

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1: O Transistor Bipolar de Junção

O Transistor Bipolar de Junção - TBJ (*Bipolar Junction Transistor – BJT*) é um dispositivo semicondutor constituído por três camadas de material extrínseco, podendo ser um:

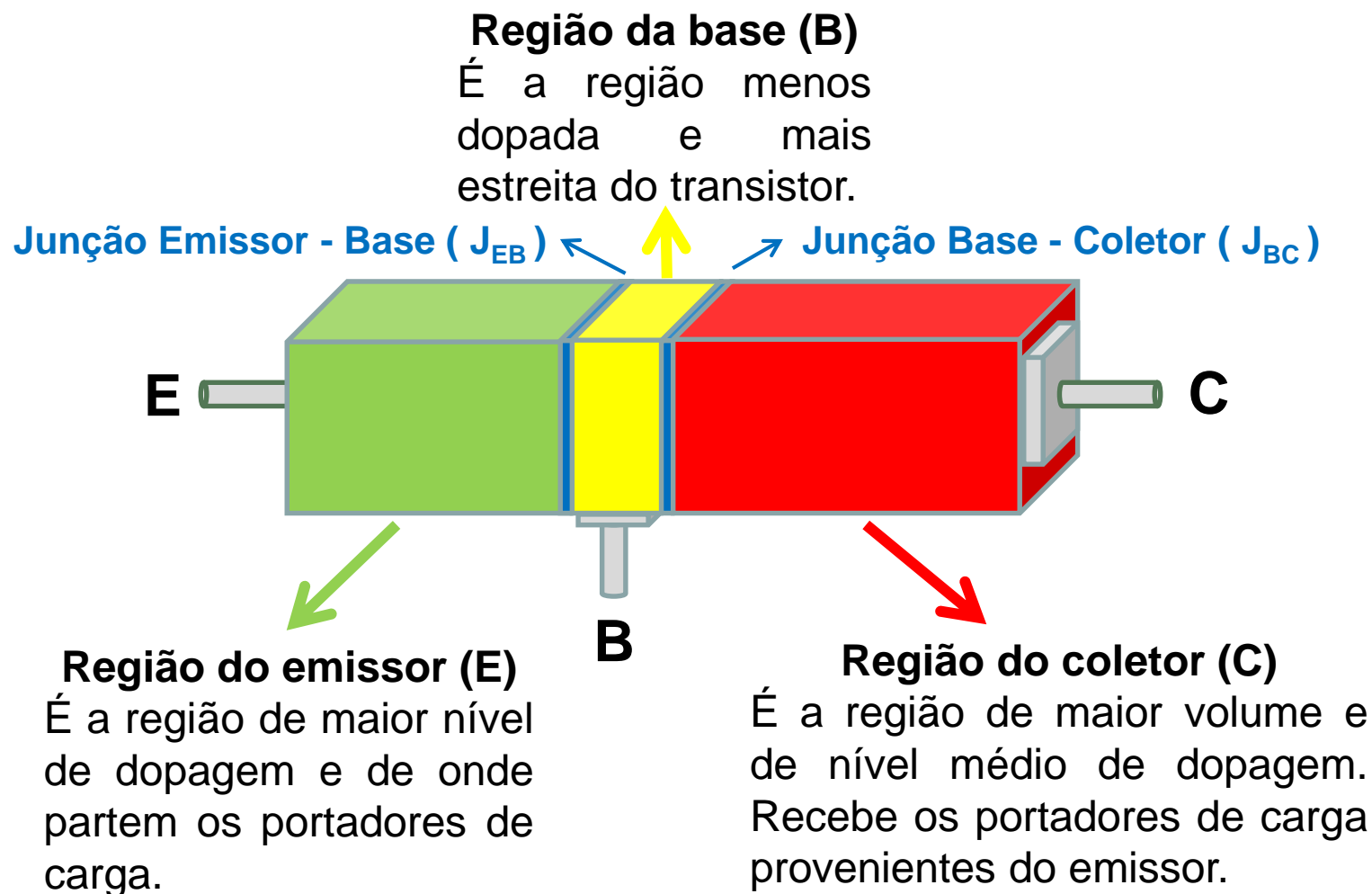
Transistor pnp : Formado por duas camadas externas do tipo **p** e uma interna do tipo **n**

Transistor npn : Formado por duas camadas externas do tipo **n** e uma interna do tipo **p**

Unipolar: Condução só por Elétrons ou só por Lacunas
Bipolar: Condução por Elétrons e Lacunas

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.1: Construção do TBJ



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ
1.1.2: Modos de Operação

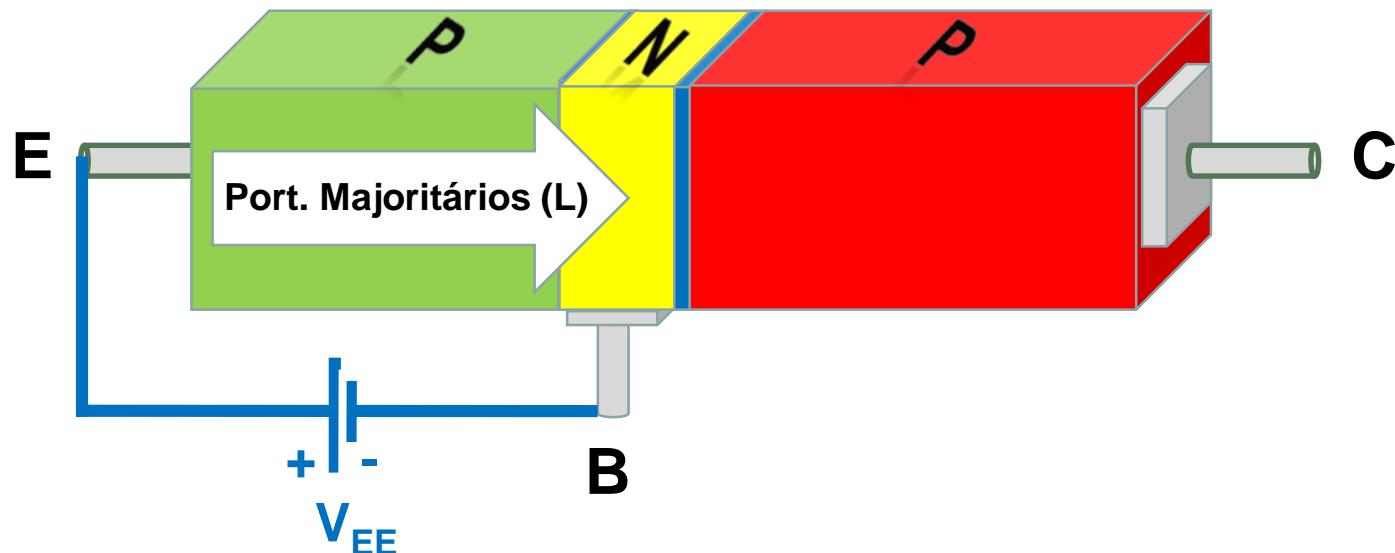
| MODOS DE OPERAÇÃO DO TBJ | | |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Modo | J_{EB} | J_{BC} |
| CORTE | Reversa | Reversa |
| SATURAÇÃO | Direta | Direta |
| ATIVO | Direta | Reversa |
| ATIVO REVERSO | Reversa | Direta |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3: Operação no Modo Ativo

Transistor pnp no Modo Ativo: Polarização da J_{EB}

Com a polarização direta da J_{EB} a sua região de depleção tem a largura diminuída e é estabelecido um fluxo denso de portadores majoritários (lacunas) da região p (emissor) para a região n (base).

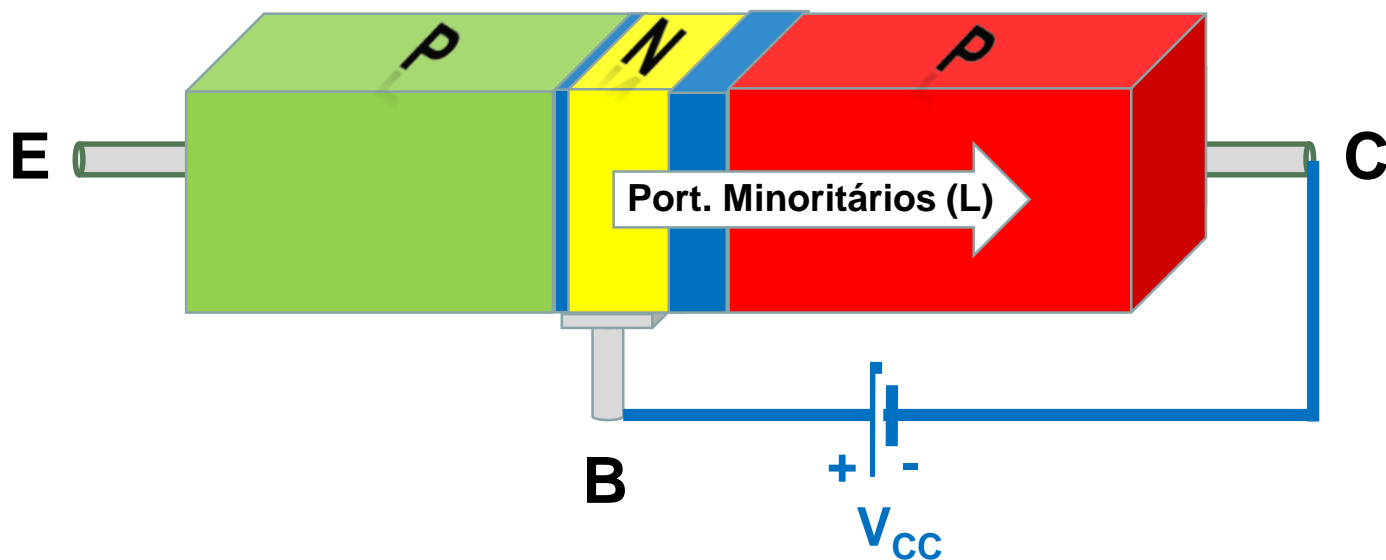


Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3: Operação no Modo Ativo

Transistor pnp no Modo Ativo: Polarização da J_{BC}

Com a polarização reversa da J_{BC} a sua região de depleção tem a largura aumentada fazendo com que o fluxo de portadores majoritários (lacunas) da região p (coletor) para a região n (base) seja nulo. Entretanto, haverá um fluxo de portadores minoritários (lacunas) da região n (base) para a região p (coletor).

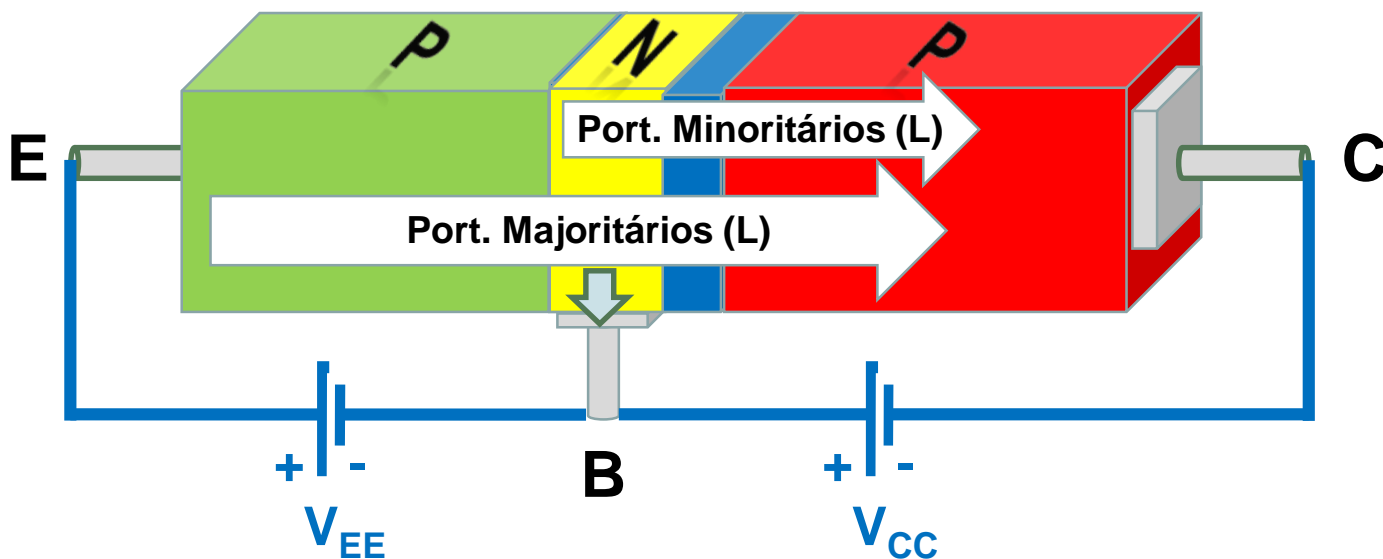


Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3: Operação no Modo Ativo

Transistor pnp no Modo Ativo

A região da base, por ser estreita e pouco dopada, apresenta baixa condutividade. Assim, a maior parte dos portadores majoritários vindos do emissor entrará via J_{BC} na região **p** do coletor, enquanto apenas alguns poucos deles irão para o terminal da base. Dessa forma, teremos uma corrente entre emissor e coletor da ordem de miliampères enquanto a corrente de base será da ordem microampères.



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

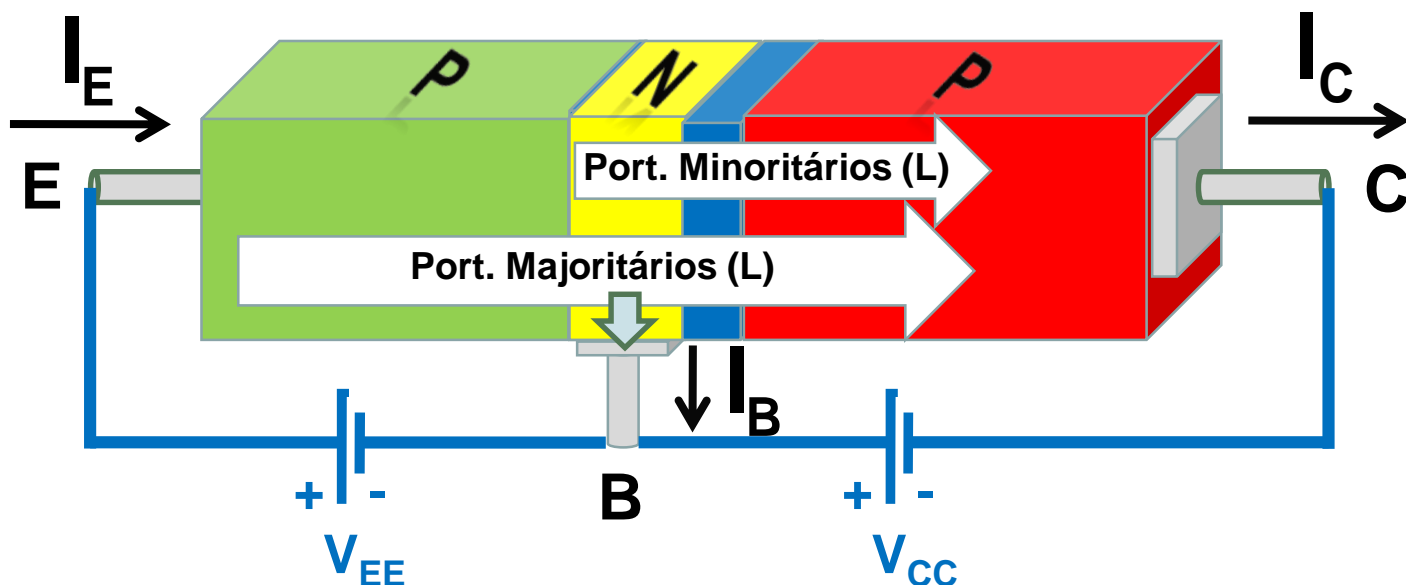
1.1.3: Operação no Modo Ativo

Transistor pnp no Modo Ativo

Portanto, temos:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = I_{C\text{majoritário}} + I_{C\text{minoritário}} (I_{CO})$$



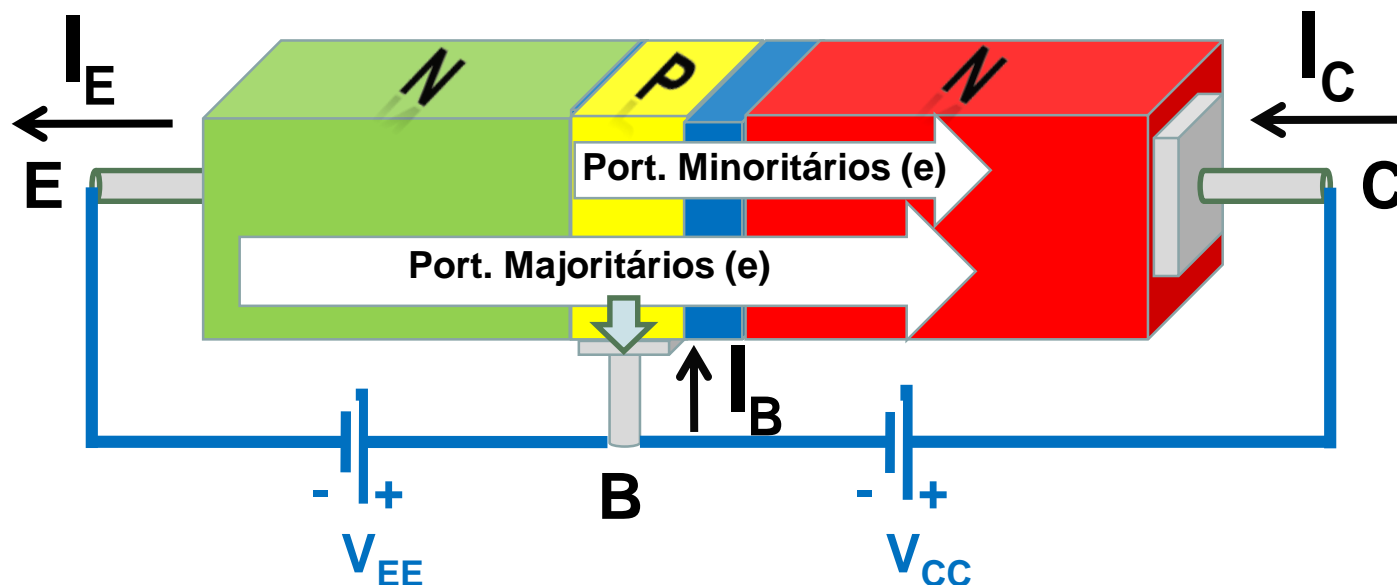
Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3: Operação no Modo Ativo

Transistor npn no Modo Ativo

$$I_E = I_C + I_B$$

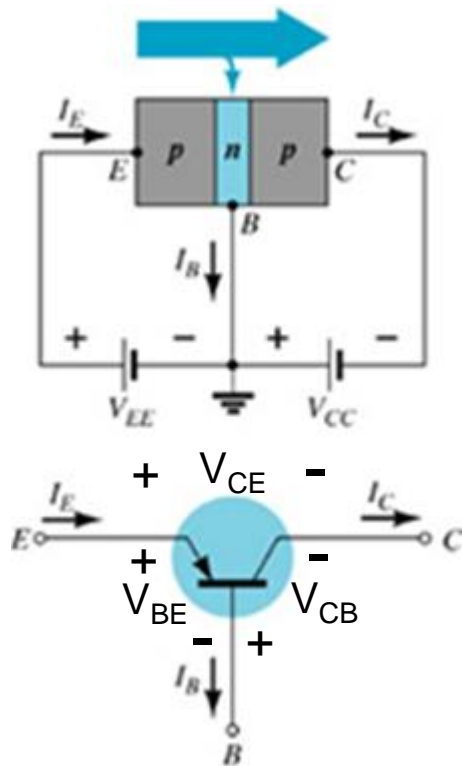
$$I_C = I_{C\text{majoritários}} + I_{C\text{minoritários}} (I_{CO})$$



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

Transistor pnp

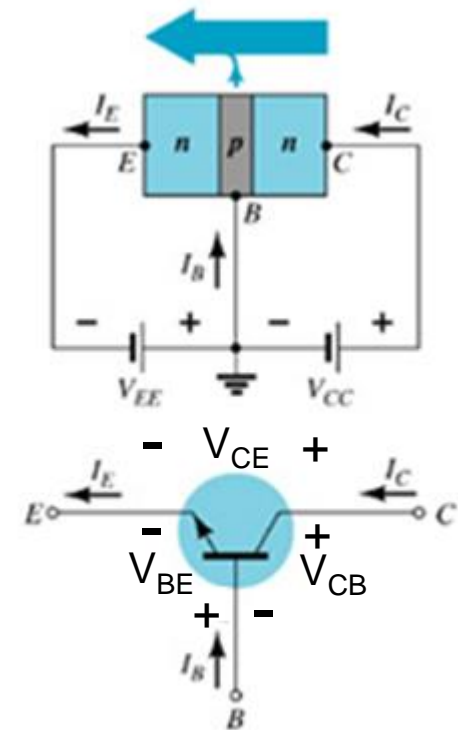


$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Típico: $0,9 < \alpha < 0,998$

Transistor npn

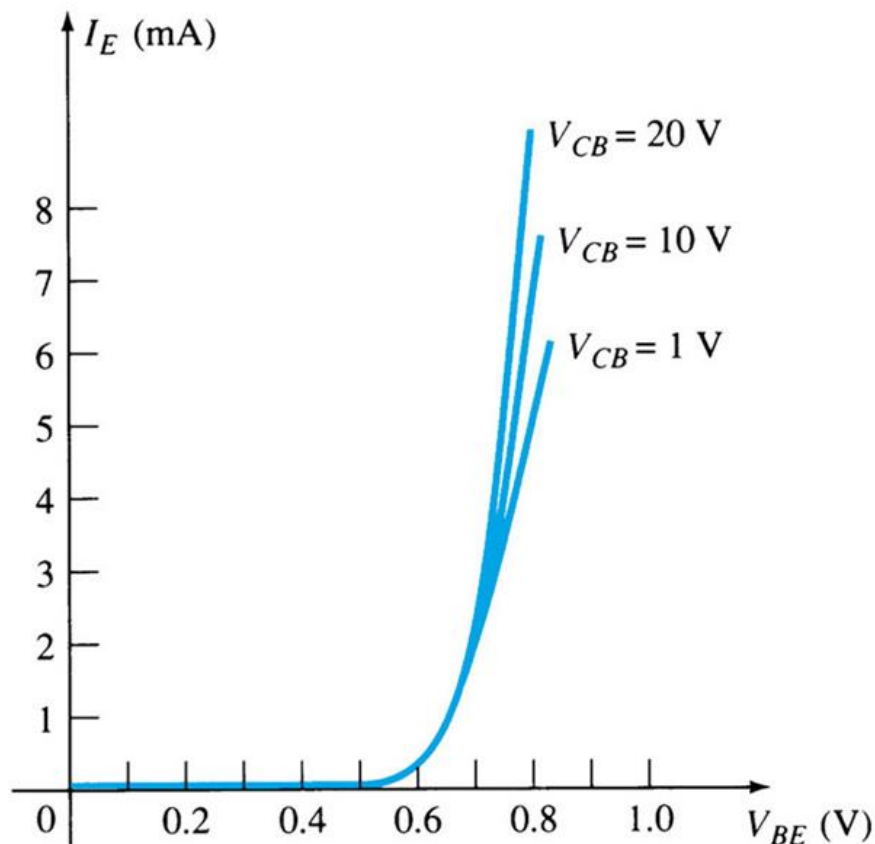


Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

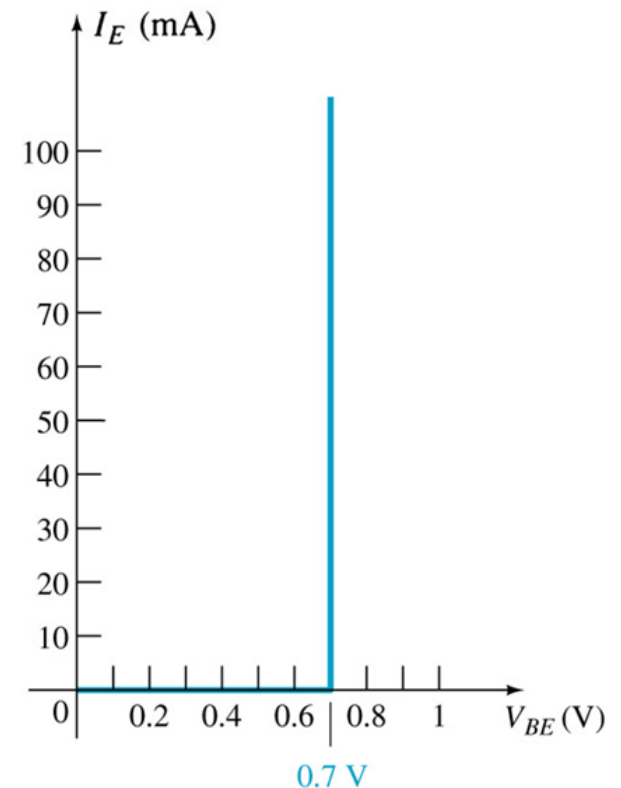
Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Curvas Características de Entrada



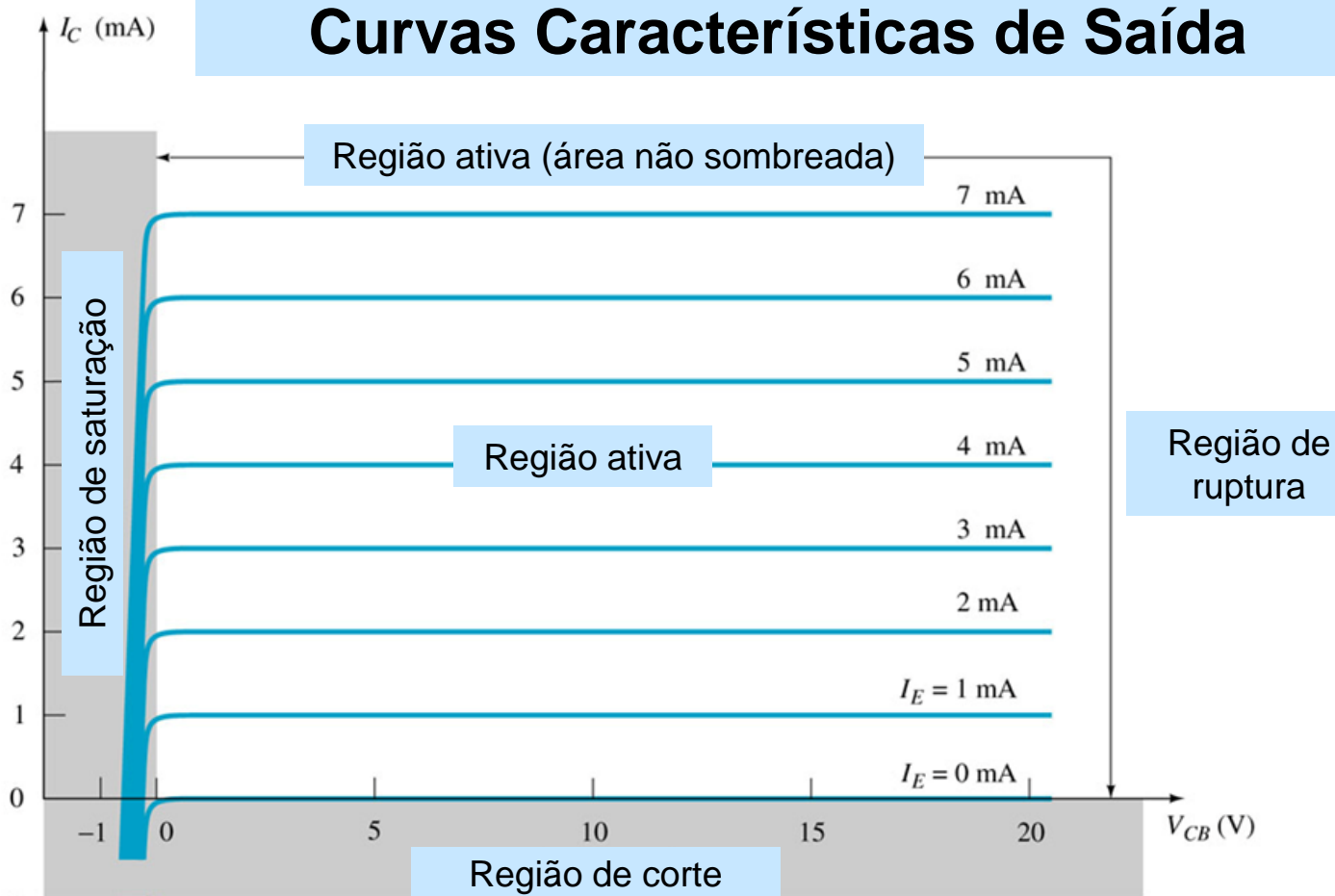
III

Curva Aproximada



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

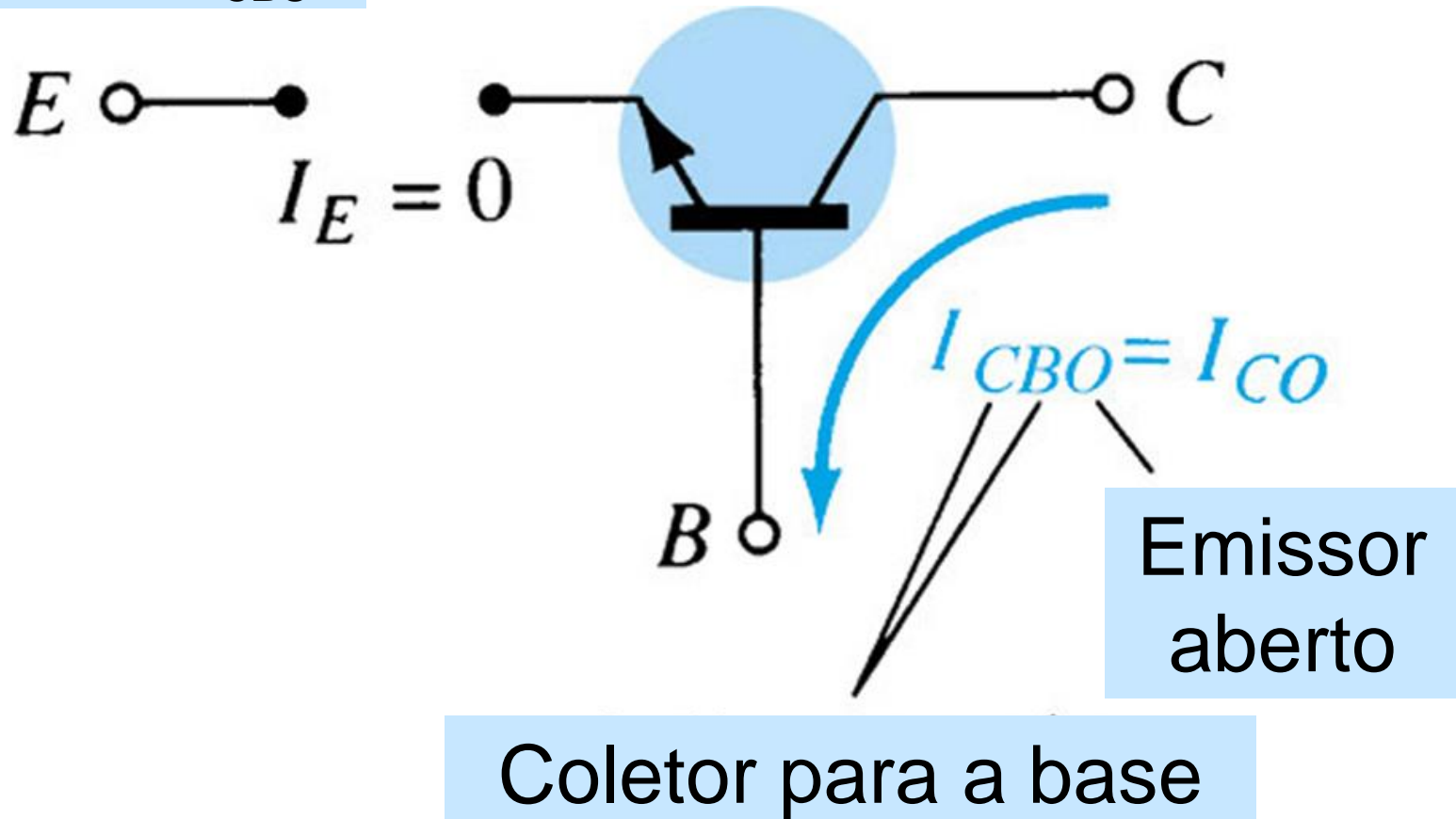


Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

A Corrente I_{CBO}



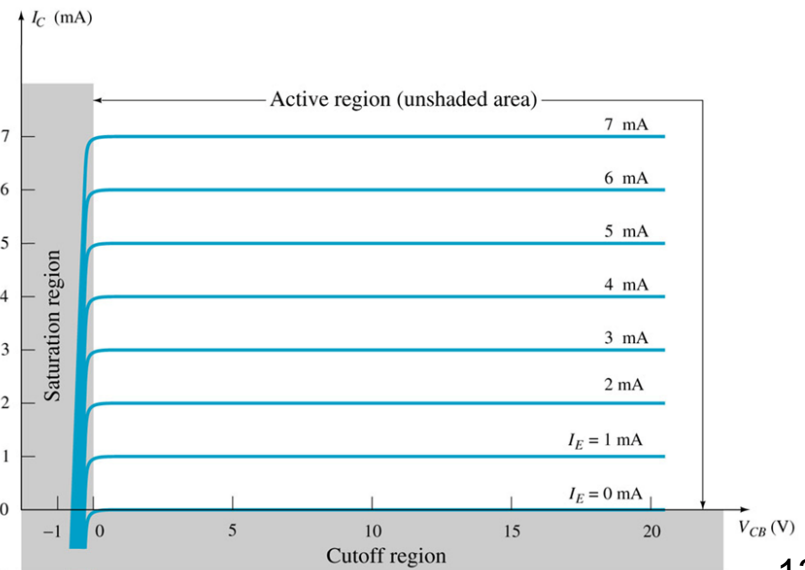
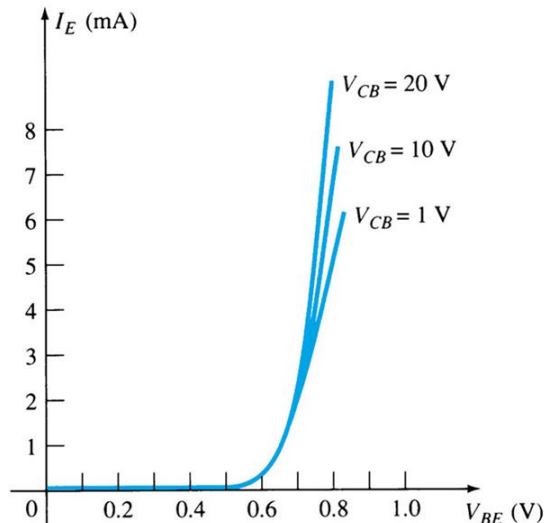
Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Exemplo 3.1: A partir das curvas características de um transistor na configuração base comum, apresentadas abaixo, determine:

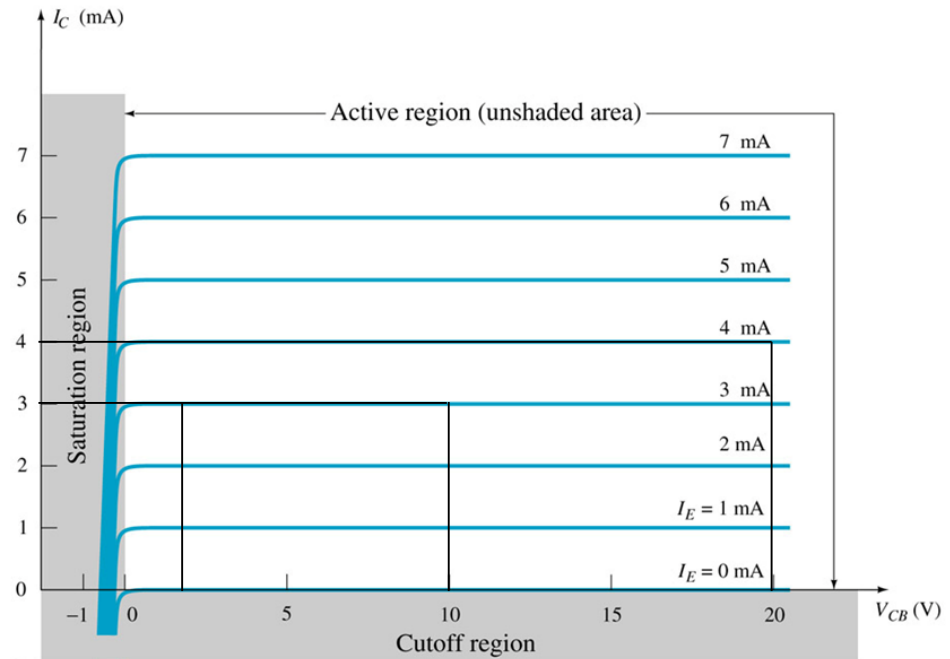
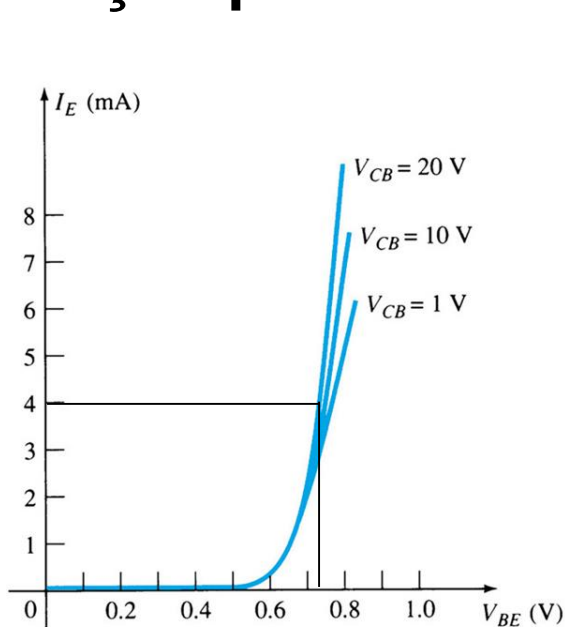
- o valor de I_C para $I_E = 3$ [mA] e $V_{CB} = 10$ [V];
- o valor de I_C para $I_E = 3$ [mA] e $V_{CB} = 2$ [V];
- o valor de V_{BE} para $I_C = 4$ [mA] e $V_{CB} = 20$ [V];
- o valor de V_{BE} , utilizando-se a curva característica aproximada de entrada.



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.1: Configuração Base Comum (BC)

Solução para o Exemplo 3.1



Respostas

| | |
|--------------|------|
| I_C [mA] | 3 |
| I_C [mA] | 3 |
| V_{BE} [V] | 0,74 |
| V_{BE} [V] | 0,74 |

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

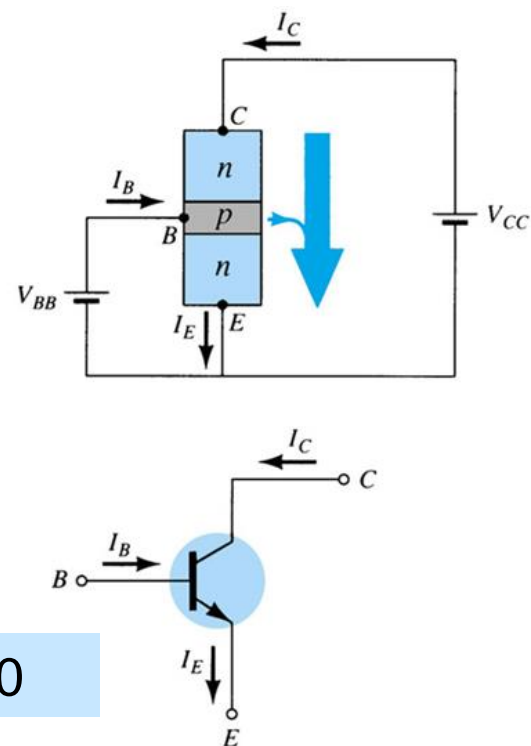
Transistor pnp

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Típico: $50 < \beta < 400$

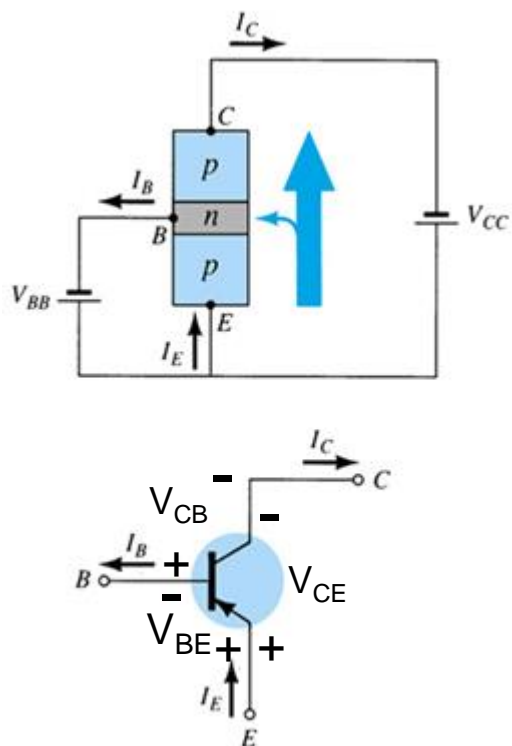
Transistor npn



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Transistor pnp



$$I_E = I_C + I_B$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Típico: $50 < \beta < 400$

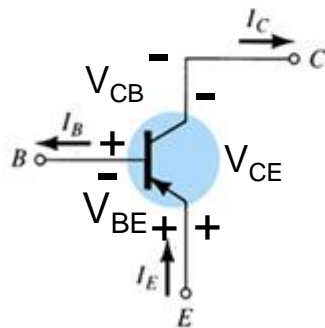
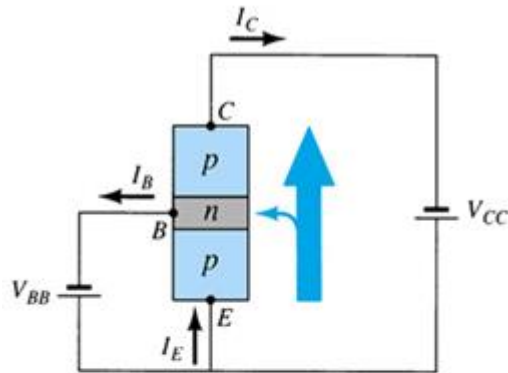
Transistor npn

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Transistor pnp

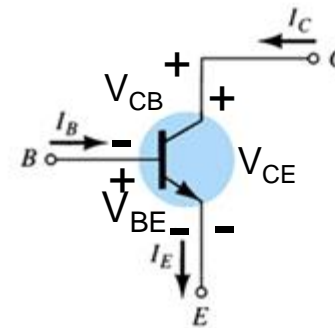
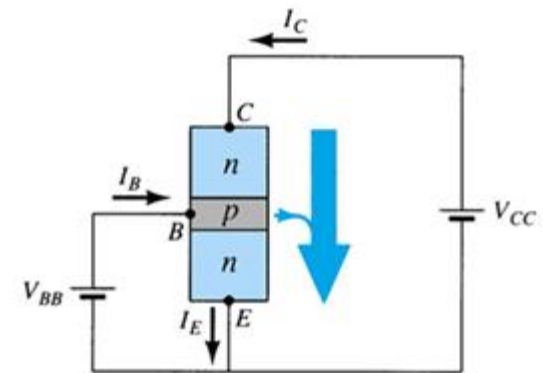


$$I_E = I_C + I_B$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\text{Típico: } 50 < \beta < 400$$

Transistor npn

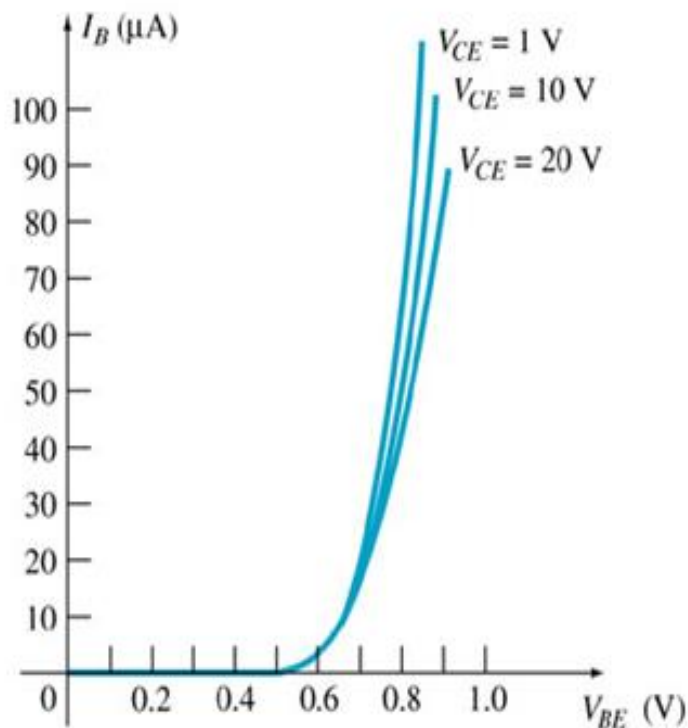


Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

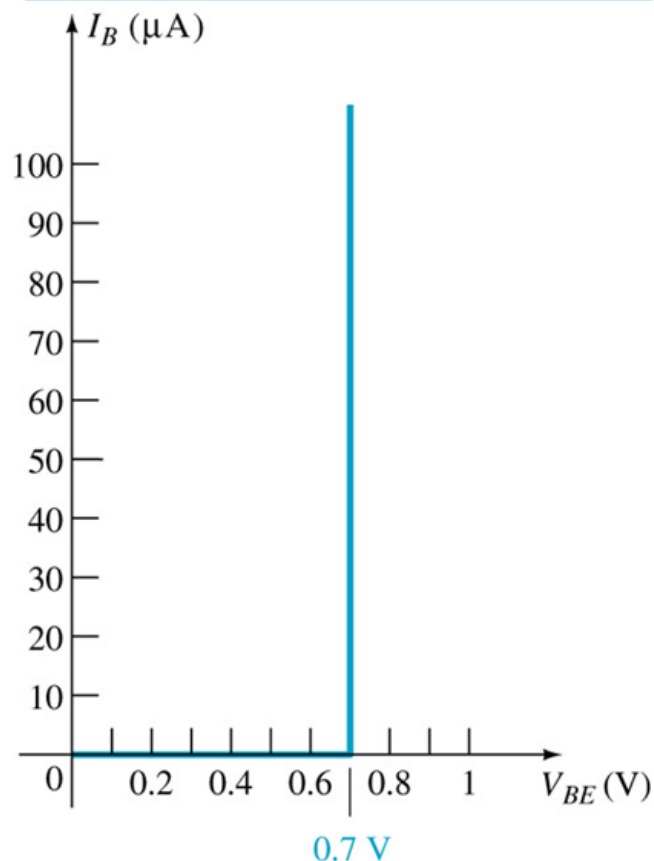
1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Curvas Características de Entrada



~

Curva Aproximada

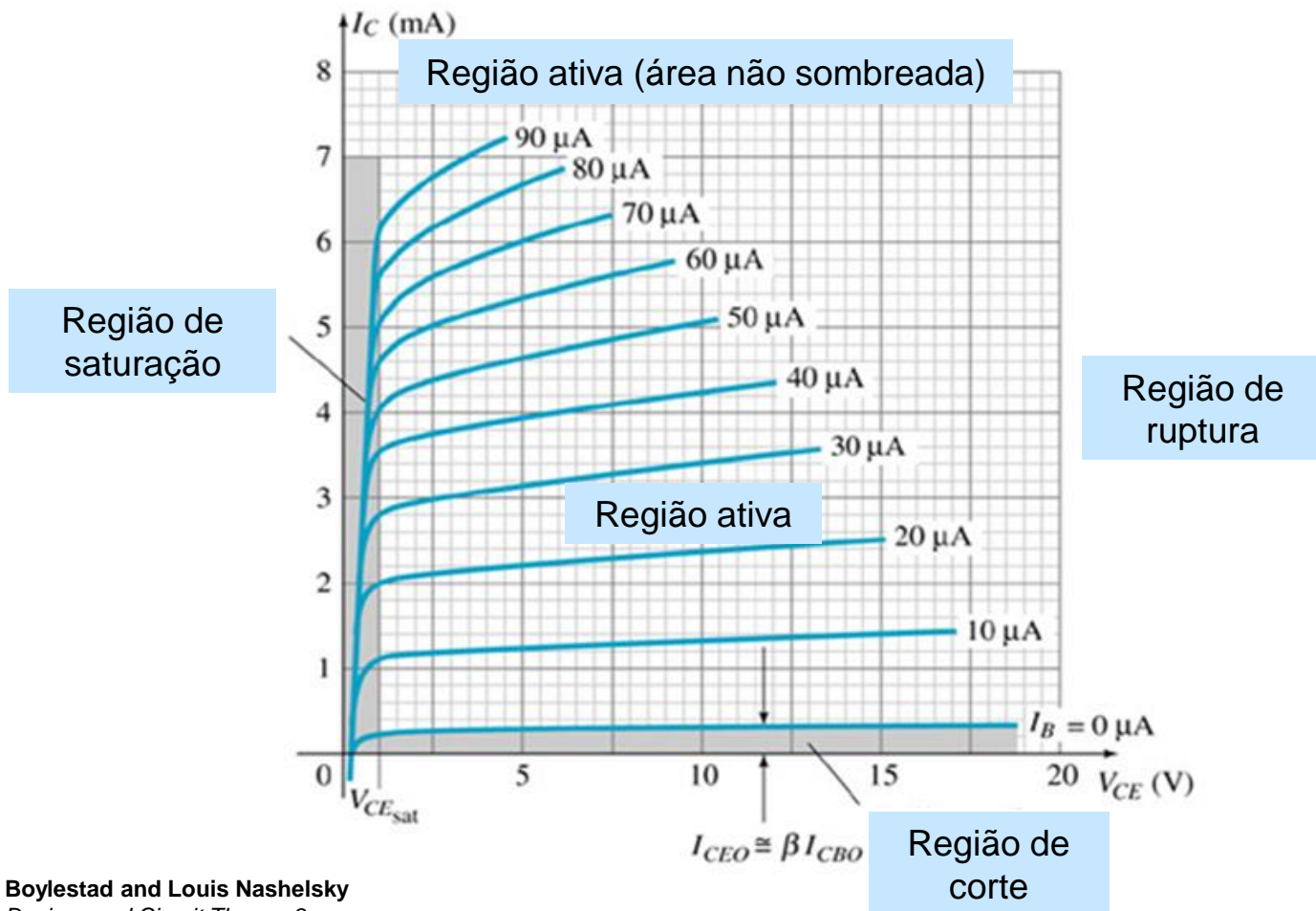


Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Curvas Características de Saída



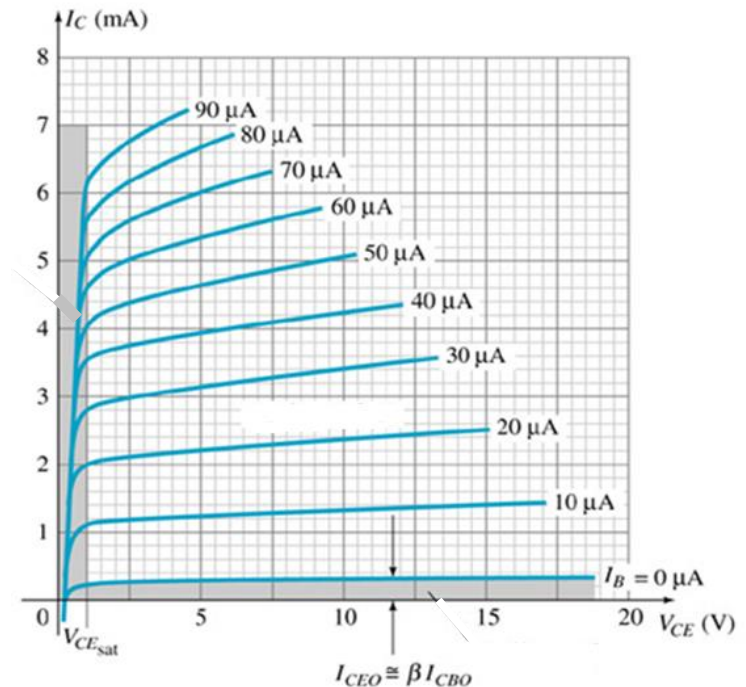
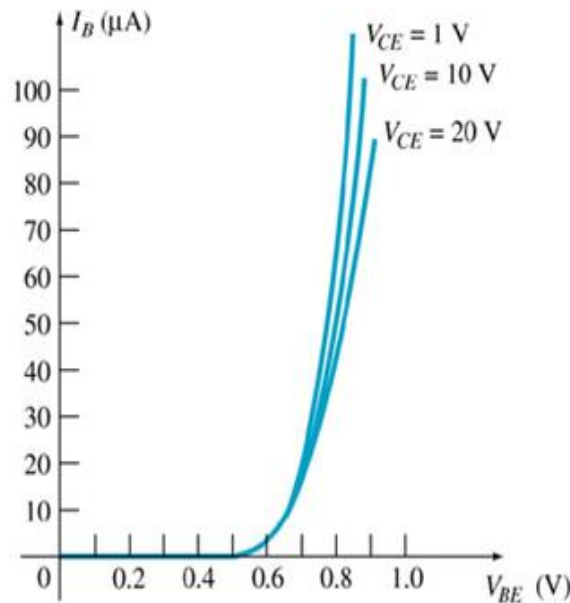
Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Exemplo 3.2: A partir das curvas características de um transistor na configuração emissor comum, apresentadas abaixo, determine:

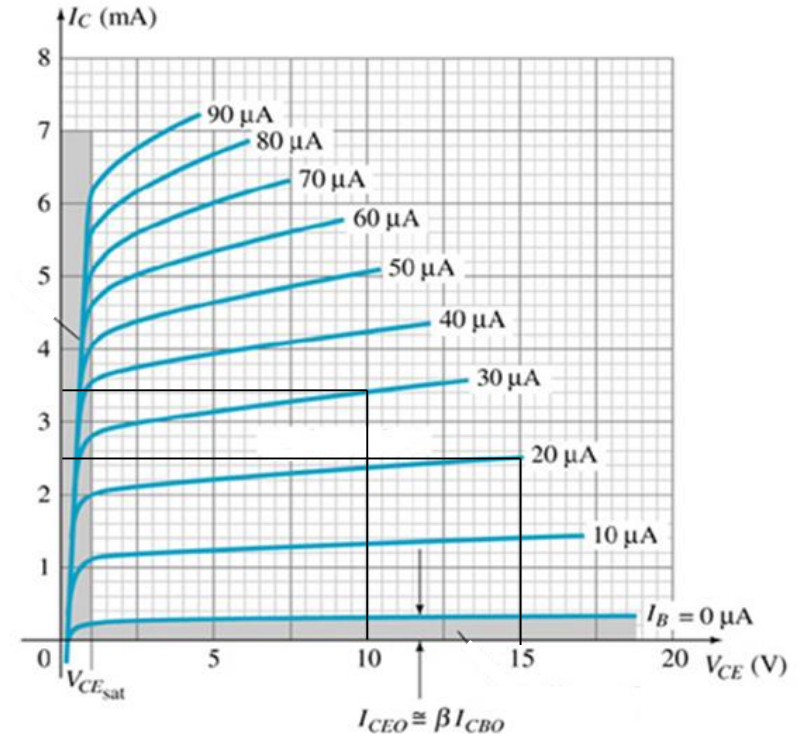
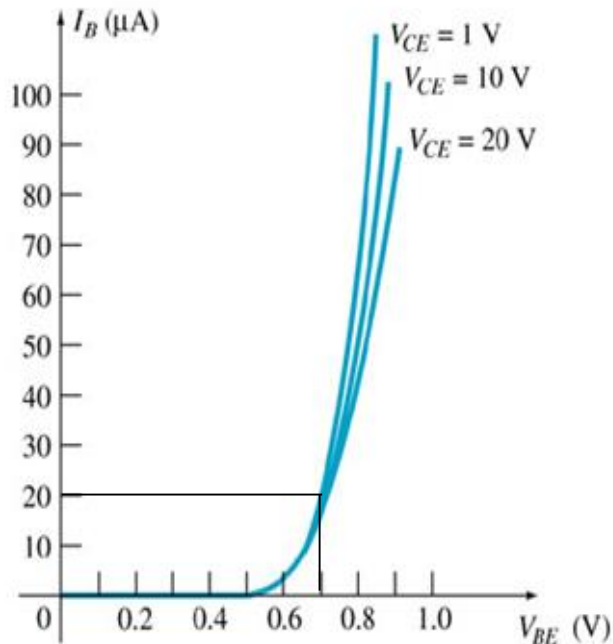
- o valor de I_C para $I_B = 30 \text{ } \mu\text{A}$ e $V_{CE} = 10 \text{ V}$
- o valor de I_C para $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{CE} = 15 \text{ V}$



Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.2: Configuração Emissor Comum (EC)

Solução para o Exemplo 3.2



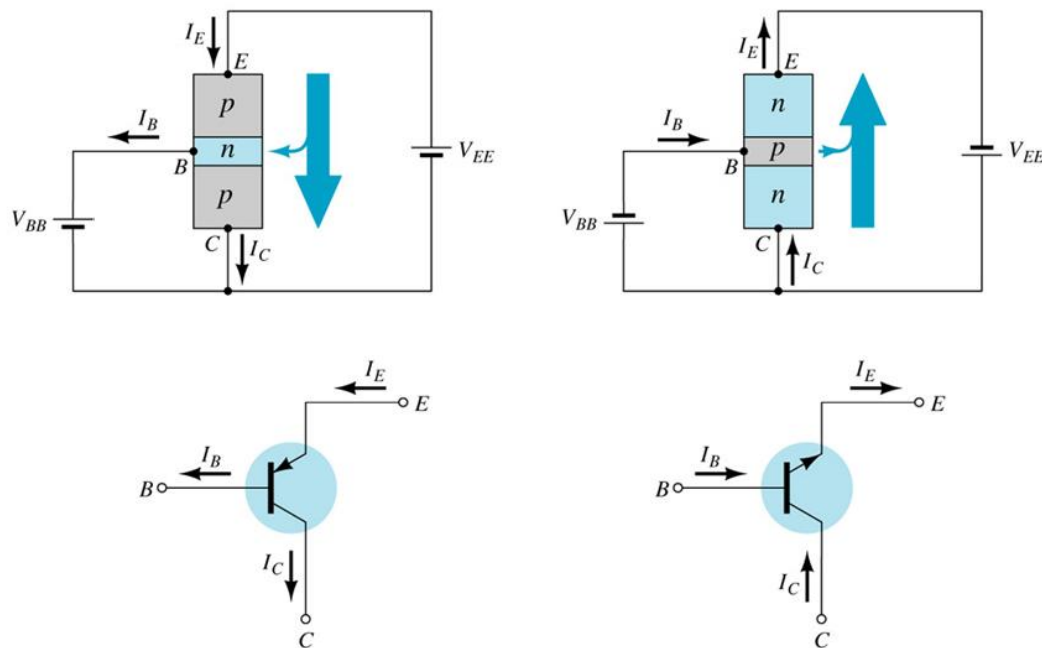
Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

| Respostas | |
|------------|-----|
| I_C [mA] | 3,4 |
| I_C [mA] | 2,5 |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.3.3: Configuração Coletor Comum (CC)

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

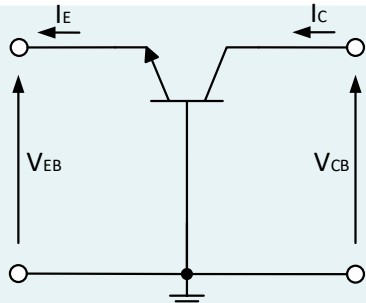
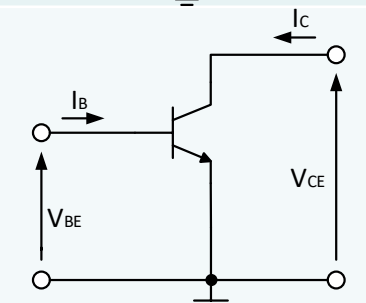
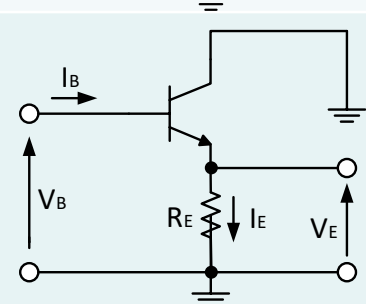


Essa configuração apresenta valores elevados de impedância de entrada (Z_{in}), baixos de impedância de saída (Z_{out}) e ganho de tensão (G_v) aproximadamente igual a unidade. É usada, principalmente, como isolador de impedâncias.

Suas curvas características são similares às curvas da configuração EC, bastando trocar I_C por I_E nas curvas características de saída.

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.4: Análise Comparativa entre as Configurações BC, EC e CC

| Configuração | | Z_i | Z_o | G_i | G_v |
|--|----|---|--|---|---|
|  | BC | $Z_i = \frac{V_{EB}}{I_E}$ <p>Muito Baixa</p> | Média | $G_i = \frac{I_C}{I_E} = \alpha$ <p>< 1</p> | $G_v = \frac{V_{CB}}{V_{EB}}$ <p>Alto</p> |
|  | EC | $Z_i = \frac{V_{BE}}{I_B}$ <p>Média</p> | <p>Média</p> <p>Um pouco menor do que BC</p> | $G_i = \frac{I_C}{I_B} = \beta$ <p>Alto</p> | $G_v = \frac{V_{CE}}{V_{BE}}$ <p>Alto</p> |
|  | CC | $Z_i = \frac{V_B}{I_B}$ <p>Muito Alta</p> | Muito Baixa | $G_i = \frac{I_E}{I_B} = \beta + 1$ <p>Alto</p> | $G_v = \frac{V_E}{V_B}$ <p>< 1</p> |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.5: Relações Básicas entre α , β , I_E , I_C , I_B , I_{CEO} e I_{CBO}

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \Rightarrow I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$\frac{I_C}{\alpha} = I_C + \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.5: Relações Básicas entre α , β , I_E , I_C , I_B , I_{CEO} e I_{CBO}

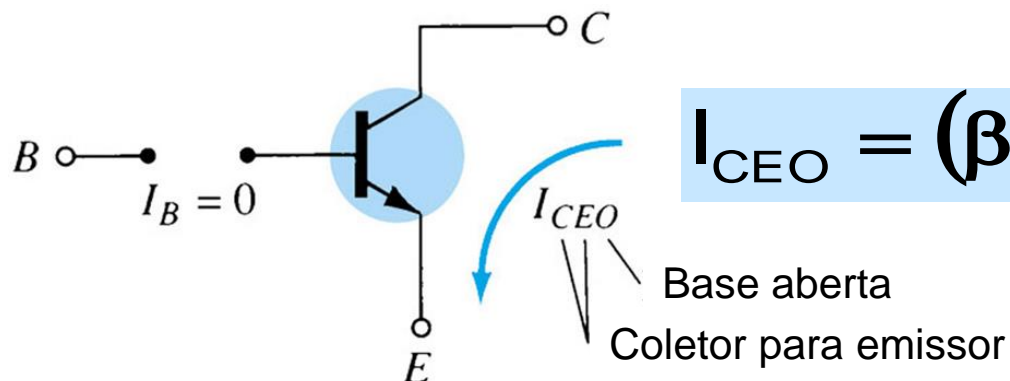
A Corrente I_{CEO}

$$I_C = I_{Cmaj} + I_{CBO} \Rightarrow I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \Rightarrow I_C = \alpha (I_C + I_B) + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$

para $I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_{CEO} = (\beta + 1) I_{CBO}$



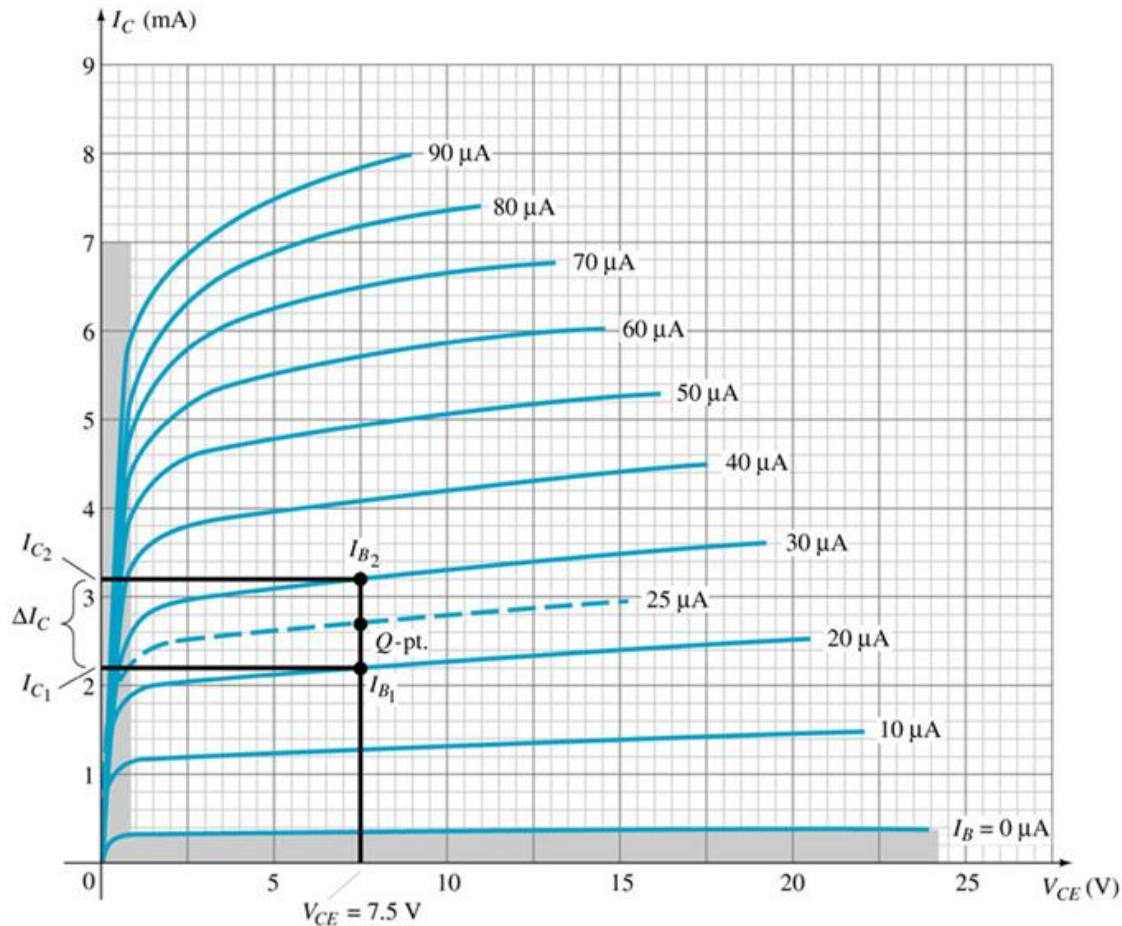
$$I_{CEO} = (\beta + 1) I_{CBO}$$

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.6: Fator de Amplificação de Corrente (β)

Determinação Gráfica de β_{cc} e β_{ac}



$$\beta_{cc} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

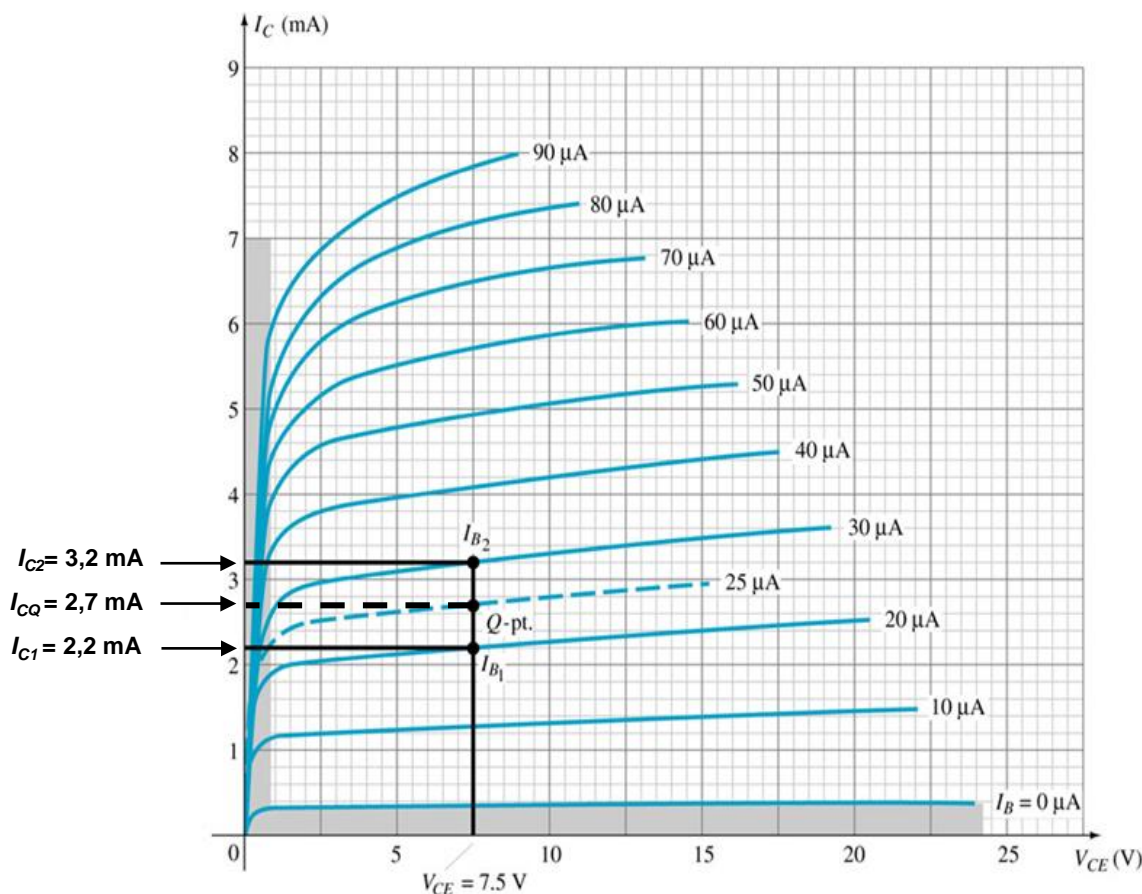
$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.6: Fator de Amplificação de Corrente (β)

Determinação Gráfica de β_{cc} e β_{ac}



$$\beta_{cc} = \frac{2,7 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-6}} = 108$$

$$\beta_{ac} = \frac{(3,2 - 2,2) \times 10^{-3}}{(30 - 20) \times 10^{-6}} = 100$$

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.7: Folha de Dados (*Data Sheet*)

Maximum Ratings @ 25°C Unless Otherwise Specified

| Charateristic | Symbol | Value | Unit |
|---|-----------------|------------|-------------|
| Collector-Emitter Voltage 2N4123 2N4124 | V_{CEO} | 30 25 | V |
| Collector-Base Voltage 2N4123 2N4124 | V_{CBO} | 40 30 | V |
| Emitter-Base Voltage 2N4123 2N4124 | V_{EBO} | 5 | V |
| Collector Current(DC) | I_C | 200 | mA |
| Power Dissipation@ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ | P_d | 625 5.0 | mW mW/°C |
| Power Dissipation@ $T_C=25^{\circ}\text{C}$ | P_d | 1.5 12 | W mW/°C |
| Thermal Resistance, Junction to Ambient Air | $R_{\Theta JA}$ | 200 | °C/W |
| Thermal Resistance, Junction to Case | $R_{\Theta JC}$ | 83.3 | °C/W |
| Operating & Storage Temperature | T_j, T_{STG} | -55~150 | °C |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.7: Folha de Dados (Data Sheet)

MCC

Micro Commercial Components
20736 Marilla Street Chatsworth
CA 91311
Phone: (818) 701-4933
Fax: (818) 701-4939

Features

- Through Hole TO-92 Package
- Capable of 625mWatts of Power Dissipation

Pin Configuration
Bottom View



Mechanical Data

- Case: TO-92, Molded Plastic
- Marking:
2N4123 ——— 2N4123
2N4124 ——— 2N4124

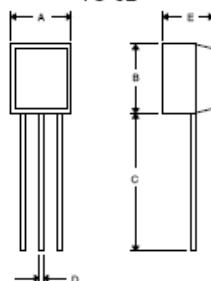
Maximum Ratings @ 25°C Unless Otherwise Specified

| Characteristic | Symbol | Value | Unit |
|--|-----------------|---------|-------|
| Collector-Emitter Voltage | V_{CE} | 30 | V |
| Collector-Base Voltage | V_{CB} | 25 | V |
| Collector-Base Voltage | V_{CB} | 40 | V |
| Emitter-Base Voltage | V_{EB} | 5 | V |
| Collector Current (DC) | I_C | 200 | mA |
| Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ | P_d | 625 | mW |
| Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ | P_d | 5.0 | mW/°C |
| Thermal Resistance, Junction to Ambient Air | $R_{\theta JA}$ | 200 | °C/W |
| Thermal Resistance, Junction to Case | $R_{\theta JC}$ | 83.3 | °C/W |
| Operating & Storage Temperature | T_j, T_{STG} | -55~150 | °C |

2N4123
2N4124

NPN Silicon General
Purpose Transistor
625mW

TO-92



| DIM | INCHES | MIN | MAX | MM | MIN | MAX |
|-----|--------|------|------|------|------|------|
| A | .175 | .185 | .195 | 4.43 | 4.70 | 4.93 |
| B | .175 | .185 | .195 | 4.43 | 4.70 | 4.93 |
| C | .500 | — | — | 12.7 | — | — |
| D | .016 | .020 | .024 | 0.41 | 0.51 | 0.61 |
| E | .135 | .145 | .155 | 3.43 | 3.68 | 3.93 |
| G | .095 | .105 | .115 | 2.42 | 2.67 | 2.93 |

DIMENSIONS

| DIM | INCHES | | MM | | NOTE |
|-----|--------|------|------|------|------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX | |
| A | .175 | .185 | 4.43 | 4.70 | |
| B | .175 | .185 | 4.43 | 4.70 | |
| C | .500 | — | 12.7 | — | |
| D | .016 | .020 | 0.41 | 0.51 | |
| E | .135 | .145 | 3.43 | 3.68 | |
| G | .095 | .105 | 2.42 | 2.67 | |

www.mccsemi.com

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.7: Folha de Dados (*Data Sheet*)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|--|---------------|----------|--------|------|
| OFF CHARACTERISTICS | | | | |
| Collector–Emitter Breakdown Voltage ⁽¹⁾ ($I_C = 1.0 \text{ mAdc}$, $I_E = 0$) | $V_{(BR)CEO}$ | 30 25 | — — | Vdc |
| Collector–Base Breakdown Voltage ($I_C = 10 \text{ } \mu\text{Adc}$, $I_E = 0$) | $V_{(BR)CBO}$ | 40 30 | — — | Vdc |
| Emitter–Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \text{ } \mu\text{Adc}$, $I_C = 0$) | $V_{(BR)EBO}$ | 5.0 | — | Vdc |
| Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 20 \text{ Vdc}$, $I_E = 0$) | I_{CBO} | — | 50 | nAdc |
| Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 3.0 \text{ Vdc}$, $I_C = 0$) | I_{EBO} | — | 50 | nAdc |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|--|---------------|----------|------|------|
| ON CHARACTERISTICS⁽¹⁾ | | | | |
| DC Current Gain ($I_C = 2.0 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$) | h_{FE} | 50 | — | |
| ($I_C = 50 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$) | | 120 | — | |
| | | 25 60 | — | |
| Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 50 \text{ mAdc}$, $I_B = 5.0 \text{ mAdc}$) | $V_{CE(sat)}$ | — | 0.3 | Vdc |
| Base–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 50 \text{ mAdc}$, $I_B = 5.0 \text{ mAdc}$) | $V_{BE(sat)}$ | — | 0.95 | Vdc |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.7: Folha de Dados (*Data Sheet*)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|---|-----------|------------|------------|------|
| SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS | | | | |
| Current-Gain-Bandwidth Product ($I_C=10\text{mA}$, $V_{CE}=20\text{V}$, $f=100\text{MHz}$) | f_T | 250 300 | --- | MHz |
| Input Capacitance ($V_{EB}=0.5\text{V}$, $I_C=0$, $f=1.0\text{MHz}$) | C_{ibo} | --- | 8.0 | pF |
| Collector-Base Capacitance ($V_{CB}=5.0\text{V}$, $I_E=0$, $f=1.0\text{MHz}$) | C_{cb} | --- | 4.0 | pF |
| Small-Signal Current Gain ($I_C=2.0\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$, $R_S=10\text{k}\Omega$, $f=1.0\text{kHz}$) | h_{fe} | 50 120 | 200 480 | --- |
| Current Gain-High Frequency ($I_C=10\text{mA}$, $V_{CE}=20\text{V}$, $f=100\text{kHz}$) | h_{fe1} | 2.5 3.0 | --- | --- |
| ($I_C=2.0\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$, $f=1.0\text{kHz}$) | | 50 120 | 200 480 | |
| Noise Figure ($I_C=100\mu\text{A}$, $V_{CE}=5.0\text{V}$, $R_S=1.0\text{k}\Omega$, $f=1.0\text{kHz}$) | NF | --- | 6.0 5.0 | dB |

1 Pulse Test: Pulse Width = $300\mu\text{s}$, Duty Cycle = 2.0%

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.8: Limites de Operação

Parâmetros Relevantes

Dissipação máxima em coletor [$P_{C(max)}$]: P_D

Corrente contínua máxima de coletor [$I_{C(max)}$]: I_C

Tensão de ruptura coletor-emissor [$V_{CE(max)}$]: V_{CEO} ou $V_{(BR)CEO}$

Tensão de ruptura coletor-base [$V_{BC(max)}$]: V_{CBO} ou $V_{(BR)CBO}$

Tensão de ruptura emissor-base [$V_{EB(max)}$]: V_{EBO} ou $V_{(BR)EBO}$

Tensão de saturação do coletor-emissor: $V_{CE(sat)}$

Tensão de saturação do base-emissor: $V_{BE(sat)}$

Corrente de corte de coletor: I_{CBO}

Corrente de corte de emissor: I_{EBO}

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.8: Limites de Operação

Maximum Ratings @ 25°C Unless Otherwise Specified

| Charateristic | Symbol | Value | Unit |
|---|-----------------|------------|-------------|
| Collector-Emitter Voltage 2N4123 2N4124 | V_{CEO} | 30 25 | V |
| Collector-Base Voltage 2N4123 2N4124 | V_{CBO} | 40 30 | V |
| Emitter-Base Voltage 2N4123 2N4124 | V_{EBO} | 5 | V |
| Collector Current(DC) | I_C | 200 | mA |
| Power Dissipation@ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ | P_d | 625 5.0 | mW mW/°C |
| Power Dissipation@ $T_C=25^{\circ}\text{C}$ | P_d | 1.5 12 | W mW/°C |
| Thermal Resistance, Junction to Ambient Air | $R_{\theta JA}$ | 200 | °C/W |
| Thermal Resistance, Junction to Case | $R_{\theta JC}$ | 83.3 | °C/W |
| Operating & Storage Temperature | T_j, T_{STG} | -55~150 | °C |

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.8: Limites de Operação

Dissipação de Potência em Coletor

$$P_C = V_{CE} I_C \Big|_{EC}$$

$$P_C = V_{CB} I_C \Big|_{BC}$$

Limites de Operação

$$I_{CEO} \leq I_C \leq I_{C(max)}$$

$$V_{CE(sat)} \leq V_{CE} \leq V_{CE(max)}$$

$$V_{CE} I_C \leq P_{C(max)}$$

Capítulo 1: Transistores Bipolares de Junção - TBJ

1.1.8: Limites de Operação

Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky
Electronic Devices and Circuit Theory, 8e

Curva de Potência Máxima

