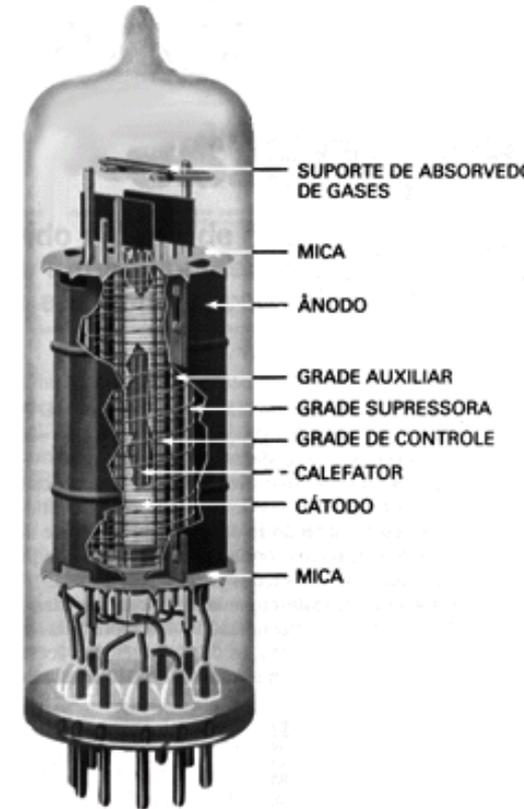


Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.1 - Breve Histórico

- Diodo à válvula inventado em 1904 por J. A. Fleming;
- De 1904 a 1947: uso predominante de válvulas;
- 1906: Lee de Forest acrescenta terceiro elemento, a grade de controle: triodo;
- Rádios e televisão usavam intensivamente tais dispositivos;
 - 1922: 1 milhão de válvulas;
 - 1937: 100 milhões de válvulas;
- Década de 30: tetrodo e pentodo;



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- 1943, iniciam-se os trabalhos com o ENIAC, o primeiro computador de grande escala, construído com válvulas:
 - 18.000 válvulas, consumindo 140 kW, 30 toneladas;
- Características das **válvulas**:
 - Alto consumo de potência (calor);
 - Baixa velocidade;
 - Vida útil reduzida;
 - Baixa confiabilidade;
 - Pesada;
- 1947: Transistor de ponto de contato: Bardeen e Brattain;
- 1948: transistor: dispositivo que tinha uma característica de transresistência;



Réplica do primeiro Transistor

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

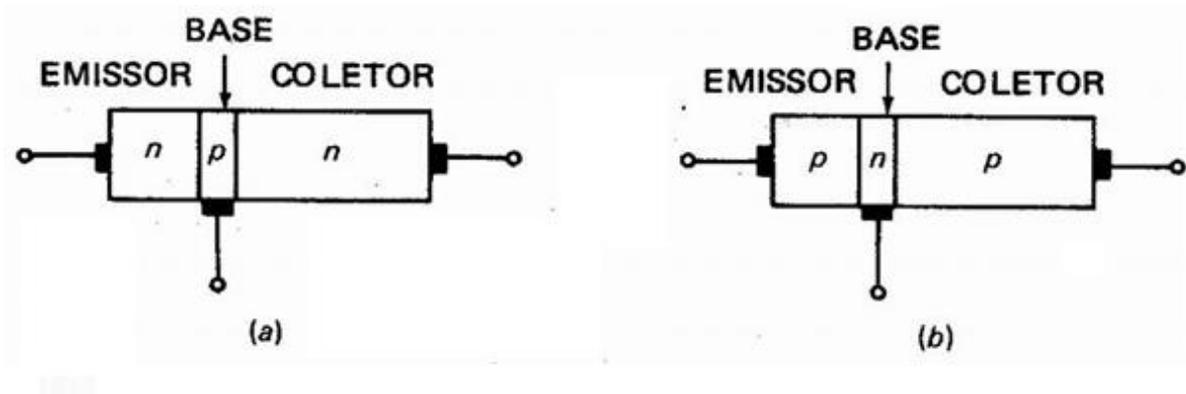
- 1951: Schockley inventa o transistor de junção;
- 1956: ganham o prêmio Nobel;
- Entre 1954 e 1956, 28 milhões de transistores haviam sido fabricados, rendendo US\$ 55 M.
- No mesmo intervalo havia sido produzido 1,3 bilhões de válvulas, rendendo mais de US\$ 1 B.

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.1.1 - Princípio de Funcionamento do Transistor

- cristal npn – emissor, base e coletor – transistor npn;



- emissor: densamente dopado – injeta elétrons na base;
- base: pequena e levemente dopada – permite que os elétrons vindos do emissor atinjam o coletor - dopagem 10 vezes menor que o emissor;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

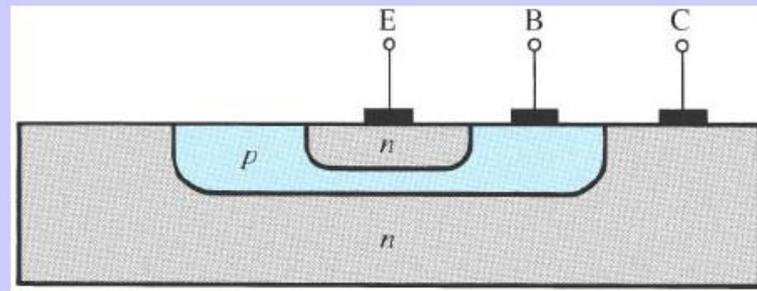
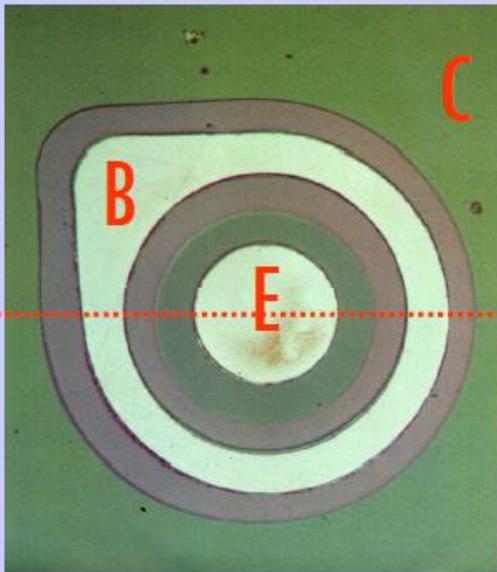
Capítulo 2 – Transistor

- coletor: dopagem intermediária – coleta os elétrons que vêm da base e é a região mais extensa, pois deve dissipar mais calor;
- tamanho do emissor + coletor > que 150 vezes tamanho da base;
- duas junções pn:
 - emissor/base: diodo emissor;
 - base/coletor: diodo coletor;
- transistor pnp;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

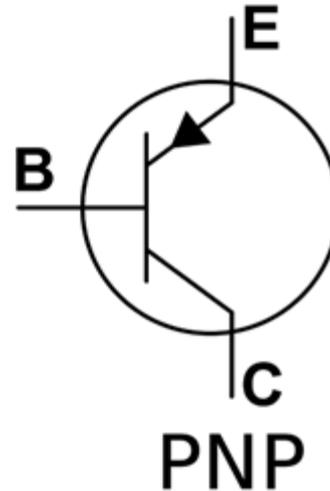
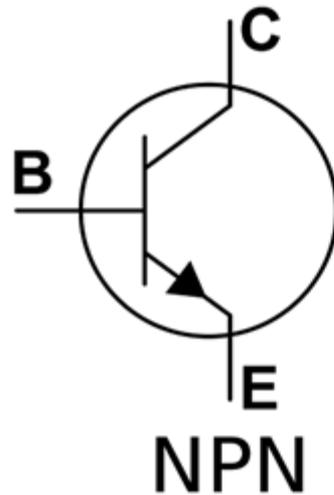
Um Transistor npn Real



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- transistor pnp;



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.1.2 – Transistor Não-Polarizado

- elétrons livres se difundem através da junção, criando duas camadas de depleção;
- para cada camada de depleção, a barreira de potencial é de 0,7 V;
- quanto mais densamente dopada uma região, maior a concentração de íons próximo da junção;
- quanto mais fracamente dopada, mais a camada de depleção avança na região;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2 – Transistor Polarizado

- Polarização direta nos diodos emissor e coletor (Figura 5.3a);
 - Correntes grandes;

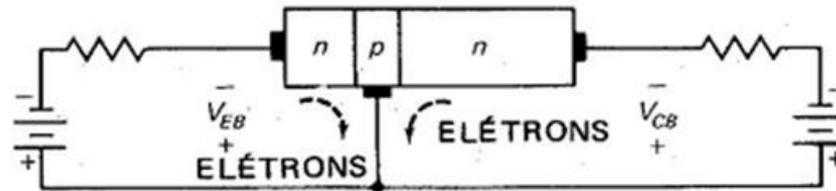


Figura 5.3 (a)

- Polarização reversa nos diodos emissor e coletor (Figura 5.3b);
 - Correntes pequenas, portadores minoritários;

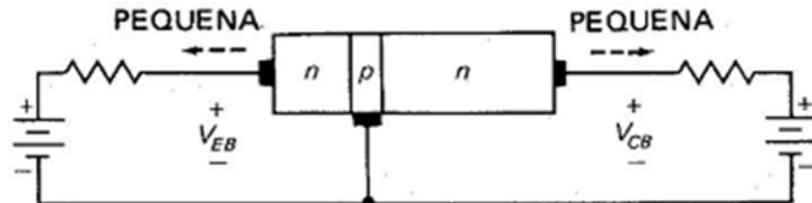


Figura 5.3 (b)

- Transistores não são usados nessas formas de polarização;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2 – Transistor Polarizado

- Polarização direta e reversa nos diodos emissor e coletor

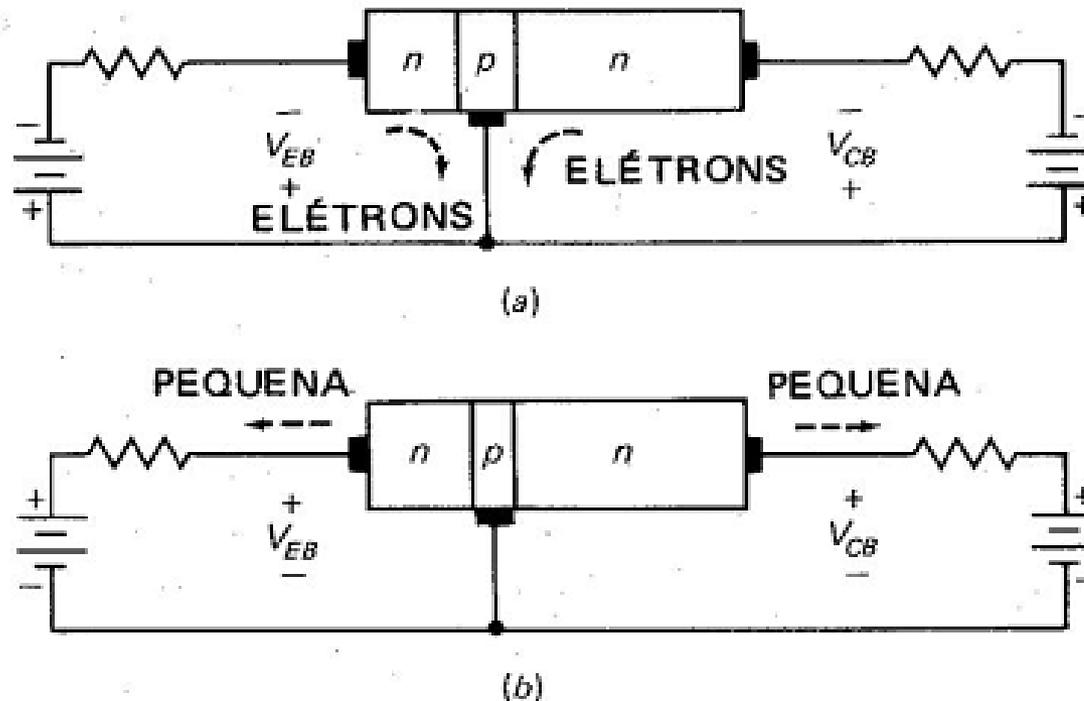


Figura 5.3

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- 2.2.1 – Polarização Direta-Reversa
- Diodo emissor com polarização direta e diodo coletor com polarização reversa;
- Grande corrente no emissor e também no coletor;

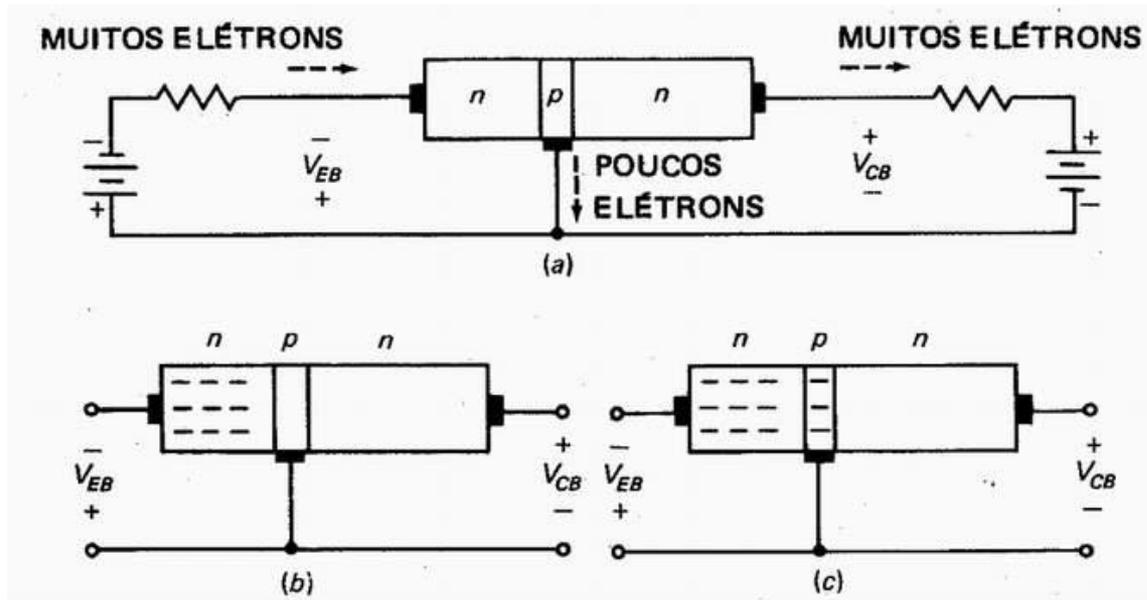


Figura 5.4

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Corrente injetada pelo emissor entra na base;
- Dois caminhos: descer pelo terminal da base ou seguir até o coletor;
 - Corrente pela base: corrente de recombinação;
 - Corrente pequena pois a base é levemente dopada;
 - Base é muito fina;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Figura 5.4.d: fluxo estável de elétrons
- Polarização V_{EB} força os elétrons do emissor a entrarem na região da base;
- Base fina e levemente dopada permite a passagem até o coletor;
- Maioria dos transistores, mais de 95 % dos elétrons injetados do emissor fluem para o coletor;

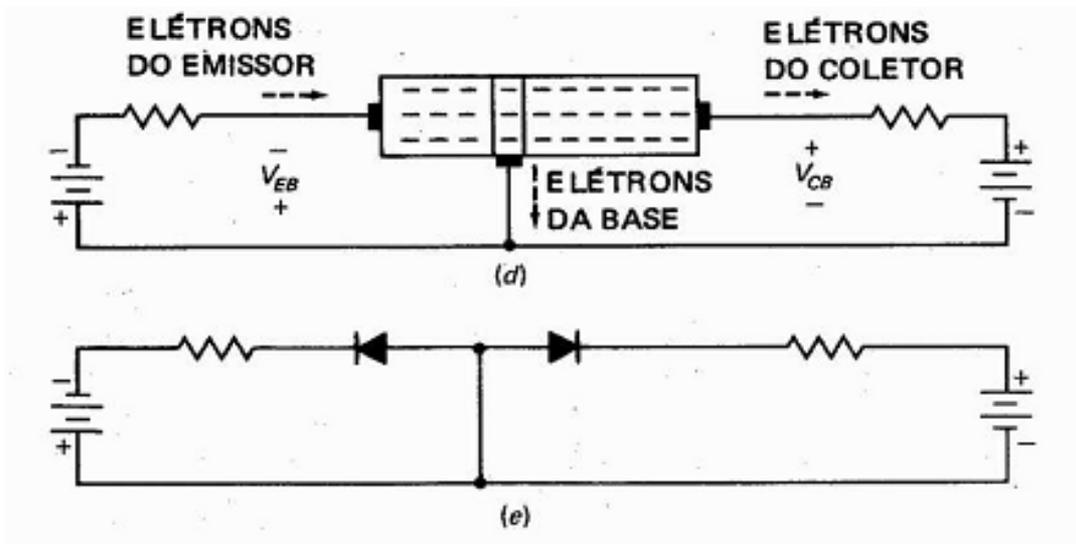


Figura 5.4 - d e

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Resumindo, no Transistor:

- Emissor: densamente dopado;
- Base: fina e levemente dopada;
- Coletor: grande e dopagem intermediária;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.2 - Ponto de Vista de Bandas de Energia

- Polarização direta do diodo emissor: permite que alguns elétrons livres se desloquem do emissor para a base;
- Ao entrar na banda de condução da base, tornam-se portadores minoritários;
- Pela dopagem da base, a maior parte se difunde pela camada de depleção do coletor;
- Alguns elétrons se recombinam com lacunas na base, tornando-se elétrons de valência e fluem para o terminal da base;
- Descida dos elétrons da base para o coletor gera calor: região mais extensa;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- **Polarização reversa do diodo coletor:**
 - não tem grande influência no número de elétrons que entram no coletor;
 - há pequena variação na corrente I_C quando V_{CB} é aumentado;

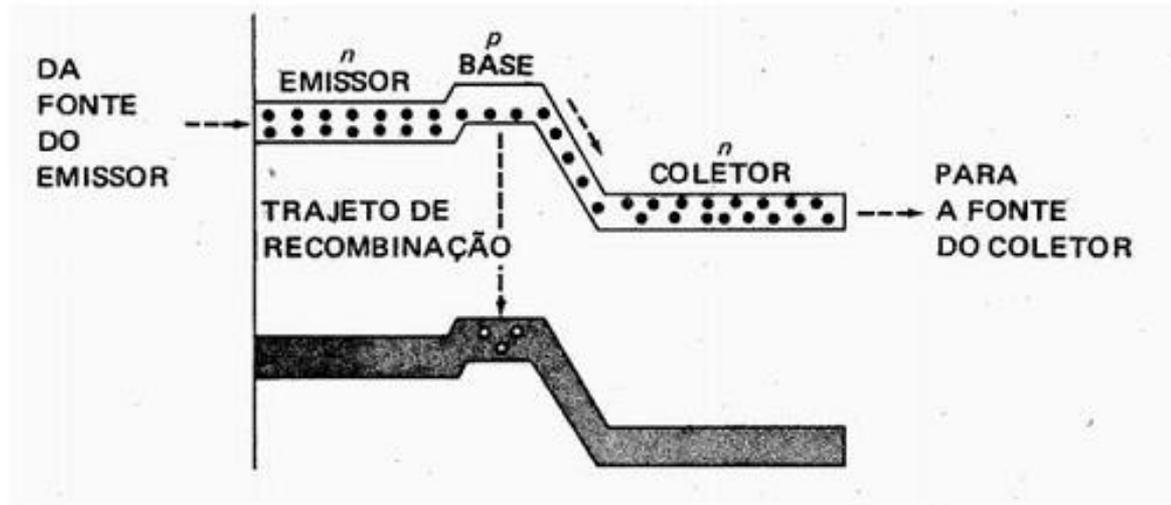


Figura 5.5

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.3 - Ganho de Corrente: Alfa cc (α_{CC})

- relação entre a corrente do coletor e do emissor;
- $\alpha_{CC} = I_C / I_E$
- quanto mais fina e mais levemente dopada a base, α_{CC} se aproxima de 1;

Exemplo:

$$I_C = 4,9 \text{ mA} \quad I_E = 5 \text{ mA}$$

$$\alpha_{CC} = 4,9 \text{ mA} / 5 \text{ mA} = 0,98$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- **2.2.4 – Tensões de Ruptura**
- junções são semelhantes a diodos: tensão reversa pode danificar o transistor;
- tensão de ruptura depende da largura da camada de depleção e dos níveis de dopagem;
- diodo emissor: alto nível de dopagem – tensão reversa baixa, de 5 a 30 V;
- diodo coletor: baixa dopagem – tensão reversa de 20 a 300 V;
- Funcionamento normal: diodo emissor diretamente polarizado e diodo coletor reversamente polarizado;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Se V_{CB} for grande demais, muita potência é dissipada e pode danificar o dispositivo;
- Diodo emissor pode ser polarizado reversamente em alguns circuitos;
- Tensões máximas reversas V_{BE} e V_{CB} não devem ser atingidas;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.5 – Ligação Emissor Comum (EC)

- Polarização do transistor tendo o emissor como ponto comum (referência);

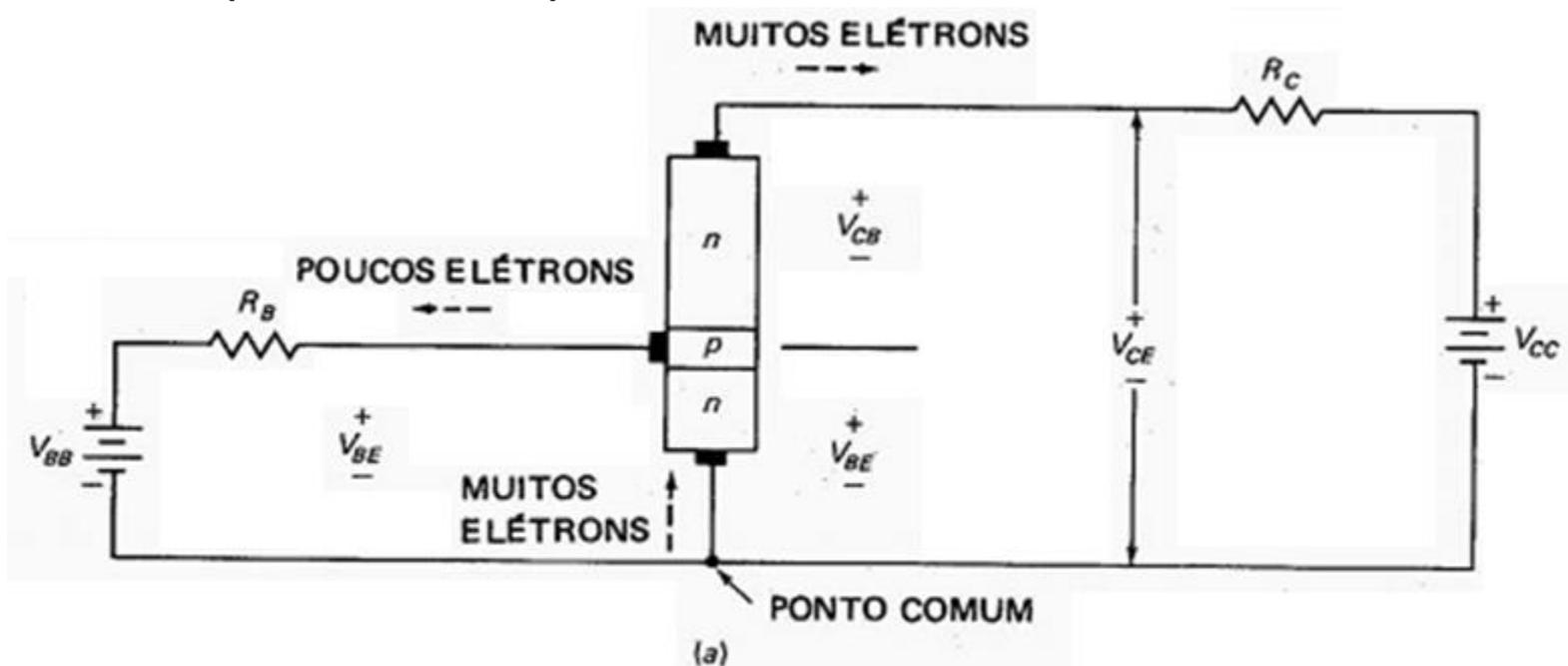


Figura 5.7

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Funcionamento semelhante ao esquema anterior (base comum);

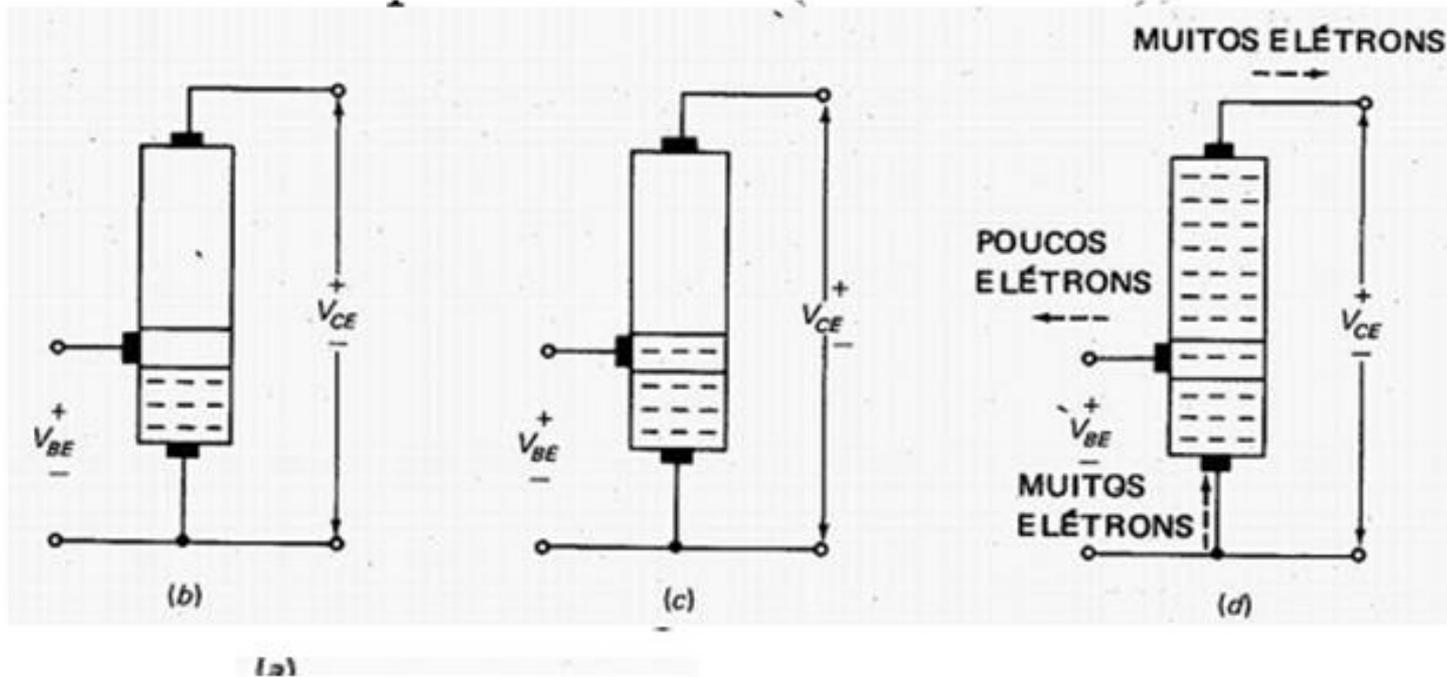


Figura 5.7. –b, c e d

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.5.1 - Ganho de Corrente Beta cc (β_{cc})

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

- Relação entre β_{cc} e α_{cc}

$$\beta_{cc} = \frac{\alpha_{cc}}{1 - \alpha_{cc}} \quad \alpha_{cc} = \frac{\beta_{cc}}{\beta_{cc} + 1}$$

- Região ativa: funcionamento do transistor num circuito linear:

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

$$\beta_{CC} = \frac{\alpha_{CC}}{1 - \alpha_{CC}} \qquad \alpha_{CC} = \frac{\beta_{CC}}{\beta_{CC} + 1}$$

Obter β_{CC} para $\alpha_{CC} = 0,9; 0,95; 0,98$

Obter α_{CC} para $\beta_{CC} = 10; 100; 1000.$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Diodo emissor deve estar polarizado diretamente;
- Diodo coletor deve estar polarizado reversamente;
- Tensão no diodo coletor deve ser menor que a tensão de ruptura;
- Ligação EC: mais usada pois uma pequena corrente de base controla uma grande corrente de saída – fonte de corrente;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.5 – Símbolo Esquemático

- transistor npn com fluxo convencional (Figura 5.9.a);
- fluxo de elétrons (Figura 5.9.b);
- emissor tem uma seta, indicando sentido da corrente;

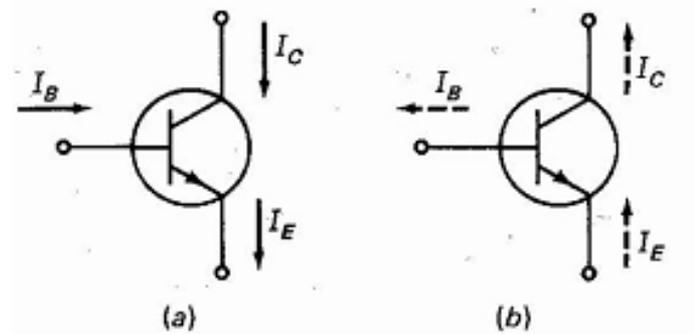


Figura 5.9

- corrente do emissor é a soma da corrente do coletor mais a corrente da base;
- corrente do coletor é aproximadamente igual à corrente do emissor;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2. 2.6 – Curvas Características do Transistor

- gráficos que relacionam correntes e tensões no transistor

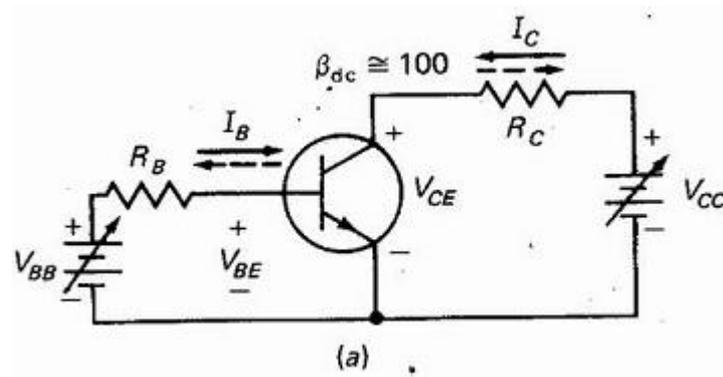


Figura 5.10

- variação das tensões V_{BB} e V_{CC} : gerar diferentes correntes e tensões;
- fixa-se I_B e varia V_{CC} : mede-se I_C e V_{CE} ;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- exemplos: $I_B = 10$ e $20 \mu\text{A}$ (Figura 5.10 b e c);

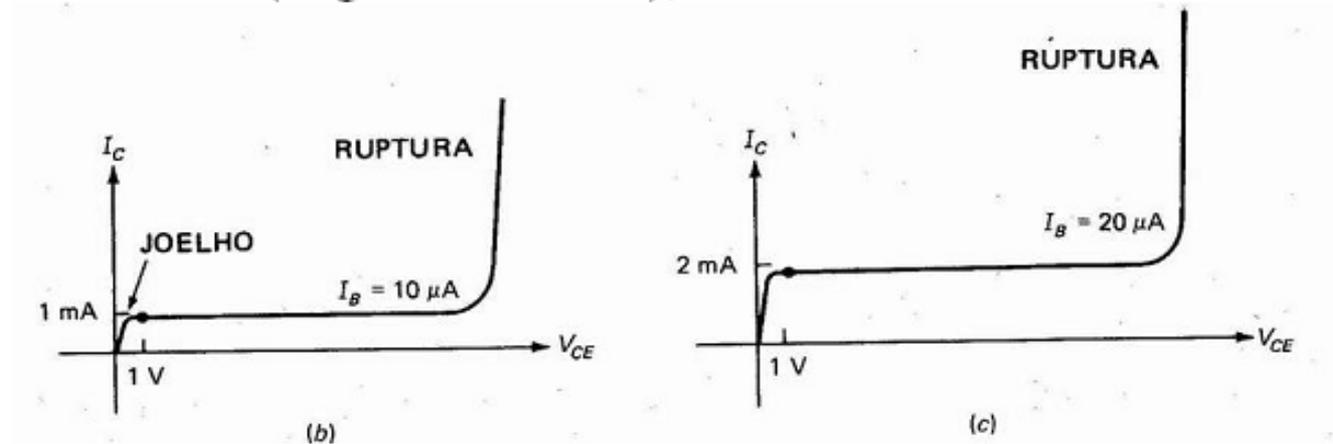


Figura 5.10 b e c

- $V_{CE} = 0$: diodo coletor não está polarizado reversamente – corrente I_C é pequena;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- V_{CE} entre 0 e 0,7 V: I_C aumenta fortemente e depois se torna constante (polarização reversa no diodo coletor);
- $V_{CE} > 0,7V$: não influencia muito a corrente I_C ;
- V_{CE} elevada: diodo coletor rompe-se;
- **Tensão de compliance:** faixa de tensão do coletor-emissor na qual o transistor funciona como uma fonte de corrente.
- Quanto maior I_B , maior o valor de I_C ;
- Várias curvas para I_B diferente num mesmo gráfico.

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

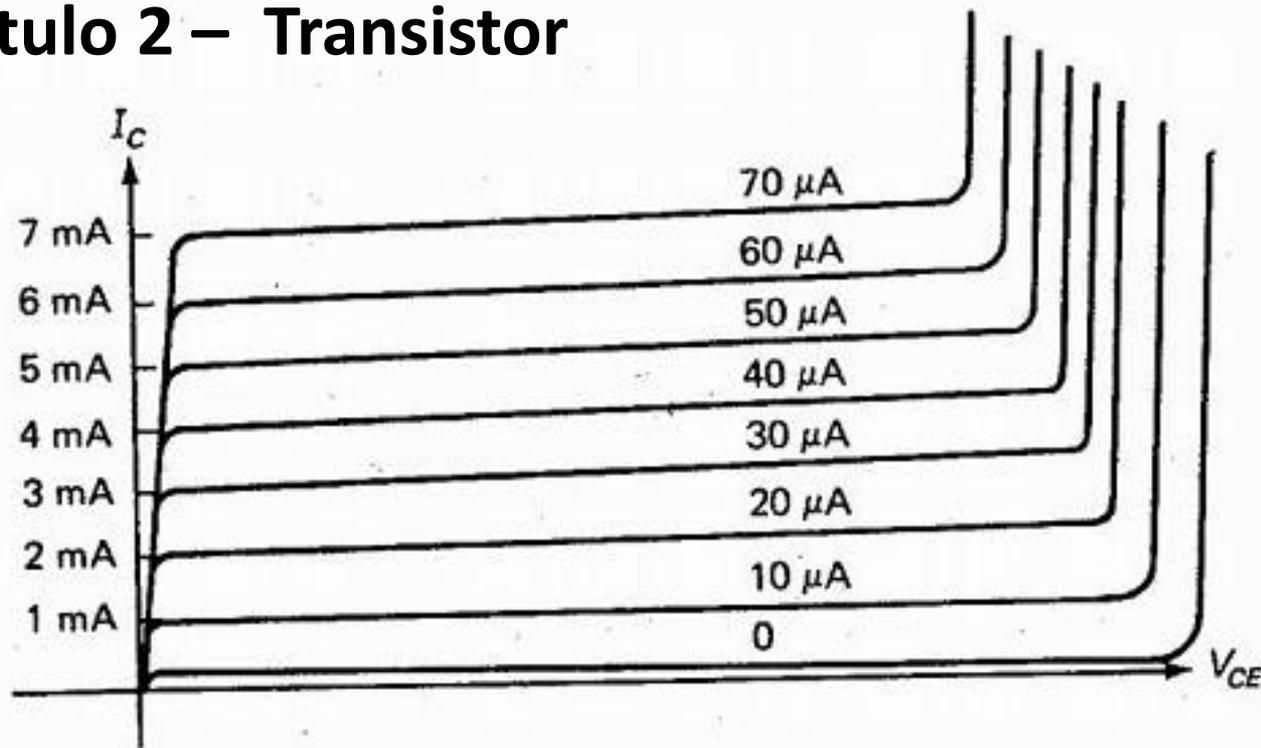


Figura 5.11

- $\beta_{cc} = 100$;
- curva inferior, $I_B = 0$, e I_C é próxima de zero (corrente de fuga – ordem de nA);
- tensões de rupturas: ficam menores conforme I_B aumenta;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.8 - Curvas de Ganho de Corrente

- varia muito entre os transistores (até 3:1):
 - variação com temperatura Figura 5.13;
 - variação de I_C e de temperatura: pode variar em 9:1;
 - projetos não podem depender de valor exato de

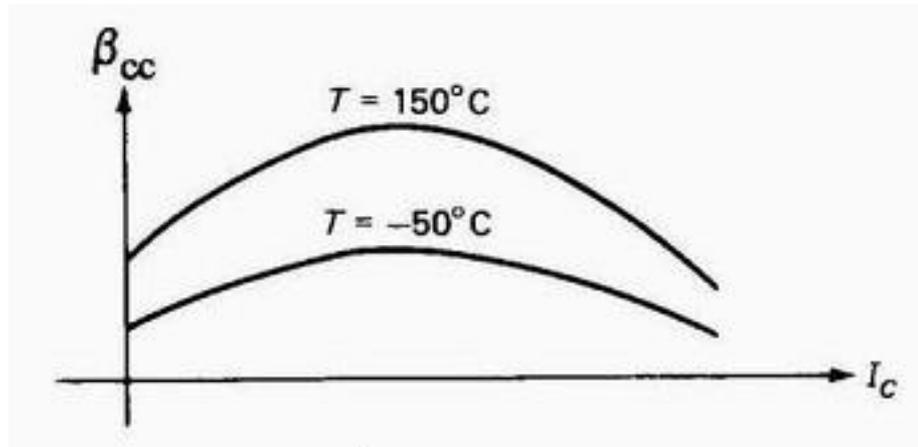


Figura 5.13

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.9 - Corte e Ruptura

- $I_B = 0$: terminal de base aberto e gera I_{CE0} (Figura 5.14);
- Produzida por portadores gerados termicamente e corrente de fuga superficial;

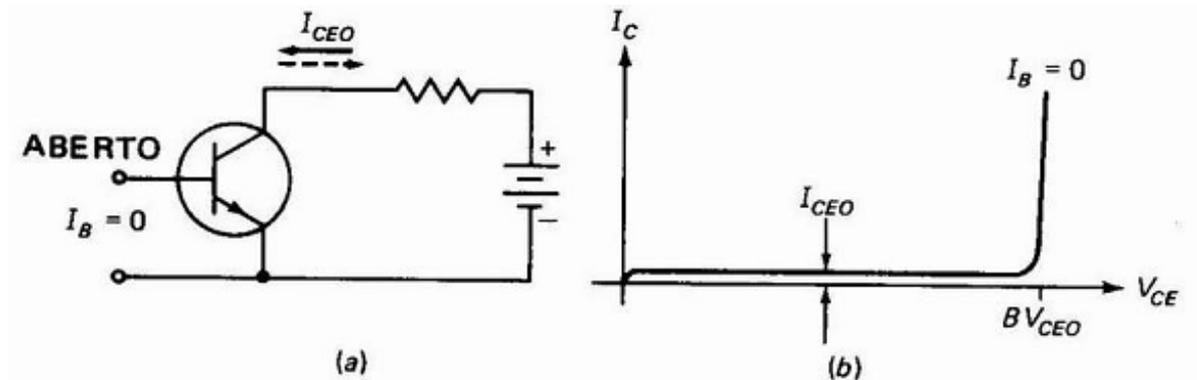


Figura 5.14

- Tensão de ruptura para $I_B = 0$: BV_{CE0} ;
- V_{CE} deve ser mantido abaixo de BV_{CE0} , regra de projeto: menor que a metade desse valor;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

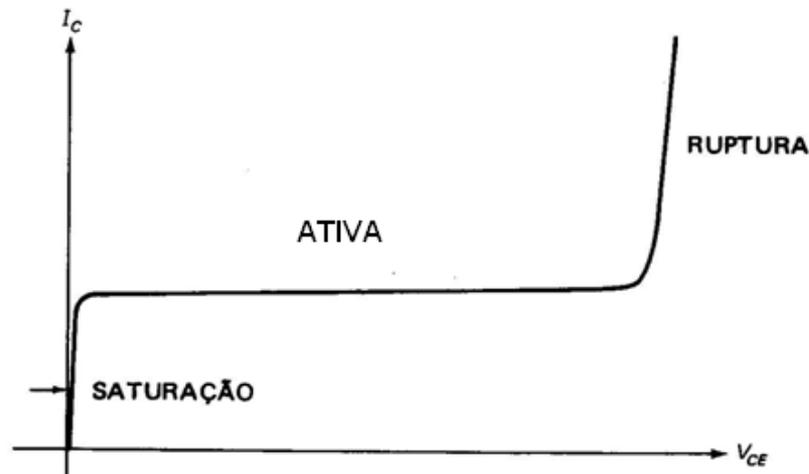
Capítulo 2 – Transistor

2.2.10 - Tensão de Saturação do Coletor

- Regiões das curvas do transistor (Figura 5.15):

– Região de Saturação:

- Parte inicial da curva;
- Toda curva entre a origem e o joelho;
- Diodo coletor polarizado diretamente
- Porta-se como uma pequena resistência;



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

– Região Ativa

- Parte plana da curva;
- Transistor funcionando como fonte de corrente controlada;
- $V_{CE(SAT)}$ – tensão acima da qual o transistor opera na região ativa;

– Região de Ruptura

- Parte final da curva;
- Região que deve ser evitada;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.11 - Linhas de Carga CC

- Linha de carga CC: $I_C = ?$

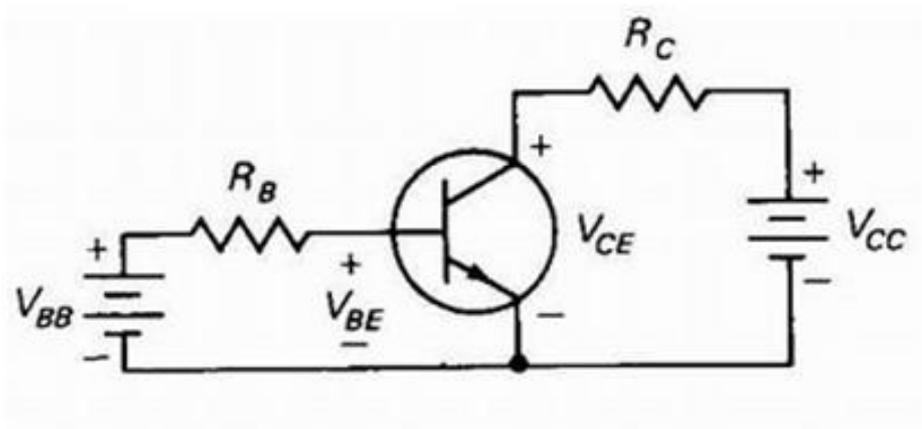


Figura 5.16a

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.2.11 - Linhas de Carga CC

- Linha de carga CC:

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

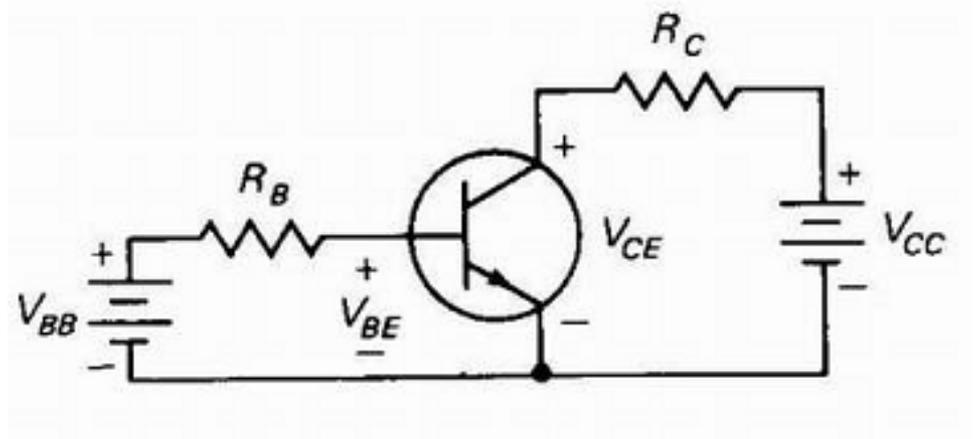


Figura 5.16a

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Intersecção da linha de carga cc com os eixos:

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_c} \quad \text{e} \quad V_{CE} = V_{cc}$$

- Figura 5.16b: linha de carga cc superposta as curvas do coletor
- Ponto de operação (quiescente): Q

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Corte: Intersecção da linha de carga com curva $I_B = 0$;
- Saturação: intersecção da linha de carga e a curva $I_B = I_{B(SAT)}$; corrente de coletor é máxima

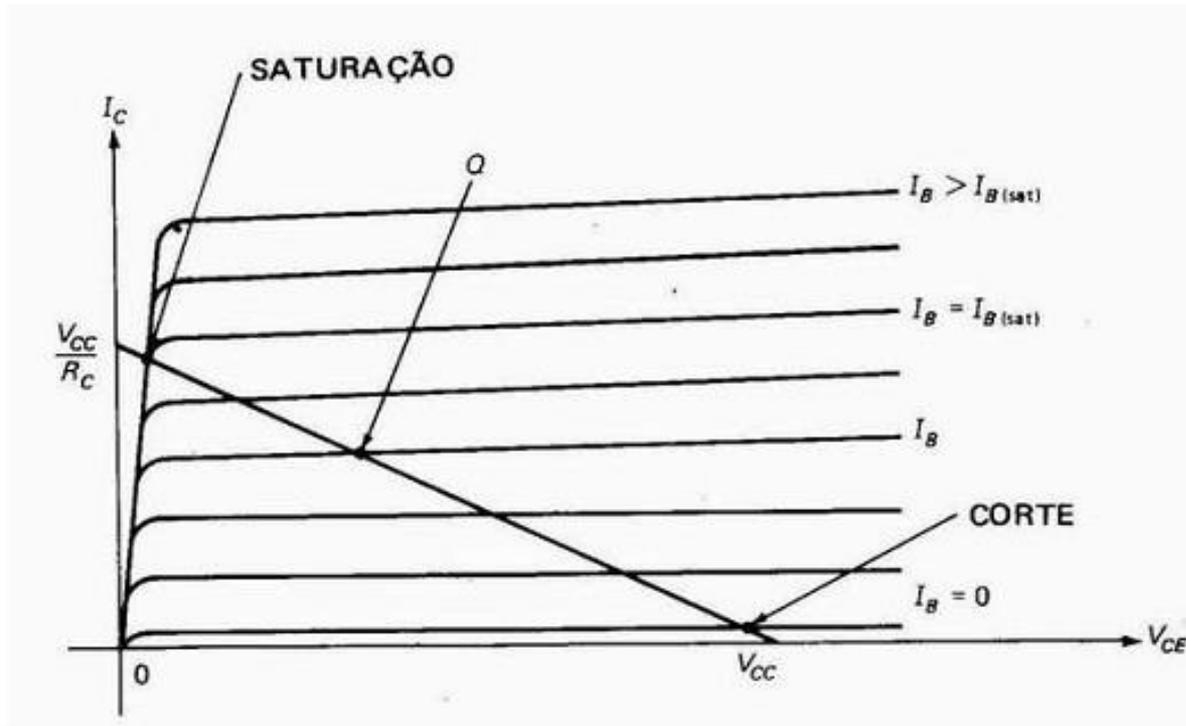


Figura 5.16 b

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.3 - Circuitos Básicos com Transistores Bipolares

2.3.1 – O transistor como chave

- Operação em dois pontos: corte e saturação

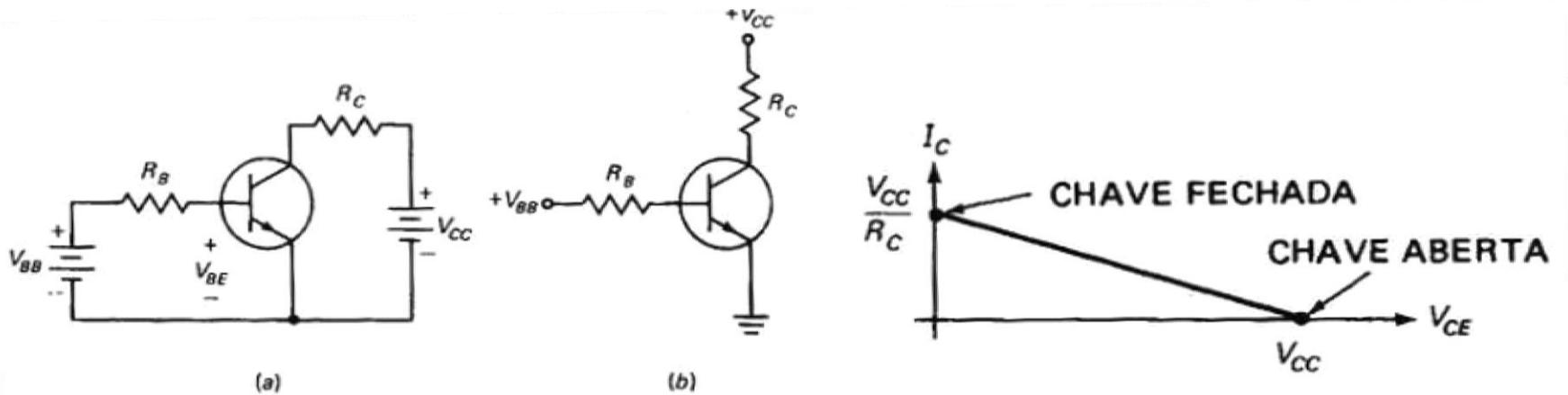


Figura 5.17

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

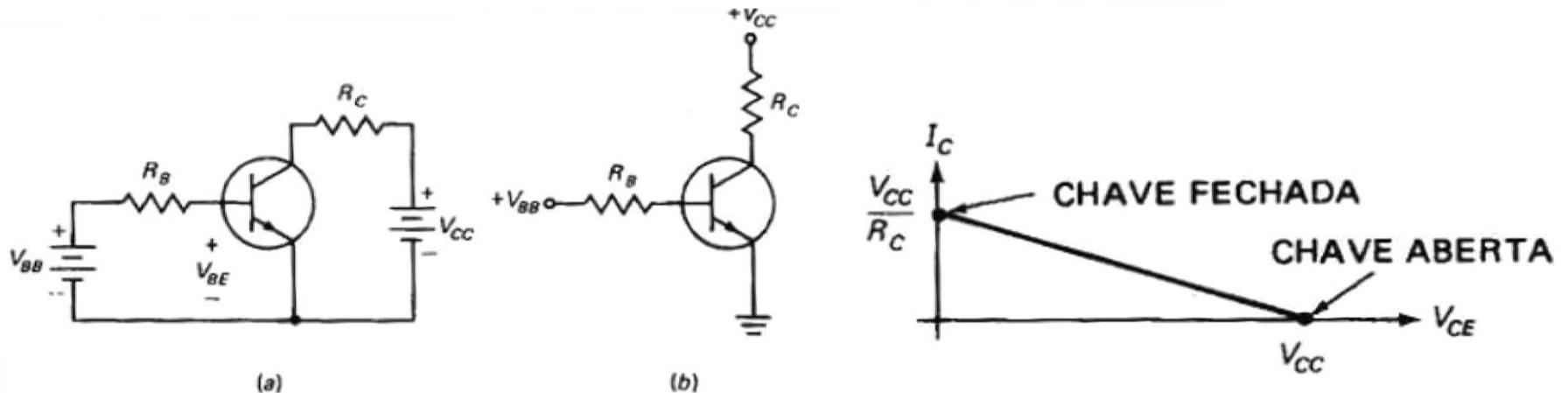


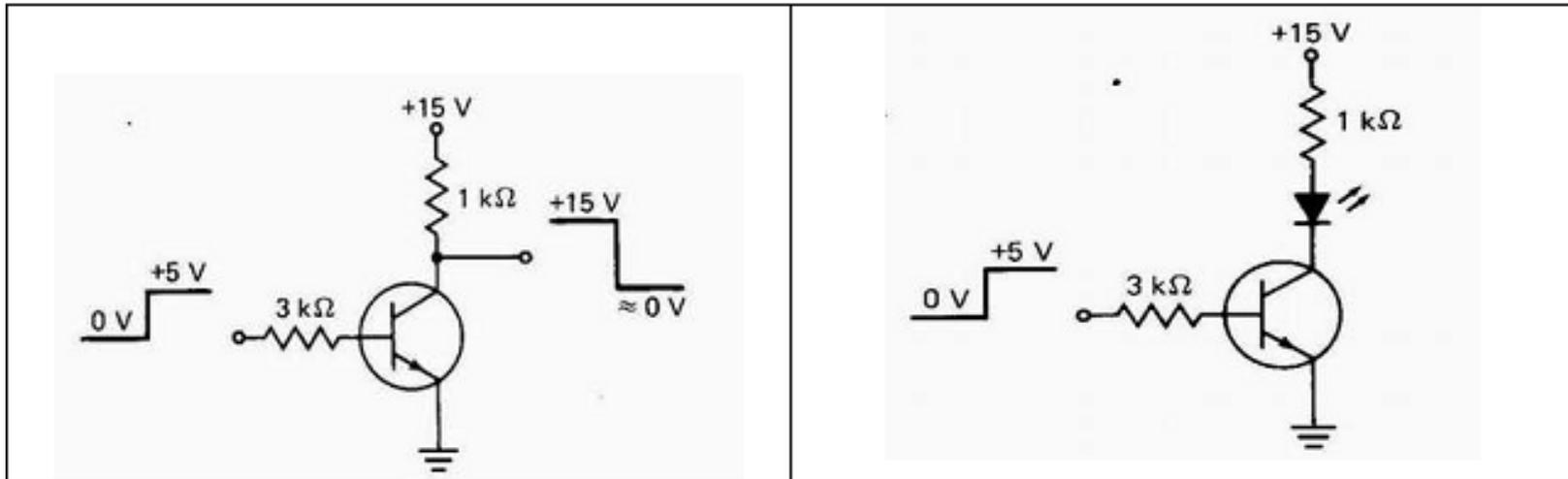
Figura 5.17

- $I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$
- Se $I_B > I_{B(SAT)}$, transistor comporta-se como uma chave fechada;
- $I_B = 0$: transistor se comporta como uma chave aberta.
- Regra para projeto: saturação forte – supõe β_{cc} mínimo, da ordem de 10;
- $I_C = 10 \text{ mA}$ e portanto, $I_B > 1 \text{ mA}$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Exemplos:



- $V_B = 5\text{ V}$: $I_B = \frac{5 - 0,7}{3\text{ k}\Omega} = 1,43\text{ mA}$; $I_{C(\text{SAT})} = \frac{15\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 15\text{ mA}$;
- I_C é cerca de 10 vezes o valor de I_B ;
- Acionamento do LED: $V_{\text{LED}} = 2,0\text{ V}$ e portanto $I_{C(\text{SAT})} = 13\text{ mA}$;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.3.2 – Transistor como Fonte de Corrente

- Acionamento do LED:
 - Fonte de corrente – corrente fixa apesar da variação em V_{LED} ;
- Circuito com Resistor de Emissor

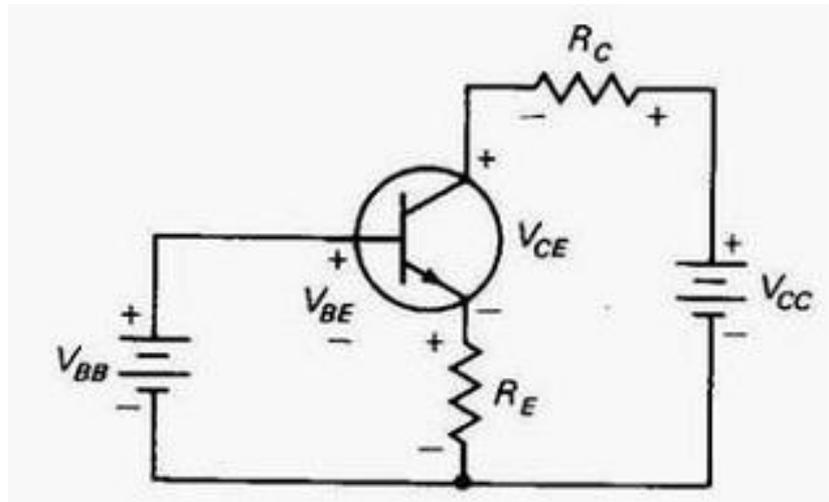


Figura 5.19a

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

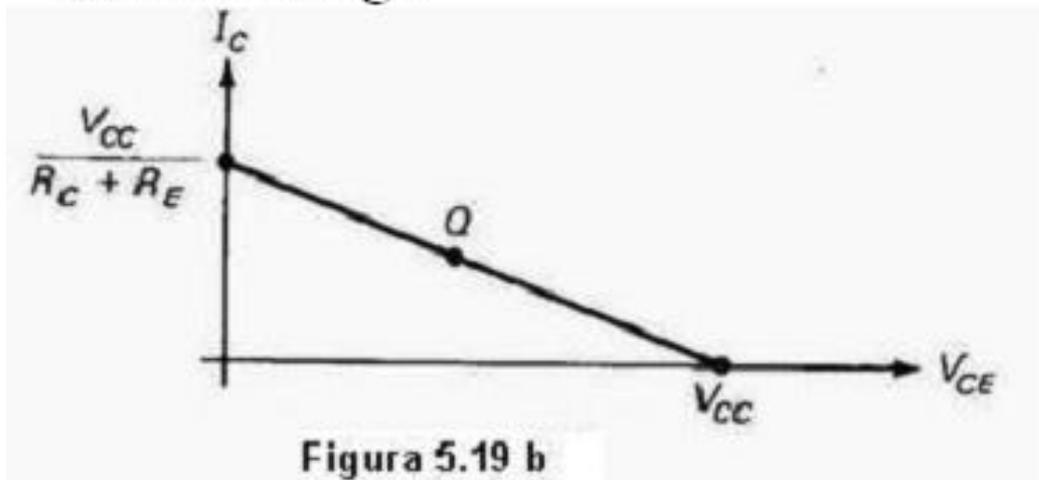
- Presença de resistor R_E entre o emissor e o ponto comum;
- Corrente de emissor passa por este resistor e soma de tensão é:

$$V_{CE} + I_E R_E - V_{CC} + I_C R_C = 0$$

- I_C é aproximadamente igual a I_E :

$$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

- Reta de carga



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Corrente no Emissor: Malha de Entrada

$$V_{BE} + I_E R_E - V_{BB} = 0$$

- Ou seja,

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

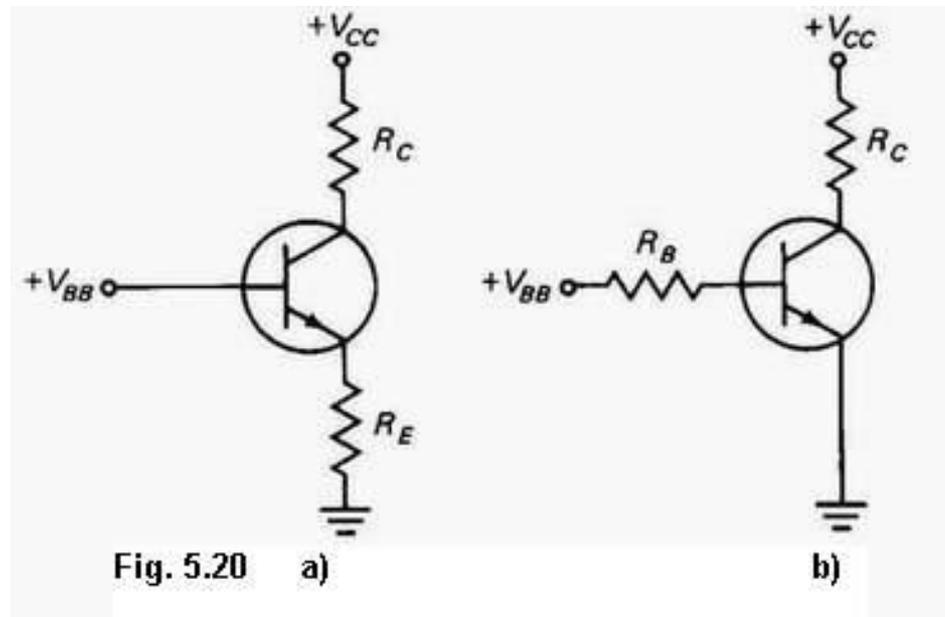
- V_{BE} aproximadamente 0,7 V;
- I_E será aproximadamente constante para todos transistores: não depende de β_{cc} ;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Fonte de Corrente X Chave
 - I_E é fixa – resistor de emissor – emissor amarrado a tensão da base (- 0,7 V) – Fig. 5.20.a);
 - I_B é fixa – emissor aterrado – atua como chave (Fig. 5.20.b) ;

Fonte de Corrente



Chave

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Exercício: Calcular corrente no LED na Figura 5.21 a), as linhas de carga e os pontos Q considerando que a queda de tensão no LED varia entre 1,5 e 2,5 V.

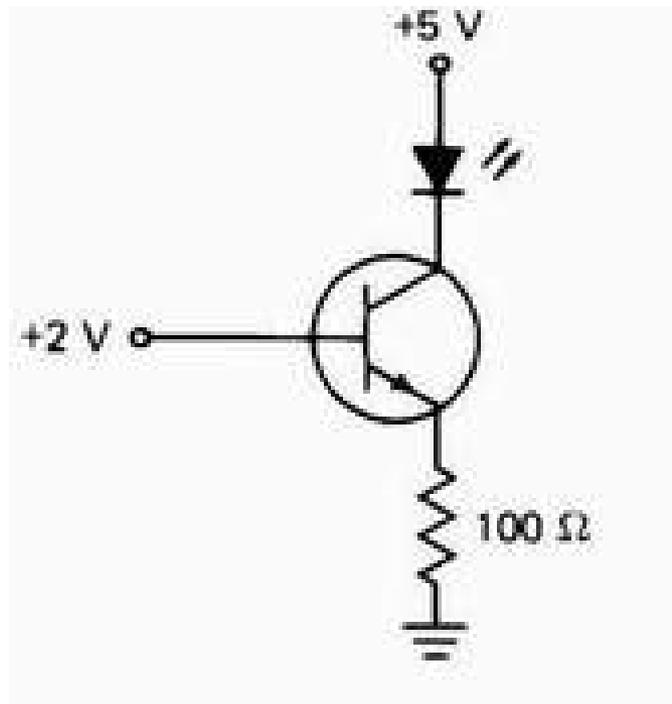
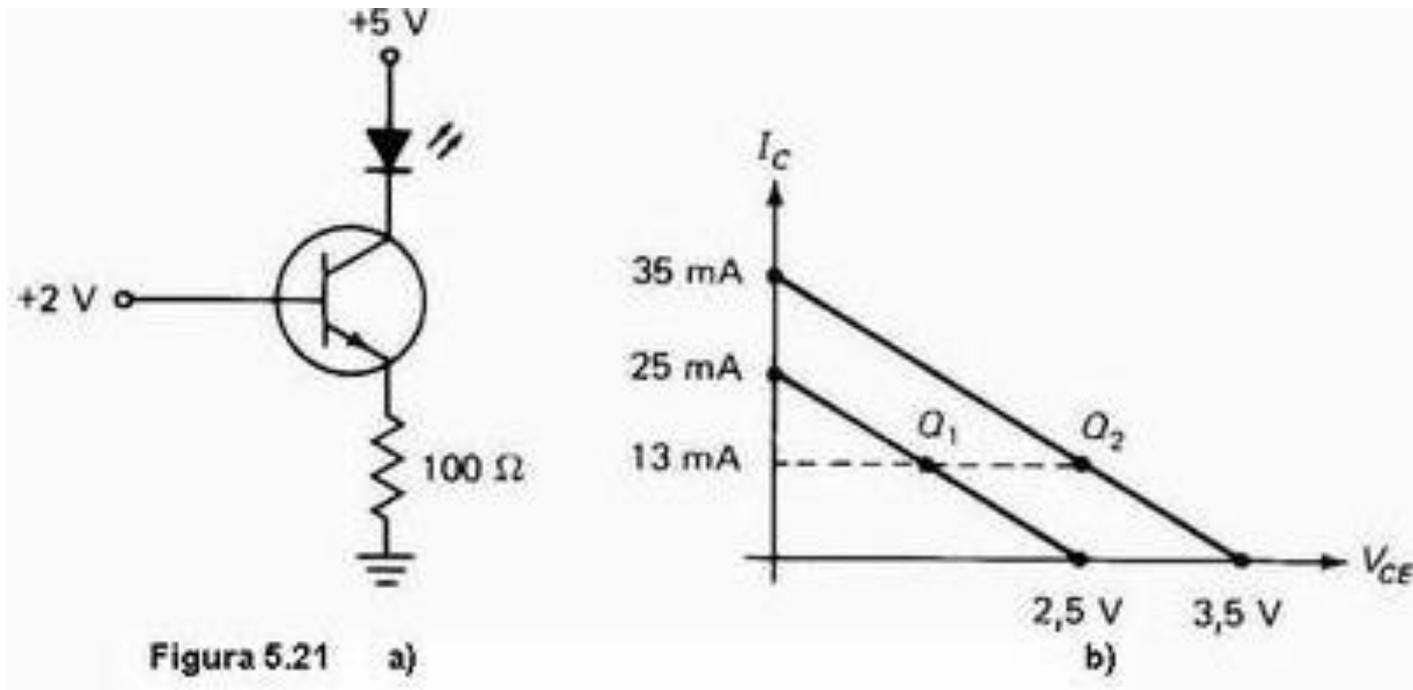


Figura 5.21 a)

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Exercício: Calcular corrente no LED na Figura 5.21 a), as linhas de carga e os pontos Q considerando que a queda de tensão no LED varia entre 1,5 e 2,5 V.



2N4123



NPN General Purpose Amplifier

This device is designed for use as general purpose amplifiers and switches requiring collector currents to 100 mA.

Absolute Maximum Ratings*

TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V _{CEO}	Collector-Emitter Voltage	30	V
V _{CBO}	Collector-Base Voltage	40	V
V _{EB0}	Emitter-Base Voltage	5.0	V
I _C	Collector Current - Continuous	200	mA
T _J , T _{stg}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +150	°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Thermal Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Characteristic	Max	Units
		2N4123	
P _D	Total Device Dissipation Derate above 25°C	625	mW
		5.0	mW/°C
R _{θJC}	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3	°C/W
R _{θJA}	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	°C/W

NPN General Purpose Amplifier

(continued)

2N4123

Electrical Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
--------	-----------	-----------------	-----	-----	-------

OFF CHARACTERISTICS

$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage*	$I_C = 1.0 \text{ mA}, I_B = 0$	30		V
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ } \mu\text{A}, I_E = 0$	40		V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10 \text{ } \mu\text{A}, I_C = 0$	5.0		V
I_{CBO}	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 20 \text{ V}, I_E = 0$		50	nA
I_{EBO}	Emitter Cutoff Current	$V_{EB} = 3.0 \text{ V}, I_C = 0$		50	nA

ON CHARACTERISTICS*

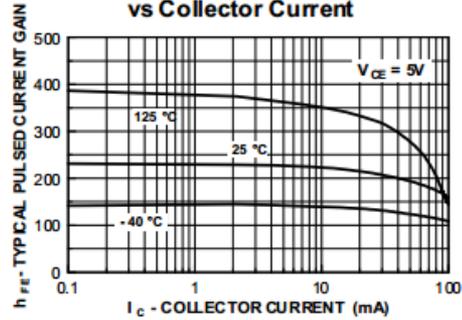
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE} = 1.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$ $V_{CE} = 1.0 \text{ V}, I_C = 50 \text{ mA}$	50 25	150	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 50 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$		0.3	V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 50 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$		0.95	V

SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS

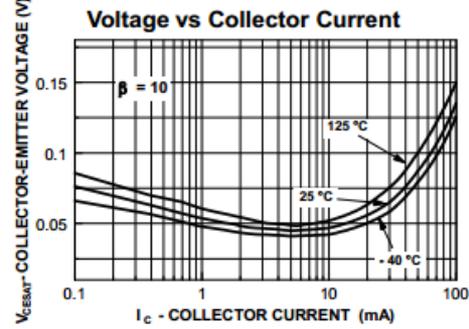
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB} = 5.0 \text{ V}, f = 100 \text{ kHz}$		4.0	pF
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB} = 0.5 \text{ V}, f = 0.1 \text{ MHz}$		8.0	pF
h_{fe}	Small-Signal Current Gain	$I_C = 2.0 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V},$ $f = 1.0 \text{ kHz}$ $I_C = 10 \text{ mA}, V_{CE} = 20 \text{ V},$ $f = 100 \text{ MHz}$	50 2.5	200	
f_T	Current Gain - Bandwidth Product	$I_C = 10 \text{ mA}, V_{CE} = 20 \text{ V}$ $f = 100 \text{ MHz}$	250		MHz
NF	Noise Figure	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 100 \text{ } \mu\text{A},$ $R_S = 1.0 \text{ k}\Omega,$ $B_W = 10 \text{ Hz to } 15.7 \text{ kHz}$		6.0	dB

Typical Characteristics

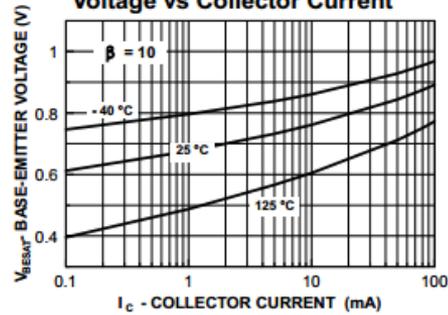
Typical Pulsed Current Gain vs Collector Current



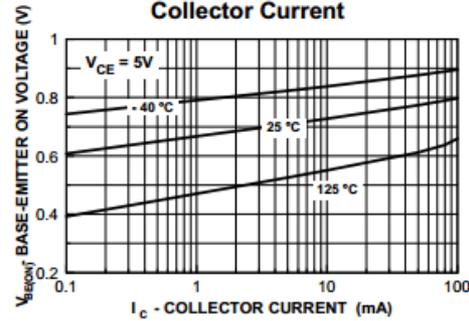
Collector-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current



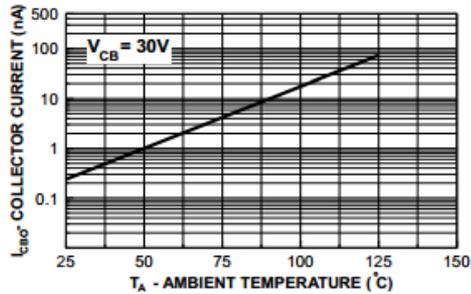
Base-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current



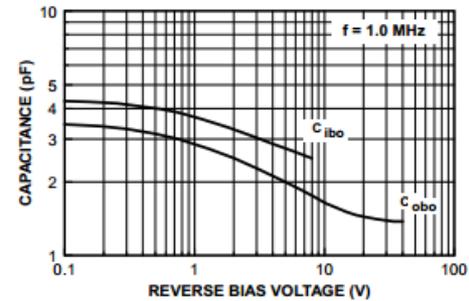
Base-Emitter ON Voltage vs Collector Current



Collector-Cutoff Current vs Ambient Temperature



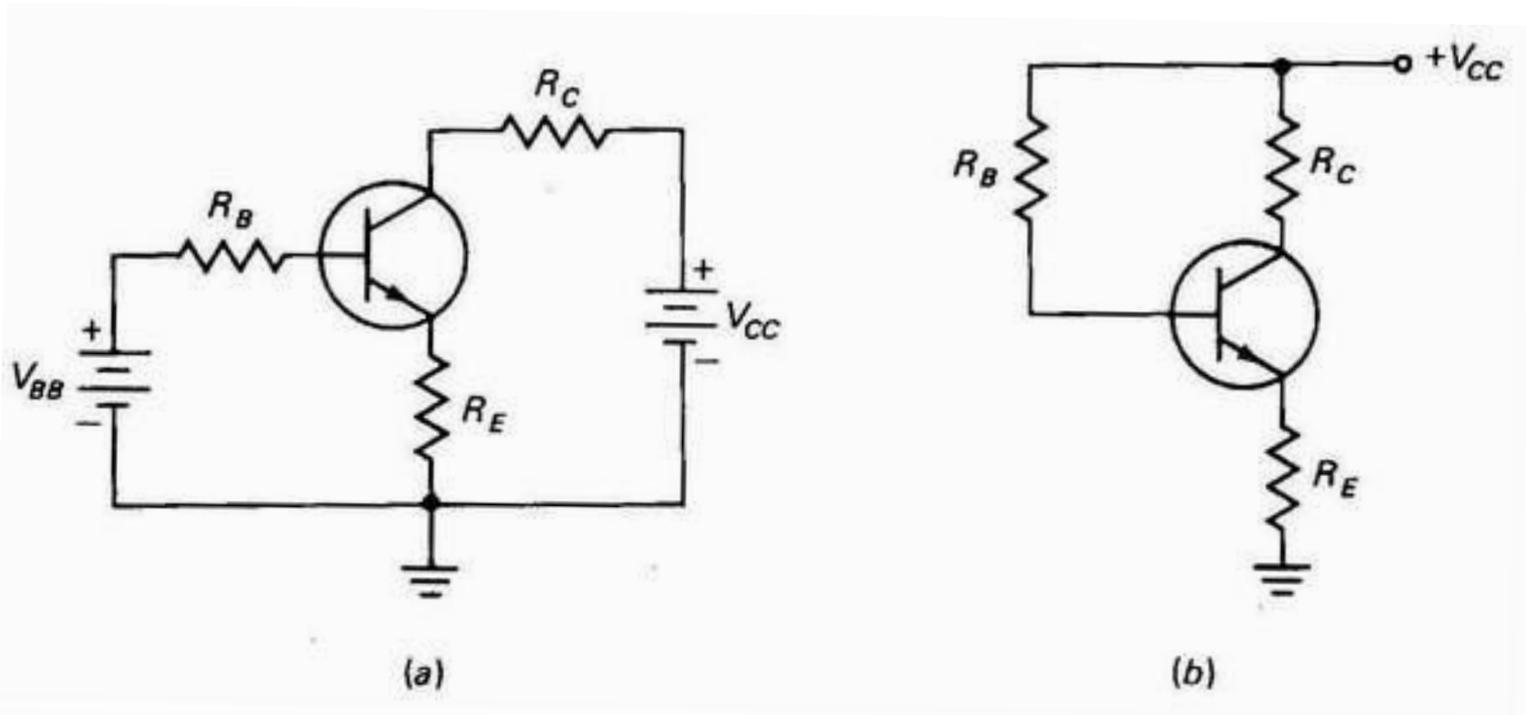
Capacitance vs Reverse Bias Voltage



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- **Polarização com Realimentação do Emissor**
- opção para compensar parte da variação de β_{cc} ;
- presença de resistor no emissor e $V_{BB} = V_{CC}$ (figura 6.2.b);

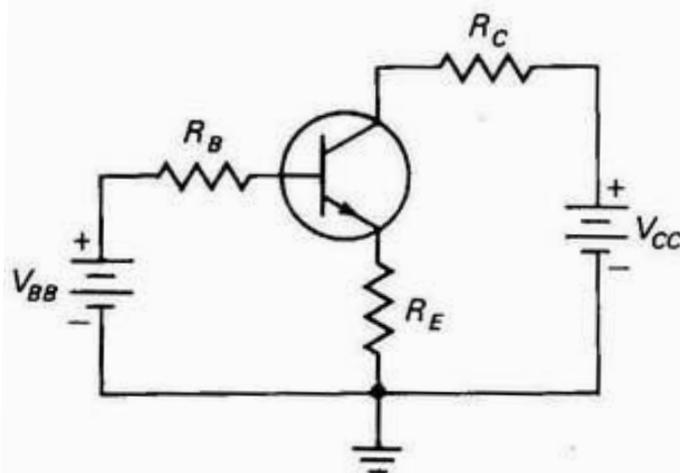


Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

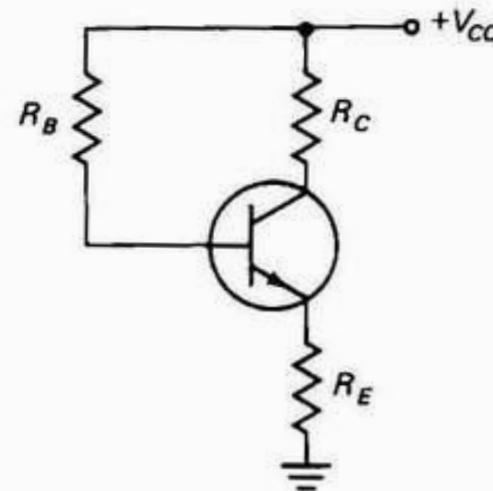
Capítulo 2 – Transistor

• Polarização com Realimentação do Emissor

- realimentação: corrente de saída (I_E) usada compensar uma variação na entrada (I_C);
- tensão através de R_E para compensar possível variação em β_{cc} ;
- aumenta β_{cc} -> I_C aumenta -> I_E aumenta -> V_E aumenta -> V_B diminui -> I_B diminui -> I_C diminui e compensar variação de β_{cc} ;
- para funcionar adequadamente, precisaria de R_E muito grande;
- Linha de carga cc



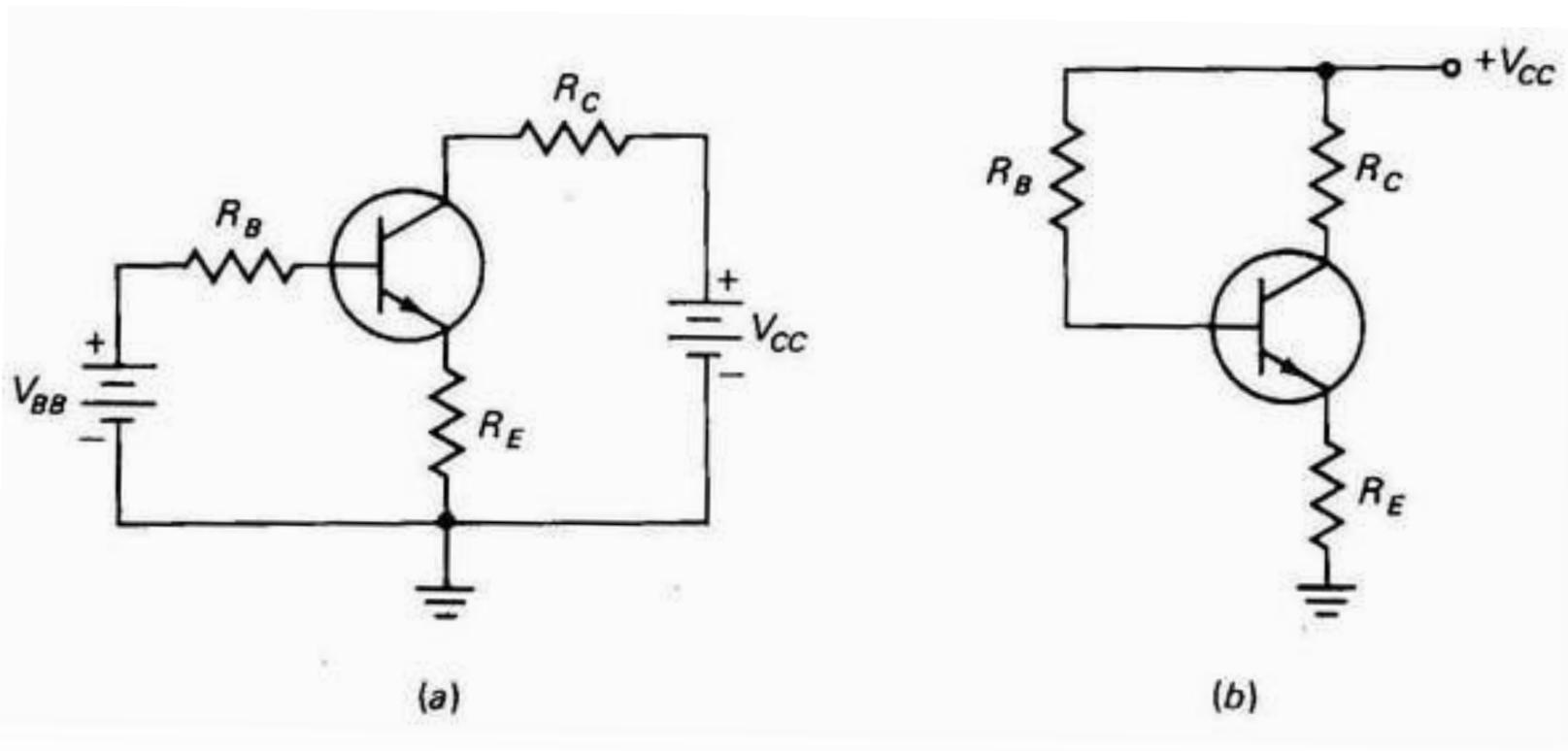
(a)



(b)

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor



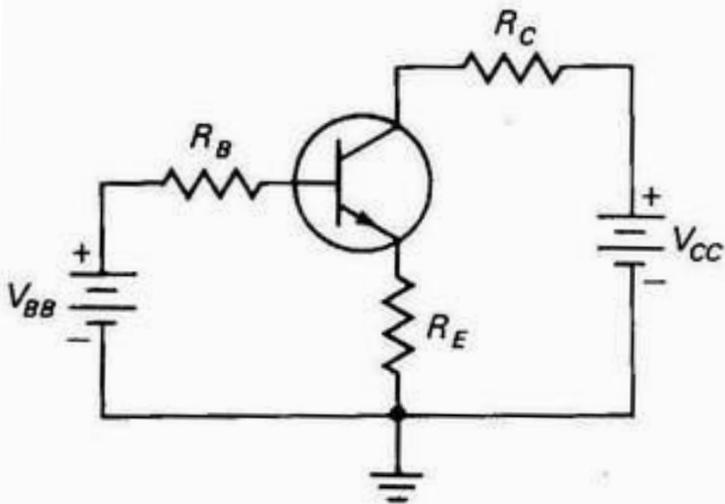
- Obter Expressões de I_c pela malha de controle e malha de carga

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

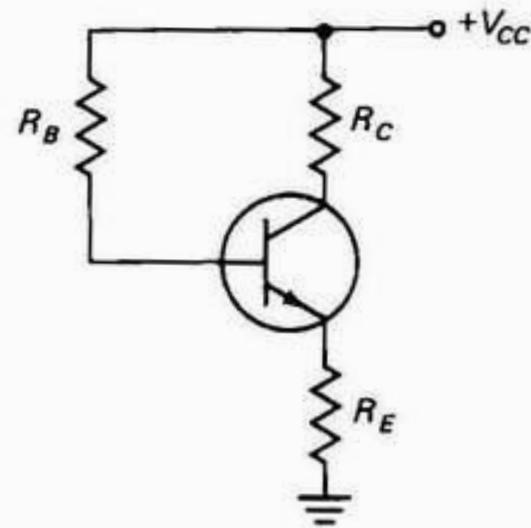
Capítulo 2 – Transistor

– $I_C \equiv \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$ ou $I_C \equiv \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B / \beta_{CC}}$

– Se $R_B = R_C$, então $I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_C}$ que é ligeiramente menor que I_C



(a)

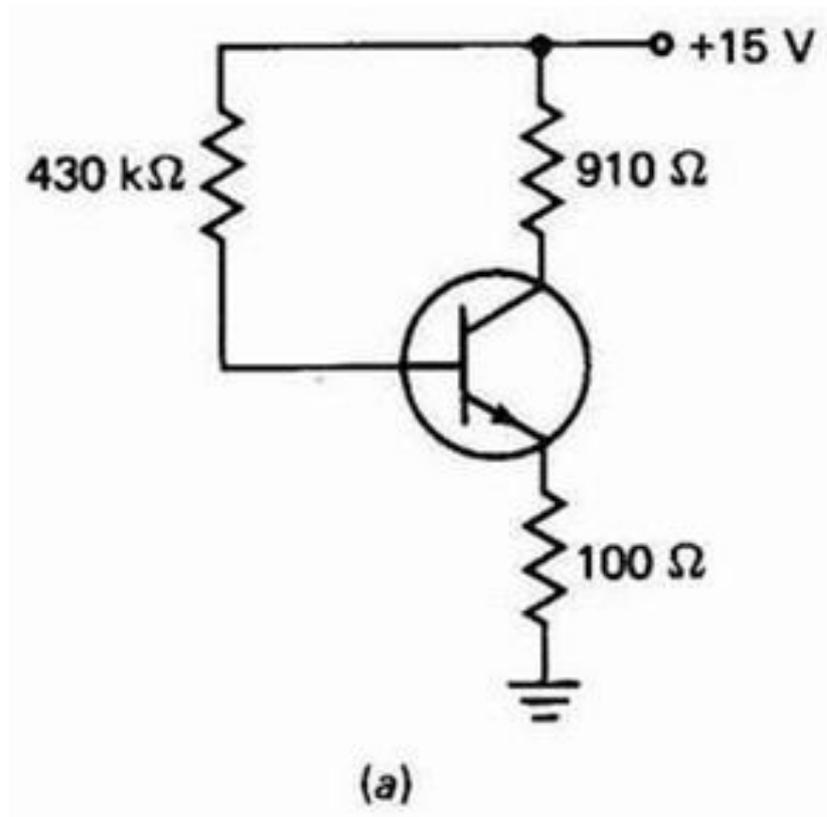


(b)

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

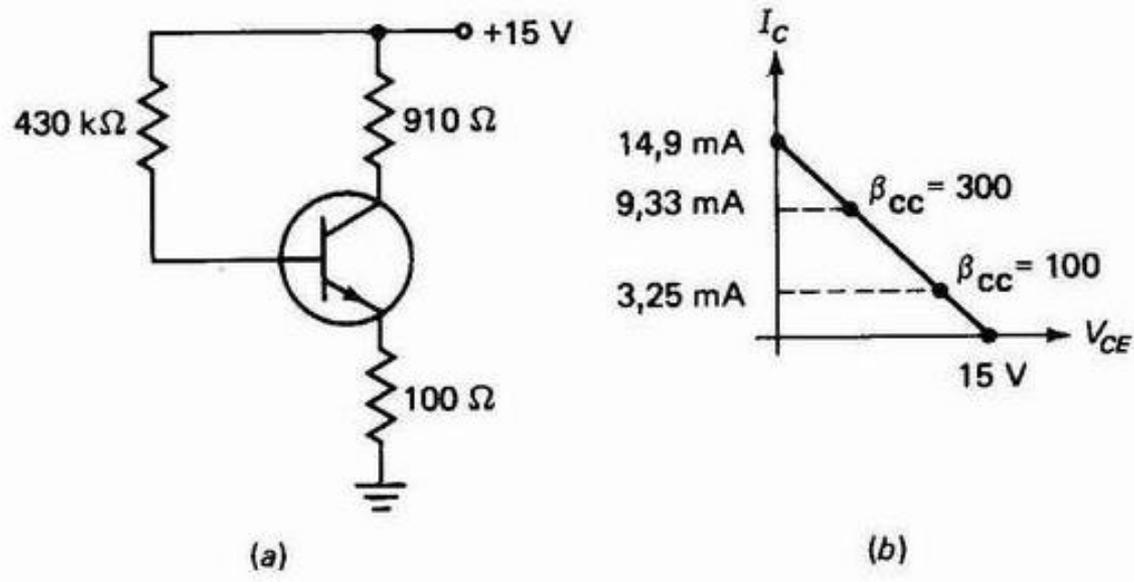
Exemplo: Calcule o valor da corrente de saturação do coletor na Figura 6.3. Calcule a corrente do coletor para dois valores de β_{cc} 100 e 300.



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Exemplo: Calcule o valor da corrente de saturação do coletor na Figura 6.3. Calcule a corrente do coletor para dois valores de β_{cc} 100 e 300.



$$I_{C(SAT)} = \frac{15}{910 + 100} = 14,9 \text{ mA}$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Para RE,

$$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B / \beta_{CC}}$$

- $\beta_{CC} = 100$: $I_C = \frac{15 - 0,7}{100 + 430.000 / 100} = 3,25 \text{ mA}$;
- $\beta_{CC} = 300$: $I_C = \frac{15 - 0,7}{100 + 430.000 / 300} = 9,33 \text{ mA}$;
- **variação de β_{CC} 3:1 -> variação de corrente quase 3 vezes (2,87:1)**

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.3 - Polarização com Realimentação do Coletor

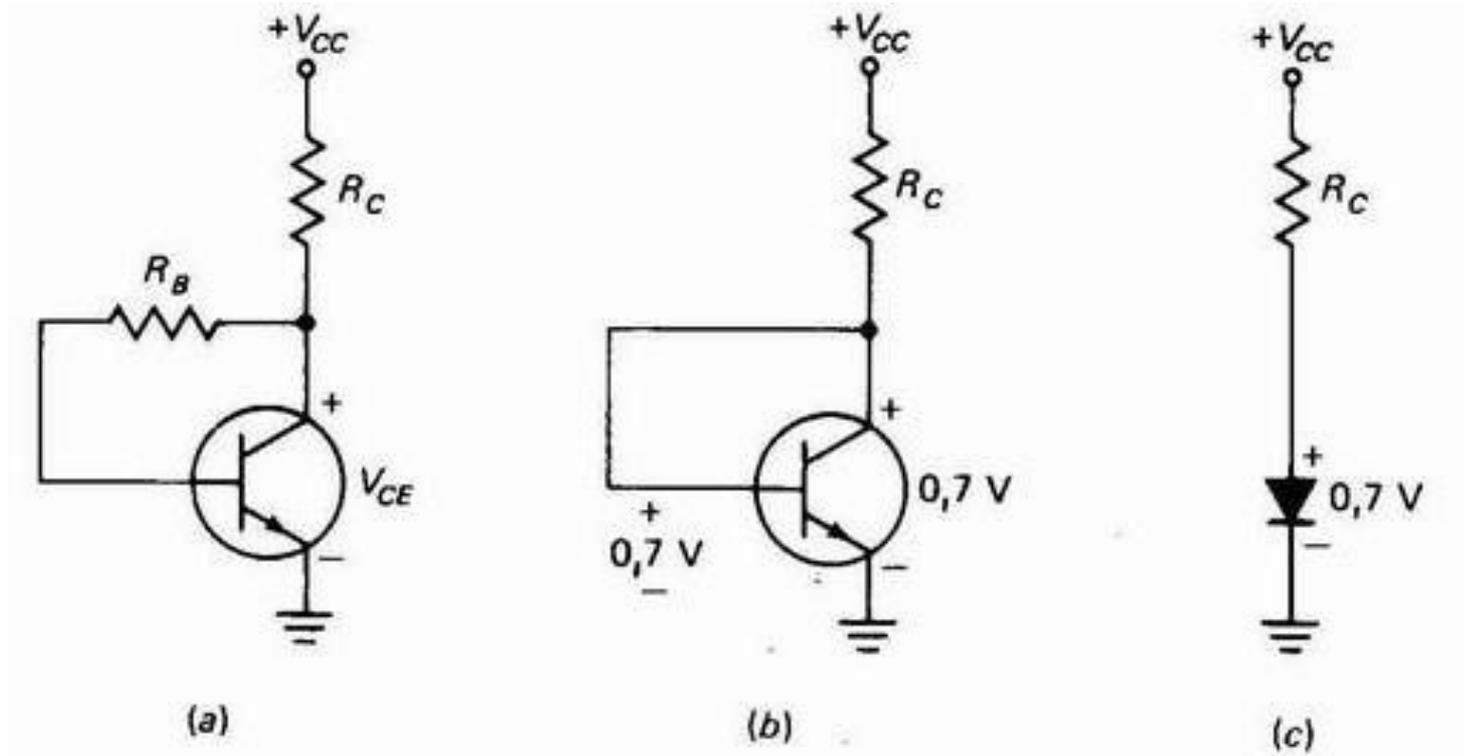
- é também chamado de autopolarização (Figura 6.4);
- resistor da base é ligado ao coletor;
- realimentação:
 - aumento de β_{CC} (com temperatura);
 - I_C aumenta e V_{CE} diminui;
 - V_B diminui e força I_C a diminuir;

- Linha de carga:

- $$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{ou} \quad I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B / \beta_{CC}}$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

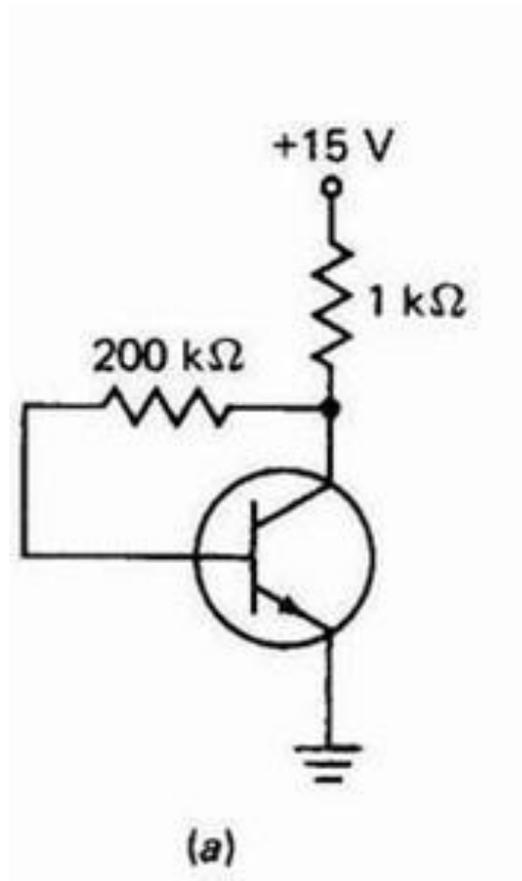
Capítulo 2 – Transistor



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Exemplo: Calcule o valor da corrente de saturação do coletor na Figura 6.5. Calcule a corrente do coletor para dois valores de β_{cc} : 100 e 300.



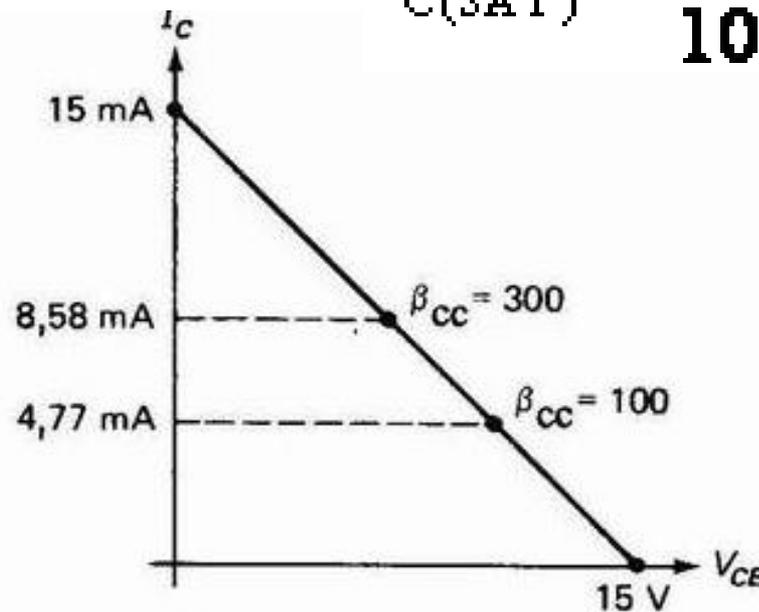
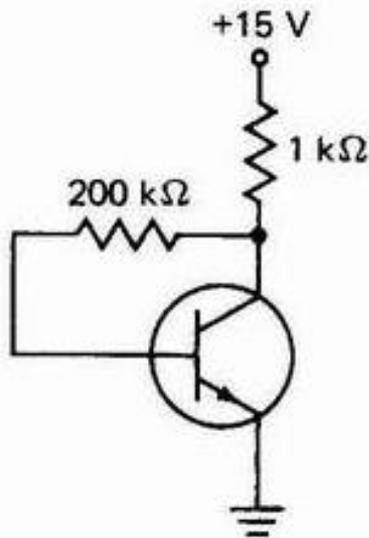
I_{csat} , V_{corte}

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

Exemplo: Calcule o valor da corrente de saturação do coletor na Figura 6.5. Calcule a corrente do coletor para dois valores de β_{cc} : 100 e 300.

$$I_{C(SAT)} = \frac{15}{1000} = 15 \text{ mA}$$



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- Linha de carga:

- $I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$ ou $I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B / \beta_{CC}}$

- $\beta_{CC} = 100$: $I_C = \frac{15 - 0,7}{1000 + 200.000/100} = 4,77 \text{ mA}$;

- $\beta_{CC} = 300$: $I_C = \frac{15 - 0,7}{1000 + 200.000/300} = 8,58 \text{ mA}$;

- **variação de β_{CC} 3:1 -> variação de corrente quase 2 vezes (1,80:1)**

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- chamada polarização universal;
- divisor de tensão nos resistores R_1 e R_2 ;
- R_2 polariza a base (diodo emissor);

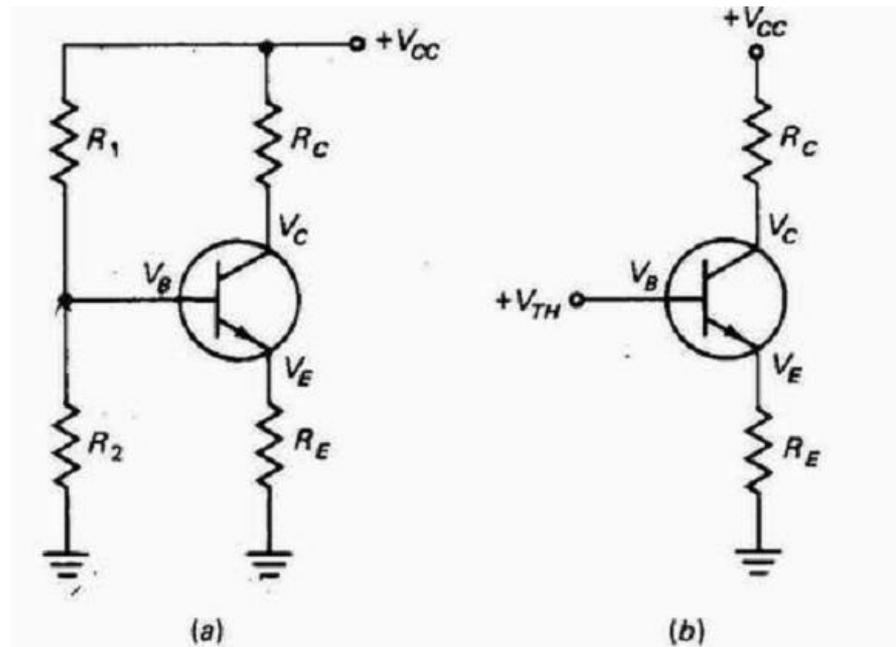


Figura 6.6

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

Tensão da base (Tensão Thevenin – Figura 6.7):

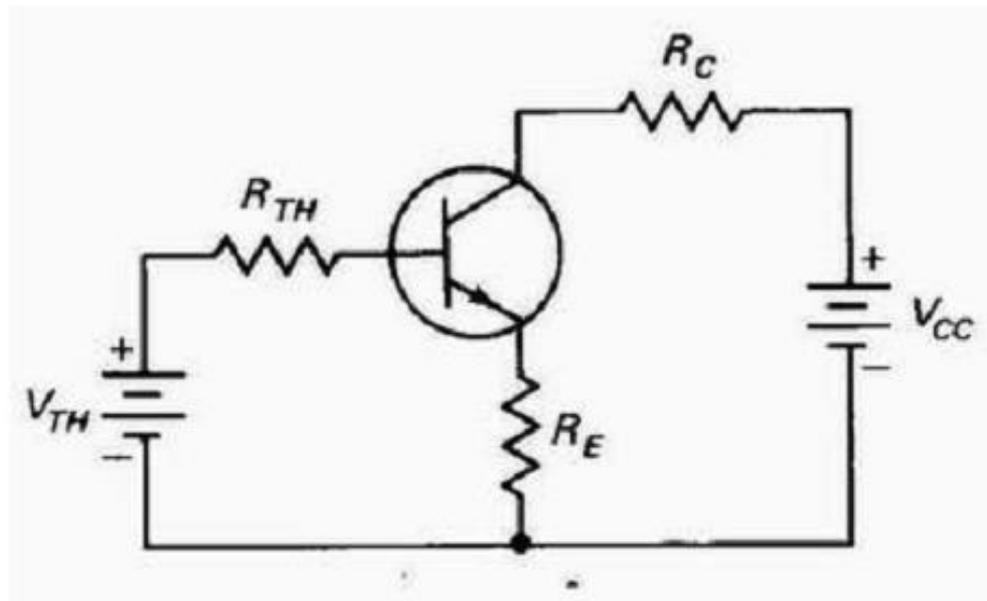


Figura 6.7

$$V_{TH} =$$

$$R_{TH} =$$

$$e \quad I_E =$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

Tensão da base (Tensão Thevenin – Figura 6.7):

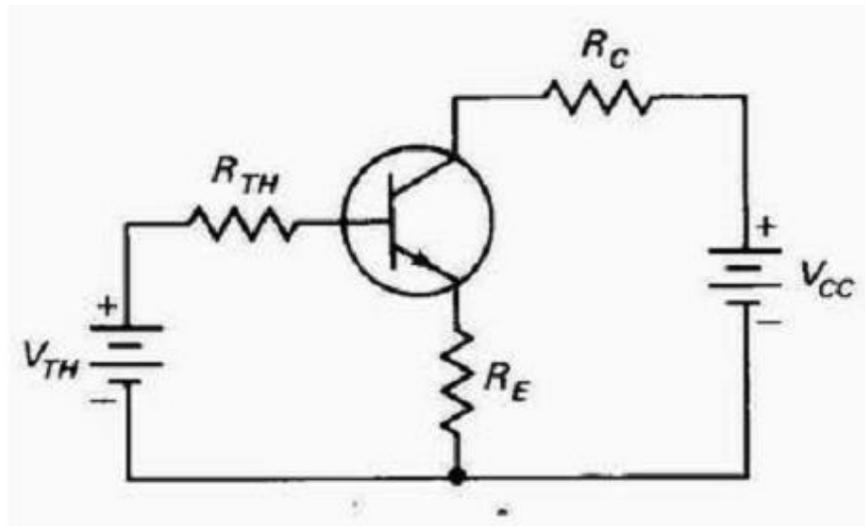


Figura 6.7

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \text{ (demonstrar)} \quad e \quad I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- β_{CC} não aparece nas expressões: circuito é imune à variações desse parâmetro;
- Divisor estabilizado:

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad e \quad I_E \cong \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + R_{TH} / \beta_{CC}}$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad e \quad I_E \cong \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + R_{TH} / \beta_{CC}}$$

- Se $R_E > 100 \frac{R_{TH}}{\beta_{CC}}$, expressão pode ser simplificada para:

- $I_E \cong \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$

- divisor estabilizado: $R_{TH} \leq 0.01 \beta_{CC} R_E$

- β_{CC} mínimo deve ser usado;

$$R_2 \leq 0.01 \beta_{CC} R_E$$

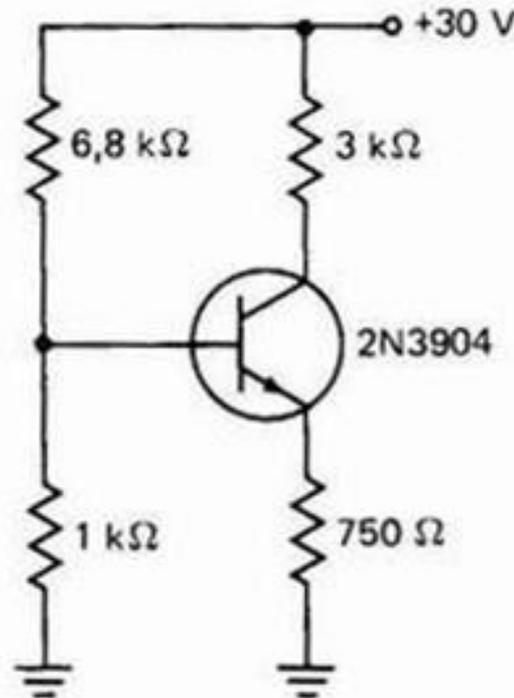
- Divisor de tensão firme: $R_2 \leq 0.1 \beta_{CC} R_E$ e daí $R_1 = \frac{V_1}{V_2} R_2$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- **Exemplo:** O circuito da Figura 6.9.a tem um divisor de tensão quase-ideal. Desenhe a linha de carga cc e mostre o ponto Q.
- $V_{CE(CORTE)}$ e I_{csat}



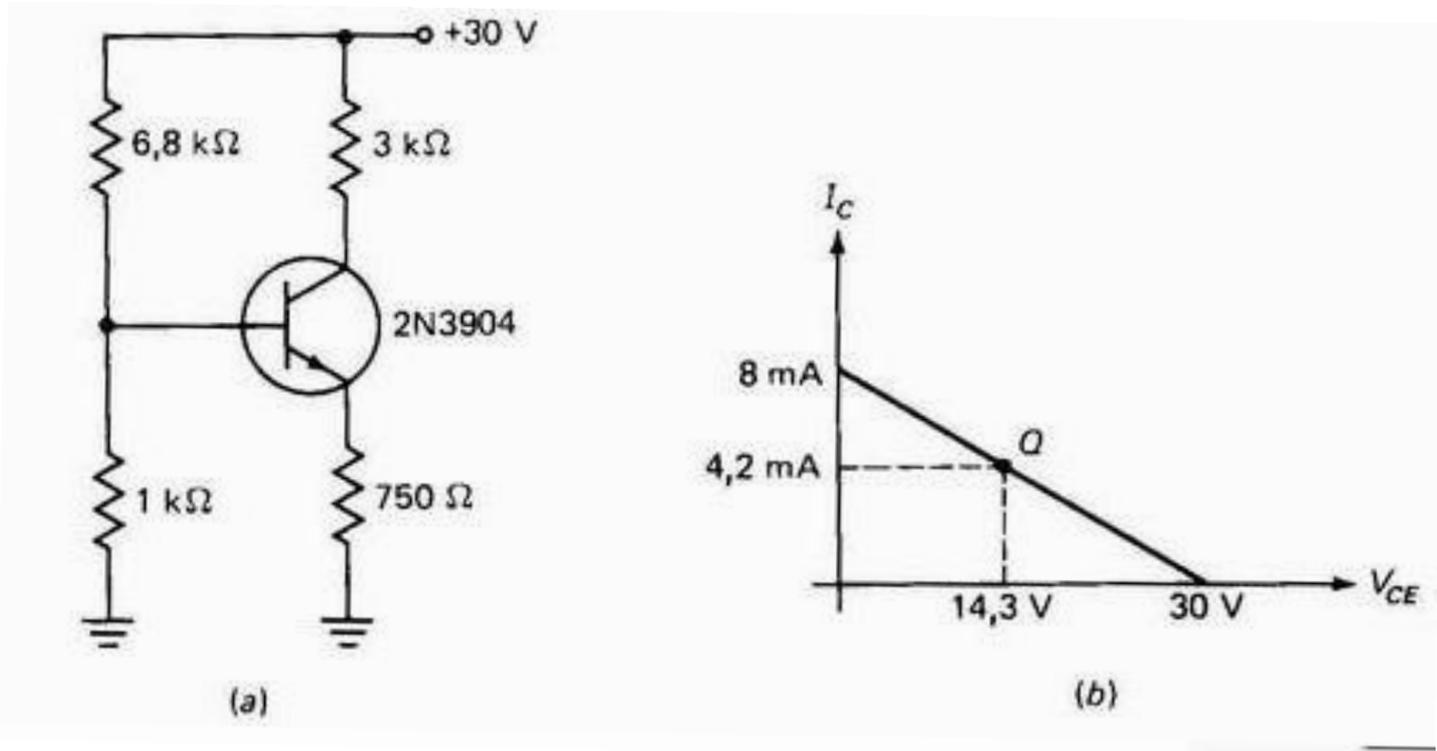
(a)

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- **Exemplo:** O circuito da Figura 6.9.a tem um divisor de tensão quase-ideal. Desenhe a linha de carga cc e mostre o ponto Q.
- $V_{CE(CORTE)} = 30\text{ V};$



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

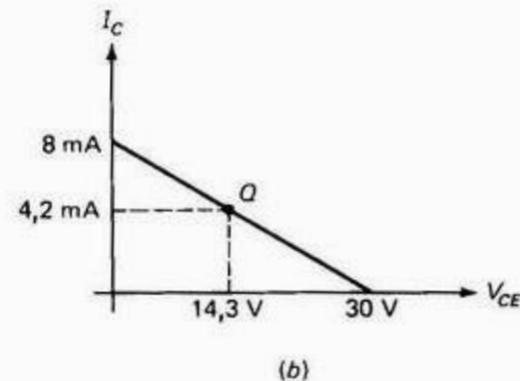
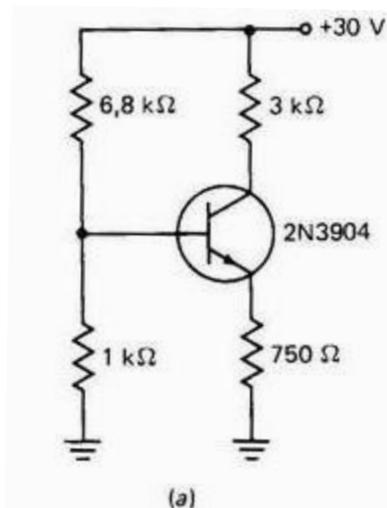
Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- **Exemplo:** O circuito da Figura 6.9.a tem um divisor de tensão quase-ideal. Desenhe a linha de carga cc e mostre o ponto Q.
- $V_{CE(CORTE)} = 30\text{ V};$

- $$I_{C(SAT)} = \frac{30}{3000 + 750} = 8\text{ mA (Figura 6.9.b);}$$

- $$V_{TH} = \frac{1000}{6800 + 1000} 30 = 3,85\text{ V}$$



Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- $I_E \cong \frac{3,85 - 0,7}{750} = 4,2 \text{ mA} \cong I_C ;$
- $V_C = 30 - (4,2 \times 10^{-3}) * 3000 = 17,4 \text{ V} ;$
- $V_{CE} = V_C - V_E = 17,4 - 3,15 = 14,3 \text{ V}$
- Ponto Q aproximadamente no meio da reta de carga cc;

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

Exemplo: Amplificador de dois estágios. Quais as tensões cc do emissor para cada estágio? Quais as tensões cc do coletor?

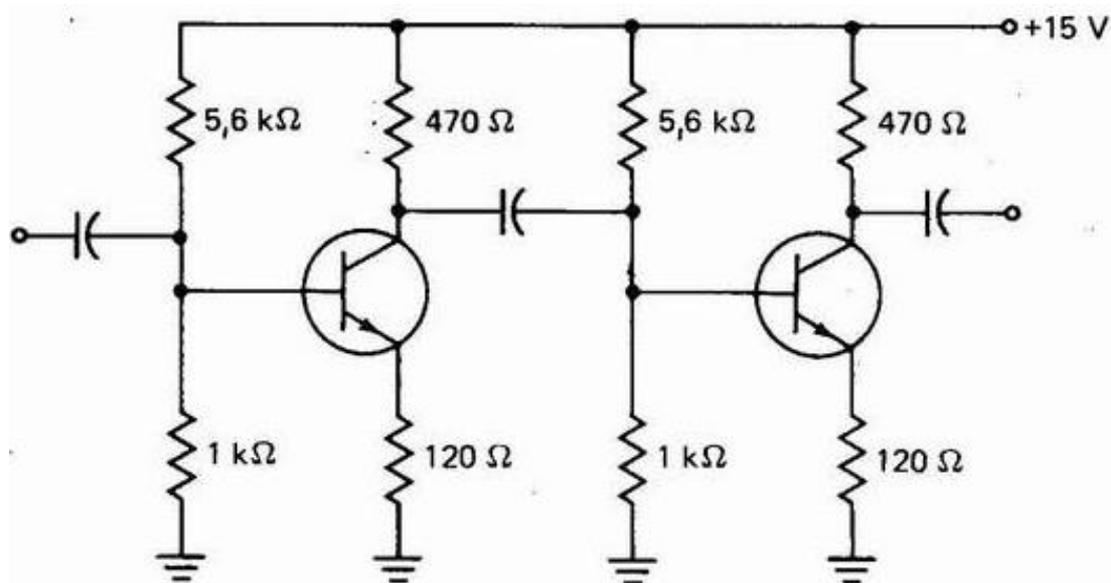


Fig. 6-10 Um amplificador de dois estágios.

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

Exemplo: Amplificador de dois estágios. Quais as tensões cc do emissor para cada estágio? Quais as tensões cc do coletor?

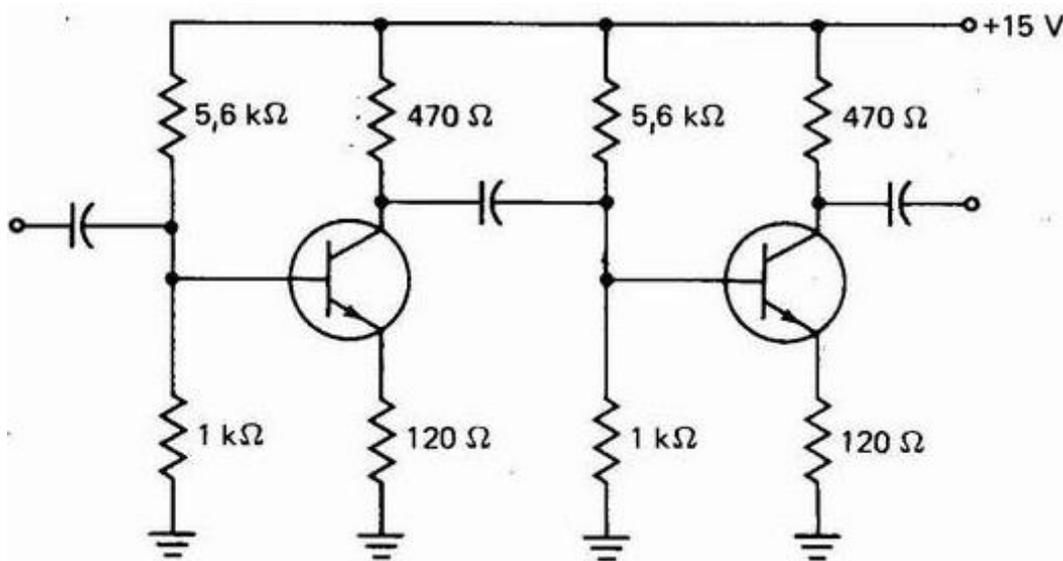


Fig. 6-10 Um amplificador de dois estágios.

Calcule: I_{CSAT} , V_{TH} , I_E , V_C , V_{CE}

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

2.4.4 - Polarização com Divisor de Tensão

- Capacitores abertos em cc: dois circuitos desacoplados;
 - Estágios idênticos;
 - $V_{TH} = \frac{1000}{5600+1000} 15 = 2,27 \text{ V}$ e $V_E = 1,57 \text{ V}$;
 - $I_{CSAT} = V_{CC} / (R_E + R_C) = 15 / 590 = 25,4 \text{ mA}$
 - $I_E \cong \frac{1,57}{120} = 13,1 \text{ mA} \cong I_C$
- $$V_C = 15 - (13,1 * 10^{-3}) * 470 = 8,84 \text{ V}$$

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 5 – Malvino (Edição revisada):

- 5-1 Suponha que somente 2 por cento dos elétrons injetados na base recombinam-se com as lacunas da base. Se 1 milhão de elétrons entram no emissor em $1 \mu\text{s}$, quantos elétrons saem pelo condutor da base nesse período? Quantos saem pelo condutor do coletor nesse intervalo de tempo?
- 5-2 Se a corrente do emissor for de 6 mA e a corrente do coletor de 5,75 mA, qual o valor da corrente da base? Qual o valor de α_{cc} ?
- 5-3 Um transistor tem um I_C de 100 mA e um I_B de 0,5 mA. Quais os valores de α_{cc} e β_{cc} ?
- 5-4 Um transistor tem um β_{cc} de 150. Se a corrente do coletor for igual a 45 mA, qual o valor da corrente da base?
- 5-5 Um 2N5607 é um transistor de potência com um r'_b de 10Ω . Qual a queda de $I_B r'_b$ quando $I_B = 1 \text{ mA}$? Quando $I_B = 10 \text{ mA}$? Quando $I_B = 50 \text{ mA}$?
- 5-6 Um 2N3298 tem um β_{cc} típico de 90. Calcule as correntes aproximadas do coletor e da base para uma corrente do emissor de 10 mA.
- 5-7 Um transistor tem um β_{cc} de 400. Qual o valor da corrente da base quando a corrente do coletor for igual a 50 mA?

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Trabalho 3 – Transistores (Para 09/04)

5.8; 5.10; 5.11; 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16; 5.17

6.1; 6.2; 6.3; 6.4, 6.5, 6.6; 6.7; 6.8; 6.9 ;

5-8 A Fig. 5-26a mostra uma das curvas do coletor. Calcule β_{cc} no ponto *A* e no ponto *B*.

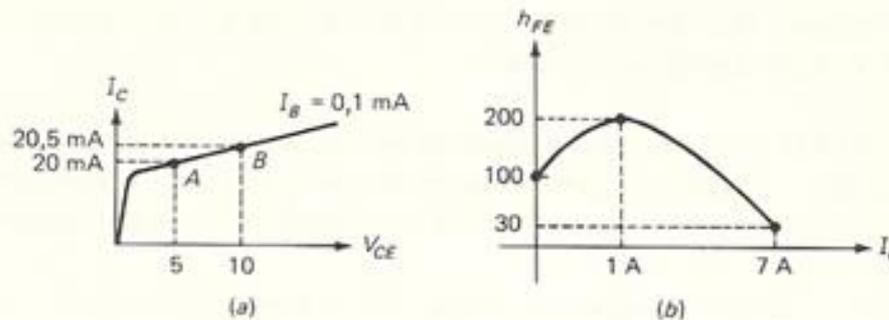


Fig. 5-26

- 5-10 Um 2N5346 tem as variações β_{cc} mostradas na Fig. 5-26b. Qual o valor de β_{cc} se I_C for de 1 mA? Qual o valor da corrente da base quando $I_C = 1A$? Quando $I_C = 7 A$?
- 5-11 A Fig. 5-27a mostra um circuito com transistor com um condutor da base aberto. Se medirmos uma V_{CE} de 9 V, qual o valor de I_{CEO} ? Se trocarmos o resistor do coletor de 10 M Ω para 10 k Ω , como mostra a Fig. 5-27b, qual o novo valor de V_{CE} ? (Admita que I_{CEO} permanece o mesmo.)

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

5-12 Um transistor tem as curvas do coletor da Fig. 5-27c. Se esse transistor for usado no circuito da Fig. 5-27d, qual será o valor de V_{CE} ? Qual o valor de BV_{CEO} ? O transistor da Fig. 5-27d está em perigo de ruptura?

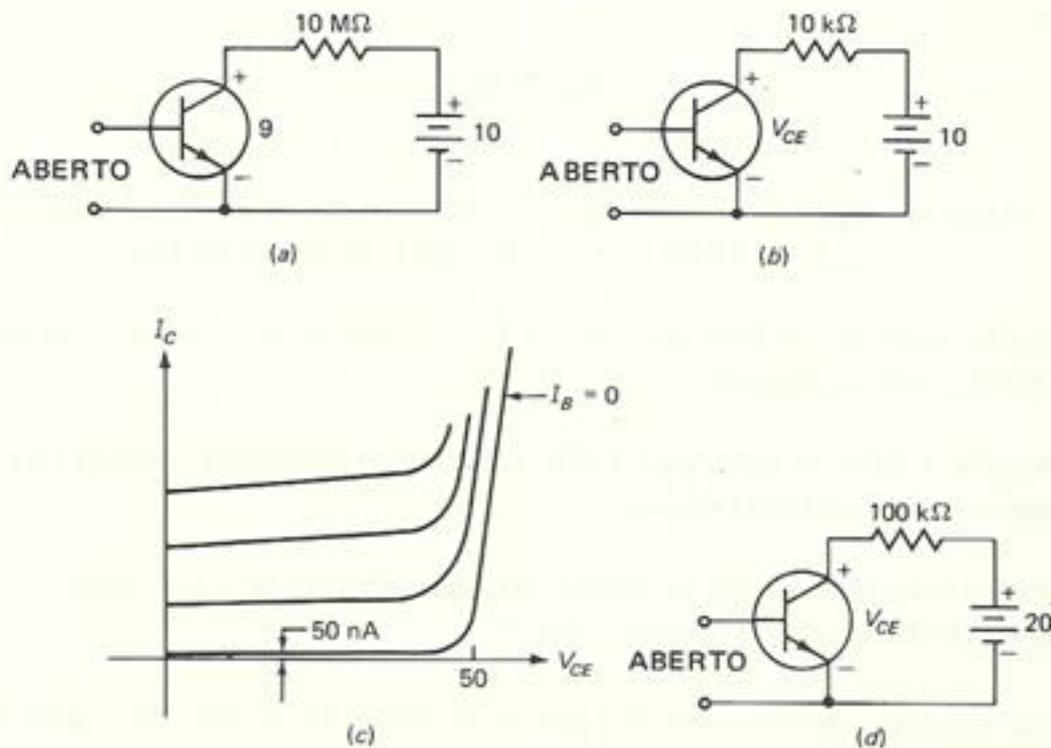


Fig. 5-27

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

- 5-13 Um transistor tem uma corrente do coletor de 10 mA e uma tensão do coletor-emissor de 12 V. Qual a potência dissipada?
- 5-14 Um 2N3904 tem uma especificação de potência de 310 mW à temperatura ambiente (25°). Se a tensão do coletor-emissor for de 10 V, qual a máxima corrente que o transistor pode agüentar sem exceder a sua especificação de potência?
- 5-15 Desenhe a linha de carga para a Fig. 5-28a. Qual a corrente de saturação? Qual a tensão de corte?
- 5-16 Na linha de carga da Fig. 5-28b, qual a máxima corrente do coletor possível? Se a tensão da base for removida, qual o valor de V_{CE} ?
- 5-17 Qual a corrente da base na Fig. 5-28a? Qual a tensão do coletor-emissor? O transistor está em saturação forte?

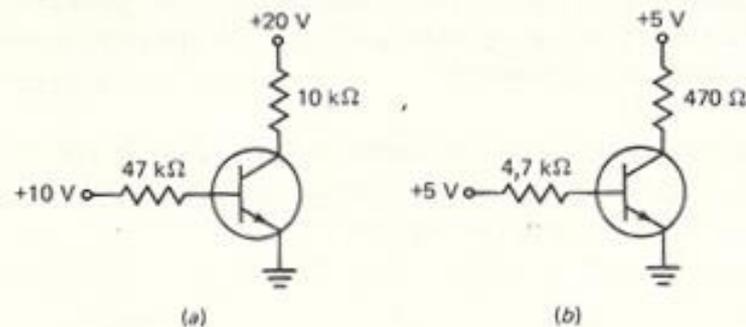


Fig. 5-28

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- 5-18 Suponha que ligamos um LED em série com o resistor de $10\text{ k}\Omega$ da Fig. 5-28a. Qual o valor da corrente do LED? Comente a respeito do brilho do LED.
- 5-19 Qual o valor da corrente da base na Fig. 5-28b? Qual a corrente do coletor? Qual a tensão coletor-emissor?
- 5-20 Desenhe a linha de carga para a Fig. 5-29a. Qual o valor de saturação da corrente do coletor? Qual a tensão de corte?
- 5-21 Qual o valor da corrente do coletor na Fig. 5-29a? Qual a tensão entre o coletor e o terra? Qual a tensão do coletor-emissor?
- 5-22 Qual a máxima corrente possível para o coletor na Fig. 5-29b? Se V_{BB} for de 2 V, qual a tensão do coletor ao terra?
- 5-23 Na Fig. 5-29b, $V_{BB} = 10\text{ V}$. Qual a tensão do coletor-emissor?

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

PROBLEMAS

Imediatos

- 6-1 O transistor da Fig. 6-18 tem um h_{FE} de 80. Qual a tensão entre o coletor e o terra?
- 6-2 Desenhe a linha de carga cc para a Fig. 6-18.
- 6-3 Para que valor aproximado de β_{cc} o circuito da Fig. 6-18 se satura?

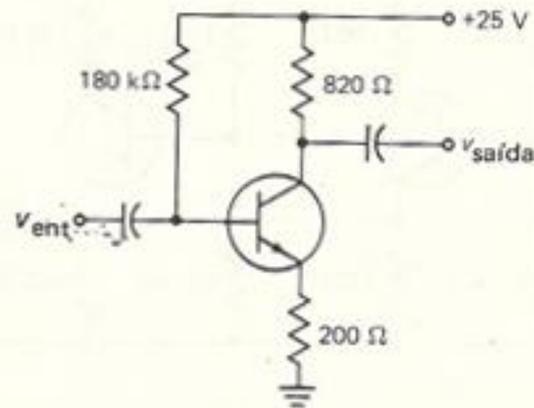


Fig. 6-18

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

- 6-4 Se $\beta_{cc} = 125$ na Fig. 6-18, calcule a tensão da base, a tensão do emissor e a tensão do coletor. (Todas as tensões são em relação ao terra.)
- 6-5 Se $V_{CC} = 10$ V na Fig. 6-19, qual a tensão do coletor em cada estágio?
- 6-6 Se $V_{CC} = 15$ V na Fig. 6-19, qual a potência dissipada em cada transistor?

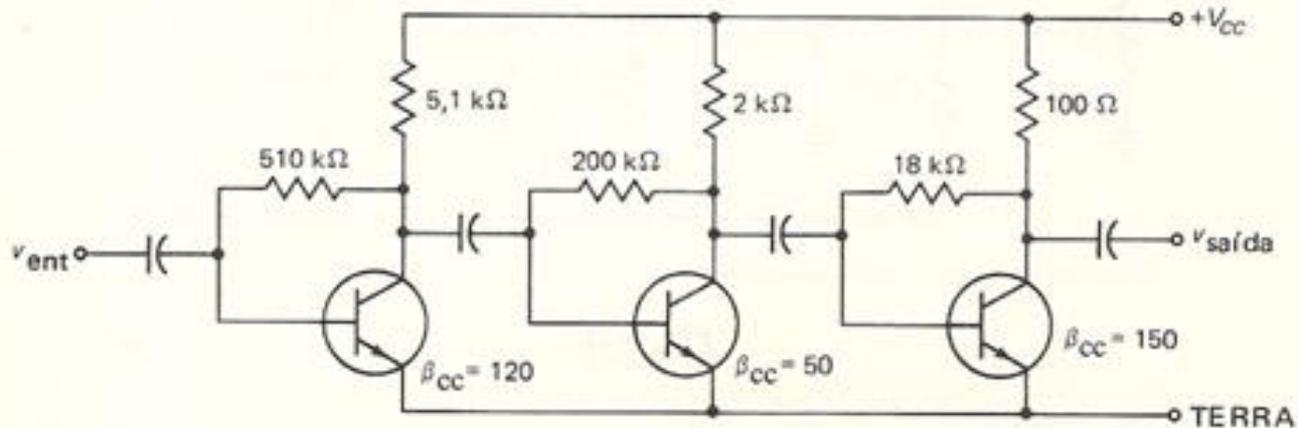


Fig. 6-19

Eletrônica Básica - ELE 0316 / ELE0937

Capítulo 2 – Transistor

6-7 Qual a tensão do emissor relativamente ao terra para cada estágio da Fig. 6-20 se a tensão de alimentação for de 10 V?

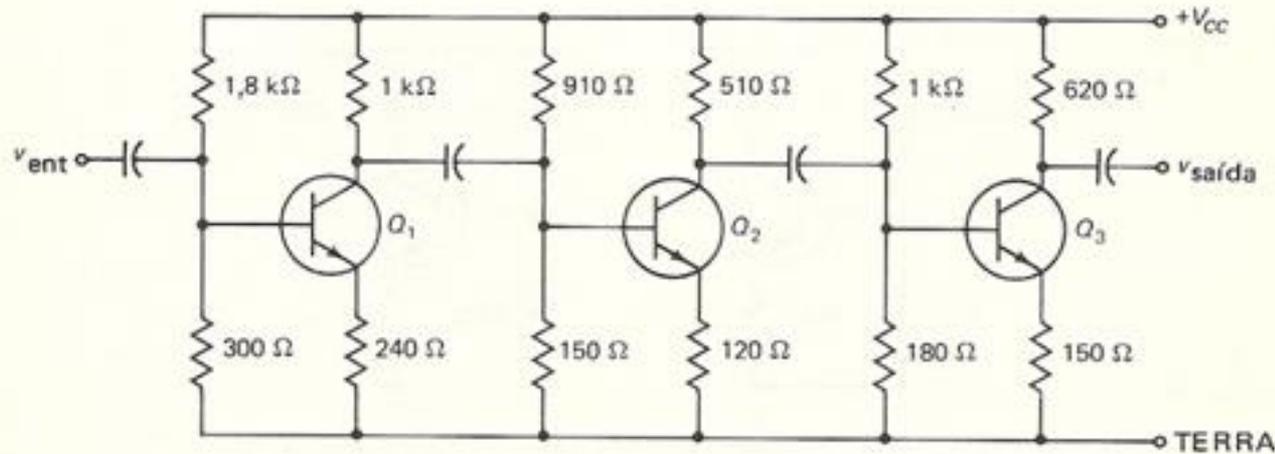


Fig. 6-20

6-8 Calcule a corrente de saturação do coletor para cada estágio da Fig. 6-20, para uma V_{CC} de 15 V.

6-9 Faça uma análise completa da Fig. 6-20 para $V_{CC} = 20\text{ V}$ calculando para cada estágio os seguintes valores: V_B , V_E , V_C , I_C e P_D (potência dissipada).