

# Circuitos Eletrônicos

## Aula 06 - Transistor Bipolar

# Apresentação

---

Nesta aula, iremos aprofundar nossos estudos sobre o funcionamento dos transistores bipolares. Para isso, definiremos algumas características específicas desse transistor, como tensão, corrente e regiões de operação, para que consigamos analisar circuitos os quais implementam as configurações básicas do mesmo (emissor comum, base comum e coletor comum). A partir desse estudo será possível entender como o transistor bipolar pode ser utilizado para diversas aplicações.

## Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

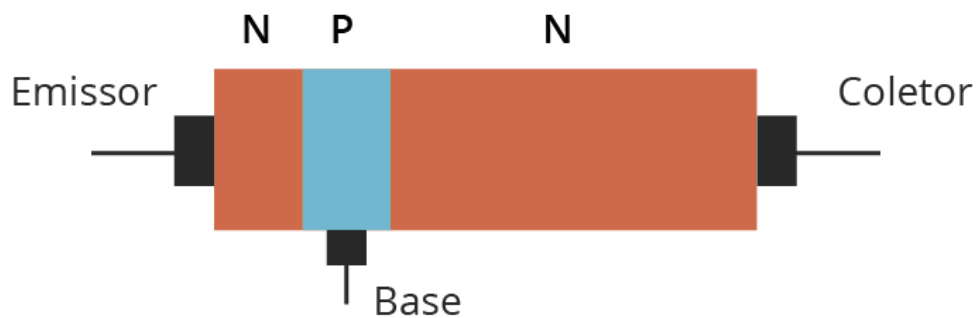
- Identificar a simbologia dos diferentes tipos de transistores;
- Identificar as tensões e correntes do transistor;
- Analisar os gráficos de corrente VS tensão do transistor bipolar;
- Compreender as regiões de operação do transistor bipolar;
- Entender, de forma específica, a configuração base comum.

# Revisão

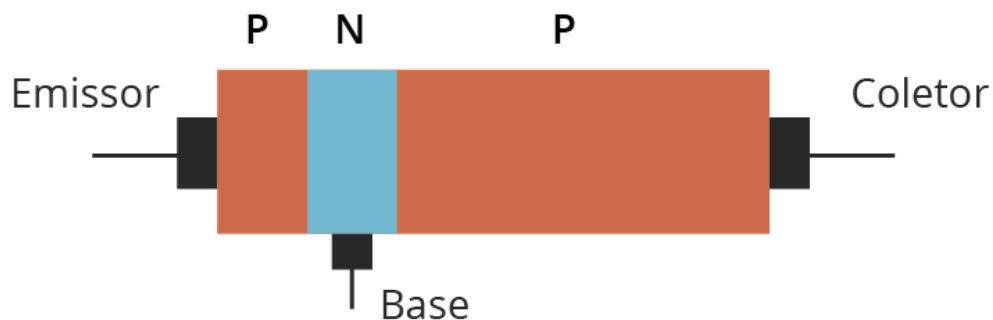
---

Vimos, na aula passada, os dois diferentes tipos de transistores de junção: NPN e PNP. Vimos que esses dispositivos são formados por “sanduíches” de semicondutores dopados de formas específicas. As duas figuras a seguir ilustram os transistores bipolares do tipo NPN e PNP.

**Figura 01** - Transistor do tipo NPN.



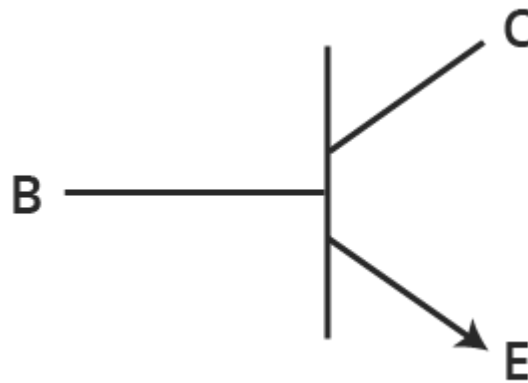
**Figura 02** - Transistor do tipo PNP.



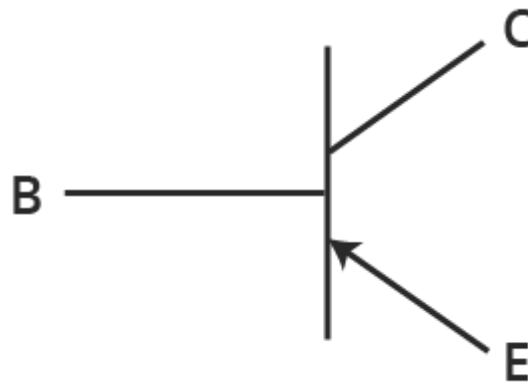
Vimos também que o transistor é um dispositivo de três terminais distintos, onde cada terminal é ligado a uma das camadas do “sanduíche” de semicondutores. São eles, o **emissor**, a **base** e o **coletor**.

Além disso, aprendemos a simbologia utilizada para cada um dos tipos de transistores. Veja as figuras a seguir e relembre-as:

**Figura 03** - Simbologia empregada no transistor NPN.



**Figura 04** - Simbologia empregada no transistor PNP.



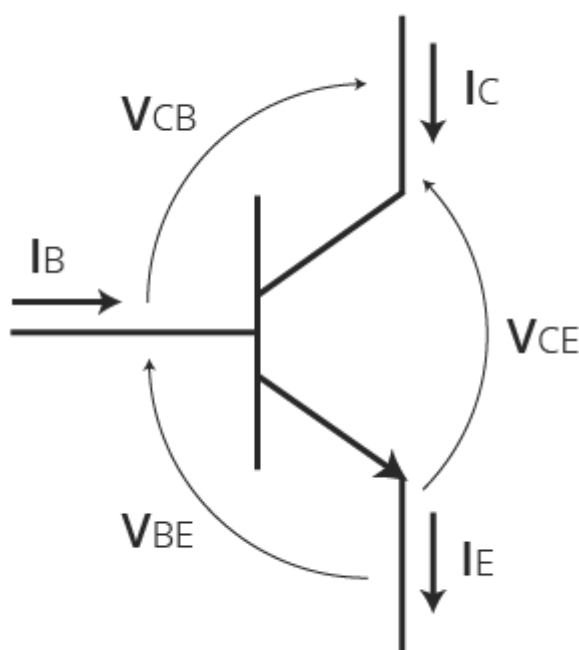
Vale a pena lembrar que a seta indica o sentido do fluxo de corrente em cada tipo de transistor. No transistor NPN, a corrente passa pelo coletor em direção ao emissor; já no PNP, ocorre o oposto. Veremos melhor essa característica no próximo tópico.

Os dois papéis **fundamentais** dos transistores, em circuitos eletrônicos, foram mencionados de uma forma bem simples: as funções de amplificador e de chave. Nesta e nas próximas aulas, veremos o que devemos fazer para “configurar” um transistor de uma forma ou de outra.

# Diferenças de potencial e correntes elétricas no transistor

Nesta seção, mostraremos a convenção de nomenclatura utilizada daqui para a frente com relação às diferenças de potencial (tensões) e às correntes elétricas que envolvem os terminais do transistor. A figura a seguir mostra o transistor NPN.

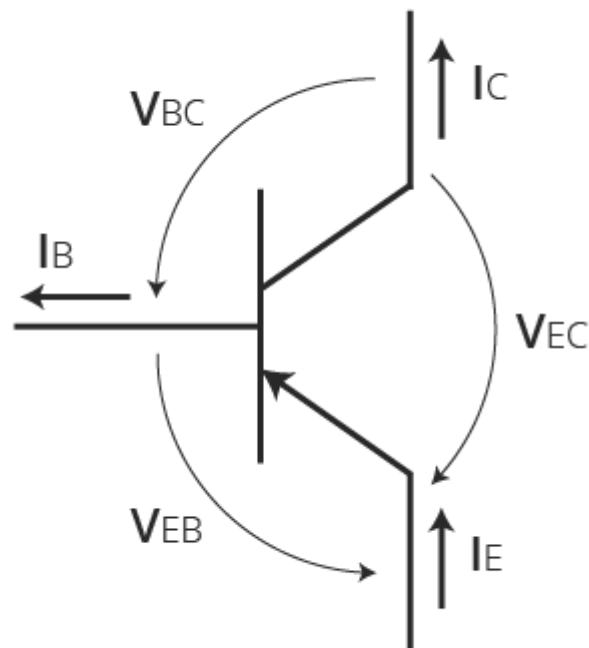
**Figura 05** - Tensões e correntes do transistor NPN.



As correntes são discriminadas sempre como “I” mais o complemento referente à sua localidade. Assim, a corrente que passa pela base é a  $I_B$ , a corrente do coletor,  $I_C$ , e a corrente do emissor,  $I_E$ . Temos também as tensões entre os terminais. Seguindo a mesma lógica das correntes, a tensão entre o coletor e a base é chamada  $V_{CB}$ , a tensão entre a base e o emissor,  $V_{BE}$ , e a tensão entre o coletor e o emissor,  $V_{CE}$ .

No transistor PNP, devido à sua construção diferente, as correntes e tensões aparecem invertidas. Veja na figura a seguir:

**Figura 06** - Tensões e correntes do transistor PNP.



Das figuras anteriores, pode-se aplicar a lei das malhas e a lei dos nós para se tirar as importantes relações a seguir:

**1** - Considerando o transistor como um nó, a soma das correntes que entram nele é igual à soma das correntes que saem dele - lei dos nós. Assim:

$$I_E = I_C + I_B \text{ (vale para os dois tipos de transistores)}$$

A corrente do emissor é igual à soma das correntes da base e do coletor.

**2** - Aplicando agora a lei das malhas, a soma das tensões em uma malha é sempre igual a zero. Sendo assim:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}: \text{No transistor NPN}$$

$$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}: \text{No transistor PNP}$$

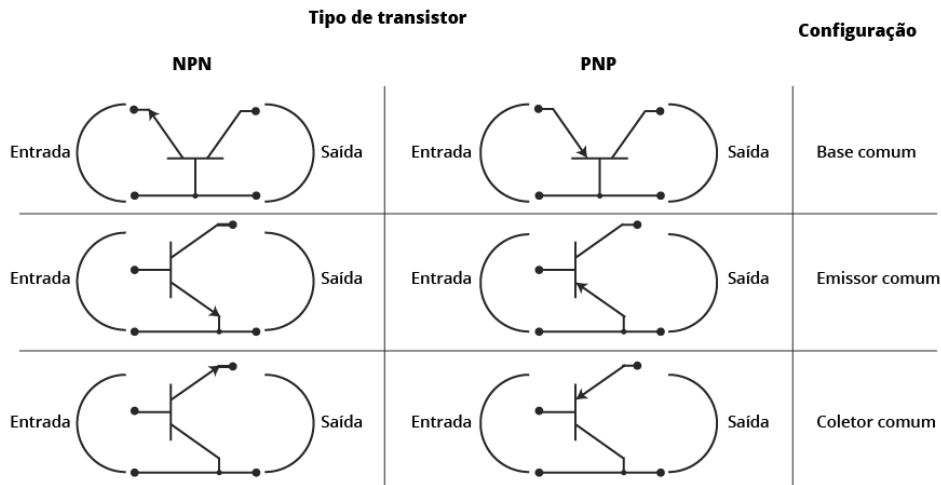
Sempre estaremos nos referindo a essas tensões e correntes para analisar o funcionamento dos transistores e seu comportamento nos circuitos eletrônicos.

# Configurações de trabalho

Como foi dito anteriormente, o transistor tem três terminais e, assim, pode funcionar de forma diferente conforme é polarizado e montado no circuito. Estudaremos três configurações básicas de montagem no circuito. Para cada uma delas, analisaremos as possíveis polarizações em seus terminais para determinar o comportamento do dispositivo em cada situação. Na medida em que formos fazendo esse estudo, mostraremos possíveis aplicações do transistor em alguns exemplos.

Para melhor entender as configurações, pense no transistor como uma caixa funcional que contém uma entrada e uma saída, sendo que tanto a entrada quanto a saída são formadas por dois terminais. Por possuir apenas três terminais, um deles será comum entre a entrada e a saída. Isso é o que vai determinar a sua configuração. Com isso, temos três possibilidades de configuração: coletor comum, emissor comum e base comum. Veja a figura a seguir:

**Figura 07** - Entrada e saída com transistores NPN e PNP nas diversas configurações.



Você lembra quais são as duas principais aplicações do transistor? Não?!

Então grave: os transistores são extramente utilizados como amplificadores e chaves. Comumente, quando se deseja implementar um amplificador utilizando um transistor bipolar, faz-se uso de uma das configurações ilustradas na figura 7. Logo, com o transistor bipolar é possível programar três tipos de amplificadores com características diferentes. Estudaremos detalhadamente as características de cada uma das configurações.

Os pontos pretos na figura 7, em cada configuração, indicam onde os transistores são ligados ao circuito na entrada e na saída. O terminal que é comum à entrada e à saída dá o nome à configuração e é utilizado como referência.

Vários estudantes se confundem com relação ao papel do coletor/emissor no circuito. A ideia do nome coletor indica algo que chega, e emissor algo que sai. Vimos, na aula passada, que os nomes “emissor” e “coletor” vêm dos emissores e coletores de portadores de cargas. Isso não significa dizer que o emissor sempre será a saída e o coletor a entrada. O papel de entrada e saída vai variar conforme a configuração.

## Atividade 01

---

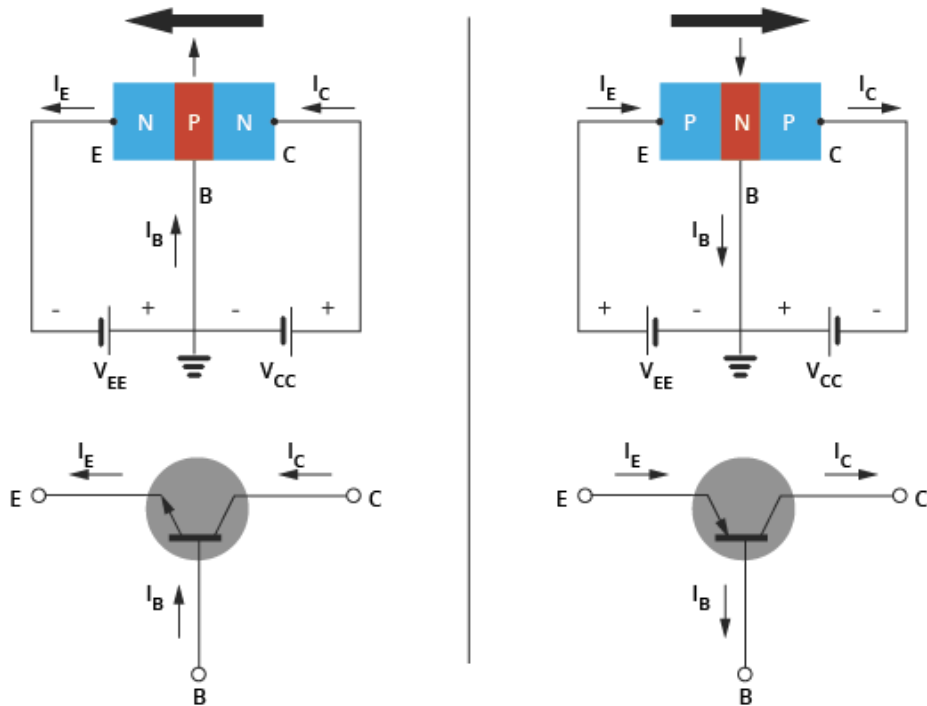
1. Analise a figura 7 e **identifique**, em cada uma das seis figuras, o coletor, a base e o emissor e **confirme** quais são os terminais de entrada, de saída e o comum, que dá nome à configuração.
2. Um determinado amplificador é implementado utilizando um transistor bipolar na configuração emissor comum. Qual a corrente de coletor desse amplificador se a corrente de base é de 1 mA e a corrente de emissor é de 100 mA?



# Configuração base comum

Vamos começar a nossa análise pela configuração base comum. Analise a figura a seguir:

**Figura 08** - Transistor na configuração base comum. a) NPN b) PNP.



Nas figuras, podemos observar duas fontes de tensão  $V_{EE}$  e  $V_{CC}$  polarizando um transistor NPN e um transistor PNP. Vamos observar o caso do transistor NPN e a mesma análise pode ser utilizada para o transistor PNP. É importante notar como a tensão de alimentação  $V_{EE}$  está polarizando a junção base-emissor, fazendo com que flua uma corrente saindo do terminal do emissor. Isto só ocorre devido à polarização direta dessa junção. Já a fonte de alimentação  $V_{CC}$ , está polarizando a junção base-coletor inversamente, de modo que os elétrons que vêm do emissor sejam coletados pelo terminal "coletor". Com essas duas polarizações a corrente flui do terminal coletor para o emissor. Essa situação caracteriza uma região de operação do transistor chamada de região ativa, falaremos mais adiante a respeito disto.

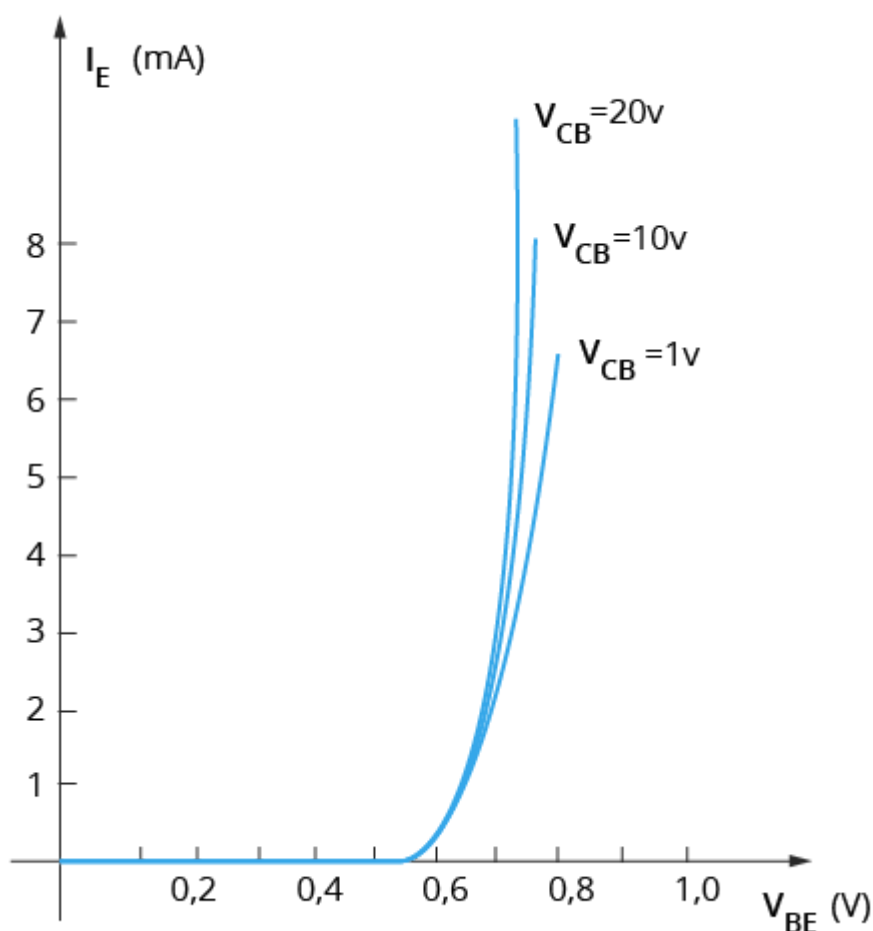
Como são muitas variáveis a serem analisadas, estipulam-se os parâmetros de entrada e saída. Começamos pelos parâmetros de entrada.

## Análise dos parâmetros de entrada

### $I_E \times V_{BE}$ para diversos $V_{CB}$

Ou seja, a análise da corrente de entrada,  $I_E$  (corrente do emissor) pela tensão base emissor  $V_{BE}$ , para diversos valores de tensão de saída, considerada  $V_{CB}$ . Veja o gráfico a seguir:

**Figura 09** - Curva característica da entrada de um transistor configurado em base comum.



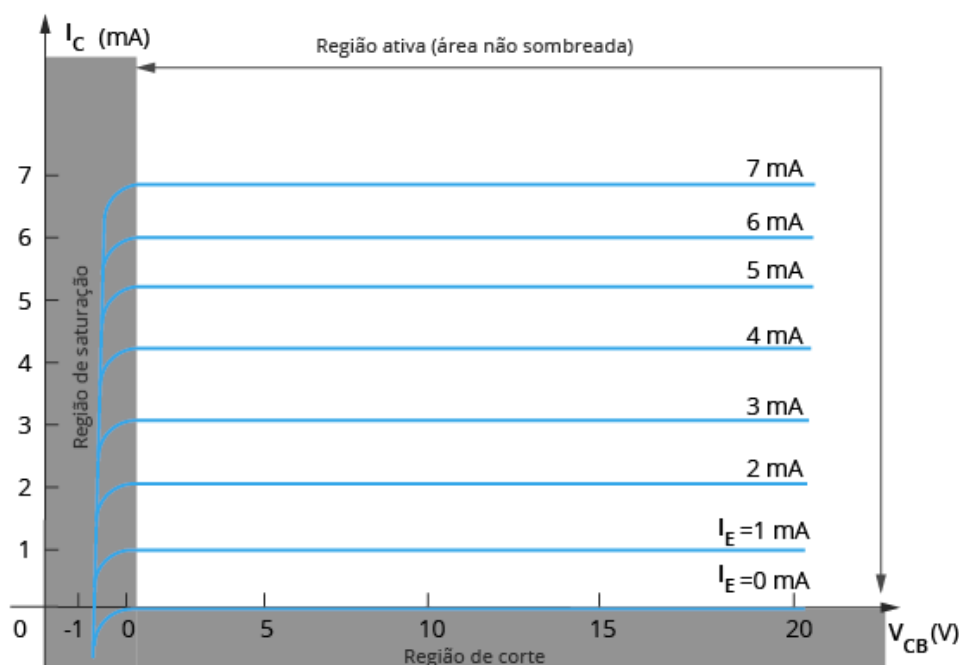
Essa figura faz você se lembrar de alguma coisa? Ao atingir a tensão 0,7V entre o terminal da base e o emissor, a corrente do emissor começa a subir rapidamente. Sim! A curva característica do diodo de silício, polarizado diretamente! O funcionamento é exatamente o mesmo porque a base é formada pelo semiconductor tipo N e o emissor é formado pelo semiconductor tipo P (transistor PNP). 0,7V é o valor de tensão da mesma barreira de potencial que era formada nos diodos. E veja que pouco importa qual a tensão da saída VCB, as curvas são muito parecidas entre elas. Acima de 0,7V, tal qual o diodo, o transistor está ativado e a corrente do emissor pode fluir.

## Agora vamos analisar os parâmetros de saída:

### $I_C \times V_{CB}$ para diversos $I_E$

A análise da corrente de saída,  $I_C$  (corrente do coletor) pela tensão de saída  $V_{CB}$ , para diversos valores de correntes de entrada  $I_E$ . Analise o gráfico a seguir:

**Figura 10** - Curva característica de saída de um transistor configurado em base comum.



No gráfico anterior, temos uma porção de coisas para analisar. Veja que o gráfico já destacou três regiões específicas: região de corte, região de saturação e região ativa. A chamada **região ativa**, onde a área não está sombreada, é “ativada” quando a junção base emissor está polarizada diretamente e a junção base coletor polarizada inversamente.

Quando a corrente do emissor aumenta ( $I_E$ ), temos um aumento da corrente do coletor até “topar”. Observe também que mesmo aumentando a tensão entre o coletor e a base, o valor da corrente do coletor prevalece praticamente a mesma. Essa relação entre  $I_E$  e  $I_C$  é chamada de alfa ( $\alpha$ ), e pode ser calculada como:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \qquad I_C = \beta I_B$$

Como o valor máximo de  $I_E$  atinge no máximo o valor de  $I_C$ , temos que alfa ( $\alpha$ ) sempre será menor ou igual a 1. Em transistores comerciais, encontramos valores em torno de 0,90 até chegar a 0,98. Já a segunda equação relaciona a corrente de base com a corrente de coletor. Falaremos mais sobre ela na próxima aula, mas é importante que vocês conheçam essa equação. Se considerarmos que a corrente no emissor é a soma das correntes no coletor e na base, podemos relacionar alfa com beta pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

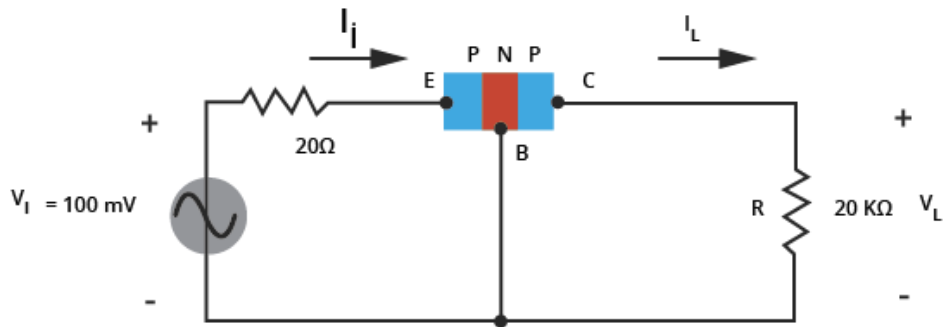
Vamos ver uma aplicação dessa configuração trabalhando nessa região da curva do transistor. Observe o circuito a seguir.

## Exercício Resolvido 1

---

Temos uma fonte de tensão alternada de 100mV ligada na entrada desse transistor. Vamos supor que o  $\alpha$  desse transistor é de 0,98, calcularemos a tensão  $V_L$ , considerada a saída do transistor.

**Figura 11** - Transistor montado na configuração base comum.



Veja que a fonte de tensão alternada encontra uma resistência de 20 Ohms na entrada do transistor. Sendo assim, usando a primeira lei de ohm, podemos calcular a corrente  $I_i$  que será a corrente  $I_E$ , a que vai entrar no emissor do transistor.

$$V_i = R * I_i \rightarrow I_i = \frac{V_i}{R} = \frac{100 \times 10^{-3}}{20} = 5 \text{ mA}$$

A corrente do emissor  $I_E$  será de 5mA. Como o  $\alpha$  é de 0,98, podemos calcular a corrente de saída no coletor,  $I_C$ .

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

$$I_C = 0,98 * 5 \text{ mA} = 0,98 * 5 \times 10^{-3} = 4,9 \text{ mA}$$

Tendo uma corrente de 4,9mA saindo do coletor, que é igual a  $I_L$ , e consequentemente passando pelo resistor R, podemos calcular a tensão aplicada sobre os terminais do resistor usando a lei de Ohm mais uma vez:

$$V_L = R * I_L = 20 \times 10^3 * 4,9 \times 10^{-3} = 98 \text{ V}$$

Veja que tínhamos na entrada uma tensão de 100mV e agora na saída temos uma tensão de 98V! Conseguimos elevar a tensão usando o transistor! A corrente teve uma leve queda que é atenuada cada vez que o  $\alpha$  tender a 1.

Assim, conseguimos fazer com que o transistor funcionasse como um amplificador de tensão.

O autor Boylestad afirma em seu livro, Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos, que o próprio nome transistor vem dessa funcionalidade. Já que temos uma transferência de corrente de um circuito de baixa resistência, entrada (lado esquerdo do circuito), para um circuito de alta resistência.

**Transferência + resistor = transistor.**

## Detalhando as Regiões de Operação

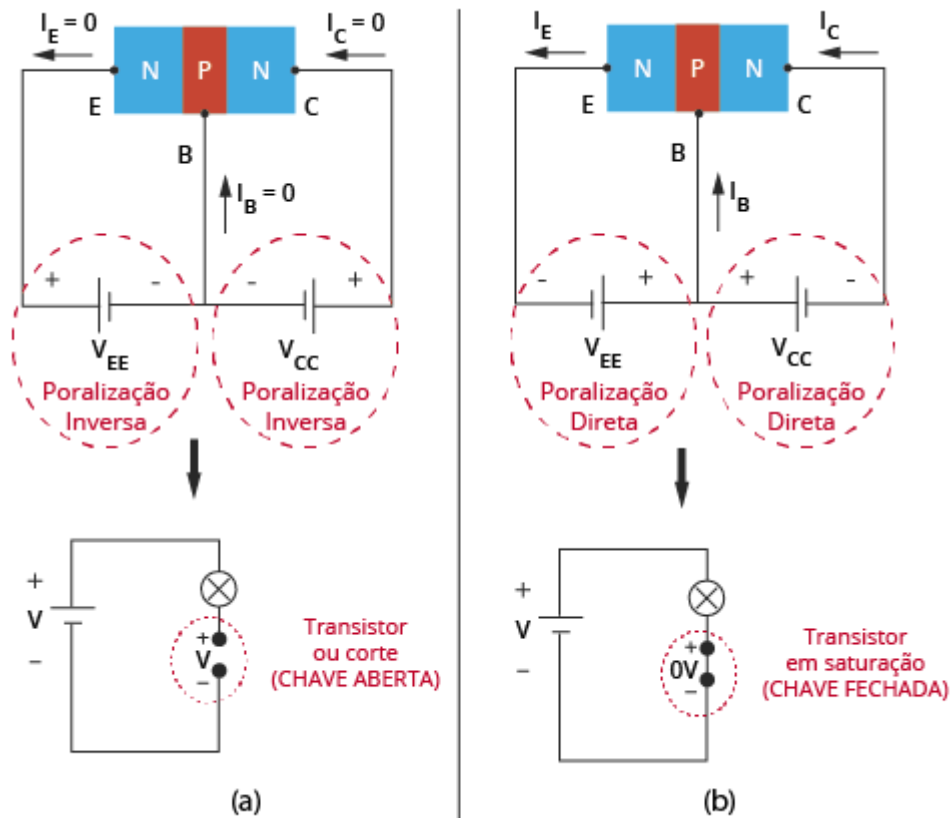
---

Lembre-se de que toda essa análise foi feita num transistor configurado em base comum atuando na região **ativa**! Quando utilizamos um transistor bipolar operando como amplificador, devemos polarizá-lo na região ativa.

Para concluir, ainda precisamos analisar as duas regiões que faltam no gráfico dos parâmetros de saída, a de **corte** e a de **saturação**.

A **região de corte** é a região do gráfico abaixo do eixo de  $V_{CB}$ , em que a corrente do coletor é ZERO. Isso acontece quando a **junção base-emissor** e a **base-coletor** estão ambas polarizadas **inversamente**. A figura 12a ilustra um transistor NPN polarizada na região de corte.

**Figura 12** - Transistor polarizado na região de. a) Corte b) Saturação.



A **região de saturação** é exatamente o contrário dessa situação. Quando ambas as **junções base-coletor** e **base-emissor** estão polarizadas **diretamente**, temos a presença de corrente no coletor, mas sob uma diferença de potencial zero entre o coletor e a base.

Lembre-se que ao polarizar a junção base-emissor ou base-coletor diretamente, você está polarizando um diodo. Logo, a queda de tensão desta junção será idealmente zero (na prática consideramos uma queda de 0,7 V).

Utilizando-se dessas duas situações, podemos fazer com que o transistor atue como uma chave. Ele será uma chave aberta quando estiver na região de corte e uma chave fechada quando estiver saturado. A utilização de um transistor como

chave é mais empregada na configuração emissor comum. Veremos na próxima aula mais detalhes sobre a mesma.

## Identificando a região de operação

Até aqui, você conheceu algumas características da configuração base-comum e, a partir desta configuração, você aprendeu como polarizar cada junção do transistor bipolar para que ele opere em uma das três regiões (corte, saturação e ativa). Mas, será que você consegue analisar um circuito e afirmar em qual região o transistor está operando? Não?

Então, criamos uma tabela que vai ajudar você a identificar quando um transistor estiver na região ativa, de corte e de saturação. Não é preciso decorar as condições e modelo para região. Esta tabela apenas servirá como auxílio, pois quando você entender a aplicação do transistor em cada região, a associação para o que se espera das tensões e correntes se torna fácil.

NPN			PNP	
ZONA	Condições	Modelo	Condições	Modelo
Corte	$V_{BE} < 0.7V$ $V_{BC} < 0.7V$	$I_C = 0$ $I_E = 0$ $I_B = 0$	$V_{EB} < 0.7V$ $V_{CB} < 0.7V$	$I_C = 0$ $I_E = 0$ $I_B = 0$
Ativa	$V_{BE} = 0.7V$ $V_{CC} > V_{CE} > 0,2V$ $I_B > 0$	$V_{BE} = 0.7V$ $I_E = \alpha \cdot I_C$ $I_C = \beta I_B$	$V_{EB} = 0.7V$ $V_{CC} > V_{EC} > 0,2V$ $I_B > 0$	$V_{EB} = 0.7V$ $I_E = \alpha \cdot I_C$ $I_C = \beta I_B$
Saturação	$I_C < \beta I_B$ $V_{BE} = 0.8V$	$V_{BE} = 0.8V$ $V_{CE} = 0.2V$ $I_E = I_C + I_B$	$I_C = \beta I_B$ $V_{EB} = 0.8V$	$V_{EB} = 0.8V$ $V_{EC} = 0.2V$ $I_E = I_C + I_B$

**Tabela 1** - Características das regiões do transistor bipolar.



Por exemplo, quando um transistor está na região de saturação, como esperamos que ele se comporte? Esperamos que ele se comporte como uma chave fechada, certo? Ok (Ilustramos isso na figura 12 b).

Mas, o que caracteriza uma chave fechada?

Quando temos uma chave fechada, queremos que a queda de tensão em cima dela seja praticamente zero. Logo, se o transistor está trabalhando como uma chave fechada, a queda de tensão entre seus terminais coletor-emissor deve ser idealmente zero ( $V_{CE} = 0.2V$ ), como mostra na tabela. Se você recordar, falamos que as junções base-emissor e base-coletor devem estar polarizadas diretamente para que o transistor opere na região de saturação. Lembrando que essas junções são diodos, a queda de tensão em cada uma deve ser aproximadamente 0,7V.

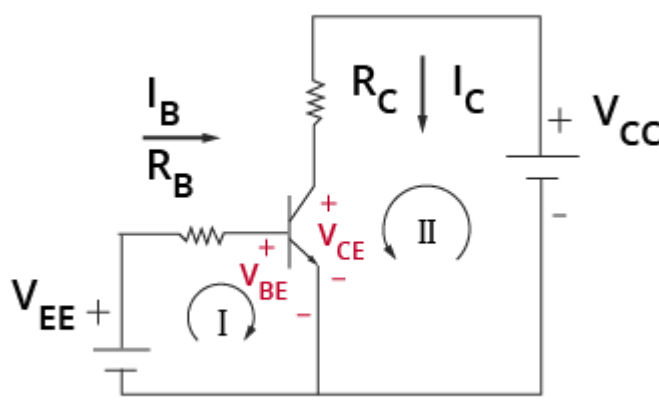
Então, apenas conhecendo as características da aplicação conseguimos definir o que esperar das tensões entre os terminais do transistor.

Vamos praticar!

## Exercício Resolvido 2

---

Analise o circuito abaixo e encontre a região de operação do transistor NPN.



Para esse circuito considere os seguintes dados:

- $V_{CC} = 6,1 V$  e  $V_{EE} = 5,7 V$

- $R_B = 1k\ \Omega$  e  $R_C = 10\ \Omega$
- $\alpha = 0.99$

Como não sabemos em que região o transistor opera, para podermos analisar o circuito temos que supor que o mesmo está em alguma região. É comum adotar, para uma análise inicial, a região ativa. Feito isso, vamos aplicar a lei das malhas para a malha I indicada na figura. Logo, temos:

$$V_{EE} - R_B I_B - V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{5,7 - 0,7}{1k} = 5mA$$

Por essa malha já podemos chegar à conclusão que o transistor não opera na região de corte, pois a corrente de emissor é diferente de zero. Agora, temos que encontrar a corrente de coletor e de emissor. Para isso, utilizaremos duas equações:

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

$$I_E = I_B + I_C \rightarrow \frac{I_C}{\alpha} = I_B + I_C \rightarrow \frac{I_C}{\alpha} - I_C = I_B \Rightarrow I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B$$

Com esta última equação, conseguimos encontrar o valor da corrente no coletor apenas com o valor da corrente de base:

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B \rightarrow I_C = \frac{0,99}{1 - 0,99} 5mA \Rightarrow I_C = 0,495A$$

Para confirmar em qual região o transistor está operando, podemos utilizar a tabela para auxílio. Se confirmarmos que o transistor está na região ativa, a tensão  $V_{CE}$  deve ser maior que 0,2. Caso contrário, o transistor funciona em saturação. Se aplicarmos a lei das malhas na malha II, indicada na figura, podemos chegar à conclusão final. Logo:

$$V_{CC} - R_c I_c - V_{CE} = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_c I_c$$

$$V_{CE} = 5,1 - 10 \cdot 0,495 \Rightarrow V_{CE} = 0,15V$$

Então, já podemos concluir que o transistor está na região de saturação, ou seja, está funcionando como uma chave fechada, pois praticamente não há queda de tensão no transistor. Para encontrar os valores exatos de corrente e tensão do circuito é preciso recalcular considerando que  $V_{BE} = 0,8V$  e  $V_{CE} = 0,2V$ .

## Atividade 02

---

1. Considere o mesmo circuito do exercício resolvido 2 e analise o circuito utilizando os seguintes dados:

- a.  $V_{CC} = 610\text{ V}$  e  $V_5 = 5,7\text{ V}$
- b.  $R_B = 10\text{ k}\Omega$  e  $R_C = 1\text{ k}\Omega$
- c.  $\beta = 100$

**OBS:** Inicie a análise considerando que o transistor está em saturação, ou seja,  $V_{CE} = 0,2\text{ V}$  e  $V_{BE} = 0,8\text{ V}$ . Encontre a corrente de base utilizando a malha I, em seguida obtenha a corrente de coletor pela malha II. Verifique se  $I_C < \beta I_B$ , caso negativo tente a região de corte.

2. Considere as junções base-coletor e base-emissor. Como elas devem estar polarizadas para que o transistor opere em região:
  - a. Ativa;
  - b. de Saturação;
  - c. de Corte.

# Resumo

---

Nesta aula, vimos a simbologia utilizada para representar um transistor, assim como a nomenclatura geralmente feita para identificar as correntes e tensões elétricas relacionadas ao transistor. Estudamos as possíveis configurações de trabalho e nos aprofundamos inicialmente na configuração base comum. Além disso, estudamos as regiões de operação dos transistores bipolares e aprendemos como identificar essas regiões analisando circuitos.

## Autoavaliação

---

1. Mostre a simbologia do transistor NPN e PNP com as respectivas correntes e tensões.
2. Mostre as possíveis configurações de trabalho, ressaltando as entradas e saídas.
3. Sobre a configuração base comum, com o que se assemelha a análise dos parâmetros de entrada? Justifique.
4. Sobre os parâmetros de saída da configuração base comum, explique as três regiões de trabalho.
5. De onde vem a terminologia “transistor”? Justifique sua resposta, se possível, com um exemplo.

## Referências

---

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. [s.l.]: Pearson, 2012.

FERREIRA, Aitan Póvoas. **Curso básico de Eletrônica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca técnica Freitas Bastos, 1987.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. 2. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 1997.

MARQUES, Angelo Eduardo B.; CHOURERI JUNIOR, Salomao; CRUZ, Eduarod Cesar Alves. **Dispositivos semicondutores: Diodos e Transistores**. 13. ed. rev. São Paulo: editora Érica, 2012.