

Capítulo 4

Transistores bipolares



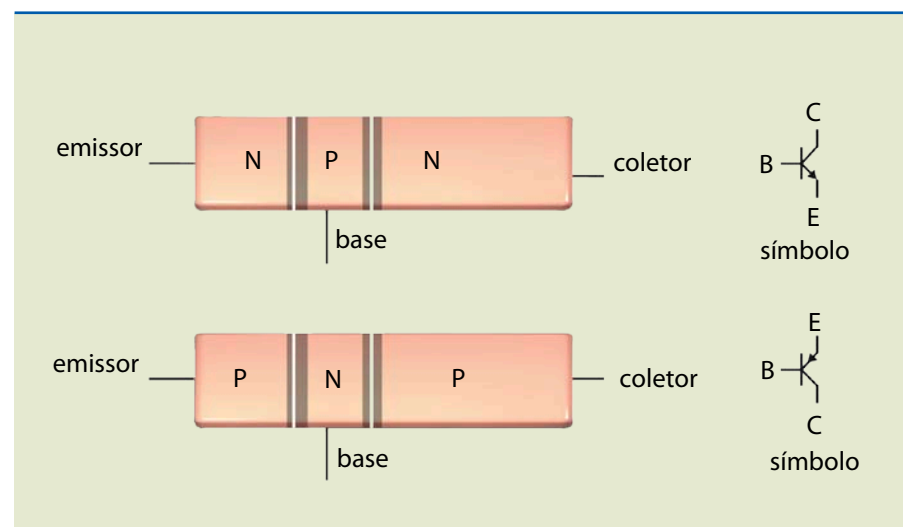
O transistor foi desenvolvido nos laboratórios da Bell em Murray Hill, New Jersey, Estados Unidos, em 1947 pelos cientistas John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley. O desenvolvimento desse componente semiconductor foi de grande relevância para a história da eletrônica e da informática, pois ele está presente em inúmeras invenções eletroeletrônicas, modificando vertiginosamente nossa sociedade.

4.1 Construção básica e princípio de funcionamento

O termo “transistor” é a contração de duas palavras em inglês: *transfer resistor* (resistor de transferência). Existem dois tipos básicos de transistores de acordo com o tipo de dopagem de cada terminal (base, coletor e emissor), NPN e PNP. A figura 4.1 ilustra, de maneira simplificada, sua simbologia e a estrutura interna (na forma de sanduíche). A construção física é diferente.

Analisando a figura 4.1, é possível observar que não existe simetria, isto é, as regiões NPN não possuem as mesmas dimensões, como às vezes a literatura sugere, e, portanto, não é possível confundir o emissor com o coletor. As áreas cinza de cada lado da junção representam as regiões de carga espacial ou de depleção.

Figura 4.1
Tipos de transistor e simbologia:
(a) NPN e (b) PNP.



Cada uma das regiões do transistor apresenta características próprias:

A **base** é a região mais estreita, menos dopada (com menor concentração de impureza) e extremamente fina.

O **emissor** é a região mais dopada (com maior concentração de impureza), onde são emitidos os portadores de carga (elétrons no caso de transistor NPN e lacunas no caso de transistor PNP).

O **coletor** é a região mais extensa, porque é nela que a potência se dissipa.

4.1.1 Funcionamento

Vamos entender como um transistor funciona, tomando como exemplo o transistor NPN, por ser o mais utilizado. De maneira simplificada, para compreender a operação de trabalho do PNP, basta inverter o sentido das tensões e correntes. Consideremos uma situação em que as duas junções foram polarizadas diretamente, assim as correntes que circulam serão altas (da ordem de mA). Se as duas junções estiverem polarizadas reversamente, todas as correntes serão praticamente nulas. No entanto, se a junção da base com o emissor for polarizada diretamente e a outra junção polarizada reversamente, também as correntes de coletor e emissor serão altas, aproximadamente de mesmo valor. Como se explica isso? Em polarização normal (como amplificador), a junção base-emissor é polarizada diretamente e a junção base-coletor reversamente.

Na configuração ilustrada na figura 4.2, como a junção base-emissor está polarizada diretamente, os elétrons são emitidos no emissor (que possui alta dopagem), isto é, passa a existir uma corrente (de elétrons) indo do emissor para a base. Os elétrons atingem a base e, por ela ser muito fina e pouco dopada, quase todos atingem a região de carga espacial (região de depleção) da junção base-coletor, onde são acelerados pelo campo elétrico e direcionados para o coletor. Dos elétrons emitidos no emissor, apenas pequena parcela (1% ou menos) consegue se recombinar com as lacunas da base, formando a corrente de base; os outros (99% ou mais) atingem a junção do coletor. Observe que externamente o sentido indicado é o convencional para as três correntes: de base (I_B), de coletor (I_C) e de emissor (I_E). A maneira como o transistor está conectado é chamada de ligação base comum.

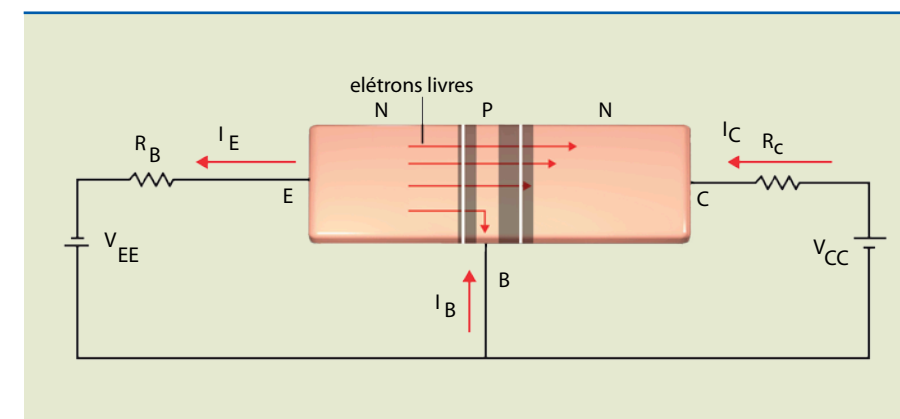


Figura 4.2
Transistor: ligação base comum.



4.2 Operação do transistor

Na estrutura definida na figura 4.2 – ligação base comum –, a junção base-emissor é polarizada diretamente e a junção base-coletor reversamente. A polarização direta faz aparecer um fluxo de elétrons indo do emissor para a base e, como essa região é muito estreita e com baixa dopagem, poucos elétrons se recombinam com lacunas existentes na base (1% ou menos dos elétrons emitidos). Quase todos os elétrons emitidos conseguem atingir a região de carga espacial da junção base-coletor, onde são acelerados em direção ao coletor. A corrente de base é originada da corrente das lacunas, que se difunde no emissor, e dos elétrons, que se recombinam com lacunas na base. A corrente de base apresenta valor muito pequeno, normalmente 200 vezes menor que a de emissor. Retorne à figura 4.2 e observe a indicação das três correntes do transistor, considerando o sentido convencional.

Em um transistor podemos adotar a seguinte relação entre as três correntes:

$$I_E = I_C + I_B$$

Define-se $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$ (4.1)

como o ganho de corrente na ligação base comum. **Importante:** o parâmetro α é um número sem unidade, menor que 1, porém próximo de 1 (ex.: $\alpha = 0,99$).

A configuração ilustrada na figura 4.2 está agora representada pelo circuito elétrico da figura 4.3, com o símbolo usual do transistor NPN.

Podemos representar o transistor como indicado na figura 4.4. Nesse caso, a ligação é chamada de emissor comum. A polarização das duas junções continua como antes, junção base-emissor polarizada diretamente e junção base-coletor reversamente. A operação é a mesma da ligação base comum.

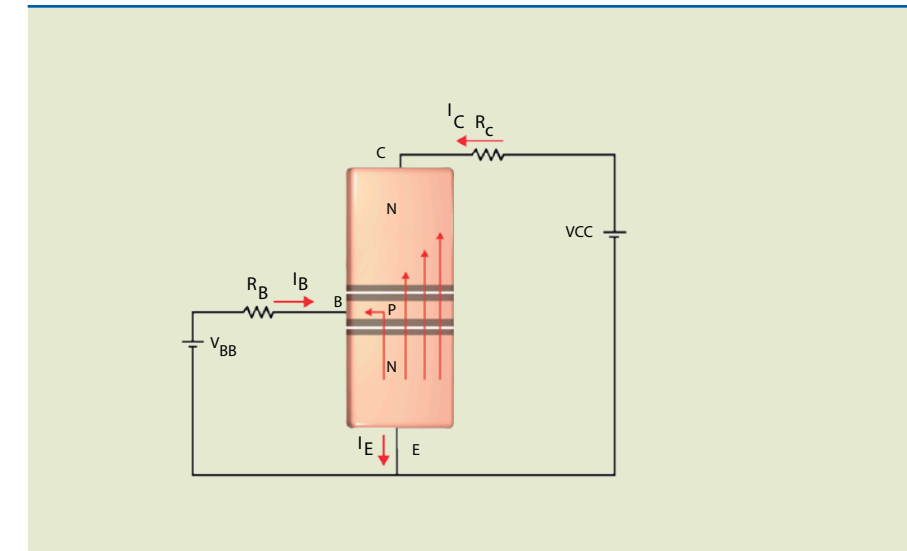


Figura 4.4
Transistor: ligação emissor comum.

Para essa configuração, define-se o ganho de corrente como:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (4.2)$$

Nesse caso, o valor do parâmetro β é muito maior que 1 e também não tem unidade (ex.: $\beta = 300$).

A relação entre os dois parâmetros é dada por:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4.3) \quad \text{e} \quad \beta = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad (4.4)$$

A configuração ilustrada na figura 4.4 está agora representada pelo circuito elétrico da figura 4.5, com o símbolo usual do transistor NPN.

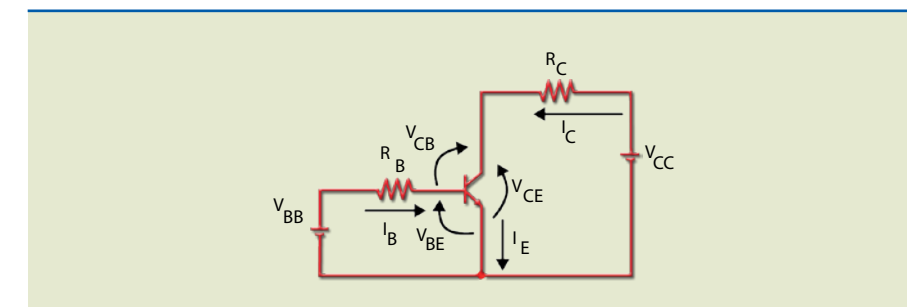


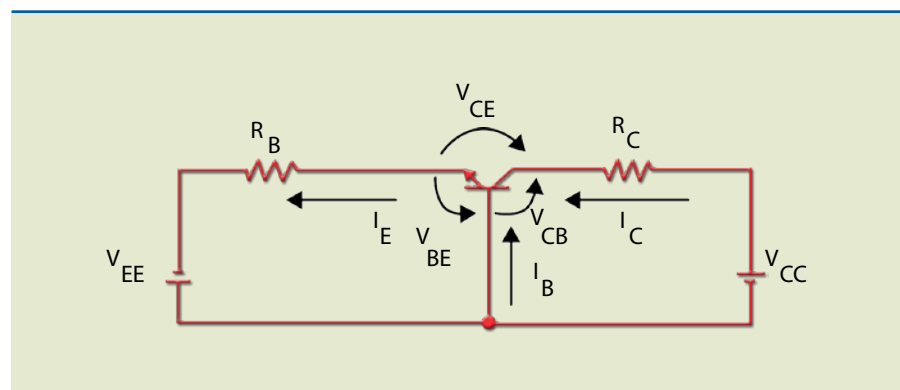
Figura 4.5
Representação por meio de esquema elétrico de um transistor NPN do circuito da figura 4.4.

Em um transistor podemos adotar a seguinte relação entre as três tensões:

$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

Note que a tensão é abreviada por V e que a primeira letra do índice representa o ponto de maior potencial; por exemplo, no caso da tensão entre a base e o emissor (V_{BE}), a base é mais positiva. Em um transistor PNP, a notação para essa mesma tensão é V_{EB} .

Figura 4.3
Representação por meio de esquema elétrico de um transistor NPN do circuito da figura 4.2.

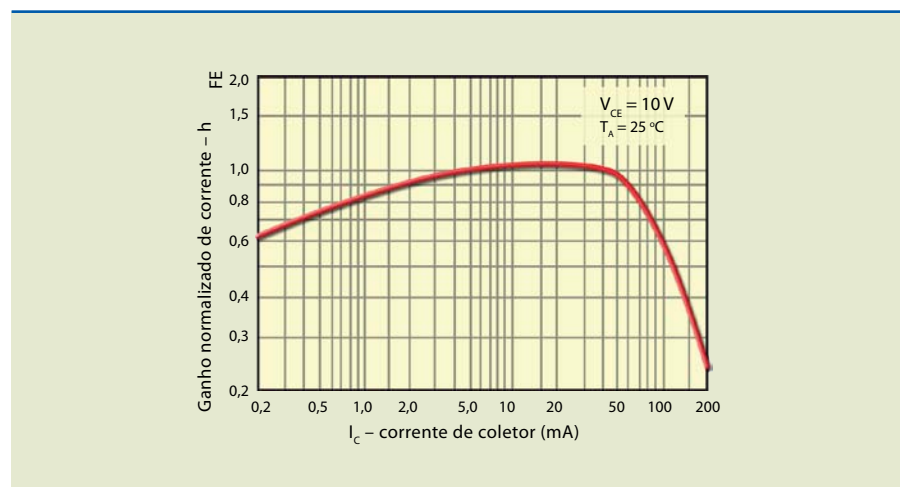


Muitas vezes o ganho de corrente vem com a notação h_{FE} , isto é, $\beta = h_{FE}$.

Figura 4.8

Dependência do ganho de corrente com a corrente de coletor.

O gráfico da figura 4.8 foi obtido da folha de dados do transistor BC548 e mostra a dependência do ganho com a corrente de coletor para dada temperatura e tensão coletor-emissor.



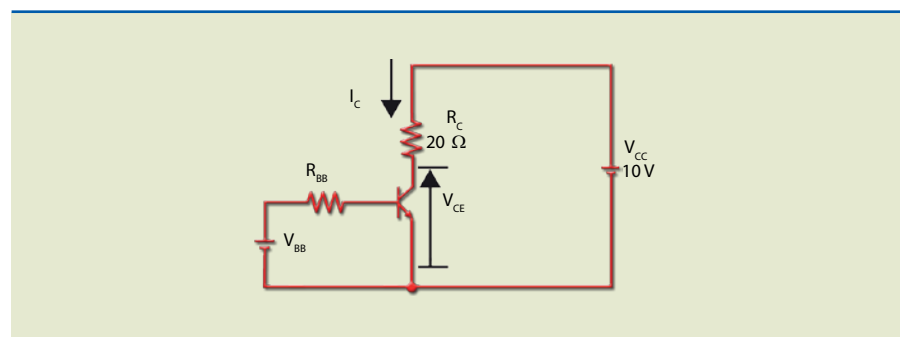
Como é possível observar na figura 4.8, o ganho de corrente β (h_{FE}) varia com a corrente de coletor, temperatura e tensão coletor-emissor. O gráfico do ganho de corrente é normalizado, isto é, para a corrente de 4 mA, o ganho é 100%. Para correntes menores ou maiores que 4 mA, o ganho apresenta outros valores: para 0,4 mA, por exemplo, o ganho será 70% do ganho a 4 mA.

4.4 Regiões de operação: reta de carga

O circuito da figura 4.9 simboliza um transistor com as curvas características apresentadas na figura 4.7b.

Figura 4.9

Ligação emissor comum.



Na figura 4.9, o equacionamento do circuito de coletor resulta em:

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

Essa é a equação de uma reta, chamada de reta de carga, que é representada no plano $I_C \cdot V_{CE}$ das curvas características de coletor.

Para traçarmos essa reta, utilizamos dois pontos:

Primeiro ponto: igualando $I_C = 0$ na equação anterior, obtemos $V_{CE} = V_{CC}$, que fisicamente representa o corte. Como no corte as duas junções estão polarizadas reversamente e, portanto, todas as três correntes são muito pequenas (nA), podemos admitir que nessas condições o transistor é uma chave aberta (figura 4.10b).

Obs.: para cortar um transistor de Si, basta fazer $V_{BE} < 0$ V; para um transistor de Ge, $V_{BE} < -0,4$ V.

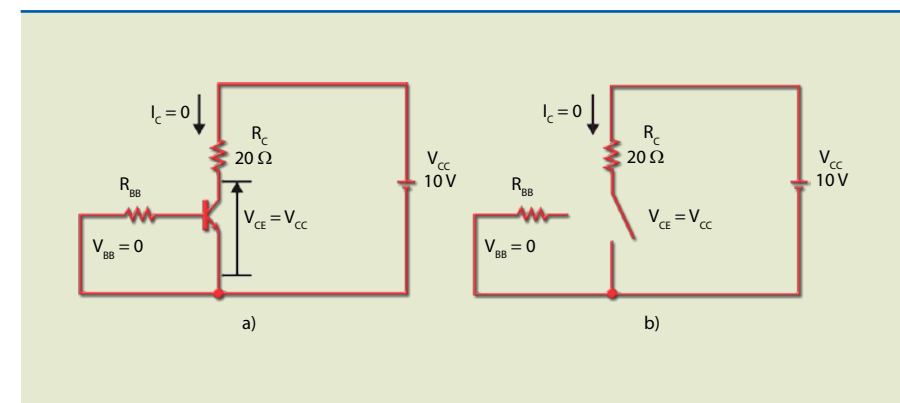


Figura 4.10

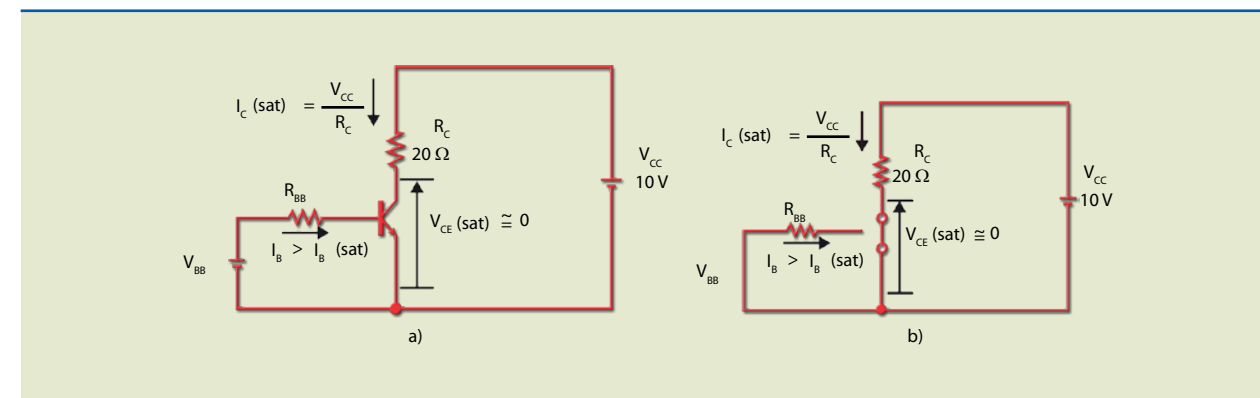
Transistor no corte: (a) circuito e (b) modelo simplificado.

Segundo ponto: fazendo $V_{CE} = 0$, obtemos $I_C = V_{CC}/R_C$, que fisicamente representa a saturação. Na saturação, o transistor se comporta como uma chave fechada e as duas junções estão polarizadas diretamente. Para garantirmos que o transistor sature, temos de impor algumas condições, uma delas considerar $V_{CE} \cong 0$. No entanto, para obtermos essa condição, devemos ter $I_C < \beta \cdot I_B$; como o ganho de corrente de um transistor varia entre um mínimo e um máximo, usamos o valor mínimo (β_{min}); portanto, $I_C < \beta_{min} \cdot I_B$.

A figura 4.11a mostra o circuito de um transistor na saturação e a figura 4.11b, o modelo simplificado para ele (chave fechada).

Figura 4.11

Transistor na saturação: (a) circuito e (b) modelo simplificado.



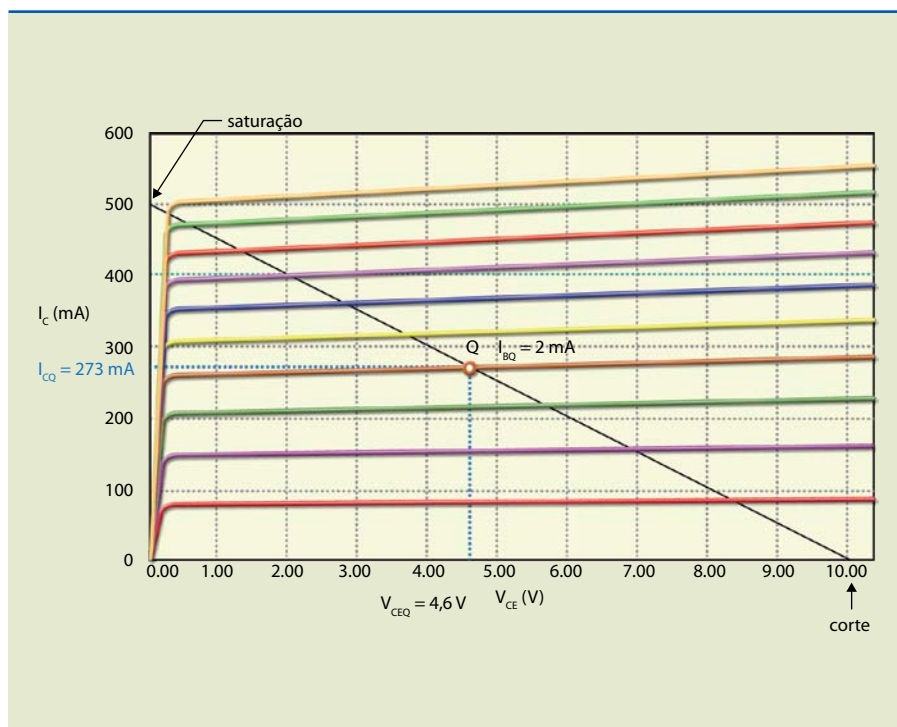
Após a determinação desses dois pontos, devemos uni-los, traçando a reta de carga.



Obrigatoriamente, o ponto de operação, também chamado de ponto quiescente, representado por Q (valores de I_{BQ} , I_{CQ} , V_{CEQ}), estará sempre em cima da reta de carga.

Figura 4.12

Curvas característica de coletor com a reta de carga.



No gráfico da figura 4.12, observe que, no ponto Q , temos $I_{BQ} = 2$ mA, $I_{CQ} = 273$ mA e $V_{CEQ} = 4,6$ V. Os limites da reta de carga são a saturação, quando $V_{CE} = 0$, e o corte, quando $I_B = 0$. Entre esses dois pontos (saturação e corte), o transistor opera como amplificador, isto é, a relação entre I_C e I_B é dada por $I_C = \beta \cdot I_B$. Nessa região (região ativa), o transistor é usado como amplificador.

Para entender como o transistor passa a funcionar como amplificador, considere o circuito apresentado na figura 4.13a. Nessa situação, um pequeno valor de tensão alternada é somado à tensão de polarização V_{BB} . Desse modo, no semiciclo positivo, a corrente de base se eleva acima de I_{BQ} , fazendo a corrente de coletor aumentar proporcionalmente e a tensão de coletor diminuir. A tensão obtida no coletor costuma ser maior que a tensão aplicada na base, ou seja, houve amplificação de tensão. Além disso, essa configuração causa defasagem de 180° na tensão de saída em relação à de entrada. O gráfico da figura 4.13b mostra essa operação.

Com base nessa análise, podemos concluir que o ponto de operação (Q) deve ser bem localizado para que seja possível obter a máxima saída de pico a pico sem distorção. A melhor localização é no meio da reta de carga ($V_{CEQ} = V_{CC}/2$), pois permite um valor V_{CC} de máxima saída. Observe os três casos representados na figura 4.14. No primeiro (figura 4.14a), a máxima saída de pico a pico possível é de 10 V, antes que ocorra o ceifamento (distorção) por saturação ou corte; nos outros dois (figuras 4.14b e 4.14c), é de 4 V – em ambos os casos, se a entrada aumentar, o sinal de saída distorcerá.

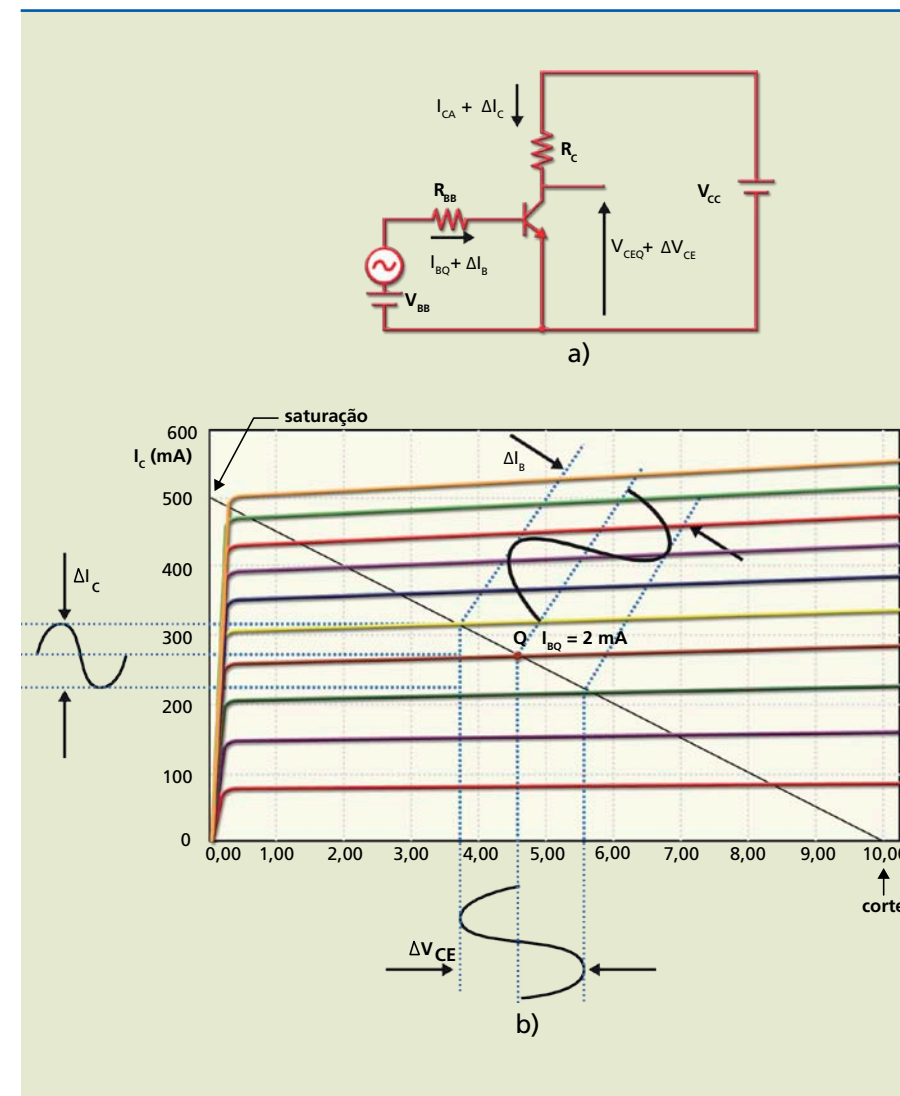


Figura 4.13

Amplificação:
(a) circuito e
(b) análise gráfica.

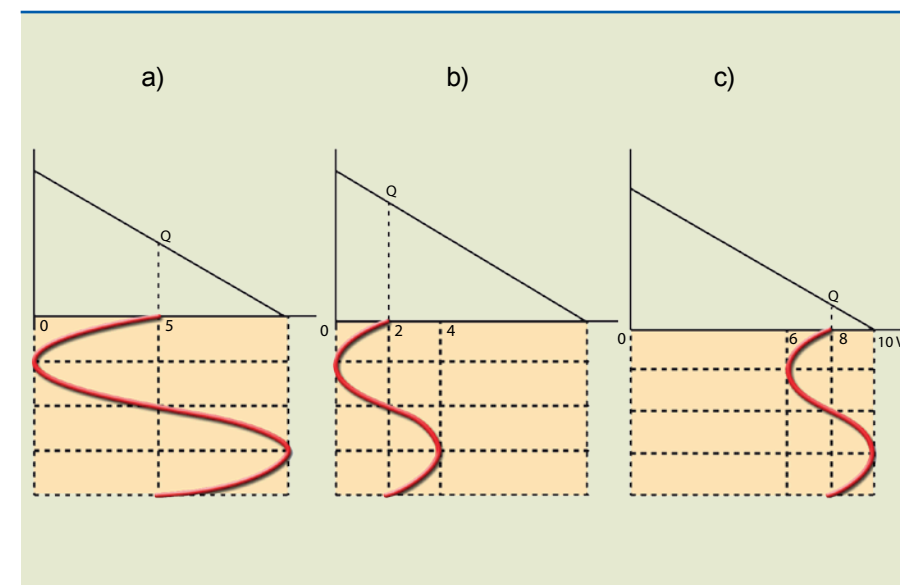


Figura 4.14

Influência da localização do ponto Q :
(a) meio da reta,
(b) próximo da saturação e
(c) próximo do corte.



4.5 Potência dissipada: dissipadores

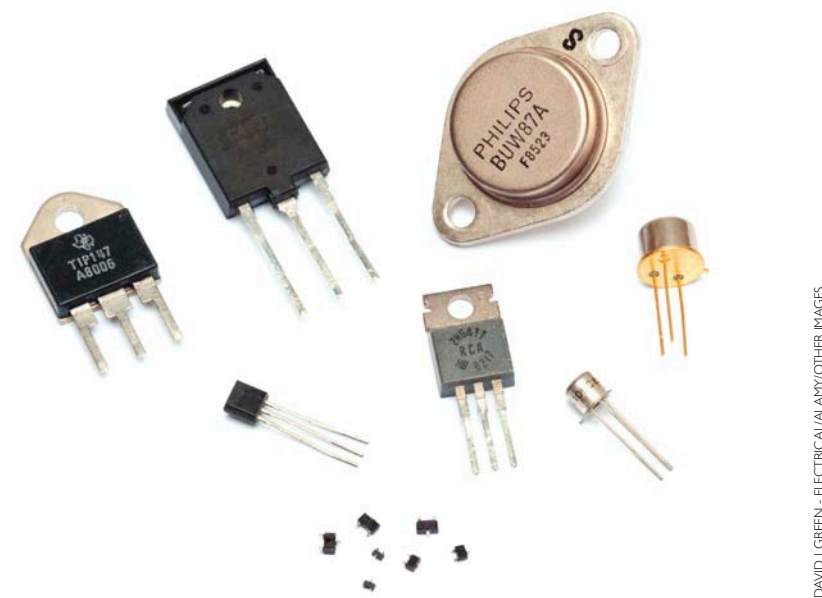
Em um transistor, a maior parte da potência é dissipada no coletor. A potência dissipada é calculada aproximadamente por:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C$$

Em relação à capacidade de dissipar potência, os transistores podem ser classificados em três tipos: de baixa potência (ex.: BC548 e BC109), de média potência (ex.: BD140 e TIP41) e de alta potência (ex.: 2N3055). A figura 4.15 mostra os principais encapsulamentos de transistores de baixa, média e alta potência. Observe que os encapsulamentos preveem local para a colocação do dissipador – alguns apresentam furos que facilitam a união entre o transistor e o dissipador.

Figura 4.15

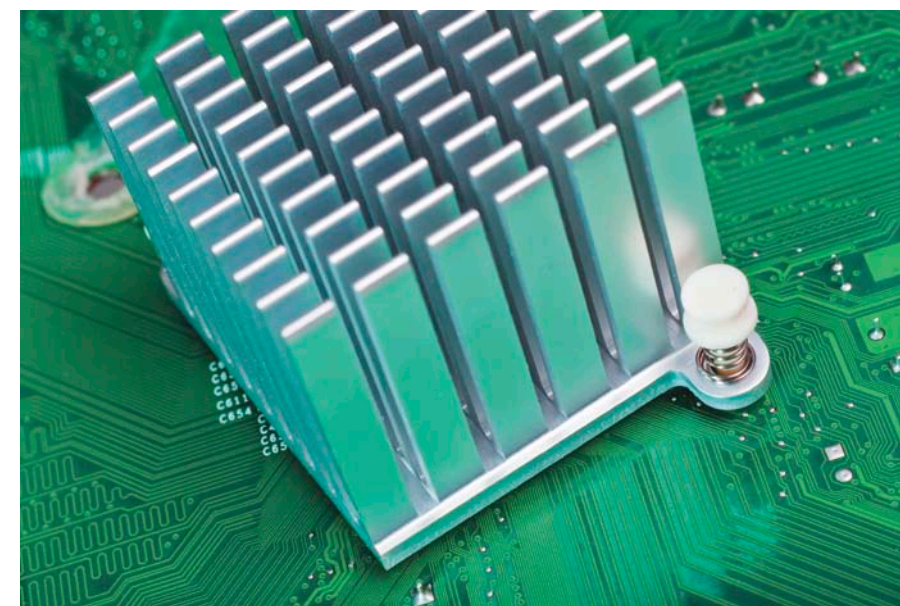
Encapsulamentos usuais.



DAVID J. GREEN - ELECTRICAL/ANY/OTHER IMAGES

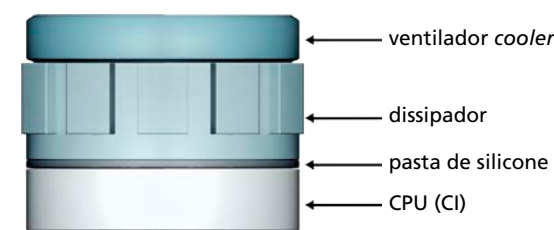
Como vimos, os semicondutores são sensíveis às variações de temperatura. Uma das maneiras de amenizar a ação do excesso de temperatura nesses dispositivos é prender ao corpo do transistor uma placa metálica chamada dissipador de calor. Os dissipadores de calor usados em eletrônica são feitos de alumínio ou cobre. Os dissipadores de alumínio são mais baratos, porém menos eficientes que os de cobre.

Por vezes, o dissipador está acoplado a um pequeno ventilador, chamado *cooler*, que auxilia a retirada do ar quente para o meio externo. A figura 4.16 mostra o sistema de arrefecimento da CPU de um computador. Observe que esse sistema é constituído de um dissipador fixado à CPU por parafusos e pasta de silicone, que facilita a transferência de calor e elimina as bolhas de ar, e de um *cooler*, que aspira o ar quente próximo ao dissipador.



TIMOTHY HODGKINSON/SHUTTERSTOCK

Figura 4.16
Sistema de arrefecimento de uma CPU de computador.



4.6 Conexão Darlington

Conexão Darlington é uma ligação realizada entre dois transistores quando se deseja obter um transistor equivalente com valor de ganho de corrente elevadíssimo.

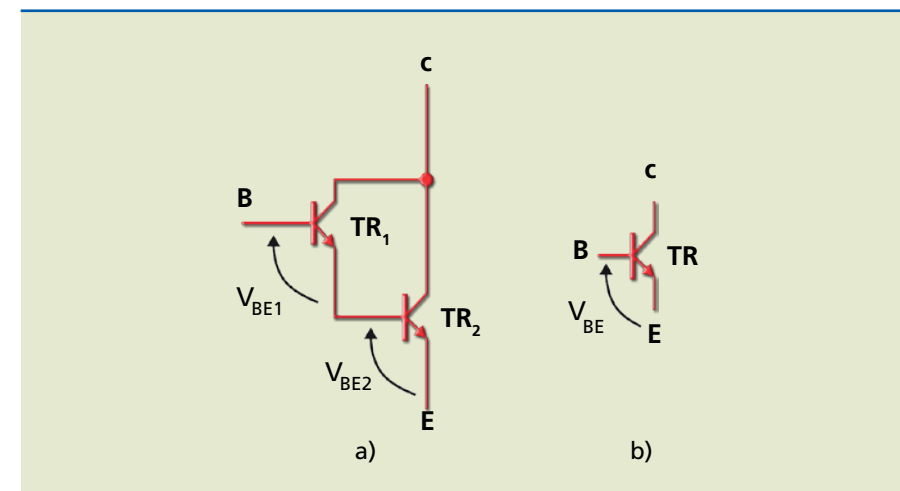


Figura 4.17
(a) Conexão Darlington e (b) transistor equivalente.

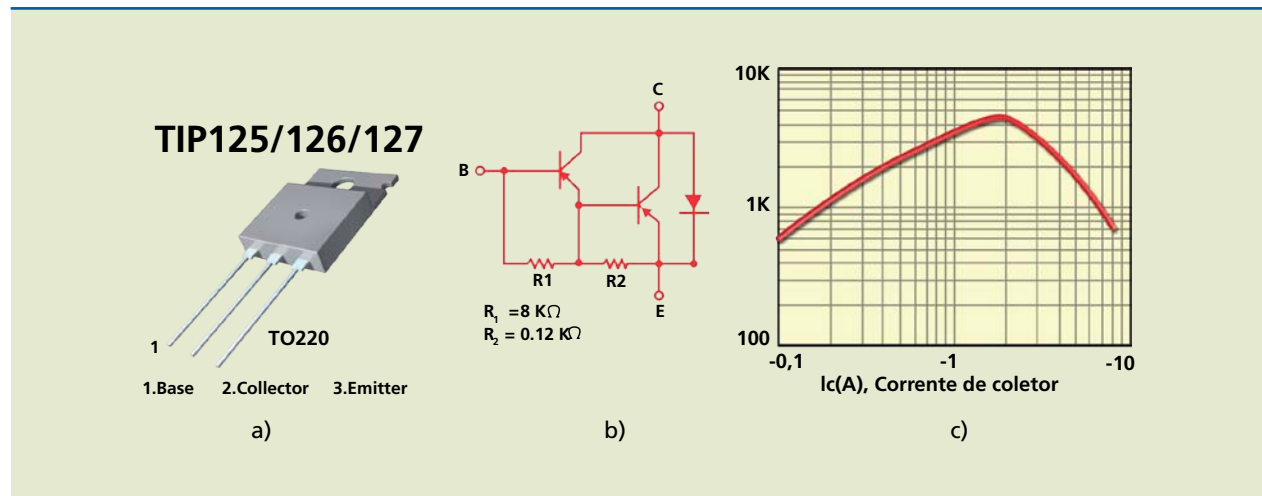


Figura 4.18

(a) Exemplo de conexão Darlington (PNP),
 (b) circuito equivalente e
 (c) gráfico do ganho de corrente conforme I_C .

O transistor equivalente tem ganho de corrente igual a $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$, em que β_1 e β_2 são os ganhos dos transistores TR1 e TR2, respectivamente. A tensão base-emissor quando em condução vale $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$.

Esse tipo de conexão é usado na saída de estágios de potência, em fontes de alimentação e em qualquer situação em que for necessário obter variações de corrente extremamente baixas com fornecimento de grandes correntes.

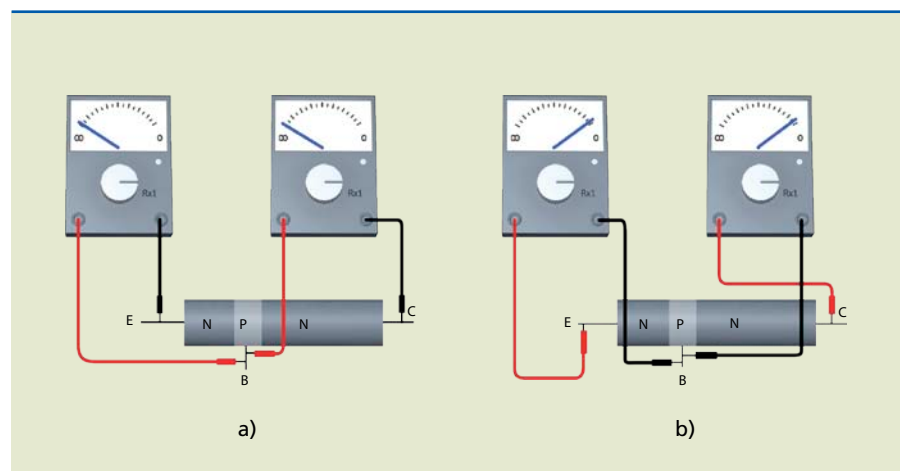


4.7 Teste de transistores

Para testar transistores, são usados os mesmos princípios do diodo, com alguns procedimentos adicionais. Observe que, nas situações representadas na figura 4.19, utiliza-se multímetro analógico com a chave na posição ohmímetro na escala de resistência Rx1.

Figura 4.19

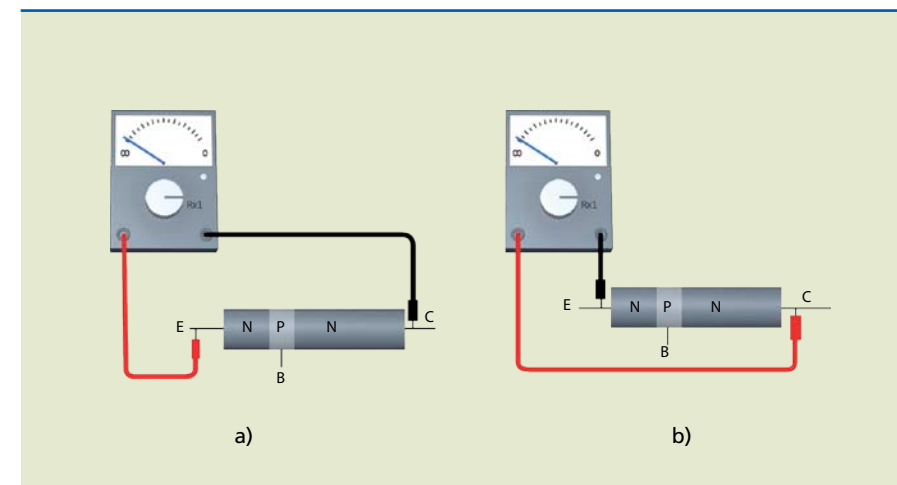
Transistor polarizado
 (a) reversamente e
 (b) diretamente.



Agora veja, na figura 4.20, o que acontece quando o multímetro é ligado entre emissor (E) e coletor (C): em qualquer um dos casos existirá sempre uma junção polarizada reversamente.

Figura 4.20

Polarizando reversamente
 (a) a junção coletor-base e
 (b) a junção emissor-base.

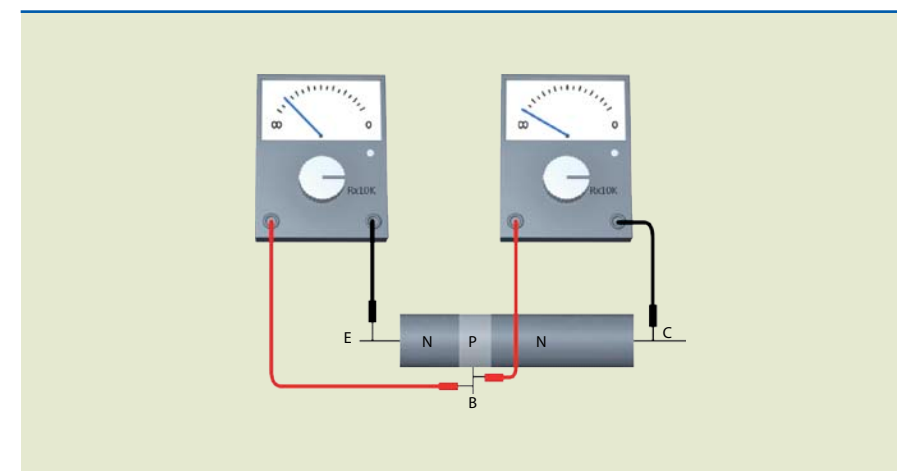


A que conclusão podemos chegar depois de analisar as situações representadas nas figuras 4.19 e 4.20? Testando dois a dois, nos dois sentidos, os terminais de um transistor, quando encontramos valor de resistência alta entre dois terminais, de uma forma ou de outra, o terminal que sobrou é a base!

Para saber qual terminal é o coletor e qual o emissor, devemos usar o multímetro analógico com escala de resistência R x 10 k ou de maior valor. Na figura 4.21, mede-se a resistência reversa das duas junções; a do emissor é a de menor valor, pois sua dopagem é maior.

Figura 4.21

Identificação do emissor e do coletor.



4.8 Leitura dos códigos em semicondutores

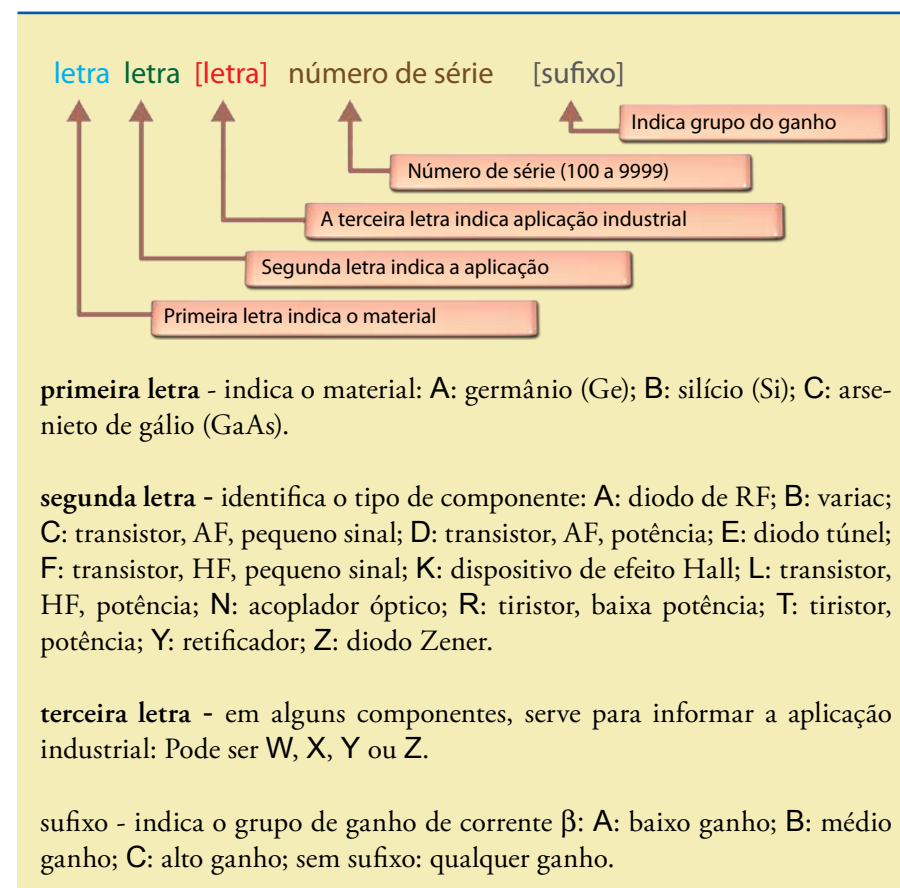
É possível conhecer o valor da resistência de um resistor lendo a faixa colorida ao redor dele. De maneira semelhante, os semicondutores (transistor, diodo e circuito integrado, entre outros) também apresentam uma codificação que permite saber se o material é germânio ou silício e se o componente é um transistor ou um diodo, além de outras informações. Existem associações que elaboram essas codificações; as mais conhecidas são: Pro-Electron, Joint Electron Device Engineering Council (Jedec) e Japanese Industrial Standard (JIS).



4.8.1 Pro-Electron

Trata-se da norma europeia. Vamos tomar como exemplo um semiconductor com a especificação **BC 548 A**. Com base nessa especificação, conclui-se que esse semiconductor é um transistor de silício. Essa informação é obtida observando as duas letras iniciais: a segunda letra (C) identifica o tipo de componente – um transistor –, e a primeira letra (B), o tipo de material – silício. Os três números (548) servem para identificar o tipo específico de transistor, ou seja, sua família. A última letra (chamada de sufixo) indica o grupo de ganho de corrente β , nesse caso baixo ganho (A).

De modo geral, a regra é:



Exemplo: BZX84C12

B = Si, Z = Zener

As três informações seguintes — no caso, **X84** — poderiam ser números com três algarismos (de 100 a 999) se o dispositivo fosse dirigido ao consumidor comum, ou uma letra (**Z**, **X** ou **Y**) no caso de equipamentos industriais, seguido de números com dois algarismos, que variam de 10 a 99.

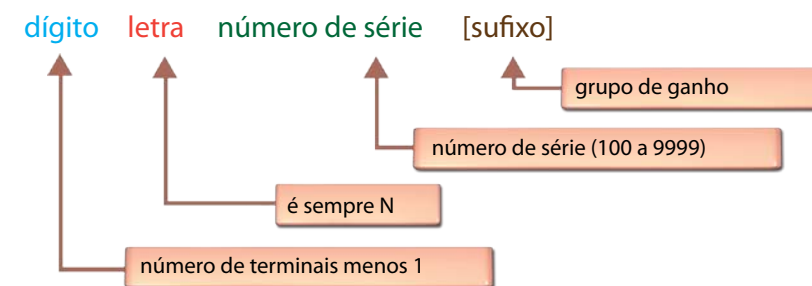
C12 refere-se à tensão de regulação, 12 V no caso.

Portanto, o dispositivo em questão é um diodo Zener industrial de 12 V.

BZX84 é a série, que pode ter dispositivos de várias tensões. A série tem a ver com máxima potência. Por exemplo: a série BZX84 é para o 3 W, enquanto a série BZX85 é para 1,3 W, BZX55 para 0,55 W etc

4.8.2 Joint Electron Device Engineering Council (Jedec)

Essa norma é norte-americana e apresenta a seguinte codificação:

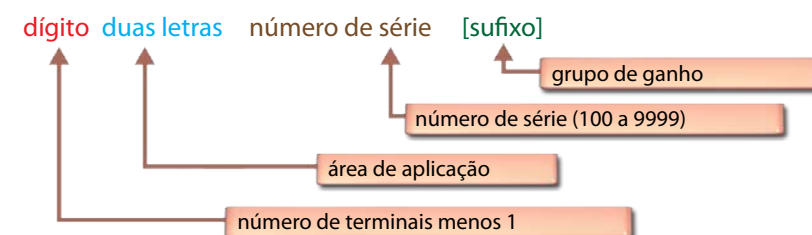


Quando existir sufixo, indicará o grupo de ganho.

Exemplos: 1N4001 (diodo), 2N2222A (transistor), 2N5444 (TRIAC), 2N6399 (SCR), 1N475A (Zener), 2N3821 (JFET).

4.8.3 Japanese Industrial Standard (JIS)

A norma japonesa apresenta a seguinte codificação:



As letras indicam a área de aplicação de acordo com o código:

- SA: PNP, transistor de alta frequência;
- SB: PNP, transistor de áudio;
- SC: NPN, transistor de alta frequência;
- SD: NPN, transistor de áudio;
- SE: diodo;
- SF: tiristor;
- SJ: FET/MOSFET canal P;
- SK: FET/MOSFET canal N;
- SM: TRIAC;
- SR: retificador.



4.8.4 Outras formas de especificação

Além das normas Pro-Electron, Jedec e JIS, alguns fabricantes têm a própria forma de apresentar a especificação e a identificação de seus componentes por meio de prefixos. Veja os exemplos:

- MCR: Motorola, tiristor (ex.: MCR106);
- MJ: Motorola, dispositivo de potência em invólucro metálico (ex.: MJ15004);
- MJE: Motorola, dispositivo de potência em invólucro plástico (ex.: MJE13003);
- MPS: Motorola, dispositivo de baixa potência em invólucro plástico (ex.: MPS3638);
- MRF: Motorola, transistor para HF, VHF e micro-ondas;
- RCA: RCA;
- RCS: RCS;
- TIC: Texas Instruments, tiristor em invólucro plástico (ex.: TIC106, TIC226C);
- TIP: Texas Instruments, transistor de potência em invólucro plástico (ex.: TIP36).

Exemplos

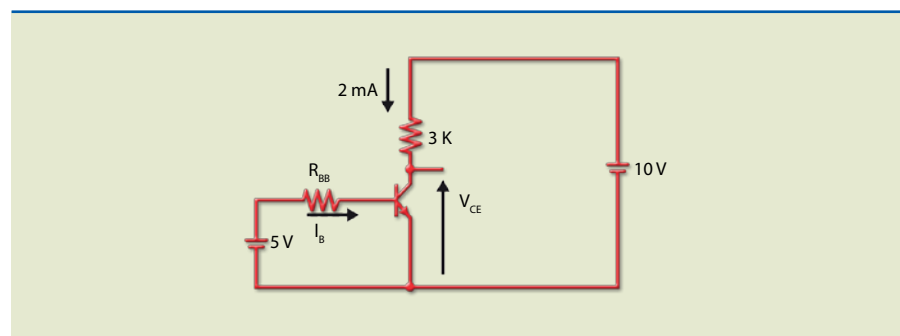
1. No circuito da figura 4.22, considere as seguintes informações:

$I_C = 2 \text{ mA}$, $\beta = 200$ e transistor de Si. Calcule:

- V_{CE}
- I_B
- R_{BB}

Qual o estado do transistor (saturado/cortado/região ativa)?

Figura 4.22



Solução:

a) Equacionando a malha de saída: $10 = 3 \text{ K} \cdot 2 \text{ mA} + V_{CE}$, obtemos:

$$V_{CE} = 10 - 6 = 4 \text{ V}$$

b) A relação entre I_B e I_C é dada pelo β , logo:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2 \text{ mA}}{200} = 0,01 \text{ mA} = 10 \mu\text{A}$$

c) Equacionando a malha de entrada: $5 = R_{BB} \cdot I_B + 0,7\text{V}$, obtemos:

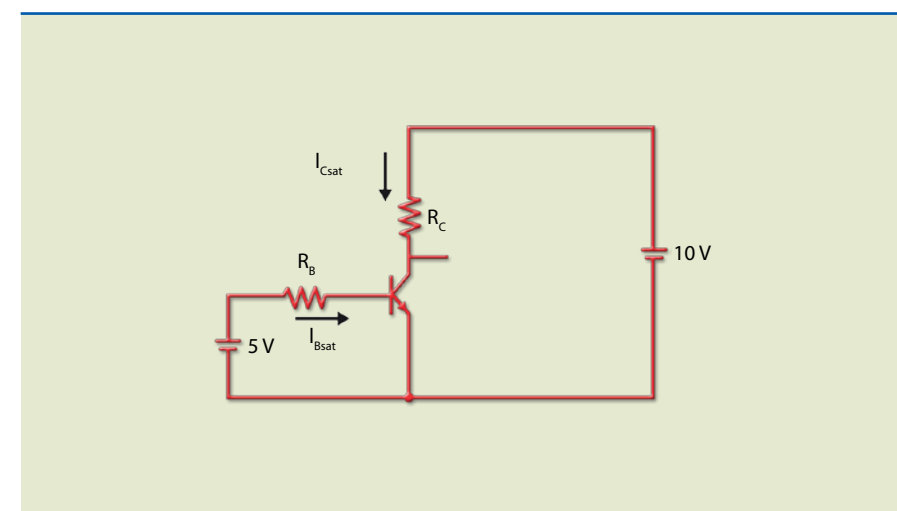
$$R_{BB} = \frac{5 - 0,7}{10 \mu\text{A}} = 430 \text{ k}\Omega$$

Como $V_{CE} = 4 \text{ V}$, o transistor se encontra na região ativa.

2. Analise o circuito da figura 4.23 e calcule R_B e R_C para que o transistor sature com $I_C = 40 \text{ mA}$.

Dados: $\beta_{\min} = 100$, $V_{CEsat} = 0 \text{ V}$ e $V_{BEsat} = 0,7 \text{ V}$.

Figura 4.23



Solução:

Com o transistor saturado, toda a tensão da fonte estará aplicada em R_C . Assim, o valor pode ser calculado por:

$$R_C = \frac{10 \text{ V}}{40 \text{ mA}} = 0,25 \text{ k} = 250 \Omega$$

A corrente de base deve ser:

$$I_B \geq \frac{I_{Csat}}{\beta_{\min}} = \frac{40 \text{ mA}}{100} \Rightarrow I_B \geq 0,4 \text{ mA}$$



Portanto, a resistência de base deve ser:

$$R_B \leq \frac{5 - 0,7}{0,4 \text{ mA}} = 10,75 \text{ k}\Omega$$

Para isso, é adotado o valor comercial de 10 k Ω .

4.9 Circuitos de polarização

Polarizar um transistor significa determinar valores de tensão e corrente que se mantenham estáveis de acordo com a temperatura de trabalho, o desgaste das partes internas características de vida útil do componente e a própria substituição do componente. Ao polarizar um transistor, é preciso levar em conta que valores de ponto de operação (ponto Q, quiescente) estabelecidos devem garantir baixo grau de distorção, de modo a não prejudicar o sinal amplificado.

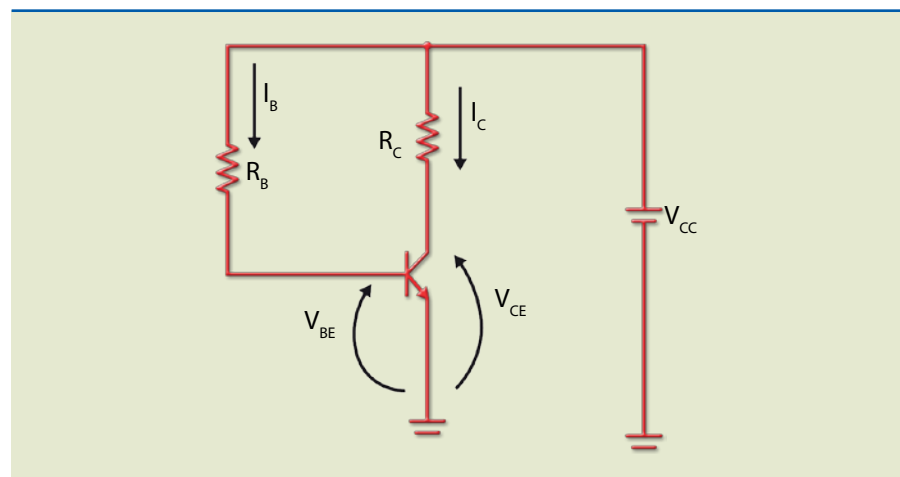
Considerando amplificadores de pequenos sinais, a melhor localização do ponto Q é no meio da reta de carga, isto é, a tensão coletor-emissor (V_{CE}) deve medir aproximadamente metade da tensão da fonte (V_{CC}). Isso garantirá que a saída de pico a pico seja a máxima possível e sem distorção do sinal. A seguir apresentam-se dois tipos de polarização: por corrente de base constante e por divisor de tensão na base.

4.9.1 Polarização por corrente de base constante

É o circuito de polarização mais simples e consiste em aplicar uma corrente constante na base, como exemplificado na figura 4.24.

Figura 4.24

Circuito de polarização por corrente de base constante.



O cálculo dessa corrente é determinado por:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{V_{CC}}{R_B}$$

Como a corrente de coletor é dada por $I_C = \beta \cdot I_B$, então:

$$I_C = \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \cong \beta \cdot \frac{V_{CC}}{R_B}$$

Como o ganho de corrente de uma família de transistor pode variar entre um valor mínimo e um valor máximo, podemos concluir que esse tipo de polarização é altamente instável com a troca de transistor e temperatura.

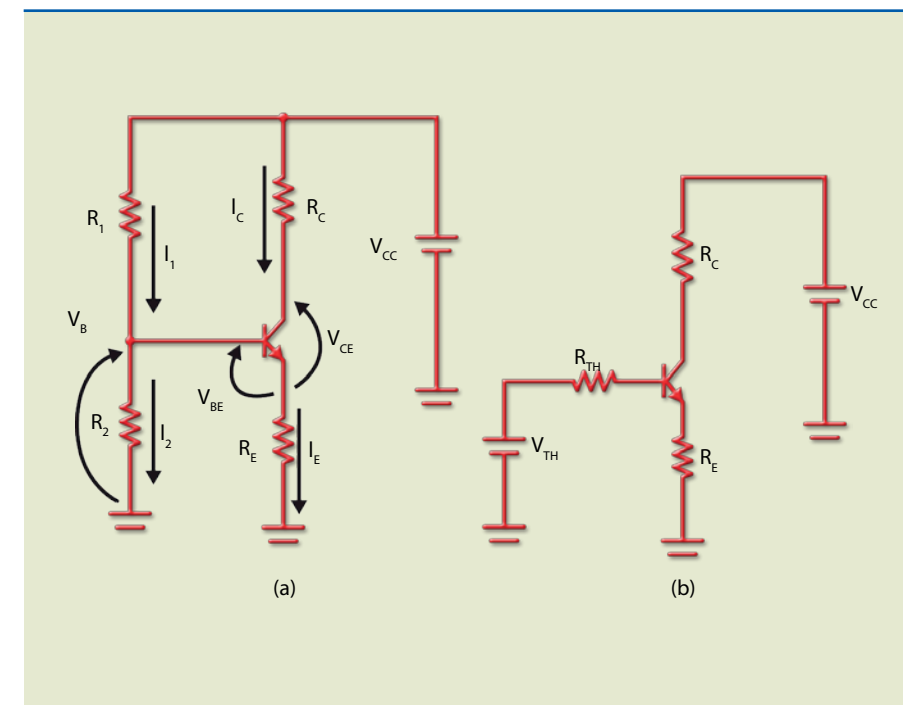
4.9.2 Polarização por divisor de tensão na base

O circuito de polarização por corrente de base constante explicado na seção 4.9.1 apresenta algumas características importantes que devem ser levadas em conta. Esse tipo de polarização, além de depender muito do valor β , apresenta alta instabilidade com o aumento de temperatura. Isso pode acarretar um efeito conhecido por disparo térmico, ou seja, um ciclo em que, a cada aumento de temperatura, ocorre uma elevação de corrente e, conseqüentemente, outro aumento de temperatura.

É possível, porém, polarizar o transistor de maneira que não fique vulnerável à variação de β . Na configuração da figura 4.25, chamada de circuito de polarização por divisor de tensão na base, a realimentação negativa em CC estabiliza o ponto Q, isto é, quando a temperatura aumenta, a corrente de emissor e a tensão V_E também aumentam. No entanto, como a tensão na base (V_B) é constante, obrigatoriamente V_{BE} diminui, despolarizando a base e reduzindo as correntes que tinham aumentado com a temperatura. Claramente, o circuito possui um controle interno por causa dessa realimentação.

Figura 4.25

(a) Circuito de polarização por divisor de tensão na base e (b) circuito com equivalente na base.



Para analisar o circuito, tomemos o equivalente Thévenin na base (figura 4.25a):

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad \text{e} \quad R_{Th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Observando o circuito equivalente da figura 4.25b, temos as seguintes equações na malha de entrada:

$$V_{Th} = R_{Th} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E$$

$$\text{e, como } I_E \cong I_C \text{ e } I_B = \frac{I_C}{\beta}:$$

$$V_{Th} = R_{Th} \cdot \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + I_C \cdot R_E$$

resultando:

$$I_C = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{\frac{R_{Th}}{\beta} + R_E}$$

Se calcularmos os componentes de forma que $R_E \gg \frac{R_{Th}}{\beta}$, então:

$$I_C \cong \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E}$$

Portanto, teremos um circuito no qual o ponto de operação (corrente de coletor) não depende de β .

A seguir, descrevem-se os passos para determinar os valores das resistências do circuito de polarização de divisor de tensão na base. Essas orientações são de caráter essencialmente prático, e pode-se até afirmar que constituem uma “receita”, com fundamentação teórica nas expressões anteriores.

Em geral, são especificados a tensão de alimentação (V_{CC}), a corrente quiescente de coletor e o transistor que será utilizado; portanto, são conhecidos β_{\min} e β_{\max} . Para que toda a “receita” tenha validade, devemos admitir que o valor da corrente de base seja muito menor que o da corrente “descendo” pelo divisor de tensão, como se a base estivesse “aberta”.

Passos para determinar os valores do divisor

1. Adotar os seguintes percentuais da tensão de alimentação:

$$V_{CE} = 0,5 \cdot V_{CC}, \quad V_{RE} = 0,1 \cdot V_{CC} \quad \text{e} \quad V_{RC} = 0,4 \cdot V_{CC}.$$

2. Como I_C é conhecido, é possível calcular R_E :

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{0,1 \cdot V_{CC}}{I_E}$$

3. Como $I_C = I_E$ e $V_{RC} = 4 \cdot V_{RE}$, então $R_C = 4 \cdot R_E$.

4. $R_2 \leq 0,1 \cdot \beta_{\min} \cdot R_E$ (em geral, escolhe-se um valor igual a $0,1 \cdot \beta_{\min} \cdot R_E$. Em momento oportuno vamos avaliar que a escolha de um valor muito baixo para R_2 leva a uma diminuição na impedância de entrada). Não faremos a dedução dessa expressão, mas ela é intuitiva, ou seja, R_2 não pode ser de grande valor, pois nesse caso a condição de corrente de base desprezível não seria verdadeira.

5. Conhecido o valor de R_2 para calcular R_1 , é preciso lembrar que os dois resistores “estão em série”, portanto:

$$R_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot R_2, \quad \text{em que } U_2 = 0,7 + V_{RE} \quad \text{e} \quad U_1 = V_{CC} - U_2.$$

Exemplo

Projete um circuito de polarização por divisor de tensão na base, considerando os valores da tensão de alimentação, o tipo de transistor e o valor da corrente de coletor.

Dados: $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $\beta_{\min} = 100$ e $I_{CQ} = 5 \text{ mA}$.

Solução:

$$V_{RE} = 0,1 \cdot V_{CC} = 0,1 \cdot 12 \text{ V} = 1,2 \text{ V}$$

Então:

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1,2 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 240 \Omega \quad R_C = 4 \cdot R_E = 4 \cdot 240 = 960 \Omega$$

$$R_2 \leq 0,1 \cdot \beta_{\min} \cdot R_E = 0,1 \cdot 100 \cdot 240 = 2400 \Omega$$

$$R_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot R_2 = \frac{10,1}{1,9} \cdot 2,4 \text{ k} = 12,7 \text{ k}$$

Valores adotados: $R_E = 220 \Omega$, $R_C = 820 \Omega$, $R_2 = 2\text{k}2$ e $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$.

Esses valores são comerciais e próximos dos valores calculados.



4.10 Reguladores de tensão

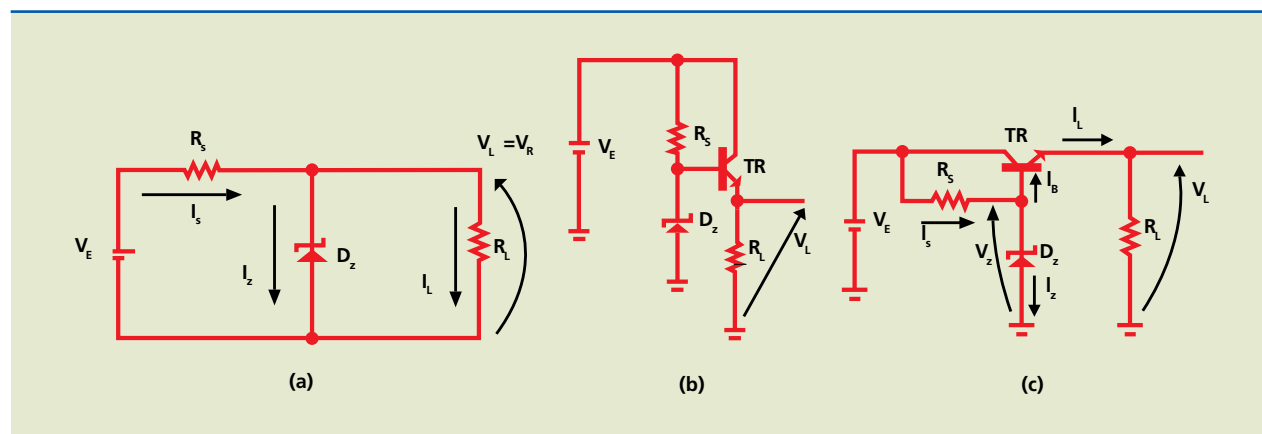
Como vimos no capítulo 2, a tensão senoidal deve ser retificada e filtrada antes de alimentar um circuito com componentes eletrônicos. Hoje, as fontes retificadoras fornecem tensão de saída com baixos valores de *ripple*, porém alguns componentes eletrônicos não suportam nenhum valor mínimo de *ripple*. Nesses casos, recomenda-se a utilização de reguladores de tensão para amenizar a variação de tensão contínua que alimenta o circuito eletrônico. Os circuitos reguladores de tensão podem ser construídos utilizando transistores e circuitos integrados específicos.

4.10.1 Regulador de tensão em série

Sabemos que o diodo Zener é um regulador paralelo que pode ser instalado em paralelo com a carga. Nessas condições, enquanto a corrente no Zener estiver dentro da faixa de regulação, a tensão de saída na carga se mantém aproximadamente constante.

Figura 4.26

(a) Regulador com Zener; (b) e (c) circuitos de regulador de tensão em série com transistor.



Os reguladores de tensão em série apresentam vantagens quando comparados com os reguladores de tensão em paralelo, principalmente considerando que nos circuitos em série somente o Zener utilizado pode ser de menor potência e o valor de impedância de saída, baixo, características técnicas importantes para uma fonte retificadora.

Exemplo

A figura 4.28 apresenta um circuito com regulador de tensão em série. Considerando os dados a seguir, calcule:

$$V_L, V_{CE}, I_z, P_z, P_{TR}, P_{R_S} \text{ e } I_C.$$

Dados: $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ e $\beta = 100$.

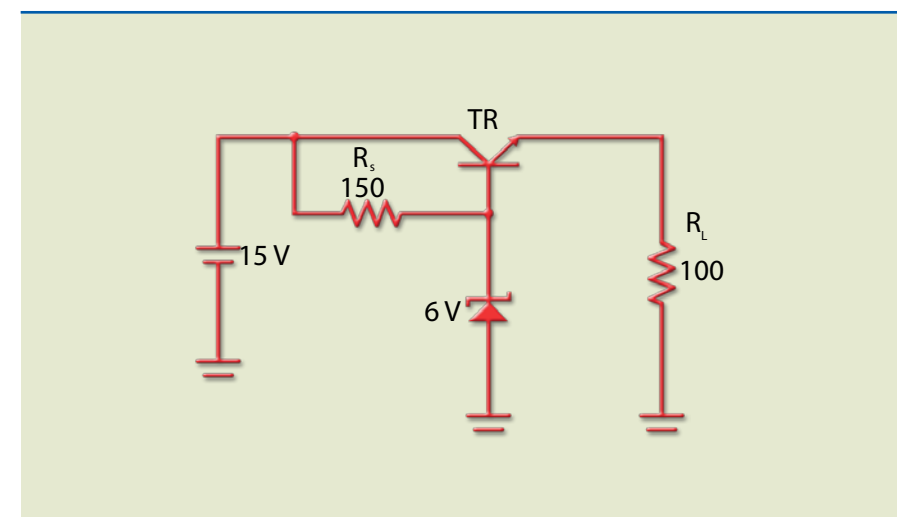


Figura 4.27

Solução:

A tensão em R_S é $15 - 6 = 9 \text{ V}$; portanto, a corrente vale:

$$I_s = \frac{9 \text{ V}}{0,15 \text{ k}} = 60 \text{ mA}$$

A tensão na carga é $6 - 0,7 = 5,3 \text{ V}$; portanto, a corrente na carga vale:

$$I_L = \frac{5,3 \text{ V}}{0,1 \text{ k}} = 53 \text{ mA}$$

$$\text{A corrente de base vale } I_B = \frac{53 \text{ mA}}{100} = 0,53 \text{ mA}$$

e a corrente no Zener, $I_z = 60 \text{ mA} - 0,53 \text{ mA} = 59,47 \text{ mA}$.

A potência dissipada é $P_z = 6 \text{ V} \cdot 59,47 \text{ mA} = 356,82 \text{ mW}$.

A tensão entre coletor e emissor vale

$V_{CE} = 15 - 5,3 = 9,7 \text{ V}$ e a potência dissipada, $P_{TR} = 9,7 \text{ V} \cdot 53 \text{ mA} = 514,1 \text{ mW}$. A potência dissipada em R_S é $P_{R_S} = 9 \text{ V} \cdot 60 \text{ mA} = 540 \text{ mW}$.

4.10.2 Reguladores integrados de três terminais

São reguladores que requerem poucos componentes externos ou nenhum para auxiliar sua operação. Estão disponíveis em diversos valores de tensão e corrente e em vários modelos de encapsulamento; o mais comum é o TO-220.



Regulador de tensão fixa

O regulador integrado de três terminais é um circuito que fornece uma tensão altamente regulada a partir de uma tensão qualquer (em geral, é utilizado na saída de um retificador com filtro). Esse componente pode fornecer tensões reguladas positivas ou negativas com valores entre 5 V e 24 V. Uma de suas aplicações é na construção de um regulador no local, pois ele elimina problemas associados à distribuição das tensões quando existe uma única fonte de alimentação. Os reguladores integrados possuem proteção interna contra sobrecarga de corrente e elevação de temperatura. Estão disponíveis em vários encapsulamentos. Os modelos mais conhecidos são o TO-220 e o TO-3, com capacidade de corrente de até 2 A (deve-se consultar o *datasheet*, pois, dependendo do fabricante, esse valor pode mudar).

As principais famílias de reguladores integrados de três terminais são:

- 78XX: reguladores de tensão fixa positiva;
- 79XX: reguladores de tensão fixa negativa.

A figura 4.28 mostra a pinagem para encapsulamento TO-220 para reguladores da família 78XX e 79XX.

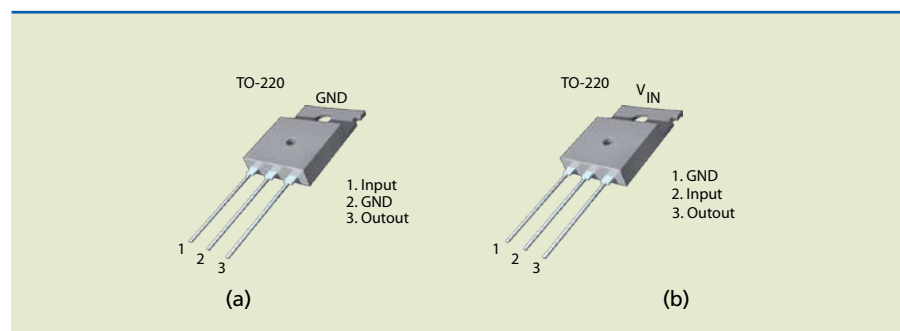


Figura 4.28

Encapsulamentos TO-220 para reguladores (a) 78XX e (b) 79XX.

A figura 4.29a apresenta a configuração básica para esses reguladores. É importante enfatizar que, para funcionamento adequado, a entrada deve ter tensão mínima de $XX + 2,5$ V. Assim, no caso do regulador 7805, para obter 5 V na saída, o valor de entrada mínimo tem de ser 7,5 V. Existe também um valor de tensão de entrada máximo, que, em geral, não pode exceder 40 V (é importante consultar o valor exato no *datasheet* do fabricante). Recomenda-se o uso dos capacitores C_1 e C_2 , porém, sem eles, o circuito funciona. O C_1 deve ser utilizado quando o capacitor do filtro do retificador estiver distante do regulador e o capacitor C_2 melhora a resposta transiente de proteção contra ruídos.

O circuito da figura 4.29b apresenta um regulador para tensão positiva com reforço de corrente na saída. Nesse modelo, a corrente de saída (I_L) é calculada por:

$$I_L = I_{REG} + \beta \cdot (I_{REG} - \frac{V_{BE}}{R_1})$$

em que β é o ganho de corrente do transistor (média ou alta potência) e I_{REG} a corrente no regulador.

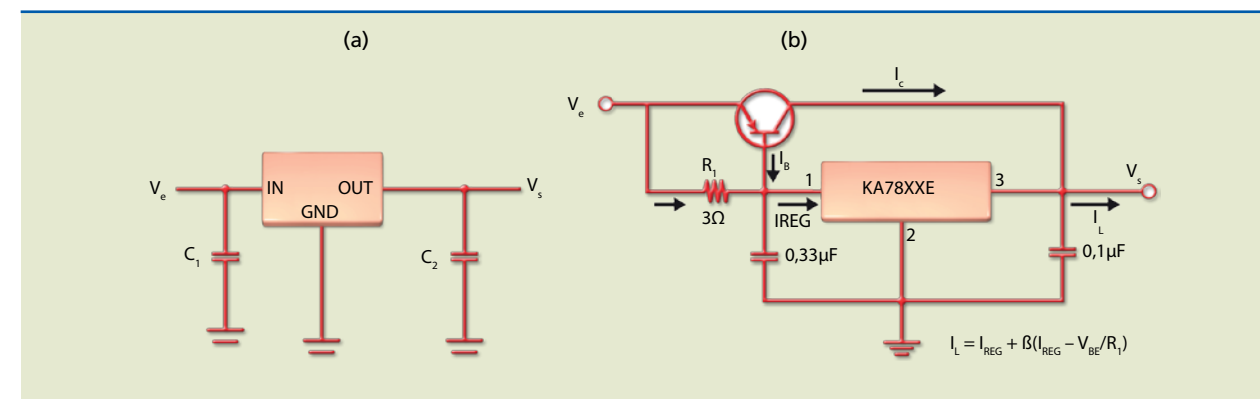


Figura 4.29

(a) Circuito básico para reguladores de saída fixa positiva ou negativa e (b) saída de alta corrente.

O circuito da figura 4.29b apresenta um regulador para tensão positiva com reforço de corrente na saída. Nesse modelo, a corrente de saída (I_L) é calculada por:

$$I_L = I_{REG} + \beta \cdot (I_{REG} - \frac{V_{BE}}{R_1})$$

em que β é o ganho de corrente do transistor (média ou alta potência) e I_{REG} a corrente no regulador.

A figura 4.30 mostra uma aplicação do regulador KA78XXE como fonte de corrente. Observe que a tensão regulada (V_{XX}) fornecida pelo componente é aplicada no resistor R_1 , e, portanto, a corrente e a tensão em R_1 são constantes. Desse modo, a corrente na carga também será constante e valerá:

$$I_L = \frac{V_{XX}}{R_1} + I_Q$$

em que V_{XX} é a tensão regulada – para o circuito integrado 7805, por exemplo, $V_{XX} = 5$ V – e I_Q a corrente de polarização, normalmente da ordem de μ A.

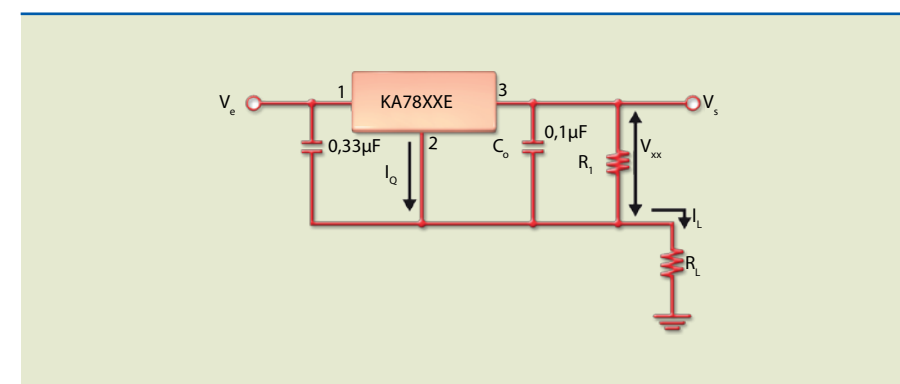


Figura 4.30

Regulador de corrente constante.

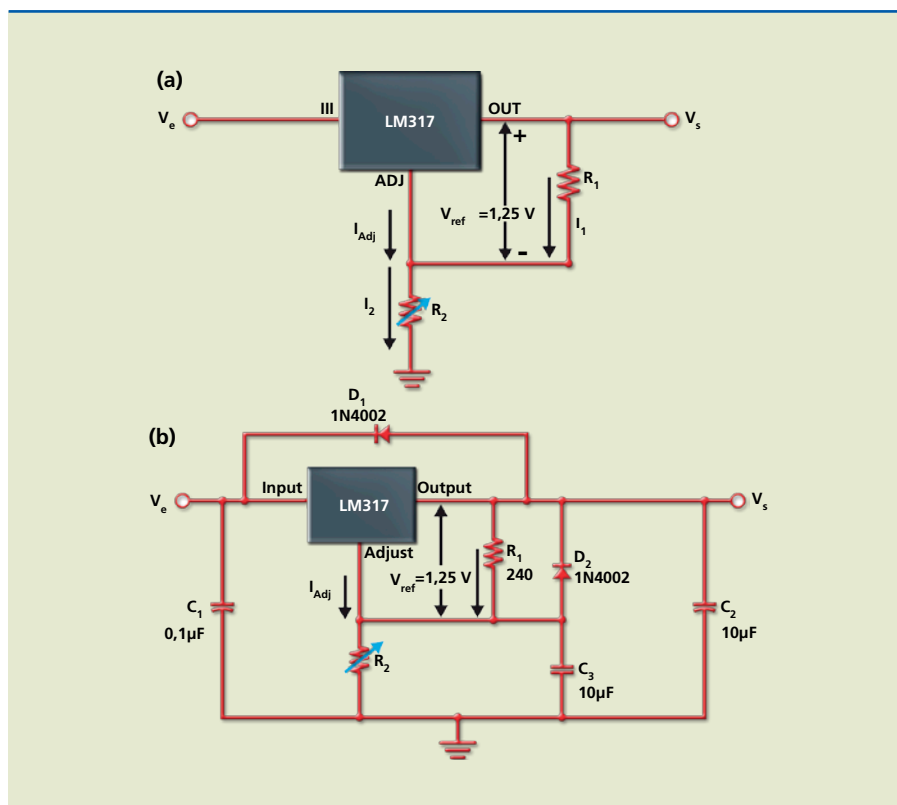


Regulador de tensão ajustável

Esse regulador (figura 4.31) fornece uma tensão de referência da ordem de 1,25 V e é indicado para a construção de fontes ajustáveis. Existe grande variedade de modelos, entre os quais o mais conhecido é o LM317, que fornece até 1 A de corrente (dependendo do encapsulamento) na faixa de tensão entre 1,25 V e 35 V. Esse modelo necessita de um circuito com dois resistores e possui proteção contra sobrecorrente e sobrecarga térmica.

Figura 4.31

Regulador de tensão ajustável:
(a) circuito básico e
(b) circuito completo.



O LM317 gera uma tensão de referência fixa de 1,25 V entre o terminal de saída (OUT) e o terminal de ajuste (ADJ). Em uma primeira análise, se considerarmos a corrente de polarização (I_{ADJ}) desprezível em relação às outras correntes, podemos afirmar que $I_1 = I_2$. Então, equacionando na malha de saída, temos:

$$I_1 = \frac{1,25 \text{ V}}{R_1} \text{ e } V_s = 1,25 + R_2 \cdot I_2 = 1,25 + R_2 \cdot \frac{1,25}{R_1} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Se levarmos em conta I_{ADJ} , devemos incluir na expressão acima o termo $R_2 \cdot I_{ADJ}$. É importante ressaltar que as resistências R_1 e R_2 devem ter valores baixos para garantir que a corrente de polarização seja desprezível. Uma aproximação razoável é considerar que a soma das duas resistências não exceda 5 kΩ.

As funções dos demais componentes do circuito apresentado na figura 4.30b são as seguintes:

C_1 : não é funcional, mas recomendado, em especial se o filtro do retificador não estiver próximo do regulador.

C_2 : melhora a resposta transiente e deve ser usado, principalmente, para prevenir que ruídos prejudiquem o funcionamento de dispositivos ligados na saída do regulador.

C_3 : melhora a rejeição ao *ripple* da fonte, sobretudo quando o ajuste é feito com ganho elevado. Caso esse capacitor seja usado, é melhor colocar os diodos de proteção.

D_1 e D_2 : são utilizados para providenciar um caminho de baixa impedância caso a entrada seja zero, evitando que os capacitores se descarreguem na saída do circuito integrado.

Exemplos

1. Calcule a máxima e a mínima tensão na saída do regulador do circuito da figura 4.32. Considere desprezível a corrente de polarização do circuito integrado.

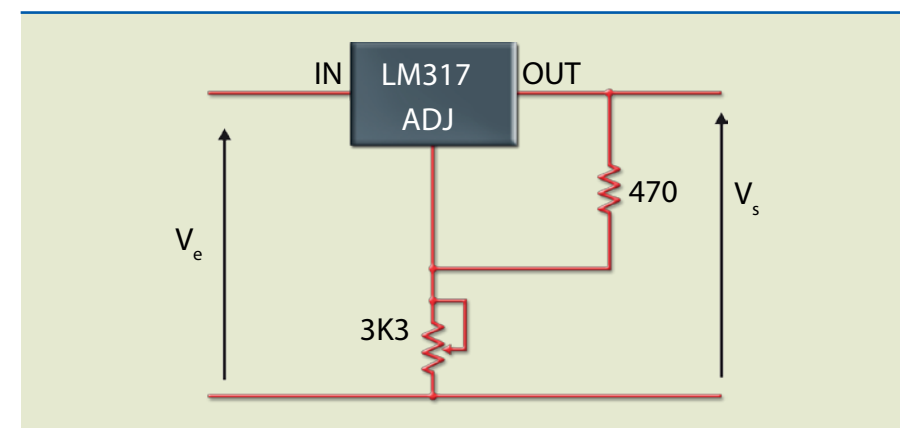


Figura 4.32

Solução:

A tensão de saída é dada pela expressão:

$$V_s = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

em que $R_1 = 470 \Omega$ e $R_2 = 3k3$ (0 a 3k3).

A saída é máxima quando $R_2 = 3k3$:

$$V_{S(\text{máx})} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{3300}{470}\right) = 10 \text{ V}$$

