

# Transistores Bipolares 1

Adrielle C. Santana

# Válvulas Eletrônicas

Sinais de TV e rádio não são fortes o suficiente para fazer funcionar um alto-falante ou gerar a imagem na TV. Esses sinais após captados precisam ser amplificados antes de serem efetivamente utilizados.

Até 1951 as válvulas eletrônicas eram os principais amplificadores utilizados. São utilizados ainda hoje em alguns aparelhos.

# Válvulas Eletrônicas



## DESVANTAGENS

- Aquecimento
- Vida útil do filamento
- Espaço ocupado



# Shockley

Em 1951 Shockley inventou o transistor de junção que superou a válvula facilmente por não precisar se aquecer (consumindo menos potência), ocupando pouco espaço e possuindo uma vida útil muito maior que a da válvula eletrônica.

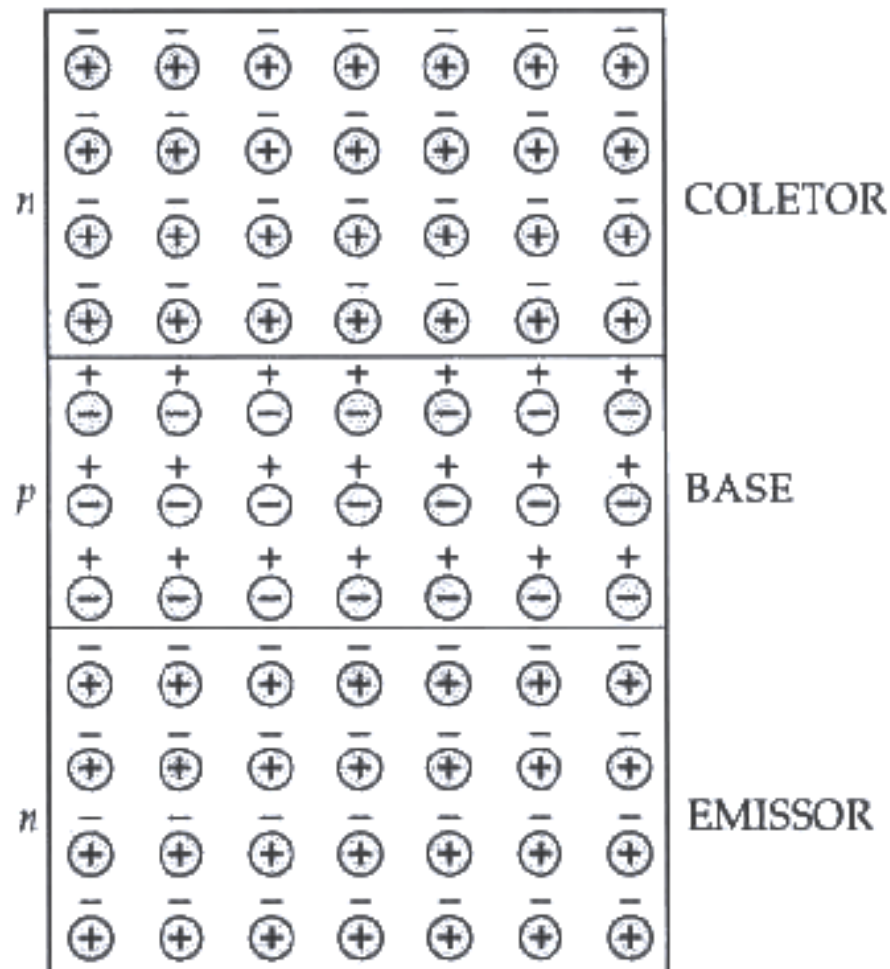
# Shockley

O transistor possibilitou a invenção de diversos outros dispositivos eletrônicos dentre eles os CIs (circuitos integrados) que por sua vez possibilitou a criação de computadores, microcontroladores, celulares, etc.

O transistor que funciona por elétrons e lacunas é conhecido como transistor bipolar.

# Transistor Não Polarizado

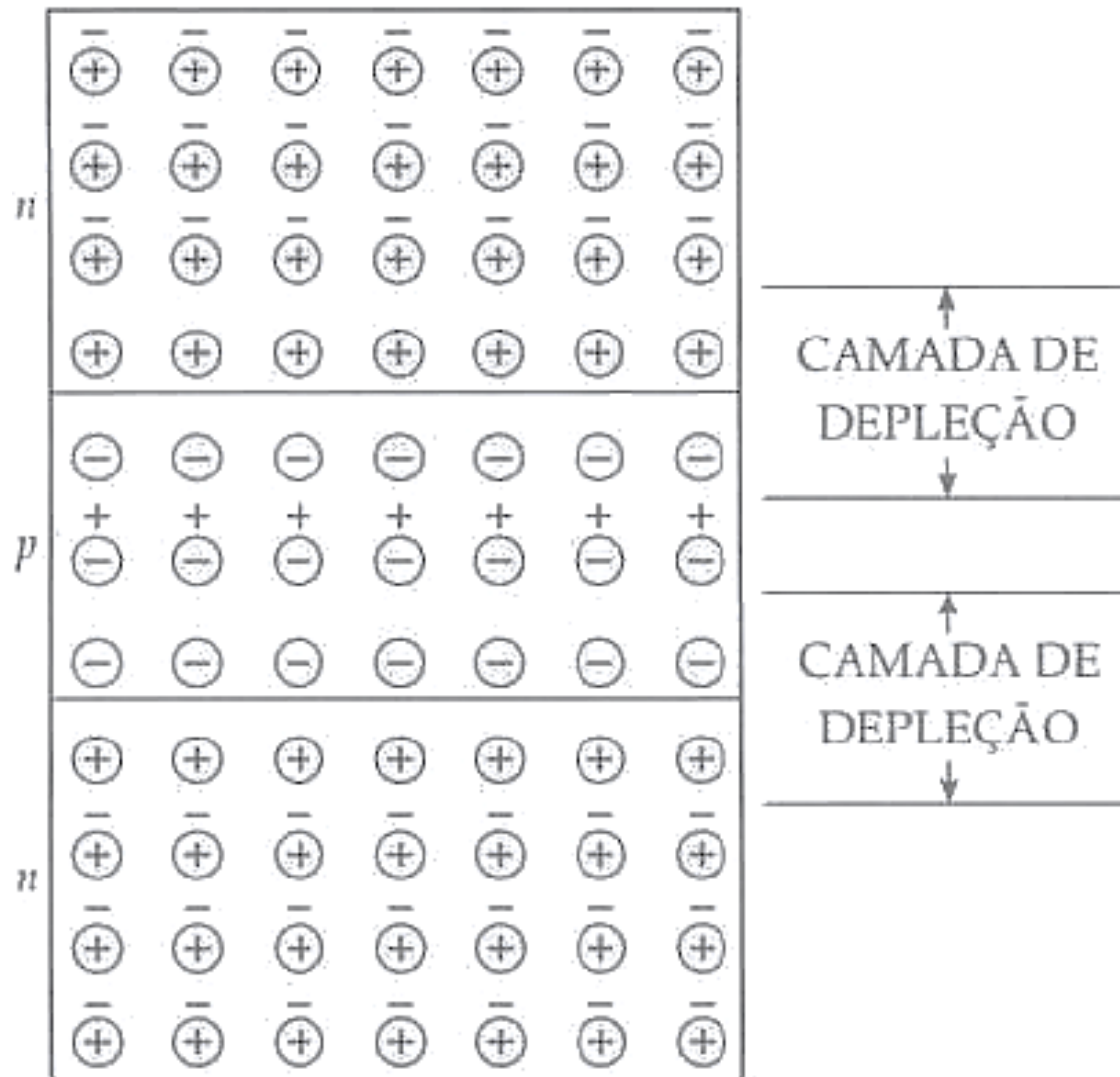
Três regiões dopadas: *npn* ou *pnp*



# Transistor Não Polarizado

- Possui duas junções (como se fossem dois diodos).
- Diodo emissor e diodo coletor.
- Assim como nos diodos os elétrons livres da região n tendem a se recombinar com as lacunas da região p. No transistor isso cria duas camadas de depleção cada uma criando uma barreira de potencial própria (0,7V - silício).

# Transistor Não Polarizado





# Transistor Polarizado

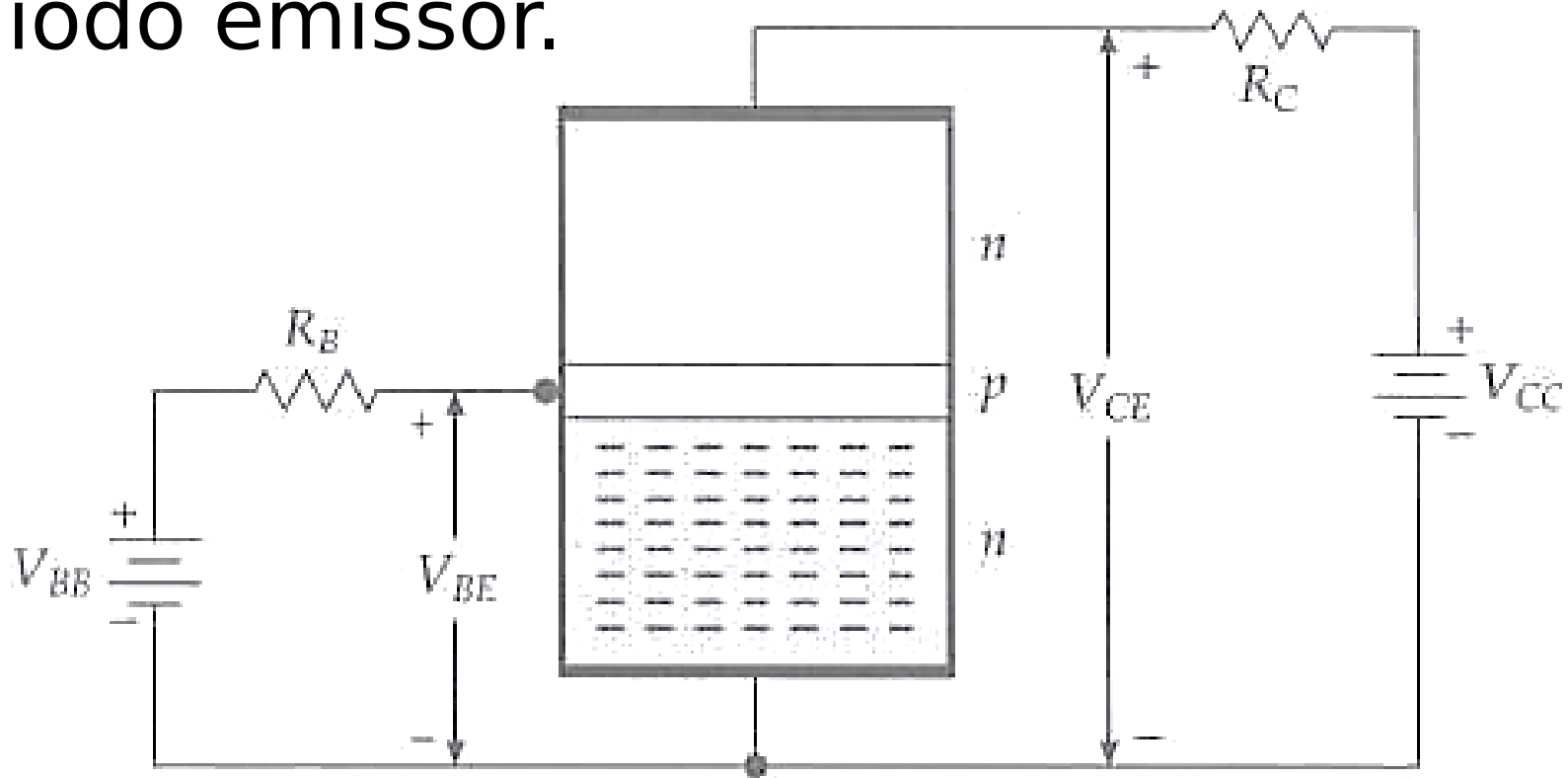
- **Elétrons no Emissor**

Quanto ao nível de dopagem o emissor é mais fortemente dopado que o coletor. A base além de ser fracamente dopada ainda possui área menor que o emissor e coletor.

Dessa forma quando polarizado (nnp), os elétrons livres do emissor passam para a base e os sobressalentes são “coletados” pelo coletor.

# Transistor Polarizado

A fonte  $V_{BB}$  polariza diretamente o diodo emissor.



# Transistor Polarizado

- **Elétrons na Base**

Se  $V_{BB}$  for maior que a barreira de potencial do diodo emissor, os elétrons do emissor passarão pela base. Daí eles têm dois caminhos:

- Da base, irem para a fonte (+);
- Da base, irem para o coletor;

# Transistor Polarizado

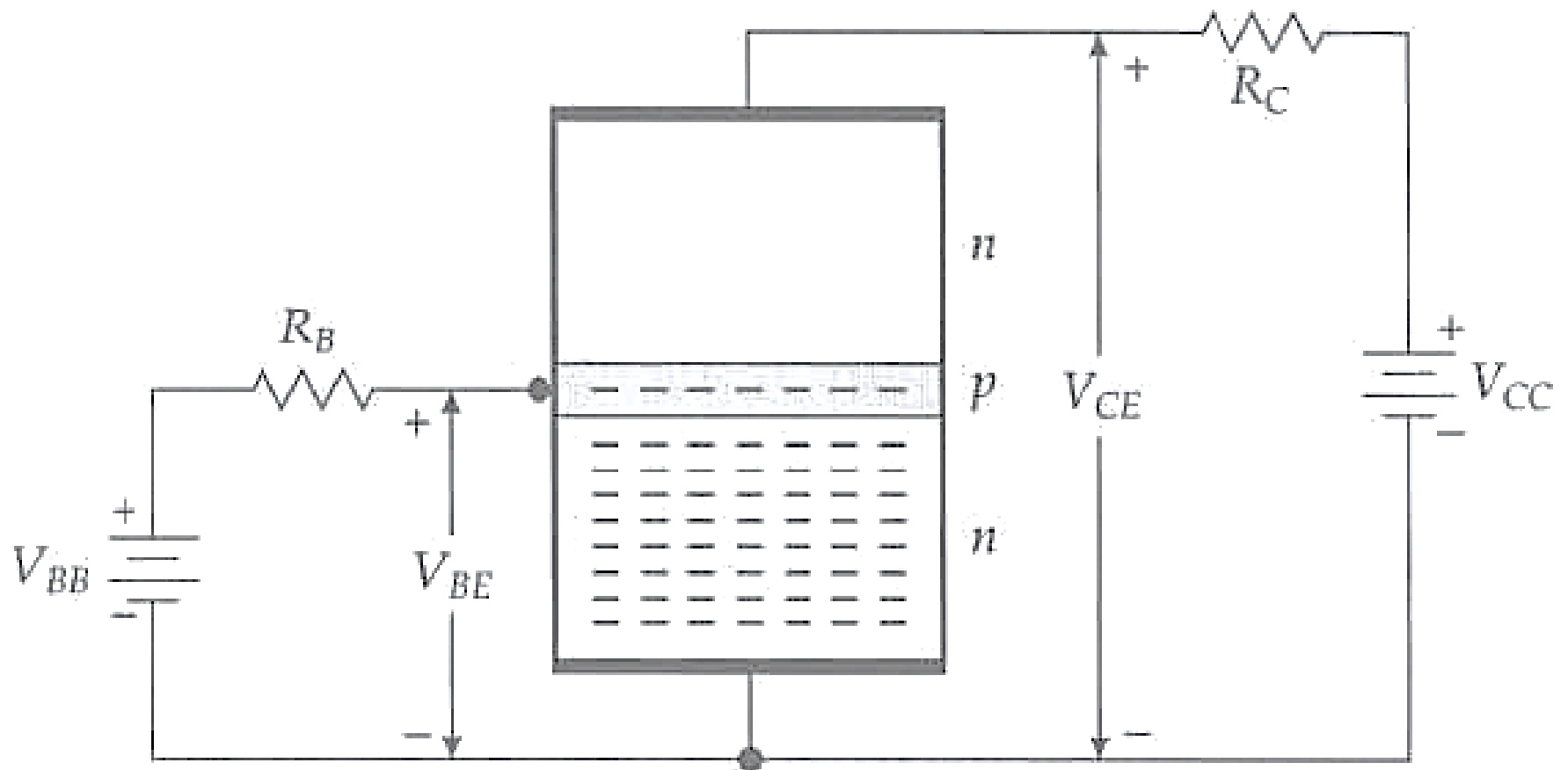
- Para onde irá a maioria dos elétrons?

Para o coletor.

- Por quê?

Porque a base é estreita e fracamente dopada. Os elétrons demoram para achar uma lacuna para se recombinar sendo mais fácil seguir para o coletor mesmo. Eles só passam para o fio indo para a fonte, fazendo recombinações na base. Alguns poucos elétrons conseguem mas a maioria vai para o coletor.

# Transistor Polarizado

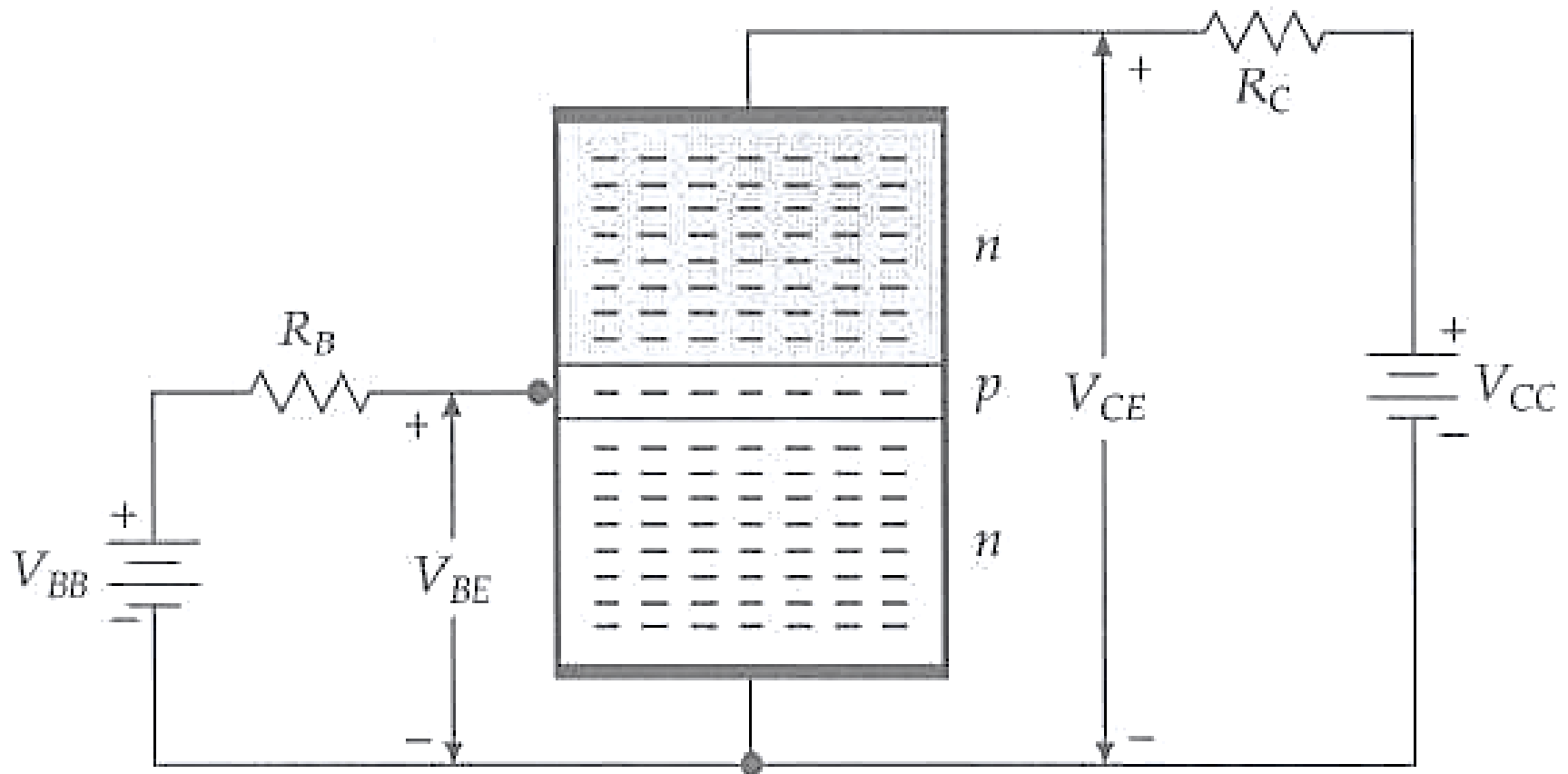


# Transistor Polarizado

- **Elétrons no coletor**

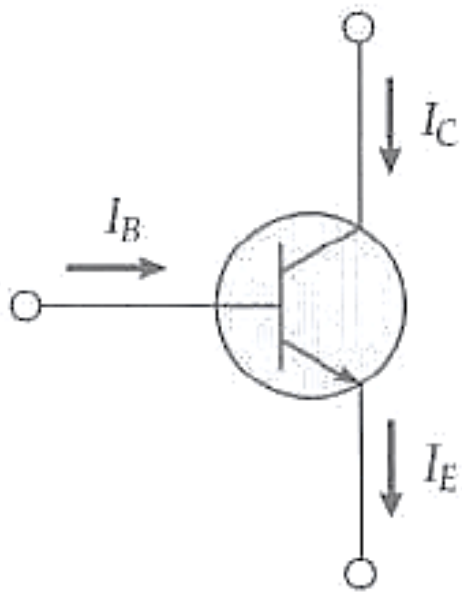
Os elétrons que passaram para o coletor (cerca de 95%) são atraído pela fonte  $V_{CC}$ . Por recombinação eles passam pelo coletor, depois pelo resistor  $R_C$  e chegam na fonte.

# Transistor Polarizado

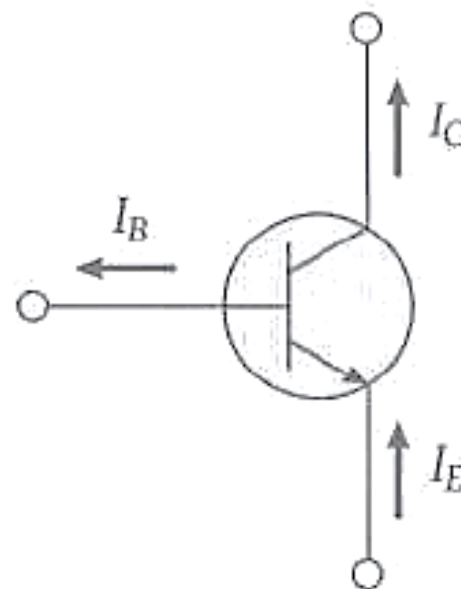


# Correntes no Transistor

A corrente no emissor ( $I_E$ ) é a maior das três sendo que a corrente no coletor ( $I_C$ ) é quase igual a ela pelo fato da maior parte dos elétrons vindos do emissor, passarem por ele.



(a) CONVENCIONAL



(b) REAL



# Correntes no Transistor

Pela lei de Kirchhoff para correntes temos:

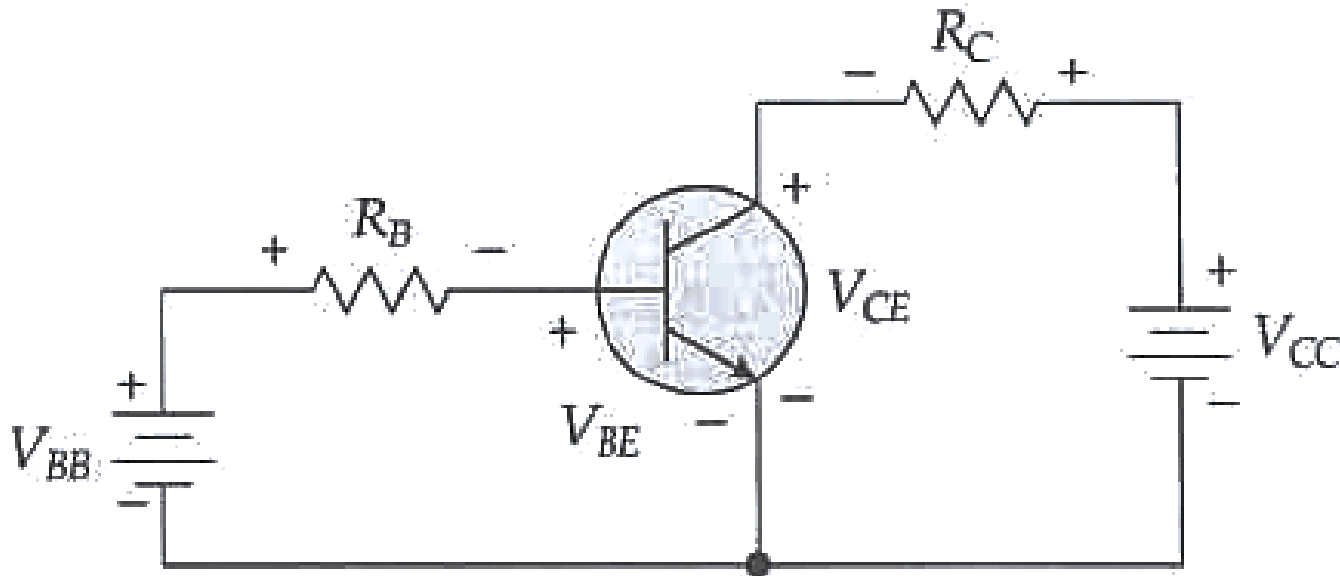
$$I_E = I_C + I_B$$

O ganho de corrente é a relação entre a corrente alta no coletor e a corrente baixa na base.

$$\beta_{cc} = \frac{I_C}{I_B}$$

# A Polarização EC

No esquema abaixo o terra de cada fonte está conectado ao emissor. Essa configuração é chamada “Emissor comum”.



# A Polarização EC

- A malha da esquerda é chamada de “circuito da base” e a da direita “circuito do coletor”.

$V_{BB}$  é tipicamente um valor entre 5 e 15V para aplicações de baixa potência.

Variando  $V_{BB}$  e/ou  $R_B$  influenciaremos diretamente na corrente  $I_B$  e conseqüentemente na corrente  $I_C$  (ganho de corrente  $\beta_{CC}$ ).

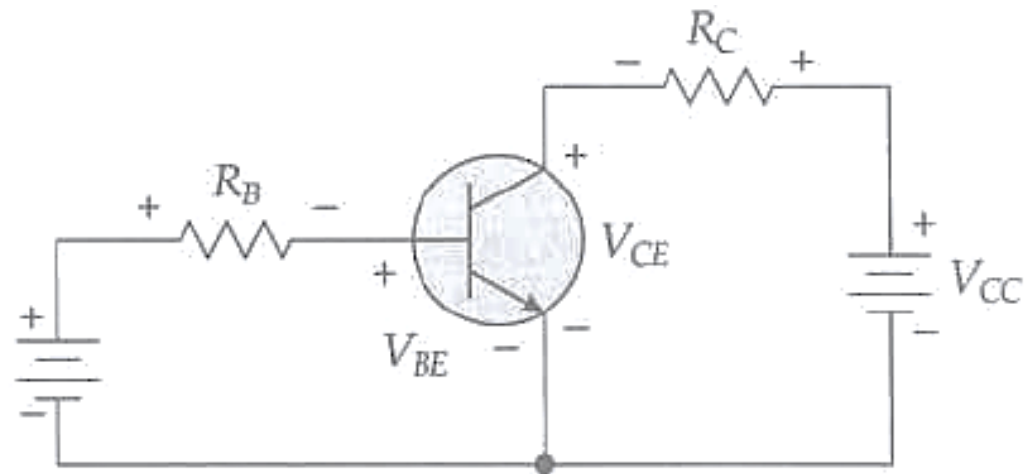
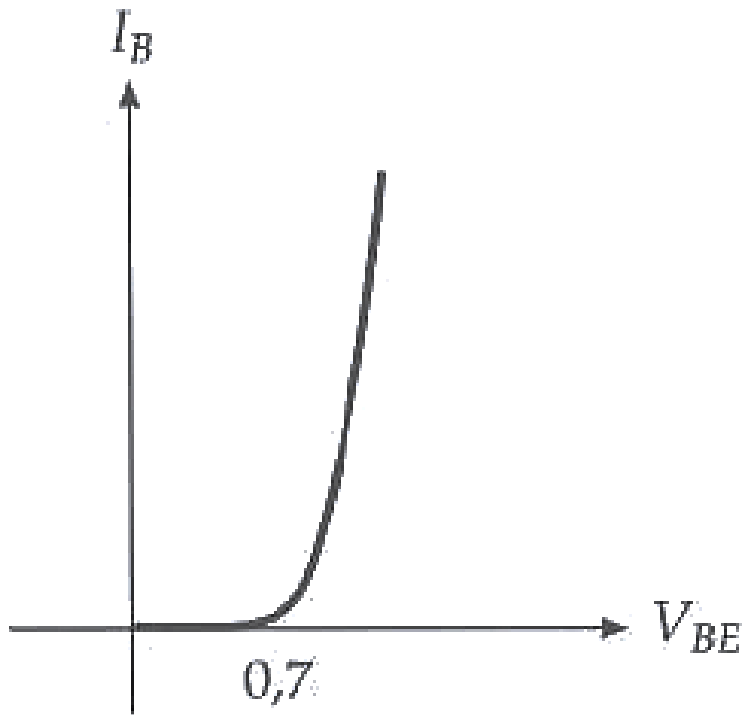
# A Polarização EC

No circuito do coletor temos a fonte  $V_{CC}$  (que deve polarizar o diodo coletor reversamente) e o resistor de limitação de corrente  $R_C$ . A tensão entre coletor e emissor é a  $V_{CE}$ .

Sabe-se que o diodo está operando normalmente quando  $V_{CE}$  está entre 1 e 15V para circuitos de baixa potência.

# A Curva da Base

A curva  $I \times V$  para o diodo emissor é semelhante a curva de um diodo retificador comum.



# A Curva da Base

Considerando a segunda aproximação para diodos que vimos, espera-se que a tensão  $V_{BE}$  seja de aproximadamente 0,7V (para silício).

O cálculo de  $I_B$  é feita então como segue:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

# A Curva da Base

As tensões com um subíndice apenas ( $V_C$ ,  $V_E$  e  $V_B$ ) são aquelas medidas do terminal para o terra. As tensões com dois subíndices ( $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$  e  $V_{CB}$ ) são as medidas entre terminais sendo que podem ser obtidas por subtração como:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_{CB} = V_C - V_B$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

# Curvas do Coletor

Podemos variar  $V_{BB}$  e  $V_{CC}$  de modo a obter diferentes correntes e tensões.

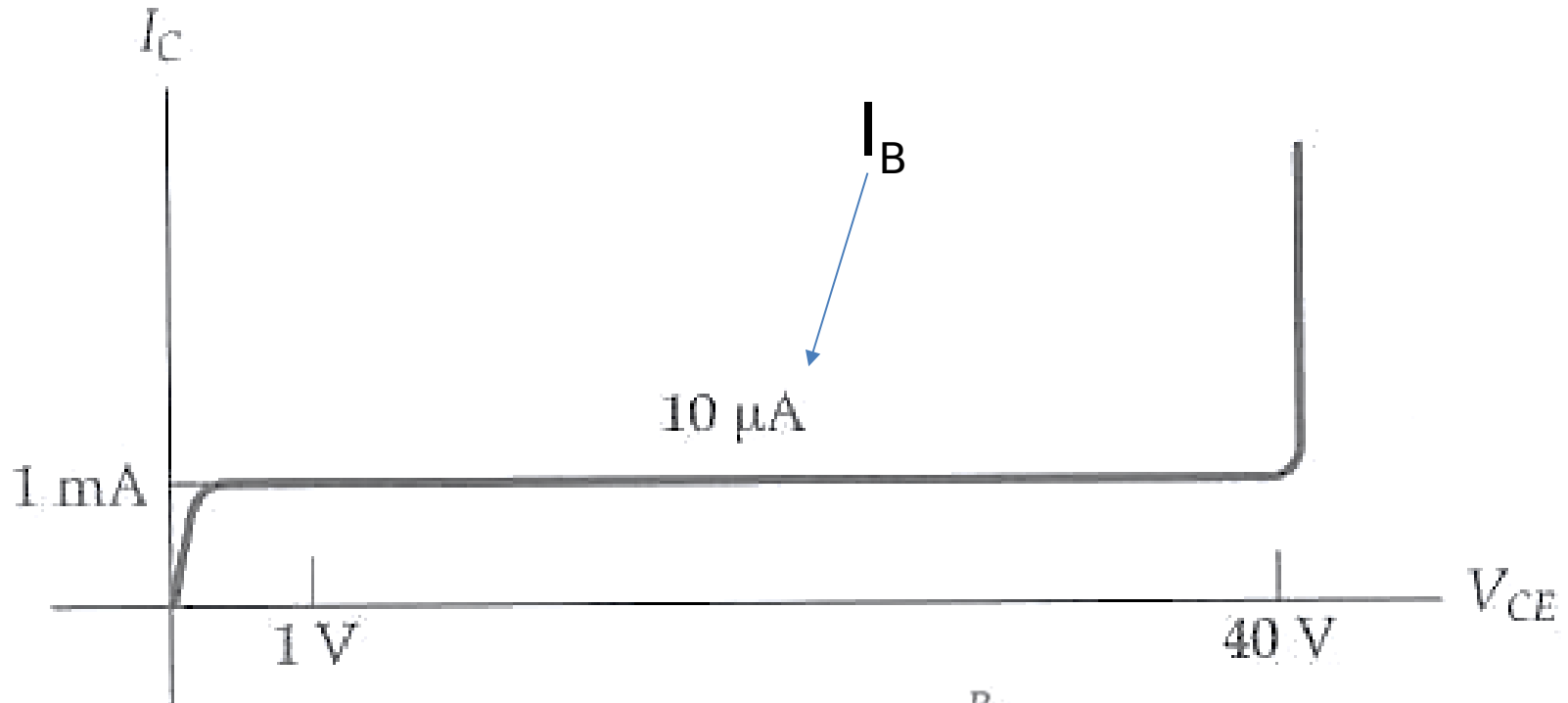
A curva do coletor é obtida relacionando-se a corrente  $I_C$  com a tensão  $V_{CE}$ .

Ex.:

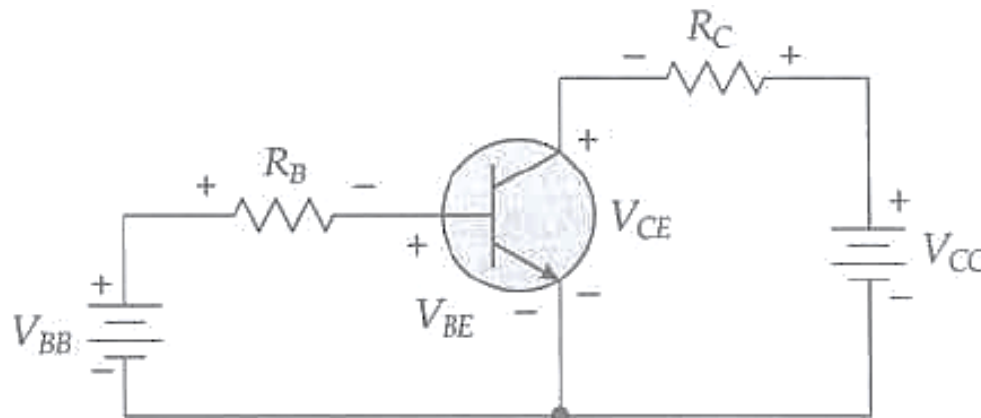
- Ajusta-se  $V_{BB}$  para fixar  $I_B$  num valor.
- Varia-se  $V_{CC}$  para influenciar em  $I_C$  e  $V_{CE}$  onde plota-se um gráfico com os valores.



# Curvas do Coletor



Queda de tensão sobre  $R_C$  é constante até  $V_{ce}=40\text{V}$  **nesse transistor** do exemplo.



# Curvas do Coletor

$V_{CE} = 0$   $\longrightarrow$  diodo coletor não está reversamente polarizado  $\longrightarrow I_C = 0$

$0 < V_{CE} < 1$   $\longrightarrow I_C$  cresce a uma taxa maior que  $V_{CE}$  e depois fica constante.

São necessários 0,7V para polarizar o diodo coletor reversamente de modo que após esse valor o coletor captura quase todos os elétrons que chegam na camada de depleção.

# Curvas do Coletor

$0,7 < V_{CE} < 40 \text{ V}$   $\longrightarrow$  o valor de  $V_{CE}$  não é mais importante pois qualquer aumento na polarização reversa ( $V_{CC}$ ) já faz com que todos os elétrons da base sejam coletados.  $I_C$  constante para (transistor 2N3904).

$V_{CE} > 40\text{V}$   $\longrightarrow$  diodo coletor atinge ruptura onde o transistor deixa de funcionar normalmente (ver folha de dados).

# Curvas do Coletor

Da lei das tensões de Kirchhoff temos que:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

A dissipação de potência do transistor é dada por:

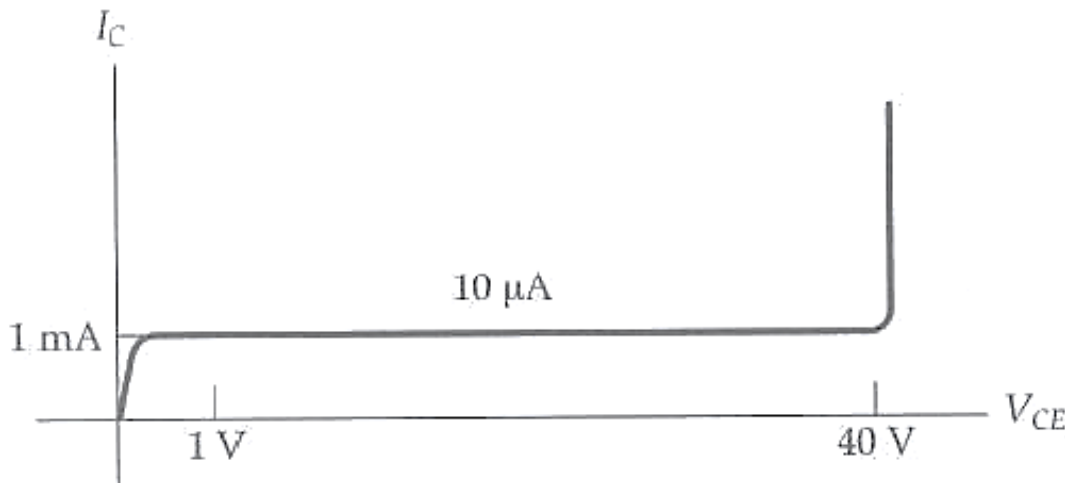
$$P_D = V_{CE} I_C$$

Essa dissipação causa aquecimento do diodo coletor e queima na faixa dos 150° a 200 °C. Na folha de dados é possível ver qual o  $P_{D(máx)}$  de modo a tentarmos fazer com que  $P_D$  não chegue ao valor  $P_{D(máx)}$ .

# Curvas do Coletor

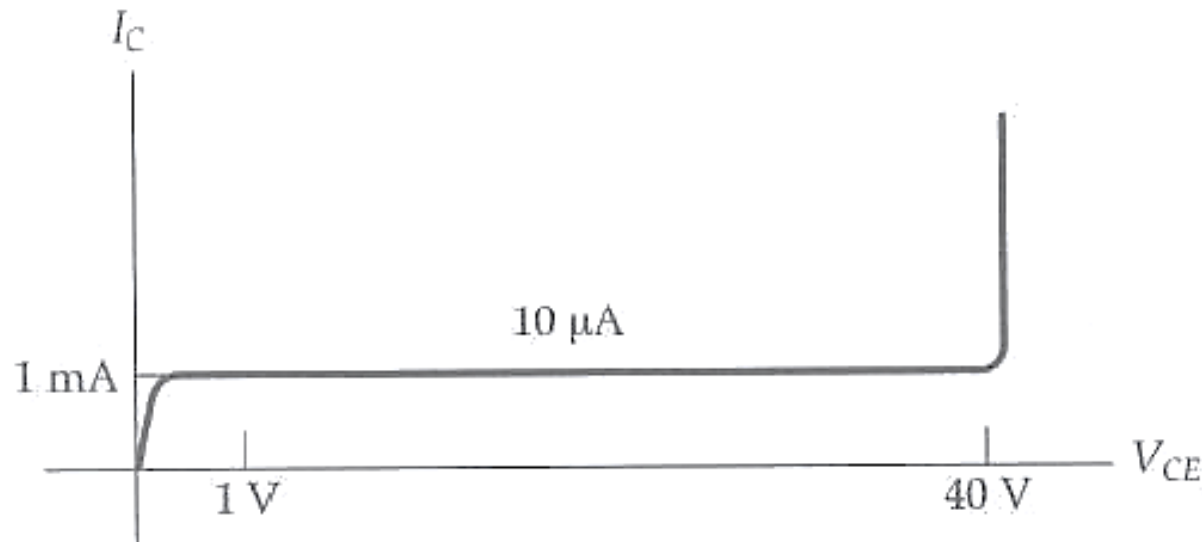
A curva do coletor tem 3 regiões:

- $0,7 < V_{CE} < 40 \text{ V}$ : representa a operação em modo normal do transistor. O coletor está coletando quase todos os elétrons que o emissor injeta na base (região ativa).



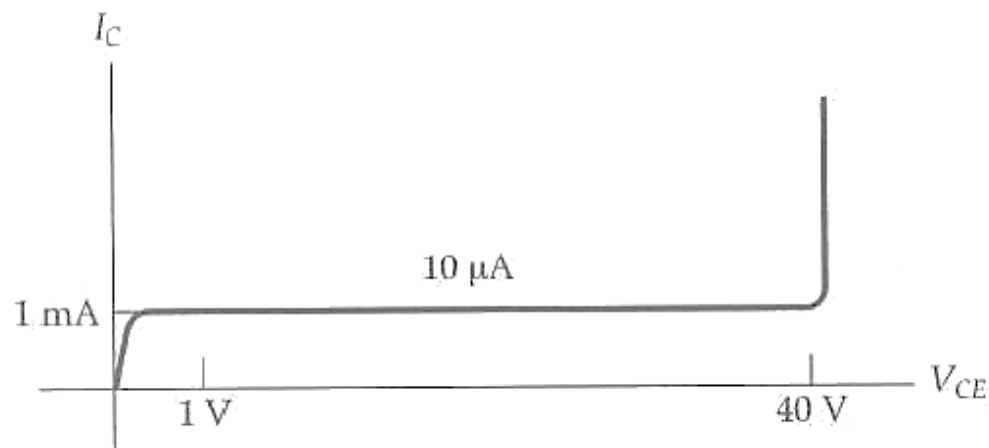
# Curvas do Coletor

- $V_{CE} > 40 \text{ V}$ : região de ruptura. O transistor diferente do Zener não foi feito para operar nessa região. Evitar chegar nela!



# Curvas do Coletor

- $0 < V_{CE} < 0,7 \text{ V}$ : região de saturação.  
O diodo coletor não está ainda reversamente polarizado.  
Dependendo do diodo, essa região pode ir de 0 a um valor abaixo dos 0,7V.



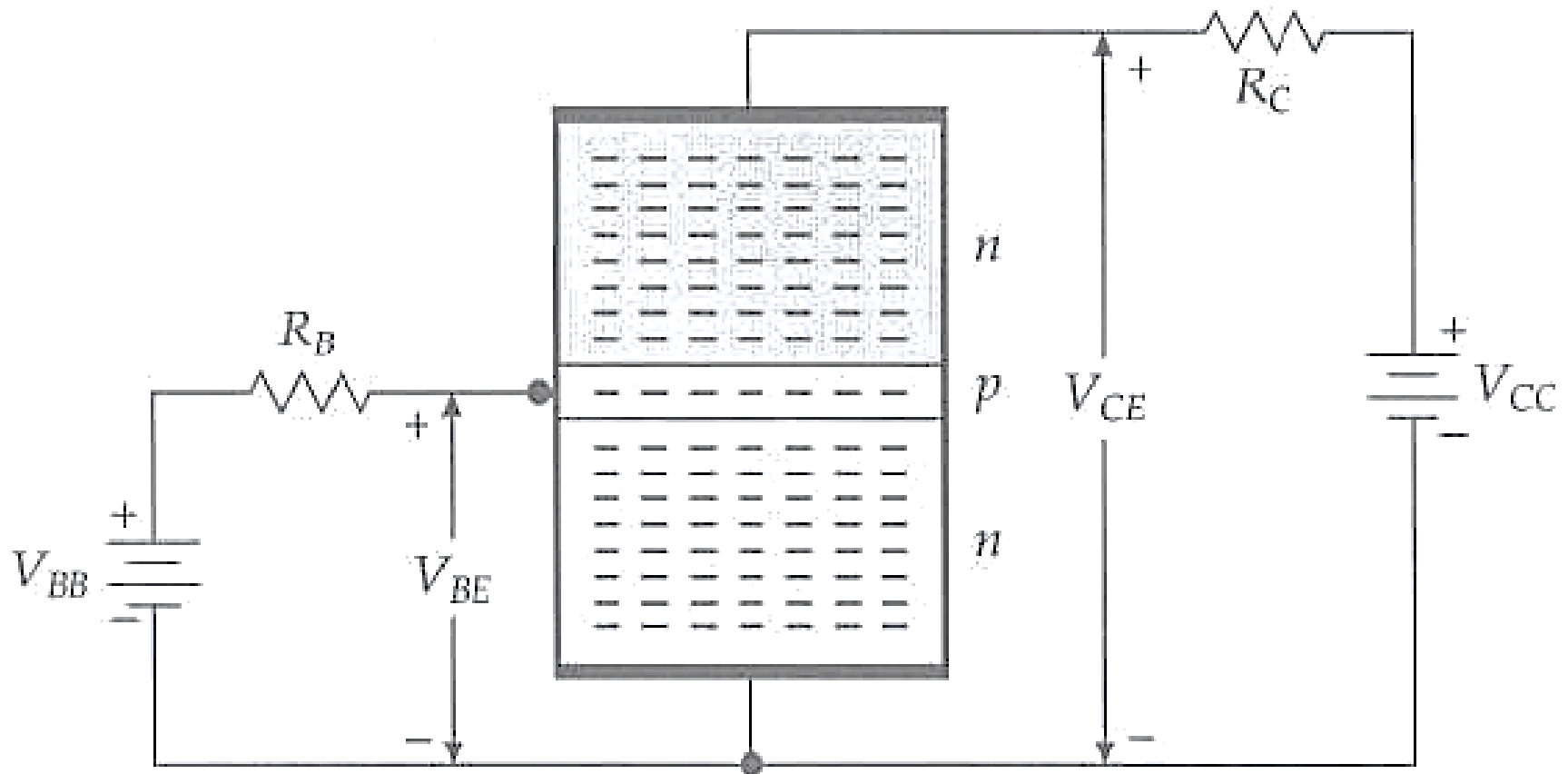
# Curvas do Coletor

Se plotarmos a curva do coletor para uma  $I_B$  maior, como  $20\mu\text{A}$  veremos que a corrente do coletor na região ativa aumenta para  $2\text{mA}$  também, em razão da quantidade maior de elétrons que está vindo do emissor agora.

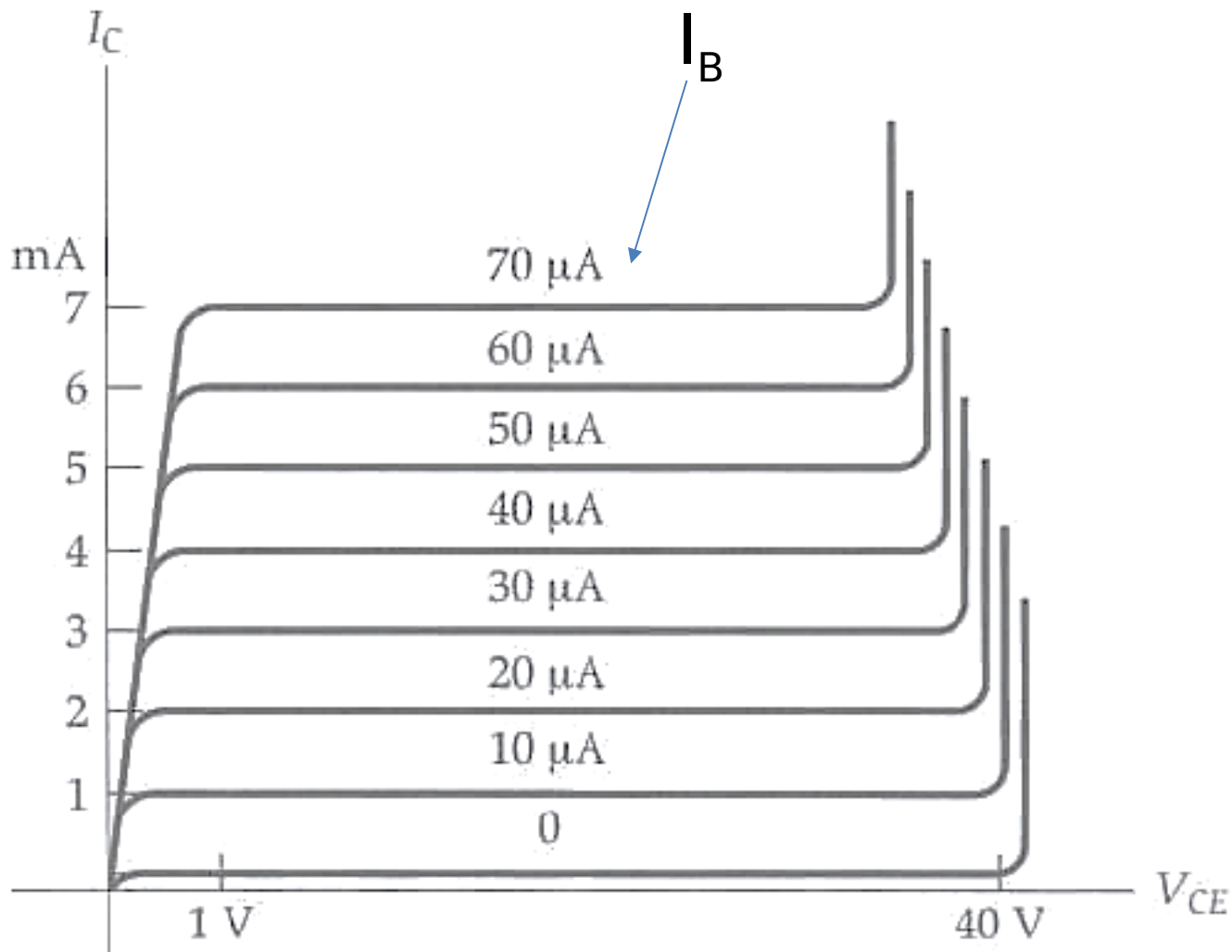
As possíveis curvas para valores diferentes de  $I_B$  são mostradas a seguir.



# Curvas do Coletor



# Curvas do Coletor



# Curvas do Coletor

A relação entre as correntes  $I_B$  e  $I_C$  aqui está na ordem de 100 (2N3904).

$$\beta_{cc} = \frac{7 \text{ mA}}{70 \mu\text{A}} = 100$$

Na última curva da figura anterior, verifica-se a existência de corrente no coletor mesmo sem termos corrente na base (figura exagerada). Esta corrente é chamada de “corrente de corte”.

# Curvas do Coletor

Essa corrente é a corrente reversa que existe em todo diodo e não é diferente no diodo coletor. Nesse diodo em específico, 2N3904, essa corrente é de 50nA. Desde que a relação dessa corrente com a corrente  $I_C$  seja 20:1, pode-se ignorar essa corrente.

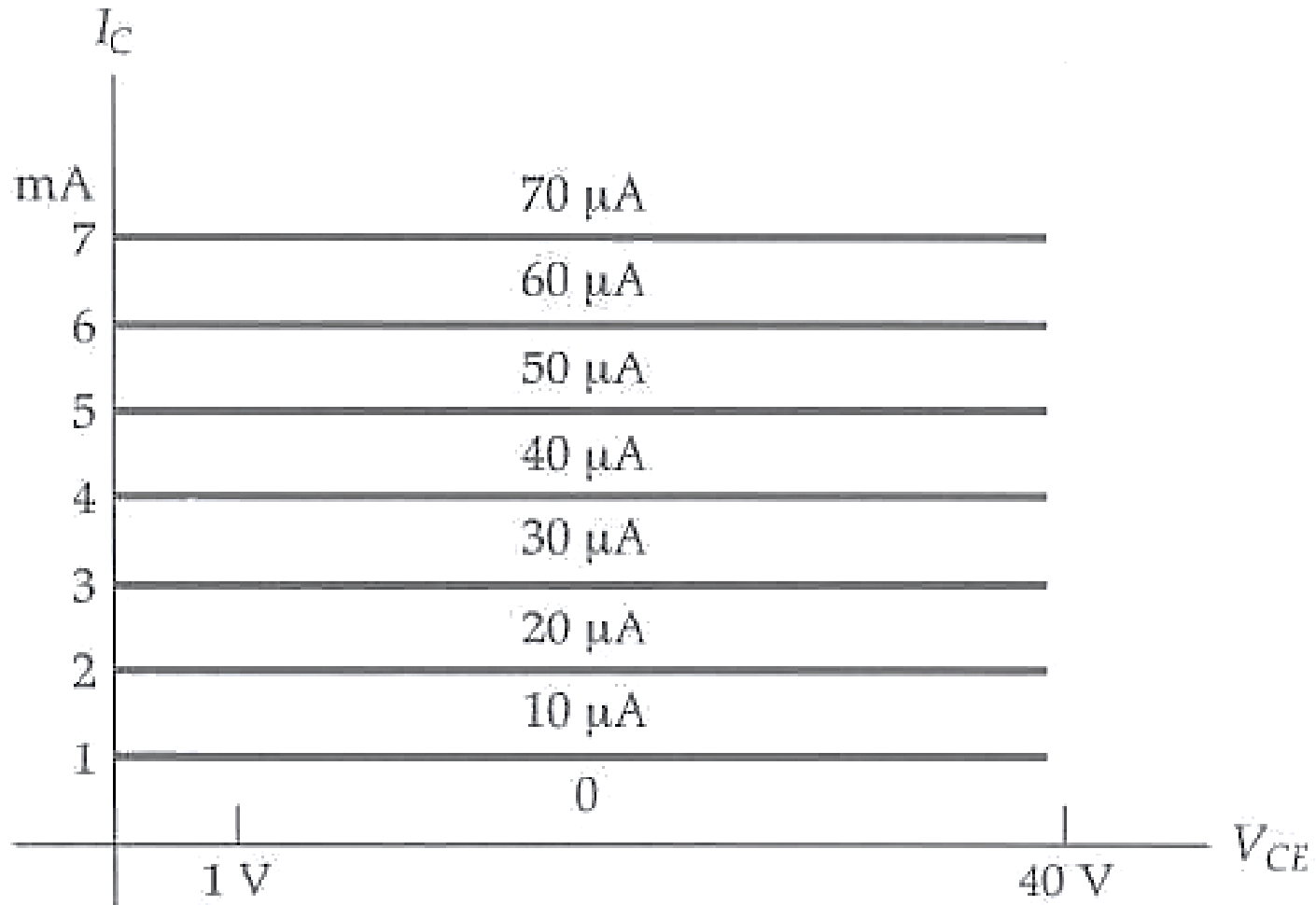
# Aproximações do Transistor

Dependendo do uso, podemos considerar uma ou outra forma de aproximar o comportamento de um transistor de acordo com as aproximações a seguir.

## **Transistor Ideal**

- Não tem região de ruptura;
- $I_C = 0$  A para  $I_B = 0$  A;
- Não há região de saturação.

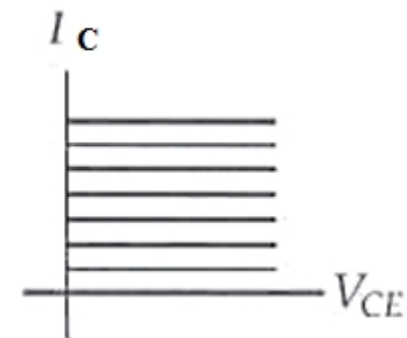
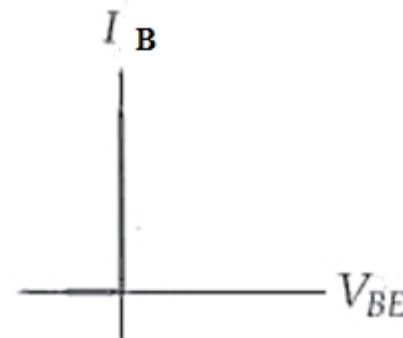
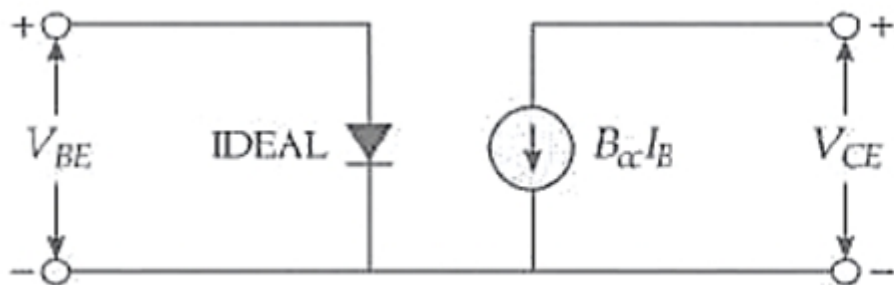
# Aproximações do Transistor



# Aproximações do Transistor

A figura a seguir ilustra como seria o transistor ideal. Na entrada ele se comportaria como um diodo ideal e na saída ele seria como uma fonte de corrente com valor constante calculado como:

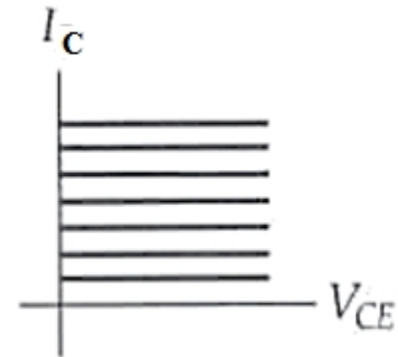
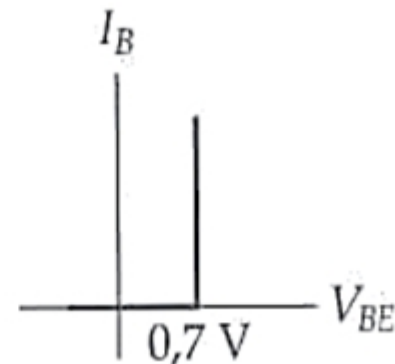
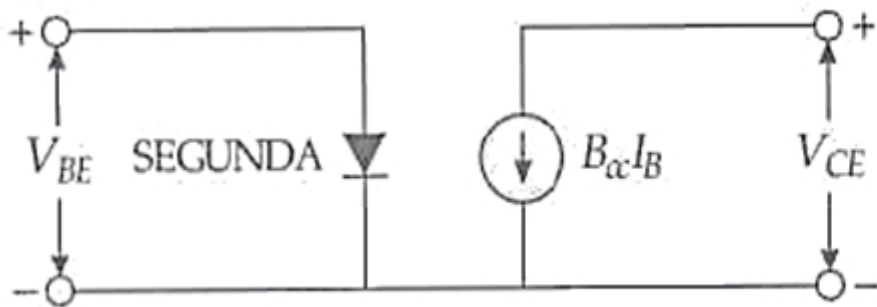
$$I_C = \beta_{cc} I_B$$



# Aproximações do Transistor

## Segunda aproximação

Nessa aproximação, o diodo da entrada (diodo emissor) não é mais considerado ideal. Acrescenta-se nele a queda de tensão de 0,7V.





# Aproximações do Transistor

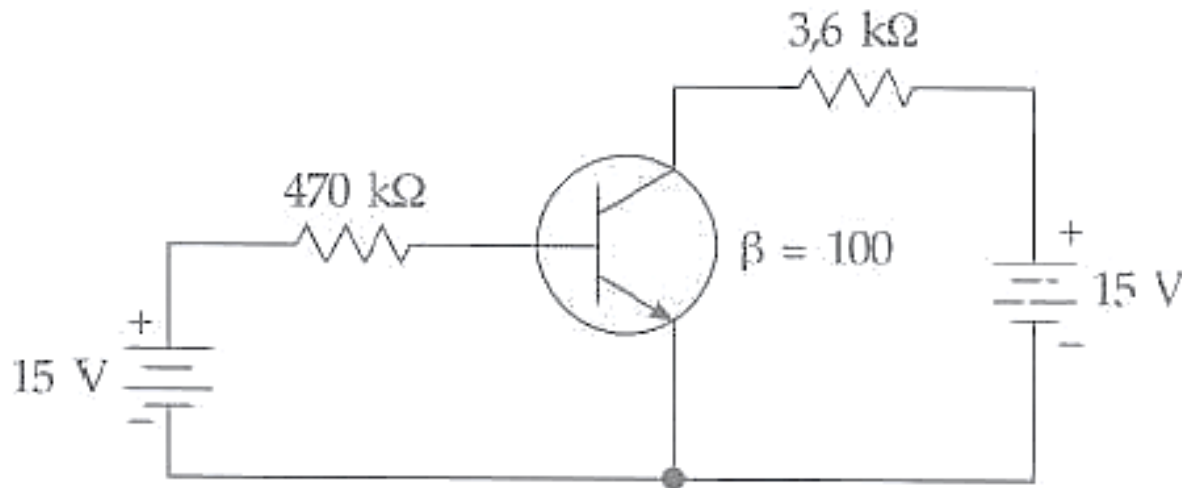
Para transistores de alta potência a resistência de corpo do diodo emissor deve ser levada em consideração pois ela, juntamente com a barreira de potencial do diodo ( $0,7V$ ), causam uma queda de tensão significativa para o cálculo de  $V_{BE}$ .

A resistência de corpo do diodo coletor também causa uma pequena queda de tensão da ordem de  $0,1$  a  $0,2$  V.

Com isso,  $V_{BE}$  pode ser maior que  $0,7V$  e  $V_{CE}$  pode ser maior que  $0$  V quando o transistor está na região de saturação.

# Aproximações do Transistor

Exemplo: Calcular tensão entre emissor e coletor considerando as três aproximações vistas. Compare os resultados.



# Aproximações do Transistor

- Ideal

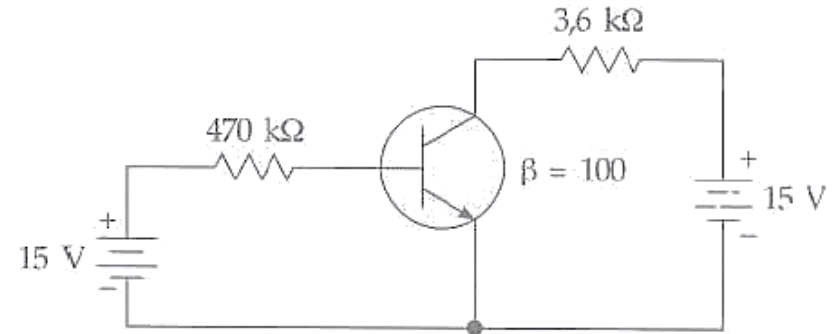
$$V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{15 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 31,9 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100(31,9 \text{ }\mu\text{A}) = 3,19 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3,19 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 3,52 \text{ V}$$

$$I_E = 3,19 \text{ mA} + 31,9 \text{ }\mu\text{A} = 3,22 \text{ mA}$$



# Aproximações do Transistor

- Segunda aproximação

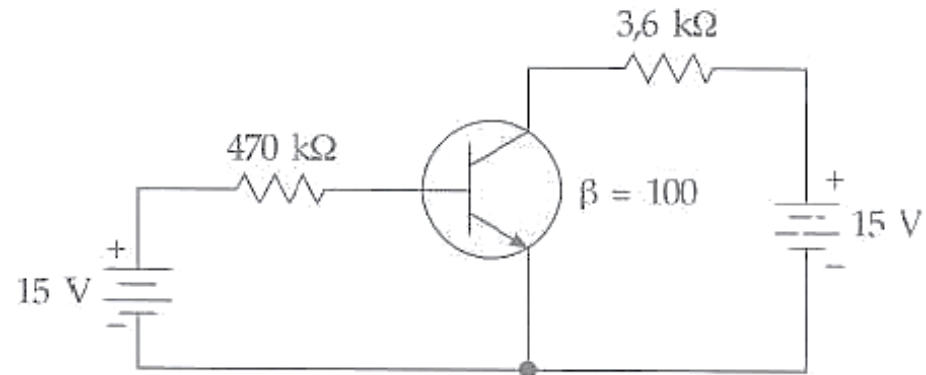
$$V_{BE} = 0,7 \text{ V.}$$

$$I_B = \frac{14,3 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 30,4 \mu\text{A}$$

$$I_C = 100(30,4 \mu\text{A}) = 3,04 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3,04 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 4,06 \text{ V}$$

Diferença entre as aproximações: 0,5V



# Aproximações do Transistor

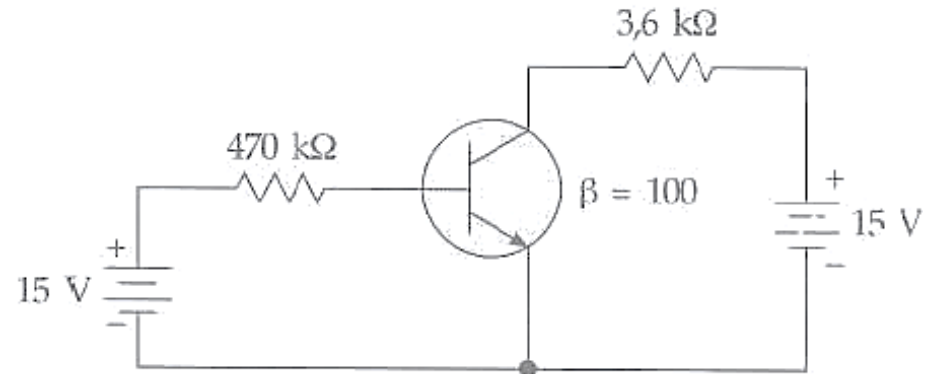
- **Terceira aproximação**

No pior caso  $V_{BE} = 1V$

$$I_B = \frac{14 V}{470 k\Omega} = 29,8 \mu A$$

$$I_C = 100(29,8 \mu A) = 2,98 mA$$

$$V_{CE} = 15 V - (2,98 mA)(3,6 k\Omega) = 4,27 V$$



Aqui a diferença para a aproximação ideal foi de 0,75V.

# Folha de Dados



**MOTOROLA**  
**Semiconductors**

BOX 20912 - PHOENIX ARIZONA 85036

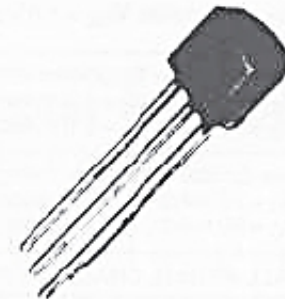
**2N3903**  
**2N3904**

## **NPN SILICON ANNULAR<sup>†</sup> TRANSISTORS**

... designed for general purpose switching and amplifier applications and for complementary circuitry with types 2N3905 and 2N3906.

- High Voltage Ratings —  $BV_{CEO} = 40$  Volts (Min)
- Current Gain Specified from 100  $\mu$ A to 100 mA
- Complete Switching and Amplifier Specifications
- Low Capacitance —  $C_{ob} = 4.0$  pF (Max)

**NPN SILICON  
SWITCHING & AMPLIFIER  
TRANSISTORS**



# Folha de Dados

## MAXIMUM RATINGS

| Rating   | Symbol    | Value       | Unit                          |
|--|-----------|-------------|-------------------------------|
| * Collector-Base Voltage   | $V_{CB}$  | 60          | Vdc                           |
| * Collector-Emitter Voltage  | $V_{CE0}$ | 40          | Vdc                           |
| * Emitter-Base Voltage   | $V_{EB}$  | 6.0         | Vdc                           |
| * Collector Current  | $I_C$     | 200         | mAdc                          |
| Total Power Dissipation @ $T_A = 60^\circ\text{C}$                                       | $P_D$     | 250         | mW                            |
| ** Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$<br>Derate above $25^\circ\text{C}$ | $P_D$     | 350<br>2.8  | mW<br>mW/ $^\circ\text{C}$    |
| ** Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$<br>Derate above $25^\circ\text{C}$ | $P_D$     | 1.0<br>8.0  | Watts<br>mW/ $^\circ\text{C}$ |
| ** Junction Operating Temperature  | $T_J$     | 150         | $^\circ\text{C}$              |
| ** Storage Temperature Range   | $T_{stg}$ | -55 to +150 | $^\circ\text{C}$              |

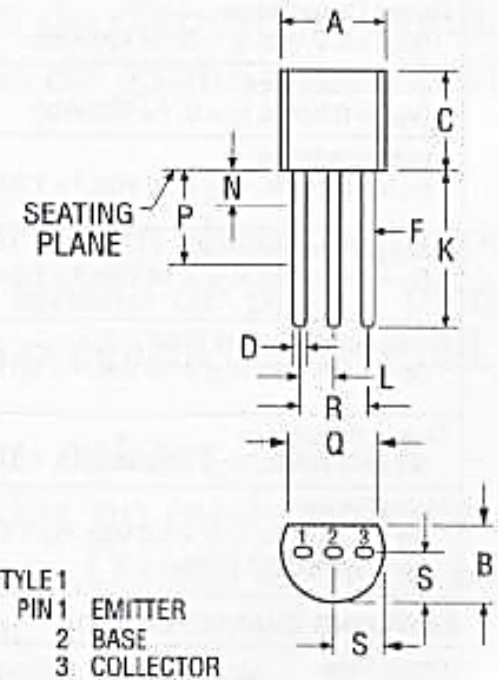
## THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic                          | Symbol          | Value | Unit               |
|---|-----------------|-------|--------------------|
| Thermal Resistance, Junction to Ambient | $R_{\theta JA}$ | 357   | $^\circ\text{C/W}$ |
| Thermal Resistance, Junction to Case    | $R_{\theta JC}$ | 125   | $^\circ\text{C/W}$ |

\* Indicates JEDEC Registered Data

\*\* Motorola guarantees this data in addition to the JEDEC Registered Data.

† Annular Semiconductors Patented by Motorola Inc.



| DIM | MILLIMETERS |       | INCHES |       |
|-----|-------------|-------|--------|-------|
|     | MIN         | MAX   | MIN    | MAX   |
| A   | 4.450       | 5.200 | 0.175  | 0.205 |
| B   | 3.180       | 4.190 | 0.125  | 0.165 |
| C   | 4.320       | 5.330 | 0.170  | 0.210 |
| D   | 0.407       | 0.533 | 0.016  | 0.021 |
| F   | 0.407       | 0.482 | 0.016  | 0.019 |
| K   | 12.700      | -     | 0.500  | -     |
| L   | 1.150       | 1.390 | 0.045  | 0.055 |
| N   | -           | 1.270 | -      | 0.050 |
| P   | 6.350       | -     | 0.250  | -     |
| Q   | 3.430       | -     | 0.135  | -     |
| R   | 2.410       | 2.670 | 0.095  | 0.105 |
| S   | 2.030       | 2.670 | 0.080  | 0.105 |

CASE 29-02  
TO-92

# Folha de Dados

- **Valores nominais de ruptura**

$$V_{CB} = 60V$$

$$V_{CEO} = 40V$$

Onde  $V_{CEO}$  representa a tensão do emissor para o coletor considerando a base aberta.



# Folha de Dados

- **Corrente e potência máximos**

|       |           |                                  |
|-------|-----------|----------------------------------|
| $I_C$ | 200 mA dc |                                  |
| $P_D$ | 250 mW    | (para $T_A = 60^\circ\text{C}$ ) |
| $P_D$ | 350 mW    | (para $T_A = 25^\circ\text{C}$ ) |
| $P_D$ | 1 W       | (para $T_C = 60^\circ\text{C}$ ) |

Temos aqui a potência dissipada para o pior caso que seria a  $60^\circ\text{C}$ .

Com a temperatura externa e interna menor ( $25^\circ\text{C}$ ) o transistor pode dissipar mais potência antes de queimar.  $T_C$  é a temperatura máxima do encapsulamento.

# Folha de Dados

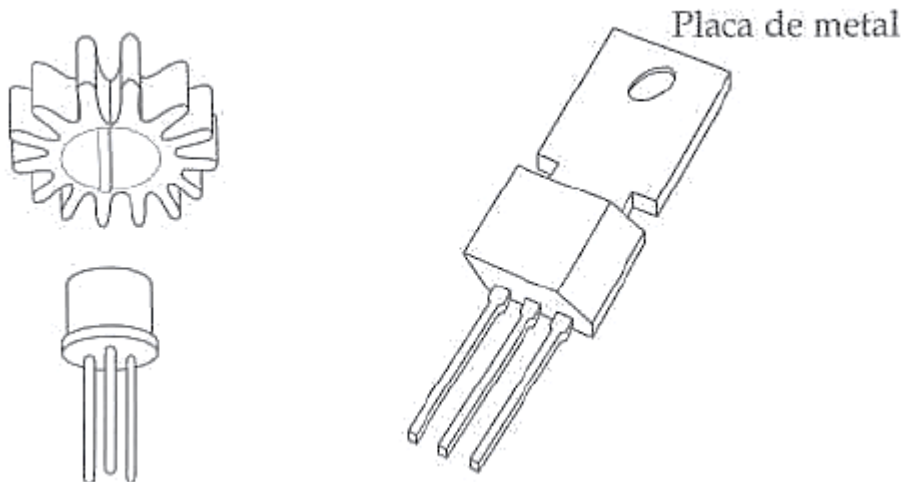
## **Fator de degradação**

Dado por  $2,8\text{mW}/^{\circ}\text{C}$  para o 2N3904.  
Significa que deve-se reduzir a potência máxima nominal considerada de  $2,8\text{mW}$  para cada grau acima dos  $25^{\circ}\text{C}$ .

# Folha de Dados

- **Dissipadores de Calor (*resistências térmicas*)**

Uma forma de aumentar a potência nominal do transistor é retirando o calor interno. Uma forma é utilizando um dissipador de calor que consiste em aumentar a superfície do encapsulamento permite maior troca de calor com o ambiente



# Folha de Dados

- **Ganho de corrente**

Uma outra representação para o ganho de corrente é:

$$\beta_{cc} = h_{FE}$$

# Folha de Dados



# Folha de Dados

## ON CHARACTERISTICS

|  |                  |        |               |           |              |     |
|--|------------------|--------|---------------|-----------|--------------|-----|
| DC Current Gain (1)<br>( $I_C = 0.1 \text{ mA dc}$ , $V_{CE} = 1.0 \text{ V dc}$ )   | 2N3903<br>2N3904 | 15     | $h_{FE}$      | 20<br>40  | -<br>-       | -   |
| ( $I_C = 1.0 \text{ mA dc}$ , $V_{CE} = 1.0 \text{ V dc}$ )  | 2N3903<br>2N3904 |        |               | 35<br>70  | -<br>-       | -   |
| ( $I_C = 10 \text{ mA dc}$ , $V_{CE} = 1.0 \text{ V dc}$ )   | 2N3903<br>2N3904 |        |               | 50<br>100 | 150<br>300   | -   |
| ( $I_C = 50 \text{ mA dc}$ , $V_{CE} = 1.0 \text{ V dc}$ )   | 2N3903<br>2N3904 |        |               | 30<br>60  | -<br>-       | -   |
| ( $I_C = 100 \text{ mA dc}$ , $V_{CE} = 1.0 \text{ V dc}$ )  | 2N3903<br>2N3904 |        |               | 15<br>30  | -<br>-       | -   |
| Collector-Emitter Saturation Voltage (1)<br>( $I_C = 10 \text{ mA dc}$ , $I_B = 1.0 \text{ mA dc}$ )<br>( $I_C = 50 \text{ mA dc}$ , $I_B = 5.0 \text{ mA dc}$ ) |                  | 16, 17 | $V_{CE(sat)}$ | -<br>-    | 0.2<br>0.3   | Vdc |
| Base-Emitter Saturation Voltage (1)<br>( $I_C = 10 \text{ mA dc}$ , $I_B = 1.0 \text{ mA dc}$ )<br>( $I_C = 50 \text{ mA dc}$ , $I_B = 5.0 \text{ mA dc}$ )      |                  | 17     | $V_{BE(sat)}$ | 0.65<br>- | 0.85<br>0.95 | Vdc |

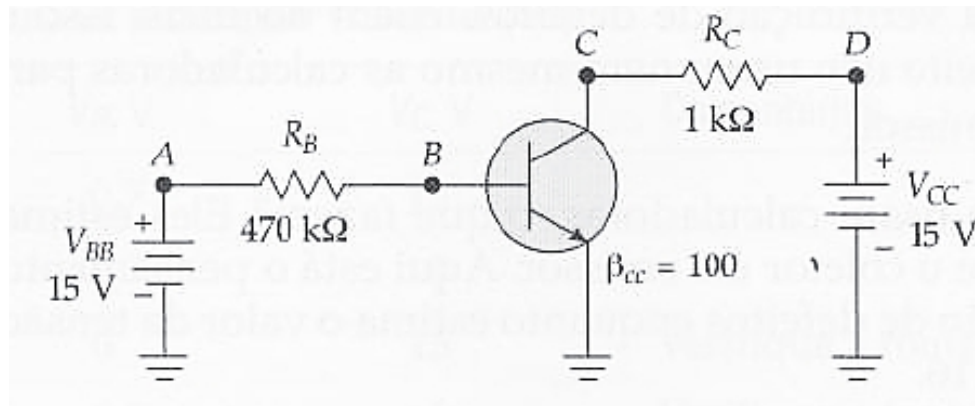
# Folha de Dados

A interpretação da folha de dados diz que o 2N3904 funciona melhor quando sua corrente  $I_C$  está próxima de 10mA. Com esse nível, o ganho de corrente estará entre 100 e 300.

Observe que para os demais valores de corrente o ganho mínimo (pior caso) é inferior a 100.

# Verificação de Defeitos

- Seja  $R_B$  o resistor da base. Chamaremos de  $R_{BS}$  esse resistor em curto e  $R_{BO}$  o resistor aberto.
- Da mesma forma seja  $R_C$  o resistor do coletor. Chamaremos de  $R_{CS}$  esse resistor em curto e  $R_{CO}$  o resistor aberto.
- Considerando os circuito abaixo, a verificação de defeitos para ele seria como nas tabelas a seguir.





# Verificação de Defeitos

| Defeitos | $V_B, V$ | $V_C, V$ | Comentários                     |
|----------|----------|----------|---------------------------------|
| Nenhum   | 0,7      | 12       | Sem defeito                     |
| $R_{BS}$ | 15       | 0        | Transistor queimado             |
| $R_{BO}$ | 0        | 15       | Sem corrente na base ou coletor |

| Defeitos     | $V_B, V$ | $V_C, V$ | Comentários                      |
|--------------|----------|----------|----------------------------------|
| $R_{CS}$     | 0,7      | 15       |                                  |
| $R_{CO}$     | 0,7      | 0        |                                  |
| Sem $V_{BB}$ | 0        | 15       | Verifique a fonte e os terminais |
| Sem $V_{CC}$ | 0,7      | 0        | Verifique a fonte e os terminais |