

## **Transistores Bipolares de Junção (TBJs) – Parte I**

Capítulo 4 de (SEDRA e SMITH, 1996).

### **SUMÁRIO**

Introdução

4.1. Estrutura Física e Modos de Operação

4.2. Operação do Transistor npn no Modo Ativo

4.3. O Transistor pnp

4.4. Símbolos para Circuitos e Convenções

4.5. Representação Gráfica das Características do Transistor

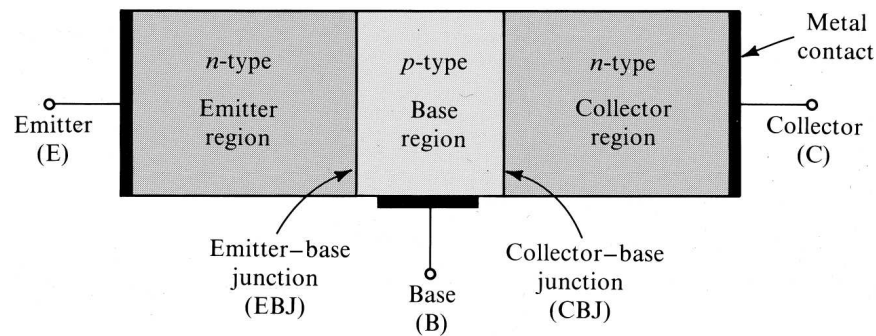
4.6. Análise *cc* de Circuitos com Transistores

### **INTRODUÇÃO**

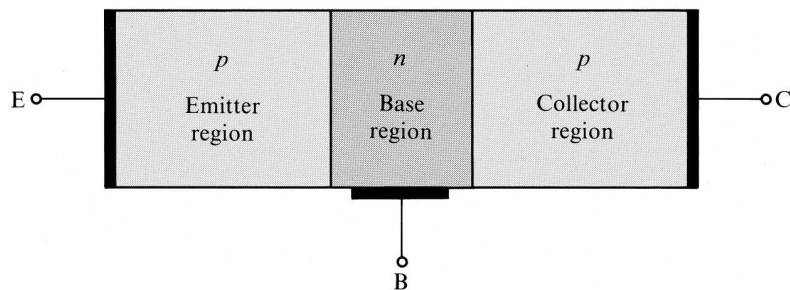
- Os dispositivos semicondutores de três terminais são muito mais utilizados que os de dois terminais (diodos) porque podem ser usados em várias aplicações, desde a amplificação de sinais até o projeto de circuitos digitais de memória.
- O princípio básico de operação é o uso de uma tensão entre dois terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal.
- A tensão de controle pode ser também usada para fazer com que a corrente no terceiro terminal varie de zero até um valor significativo, comportando-se como uma chave, elemento básico de circuitos digitais.
- Há 2 tipos principais de dispositivos de 3 terminais: o transistor bipolar de junção (TBJ) e o transistor de efeito de campo (FET).
- O transistor bipolar, geralmente chamado apenas *transistor* consiste em duas junções pn construídas de modo especial e conectadas em série e em oposição.

#### 4.1. ESTRUTURA FÍSICA E MODOS DE OPERAÇÃO

- O TBJ constitui-se de 3 regiões semicondutoras: o *emissor* (E), a *base* (B) e o *coletor* (C), cada um ligado a um terminal metálico para acesso externo.
- No *transistor npn* a base é do tipo p e as outras regiões são do tipo n. No *transistor pnp*, a base é do tipo n e as outras regiões são do tipo p.



[Figura 4.1 – página 209]

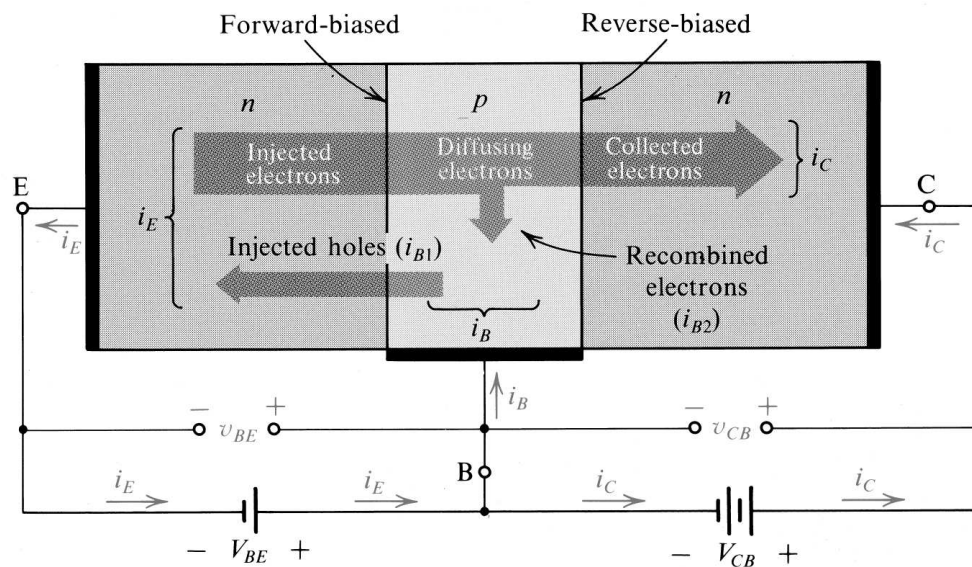


[Figura 4.2 – página 209]

- O transistor consiste em duas junções pn, a *junção emissor-base* (JEB) e a *junção coletor-base* (JCB).
- Dependendo da condição de polarização de cada junção, são obtidos diferentes modos de operação para o transistor.

JEB	JCB	MODO
Reversa	Reversa	<b>CORTE</b>
Direta	Reversa	<b>ATIVO</b>
Direta	Direta	<b>SATURAÇÃO</b>

## 4.2. OPERAÇÃO DO TRANSISTOR npn NO MODO ATIVO



[Figura 4.3 – página 210]

### O Fluxo de Corrente

- As correntes de deriva devidas aos portadores minoritários gerados termicamente são pequenas e desprezadas na análise.
- A polarização direta da junção emissor-base fará com que uma corrente circule pela junção composta de 2 componentes: elétrons injetados no emissor e lacunas injetadas na base.
- A componente de elétrons é muito maior que a de lacunas, isto é obtido usando-se um emissor fortemente dopado e uma base levemente dopada e bem estreita.
- O fato da base ser muito estreita faz com que os elétrons injetados na base se difundam (corrente de difusão) em direção ao coletor.
- No caminho, alguns elétrons que estão se difundindo através da região da base se recombinaem com as lacunas (portadores majoritários na base), mas como ela é muito estreita e fracamente dopada, a porcentagem de elétrons perdidos por recombinação é muito pequena.

### **A Corrente de Coletor**

- A maioria dos elétrons que se difundem alcançará a região de depleção coletor-base.
- Pelo fato do coletor ser mais positivo que a base, esses elétrons serão arremessados através da região de depleção para o coletor, constituindo a corrente de coletor  $i_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$
- Observe que o valor de  $i_C$  independe de  $V_{CB}$ .
- A corrente de saturação  $I_S$  é inversamente proporcional à largura da base e diretamente proporcional à área de JEB, dobrando a cada 5° C de aumento de temperatura.

### **A Corrente de Base**

- A corrente de base pode ser representada por uma parcela de  $i_C$  tal que

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left( \frac{I_S}{\beta} \right) \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

- A constante  $\beta$ , denominada *ganho de corrente de emissor comum*, é um dos parâmetros característicos de um transistor.
- Para transistores modernos,  $\beta$  fica na faixa de 100 a 200, podendo chegar a 1000 em dispositivos especiais.

### **A Corrente de Emissor**

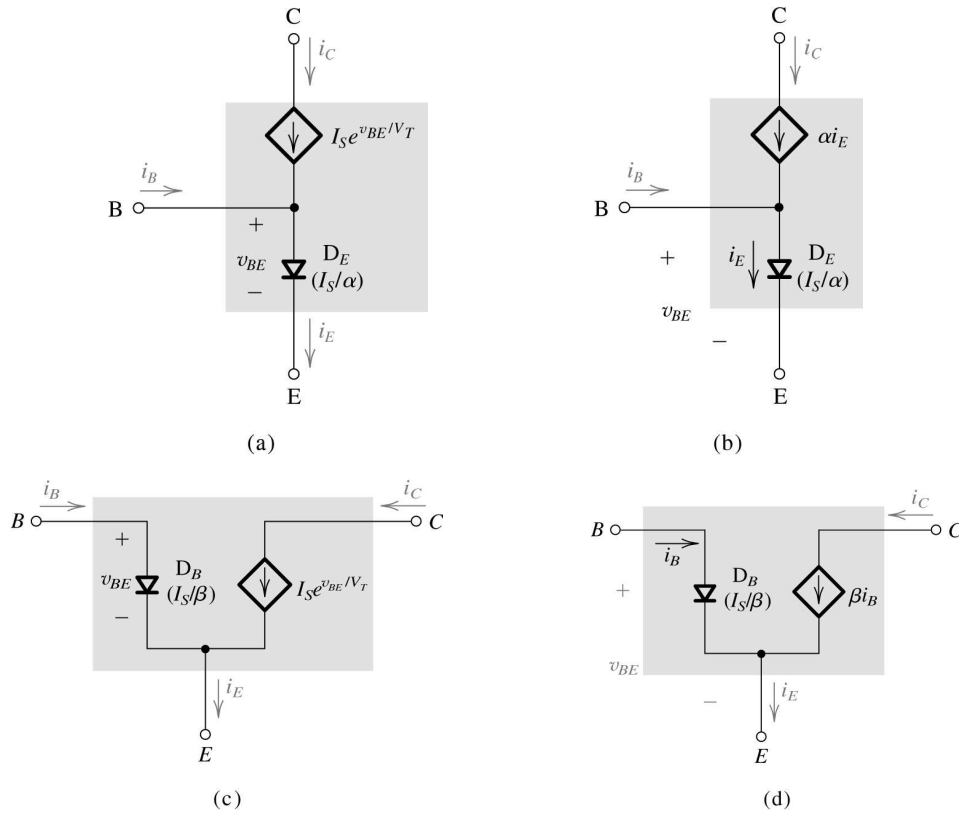
- É a soma da corrente de coletor com a corrente de base.

$$i_E = i_C + i_B = \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot i_C$$

- Define-se  $i_C = \alpha \cdot i_E$ , onde  $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$  ou  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ .

- Observe que se  $\beta = 100$ , então  $\alpha \cong 0,99$ .
- $\alpha$  é chamado de *ganho de corrente em base comum*.

### Modelos Equivalentes



[Figura 4.5 – página 216]

- Circuitos equivalentes ao TBJ npn no modo ativo
  - Fonte de corrente controlada pela tensão  $v_{BE}$ .
  - Fonte de corrente controlada pela corrente  $i_E$ .
  - Fonte de corrente controlada pela tensão  $v_{BE}$ .
  - Fonte de corrente controlada pela corrente  $i_B$ .

### A Constante $n$ (*fator de idealidade*)

- Na equação do diodo, a constante  $n$  possui valor entre 1 e 2.

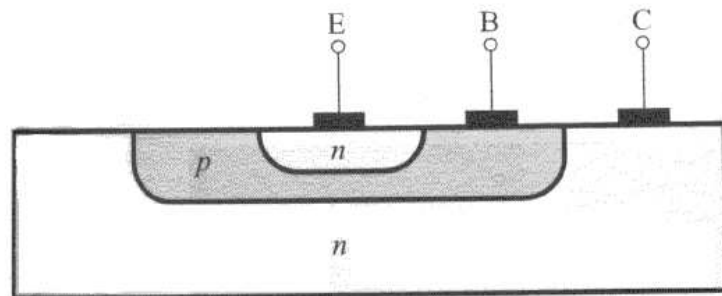
- No TBJ, a constante  $n$  é próxima de 1, exceto em correntes muito altas ou muito baixas, em que possui um valor próximo a 2.
- Considera-se nas análises que  $n=1$ , salvo seja citado.

#### **A Corrente Reversa de Coletor-Base ( $I_{CBO}$ )**

- Corrente reversa associada a portadores minoritários gerados termicamente.
- $I_{CBO}$  circula do coletor para a base com o emissor em aberto (Open) e está na faixa de nA.
- Contém uma componente de fuga substancial e seu valor varia com  $V_{CB}$ .
- Depende muito da temperatura (dobra a cada  $10^\circ$  C de aumento de temperatura).

#### **A Estrutura de Transistores Reais**

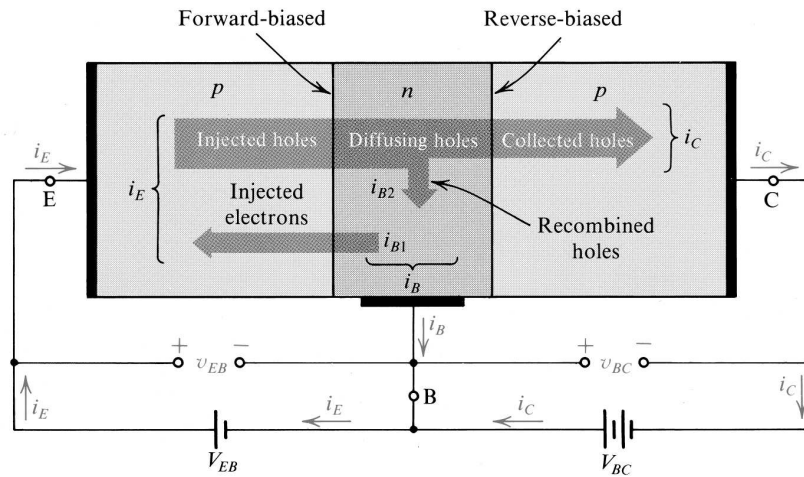
- Seção transversal de um TBJ npn.



[Figura 4.6 – página 217]

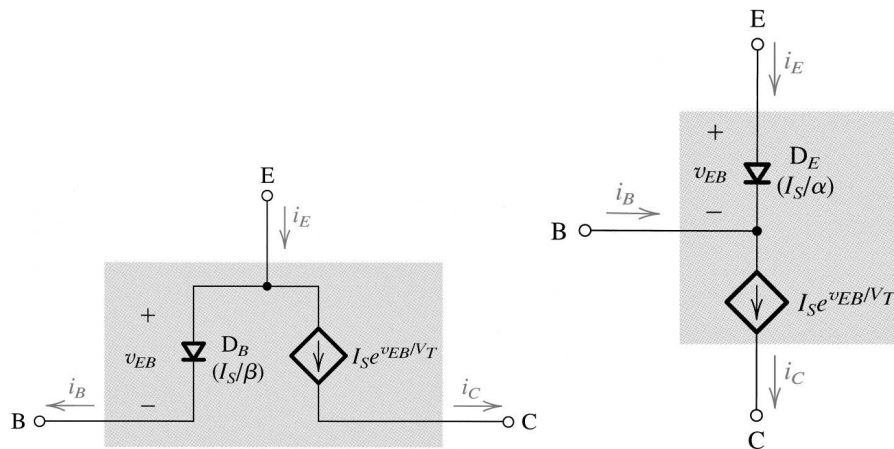
### 4.3. O TRANSISTOR pnp

- Fluxo de corrente de um transistor pnp polarizado para operar no modo ativo.



[Figura 4.7 – página 218]

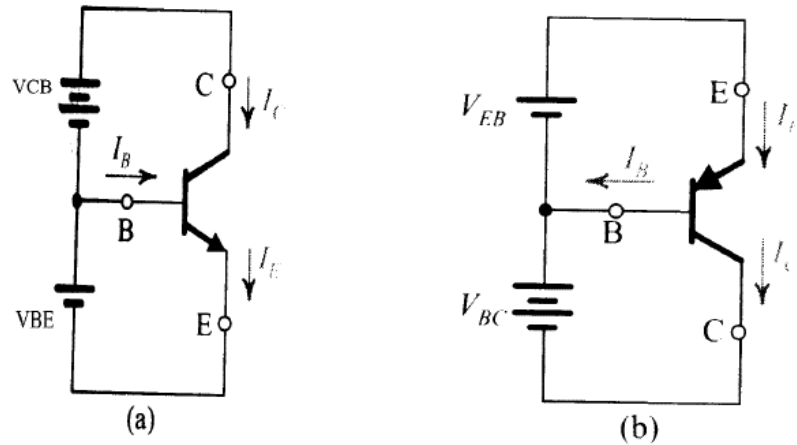
- Dois modelos para grandes sinais para o transistor pnp operando no modo ativo.



[Figura 4.8 – página 219]

#### 4.4. SÍMBOLOS PARA CIRCUITOS E CONVENÇÕES

- Simbologia para os transistores npn e pnp.
- Polaridades das tensões e fluxos de corrente para os transistores polarizados no modo ativo.



[Figura 4.10 – página 221]

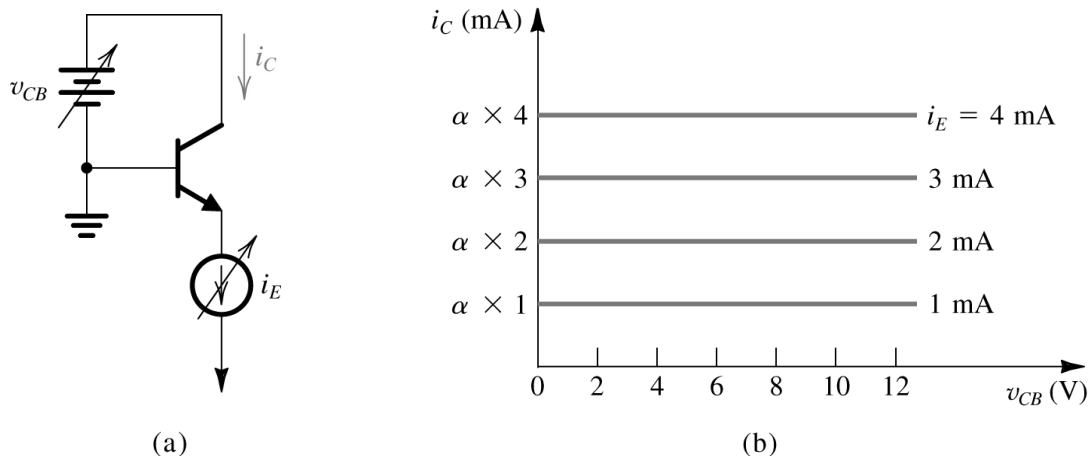
<i>Transistor na região ativa</i>		
$v_{BE} > 0$ e $v_{CB} > 0$ para o npn	$v_{EB} > 0$ e $v_{BC} > 0$ para o pnp	
$i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$	$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left( \frac{I_S}{\beta} \right) \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$	$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left( \frac{I_S}{\alpha} \right) \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$
(para o transistor pnp trocar por $v_{EB}$ e $v_{BC}$ )		
$i_C = \alpha \cdot i_E$	$i_B = \frac{i_C}{\beta}$	$i_E = i_C + i_B$
$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$	$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25mV$

- Exemplo 4.1, página 222.
- Exercícios 4.8 e 4.9, página 223.



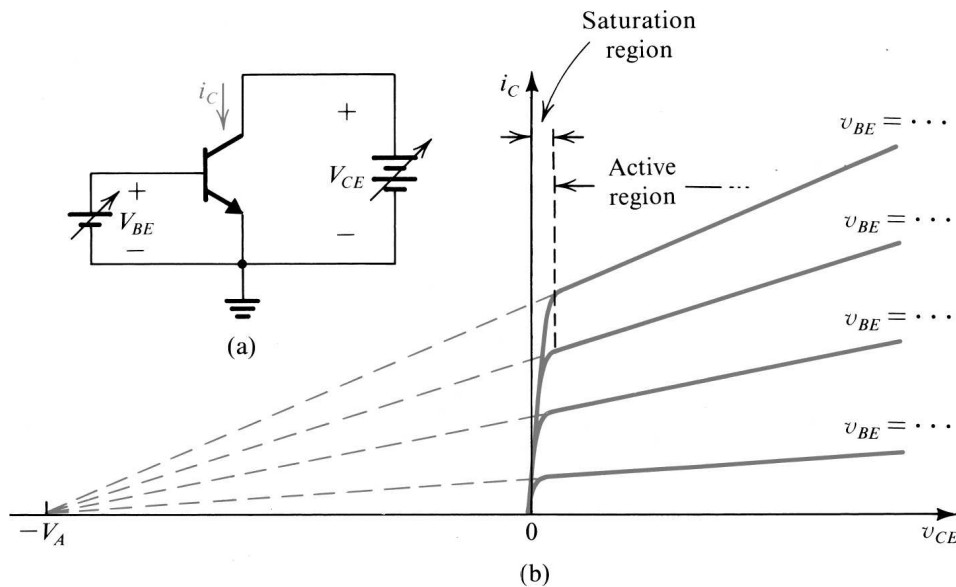
## 4.5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CARACTERÍSTICAS DO TRANSISTOR

- A curva característica  $i_C \times v_{BE}$  é uma exponencial e quase idêntica à característica  $i \times v$  do diodo de junção, pois  $i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$ .
- Para  $v_{BE}$  menor que aproximadamente 0,5V, a corrente  $i_C$  é desprezível.
- Em operação normal  $v_{BE}$  situa-se na faixa de 0,6 a 0,8V.
- Como os diodos de silício, a tensão  $v_{BE}$  diminui cerca de 2mV para cada 1° C de aumento de temperatura.
- A figura 4.14 mostra as curvas  $i_C \times v_{CB}$  de um transistor npn para vários valores da corrente de emissor  $i_E$  no modo ativo ( $v_{CB} \geq 0V$ ).



[Figura 4.14 – página 225]

Dependência de  $I_C$  com a Tensão de Coletor (característica  $i_C \times v_{CE}$ )



[Figura 4.15 – página 226]

- Para valores baixos de  $v_{CE}$ , a tensão de coletor é menor que a tensão de base e a junção coletor-base fica diretamente polarizada (modo de saturação).
- Na região ativa, as curvas características são retas com uma inclinação finita que se encontram num ponto  $-V_A$  na parte negativa do eixo  $v_{CE}$ .
- A tensão  $V_A$  é um parâmetro chamado *tensão Early* e possui valores típicos de 50 a 100V.
- Para um dado valor de  $v_{BE}$ , ao se aumentar  $v_{CE}$ , aumenta-se a tensão de polarização reversa sobre a junção coletor-base e, portanto, aumenta-se a largura da camada de depleção.
- Isso diminui a largura efetiva da base, fazendo com que  $I_S$  e  $i_C$  aumentem proporcionalmente, isto é,  $i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$ .

- A inclinação diferente de zero das retas na característica  $i_C \times v_{CE}$  na região ativa é modelada por uma resistência de saída  $r_O$  finita e definida por

$$r_O \equiv \left[ \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right]^{-1}.$$

- Para  $v_{BE}$  constante, tem-se  $r_O = V_A / I_C$ .
- Esse efeito não é normalmente usado em projetos e análises de polarização  $cc$ , mas pode ter um efeito significativo sobre o ganho de amplificadores transistorizados.

#### **4.6. ANÁLISE $cc$ DE CIRCUITOS COM TRANSISTORES**

- Utiliza-se o modelo simplificado de tensão  $v_{BE}$  constante ( $= 0,7V$ ), independente do valor exato da corrente, de forma semelhante ao usado no diodo de junção.
- Exemplos 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8.
- Exercícios 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

#### **REFERÊNCIAS**

SEDRA, Adel S. e SMITH, Kenneth S. Capítulo 3 – Diodos, em Microeletrônica. 4a. Edição. Makron Books Ltda, São Paulo, 1998.

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica Volume 1. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.