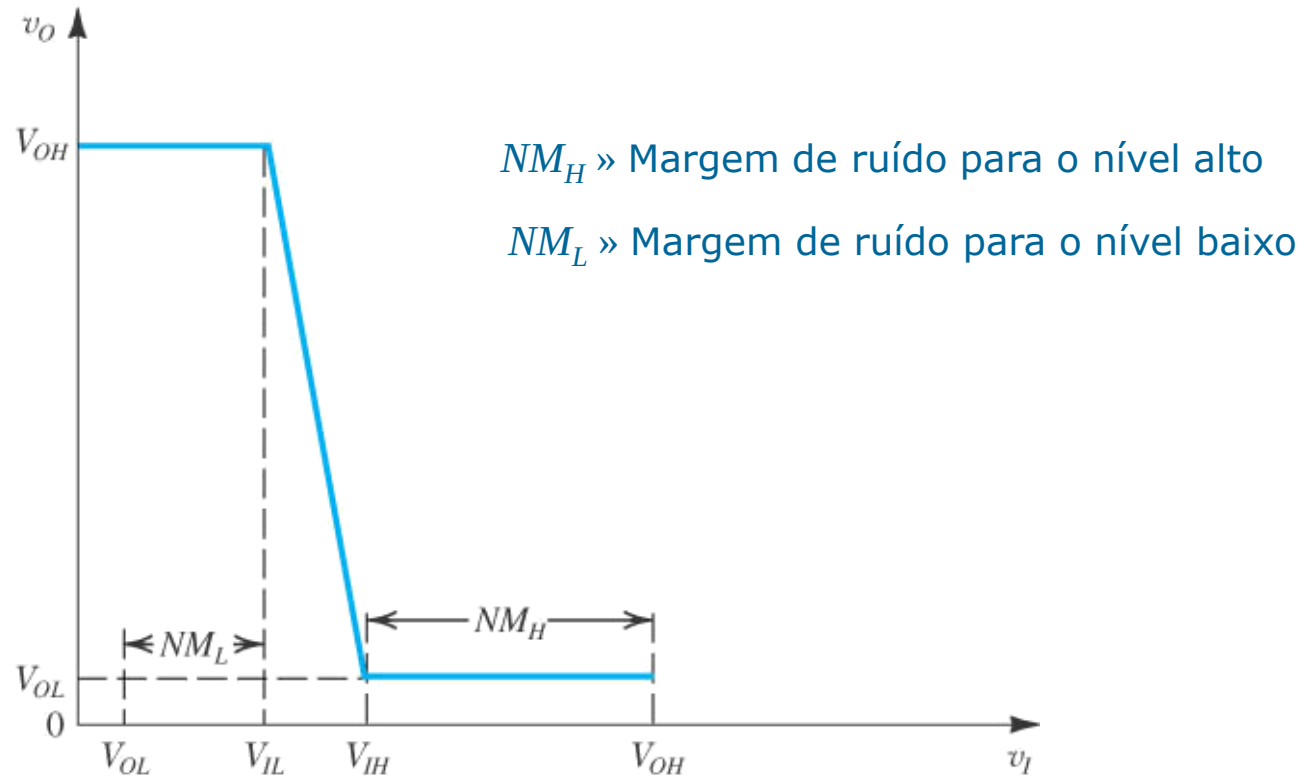
**Figure E1.23**



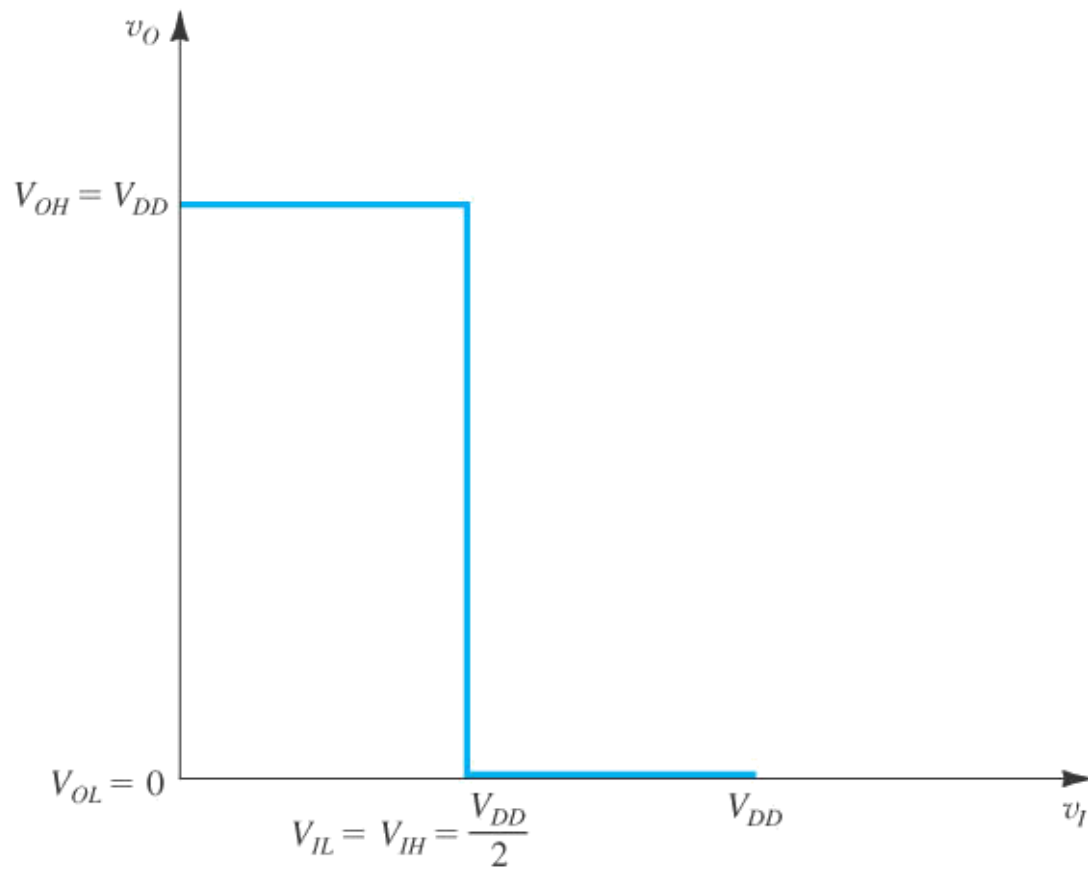
**Figure 1.28** A logic inverter operating from a dc supply  $V_{DD}$ .



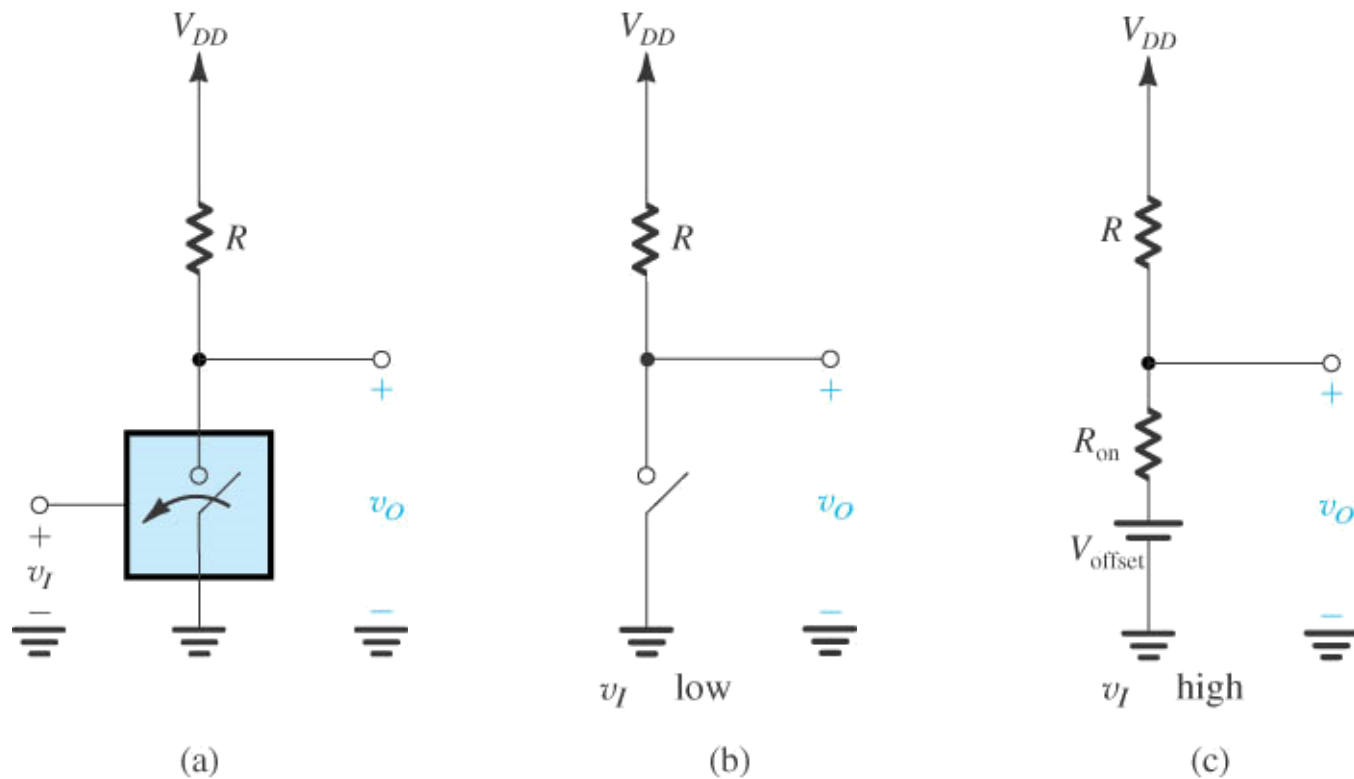
# Inversor Lógico Digital



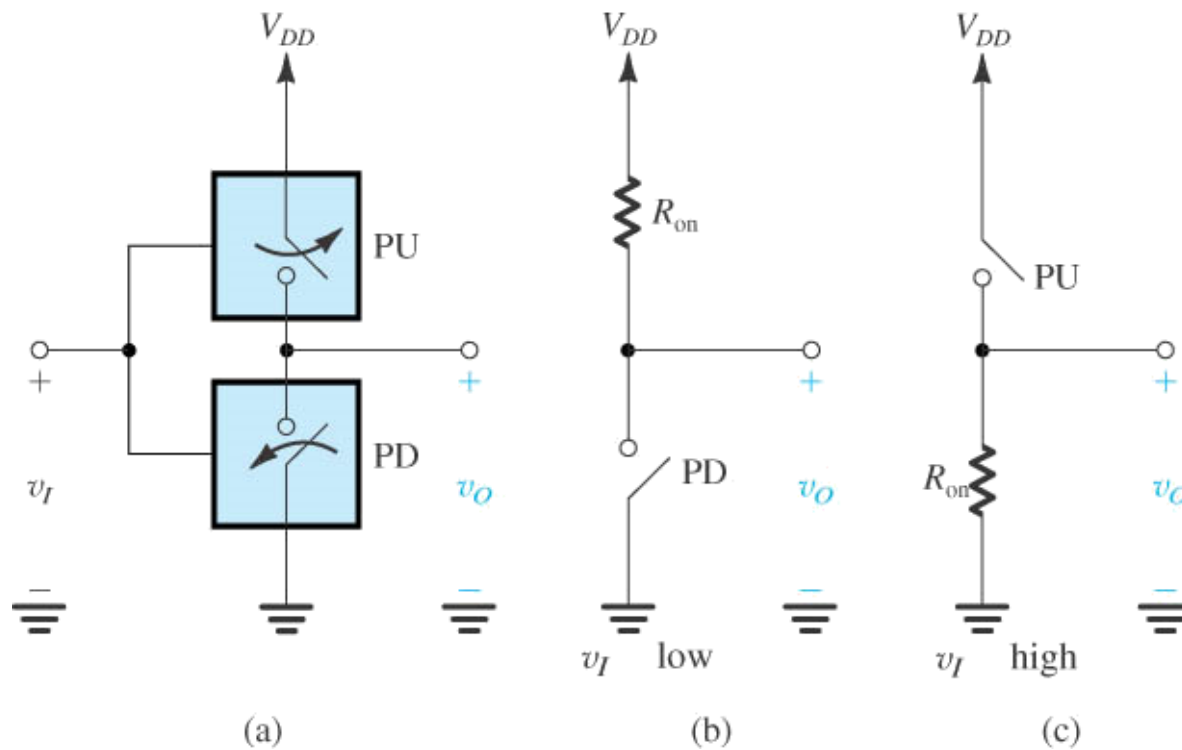
**Figure 1.29** Voltage transfer characteristic of an inverter. The VTC is approximated by three straightline segments. Note the four parameters of the VTC ( $V_{OH}$ ,  $V_{OL}$ ,  $V_{IL}$ , and  $V_{IH}$ ) and their use in determining the noise margins ( $NM_H$  and  $NM_L$ ).



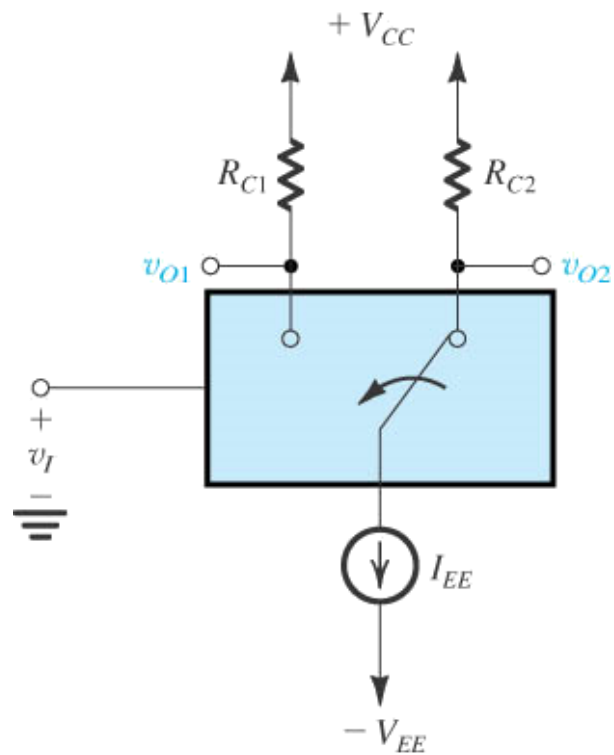
**Figure 1.30** The VTC of an ideal inverter.



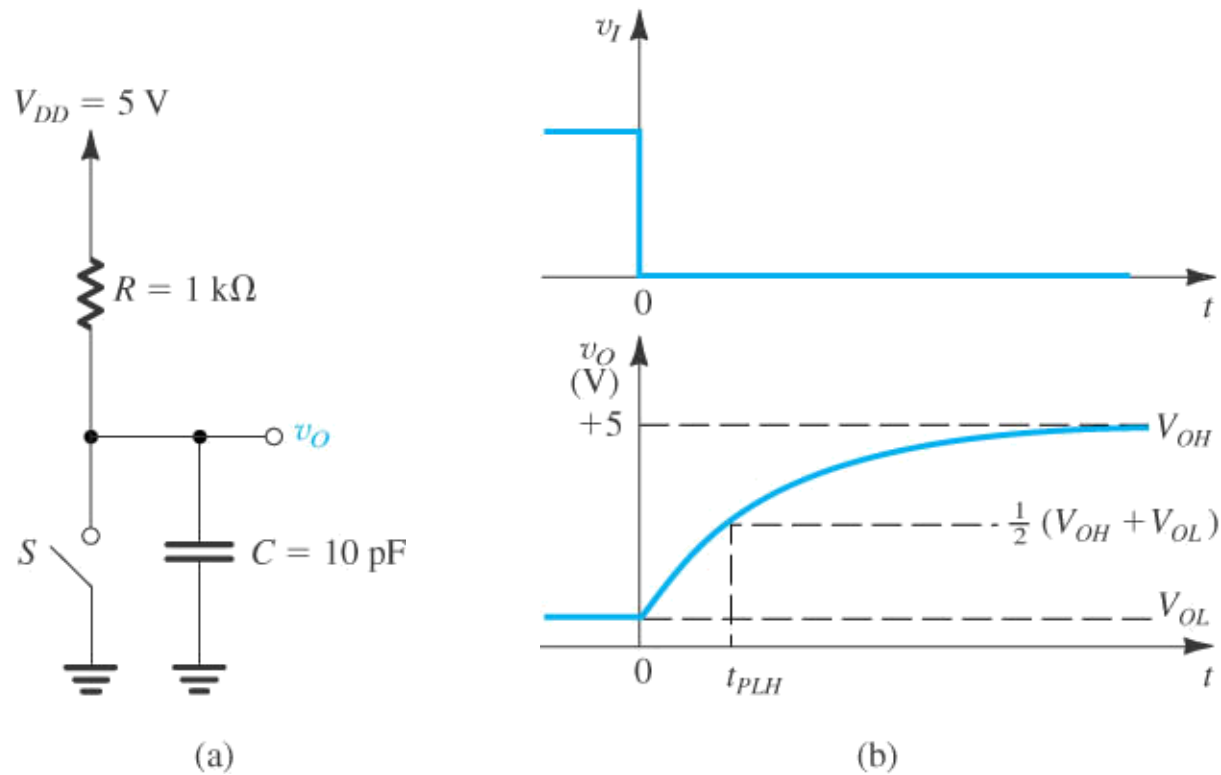
**Figure 1.31** (a) The simplest implementation of a logic inverter using a voltage-controlled switch; (b) equivalent circuit when  $v_I$  is low; and (c) equivalent circuit when  $v_I$  is high. Note that the switch is assumed to close when  $v_I$  is high.



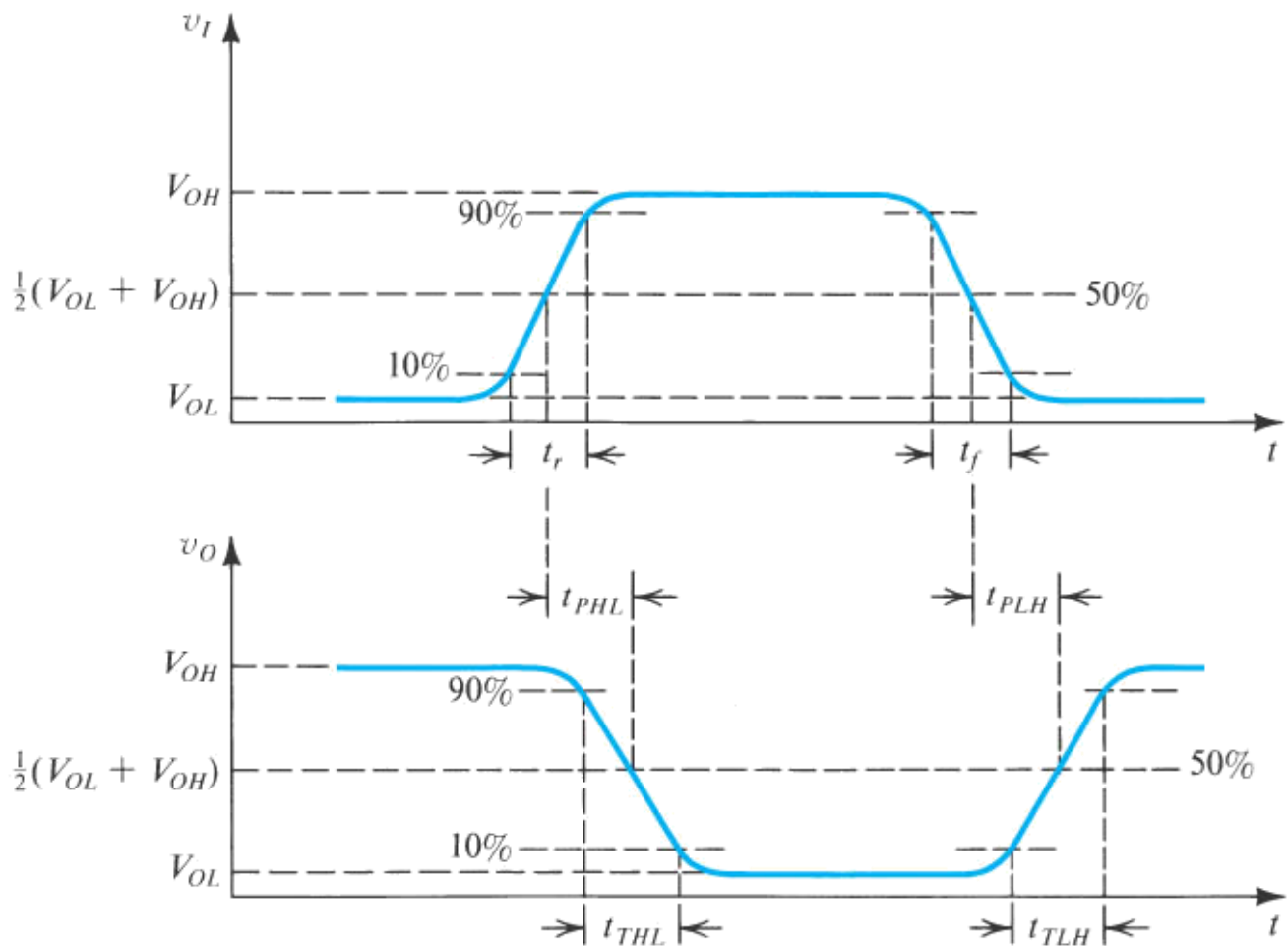
**Figure 1.32** A more elaborate implementation of the logic inverter utilizing two complementary switches. This is the basis of the CMOS inverter studied in Section 4.10.



**Figure 1.33** Another inverter implementation utilizing a double-throw switch to steer the constant current  $I_{EE}$  to  $R_{C1}$  (when  $v_I$  is high) or  $R_{C2}$  (when  $v_I$  is low). This is the basis of the emitter-coupled logic (ECL) studied in Chapters 7 and 11.

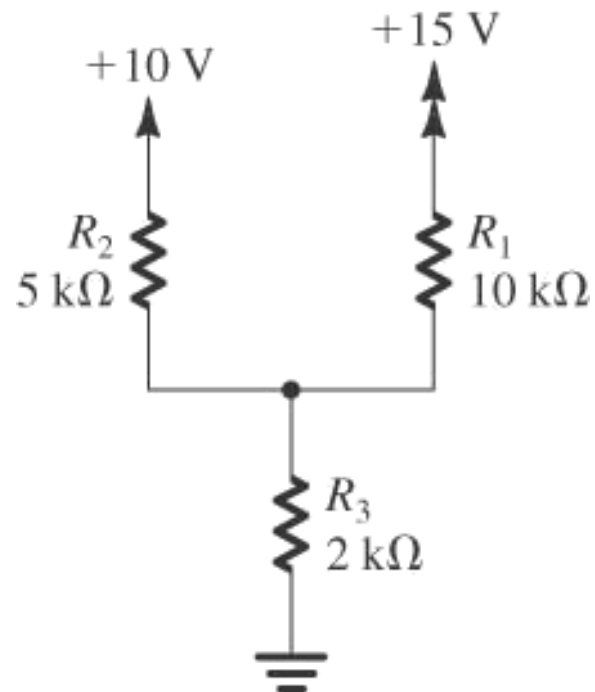


**Figure 1.34** Example 1.6: **(a)** The inverter circuit after the switch opens (i.e., for  $t \geq 0+$ ). **(b)** Waveforms of  $v_I$  and  $v_O$ . Observe that the switch is assumed to operate instantaneously.  $v_O$  rises exponentially, starting at  $V_{OL}$  and heading toward  $V_{OH}$ .



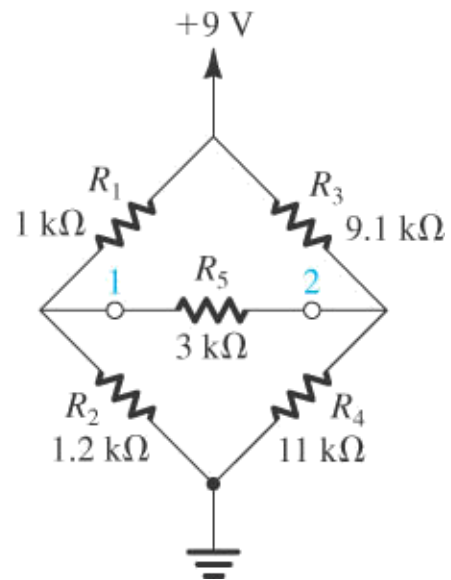
**Figure 1.35** Definitions of propagation delays and transition times of the logic inverter.

# Exercícios Propostos

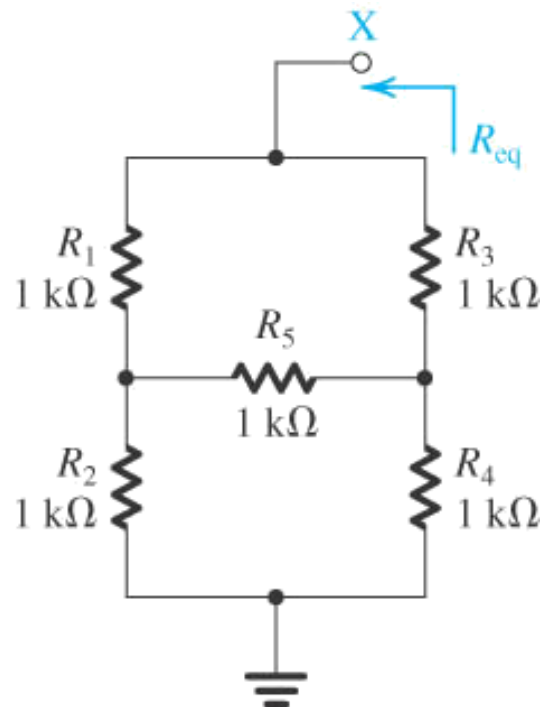


**Figure P1.16**

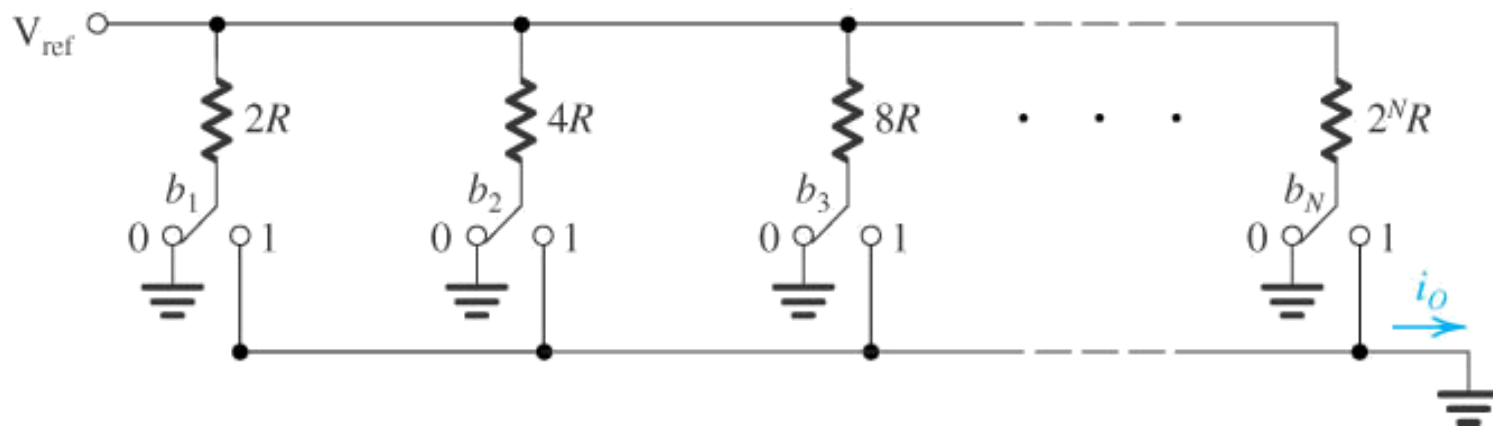




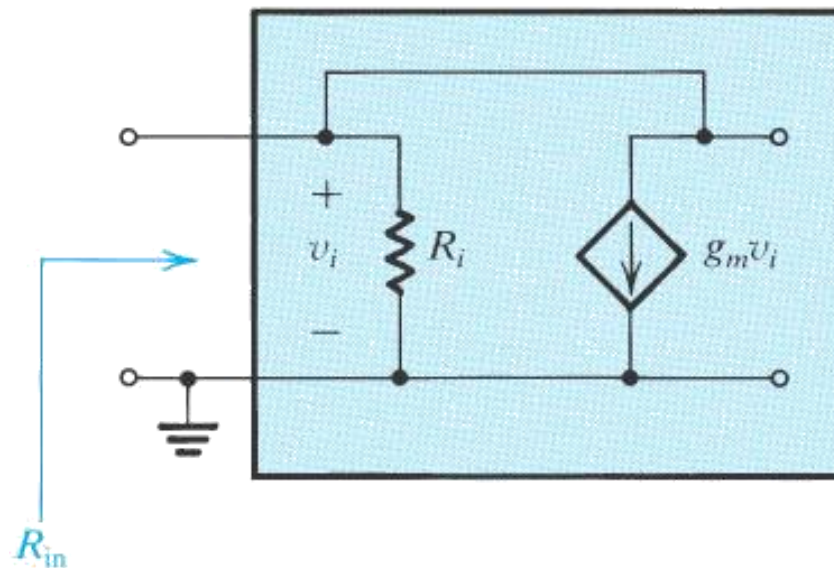
**Figure P1.17**



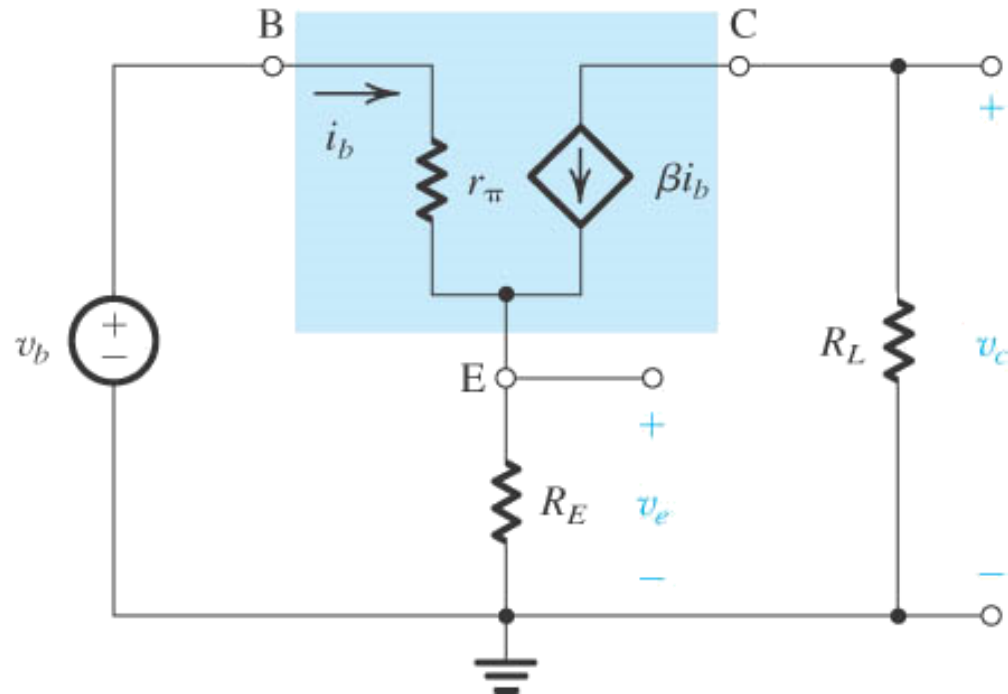
**Figure P1.18**



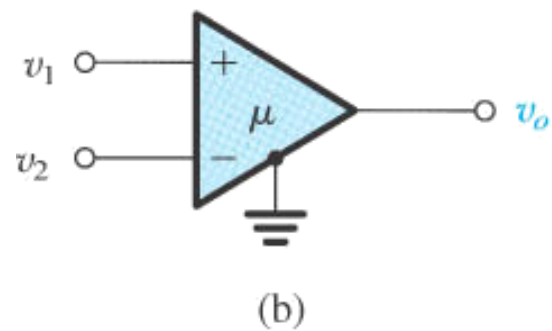
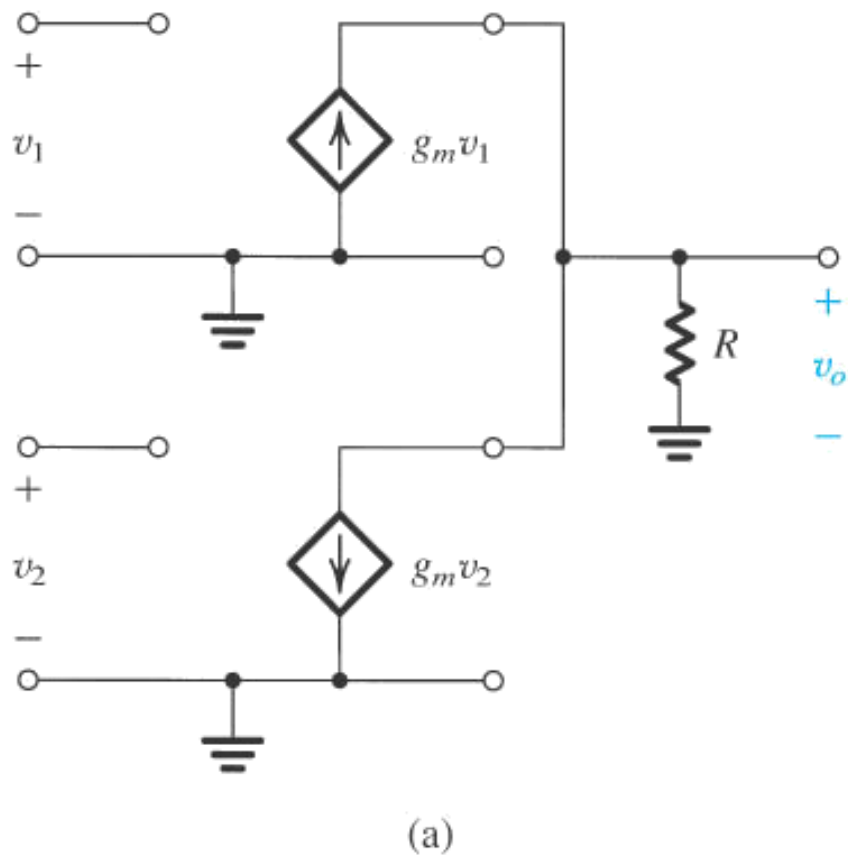
**Figure P1.37**



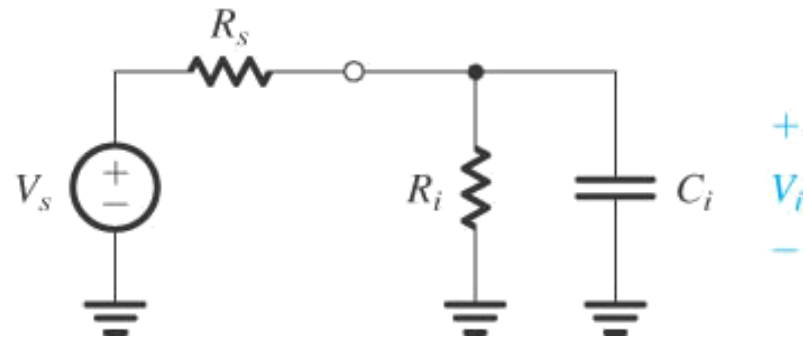
**Figure P1.58**



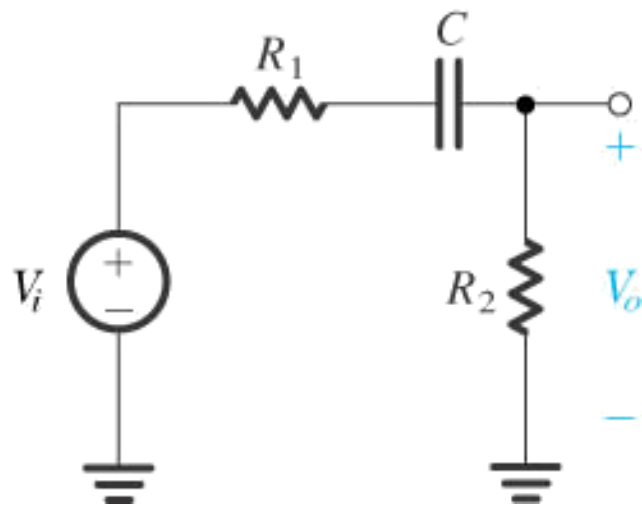
**Figure P1.63**



**Figure P1.65**

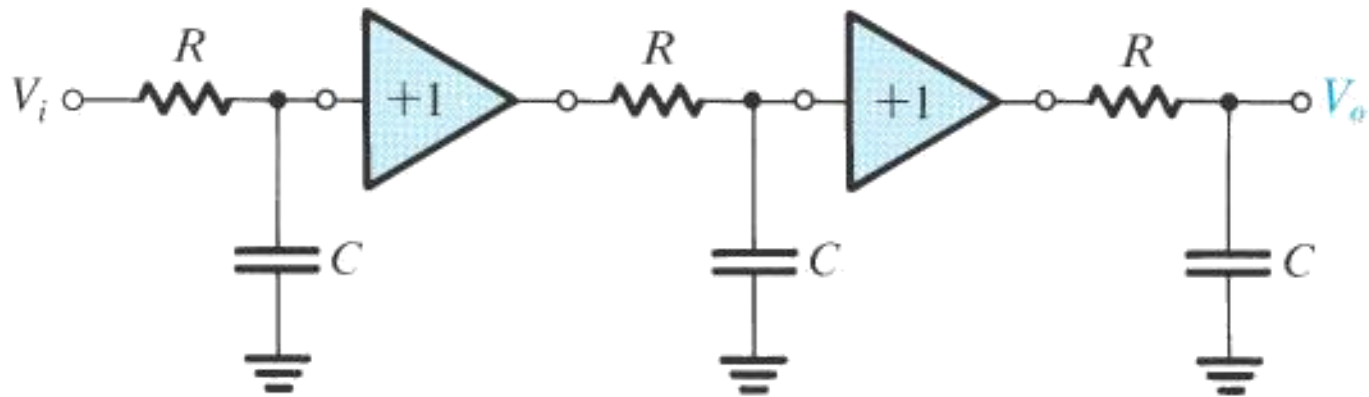


**Figure P1.67**

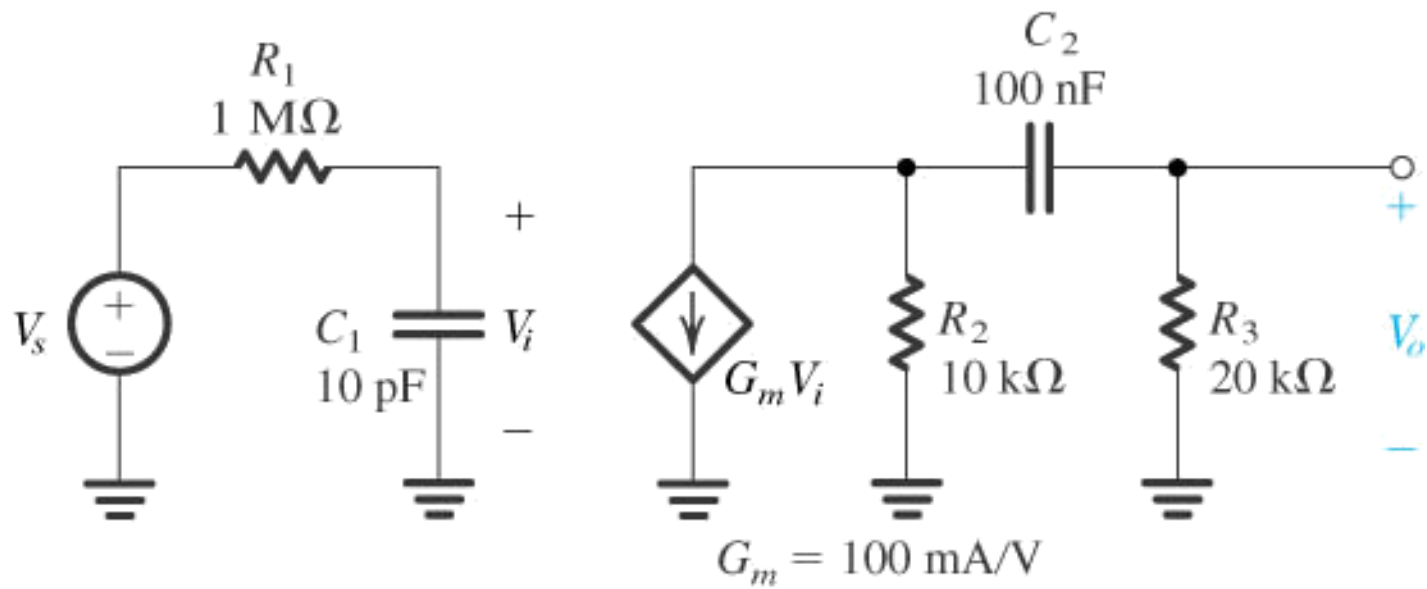


**Figure P1.68**

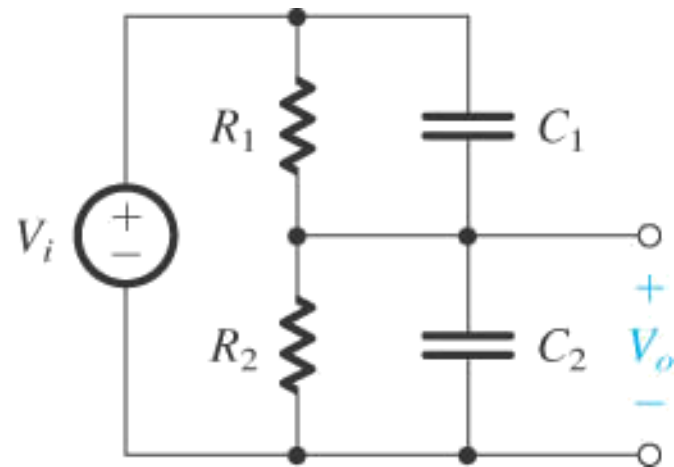




**Figure P1.72**



**Figure P1.77**



**Figure P1.79**