

Sumário

Introdução	5
Configurações do transistor	6
Curvas características	7
Parâmetros das curvas características	8
Curvas características na configuração emissor comum	9
Curvas características de saída	10
Utilização das curvas características de saída	12
Curva de dissipação máxima	17
Limitação da dissipação de potência sobre a reta de carga	19
Apêndice	21
Questionário	21
Bibliografia	22



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 comportamento de componentes eletrônicos fabricados com materiais semicondutores é geralmente expresso por curvas características, que são fornecidas pelo fabricante. Essas curvas características permitem obter a tensão entre terminais, dada a corrente através do componente ou vice-versa. Esse é o caso, por exemplo, da curva característica VI de um diodo semicondutor, que é um componente de dois terminais.

Sendo o transistor um componente de três terminais, e estando a ele associadas três correntes e tensões, a situação se torna um pouco mais complexa pois o número de curvas características aumenta, havendo portanto para cada par de terminais uma relação entre tensão e corrente que depende dos parâmetros elétricos impostos ao terceiro terminal.

O objetivo deste fascículo é apresentar ao leitor as curvas características do transistor e mostrar como essas curvas devem ser utilizadas para obtenção das condições de operação de 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:

- Transistor bipolar: princípio de operação.
- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.

Configurações do transistor

Existem três possibilidades de configurar um transistor em um circuito. O nome dado a cada configuração é definido com base no terminal do transistor que é comum às duas malhas do circuito. Dessa forma, três configurações são possíveis:

- **Configuração emissor comum:** o terminal do emissor é comum às duas malhas do circuito, como mostrado na **Fig.1a**.
- **Configuração base comum:** o terminal da base do transistor é comum às duas malhas do circuito, como ilustrado na **Fig.1b**.
- **Configuração coletor comum:** o terminal do coletor é comum às duas malhas do circuito, como na **Fig.1c**.

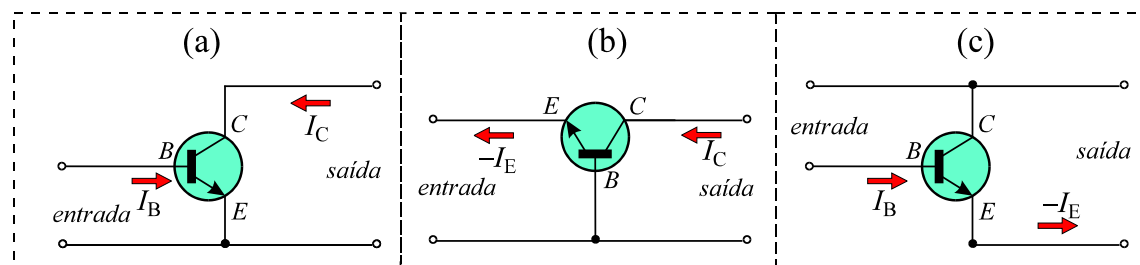


Fig.1 Configurações de um transistor em um circuito.

Curvas características

O comportamento de um componente eletrônico pode ser obtido aplicando-se uma tensão entre seus terminais, e medindo-se a corrente através do componente. Dessa forma geram-se pares de valores de corrente e de tensão que podem ser representados graficamente através da curva característica do dispositivo.

No diodo semicondutor, por exemplo, a corrente depende do valor e da polaridade da tensão aplicada aos seus terminais, conforme mostrado na **Fig.2**

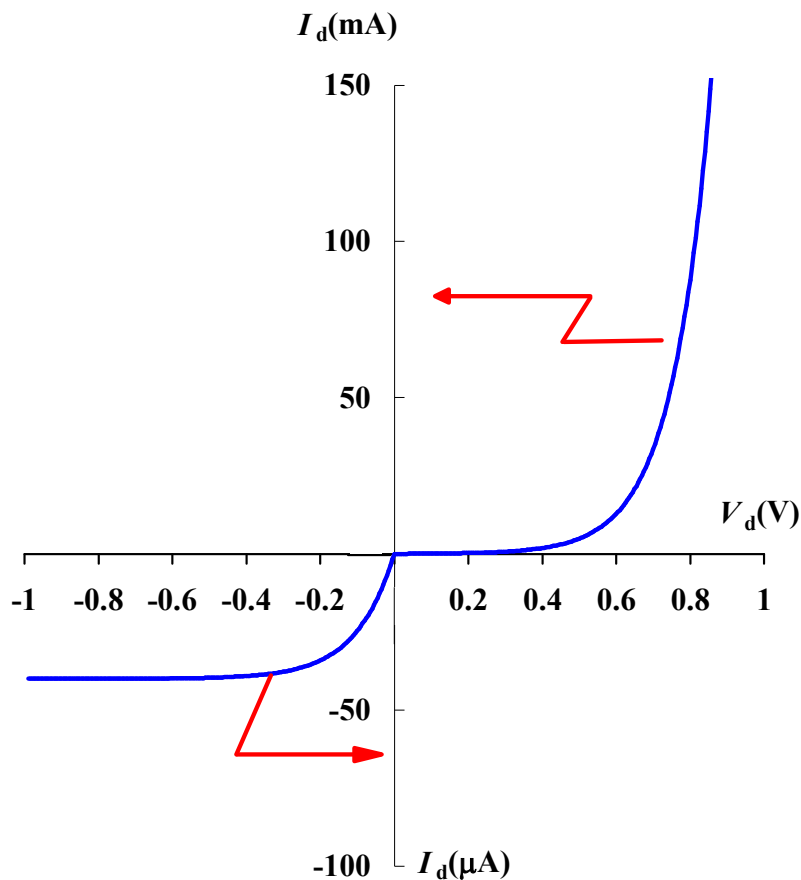


Fig.2 Curva característica de um diodo semicondutor.

O comportamento do transistor também é expresso através de curvas características. Estas são obtidas através de medidas elétricas sob condições controladas de tensão e de corrente.

O emprego das curvas características do transistor é de grande importância no projeto de circuitos, pois permite obter o comportamento do componente em uma ampla faixa de condições de operação.

PARÂMETROS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Nos componentes semicondutores com apenas dois terminais, a tensão entre terminais e a corrente através do componente são utilizados na representação gráfica da curva característica.

Como o transistor é um componente de três terminais, cada par de terminais está associado a uma corrente e uma tensão. Dessa forma, podem-se em princípio utilizar os seis parâmetros definidos a seguir para representar as propriedades do transistor:

- I_B = corrente de base.
- I_C = corrente de coletor.
- I_E = corrente de emissor.
- V_{CB} = tensão coletor-base.
- V_{CE} = tensão coletor-emissor.
- V_{BE} = tensão base-emissor.

Os seis parâmetros representativos do transistor estão mostrados na **Fig.3**. Alguns desses parâmetros juntamente com outros não elétricos, tais como temperatura, podem ser utilizados em uma série de curvas características que expressam o comportamento do transistor nas mais diversas condições de operação.

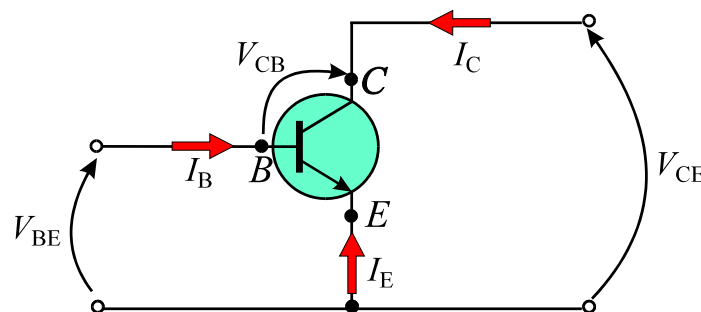


Fig.3 Parâmetros elétricos representativos do transistor.

CURVAS CARACTERÍSTICAS NA CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

O tipo de ligação mais utilizado em circuitos transistorizados é a configuração emissor comum, mostrada na **Fig.4**. As curvas características dos transistores, fornecidas pelos fabricantes, geralmente se referem a esse tipo de configuração.

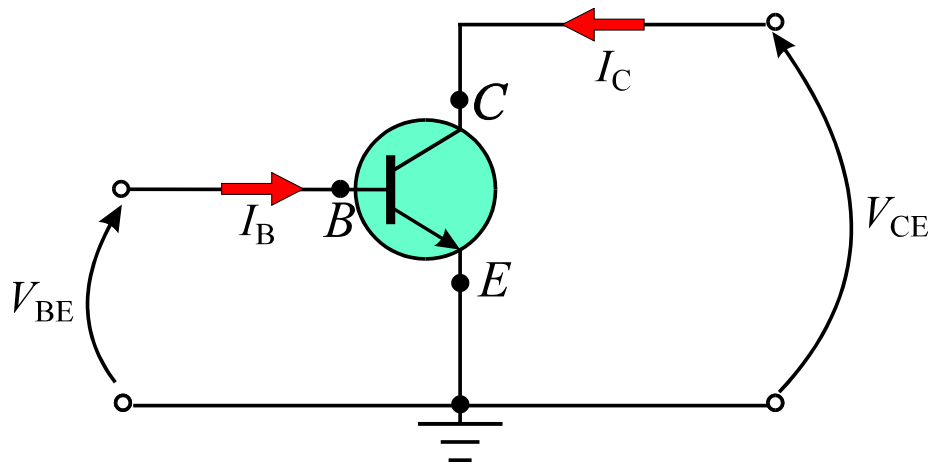


Fig.4 Configuração emissor comum.

Analisando a **Fig.4**, verifica-se que, na configuração emissor comum, apenas quatro parâmetros são suficientes para descrever o comportamento do transistor. Uma escolha possível corresponde aos parâmetros, V_{BE} , I_B , V_{CE} e I_C . Uma vez conhecidos esses quatro parâmetros os dois restantes podem ser obtidos utilizando as leis de Kirchhoff.

Com essa escolha, os parâmetros V_{BE} e I_B são denominados de **parâmetros de entrada** com V_{CE} e I_C representando os **parâmetros de saída**.

Portanto, para representar graficamente o comportamento do transistor na configuração emissor comum são necessários dois conjuntos de curvas características:

- Uma curva que expressa a relação entre os parâmetros de entrada, denominada de **curva característica de entrada**.
- Um conjunto de curvas que expressam as relações entre os parâmetros de saída, denominadas de **curvas características de saída**.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA

A influência da corrente de base na corrente de emissor torna maior a importância das curvas características de saída na representação das propriedades elétricas do transistor. Essas curvas características são também denominadas de **curvas características do coletor**.

Sabendo que para cada valor do parâmetro V_{CE} a corrente I_C é dependente do valor da corrente I_B , cada curva característica de saída é construída de forma a representar graficamente a relação entre I_C e V_{CE} para um determinado valor de I_B . A **Fig.5** mostra as curvas características de saída típicas de um transistor *npn*.

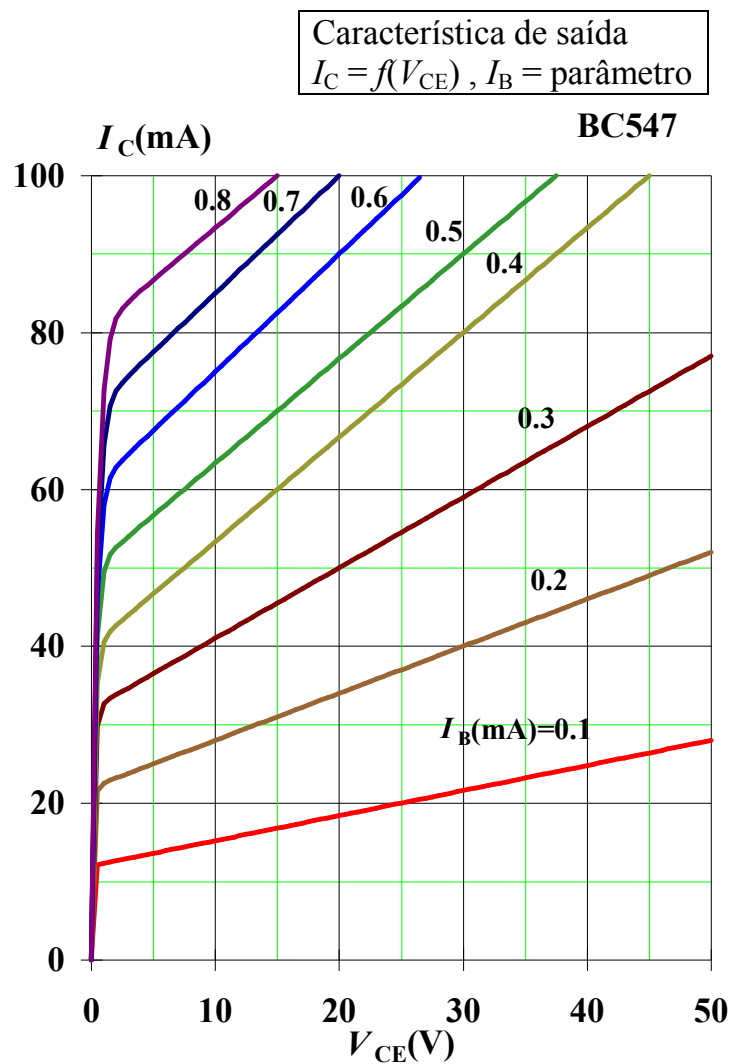


Fig.5 Curvas características de saída de um transistor *npn*.

Cada curva representada na **Fig.5** mostra a dependência da corrente de coletor I_C com a tensão coletor-emissor V_{CE} , para um determinado valor fixo da corrente de base. Em folhetos de especificações técnicas, o topo do gráfico indica que I_C é uma função de V_{CE} para cada valor fixo de I_B , através da representação:

$$I_C = f(V_{CE}), I_B = \text{parâmetro}$$

Deve-se observar que, de acordo com a convenção adotada para representação das correntes e tensões em um transistor, nos transistores *npn* os parâmetros I_B , I_C e V_{CE} são negativos pois em condições normais de operação, o coletor é polarizado negativamente em relação ao emissor e as correntes de coletor e de base fluem dos terminais do transistor para as malhas do circuito, conforme mostrado na **Fig.6**.

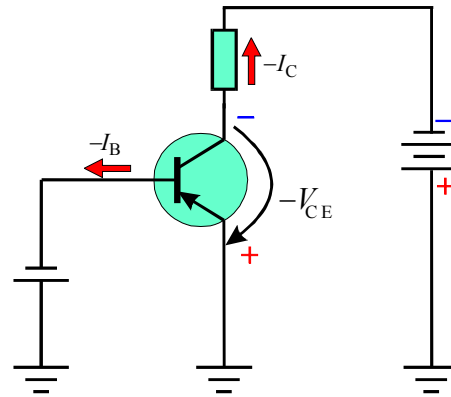


Fig.6 Polarizações e sentidos reais das correntes em um transistor *npn*.

Dessa forma, as curvas características de saída para transistores *npn* são representações gráficas de $(-I_C) \times (-V_{CE})$ para cada valor de $(-I_B)$, como mostrado na **Fig.7**.

Outro aspecto de importância no que se refere às curvas características fornecidas pelos fabricantes é que essas curvas representam o comportamento médio de um grande número de transistores de mesma especificação. Isso significa que, na prática, as propriedades elétricas do componente podem apresentar pequenos desvios em relação ao comportamento previsto pelas curvas características.

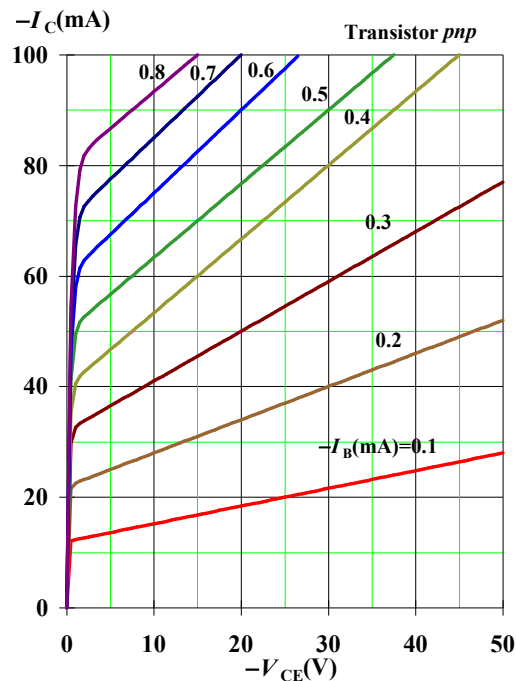


Fig.7 Curvas características de saída de um transistor *npn*.



As curvas características fornecidas pelo fabricante representam o comportamento médio de um grupo de componentes de mesma especificação.

UTILIZAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA

Com o uso das curvas características é possível determinar as condições de operação de um transistor em um circuito. Isso é feito utilizando-se o conceito de **reta de carga**, examinado a seguir.

Reta de carga

Para o caso de um transistor *npn* conectado ao circuito mostrado na **Fig.8**, aplicando-se a 2ª Lei de Kirchhoff à malha de coletor tem-se que

$$V_{CC} = V_{CE} + R_C I_C \quad (1)$$

ou alternativamente

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \quad (2)$$

Para valores fixos dos parâmetros V_{CC} e R_C , a **Eq.(2)** representa uma relação linear entre a tensão coletor-emissor V_{CE} e a corrente de coletor I_C .

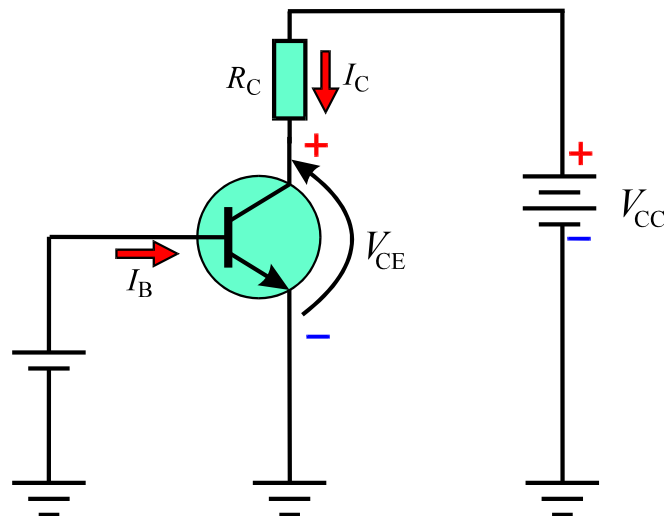


Fig.8 Circuito com transistor *npn* na configuração emissor comum.

A relação entre V_{CE} e I_C expressa pela **Eq.(2)** é representada graficamente por um segmento de reta em um diagrama $I_C \times V_{CE}$. Esse segmento de reta, denominado de **reta de carga**, pode ser traçado conhecendo-se apenas dois de seus pontos. Estes são obtidos diretamente da **Eq.(2)**, observando-se que:

- **Interseção com o eixo horizontal** $\Rightarrow I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$.
- **Interseção com o eixo vertical** $\Rightarrow V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$.

A **Fig.9** mostra a representação gráfica da reta de carga prevista pela **Eq.(2)**, e que corresponde à linha traçada entre os pontos de interseção com os dois eixos do gráfico.

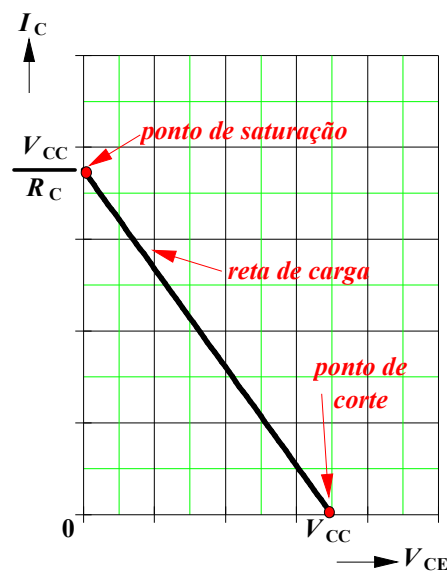


Fig.9 Reta de carga representada no diagrama $I_C \times V_{CE}$.

Para o circuito da **Fig.8**, duas condições de operação definem os pontos de interseção da reta de carga com os eixos na **Fig.9**:

- **Condição de corte.**
- **Condição de saturação.**

Condição de corte

A condição de corte ocorre quando a corrente de base no transistor é nula. A partir da relação entre correntes já derivada anteriormente,

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} \quad (3)$$

Desprezando-se a corrente de fuga no coletor, a condição $I_B=0$ fornece $I_C=0$ que define o **ponto de corte** mostrado na **Fig.9**.

Condição de saturação

A condição de saturação ocorre quando a corrente de base é suficientemente alta de forma a anular a tensão coletor-emissor. Dessa forma, impondo $V_{CE} = 0$ na **Eq.(2)** resulta $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$, que corresponde ao **ponto de saturação** mostrado na **Fig.9**. Essa situação equivale à existência de um curto entre os terminais do coletor e do emissor no circuito da **Fig.8**, de forma que toda a tensão da fonte de alimentação se transfere diretamente para o resistor de coletor.

Ponto de operação

Uma vez traçada a reta de carga pode-se determinar graficamente os valores de V_{CE} e de I_C , para um dado valor da corrente de base I_B na configuração emissor comum.

O procedimento gráfico pode ser descrito com base no circuito mostrado na **Fig.10a**, onde admite-se que a corrente de base esteja estabelecida em um valor $I_B = I_{BQ}$. A **Fig.10b** mostra as curvas características de saída que incluem aquela referente ao valor $I_B = I_{BQ}$.

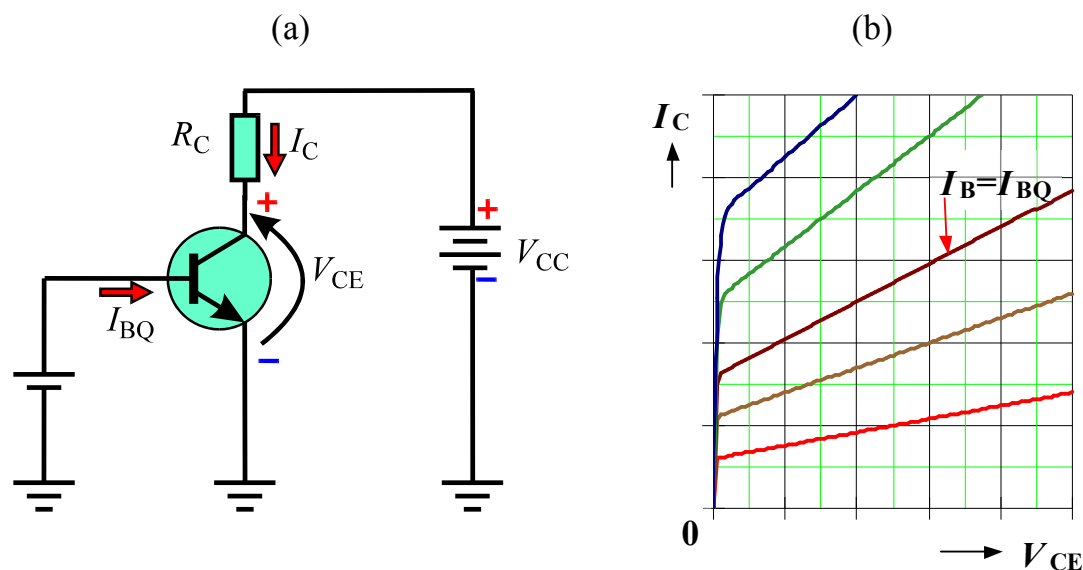


Fig.10 Circuito e curvas características de saída de um circuito transistorizado na configuração emissor comum.

Como se pode verificar na **Fig.10b**, qualquer ponto sobre a curva característica pode ser utilizado para representar os valores da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor no circuito da **Fig.10a**. A questão portanto a se considerar é a seguinte:

Conhecidos os valores de V_{CC} e R_C no circuito da Fig.10a, quais são os valores resultantes da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor?

A resposta a essa questão só pode ser obtida se for utilizada mais uma informação. Esta informação adicional é fornecida pela reta de carga do circuito, incorporada ao gráfico das características de saída, conforme ilustrado na **Fig.11**.

Ou seja, da mesma forma que os valores de corrente e tensão para o circuito definem algum ponto na curva característica, a solução deve também estar em algum ponto da reta de carga. Só existe portanto um ponto que pode existir simultaneamente na reta de carga e na curva característica correspondente a uma corrente de base I_{BQ} . Esse ponto, mostrado na **Fig.11**, é o **ponto de operação ou ponto quiescente Q** .

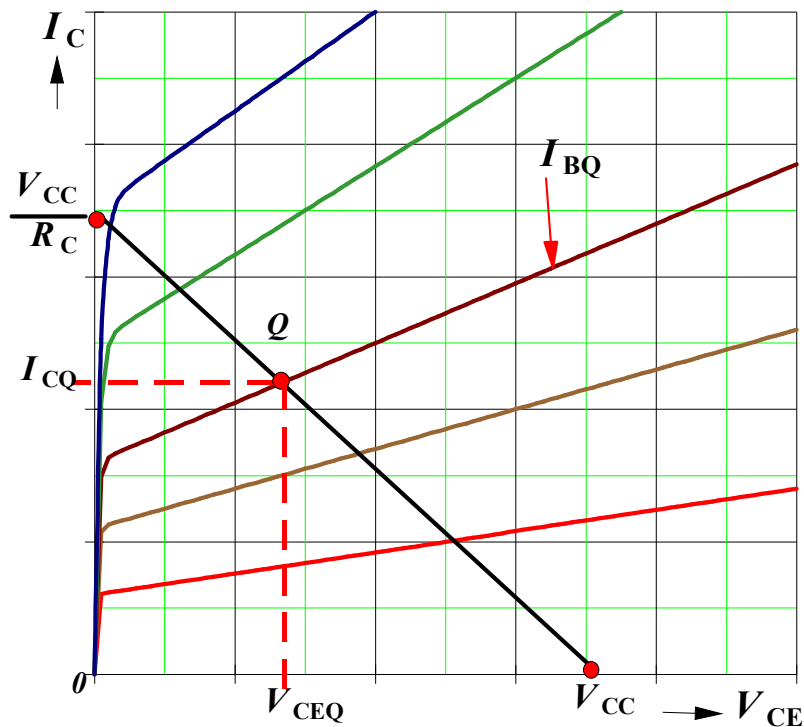


Fig.11 Determinação gráfica do ponto quiescente de um circuito transistorizado.

Determinado o ponto quiescente do circuito, obtêm-se diretamente do gráfico os valores quiescentes da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor,

representados pelos parâmetros I_{CQ} e V_{CEQ} , respectivamente. A queda de tensão sobre o resistor de coletor no ponto quiescente fica assim determinada pela expressão

$$V_{RcQ} = V_{CC} - V_{CEQ} \quad (4)$$

O exemplo seguinte ilustra o cálculo numérico do ponto quiescente de um circuito transistorizado.

Exemplo1: O circuito mostrado na **Fig.12** utiliza um transistor BC146. Para uma corrente de base de $100\mu\text{A}$ determinar os parâmetros I_C , V_{CE} e V_{Rc} .

As curvas características do transistor BC146 estão representadas no gráfico da **Fig.12(b)**, juntamente com a reta de carga do circuito. A interseção da reta de carga com a curva correspondente a uma corrente de base de $100\mu\text{A}$ ocorre no ponto quiescente Q . Como pode ser aí observado, os valores de corrente e tensão são,

$$I_{CQ} = 22\text{ mA}, V_{CEQ} = 3,4\text{ V}$$

A tensão no resistor de coletor é obtida da **Eq.(4)**, resultando em

$$V_{RcQ} = 6 - 3,4 = 2,6\text{ V}$$

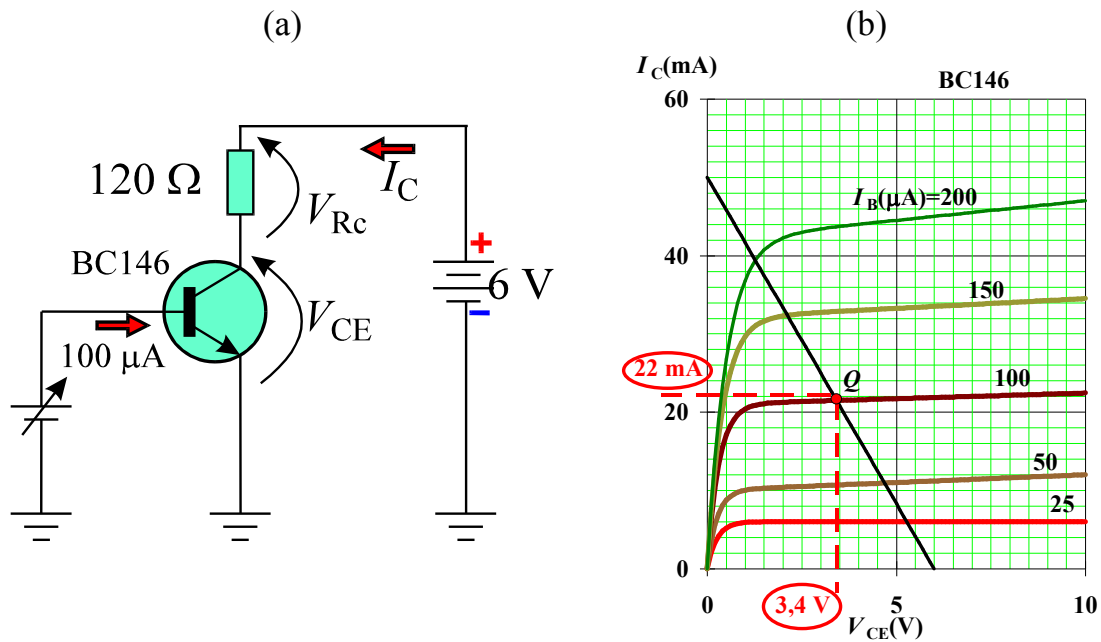


Fig.12 (a) Circuito transistorizado referente ao **Exemplo 1**. (b) Curvas características do transistor BC146 e reta de carga do circuito.

CURVA DE DISSIPÇÃO MÁXIMA

Utilizando o valor da potência de dissipação máxima do transistor, pode-se definir, no diagrama das curvas características de saída, as faixas de valores de corrente de coletor e de tensão coletor-emissor que assegurem a operação do transistor dentro de seus limites de dissipação de potência.

Como já discutido no fascículo anterior, a potência de dissipação máxima do transistor é dada aproximadamente pela expressão

$$P_{C,m\acute{a}x} = V_{CE} I_C \quad (5)$$

A relação dada pela **Eq.(5)** pode também ser escrita na forma

$$I_C = \frac{P_{C,m\acute{a}x}}{V_{CE}} \quad (6)$$

A **Eq.(6)** estabelece a dependência da corrente de coletor com a tensão coletor-emissor para um dado valor da potência de dissipação máxima. Dessa forma, conhecido o valor de $P_{C,m\acute{a}x}$, fornecido pelo fabricante, e atribuindo-se valores ao parâmetro V_{CE} , os valores correspondentes de I_C podem ser calculados da **Eq.(6)**.

Por exemplo, considerando o caso do transistor BC547 com a especificação $P_{C,m\acute{a}x} = 500\text{mW}$ a 25°C , tem-se

$$I_C = \frac{0,5 \text{ W}}{V_{CE}} \quad (7)$$

Utilizando o conjunto de valores de V_{CE} listados na 2^a. coluna da **Tabela 1**, obtêm-se os valores de I_C da 3^a. coluna daquela tabela.

Tabela 1 Alguns valores de V_{CE} e I_C correspondentes à dissipação máxima de 500 mW no transistor BC547.

Ponto	V_{CE}	I_C
1	5 V	0,1A = 100 mA
2	10 V	0,05 A = 50 mA
3	20 V	0,025 A = 25 mA
4	40 V	0,0125 A = 12,5 mA

Representando-se os quatro pontos no diagrama $I_C \times V_{CE}$, obtém-se o gráfico mostrado na **Fig.13**. A curva que passa pelos quatro pontos é a representação gráfica da relação entre os parâmetros I_C e V_{CE} , definida pela **Eq.(7)**.

A curva de dissipação máxima do transistor define o limite entre duas regiões, indicadas na **Fig.14**. A região localizada acima da curva de dissipação máxima representa a **região de dissipação excessiva** do transistor, pois os valores de V_{CE} e I_C naquela região fornecem uma potência de dissipação superior à potência de dissipação máxima do componente.

A região abaixo da curva representa a **região de funcionamento normal** do componente, pois valores de V_{CE} e I_C no interior dessa região correspondem a uma potência de dissipação inferior à potência de dissipação máxima do transistor.

Para operação do componente a temperaturas diferentes de 25 °C, deve-se utilizar a potência de dissipação máxima na temperatura de trabalho para então calcular a curva de dissipação máxima a partir da **Eq.(6)**.

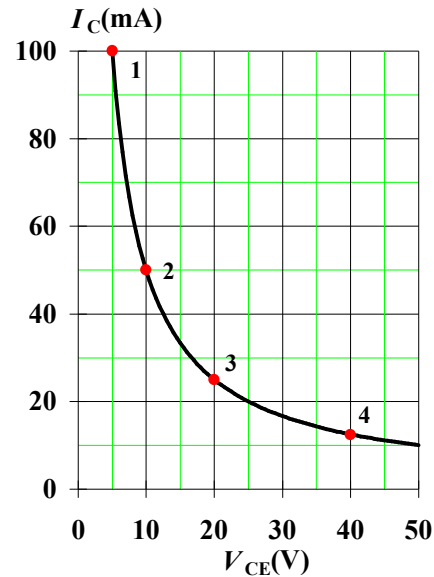


Fig.13 Representação gráfica da **Eq.(7)** para o transistor BC547.

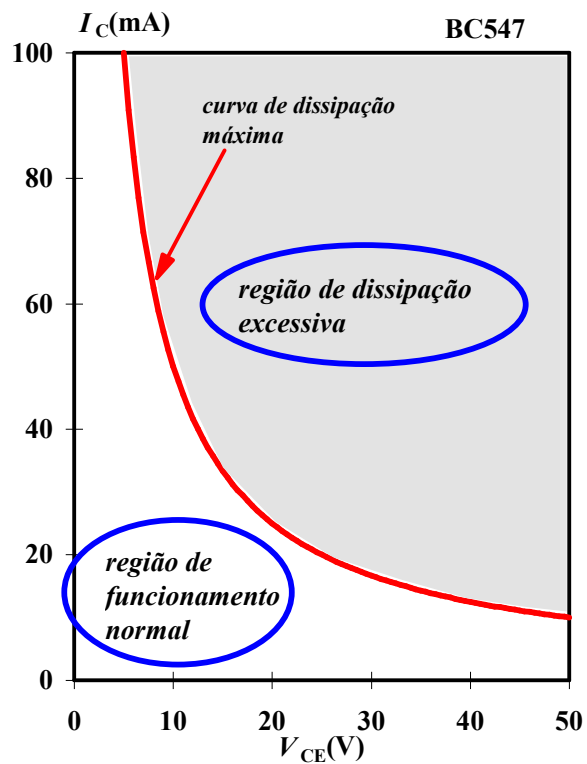


Fig.14 Regiões definindo o regime de operação do transistor BC547.

LIMITAÇÃO DA DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA SOBRE A RETA DE CARGA

A reta de carga expressa todas as possibilidades de funcionamento de um transistor para um determinado valor do resistor de coletor e da tensão de alimentação. Como a curva de dissipação máxima estabelece o limite da região de funcionamento normal do transistor, faz-se necessário que a reta de carga esteja sempre situada abaixo daquela curva.

A **Fig.15a** representa o trecho de um circuito alimentando um transistor *npn* BC547 na configuração emissor comum. Na **Fig.15b** está traçada a curva de dissipação máxima de 500 mW referente a uma temperatura de 25°C. No mesmo gráfico estão representadas as retas de carga obtidas atribuindo-se para V_{CC} os valores de 40 V e 30 V, respectivamente, com R_C fixado em 500 Ω em ambos os casos.

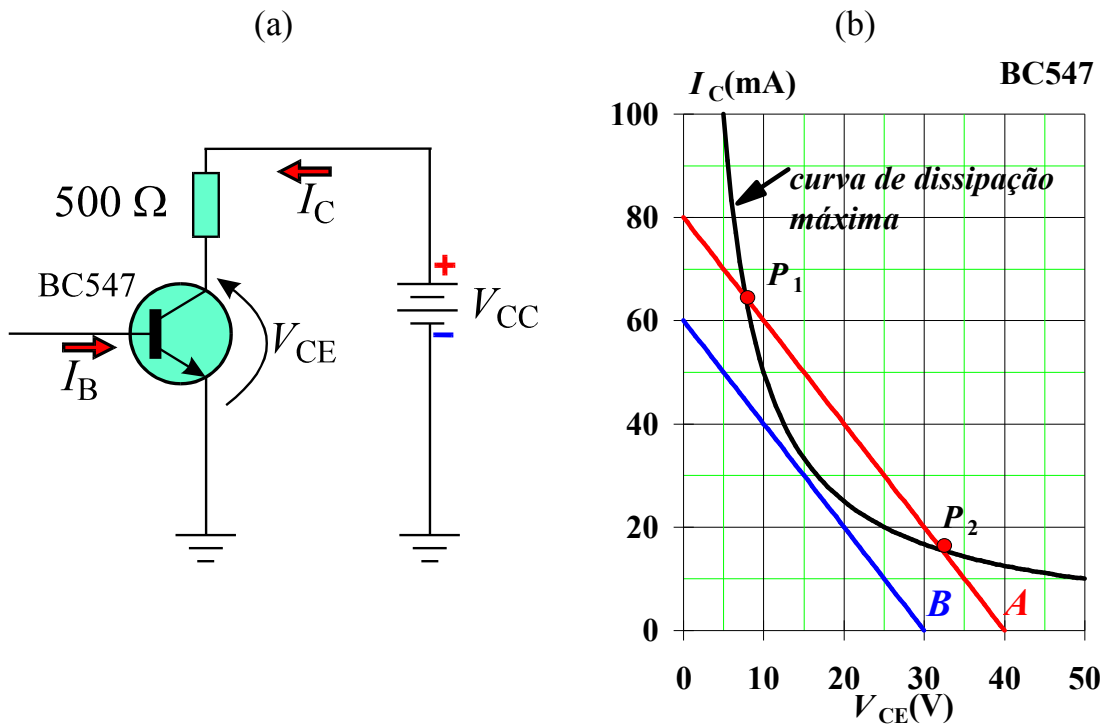


Fig.15 (a) Transistor na configuração emissor comum. (b) Curva de dissipação máxima e retas de carga: A ($V_{CC}=40$ V, $R_C=500$ Ω), B ($V_{CC}=30$ V, $R_C=500$ Ω).

Observa-se na **Fig.15b** que a reta de carga B está situada totalmente abaixo da curva de dissipação máxima do transistor. Dessa forma, qualquer

valor de corrente de base pode ser utilizado no circuito da **Fig.15a** sem que a potência de dissipação máxima do componente seja superada.

Por outro lado, examinando-se a reta de carga A da **Fig.15b**, observa-se que sobre o trecho entre os pontos P_1 e P_2 a potência dissipada supera o valor máximo definido pela curva de dissipação máxima do componente. Dessa forma, os parâmetros de circuito referentes à curva A não possibilitariam a operação segura do componente para um valor arbitrário da corrente de base.



Para evitar a possibilidade de dissipação excessiva de um transistor, os parâmetros de circuito devem ser escolhidos de forma que a reta de carga correspondente esteja situada totalmente abaixo da curva de dissipação máxima do componente.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Cite as configurações de um transistor em um circuito, caracterizando-as.
2. Para um transistor na configuração emissor comum, quais são os parâmetros de entrada e saída?
3. Para um transistor na configuração emissor comum, como são representadas as curvas características de saída?
4. O que é a reta de carga de um circuito transistorizado na configuração emissor comum?
5. Qual a denominação dos pontos de interseção da reta de carga com os eixos vertical e horizontal do diagrama $I_C \times V_{CE}$?
6. Para as condições estabelecidas no **Exemplo 1**, utilize o gráfico da **Fig.12b** para determinar:
 - (a) I_C no ponto de saturação.
 - (b) V_{CE} no ponto de corte.
7. Para operação segura de um transistor, qual deve ser a disposição da reta de carga com respeito à curva de dissipação máxima do transistor?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetor de circuitos eletrônicos. 7ed. São Paulo, Erica, 1983. 580p.

ELETRÔNICA MODULAR PANTEC. O transistor; princípios básicos. s.n.t. (curso básico, 4).

SENAI/DN. Transistores, por Antônio Abel Correia Vilela. Rio de Janeiro; Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas, 7).

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