

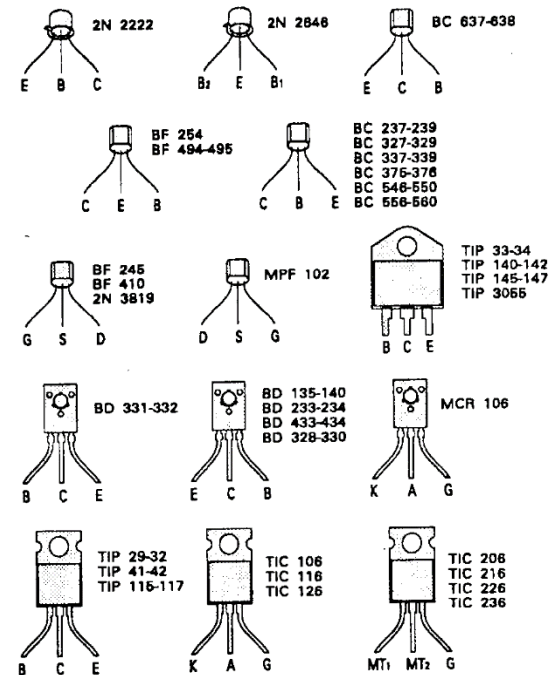
BJT- Transistor de Junções Bipolar

ECM305
Sistemas Eletrônicos

Sergio Ribeiro Augusto

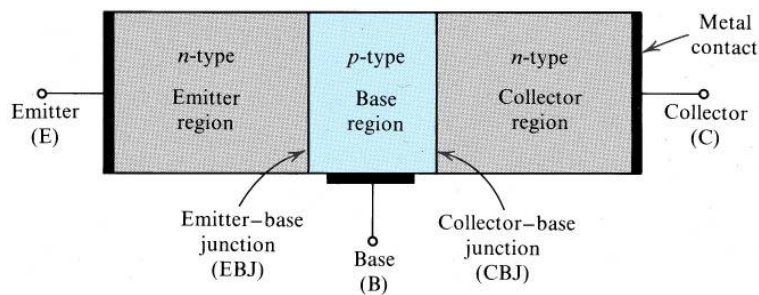
Objetivo

- Demonstrar o princípio de funcionamento do transistor de junções bipolar e aplicações como chave:
 - constituição física;
 - simbologia
 - curvas características;
 - modos de saturação e corte;
 - Transistor atuando como chave
 - Aplicações e exercícios

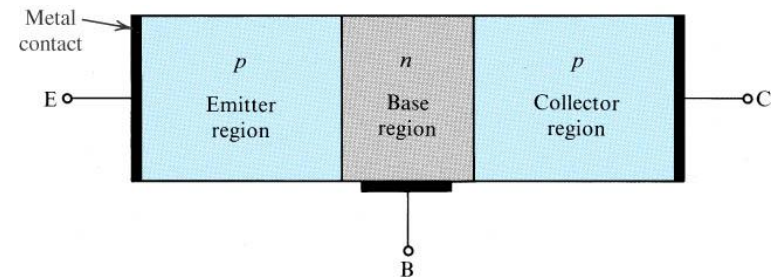
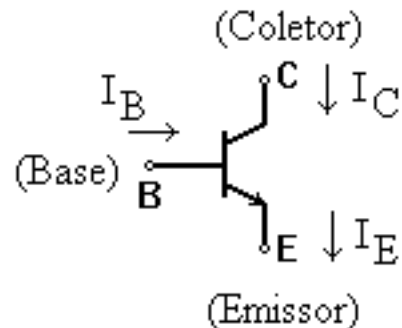


Estrutura Física e Simbologia

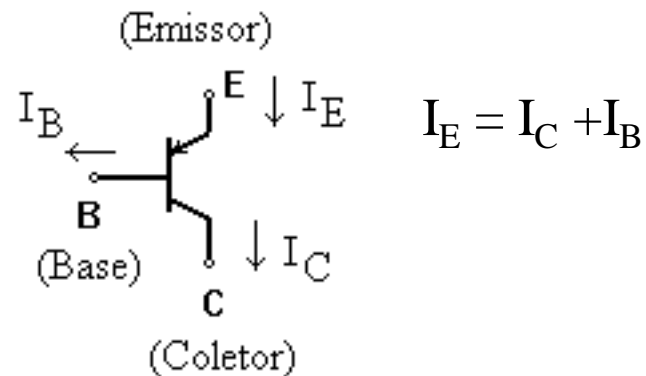
- O transistor bipolar de junção (TBJ) consiste de três regiões semicondutoras: região de emissor, região de base e região de coletor. Dependendo da dopagem da região podemos ter transistor tipo NPN ou PNP



Transistor npn

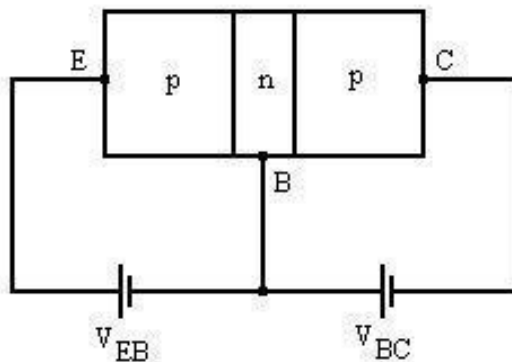


Transistor pnp

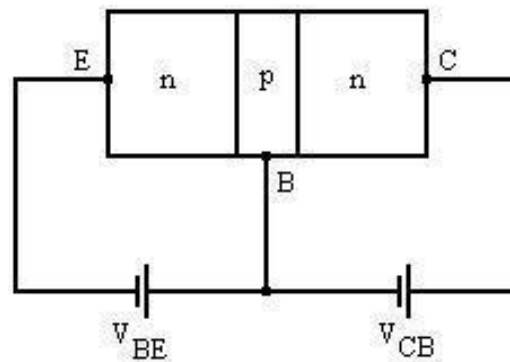


Modos de Operação

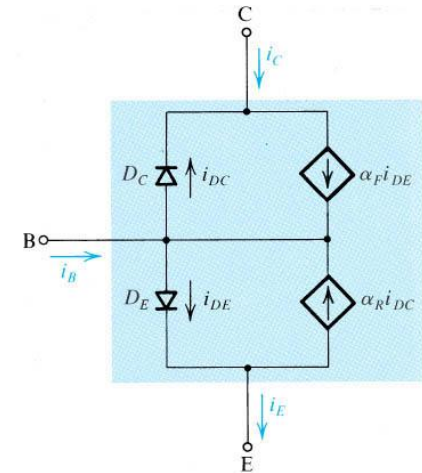
- O transistor consiste de duas junções PN, a junção base-emissor e base-coletor. Dependendo da condição de polarização (direta ou reversa) de cada junção, obtém-se diferentes modos de operação.



Transistor pnp



Transistor npn



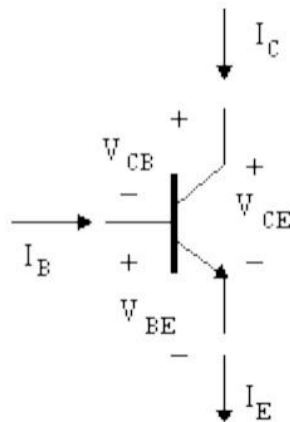
Modelo de Ebers and Moll (NPN)

Modos de Operação

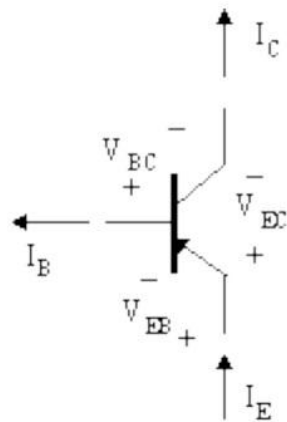
Modo	Junção Base-Emissor	Junção Base-Coletor
Corte	Polarização reversa	Polarização reversa
Ativo	Polarização direta	Polarização reversa
Saturação	Polarização direta	Polarização direta

Obs: modo ativo usado em amplificação.
corte/saturação em aplicações de chaveamento e lógica

Tensões e Correntes nos transistores NPN e PNP



NPN



PNP

Leis de Kirchhoff:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \text{ (NPN)}$$

$$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB} \text{ (PNP)}$$

Correntes no TBJ NPN no Modo Ativo

- OBS: para PNP substituir v_{BE} por v_{EB}
- **Corrente de Coletor**
 - I_C é praticamente a corrente do diodo polarizado diretamente em JBE

$$I_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad V_T \approx 25 \text{ mV (temperatura ambiente)}$$

- **Corrente de Base**
 - I_B é uma parcela muito pequena de I_C (pouca recombinação e baixa dopagem)

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{(v_{BE}/V_T)} \quad \beta \text{ típico é elevado (ex: 100 a 500)}$$

- **Corrente de Emissor**

$$I_E = I_C + I_B \quad (I_E \approx I_C)$$

$$I_E = \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) I_C = \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) I_S e^{(v_{BE}/V_T)} \quad I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha} \right) e^{(v_{BE}/V_T)}$$

Correntes no TBJ Modo Ativo (cont.)

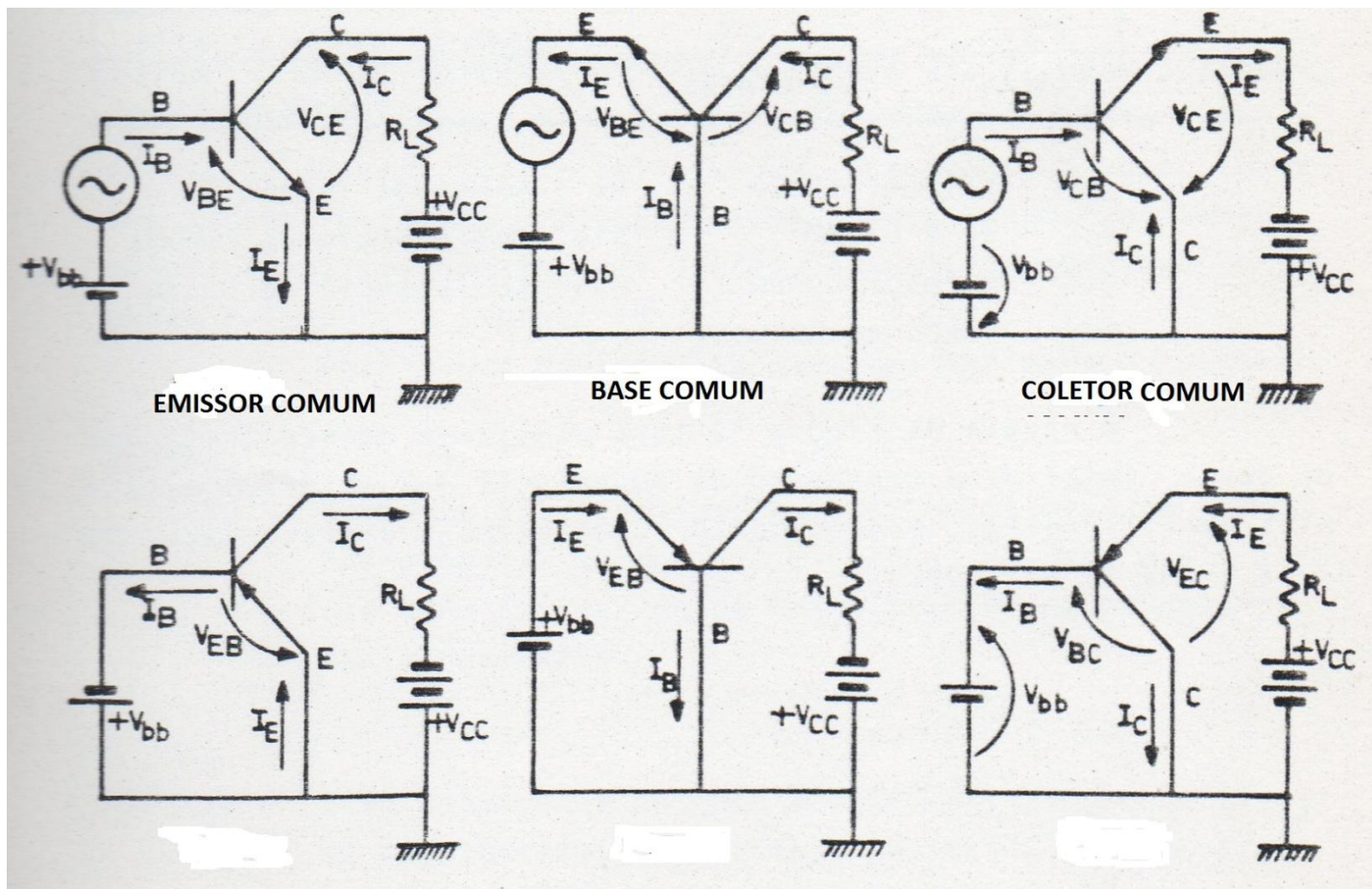
- β = ganho de corrente em Emissor-Comum ($\beta \approx h_{FE}$);
- α é definido como ganho de corrente em Base-Comum e vale ≈ 1 (0,9 a 0,998).

$$I_C = \alpha I_E$$

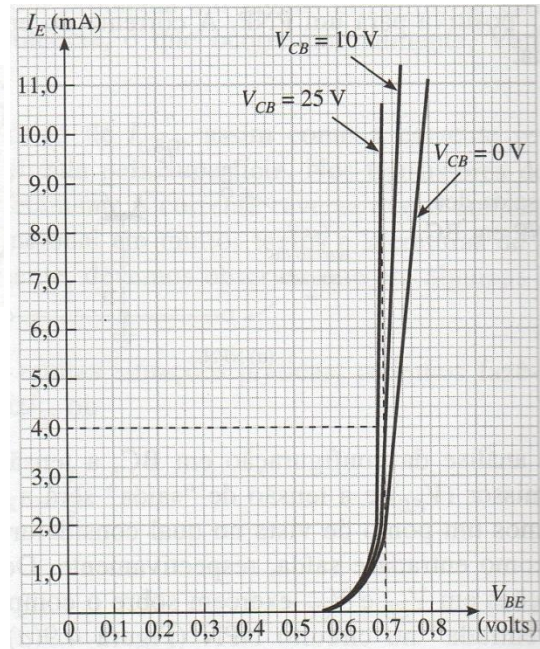
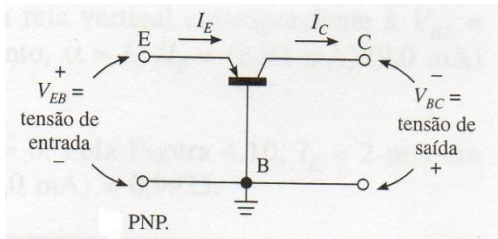
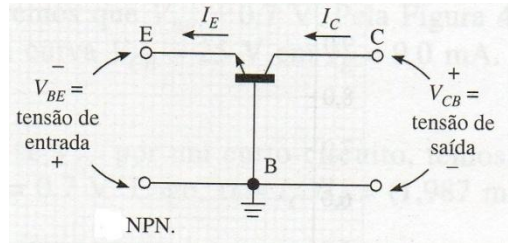
$$\alpha = \left(\frac{\beta}{\beta + 1} \right)$$

$$\beta = \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)$$

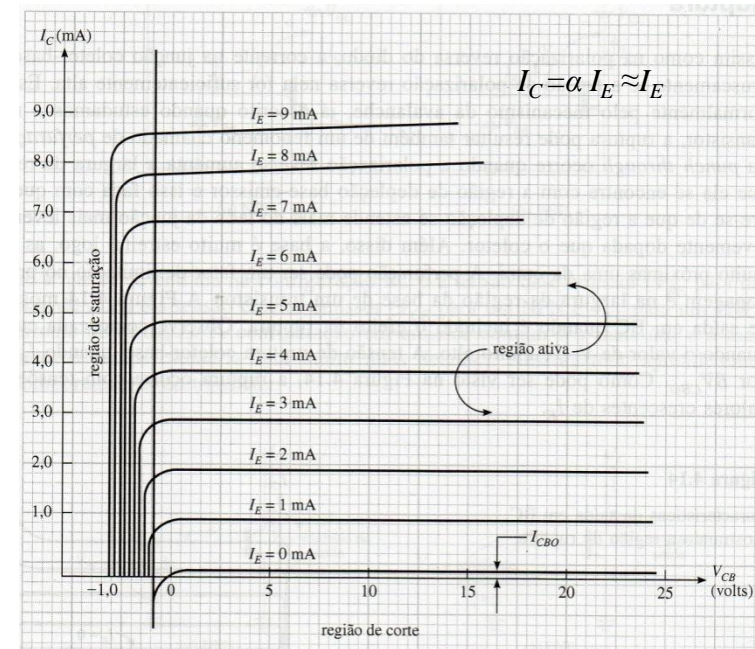
Configurações básicas EC,BC,CC



Curvas Características Base Comum



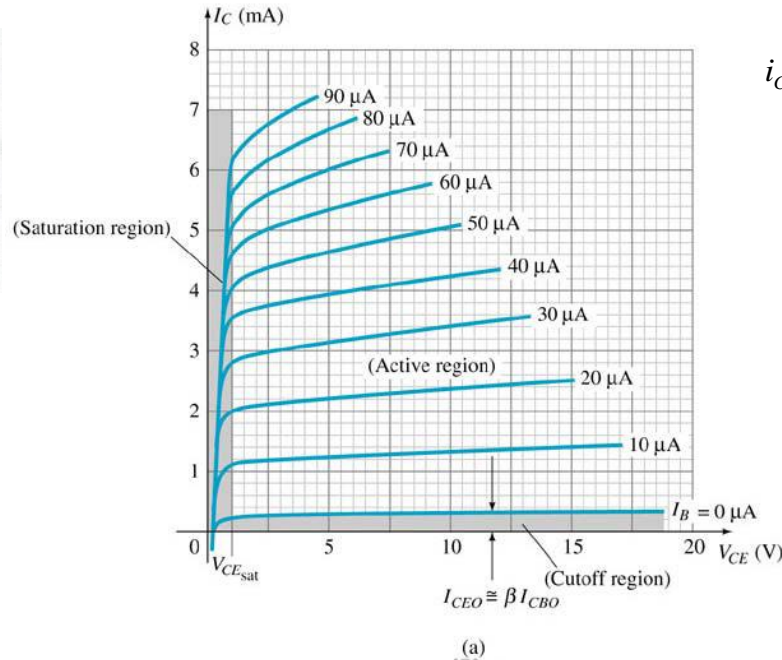
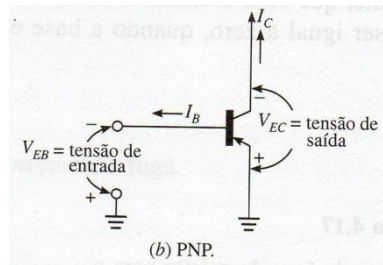
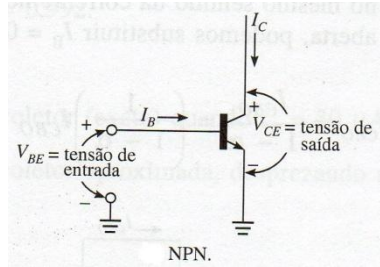
Característica de entrada BC (NPN)



Característica de Saída BC (NPN)

- Base é o terminal comum para entrada e saída. Todas as tensões são tomadas em relação à base.
- Sinal é injetado entre emissor e base e retirado entre coletor e base.
- Tensão emissor-base é a tensão de entrada e a tensão coletor-base é a tensão de saída (NPN).
- A corrente de emissor é a corrente de entrada e a corrente de coletor é a corrente de saída.

Curvas Características Emissor Comum

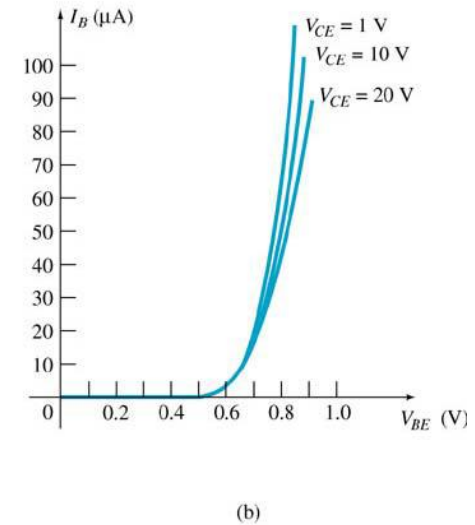


Característica de Saída EC (NPN)

$$i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T}$$

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

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

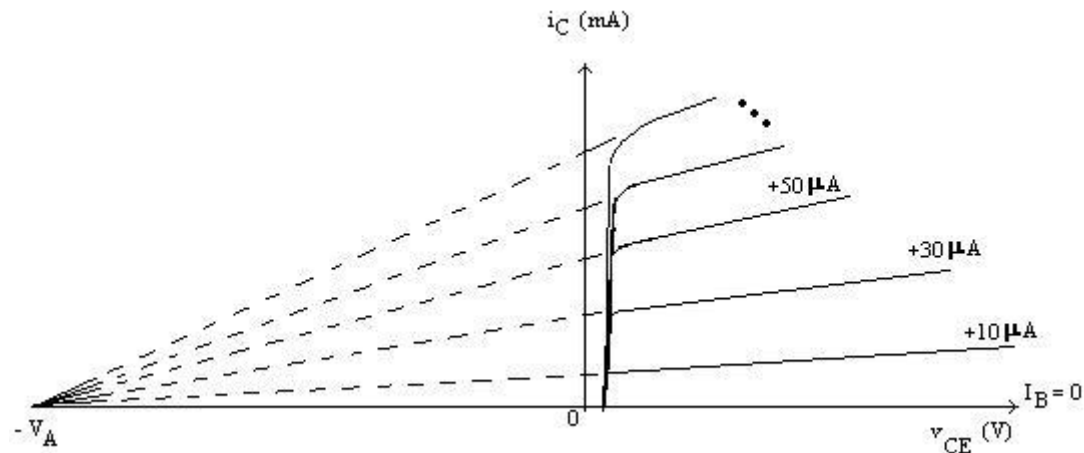


Característica de entrada BC (NPN)

- Esta configuração é a mais utilizada em circuitos transistorizados. Diversos parâmetros dos transistores fornecidos pelos manuais técnicos têm como referência a configuração de emissor comum.
- O terminal emissor é o ponto comum. Todas as tensões são tomadas em relação ao emissor.
- Sinal é injetado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor.
- Tensão base-emissor é a tensão de entrada e a tensão coletor-emissor é a tensão de saída (NPN – p/ PNP V_{EB} e V_{EC}).
- A corrente de base é a corrente de entrada e a corrente de coletor é a corrente de saída.
- $I_C = \beta I_B$ (Obs: característica de saída para valores de I_B maiores são mais inclinadas → efeito Early)

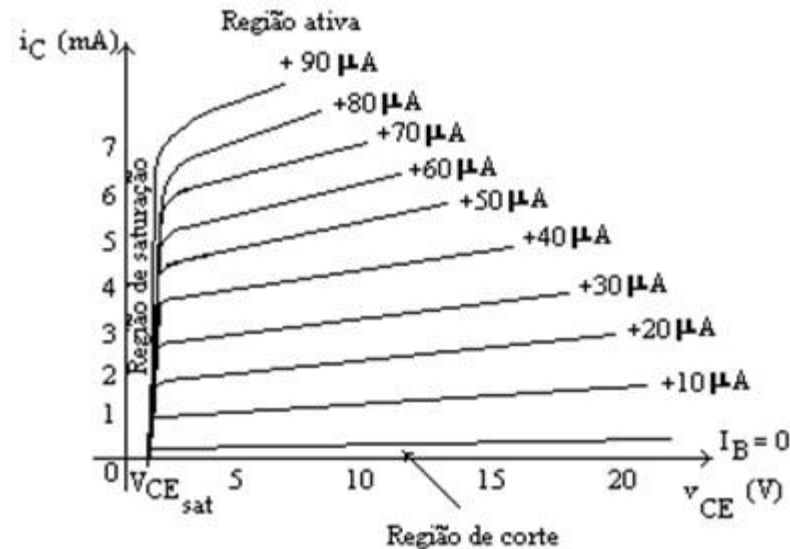
Efeito *Early*

- As linhas de I_B na característica de saída em EC são mais inclinadas do que as de IE em base comum devido ao efeito *Early*
- O efeito *Early* pode ser resumido da seguinte forma:
 - para um dado valor de V_{BE} , aumentando V_{CE} há um aumento na tensão reversa na junção coletor-base, aumentando o tamanho da região de depleção desta junção; em contraposição resulta em um aumento da corrente de saturação, proporcionalmente aumentando a corrente de coletor i_C .

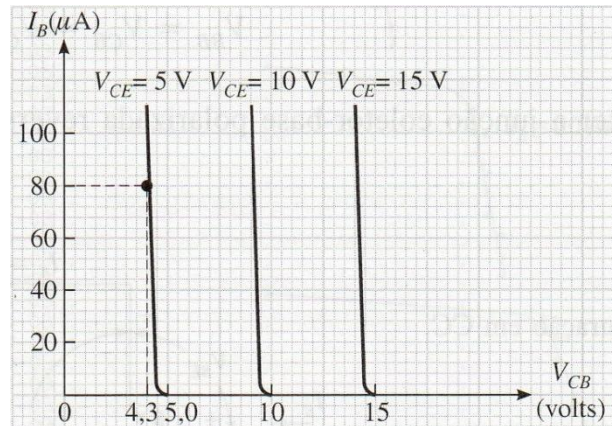
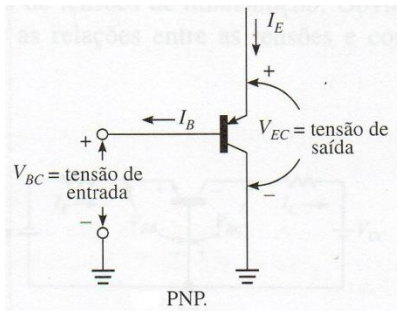
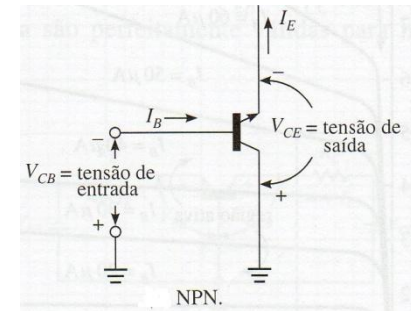


Curvas Características EC (cont.)

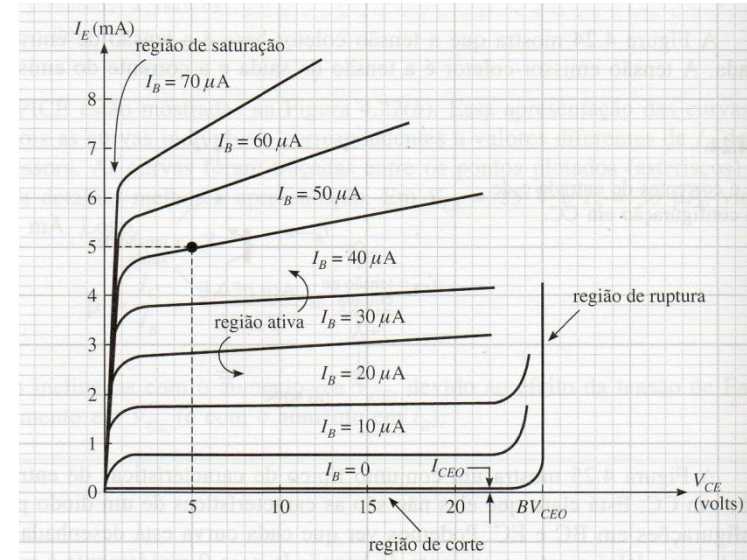
- Analizando a característica $i_C \times V_{CE}$ para o transistor BJT podemos perceber que:
 - constitui-se de linhas retas com inclinação finita dependendo da tensão V_{BE} (e consequentemente da corrente I_B).



Curvas Características Coletor Comum



Característica de entrada CC (NPN)



Característica de Saída CC (NPN)

- O terminal coletor é o ponto comum. Todas as tensões são tomadas em relação ao coletor.
- Sinal é injetado entre base e coletor e retirado no emissor.
- Tensão coletor-base é a tensão de entrada e a tensão coletor-emissor é a tensão de saída (NPN).
- A corrente de base é a corrente de entrada e a corrente de emissor é a corrente de saída.

Regiões de Funcionamento de um Transistor (Modos de Operação)

No funcionamento de um transistor distinguem-se 3 regiões:

REGIÃO ATIVA

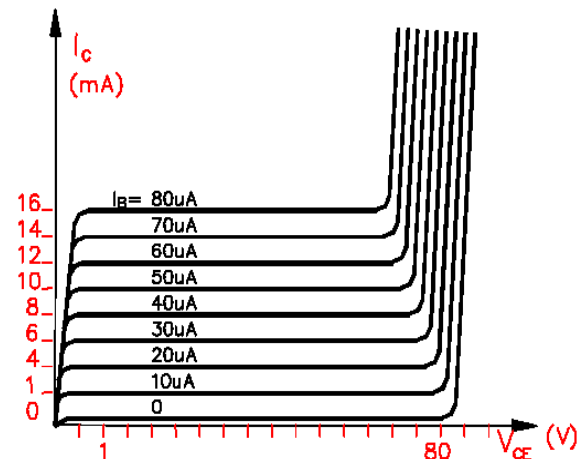
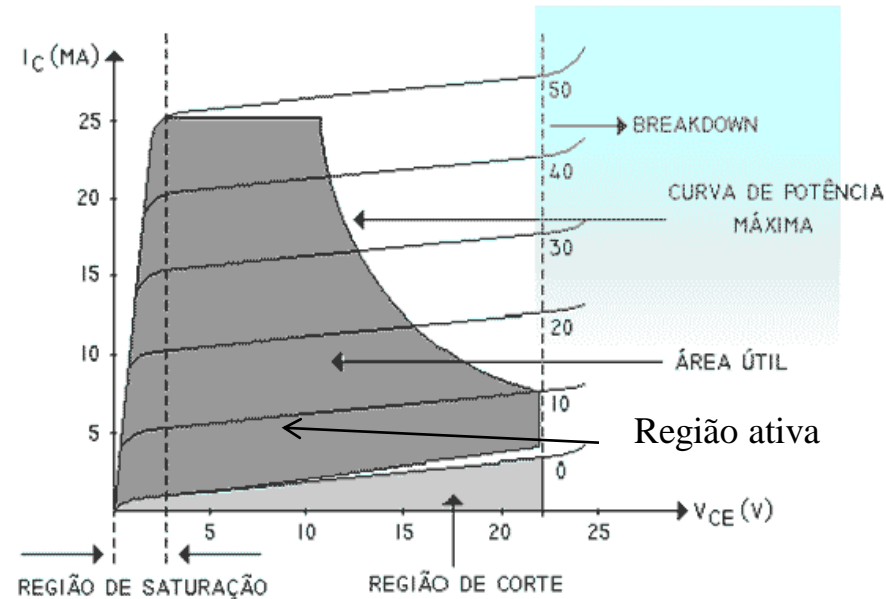
- Um transistor encontra-se a funcionar na zona ativa se tiver a junção base-emissor (BE) diretamente polarizada e a junção base-coletor (BC) reversamente polarizada.
- Na região ativa pode-se considerar $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ (cte- silício) e $I_C = \beta * I_B$ ($I_C = h_{FE} * I_B$)

REGIÃO DE CORTE

- Caracteriza-se pela ausência de corrente de coletor ($I_C = 0$) e conseqüentemente $V_{CE} = V_{CC}$. Para tal é necessário fazer $I_B \cong 0$ (Obs: $V_{BE} < 0,5 \text{ V}$). Pode-se também definir transistor no corte quando ambas as junções, base-coletor e base-emissor estiverem reversamente polarizadas.

REGIÃO DE SATURAÇÃO

- O transistor estará saturado quando ambas as junções, base-emissor e base-coletor, estiverem diretamente polarizadas.
- Para garantir a saturação é necessário que $I_C/I_B \ll \beta$, como β tem uma grande variação (entre mesmos transistores e temperatura), utiliza-se $I_C/I_B < \beta$ mínimo (ou valor mínimo de h_{FE} dado no manual). Ex: $I_B > I_C/\beta$ mínimo, $I_B = OF * I_C/\beta$ mínimo, onde OF é um fator de sobre-excitação ("overdrive"), usualmente na faixa de 2 a 10, e com $I_B < I_B$ máximo de manual)
- Na saturação o valor da tensão base-emissor (V_{BE}) é tipicamente $0,8 \text{ V}$ e V_{CE} aproximadamente $0,2 \text{ V}$ (para transistores de silício)



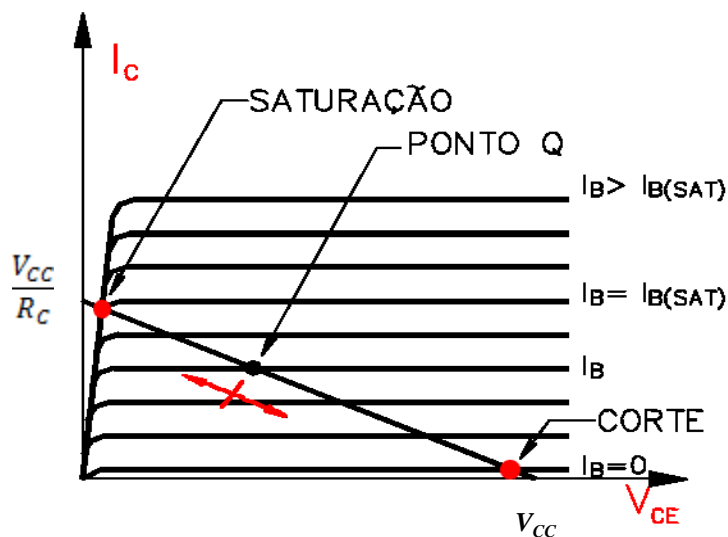
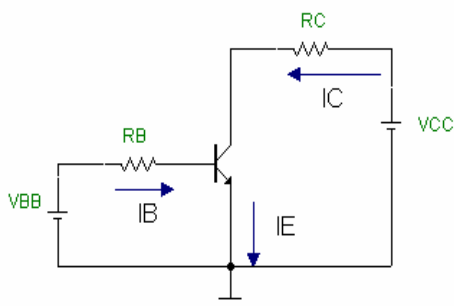
Aplicações de cada Região

- Usa-se o transistor na região ativa para aplicações de amplificação e nas regiões de corte e saturação em circuitos digitais e chaveamento (liga/desliga).

Reta de carga (Ex: Emissor comum)

- Lugar geométrico de todos os pontos quiescentes possíveis para uma determinada polarização.
- Ponto quiescente ou de operação (Q): ponto em torno do qual o transistor funcionará. Escolhe-se um ponto na região ativa em aplicações de amplificação.

Ligação Emissor Comum



Usa-se a reta de carga para obtermos I_C e V_{CE} .

Aplicando Kirchhoff para o circuito do coletor (malha de saída):

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

$$I_C = - (1/R_C) \cdot V_{CE} + V_{CC}/R_C \rightarrow \text{Reta de Carga}$$

Nesta equação existem duas incógnitas, I_C e V_{CE} . Usa-se o gráfico $I_C \times V_{CE}$ do transistor para obter a solução em função de I_B .

Extremos da reta de carga:

$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = V_{CC} / R_C$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

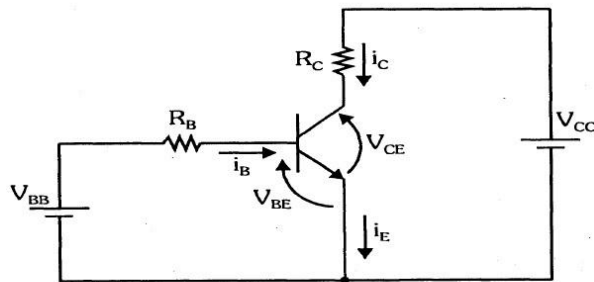
A partir da reta de carga e definido uma corrente I_B chega-se aos valores de I_C e V_{CE} .

Malha de entrada:

$$I_B = (V_{BB} - V_{BE}) / R_B \quad (V_{BE} = 0,7V \rightarrow \text{região ativa})$$

Exemplo Polarização Simples EC na Região ativa

Objetivo: escolher o ponto Q de trabalho do transistor, ou seja, dados I_{CQ} e V_{CEQ} desejados, determinar R_B e R_C .



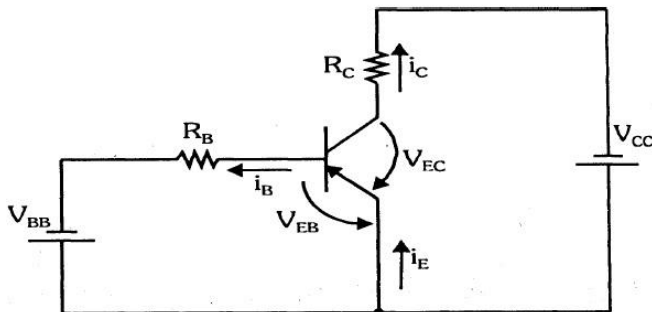
NPN

Malha de Saída:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

Malha de Entrada:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_{BQ}} \quad I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$



PNP

Malha de Saída:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{ECQ}}{I_{CQ}}$$

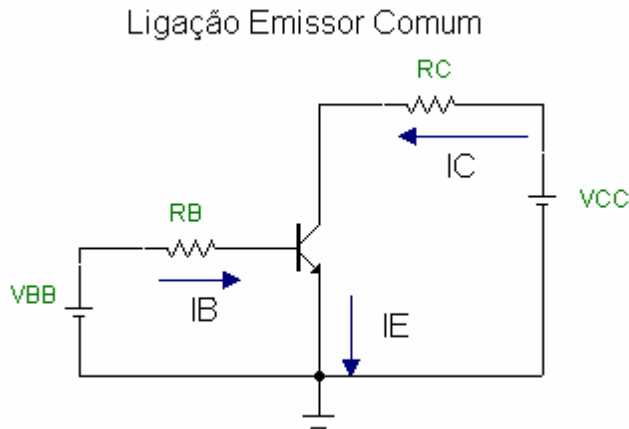
Malha de Entrada:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{EB}}{I_{BQ}} \quad I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

- Obs: existem circuito melhores para polarização. Este depende fortemente de β que varia entre componentes do mesmo tipo e também com a temperatura, não sendo usado em projetos práticos.*

Exemplo

No circuito da figura temos $V_{CC}=V_{BB}=15V$. Considere o transistor com β nominal de 200. Determinar R_B e R_C para termos o ponto de polarização do transistor em $I_C = 6 \text{ mA}$ e $V_{CE} = 5,5V$. Traçar a reta de carga.



$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{I_{CQ}} \Rightarrow R_C = \frac{(15 - 5,5)V}{6 * 10^{-3} A} = 1583 \Omega$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{6 * 10^{-3} A}{200} = 30 \mu A$$

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_{BQ}} \Rightarrow R_B = \frac{(15 - 0,7)V}{30 * 10^{-6} A} = 477 \Omega \quad (V_{BE} = 0,7V \text{ na região ativa})$$

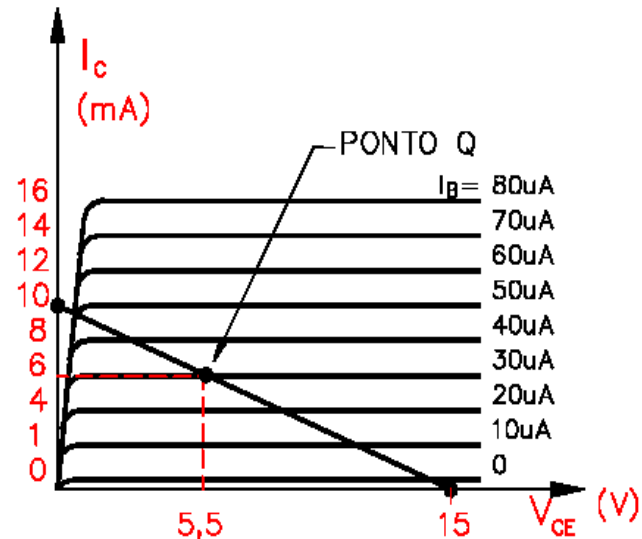
Reta de Carga: $I_C = - (1/R_C) * V_{CE} + V_{CC}/R_C$

$$I_C = - (1/1583) * V_{CE} + 15/1583$$

Extremos

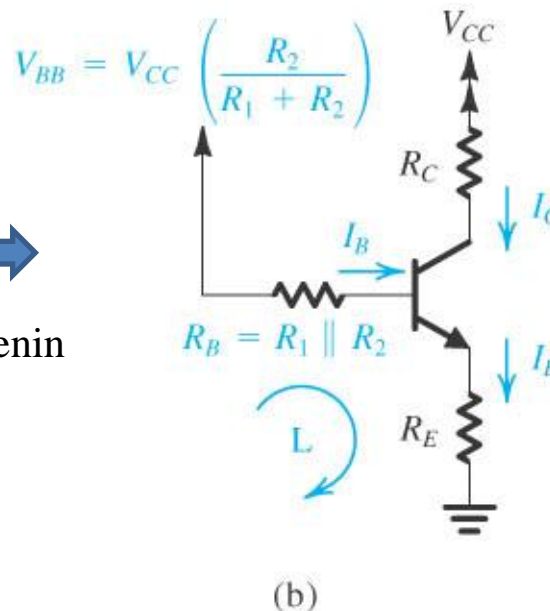
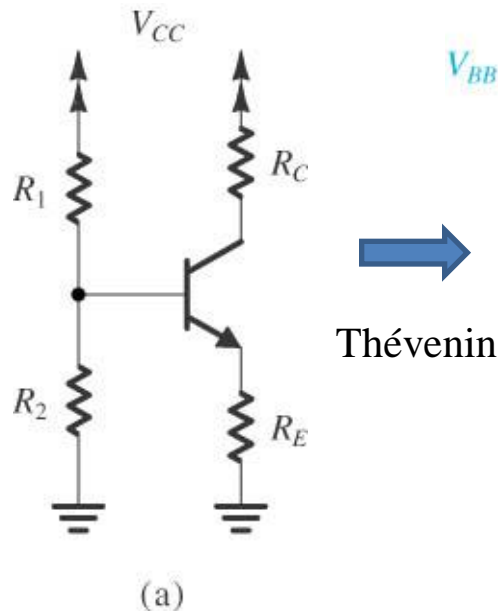
$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = V_{CC} / R_C = 15V / 1583\Omega = 9,5 \text{ mA}$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15V$$



Circuito de Polarização Prático

- O circuito abaixo é bastante utilizado em polarização de BJT.
- Não é objetivo do nosso curso estudá-lo, mas deduzindo suas equações mostra-se que a corrente I_E pode ser feita insensível às variações de β e V_{BE} , projetando o circuito dadas as condições fornecidas.



$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_B/(\beta + 1)}$$

Para I_E ser insensível às variações de β e V_{BE} :

$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

$$V_{BB} \gg V_{BE}$$

Limites dos transistores - SOA

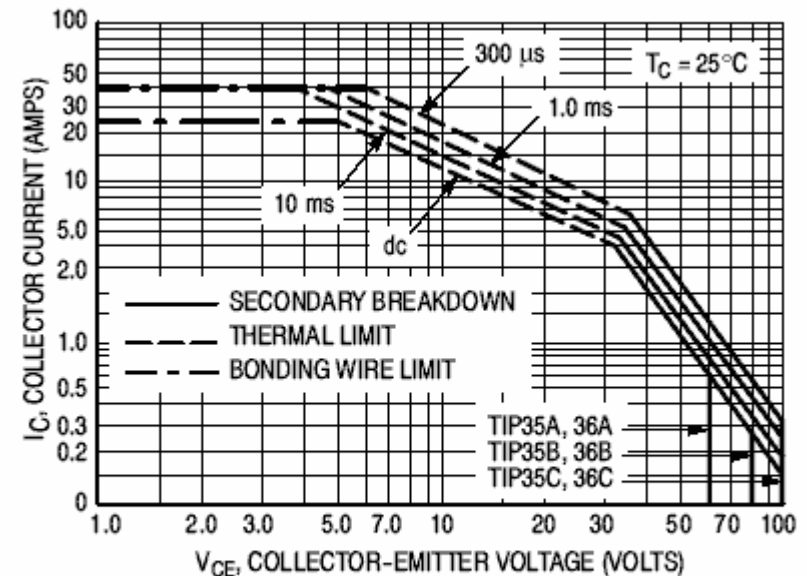
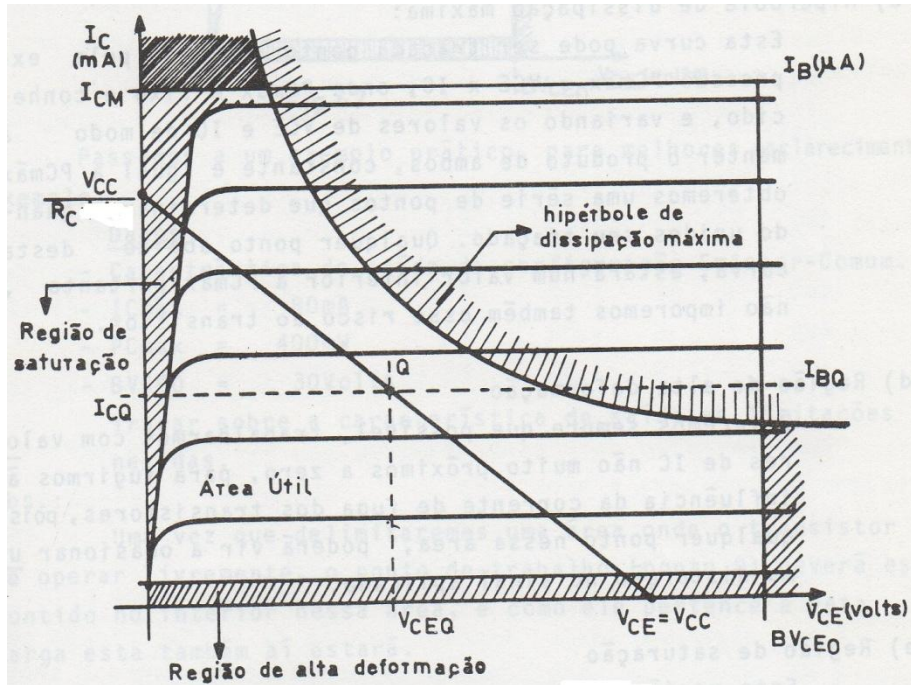


Figure 6. Maximum Rated Forward Bias Safe Operating Area

- I_{CM} : valor máximo que a corrente contínua do coletor pode atingir
- $PC_{máx}$: valor máximo da potência média dissipada no coletor ($PC_{max} = V_{CE} * I_C$)
- $BVCBO$: tensão de ruptura entre coletor e base quando o emissor está aberto
- $BVCEO$: tensão de ruptura entre coletor e emissor quando a base está aberta

Exemplo de Folha de Dados: BC547



BC546/547/548/549/550

Switching and Applications

- High Voltage: BC546, $V_{CE0}=65V$
- Low Noise: BC549, BC550
- Complement to BC556 ... BC560



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : BC546	80	V
	: BC547/550	50	V
	: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : BC546	65	V
	: BC547/550	45	V
	: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage : BC546/547	6	V
	: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ C$

BC546/547/548/549/550

Exemplo de Folha de Dados: BC547

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30\text{V}, I_E=0$			15	nA
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$	110		800	
$V_{CE}(\text{sat})$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$		90 200	250 600	mV mV
$V_{BE}(\text{sat})$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$		700 900		mV mV
$V_{BE}(\text{on})$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$ $V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}$	580	660	700 720	mV mV
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}, f=100\text{MHz}$		300		MHz
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB}=10\text{V}, I_E=0, f=1\text{MHz}$		3.5	6	pF
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB}=0.5\text{V}, I_C=0, f=1\text{MHz}$		9		pF
NF	Noise Figure : BC546/547/548 : BC549/550 : BC549 : BC550	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=200\mu\text{A}$ $f=1\text{KHz}, R_G=2\text{K}\Omega$ $V_{CE}=5\text{V}, I_C=200\mu\text{A}$ $R_G=2\text{K}\Omega, f=30\sim 15000\text{MHz}$		2 1.2 1.4 1.4	10 4 4 3	dB dB dB dB

h_{FE} Classification

Classification	A	B	C
h_{FE}	110 ~ 220	200 ~ 450	420 ~ 800

Exemplo de Folha de Dados: BC547

Typical Characteristics

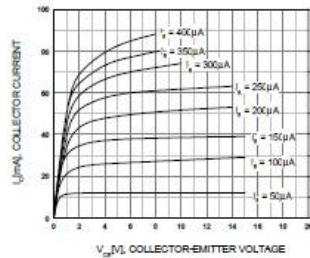


Figure 1. Static Characteristic

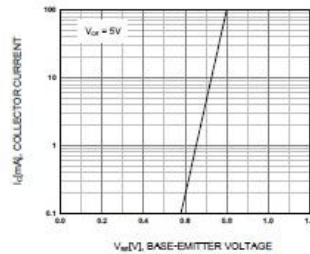


Figure 2. Transfer Characteristic

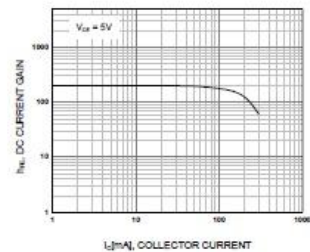


Figure 3. DC current Gain

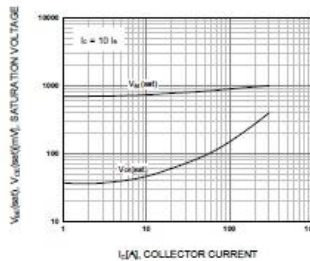


Figure 4. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

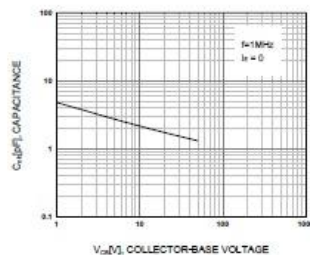


Figure 5. Output Capacitance

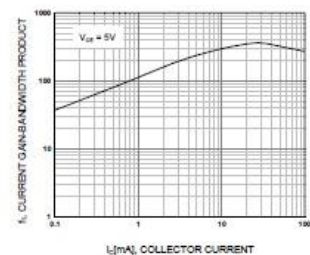
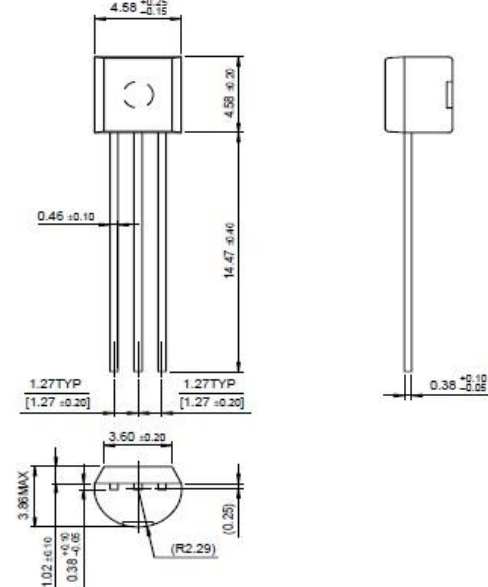


Figure 6. Current Gain Bandwidth Product

Package Dimensions

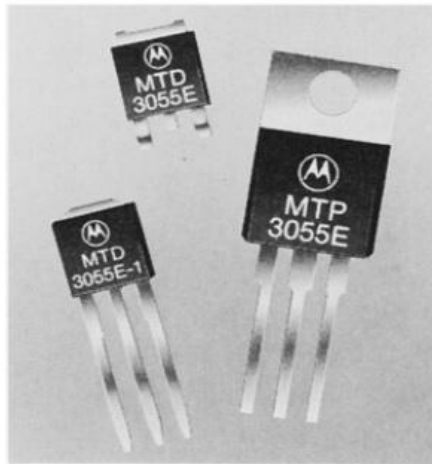
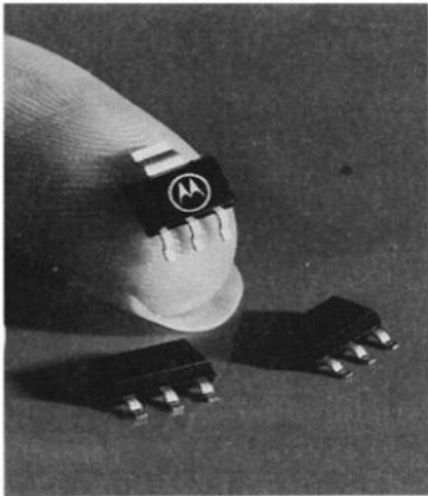
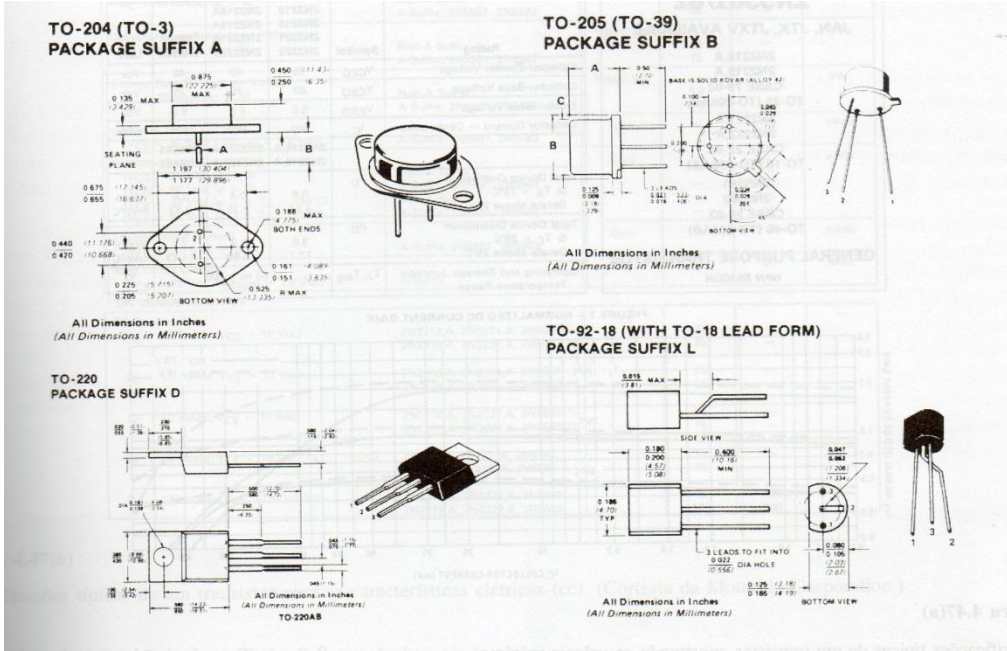
TO-92



Dimensions in Millimeters

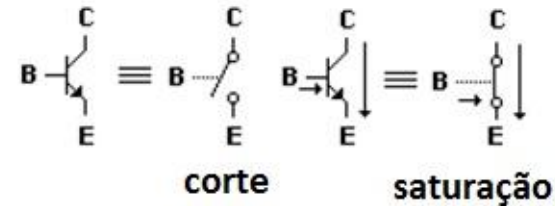
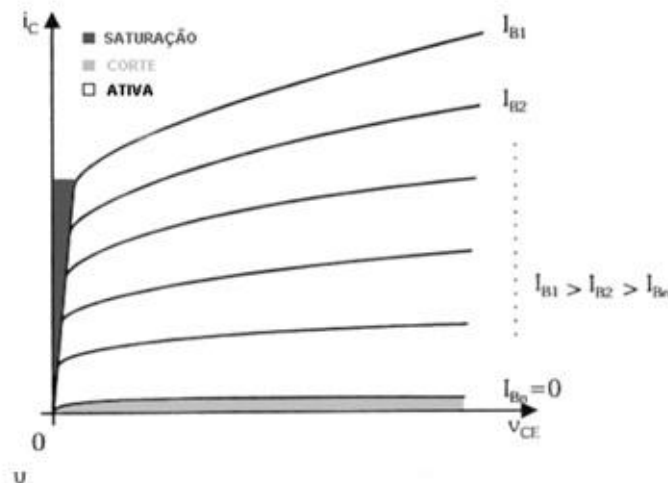
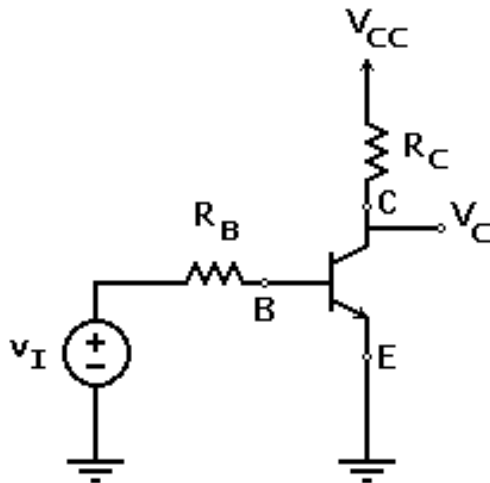
BC546/547/548/549/550

Exemplos Encapsulamento



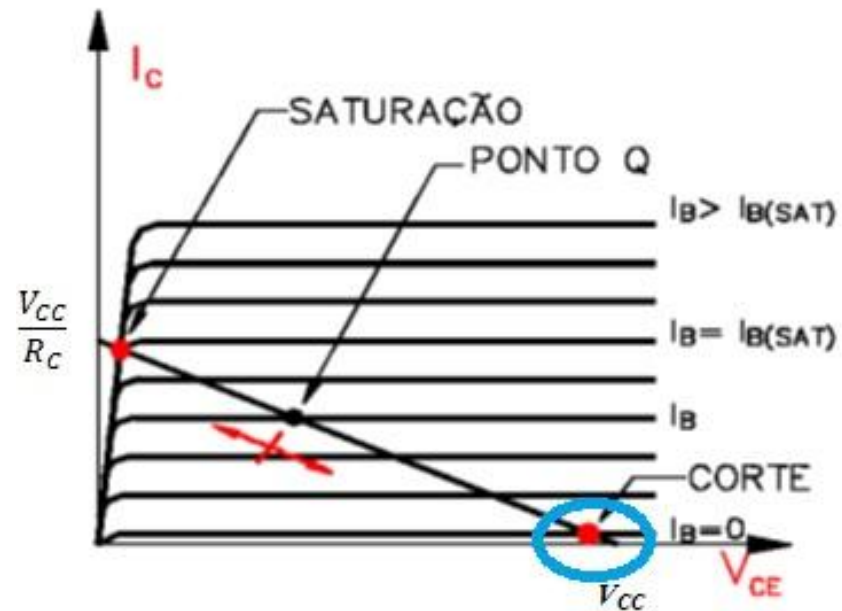
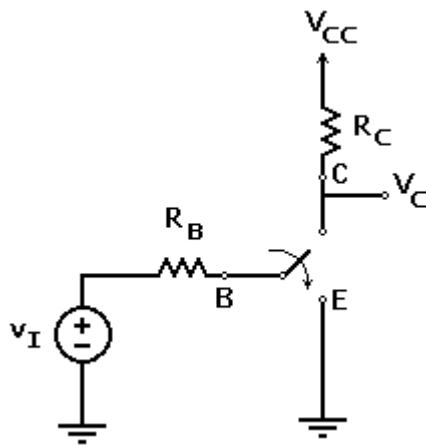
Transistor como Chave

- Os dois modos extremos de operação (corte e saturação) são muito utilizados se o transistor é usado como chave, tais como em aplicações de lógica e acionamento liga-desliga de cargas.



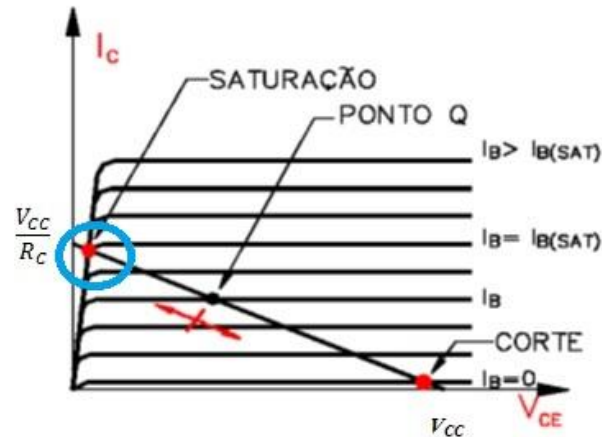
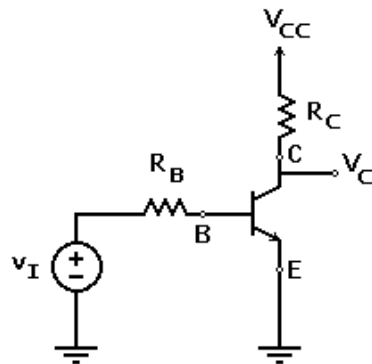
Região de Corte

- Como dito anteriormente, o funcionamento na zona de corte (interruptor aberto) caracteriza-se pela ausência de corrente de coletor ($I_C = I_E = 0$) e consequentemente $V_{CE} = V_C = V_{CC}$.
- Para tal é necessário fazer $I_B \cong 0$ ($V_{BE} < 0,5V \rightarrow V_I < 0,5V$ para transistores de silício).
- Comporta-se como uma chave aberta.



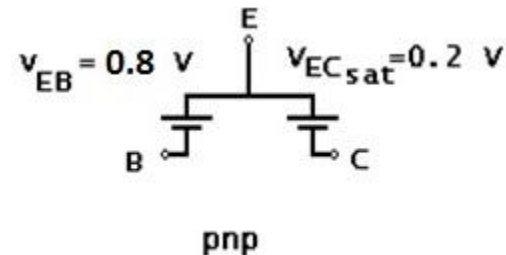
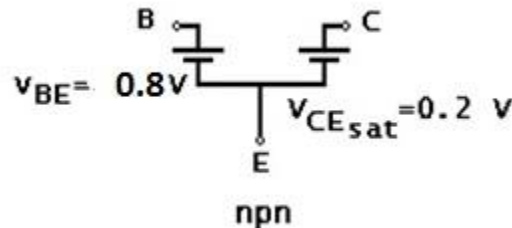
Região de Saturação

- No funcionamento na zona de saturação (interruptor fechado) temos uma tensão $V_{CE} = V_C$ praticamente nula ($\cong 0.2V$ para transistores de Silício), $V_{BE} \cong 0,8V$, sendo que a corrente de coletor I_C atinge a o seu valor máximo, limitado apenas pela resistência de coletor R_C ($I_C = V_{CC} / R_C$).

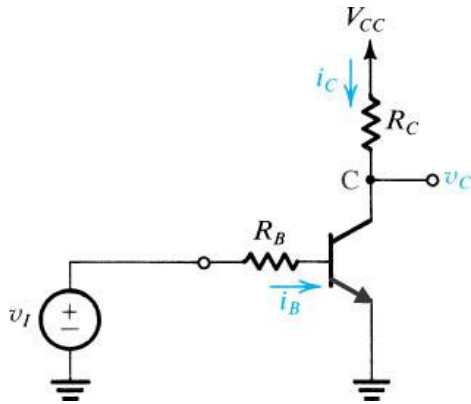


$$I_C / I_B < \beta \text{ mínimo}$$

Modelo do transistor
na saturação



Resumo Condições de Projeto



- Para garantirmos o corte, $I_B \cong 0$ ($V_{BE} < 0,5V \rightarrow V_I < 0,5V$)
- Para determinarmos R_B e R_C devemos, por exemplo, definir/escolher uma corrente de coletor desejada quando o transistor estiver no estado saturado, $I_{C(sat)}$. Então:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{I_{C(sat)}} \quad V_{CE(sat)} = 0,2 \text{ V}$$

- Calculamos I_B para garantirmos a saturação:

$$\frac{I_C}{I_B} < \beta_{min} \Rightarrow \frac{I_C}{I_B} < h_{FE(min)} \Rightarrow I_B > \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE(min)}} \quad (\text{por exemplo } I_B = OF * I_{C(sat)} / h_{FE(min)})$$

Onde OF é o fator de sobre-excitação

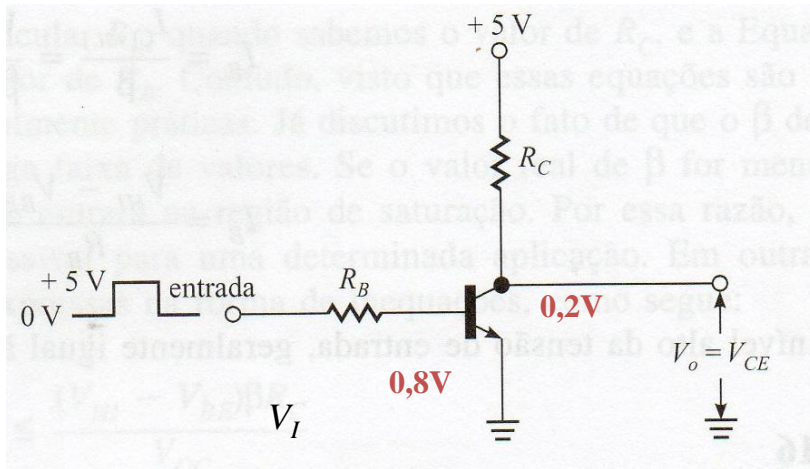
- E determinamos R_B ($V_{BE(sat)} = 0,8 \text{ V}$):

$$R_B = \frac{V_I - V_{BE(sat)}}{I_B}$$

Obs: R_B seria o valor comercial igual ou menor a esse valor. Definido R_B , a corrente I_B final deve ser menor que a corrente máxima permitida para o componente escolhido ($I_B < I_B \text{ máximo}$)

Muitas vezes temos uma carga R_C já implícita no coletor (por exemplo um relé de tensão V_{CC}). Nessa caso, precisamos calcular apenas o valor de R_B que garanta a saturação para a corrente necessária para acionar tal carga.

Exemplo inversor



O inversor da figura deve ser projetado de modo que opere com transistores cujos valores de h_{FE} variem na faixa de 80 a 200 e tenha uma corrente de coletor quando saturado de 3,2mA .
Determinar R_C e R_B que permitam tal funcionamento.

- Para $V_I = V_{LOW} = 0V$, $I_B = 0$ ($V_{BE} < 0,5V$) e $V_o = +5V$ (corte \rightarrow ok)
- Para $V_I = V_{HIGH} = 5V$ devemos ter o transistor saturado:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{I_{C(sat)}} \Rightarrow R_C = \frac{(5 - 0,2)V}{3,2 * 10^{-3}} = 1,5k\Omega$$

$$I_B > \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE(min)}} \Rightarrow I_B > \frac{3,2 * 10^{-3}}{80} = 40\mu A \Rightarrow R_B < \frac{V_I - V_{BE(sat)}}{I_B} \Rightarrow R_B < \frac{(5 - 0,8)}{40 * 10^{-6}} \Rightarrow R_B < 105k\Omega$$

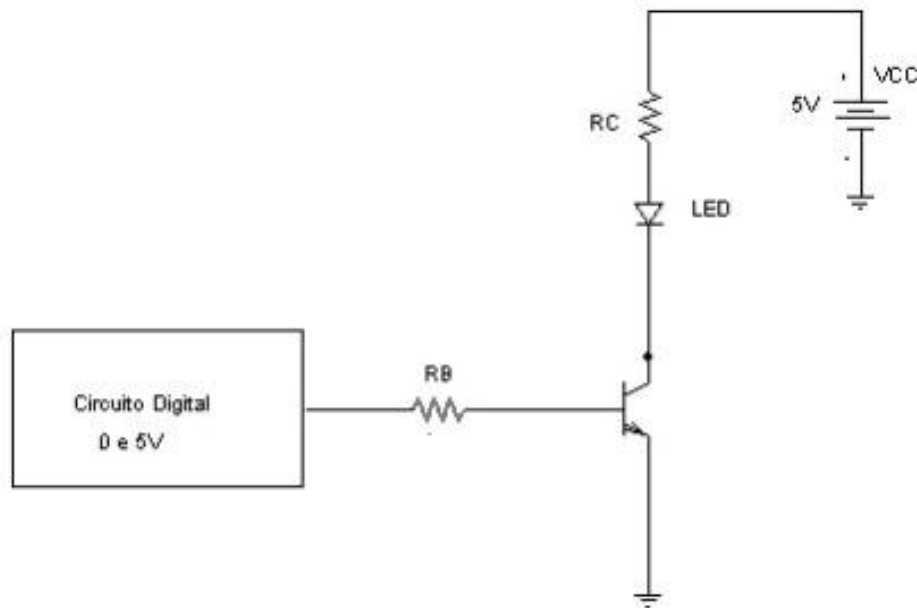
Considerando um fator de sobre-excitação, por exemplo, 10 para I_B temos:

$$R_B = \frac{(5 - 0,8)}{400 * 10^{-6}} = 10,5k\Omega$$

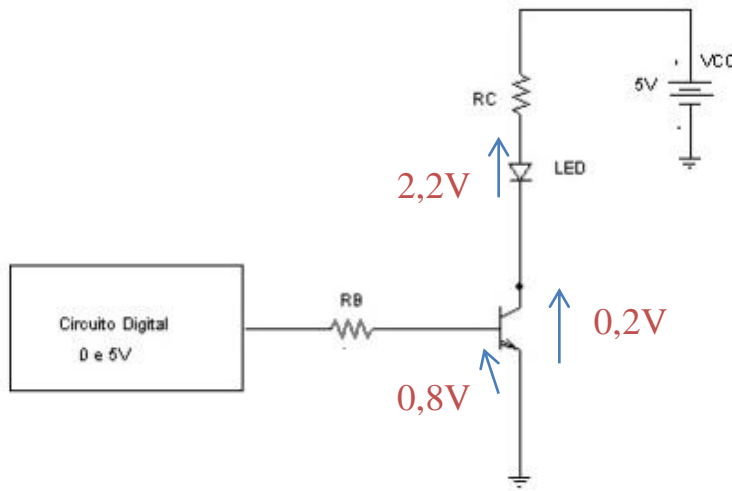
$$\begin{aligned} R_C &= 1,5k\Omega \text{ e} \\ R_B &= 10,5k\Omega \end{aligned}$$

Exemplo Acionamento de um Led

- Um circuito integrado fornece na saída no máximo 5mA. Para acender um LED de alto brilho precisa-se de pelo menos 20mA. Para isso, usa-se um transistor para amplificar a corrente. A tensão de condução do LED é 2,2V. Quais os valores máximos que R_C e R_B deverão ter? Considere β variando na faixa de 100 a 500.



Resolução



- Quando o nível de tensão de saída do CI for 0V, o transistor não conduz. Logo, a corrente no LED é zero e o LED não acende (corte \rightarrow OK).
- Quando a voltagem é 5V, a corrente no LED (coletor) deve ser 20mA, com o transistor saturado ($V_{CE} = 0,2V$).

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{CE(sat)}}{I_{C(sat)}} \Rightarrow R_C = \frac{(5 - 2,2 - 0,2)V}{20 * 10^{-3}A} = 130\Omega$$

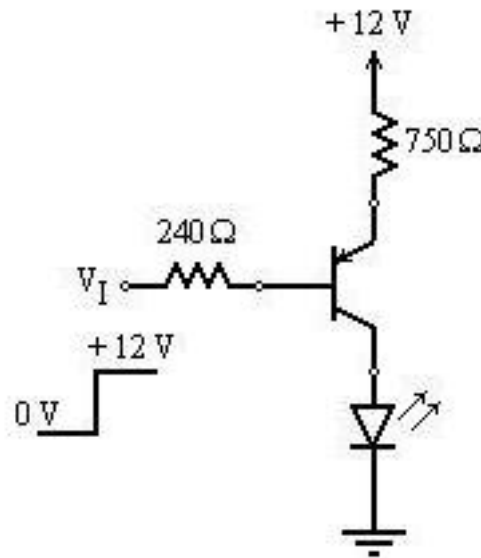
Para valores acima de 130Ω a corrente seria menor que 20mA. Usaríamos um valor comercial de 120Ω

Considerando 20 mA no coletor (usando o valor de R_C teórico):

$$I_B > \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE(min)}} \Rightarrow I_B > \frac{20 * 10^{-3}}{100} = 200\mu A \Rightarrow R_B < \frac{(5 - 0,8)}{200 * 10^{-6}}$$

$$R_B < 4k\Omega$$

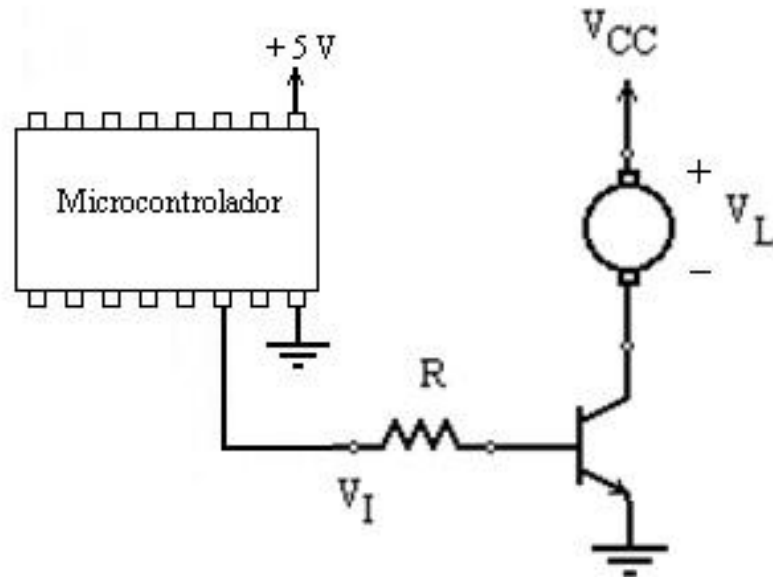
Exemplo Acionamento usando Transistor PNP



- Se $V_I = 0 \Rightarrow$ Transistor saturado, portanto LED aceso;
- Se $V_I = V_{CC} \Rightarrow$ Transistor em corte, portanto LED apagado.

Exemplo de Aplicação

► Acionamento de cargas com sinal PWM (exemplo: motor CC)

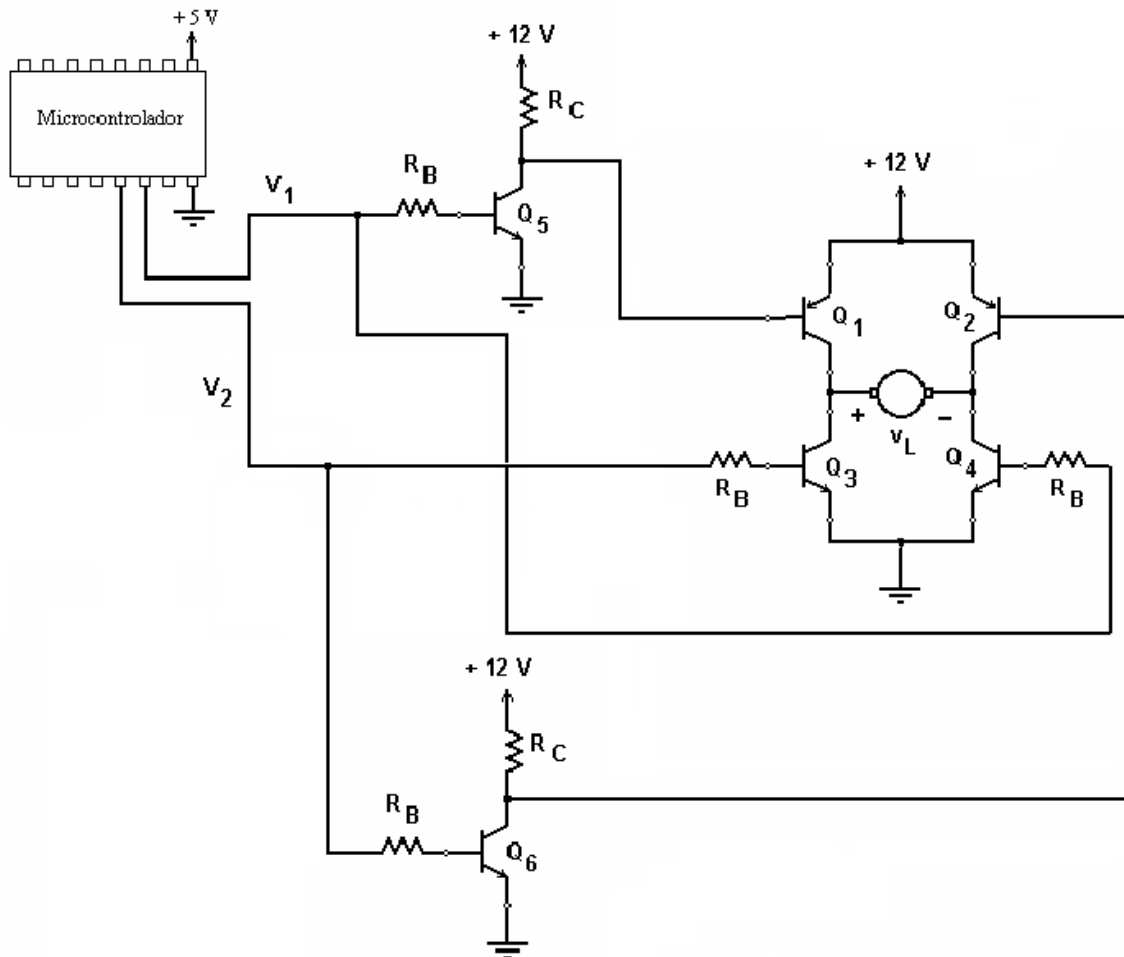


► Características:

- sinal de entrada é digital (por exemplo, usando microcontrolador), com frequência fixa e alta e largura de pulso variável

Exemplo de Aplicação (cont.)

► Acionamento bidirecional de cargas com sinal PWM (Ponte H)

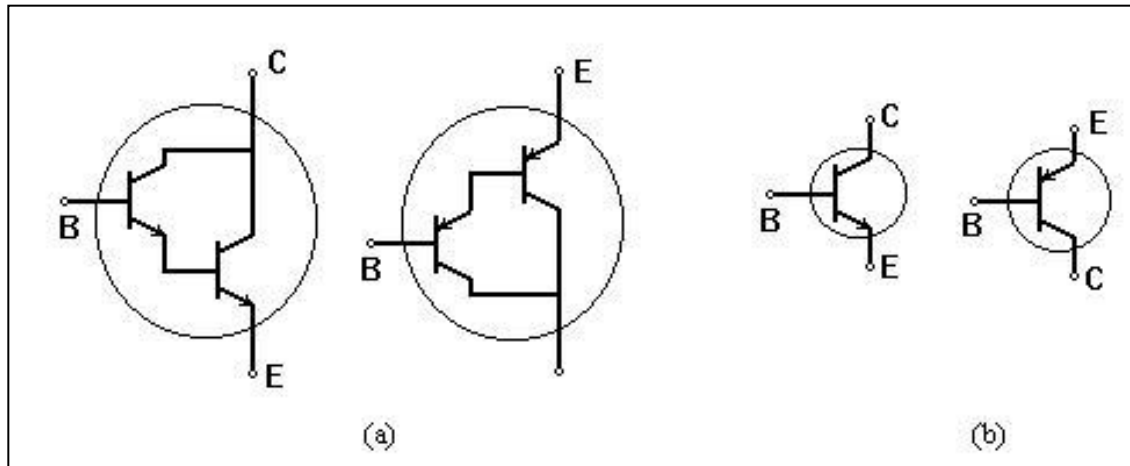


► Características:

transistores como chave, máxima tensão no motor: próximo de 12 V

Transistores Darlington

- ▶ São transistores especiais que apresentam um par de transistores em um mesmo dispositivo que funciona como um único transistor com um β extremamente alto (da ordem de 1000 a 20000).



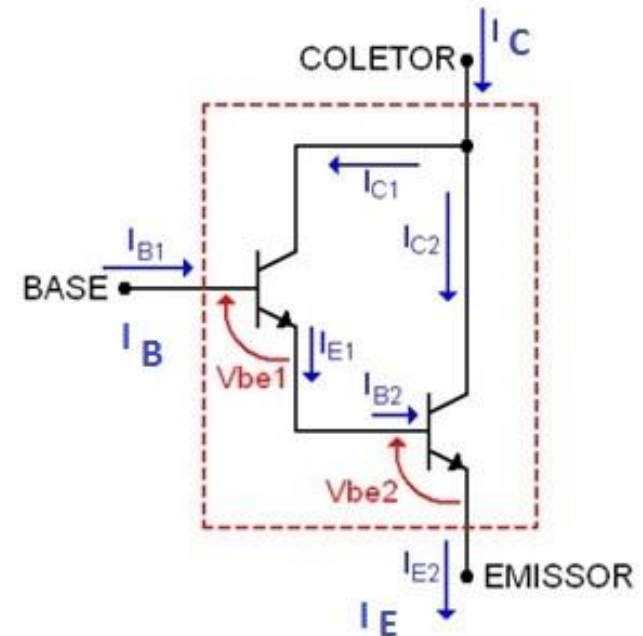
Transistores Darlington

Analizando a figura temos:

- ▶ $I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$ $I_{C2} = \beta_2 I_{B2}$
- ▶ $I_{E1} = (\beta_1 + 1) I_{B1}$ $I_{E2} = (\beta_2 + 1) I_{B2}$
- ▶ Como $I_{B2} = I_{E1}$, temos:
- ▶ $I_{C2} = \beta_2(\beta_1 + 1) I_{B1}$
- ▶ Logo:
- ▶ $I_C = I_{C1} + I_{C2} = (\beta_1 + \beta_2 * \beta_1 + \beta_2) I_{B1}$
- ▶ $I_C = (\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1) I_{B1}$
- ▶ Como $I_{B1} = I_B$ e $\beta_1, \beta_2 \gg 1$
- ▶ temos:

$$I_C = \beta_1 \beta_2 I_B \rightarrow I_C / I_B = \beta_{TOTAL} = \beta_1 * \beta_2$$

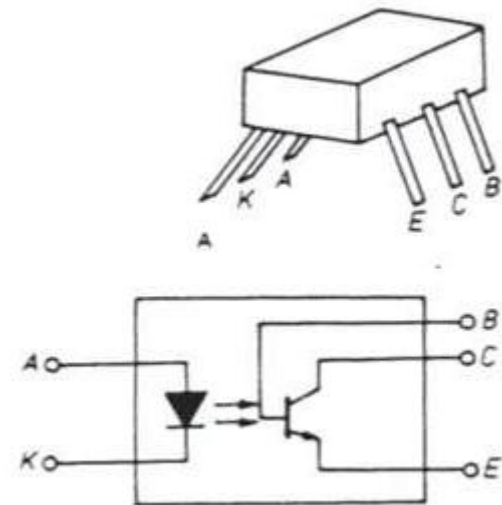
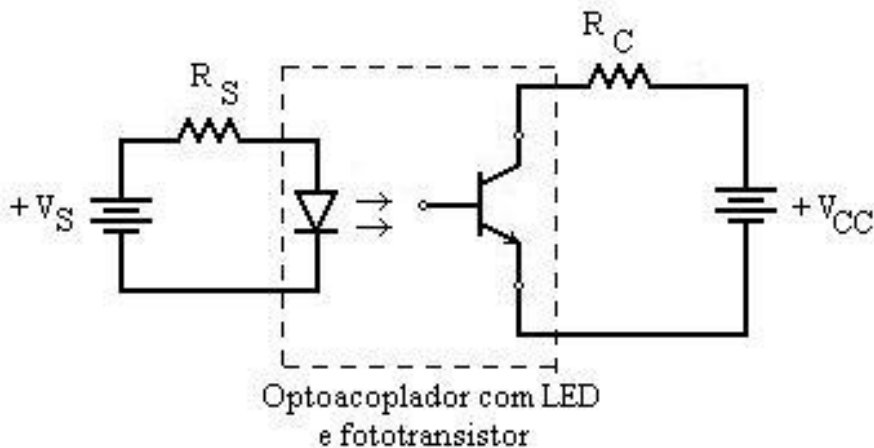
$$\text{Também: } V_{BE} = V_{be1} + V_{be2}$$



**Obtemos um elevado
valor de β_{TOTAL}**

Acopladores ou Isoladores Ópticos (Optoacopladores)

- Um acoplador óptico combina um dispositivo emissor de luz com um dispositivo sensível à luz em um único encapsulamento.



Acopladores ou Isoladores Ópticos (Optoacopladores)

► Exemplo de aplicações:

- acoplamento óptico – transmissão de sinais digitais com isolamento galvânica.
- sensores óticos para *encoders*;
- sistemas de fim de curso em automação.

