

Sumário

Introdução	5
Princípio de operação	6
Operação do transistor na região ativa	6
Junção base-emissor	8
Junção base-coletor	9
Polarização simultânea das duas junções	10
Princípio de funcionamento do transistor bipolar	13
Corrente de base	14
Corrente de coletor	16
Corrente de emissor	17
Controle de corrente no transistor	18
Ganho de corrente do transistor	19
Apêndice	21
Questionário	21
Bibliografia	21



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O transistor desempenha um papel fundamental na eletrônica. A partir da sua descoberta o desenvolvimento da eletrônica tem se tornado cada vez mais rápido. Hoje, na era dos computadores, o transistor ainda tem lugar de destaque e suas aplicações se estendem a milhares de circuitos com as mais diversas finalidades.

Este fascículo tratará do princípio de funcionamento do transistor bipolar, fornecendo informações indispensáveis para que o leitor esteja capacitado a montar e reparar circuitos transistorizados.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semiconductor.
- Transistor bipolar: estrutura básica e testes.

Princípio de operação

Para que os portadores se movimentem no interior da estrutura de um transistor é necessário aplicar tensões entre os seus terminais. O movimento dos elétrons livres e lacunas está intimamente relacionado à polaridade da tensão aplicada a cada par de terminais do transistor, como descrito a seguir.

OPERAÇÃO DO TRANSISTOR NA REGIÃO ATIVA

A estrutura física do transistor propicia a formação de duas junções pn , conforme ilustrado na **Fig.1**:

- Uma junção pn entre o cristal da base e o cristal do emissor, chamada de **junção base-emissor**.
- Uma junção pn entre o cristal da base e o cristal do coletor, chamada de **junção base-coletor**.

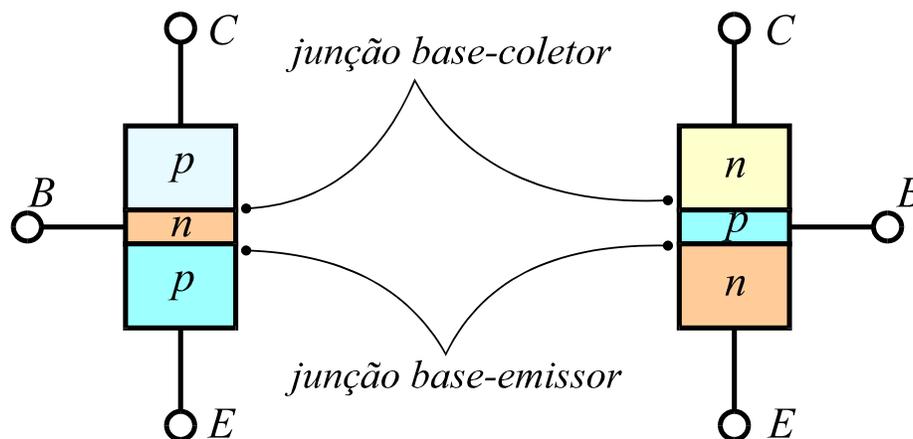


Fig.1 Junções base-coletor e base-emissor em um transistor.

A formação das duas junções no transistor faz que ocorra um processo de difusão dos portadores. Como no caso do diodo, esse processo de difusão dá origem a uma barreira de potencial em cada junção.

No transistor, portanto, existem duas barreiras de potencial, mostradas na **Fig.2**, que se formam a partir da junção dos cristais semicondutores:

- A barreira de potencial na junção base-emissor.
- A barreira de potencial na junção base-coletor.

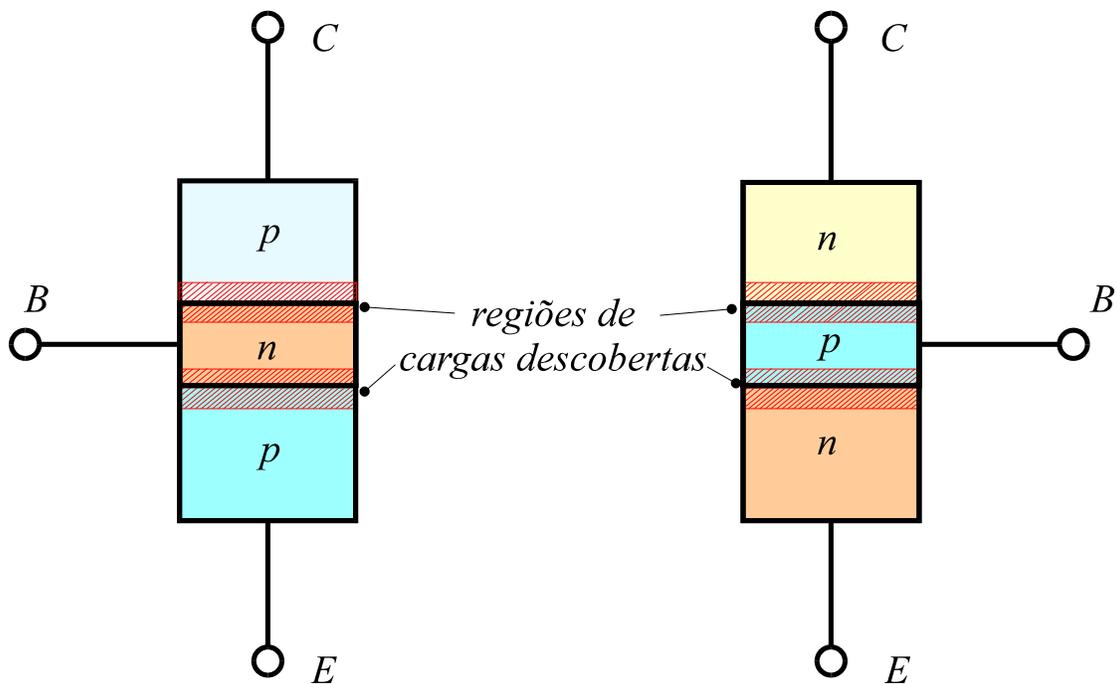


Fig.2 Barreiras de potencial formadas nas duas junções de um transistor.

As características normais de polarização dos terminais do transistor são sumarizadas a seguir.

JUNÇÃO BASE-EMISSOR

Na condição normal de funcionamento, denominada de **funcionamento na região ativa**, a junção base-emissor fica polarizada diretamente, conforme ilustrado na Fig.3.

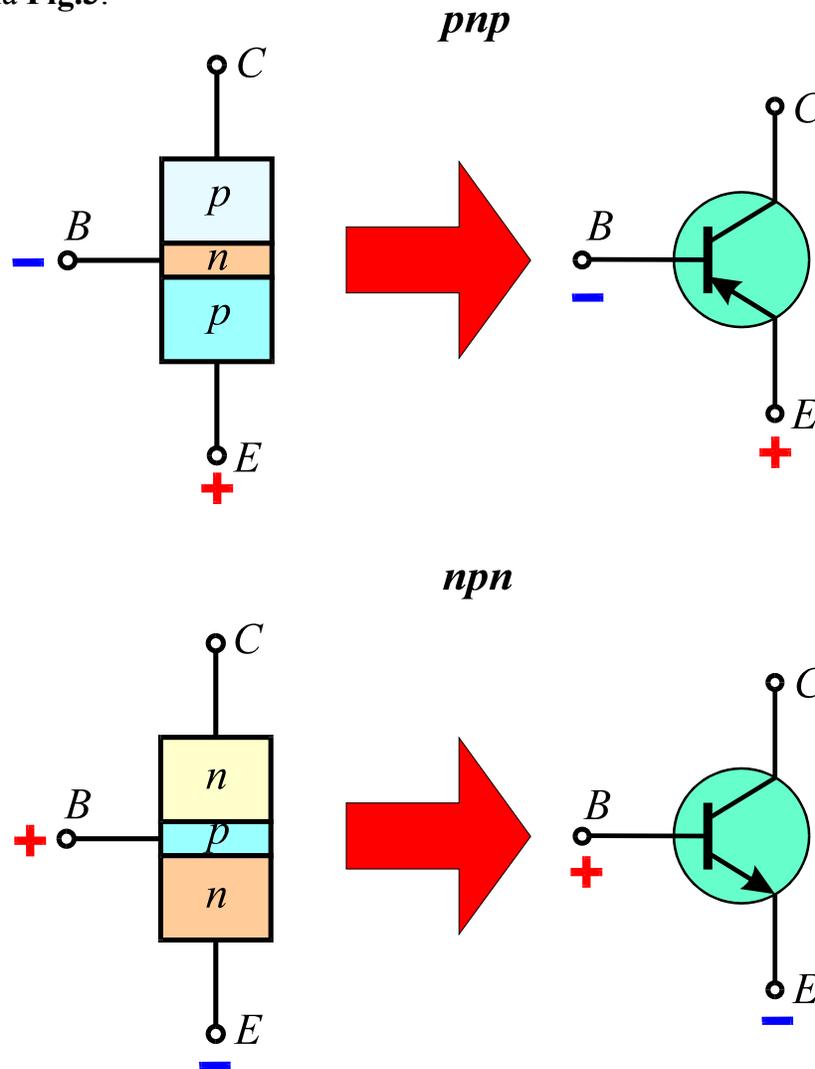


Fig.3 Polarização da junção base-emissor de transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa.

A condução através da junção base-emissor é provocada pela aplicação de uma tensão externa entre a base e o emissor, com polarização direta, ou seja, com o material tipo *p* tendo polarização positiva com relação ao material tipo *n*.



Na região ativa a junção base-emissor de um transistor fica diretamente polarizada.

JUNÇÃO BASE-COLETOR

Para operação na região ativa, a junção base-coletor fica polarizada inversamente, ou seja, com o material tipo p polarizado negativamente em relação ao material tipo n , conforme mostrado na **Fig.4**.



Na região ativa a junção base-coletor de um transistor fica inversamente polarizada.

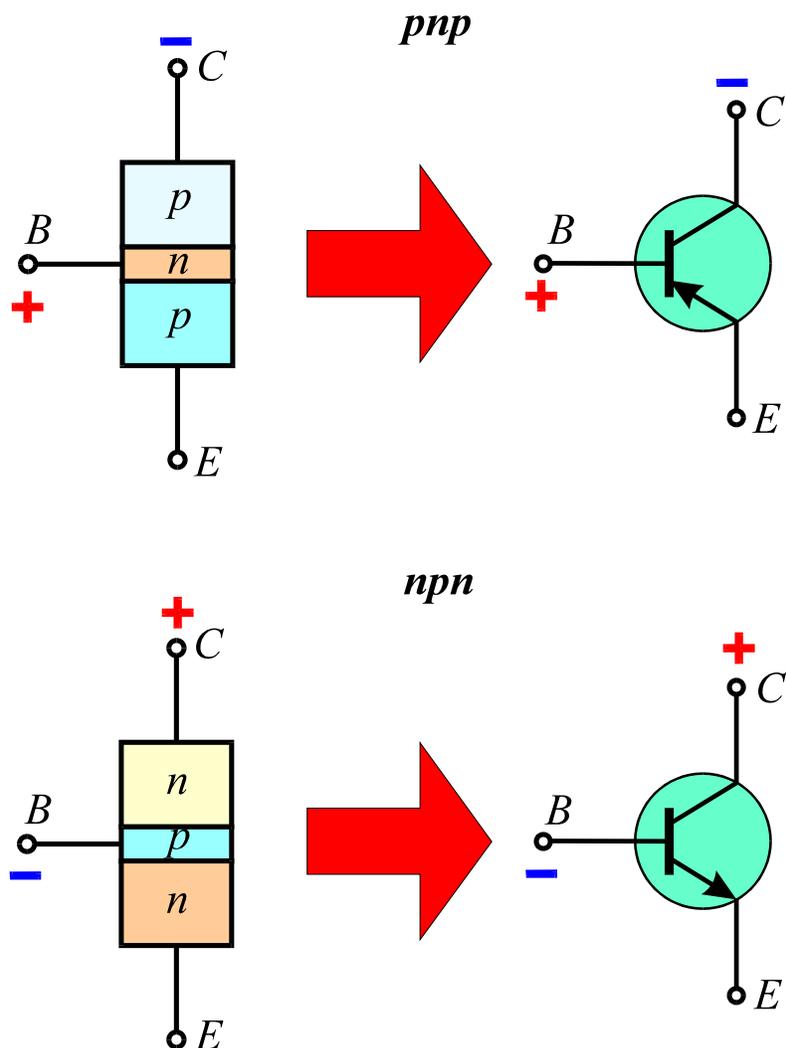


Fig.4 Polarização da junção base-coletor de transistores pnp e npn para operação na região ativa.

POLARIZAÇÃO SIMULTÂNEA DAS DUAS JUNÇÕES

Para que o transistor funcione adequadamente, as duas junções devem ser polarizadas simultaneamente. Isso é feito aplicando-se tensões externas nas duas junções do componente. A **Fig.5** mostra a forma de polarização de um transistor para operação na região ativa.

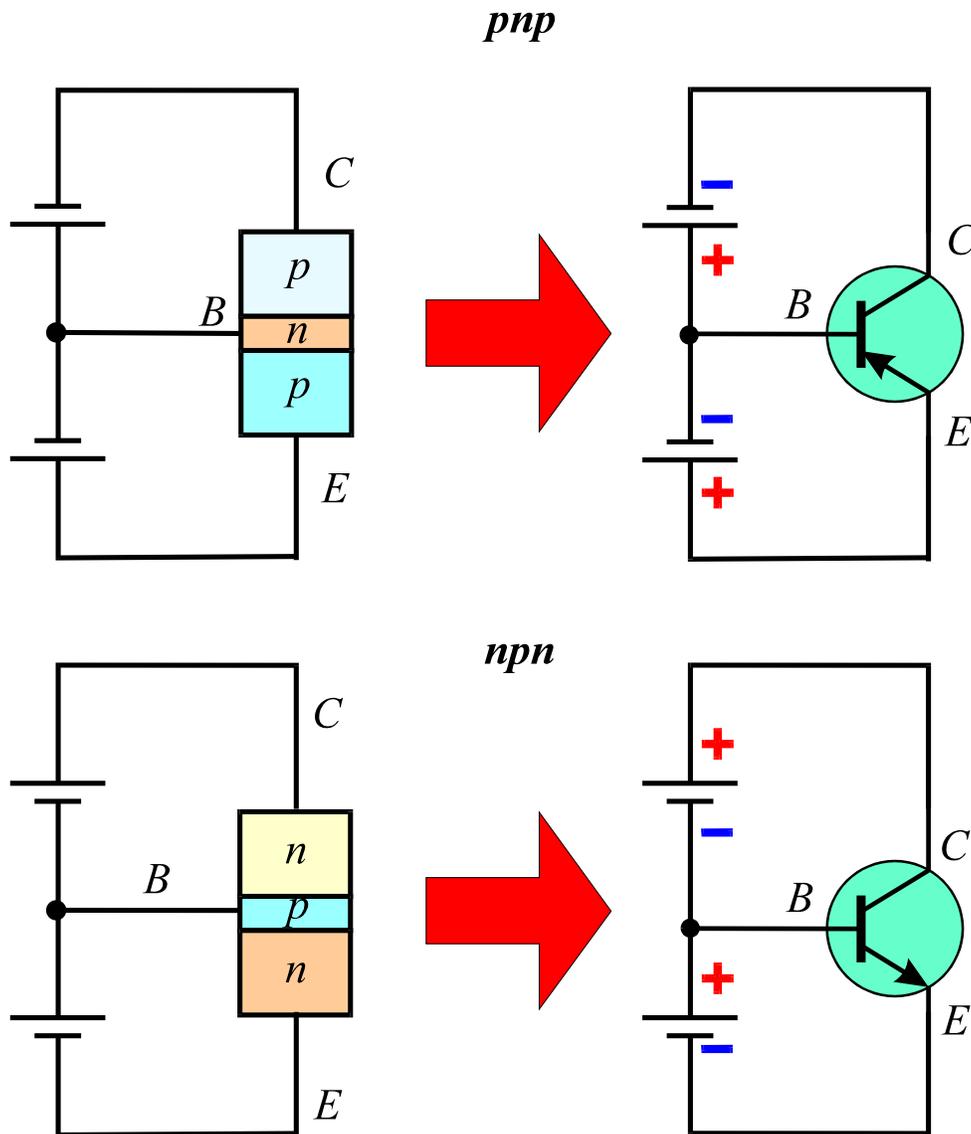


Fig.5 Polarizações dos transistores *npn* e *pnp* para operação na região ativa.

Uma forma alternativa de configuração, que permite obter a operação do transistor na região ativa é mostrada na **Fig.6**, para o caso de um transistor *npn*.

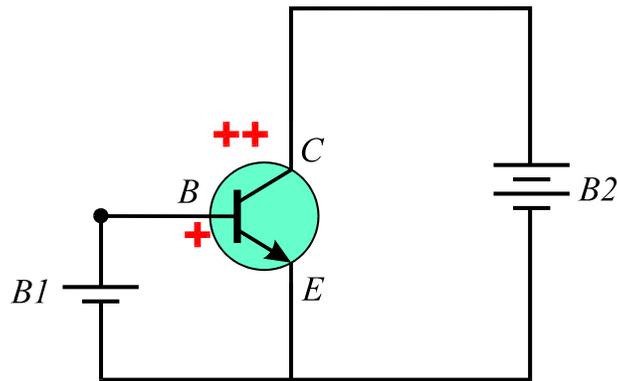


Fig.6 Configuração alternativa para operação de um transistor *npn* na região ativa.

Uma inspeção do diagrama de circuito mostrado na **Fig.6** permite extrair as seguintes observações:

- A bateria *B1* polariza diretamente a junção base-emissor.
- A bateria *B2* submete o coletor a um potencial mais elevado do que aquele aplicado à base.

Dessa forma, a junção base-coletor está submetida a uma polarização inversa, o que juntamente com a polarização direta aplicada à junção base-emissor, possibilita operação na região ativa do transistor. Conclui-se portanto que os dois esquemas mostrados na **Fig.7** produzem polarizações equivalentes nas junções do transistor.

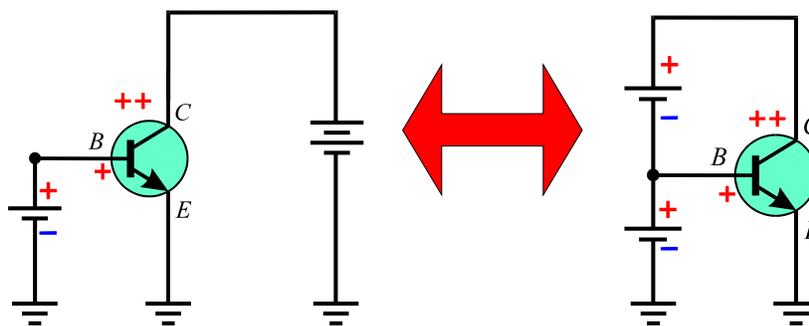


Fig.7 Diagramas de circuito que permitem a operação de um transistor *npn* na região ativa.

Em resumo, para operação de um transistor na região ativa, tem-se:

- Polarização direta da junção base-emissor.
- Polarização inversa da junção base-coletor.

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

- Tensão base-emissor, representada pelo parâmetro V_{BE} .
- Tensão coletor-base, representada pelo parâmetro V_{CB} .
- Tensão coletor-emissor, representada pelo parâmetro V_{CE} .

Esses parâmetros estão representados na **Fig.8** para os transistores *pn*p e *np*n. Como pode ser aí observado, as tensões entre os terminais são definidas matematicamente pelas relações

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (1)$$

$$V_{CB} = V_C - V_B \quad (2)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (3)$$

onde V_B , V_C e V_E são os potenciais elétricos na base, coletor e emissor, respectivamente.

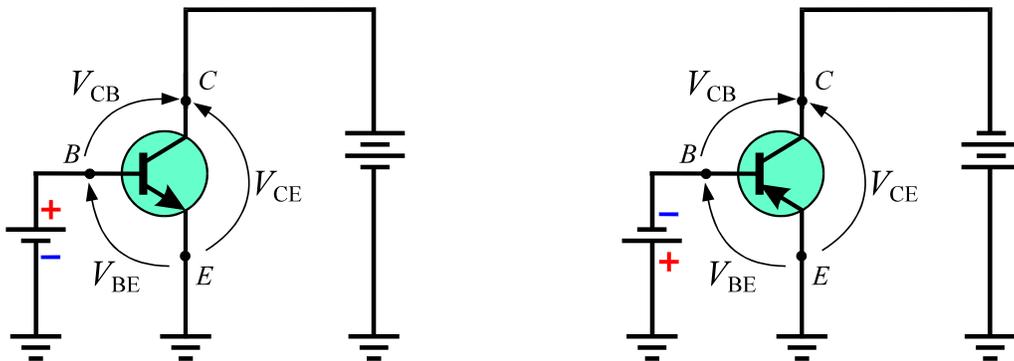


Fig.8 Tensões nas junções dos transistores *pn*p e *np*n.

Com base na **Fig.8**, ou alternativamente, somando as **Eqs.(1)** e **(2)** e comparando com a **Eq.(3)**, tem-se que as tensões entre terminais satisfazem a condição

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \quad (4)$$

Na **Fig.8** as baterias externas estão polarizadas de forma a permitir a operação do diodo na região ativa. Nessas condições, as tensões definidas nas Eqs.(1) a (3) devem assumir os sinais indicados na **Tabela 1**.

Tabela 1 Sinais das tensões entre terminais para os transistores *pn*p e *np*n.

Tensão	Transistor <i>pn</i> p	Transistor <i>np</i> n
V_{BE}	negativa	positiva
V_{CB}	negativa	positiva
V_{CE}	negativa	positiva

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR BIPOLAR

A aplicação de tensões externas ao transistor provoca o movimento de elétrons livres e lacunas no interior da estrutura cristalina, dando origem às correntes nos terminais do transistor. Utiliza-se como representação de circuito para essas correntes aquela indicada na **Fig.9**.

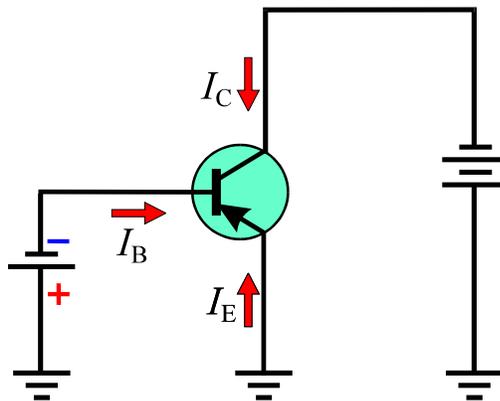


Fig.9 Representação de circuito das correntes nos terminais de um transistor.

As correntes definidas na **Fig.9**, recebem as seguintes denominações:

- I_B = corrente de base.
- I_C = corrente de coletor.
- I_E = corrente de emissor.

O sentido das correntes representadas na **Fig.9** segue uma convenção que estabelece:

 **Correntes positivas são aquelas que fluem do circuito externo para os terminais do transistor.**

De acordo com essa convenção as correntes nos terminais do transistor satisfazem a relação

$$I_B + I_C + I_E = 0 \quad (5)$$

Seguindo a convenção adotada, para transistores *npn* e *pnp* operando na região ativa, os sinais das três correntes definidas anteriormente são aqueles indicados na **Tabela 2**, conforme ilustrado na **Fig.10**.

Tabela 2 Sinais das correntes nos terminais dos transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa.

Corrente	Transistor <i>pnp</i>	Transistor <i>npn</i>
I_B	negativa	positiva
I_C	negativa	positiva
I_E	positiva	negativa

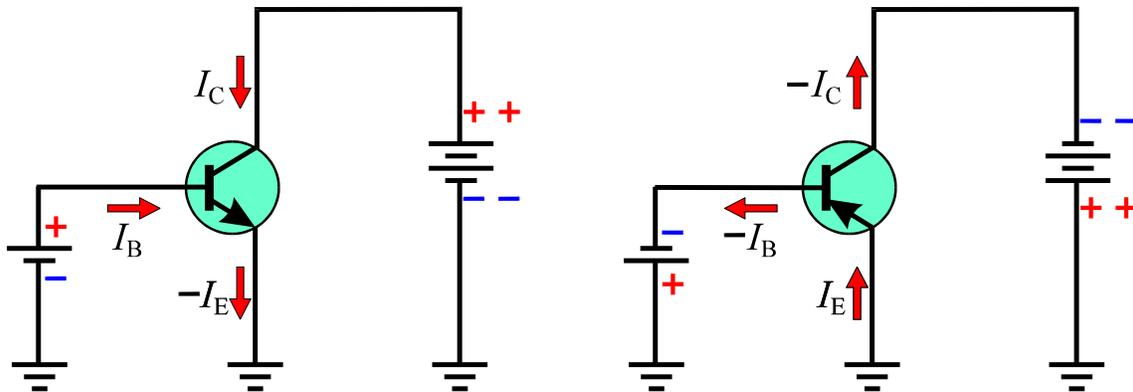


Fig.10 Sentido real das correntes nos transistores *npn* e *pnp* para operação na região ativa.

O princípio básico que explica a origem das correntes no transistor é o mesmo para estruturas *npn* e *pnp*, e a análise do movimento de portadores de carga pode ser realizada tomando-se como exemplo qualquer das duas estruturas. Isso é feito a seguir para a análise das correntes em um transistor *pnp* posto em operação na região ativa.

CORRENTE DE BASE

A corrente de base é produzida pela aplicação de uma tensão que polariza diretamente a junção base-emissor e cujo efeito é semelhante àquele observado em um diodo semiconductor polarizado diretamente.

Como ilustrado na **Fig.11**, a aplicação de uma tensão positiva

$$V_{EB} = V_E - V_B$$

com um valor superior ao potencial de barreira da junção base-emissor, facilita a injeção de lacunas do emissor para a base e de elétrons livres no sentido inverso. Como no caso de uma junção semicondutora comum, o potencial de barreira é tipicamente 0,6 a 0,7 V para o silício e 0,2 a 0,3V para o germânio.

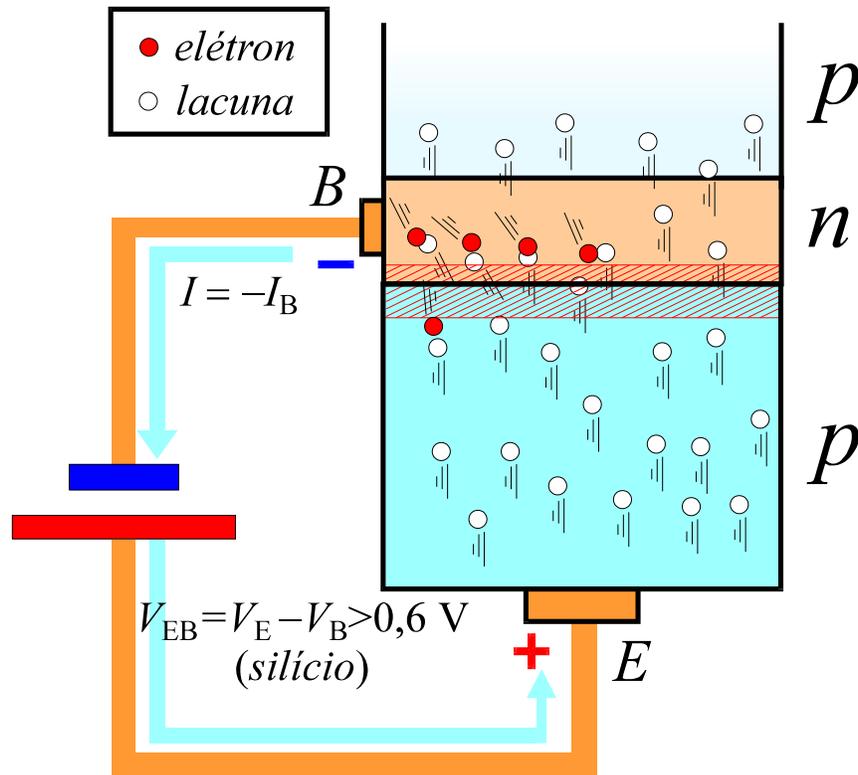


Fig.11 Movimento de portadores nas proximidades da junção base-emissor quando esta é polarizada diretamente.

Transistores são construídos com o emissor tendo um grau de dopagem muito superior àquele da base. Dessa forma o fluxo de portadores ocorre predominantemente por parte das lacunas injetadas na base.

A pequena quantidade de elétrons disponíveis na base se recombina com parte das lacunas aí injetadas, dando origem à corrente de base. Com o pequeno grau de dopagem da base, poucas recombinações ocorrem, resultando em um pequeno valor para a corrente de base, normalmente na faixa de microampères a miliampères.

Assim, a maior parte das lacunas provenientes do emissor não se recombina com os elétrons da base, podendo portanto atingir a junção base-coletor.

 Em um transistor *pnp* corrente de base é provocada pela aplicação de uma tensão $V_{EB} > 0$ ligeiramente superior ao potencial de barreira da junção base-emissor. Essa corrente é muito pequena devido ao pequeno grau de dopagem da base.

CORRENTE DE COLETOR

Devido à pequena espessura da região da base e também ao seu pequeno grau de dopagem, o excesso de lacunas que não se recombinaram com os elétrons naquela região atingem a junção base-coletor, conforme ilustrado na Fig.12. Como a junção base-coletor está inversamente polarizada, essas lacunas são aceleradas pela queda de potencial existente naquela junção, dando origem à corrente de coletor.

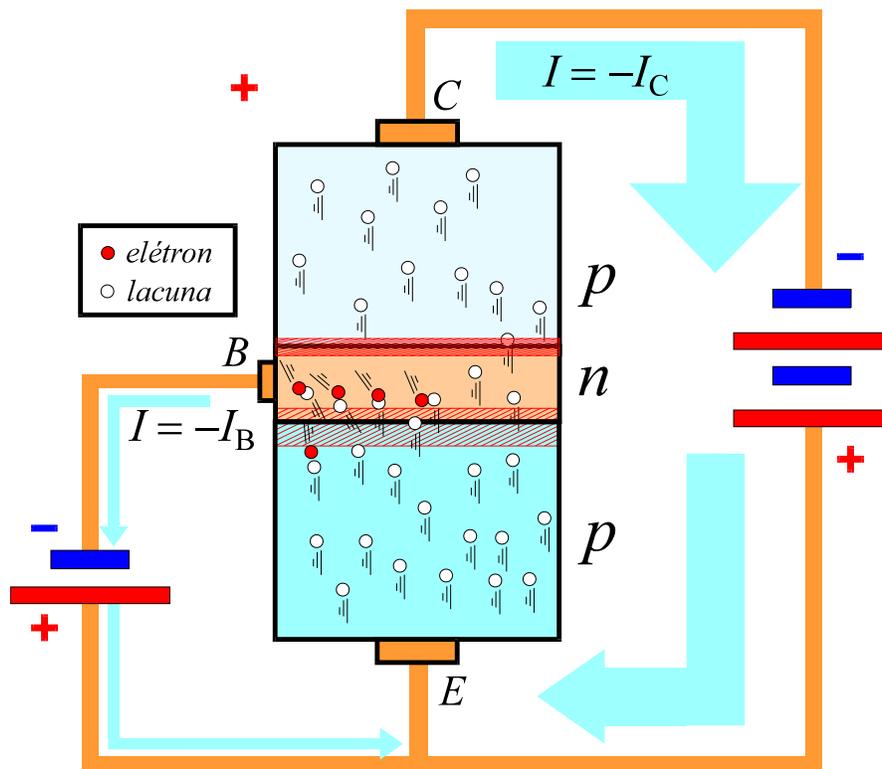


Fig.12 Movimento de portadores e correntes resultantes nos terminais de um transistor *pnp*.

A corrente de coletor tem um valor muito superior à corrente de base porque a grande maioria das lacunas provenientes do emissor não se recombinam com os elétrons da base, sendo portanto injetadas diretamente no coletor.

Tipicamente, um máximo de 5% do total de lacunas provenientes do emissor produz a corrente de base, com o restante dando origem à corrente de coletor. Essa grande diferença entre as correntes de base e de coletor está ilustrada na **Fig.13**.

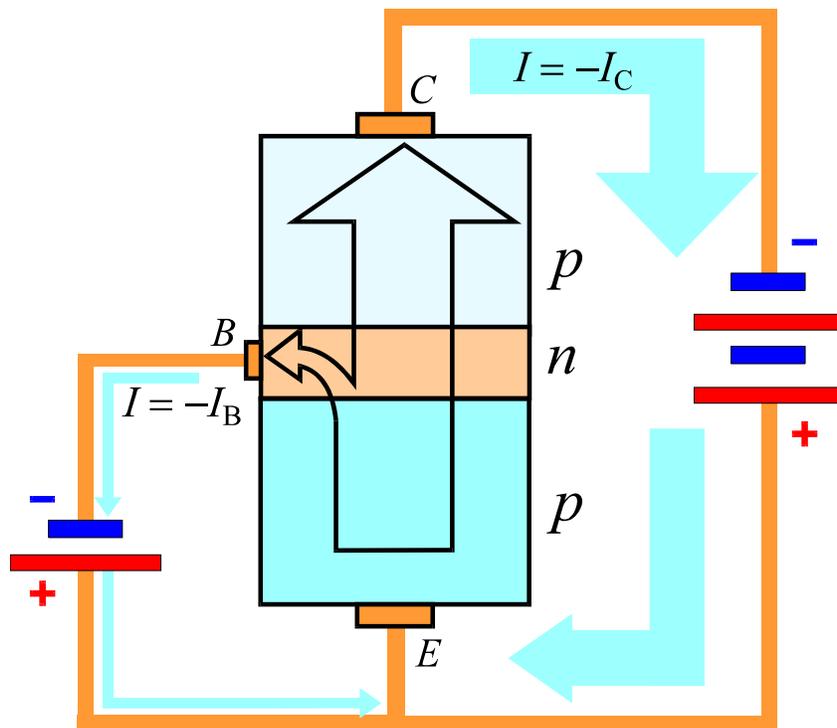


Fig.13 Comparação entre as correntes de base e de coletor em um transistor *pnp*.

CORRENTE DE EMISSOR

A partir da discussão das seções anteriores, e de acordo com o princípio da conservação da carga estabelecido pela **Eq.(5)**, a corrente de emissor pode ser obtida da relação

$$I_E = (-I_B) + (-I_C) \quad (6)$$

De acordo com a convenção adotada para definir as correntes nos terminais do transistor, os sinais a elas atribuídos indicados na **Tabela 2**, são

compatíveis com os sentidos dos fluxos de corrente, mostrados na **Fig.14**. Conseqüentemente, para o transistor *pnp* operando na região ativa:

- $I_B < 0 \Rightarrow (-I_B) > 0$, indicando que a corrente na base flui do terminal *B* para o circuito.
- $I_C < 0 \Rightarrow (-I_C) > 0$, indicando que a corrente no coletor flui do terminal *C* para o circuito.
- $I_E > 0$ indica que a corrente no emissor flui do circuito para o terminal *E*.

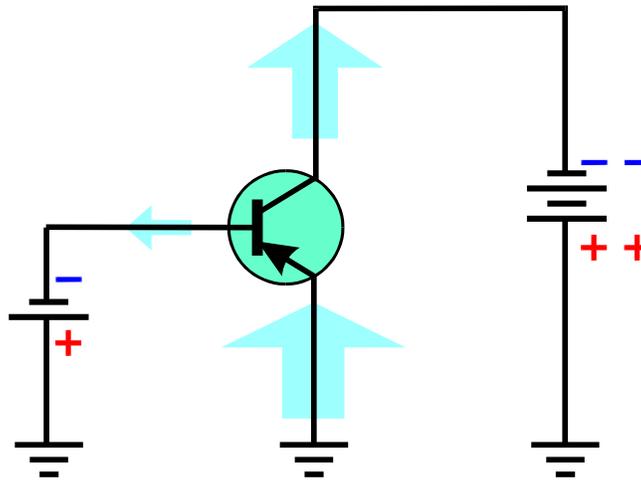


Fig.14 Sentidos das correntes em um transistor *pnp* operando na região ativa.

CONTROLE DE CORRENTE NO TRANSISTOR

A principal característica do transistor reside no fato de a corrente de base poder controlar eficientemente a corrente de coletor. A corrente de base pode ser modificada pelo ajuste externo da tensão na junção base-emissor, conforme ilustrado na **Fig.15**.

Dessa forma, qualquer variação na tensão da fonte aparece diretamente como uma variação na altura da barreira de potencial da junção base-emissor, fazendo que mais ou menos portadores provenientes do emissor sejam injetados na base. Como as correntes de base e de coletor variam em proporção direta com o número de portadores provenientes do emissor, conclui-se que variações na

tensão aplicada à junção base-emissor, ou equivalentemente na corrente de base, causam variações na corrente de coletor.

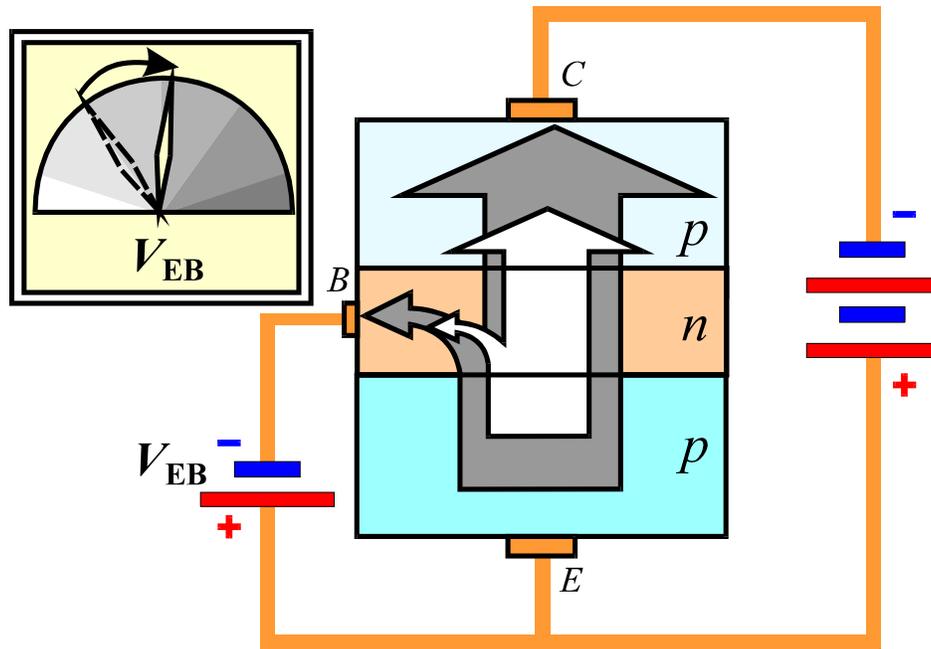


Fig.15 Influência da corrente de base na corrente de coletor de um transistor.

Nota-se que apesar de a corrente de base ser de pequeno valor, ela atua essencialmente de forma a liberar a passagem de mais ou menos corrente do emissor para o coletor. Dessa forma a corrente de base atua como corrente de controle, e a corrente de coletor, como corrente controlada.

GANHO DE CORRENTE DO TRANSISTOR

Como discutido na seção anterior, através de um transistor é possível utilizar um pequeno valor de corrente I_B para controlar a circulação de uma corrente I_C , de valor bem mais elevado.

Uma medida da relação entre a corrente controlada I_C e a corrente de controle I_B pode ser obtida do parâmetro

$$\beta_{DC} \equiv \frac{I_C}{I_B} \quad (7)$$

definido como o **ganho de corrente contínua entre base e coletor**.

Como na região ativa as correntes I_C e I_B têm o mesmo sinal, nesse regime de operação o parâmetro β_{DC} é um número positivo.

Cada transistor é fabricado com um valor bem definido para o parâmetro β_{DC} , que depende das características materiais e estruturais do componente e do regime de operação do transistor. Da **Eq.(7)** tem-se que

$$I_C = \beta_{DC} I_B \quad (8)$$

A **Eq.(8)** mostra que a corrente de coletor é diretamente proporcional à corrente de base, e que I_C pode ser calculado a partir do conhecimento dos valores de β_{DC} e I_B .

É importante salientar que o fato de o transistor permitir a obtenção de um ganho de corrente entre base e coletor não implica em criação de correntes no interior da estrutura. **Todas as correntes que circulam em um transistor são provenientes das fontes de alimentação, com a corrente de base atuando no sentido de liberar a passagem de mais ou menos corrente do emissor para o coletor.**



Os transistores não geram ou criam correntes internamente, atuando apenas como controladores do nível de corrente fornecido externamente.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. De que forma deve-se polarizar os transistores *pnp* e *nnp* para operação na região ativa?
2. Quais os sentidos reais das correntes em um transistor *pnp* polarizado na região ativa?
3. Repetir a questão anterior para o caso de um transistor *nnp*.
4. Qual o valor típico da tensão V_{BE} de um transistor *pnp* para operação na região ativa?
5. Repetir a questão anterior para o caso de um transistor *nnp*.
6. Que fração típica da corrente proveniente do emissor de um transistor *pnp* flui para a base quando o componente opera na região ativa?
7. Para um transistor *nnp* operando com $I_B = 10 \mu\text{A}$ e $I_C = 1 \text{ mA}$, calcule o ganho de corrente contínua entre base e coletor.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Hans. Transistores, segunda parte. São Paulo, EPU, 1975. il. (Eletrônica Industrial, 2).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos. 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

TUCCI, Wilson José. Introdução à Eletrônica. 7.ed. São Paulo, Nobel, 1983. 349p.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.