

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.

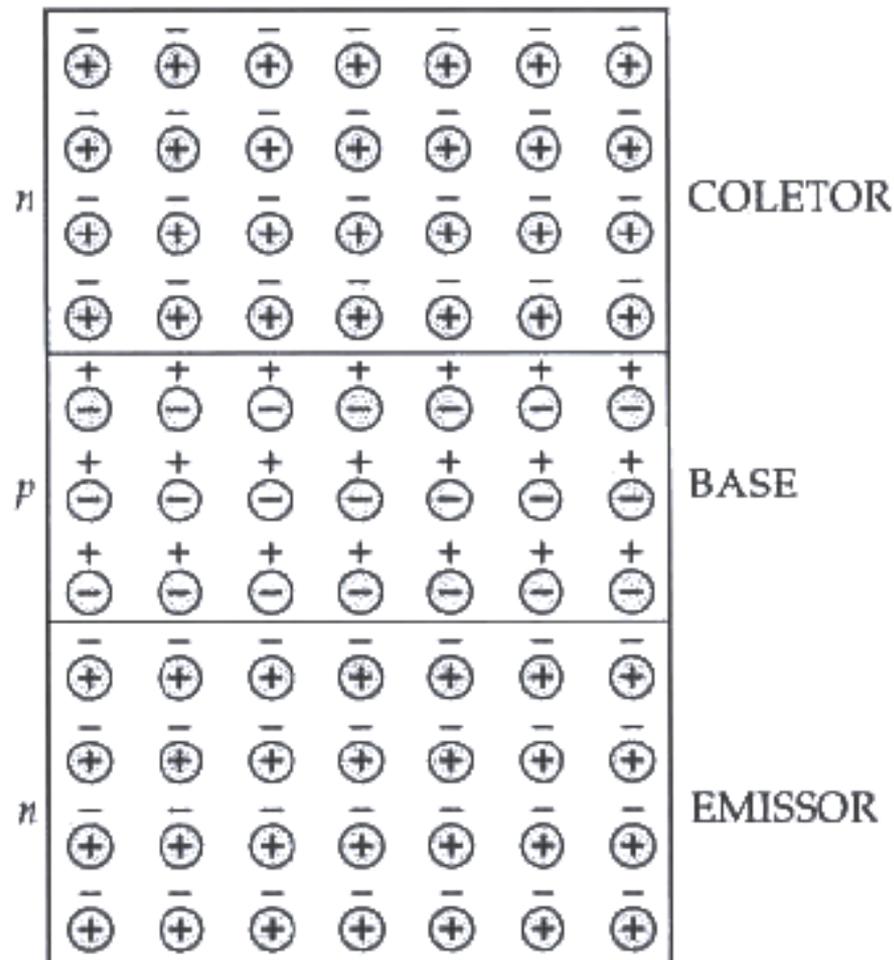
Shockley

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

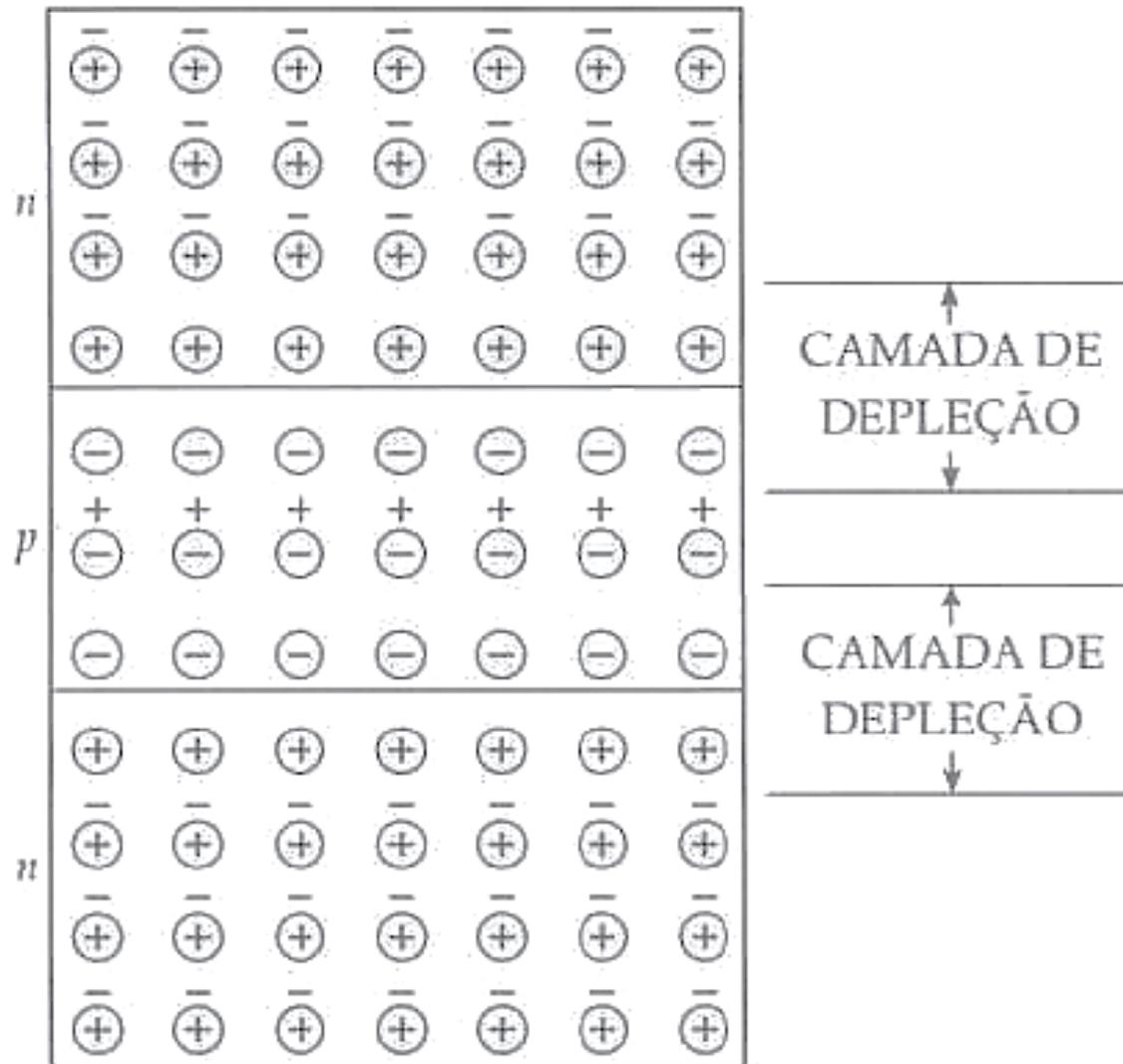
Três regiões dopadas: *npn* ou *pnp*



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

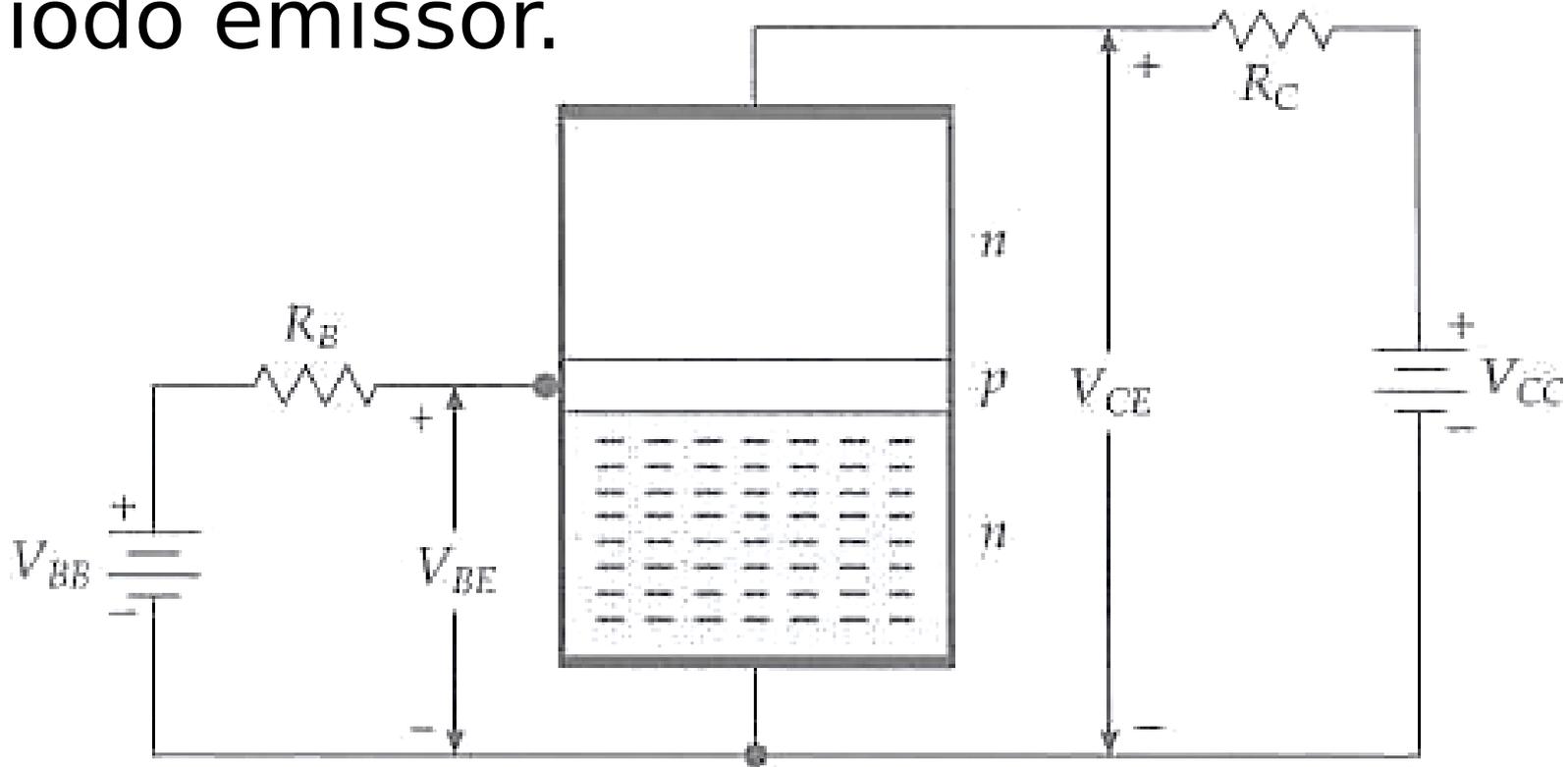
- **Elétrons no Emissor**

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

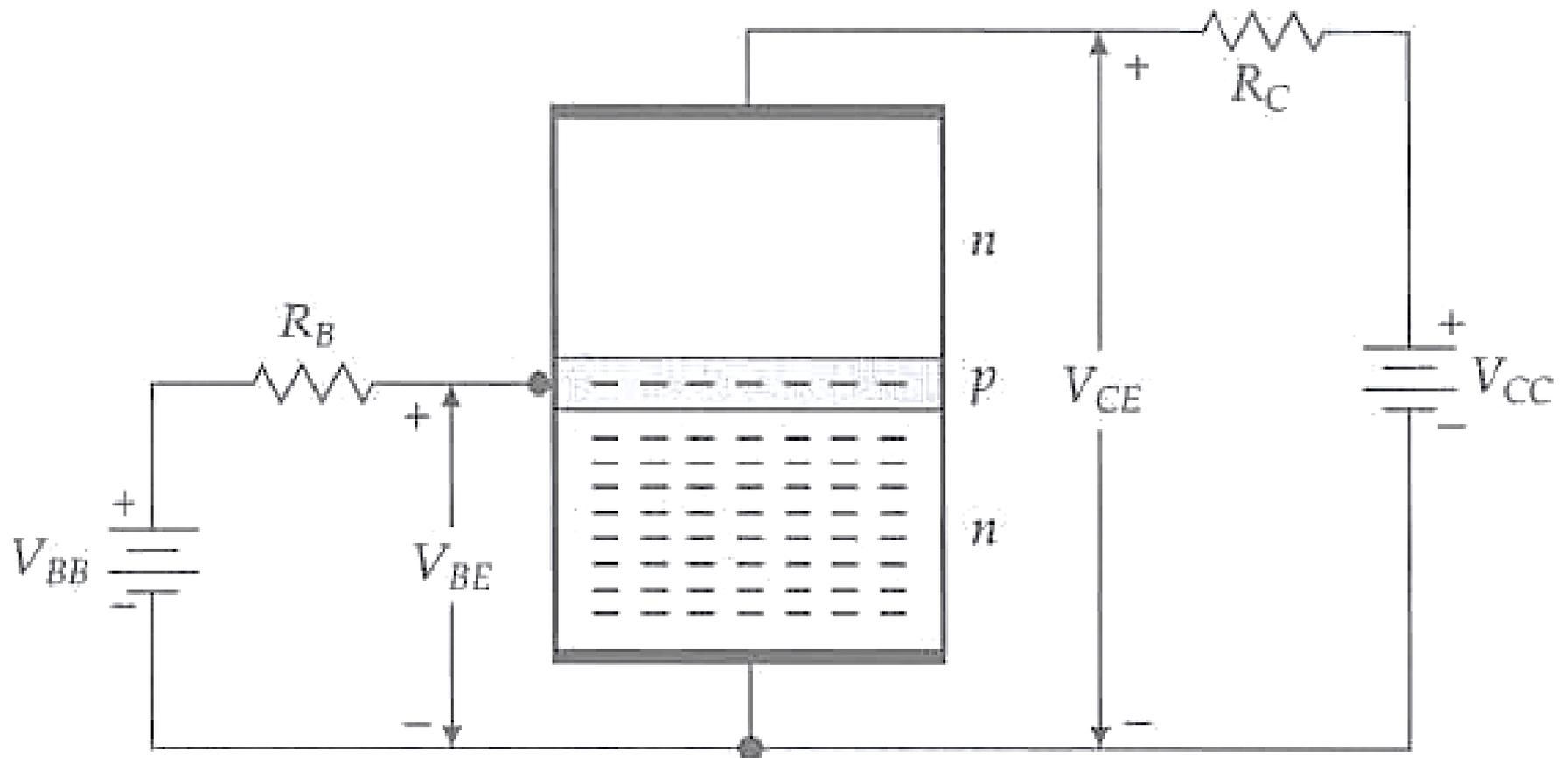
- Para onde irá a maioria dos elétrons?

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

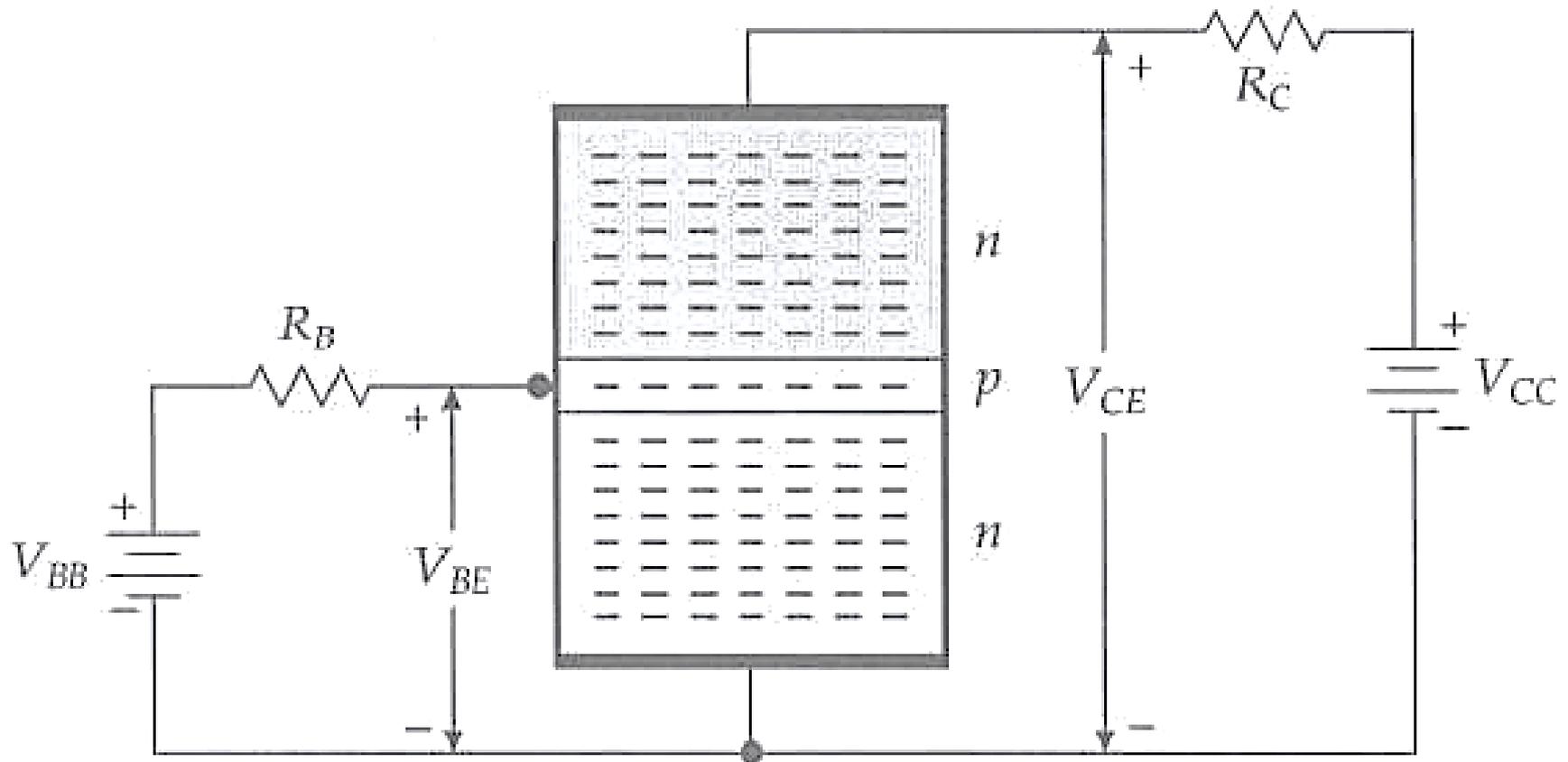


Transistor Polarizado

- **Elétrons no coletor**

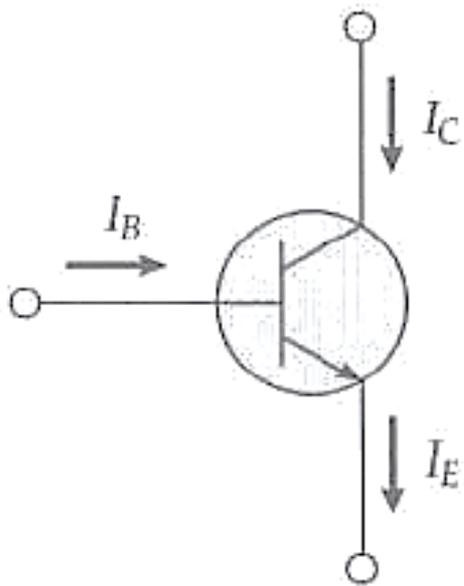
Os elétrons que passaram para o coletor (cerca de 95%) são atraído pela fonte V_{CC} . Por recombinação eles passam pelo coletor, depois pelo resistor R_C e chegam na fonte.

Transistor Polarizado

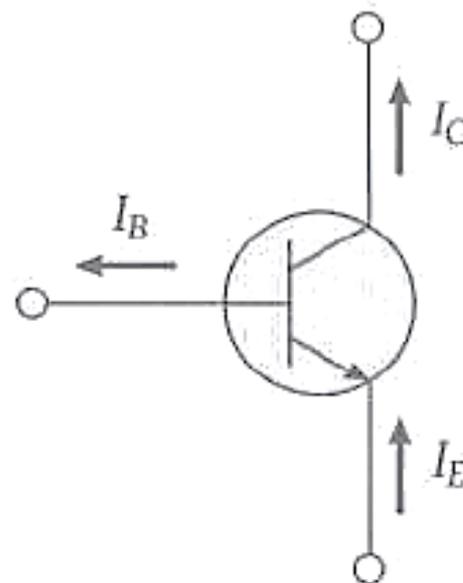


Correntes no Transistor

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:

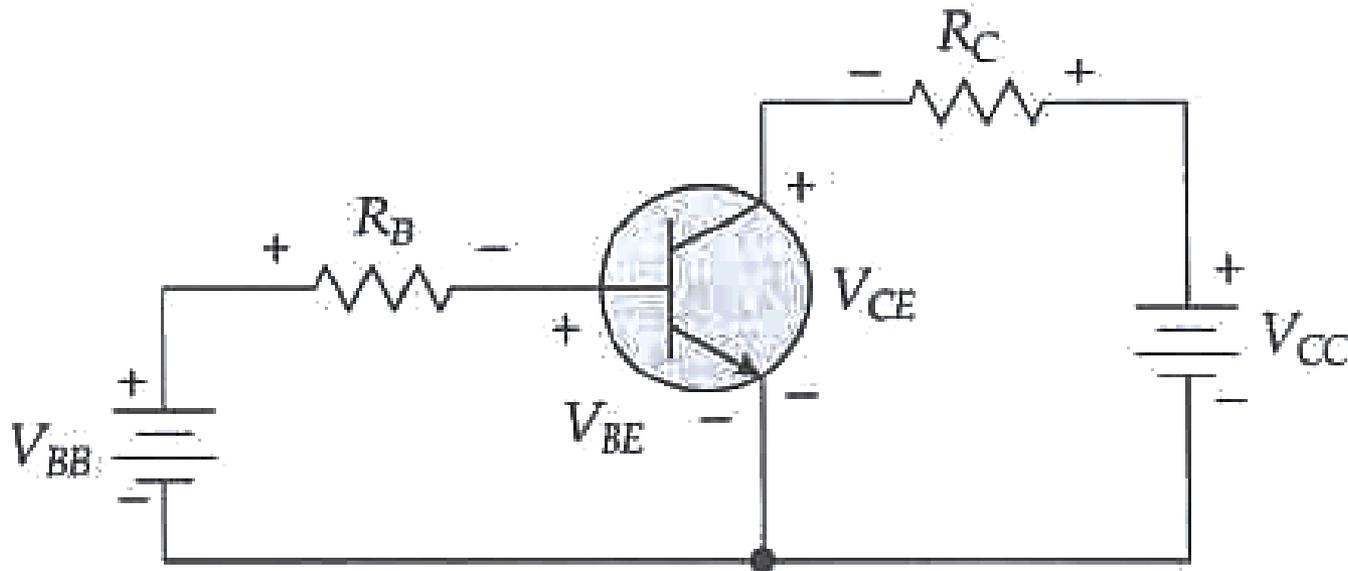
$$I_E = I_C + I_B$$

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 β_{cc}).

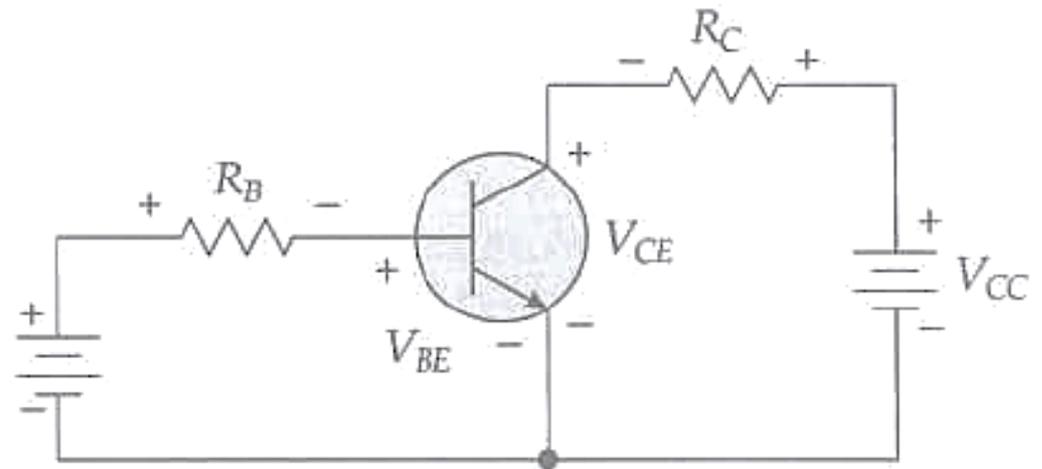
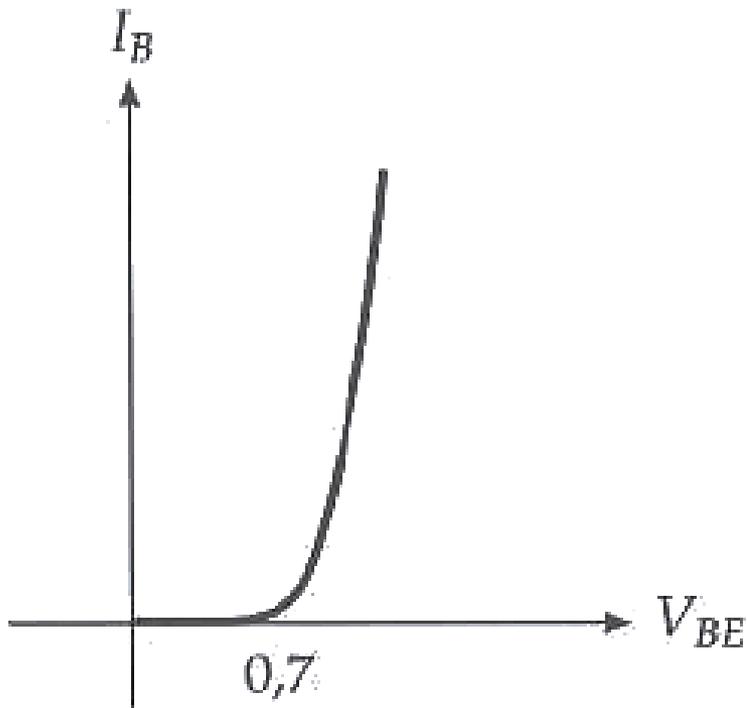
A Polarização EC

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

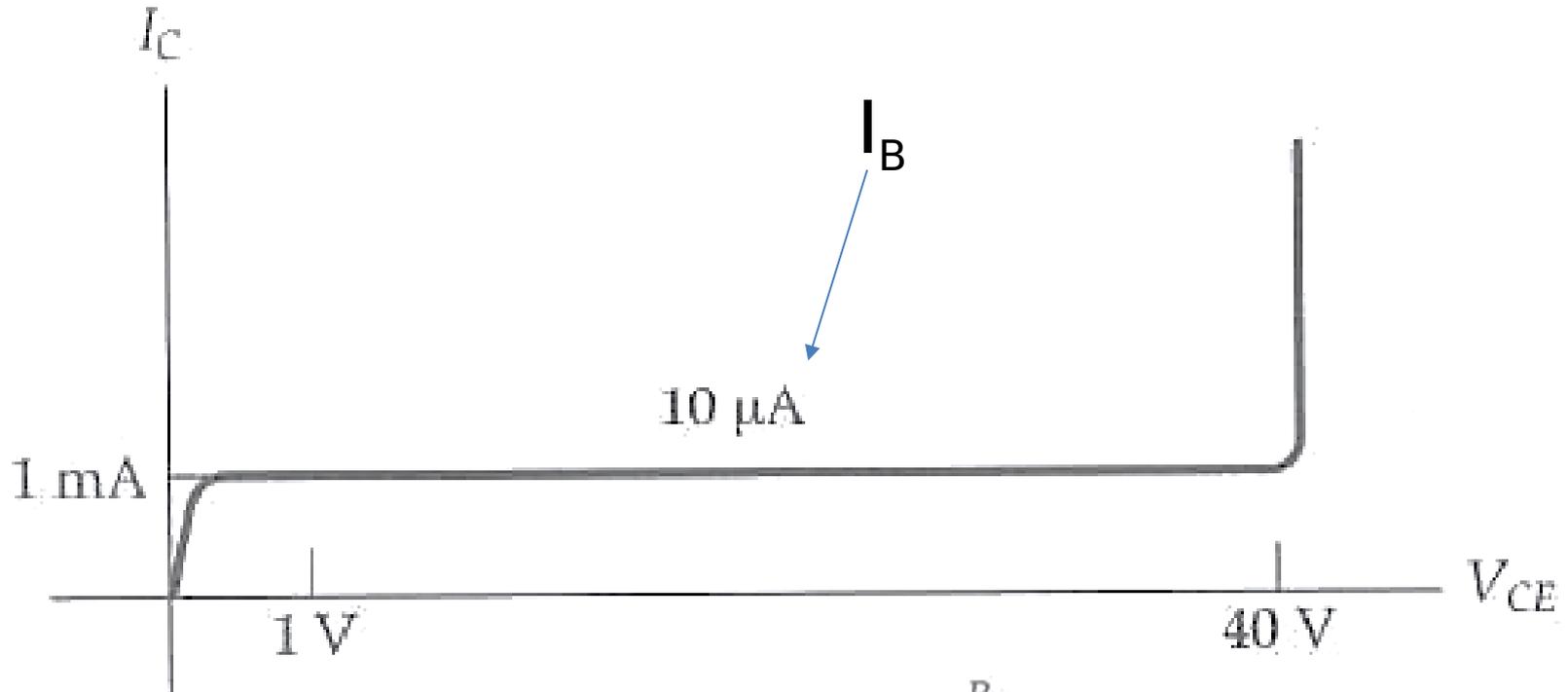
Podemos variar V_{BB} e V_{CC} de modo a obter diferentes correntes e tensões.

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

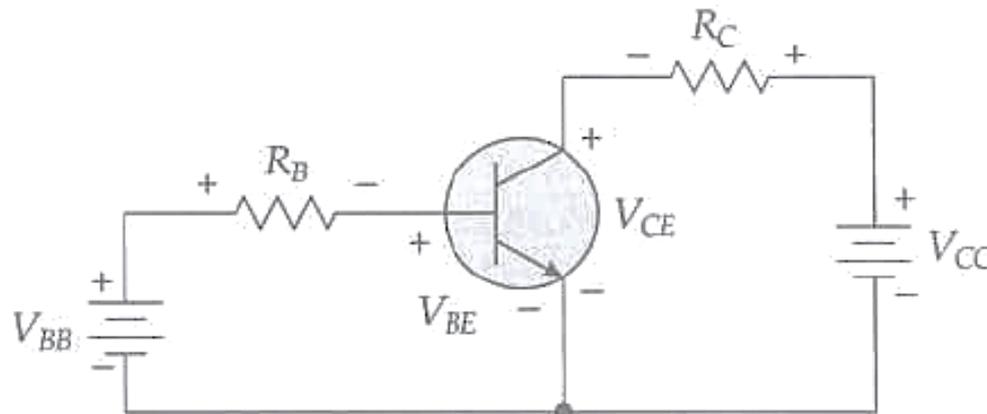
Ex.:

- 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:

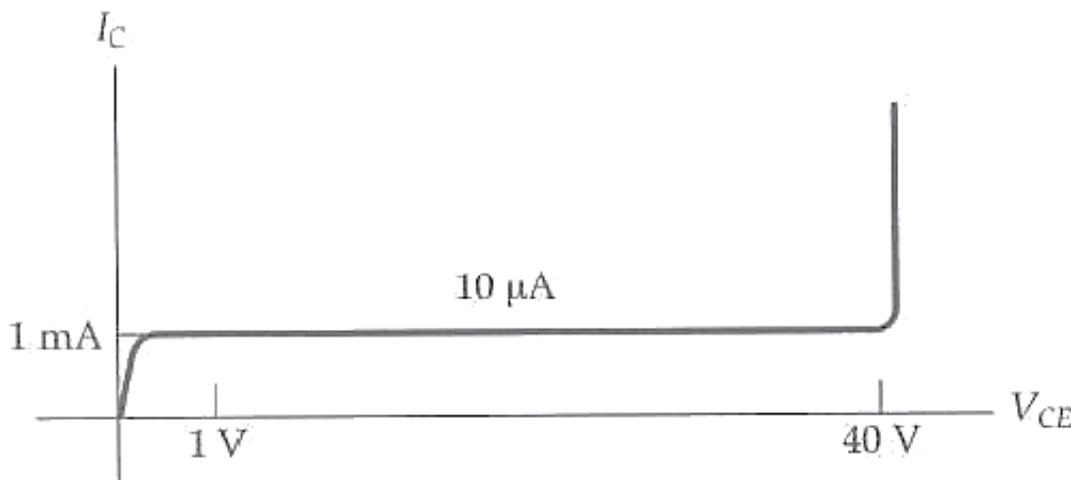
$$P_D = V_{CE} I_C$$

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 $P_{D(\text{máx})}$ de modo a tentarmos fazer com que P_D não chegue ao valor $P_{D(\text{máx})}$.

Curvas do Coletor

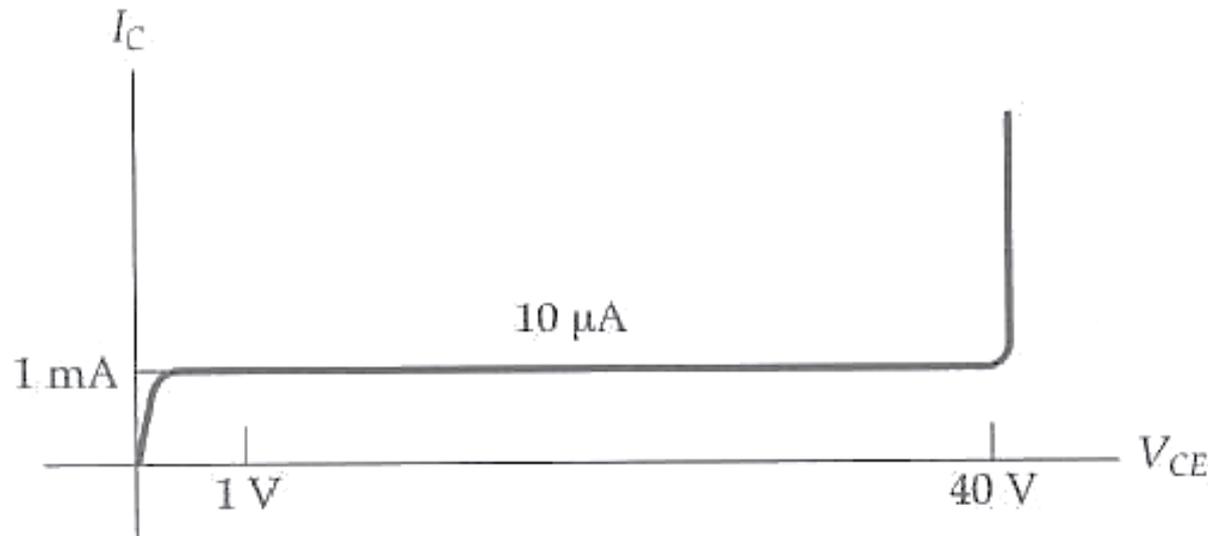
A curva do coletor tem 3 regiões:

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



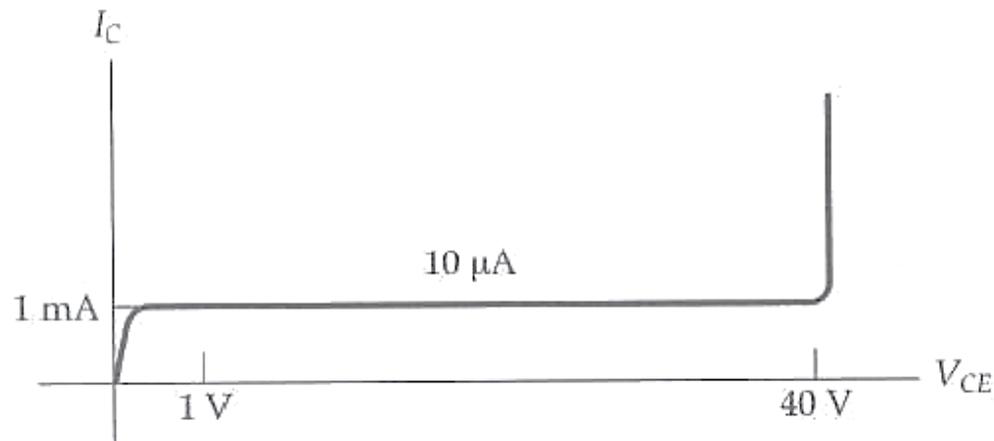
Curvas do Coletor

- $V_{CE} > 40 \text{ V}$: 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.

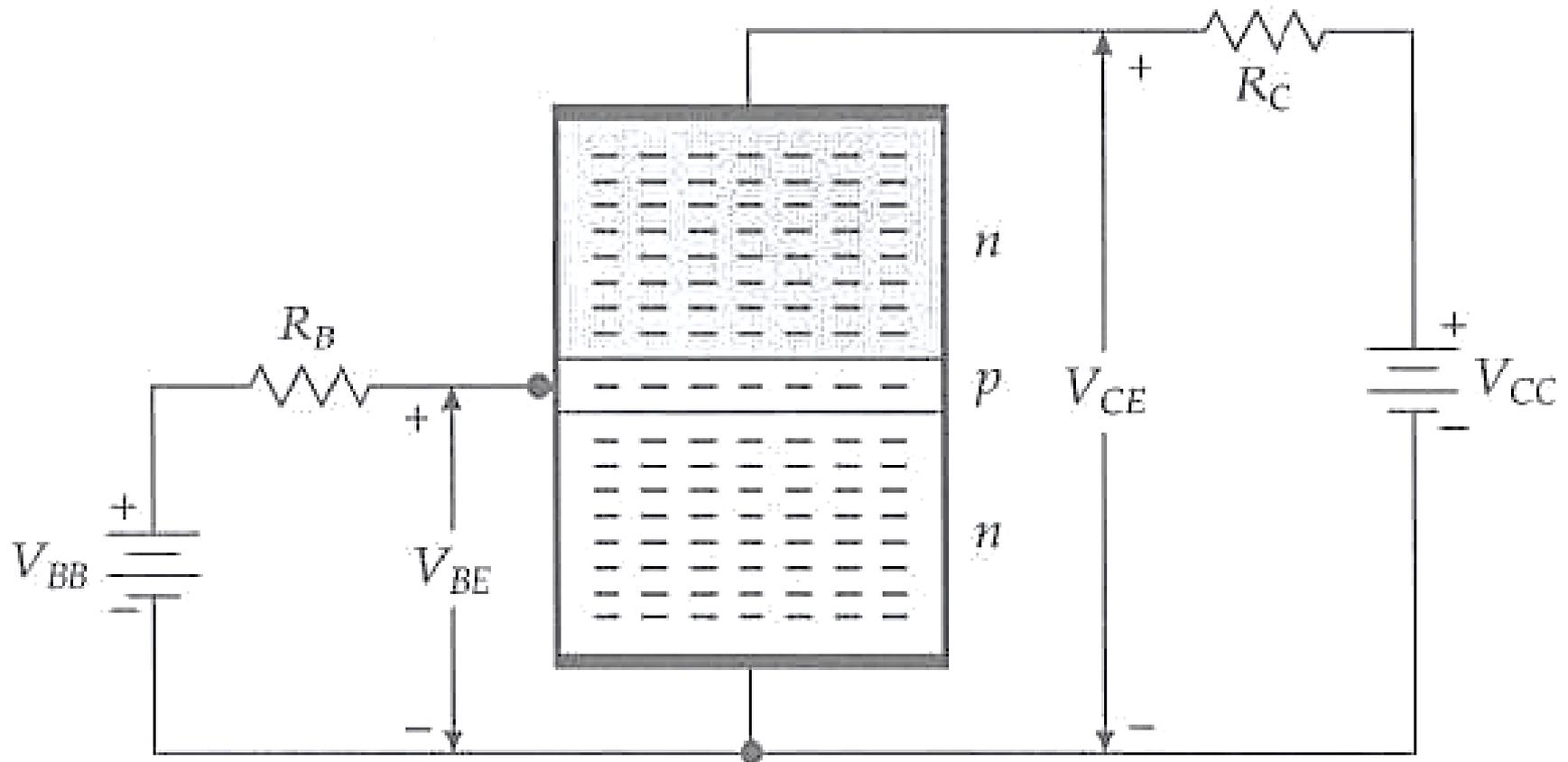


Curvas do Coletor

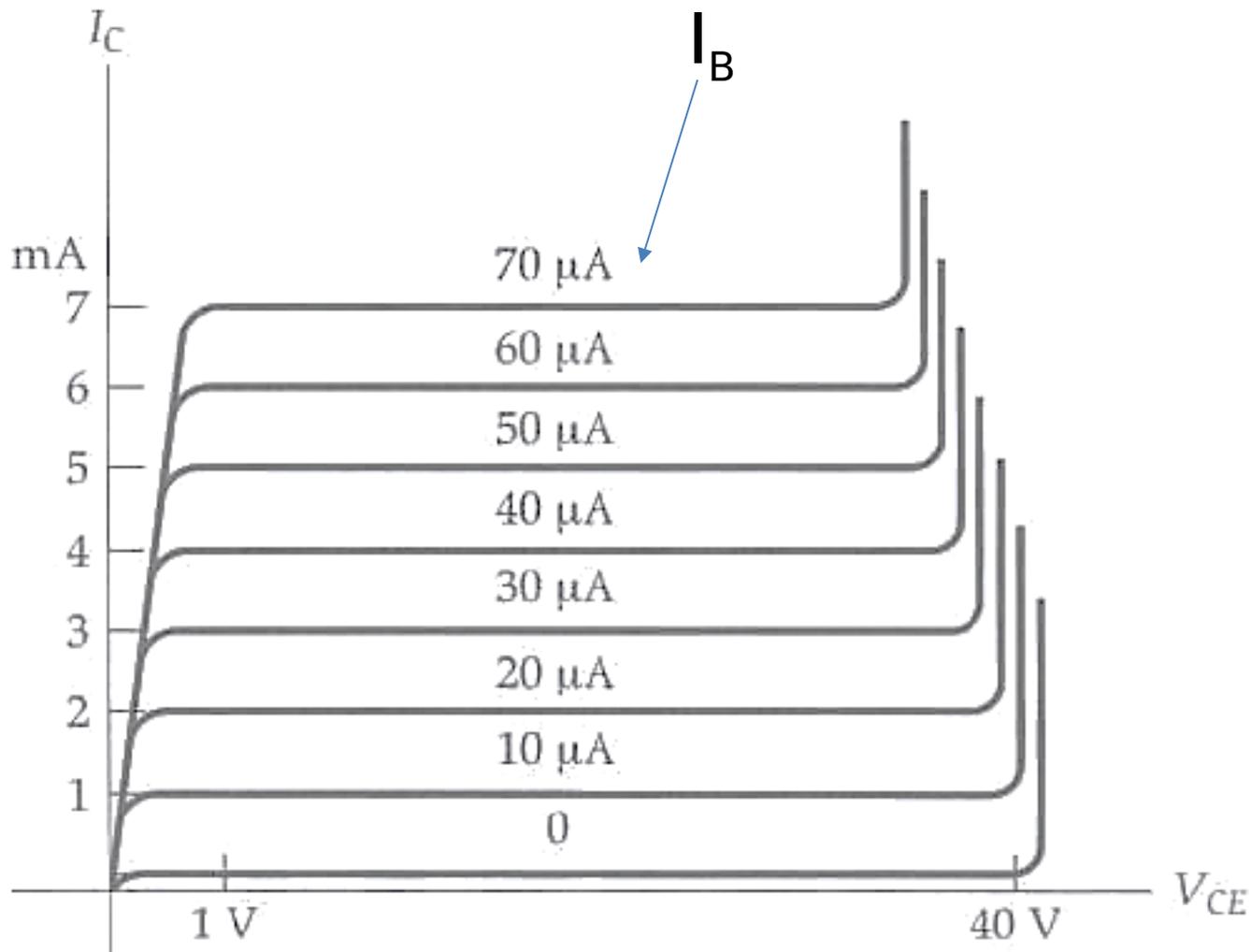
Se plotarmos a curva do coletor para uma I_B maior, como $20\mu\text{A}$ veremos que a corrente do coletor na região ativa aumenta para 2mA também, em razão da quantidade maior de elétrons que está vindo do emissor agora.

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.

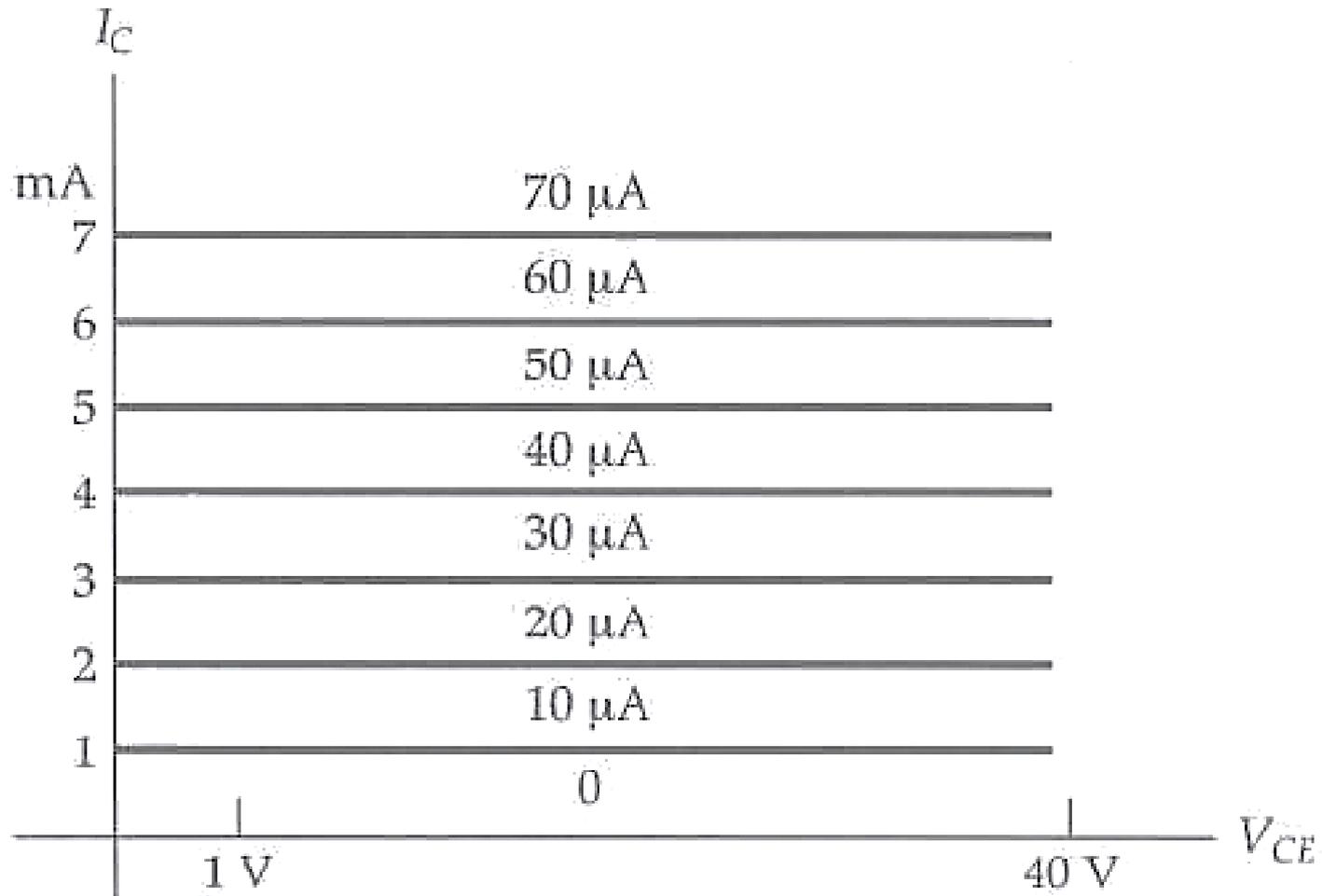
Aproximações do Transistor

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.

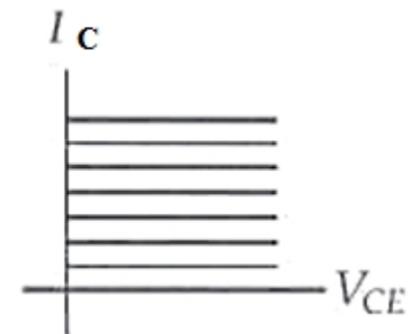
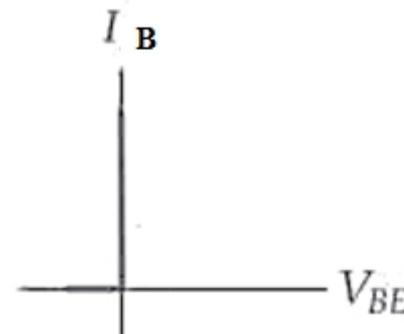
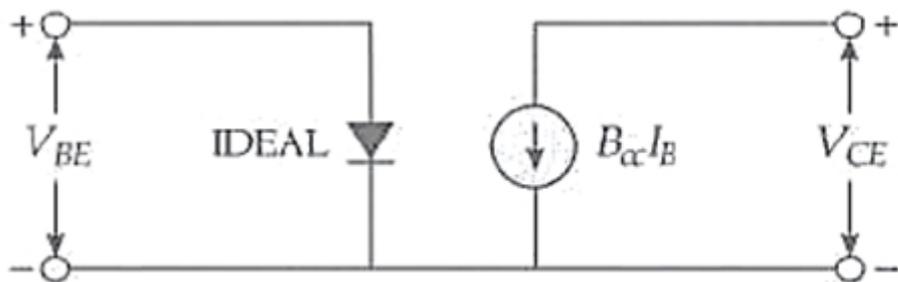
Aproximações do Transistor



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:

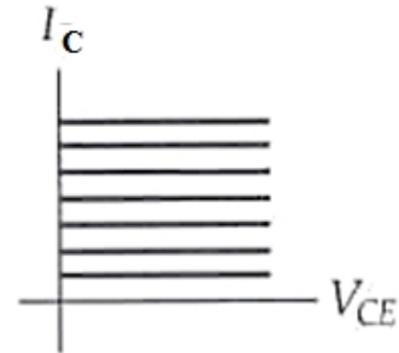
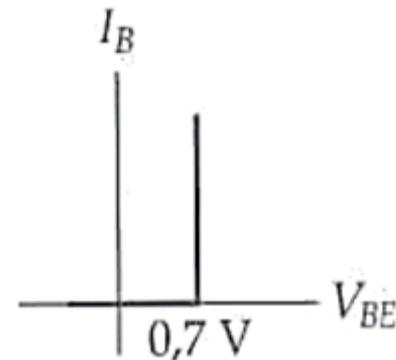
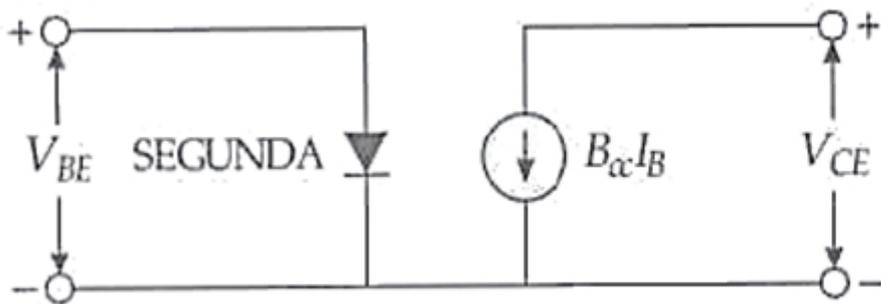
$$I_C = \beta_{cc} I_B$$



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

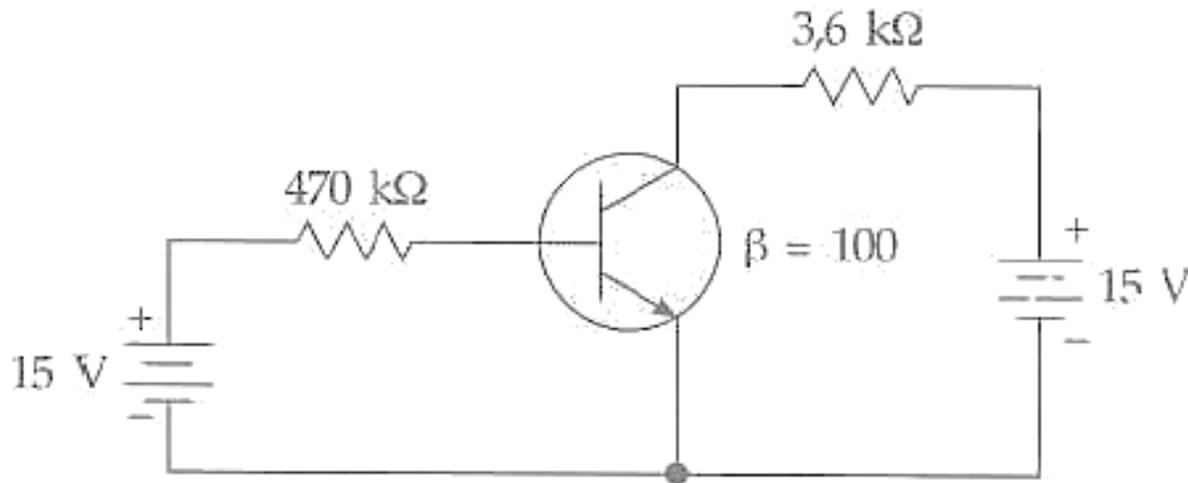
Para transistores de alta potência a resistência de corpo do diodo emissor deve ser levada em consideração pois ela, juntamente com a barreira de potencial do diodo (0,7V), causam uma queda de tensão significativa para o cálculo de V_{BE} .

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

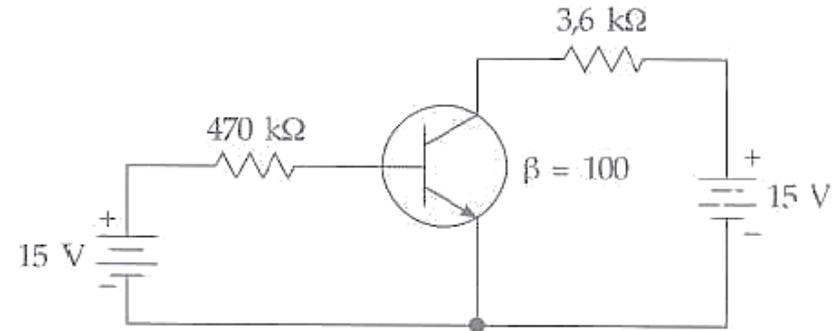
$$V_{BE} = 0$$

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

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

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

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



Aproximações do Transistor

- Segunda aproximação

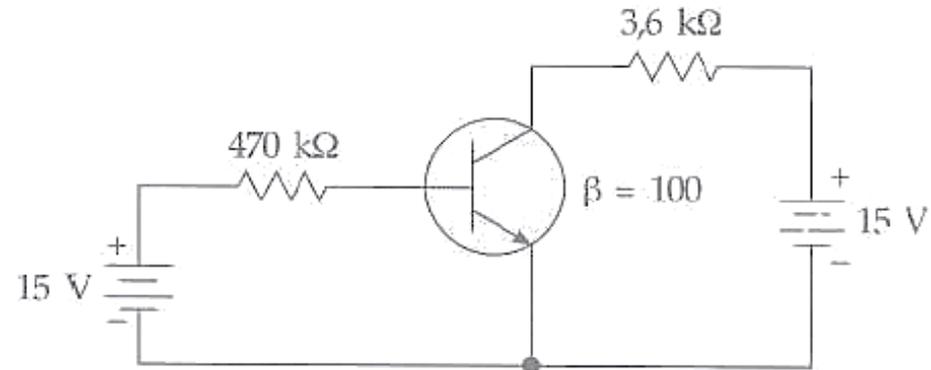
$$V_{BE} = 0,7 \text{ V.}$$

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

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

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

Diferença entre as aproximações: 0,5V



Aproximações do Transistor

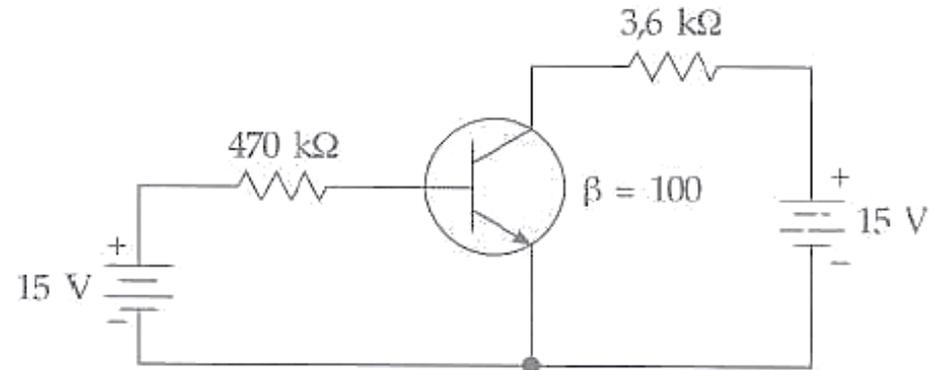
- **Terceira aproximação**

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

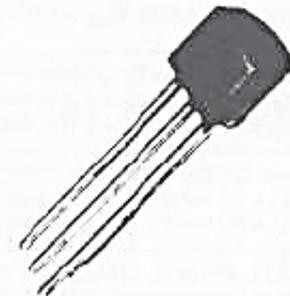
2N3903
2N3904

NPN SILICON ANNULAR[†] 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 μ 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 @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	350 2.8	mW mW/ $^\circ\text{C}$
** Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.0 8.0	Watts mW/ $^\circ\text{C}$
** Junction Operating Temperature	T_J	150	$^\circ\text{C}$
** Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

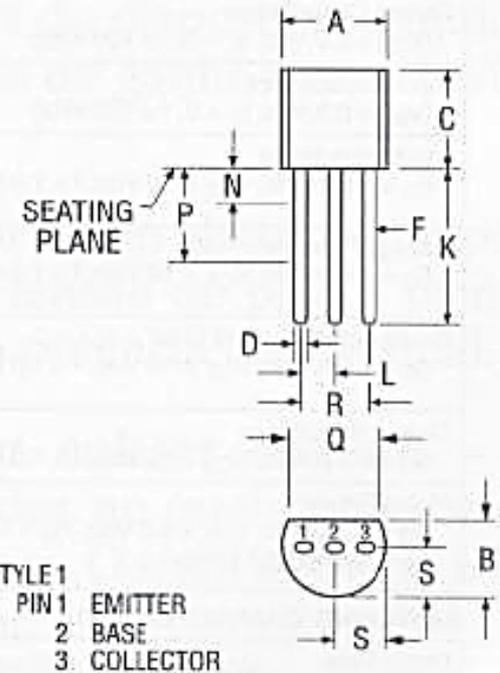
THERMAL CHARACTERISTICS

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
 T0-92

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°C .

Com a temperatura externa e interna menor (25°C) o transistor pode dissipar mais potência antes de queimar. T_C é a temperatura máxima do encapsulamento.

Folha de Dados

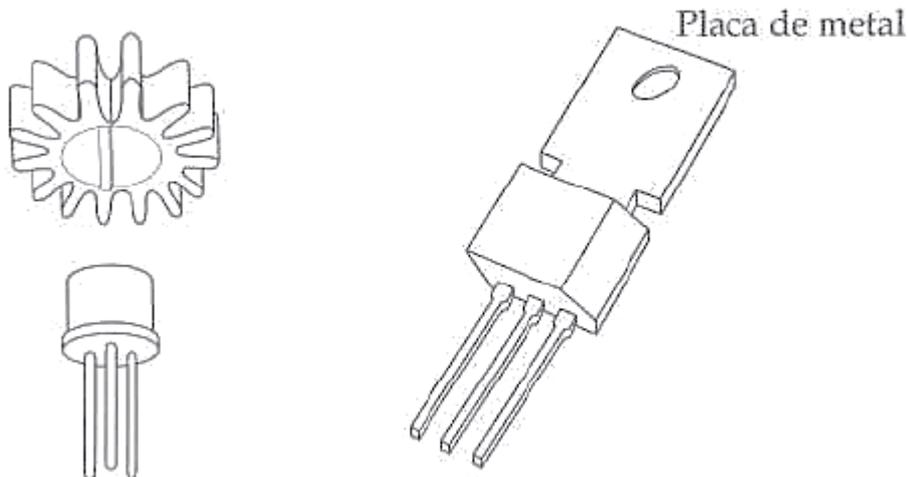
Fator de degradação

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°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

DC CHARACTERISTICS

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

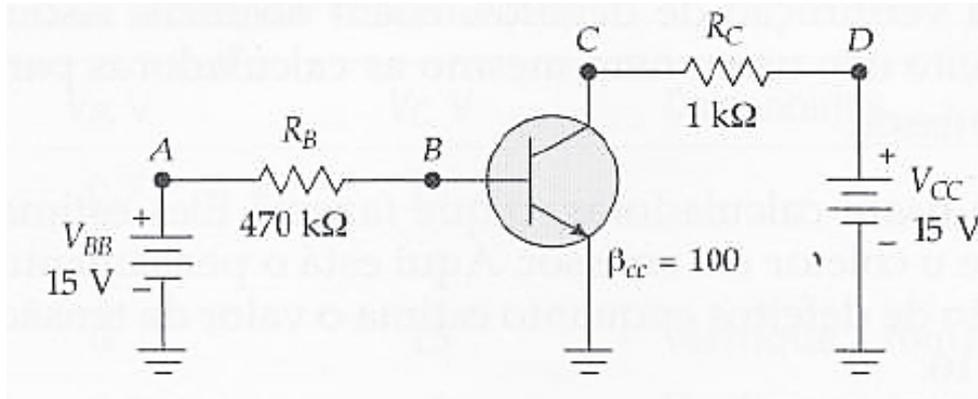
Folha de Dados

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