

CAPÍTULO 6 – TRANSISTORES

Aluno _____ turma _____

ELETRÔNICA ANALÓGICA – AULA 06

CAPÍTULO 6 - TRANSISTOR BIPOLAR

A descoberta do transistor revolucionou o campo da eletrônica. A partir dessa descoberta, o desenvolvimento da eletrônica se tornou cada vez mais rápido. Mesmo com o aparecimento dos circuitos integrados e dos microprocessadores, o transistor ainda tem um lugar de destaque. suas aplicações se estendem a milhares de circuitos com as mais diversas finalidades e utilizações.

Nesta unidade, serão estudadas as características do transistor bipolar e seu funcionamento. Para adquirir esses conhecimentos com mais facilidade, é necessário ter conhecimentos anteriores sobre materiais semicondutores junções semicondutoras, movimento de portadores dentro de cristais semicondutores; lei de Ohm e leis de Kirchhoff.

6.1 Transistor

O termo transistor vem da expressão em inglês "transfer resistor" que significa resistor de transferência. É um componente que apresenta resistência (impedância) variável entre dois terminais. Essa resistência é controlada por um terceiro terminal.

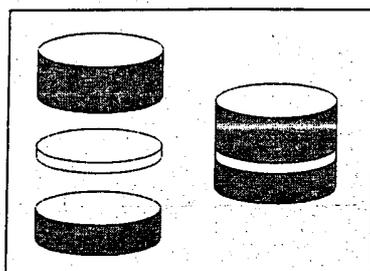
Por sua característica controladora de corrente, o transistor pode ser usado como amplificador de sinais ou como "interruptor eletrônico" em aplicações como equipamentos de som, imagem, controles industriais, máquinas, calculadoras, computadores.

Para realizar esse trabalho, existem alguns tipos de transistores:

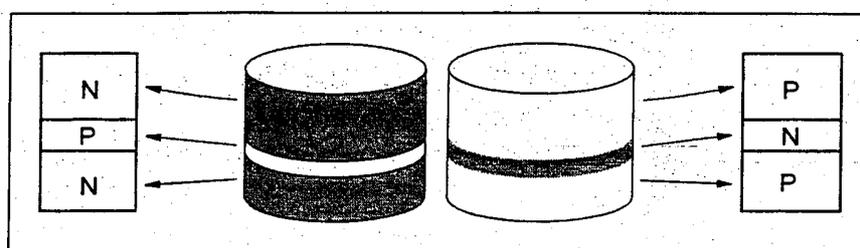
- Transistor bipolar (NPN ou PNP);
- Transistor de unijunção (UJT);
- Transistor de efeito de campo (FET e MOS-FET);

6.2 Transistor bipolar

O transistor bipolar é o mais comum e também o mais usado. Sua estrutura básica se compõe de duas pastilhas de material semiconductor do mesmo tipo. Entre essas pastilhas é colocada 'uma terceira, bastante fina, de material diferente, formando uma configuração semelhante a um sanduíche.



A configuração da estrutura do transistor bipolar permite que se obtenham dois tipos tontos de transistores bipolares: NPN e PNP.



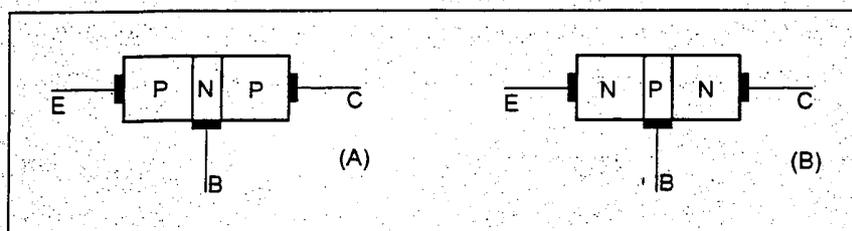
Os dois tipos de transistores podem cumprir as mesmas funções diferindo apenas na forma como as fontes de alimentação são ligadas ao circuito eletrônico.

6.3 Terminais do transistor bipolar

Cada uma das pastilhas que formam o conjunto recebe terminal para que o componente possa ser conectado ao circuito eletrônico. Cada terminal recebe uma designação para que se possa distinguir cada uma das pastilhas.

Assim, a pastilha central é denominada base e é representada pela letra B. Uma das pastilhas externas é denominada de coletor e é representada pela letra C. A outra pastilha externa é denominada emissor e é representada pela letra E.

A figura a seguir apresenta os dois tipos de transistores com a identificação dos terminais.



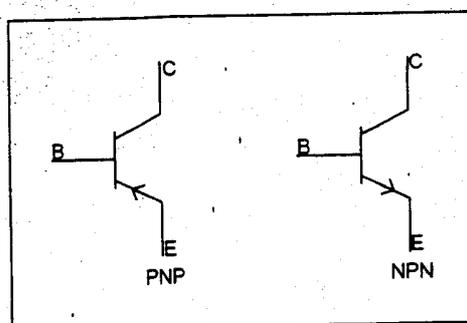
Embora as pastilhas do coletor e emissor sejam do mesmo tipo de material semiconductor, existe diferença de volume de material semiconductor e de intensidade de dopagem entre as pastilhas.

O emissor é densamente dopado, enquanto que a base é levemente dopada. O coletor possui maior volume e, por isso, dissipa mais potência; a intensidade de sua dopagem é intermediária em relação à dopagem das outras duas pastilhas.

Por esse motivo, as ligações do coletor e do emissor no circuito eletrônico não são intercambiáveis.

6.4 Simbologia

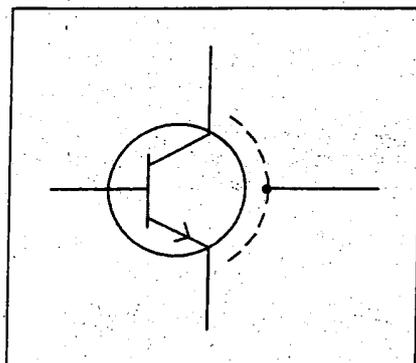
A norma NBR 12526/92 define o símbolo gráfico do transistor. A figura a seguir apresenta os símbolos dos transistores NPN e PNP, indicando a designação dos terminais. A diferença entre os símbolos dos dois transistores está apenas no sentido da seta do terminal emissor.



Alguns transistores, fabricados para aplicações específicas, são dotados de blindagem.

Essa blindagem consiste em um invólucro metálico ao redor das pastilhas semicondutoras cuja função é evitar que o funcionamento do transistor seja afetado, por campos elétricos ou magnéticos do ambiente.

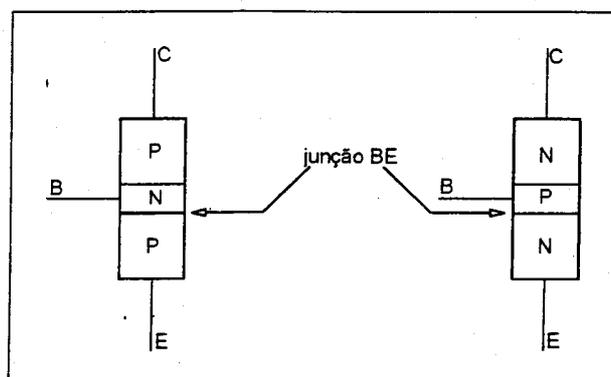
Esses transistores apresentam um quarto terminal ligado à blindagem para que possa ser conectada ao terra do circuito eletrônico. O símbolo gráfico desse tipo de transistor é apresentado a seguir.



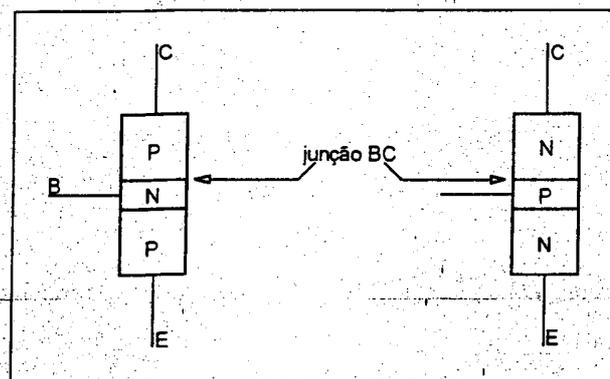
6.5 Tensões nos terminais do transistor

O funcionamento do transistor baseia-se no movimento dos elétrons livres e das lacunas em seu interior e que são provocados pela aplicação de tensões externas são: coletor, à base e ao emissor. Esse movimento está ligado a polaridade da tensão aplicada a cada um desses terminais e é diferente para transistores NPN e PNP.

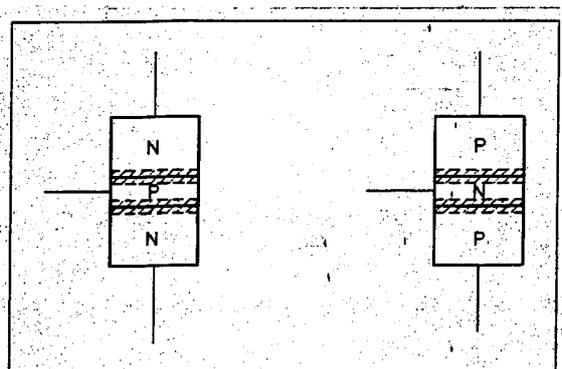
A estrutura física do transistor propicia a formação de duas junções entre cristais P e N: uma junção PN entre o cristal da base e o cristal do emissor, é chamada de junção base-emissor (BE).



Uma junção PN entre o cristal da base e o cristal do coletor, é chamada de junção base-coletor.



Quando as três pastilhas semicondutoras são unidas, ocorre um processo de difusão dos portadores. Como no diodo, esse processo de difusão dá origem a uma barreira de potencial em cada junção. Portanto, no transistor, existem duas barreiras de potencial que se formam com a junção do cristal: a barreira de potencial na junção base-emissor e a barreira de potencial na junção base-coletor.



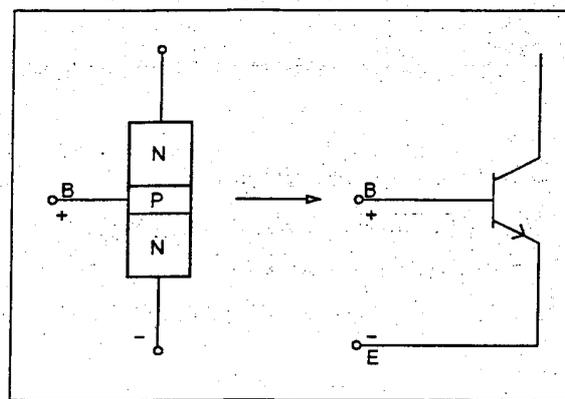
Observação

As três regiões do transistor possuem diferentes níveis de dopagem. Por isso, as camadas de depleção não possuem a mesma largura. Quanto mais densamente dopada for a região, maior será a concentração de íons próximos da junção. Isso significa que a camada de depleção penetra levemente na região do emissor (dopagem densa), porém profundamente na base (dopagem leve). O mesmo acontece entre base e coletor. A camada de depleção do emissor é pequena e a do coletor, grande.

6.6 Polarização na junção base-emissor

Na condição normal de funcionamento, denominada de funcionamento na região ativa, a junção base-emissor é polarizada diretamente.

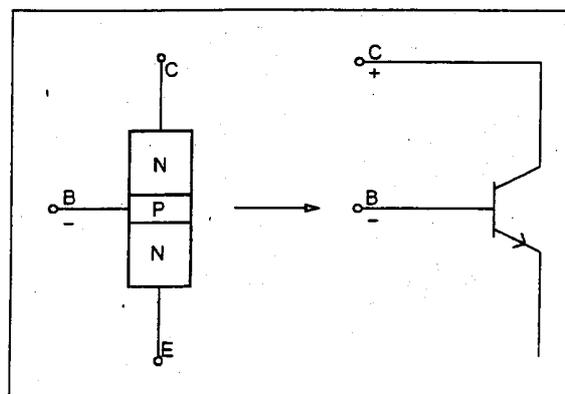
A condução da junção base-emissor é provocada pela aplicação de tensão e emissor com polaridade correta, ou seja, polaridade positiva no material no material N, para um transistor do tipo NPN.



6.7 Polarização na junção base-coletor

Na região ativa de funcionamento, a junção base-coletor é polarizada inversamente.

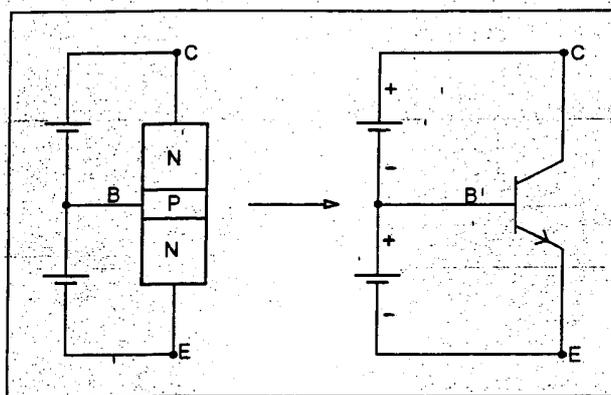
O bloqueio da junção base-coletor é provocado pela aplicação de tensão externa entre base e coletor, com polaridade adequada, ou seja, polaridade positiva no material N e, negativa no material P, para um transistor NPN.



6.8 Polarização simultânea das duas junções

Para que o transistor funcione corretamente, as duas junções devem ser polarizadas ao mesmo tempo.

Isso é feito aplicando-se duas tensões externas entre os terminais do transistor.

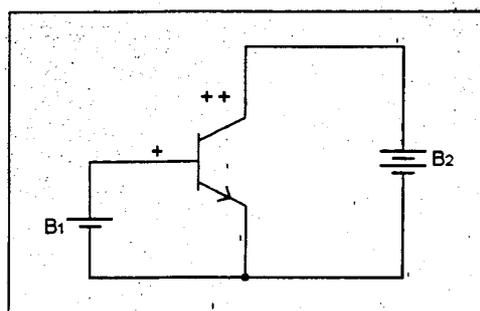


Observações

As baterias representam as tensões de polarização

Para que um transistor PNP funcione na região ativa, basta inverter as polaridades das fontes entre as junções.

Outra Configuração de baterias para a polarização correta das junções também pode ser usada:

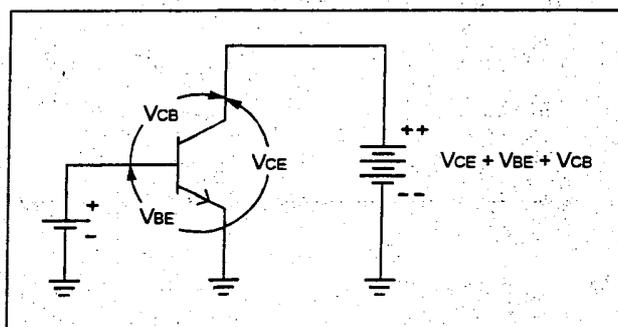


No diagrama:

- A bateria 81 polariza diretamente a junção base-emissor.
- A bateria 82 aplica uma tensão positiva ao coletor. Essa tensão é maior que a tensão positiva da base, de forma que a junção base-coletor fica polarizada inversamente.

A alimentação simultânea das duas junções, através das baterias externas, dá origem a três tensões entre os terminais do transistor:

- Tensão de base a emissor (V_{BE})
- Tensão de coletor à base (V_{CB})
- Tensão de coletor a emissor (V_{CE})



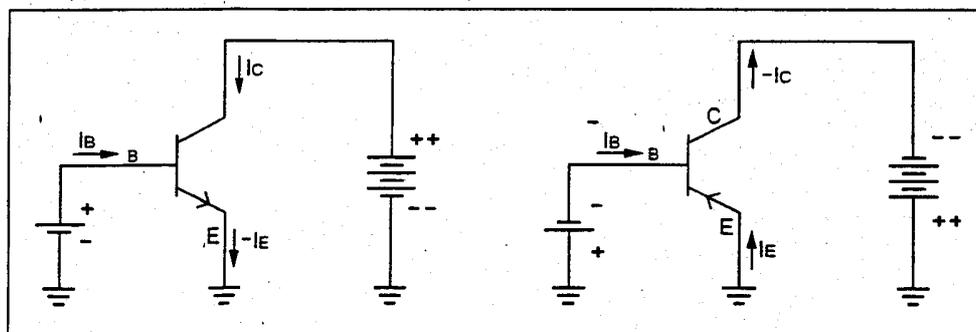
Observação

Para o transistor PNP, a regra também é válida com a diferença que a polaridade das baterias de polarização é invertida.

6.9 Princípio de funcionamento

O movimento dos portadores livres dá origem a três correntes que circulam nos três terminais do transistor:

- Corrente do terminal emissor, denominada de corrente de emissor (I_E);
- Corrente do terminal base, chamada de corrente de base (I_B);
- Corrente do terminal do coletor, chamada de corrente de coletor (I_C).



Observação

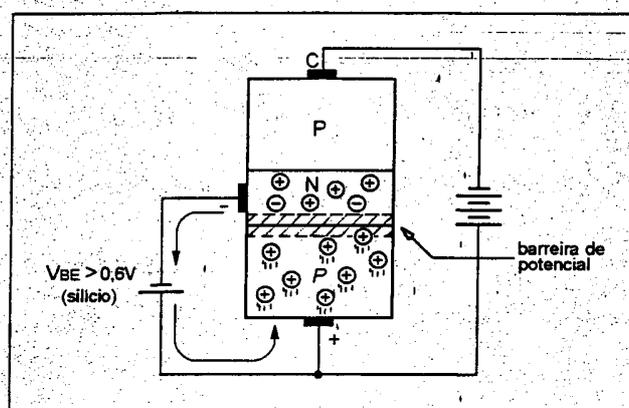
O princípio básico de funcionamento que explica a origem das correntes no transistor é o mesmo para os transistores NPN e PNP. Por isso, estudaremos o princípio de funcionamento de apenas um dos tipos. O comportamento do outro difere apenas na polaridade das baterias e no sentido das correntes.

6.10 Corrente de base

A corrente de base é provocada pela tensão aplicada entre a base e o emissor do transistor (V_{BE}).

Em um transistor PNP, por exemplo, o potencial positivo aplicado ao emissor repele as lacunas do material P em direção à base. Se a tensão tiver um valor adequado, ou seja, 0,7 V para o silício e 0,3 V para o germânio, as lacunas adquirem velocidade suficiente para atravessar a barreira de potencial formada na junção base-emissor, recombinando-se com os elétrons livres da base.

Essa recombinação dá origem à corrente de base.



Devido à pequena espessura da base e também ao seu pequeno grau de dopagem, a combinação acontece em pequena escala, ou seja, poucos portadores que provêm do emissor podem se combinar. Isso faz com que a corrente de base seja pequena, com valores que se situam na faixa de microamperes ou miliamperes.

Como o emissor é fortemente dopado, um grande número de lacunas se desloca em direção à base, repelidas pela tensão positiva do emissor e atraídas pela tensão negativa da base.

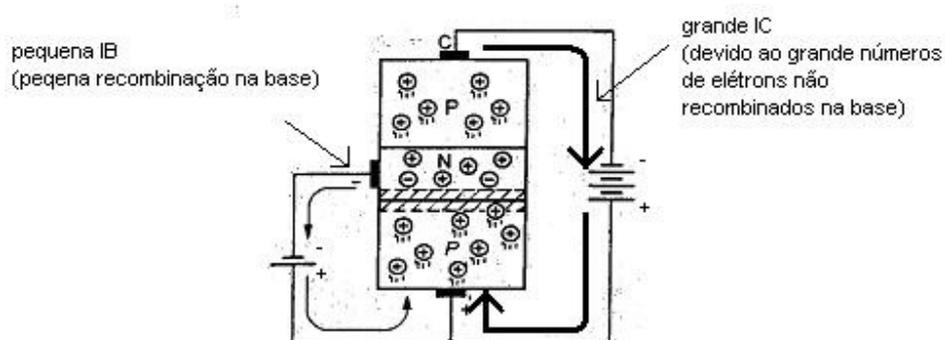
A base, porém, tem potencial negativo pequeno, não tendo assim elétrons livres suficientes para recombinar com a maior parte das lacunas que provêm do emissor.

Assim um grande número de lacunas atinge a base em grande velocidade e não se recombina por falta de elétrons livres disponíveis.

6.11 Corrente de coletor

As lacunas provenientes do emissor que não se recombinam, atingem a junção base-coletor e passam ao coletor onde existe um alto potencial positivo.

As lacunas que atingem o coletor dão origem a corrente de coletor.



Em geral, do total de lacunas que entra no emissor de um transistor, a grande maioria corresponde à corrente de coletor. Tanto a corrente de base como a corrente de coletor provêm do emissor, de forma que se pode afirmar que:

$$I_C + I_B = I_E$$

6.12 Controle da corrente de base sobre a corrente do coletor

A principal característica do transistor reside no fato de que a corrente de base (pequena) exerce um controle eficiente sobre a corrente de coletor. Esse controle é devido à influência da corrente de base sobre a largura da barreira de potencial da junção base-emissor, ou seja, quando V_{BE} aumenta, a barreira de potencial torna-se mais estreita.

Esse estreitamento permite que um maior número de portadores do emissor atinja a base. Esses portadores são absorvidos pelo coletor, uma vez que a base não tem capacidade para recombiná-los. Verifica-se então um aumento na corrente de coletor.

Assim, se I_B aumenta, I_C aumenta e se I_B diminui, I_C diminui.

6.13 Ganho de corrente do transistor

Através de um transistor, é possível utilizar uma pequena corrente I_B para controlar a circulação de uma corrente de valor muito maior (I_C).

A corrente controlada (I_C) e a corrente-de controle (I_B) podem ser relacionadas entre si para determinar quantas vezes uma é maior que outra. ;

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

O resultado dessa relação é denominado tecnicamente de ganho de corrente de base para coletor, representado pela letra grega β (beta) para corrente contínua ou h_{fe} para corrente alternada. O ganho indica quantas vezes a corrente de coletor é maior que a corrente de base.

Conhecendo-se o ganho de corrente entre base e coletor β , é possível determinar a corrente de coletor a partir da corrente de base, ou seja: $I_C = \beta \cdot I_B$

Observação

O fato do transistor permitir um ganho de corrente entre base e coletor não significa que correntes sejam geradas em seu interior. As correntes que circulam no interior do componente são provenientes das fontes de alimentação e o transistor apenas controla sua quantidade.

O outro ganho a ser considerado é o de emissor para coletor (α , lê-se alfa):

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

Como a corrente I_E é maior que I_C , conclui-se que α é sempre menor que 1.

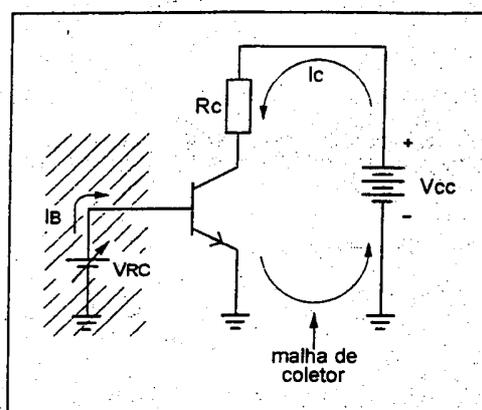
Os ganhos β e α estão relacionados entre si através das fórmulas:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

6.14 Circuito do coletor

Na grande maioria dos circuitos transistorizados, o coletor do transistor é conectado à fonte de alimentação através de um resistor denominado de resistor de coletor (R_C) o resistor de coletor

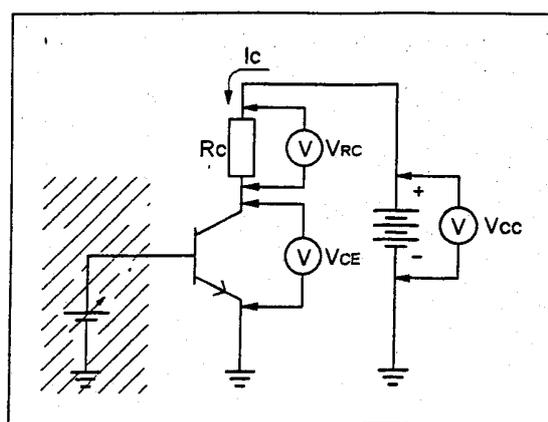
completa o circuito ou malha de coletor, composto pelos componentes por onde circula a corrente do coletor conforme circuito que segue:



A malha de coletor se compõe de resistor de coletor R_c em série com o transistor (coletor-emissor) aos quais é aplicada a tensão V_{cc} . Sendo um circuito série, a malha de coletor obedece à segunda lei de Kirchhoff, que estabelece: a soma das quedas de tensão em um circuito é igual à tensão aplicada aos seus extremos.

Na malha de coletor, a tensão V_{cc} fornecida pela bateria se distribui em duas parcelas:

- Tensão sobre o resistor de coletor, denominada de queda de tensão no resistor de coletor (V_{Rc});
- E tensão entre coletor e emissor (V_{CE}).



Aplicando a Lei de Kirchhoff, a soma das quedas de tensão nos componentes da malha de coletor será igual à tensão aplicada à malha. A partir disso pode-se determinar a equação da malha de coletor, ou seja: $V_{cc} = V_{CE} + V_{Rc}$

Nessa igualdade, V_{cc} é a tensão fornecida pela bateria ao circuito, desconsiderando-se a influência da resistência interna, pode-se admitir que V_{cc} tem um valor constante, independente da corrente que o circuito solicitar.

VRC é a queda de tensão no resistor de coletor, O valor es a que a e ensão, segundo a Lei de Ohm, depende de dois fatores: do valor do resistor R_c e da corrente que está circulando (I_c), ou seja, $VRC=RC.IC$

A queda de tensão no resistor de coletor (VRC) tem como principal característica o fato de ser proporcional à corrente de coletor do transistor.

Se a corrente de coletor se torna maior (I_c), a queda de tensão sobre o resistor de coletor aumenta, pois $RC.IC=VRC$

VCE é a tensão coletor-emissor e depende da tensão de alimentação e da queda de tensão em RC, ou seja, como $V_{cc} = VCE + VRc$, $VCE=V_{cc}-VRc$

Exemplo

Um transistor com resistor de coletor de 680Ω tem uma corrente de coletor de 6mA. A bateria fornece uma tensão de 12V à malhada coletor. Qual é a queda de tensão no resistor de coletor e a tensão de coletor-emissor no transistor?

Queda de tensão no resistor de coletor:

- $VRc = R_c \cdot I_c$

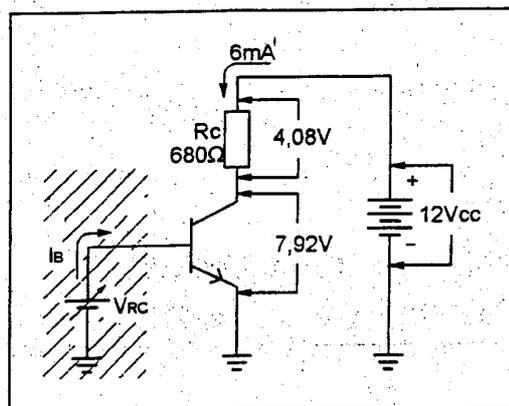
- $VRc = 680 \cdot 0,006 = 4,08V$

Tensão de coletor-emissor do transistor:

- $VCE = V_{cc} - VRc$

- $VCE = 12 - 4,08 = 7,92V$

A figura a seguir mostra a malha de coletor com os valores de tensão em cada elemento.



6.15 Relação entre parâmetros

Ao considerar que a queda de tensão V_{Rc} depende de I_c , afirma-se que V_{Rc} também depende de I_B . Desenvolvendo a equação da queda de tensão no resistor de coletor, tem-se:

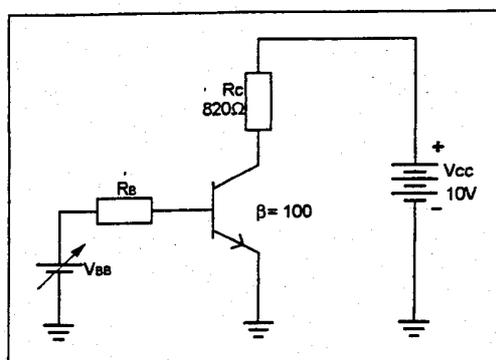
$$V_{Rc} = R_c \cdot I_c$$

Como $I_c = I_B \cdot \beta$, temos:

$$V_{Rc} = R_c \cdot (I_B \cdot \beta)$$

Nessa equação, os valores de R_c e β são constantes. Logo, pode-se dizer que o valor da queda de tensão no resistor depende diretamente da corrente de base.

Tomando-se um circuito a transistor com duas correntes de base diferentes, é possível, verificar a relação entre os valores de I_B , I_c , V_{Rc} e V_{CE} . Veja exemplo abaixo.



Observação

O resistor R_B na base do transistor serve para limitar a corrente de base do transistor.

Admitindo-se como primeiro valor de corrente de base $40\mu A$, os valores do circuito são:

$$-I_C = I_B \cdot \beta = 40 \cdot 100 = 4000\mu A \text{ ou } 0,004A$$

$$-V_{RC} = I_C \cdot R_C = 0,004 \cdot 820 = 3,28V$$

$$-V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} = 10 - 3,28 = 6,72$$

Admitindo-se um valor de corrente de base de $70\mu A$, os valores do circuito são:

$$I_C = 70 \cdot 100 = 7000\mu A \text{ ou } 0,007$$

$$V_{RC} = 0,007 \cdot 820 = 5,7V$$

$$V_{CE} = 10 - 5,74 = 4,26V$$

Colocando os dados do circuito das duas situações em uma tabela, é possível observar o comportamento dos valores de I_C , V_{RC} e V_{CE} quando a corrente de base é modificada.

Corrente de base (I_B)	Corrente de coletor (I_C)	Queda de tensão no resistor de coletor (V_{RC})	Tensão coletor emissor do transistor (V_{CE})
$40\mu A$	4 mA	3,28V	6,72V
$70\mu A$	7 mA	5,74V	4,26V

Relacionando apenas os dados relativos ao transistor, o comportamento do circuito pode ser assim resumido:

$$- I_B \uparrow \quad I_C \uparrow \quad V_{CE} \downarrow$$

$$- I_B \downarrow \quad I_C \downarrow \quad V_{CE} \uparrow$$

Considerando que a corrente de base I_B depende da tensão V_{BE} , pode-se incluir mais esse parâmetro no comportamento do transistor:

$$- V_{BE} \uparrow \quad I_B \uparrow$$

$$- V_{BE} \downarrow \quad I_B \downarrow$$

A relação entre os parâmetros do transistor é então:

$$- V_{BE} \uparrow \quad I_B \uparrow \quad I_C \uparrow \quad V_{CE} \downarrow$$

$$- V_{BE} \downarrow \quad I_B \downarrow \quad I_C \downarrow \quad V_{CE} \uparrow$$

6.16 Dissipação de potência no transistor

Todo o componente sujeito a uma diferença de potencial e percorrido por uma corrente elétrica dissipa uma âeterminada potência ($P = V \cdot I$). Isso acontece também no transistor. A circulação de corrente elétrica através das junções do transistor, provocada pela aplicação de tensões aos seus terminais, dá origem a uma dissipação de potência no interior do componente. Essa dissipação se dá em forma de energia térmica, o que resulta em um aquecimento do transistor.

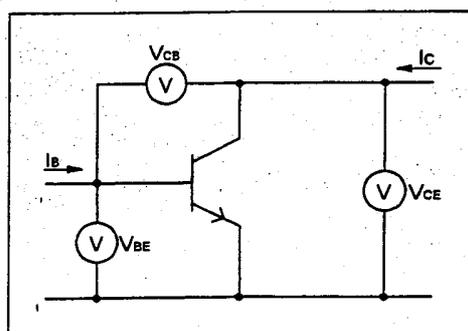
6.17 Dissipação nas Junções

A dissipação de potência ocorre nas duas junções do transistor. Essas potências dissipadas são denominadas de potência de coletor (P_c) e potência de base (P_B).

A potência total dissipada no transistor é então:

$$P_{\text{tot}} = P_C + P_B$$

Entretanto, analisando as tensões e correntes presentes nas duas junções, verifica-se que a tensão e a corrente presentes na junção base-emissor (V_{BE} e I_B) são muito pequenas, quando comparadas com a tensão e a corrente presentes na junção coletor-base (V_{CB} e I_c).



Por isso, a potência dissipada na junção base-emissor é muito pequena comparada com a potência dissipada na junção base-coletor. Assim, a potência dissipada na base do transistor é desprezada e considera-se que a potência total dissipada no transistor é a própria potência dissipada no coletor, ou seja,

$$P_{\text{tot}} = P_c$$

A potência dissipada no coletor depende da tensão de coletor à base

(V_{CB}) e da corrente de coletor (I_c):

$$P_C = V_{CB} \cdot I_C$$

Por questões de praticidade e com o objetivo de resolver circuitos transistorizados através das curvas características, essa equação é substituída por outra aproximada, cujo erro é desprezível:

$$P_C \approx V_{CE} \cdot I_C$$

6.18 Dissipação máxima de potência no transistor

O calor produzido pela dissipação de potência ($P_C = V_{CE} \cdot I_C$) provoca a elevação da temperatura dos cristais semicondutores, o que pode danificar o componente.

Para que isso não aconteça, a potência dissipada é limitada a um valor que permite o funcionamento normal do transistor. Esse valor é chamado de potência de dissipação máxima ($P_{Cmáx}$) e é fornecido pelos manuais dos fabricantes {"data books"} ou fichas técnicas.

O limite de dissipação de potência é estabelecido em função de dois fatores:

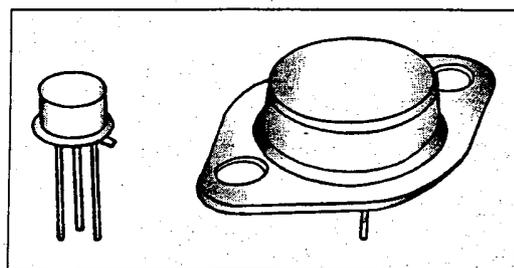
- A resistência térmica do encapsulamento;
- A temperatura externa ao transistor.

6.19 Resistência térmica

Consiste na oposição apresentada por um material à passagem do fluxo de calor.

Quando se fala em transistor, a resistência térmica do encapsulamento, representada pela notação (R_{thja}), diz respeito à oposição (imposta pelo encapsulamento) à transmissão do calor gerado internamente para o meio ambiente.

Os transistores fabricados para capacidades de dissipação mais elevadas (denominados de transistores de potência) são normalmente encapsulados em invólucros metálicos



Esse tipo de encapsulamento se caracteriza por apresentar uma baixa resistência térmica, transmitindo com mais eficiência o calor para o meio ambiente.

Os transistores de baixa dissipação (denominados de transistores de Sinal) são encapsulados normalmente em invólucros de plástico. Esse material é usado por que a quantidade de calor gerado por esses transistores é pequena.

6.20 Temperatura externa ao transistor

Para que haja transmissão de calor entre dois pontos, é necessário que haja diferença de temperatura entre eles.

A quantidade de calor transmitido é maior quando a diferença de temperatura é grande entre os dois pontos e menor quando essa diferença é pequena. Assim, a quantidade de calor transmitido da junção do transistor para o ambiente depende da diferença de temperatura entre a junção e o ambiente.

Quanto mais baixa a temperatura do ambiente, maior a transmissão de calor do interior do transistor para fora e menor o seu aquecimento. Assim, dois transistores trabalhando com as mesmas tensões e correntes e, portanto, com mesma potência dissipada, sofrerão aquecimentos diferentes se estiverem funcionando em temperaturas diferentes. O transistor que estiver funcionando em um ambiente mais quente sofrerá maior aquecimento, porque a quantidade de calor transmitido para o ambiente é menor.

Por causa disso, a especificação de potência máxima de dissipação do transistor é dada em função da temperatura. Por exemplo: Transistor BC547 apresenta potência de dissipação máxima de 500mW a 25°C ou menos.

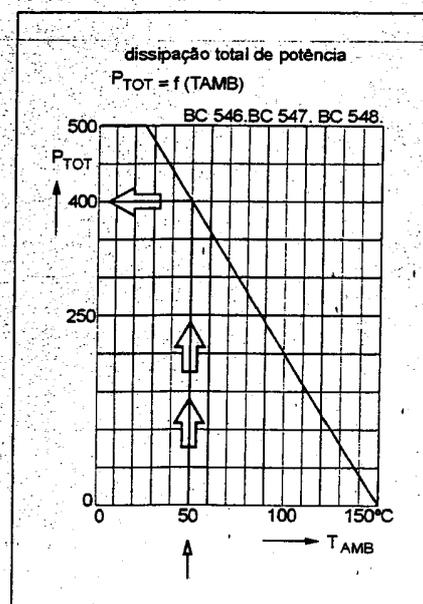
Observação

As potências de dissipação máxima fornecidas pelos fabricantes sempre são referentes à temperatura de 25°C, a menos que haja outra especificação de temperatura.

6.21 Redução da potência dissipada

Em muitos casos, torna-se necessário usar transistores em circuitos que funcionarão em temperaturas superiores a 25°C. Nesse caso é necessário considerar que o valor máximo de potência de dissipação, fornecido pelo fabricante, não pode ser empregado porque é válido somente até 25°C.

É possível compensar o aumento a temperatura ambiente, fazendo o transistor dissipar menos potência. O grau de redução da potência nominal varia de transistor para transistor e é um dado fornecido pelo fabricante na forma de um gráfico ($P_{TOT} \cdot T_{AMB}$).



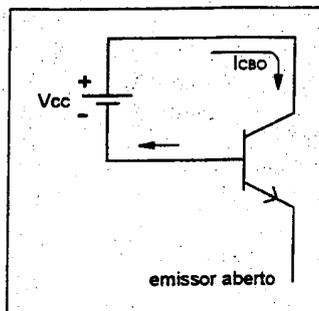
Este gráfico indica a potência máxima no transistor para os diversos valores de temperatura ambiente. Veja na ilustração a seguir o emprego do gráfico determinando a potência de dissipação máxima dos transistores BC546, BC547 e BC548 para uma temperatura ambiente de 50°C.

6.22 Correntes de fuga no transistor

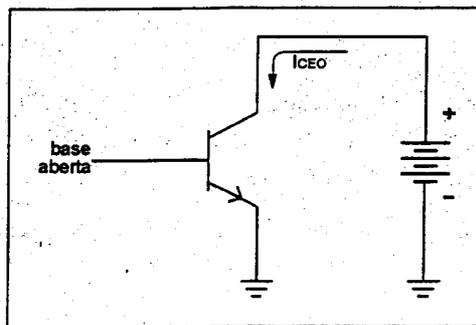
O movimento dos portadores minoritários (elétrons no PNP e lacunas no NPN) na junção inversamente polarizada do transistor origina uma pequena corrente de fuga que varia diretamente com a temperatura.

Nas figuras a seguir está ilustrada a representação dessas correntes em um transistor NPN. O raciocínio análogo se aplica ao transistor PNP, bastando inverter as polaridades da fonte de tensão CC e o sentido de percurso da corrente elétrica.

I_{CBO} ou I_{co} é a corrente do coletor para a base, com o emissor em aberto

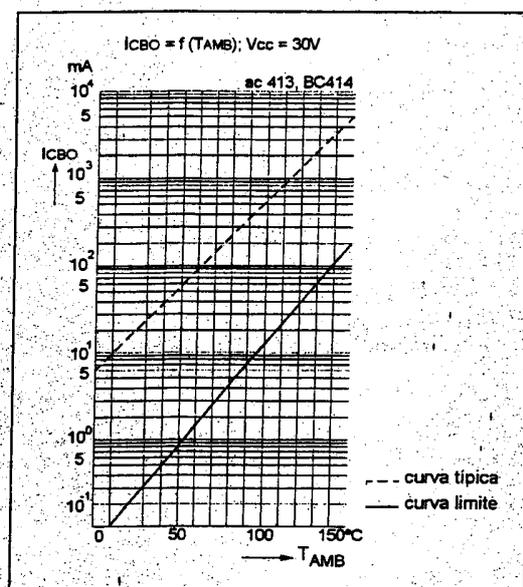


I_{CEO} é a corrente do coletor para o emissor com a base em aberto:



IEBO é a corrente do emissor para a base, com o coletor em

aberto:



Observação

A terceira condição, corrente do emissor para a base, com o coletor em aberto Não é muito utilizado na prática.

6.23 Disparo térmico

O disparo térmico (ou avalanche térmica) é um fenômeno que ocorre no transistor devido à corrente de fuga I_{cBo} . Isso pode levar o transistor à destruição por aquecimento excessivo.

A dissipação de potência em um transistor ($P_c = V_{CE} \cdot I_c$) provoca o aquecimento das junções (BE e Bc) que, por sua vez, provoca o aumento de I_{cBo} .

Como essa corrente é uma das parcelas de I_c , o aumento de I_{cBo} provoca um aumento em I_c , aumentando a potência dissipada, causando novo aquecimento das junções. Isso ocorre até que o transistor finalmente seja danificado.

A corrente de fuga I_{cBo} dobra a cada 10°C , aproximadamente, nos transistores de silício (Si) e 6°C nos de germânio (Ge). Porém, na mesma temperatura, o transistor de silício apresenta I_{cBo} até 500 vezes menor que o de germânio. Por essa razão, os transistores de silício são muito mais usados que os de germânio.