

Transistores

História do Transistor

O transistor foi inventado nos Laboratórios da Bell Telephone em dezembro de 1947 (e não em 1948 como é frequentemente dito) por Bardeen e Brattain.

Descoberto por assim dizer, (visto que eles estavam procurando um dispositivo de estado sólido equivalente à válvula eletrônica), acidentalmente durante os estudos de superfícies em torno de um diodo de ponto de contato.

Os transistores eram portanto do tipo "point-contact", e existe evidência que Shockley, o teorista que chefiava as pesquisas estava chateado porque esse dispositivo não era o que estava procurando. Na época, ele estava procurando um amplificador semicondutor similar ao que hoje chamamos de "junção FET".

O nome transistor foi derivado de suas propriedades intrínsecas "resistor de transferência", em inglês: (TRANSfer reSISTOR). Os Laboratórios Bell mantiveram essa descoberta em segredo até junho de 1948 (daí a confusão com as datas de descobrimento).

Com uma estrondosa publicidade, eles anunciaram ao público suas descobertas, porém, poucas pessoas se deram conta do significado e importância dessa publicação, apesar de ter saído nas primeiras páginas dos jornais.

Embora fosse uma realização científica formidável, o transistor não alcançou, de imediato, a supremacia comercial. As dificuldades de fabricação somadas ao alto preço do germânio, um elemento raro, mantinham o preço muito alto. Os melhores transistores custavam 8 dólares numa época em que o preço de uma válvula era de apenas 75 cents.

Shockley ignorou o transistor de ponto de contato e continuou suas pesquisas em outras direções. Ele reorientou suas idéias e desenvolveu a teoria do "transistor de junção".

Em julho de 1951, a Bell anuncia a criação desse dispositivo. Em setembro de 1951 eles promovem um simpósio e se dispõem a licenciar a nova tecnologia de ambos os tipos de transistores a qualquer empresa que estivesse disposta a pagar \$25.000,00.

Este foi o início da industrialização do transistor.

Muitas firmas retiraram o edital de licença. Antigos fabricantes de válvulas eletrônicas, tais como RCA, Raytheon, GE e indústrias expoentes no mercado como Texas e Transitron.

Muitas iniciaram a produção de transistor de ponto de contato, que nessa época, funcionava melhor em alta frequência do que os tipos de junção. No entanto, o transistor de junção torna-se rapidamente, muito superior em performance e é mais simples e fácil de se fabricar.

O transistor de ponto de contato ficou obsoleto por volta de 1953 na América e logo depois, na Inglaterra.

Somente alguns milhares foram fabricados entre 120 tipos, muitos americanos (não incluindo nestes números, versões experimentais).

O primeiro transistor de junção fabricado comercialmente era primitivo em comparação aos modernos dispositivos, com uma tensão máxima entre coletor-emissor de 6 volts, e uma corrente máxima de poucos miliampères.

Particularmente notável, foi o transistor CK722 da Raytheon de 1953, o primeiro dispositivo eletrônico de estado sólido produzido em massa disponível ao construtor amador. Vários tipos de transistor foram desenvolvidos, aumentando a resposta de frequência diminuindo os níveis de ruído e aumentando sua capacidade de potência.

Na Inglaterra, duas empresas mantiveram laboratórios de pesquisa não tão adiantadas quanto na América: Standard Telephones and Cables (STC) e a General Electric Company of England "GEC", (não tem relação com a GE americana). Foram feitas pesquisas na França e Alemanha sem efeitos comerciais.

Em 1950, um tubarão entra nessa pequena lagoa: a PHILIPS holandesa através da Mullard, sua subsidiária inglesa, com uma planta completa para industrializar o transistor.

A meta da Philips era dominar 95% do mercado europeu, alcançando esse objetivo em poucos anos. A série "OC" de transistor dominou a Europa por mais de 20 anos.

Os antigos transistores eram feitos de germânio, um semicondutor metálico, porém logo se descobriu que o silício oferecia uma série de vantagens sobre o germânio. O silício era mais difícil de refinar devido ao seu alto ponto de fusão, porém em 1955 o primeiro transistor de silício já era comercializado.

A Texas Instruments foi uma das empresas que mais tomou parte no desenvolvimento inicial dessa tecnologia, lançando uma série de dispositivos conhecidos na época pelas siglas "900" e "2S".

A grande reviravolta veio em 1954, quando Gordon Teal aperfeiçoou um transistor de junção feito de silício.

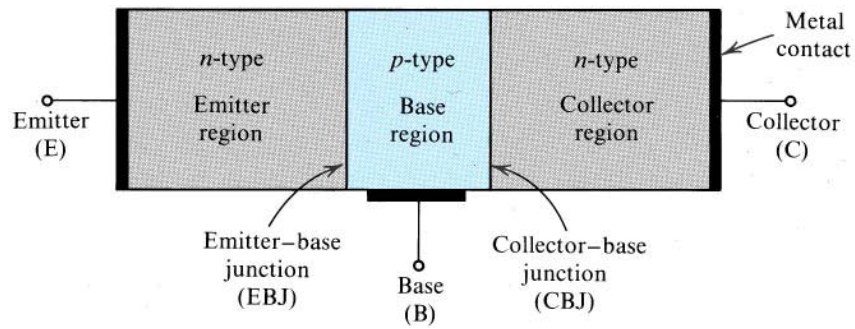
O silício, ao contrário do germânio, é um mineral abundante, só perdendo em disponibilidade para o oxigênio. Tal fato, somado ao aperfeiçoamento das técnicas de produção, baixou consideravelmente o preço do transistor. Isto permitiu que ele se popularizasse e viesse a causar uma verdadeira revolução na indústria dos computadores. Revolução tal que só se repetiria com a criação e aperfeiçoamento dos circuitos integrados.

O transistor é um componente eletrônico muito utilizado como comutador em Eletrônica Digital (funcionamento na região de corte e na de saturação). Na Eletrônica Analógica, aparece sobretudo, como dispositivo linear (funcionamento na região ativa).

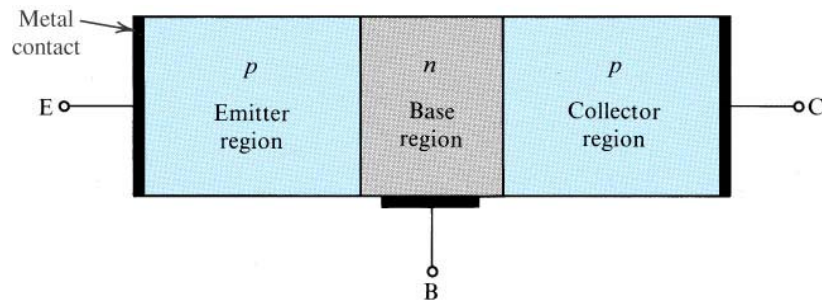
É alimentado por uma tensão constante entre 5 e 15 V (valores típicos para transistores como os utilizados no trabalho prático). Os transistores baseados na tecnologia bipolar são constituídos por 2 junções de material semicondutor pn com uma secção comum (a base). Existem 2 tipos: npn ou pnp conforme a base for do tipo p ou do tipo n (fig. 1). A matéria prima utilizada é normalmente o Silício (com menos frequência o Germânio).

Transistor de junção bipolar

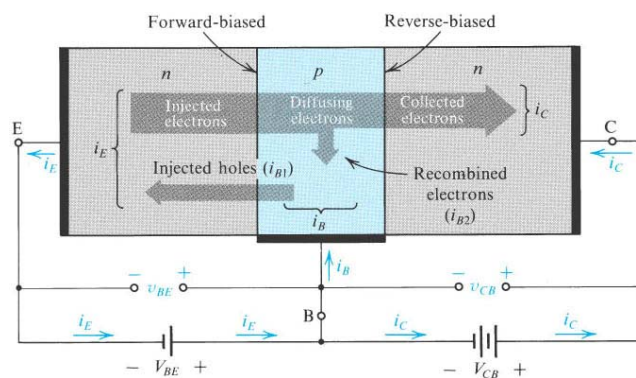
Transistor *npn*

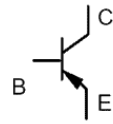
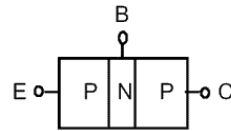


Transistor *pnp*

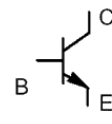
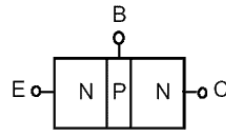


Operação do transistor npn na região ativa

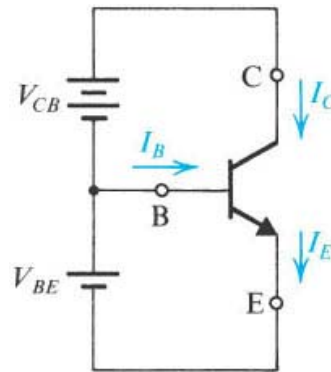
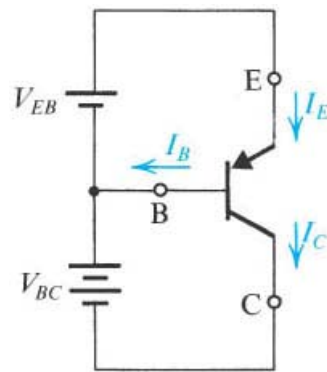




Transistor pnp



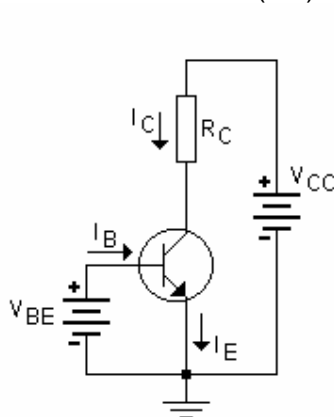
Transistor npn



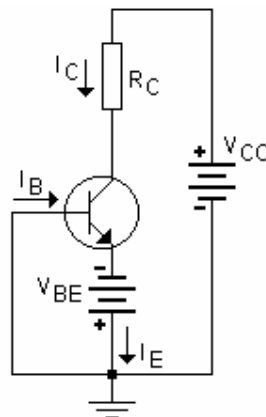
• MONTAGENS BÁSICAS DO TRANSISTOR

Os transistores podem ser ligados em 3 configurações básicas

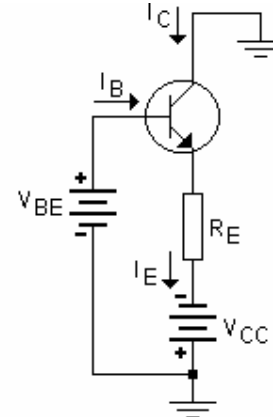
- o Base Comum (BC),
- o Emissor Comum (EC)
- o Coletor Comum (CC)



EMISSOR COMUM



BASE COMUM



COLETOR COMUM

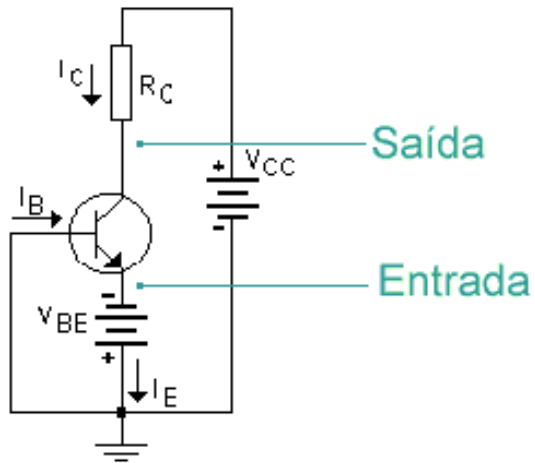
Essas denominações (Comuns) relacionam-se aos pontos onde o sinal é injetado e onde é retirado, ou ainda, qual dos terminais do transistor é referência para a entrada e saída de sinal.

As configurações emissor comum, base comum e coletor comum, são **também denominadas emissor a terra, base a terra e coletor a terra.**

CONFIGURAÇÕES BÁSICAS: **BASE COMUM**

Observa-se que o sinal é injetado entre emissor e base e retirado entre coletor e base.

Desta forma, pode-se dizer que a base é o terminal comum para a entrada e saída do sinal.

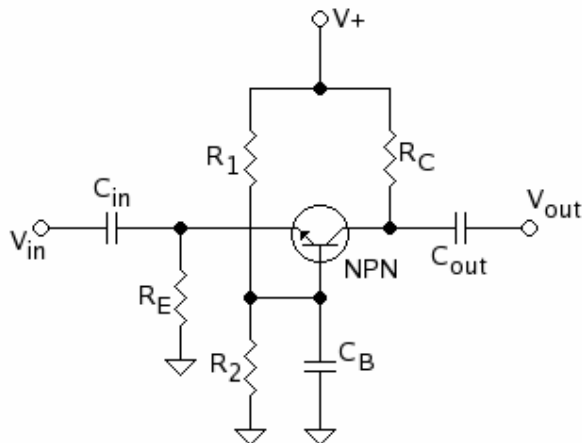
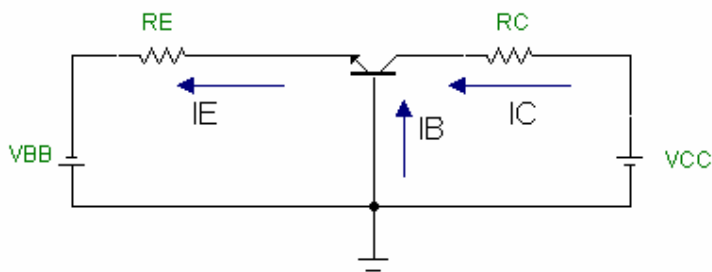


BASE COMUM

CARACTERÍSTICAS:

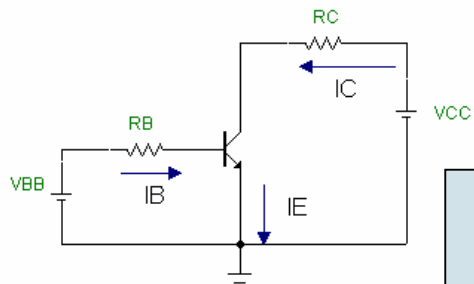
- Ganho de corrente (G_i): < 1
- Ganho de tensão (G_V): elevado
- Resistência de entrada (R_{IN}): baixa
- Resistência de saída (R_{OUT}): alta

Ligação Base Comum



CONFIGURAÇÕES BÁSICAS: EMISSOR COMUM

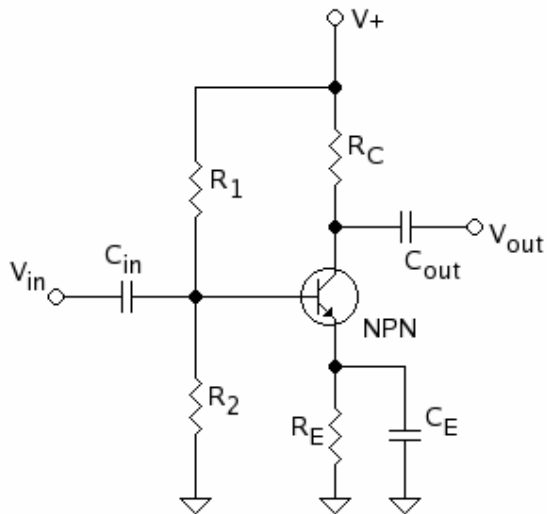
Ligação Emissor Comum



No circuito emissor comum, o sinal é aplicado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor.

CARACTERÍSTICAS:

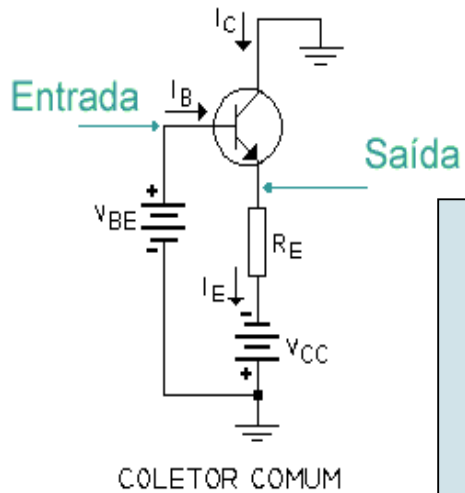
- Ganho de corrente (G_I): elevado
- Ganho de tensão (G_V) elevado
- Resistência de entrada (R_{IN}) média
- Resistência de saída (R_{OUT}) alta



CONFIGURAÇÕES BÁSICAS:

COLETOR COMUM

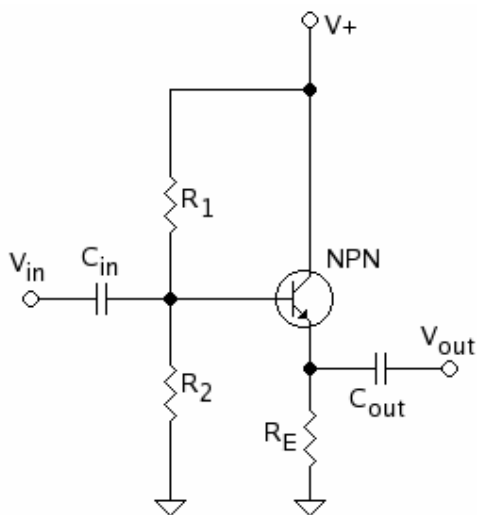
A configuração coletor comum também é conhecida como Seguidor de Emissor



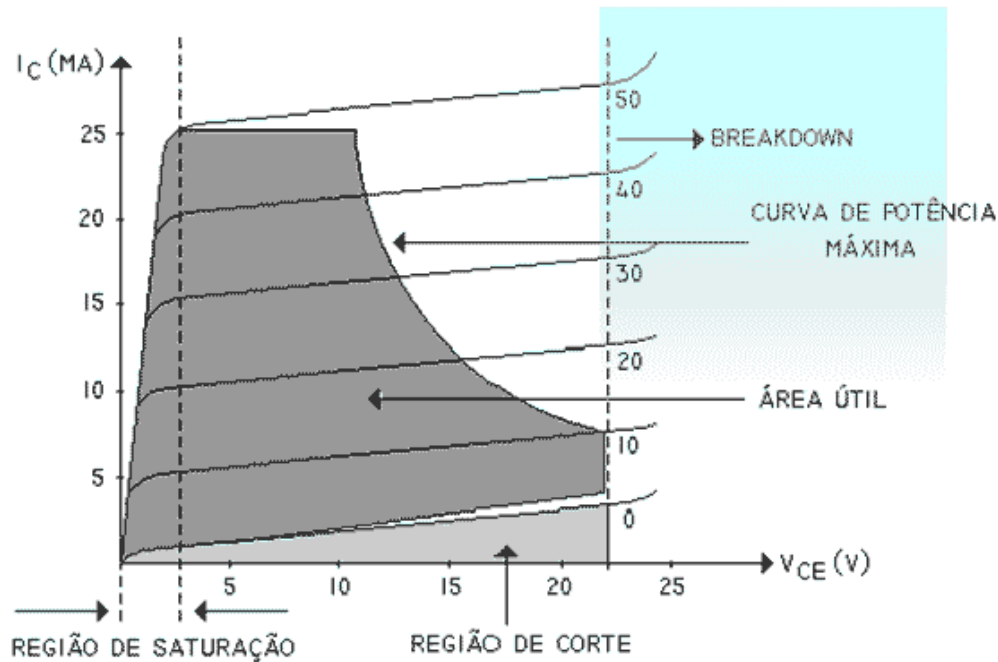
O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor.

CARACTERÍSTICAS:

- Ganho de corrente (G_i): elevado
- Ganho de tensão (G_V): ≤ 1
- Resistência de entrada (R_{IN}): muito elevada
- Resistência de saída (R_{OUT}): muito baixa



REGIÕES DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSISTOR



A parte inicial da curva é chamada de região de saturação. É toda a curva entre a origem e o joelho. A parte praticamente plana é chamada de **região ativa**. Nesta região uma variação do V_{CE} não influencia no valor da corrente de coletor (I_C). I_C mantém-se constante e igual a corrente de base vezes o ganho CC do transistor (β_{CC}) $I_C = I_B \cdot \beta_{CC}$. A parte final é a **região de ruptura** ou **Breakdown** e deve ser evitada.

Na região de saturação o diodo base-coletor está polarizado diretamente. Por isso, perde-se o funcionamento convencional do transistor, passa a simular uma pequena resistência ôhmica entre o coletor e emissor.

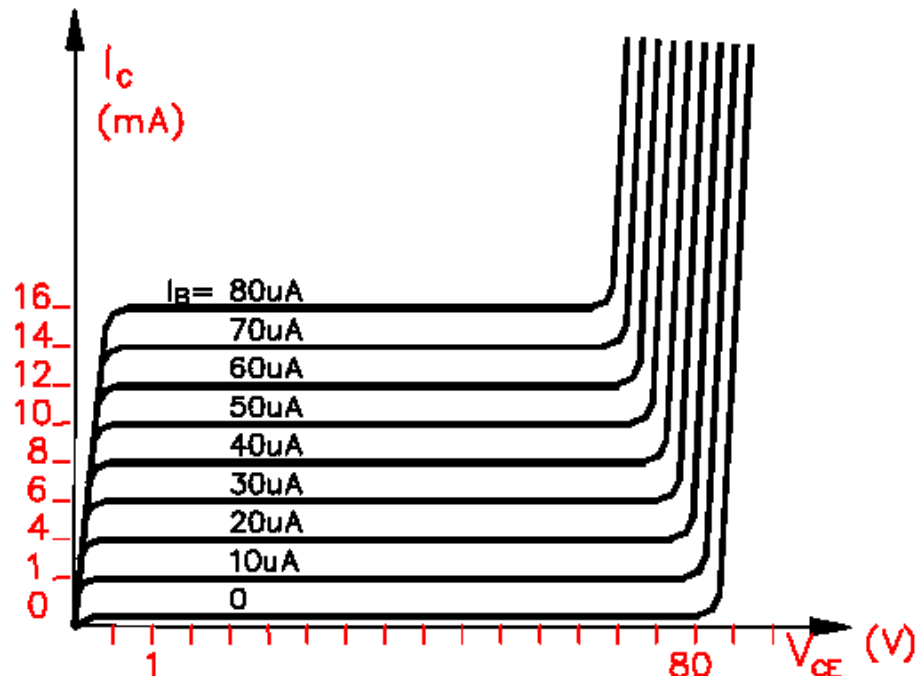
Na saturação não é possível manter a relação $I_C = I_B \cdot \beta_{CC}$.

Para sair da região de saturação e entrar na região ativa, é necessária uma polarização reversa do diodo base-coletor. Como a tensão V_{BE} na região ativa é de aproximadamente 0,7V, isto requer que a tensão coletor-emissor (V_{CE}) seja superior a 1V aproximadamente.

A região de corte é um caso especial na curva $I_C \times V_{CE}$. É quando $I_B = 0$ (equivale ao terminal da base aberto). A corrente de coletor com terminal da base aberto é designada pela corrente de coletor para emissor com base aberta (I_{CEO}).

Esta corrente é muito pequena, quase zero. Em geral se considera: Se $I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0$. Habitualmente o gráfico fornecido pelo fabricante leva em consideração diversos I_B 's.

Notar no gráfico acima que para um dado valor de V_{CE} existem diversas possibilidades de valores para I_C . Isto ocorre, porque é necessário ter o valor fixo de I_B . Então para cada I_B há uma curva relacionando I_C e V_{CE} .



No gráfico de exemplo acima, a tensão de ruptura está em torno de 80V e na região ativa para um $I_B=40\mu\text{A}$ tem-se que o $\beta_{CC} = I_C/I_B = 8\text{mA}/40\mu\text{A}=200$.

Mesmo para outros valores de I_B , o β_{CC} se mantém constante na região ativa.

Na realidade o β_{CC} não é constante na região ativa, ele varia com a temperatura ambiente e mesmo com I_C . A variação de β_{CC} pode ser da ordem de 3:1 ao longo da região ativa do transistor.

Os transistores operam na região ativa quando são usados como amplificadores.

Sendo a corrente de coletor (saída) proporcional a corrente de base (entrada), designam-se os circuitos com transistores na região ativa de circuitos lineares. As regiões de corte e saturação, por simularem uma chave controlada pela corrente de base, são amplamente usados em circuitos digitais.

RESUMINDO:

No funcionamento de um transistor distinguem-se 4 regiões (ou zonas): a região de corte, a zona ativa, a região de saturação e a região de ruptura, dependendo do modo como está polarizado.

- **FUNCIONAMENTO NA ZONA ATIVA**

Um transistor encontra-se a funcionar na zona ativa se tiver a junção base-emissor (BE) diretamente polarizada ($V_{BE} >$ tensão limiar), a junção base-coletor (BC) inversamente polarizada e $0 < V_{BC} < V_{CC}$ e $0 < V_{CE} < V_{CC}$.

Para os transistores de Silício o valor típico para a *tensão limiar* das junções PN é de 0.6V.

Na zona ativa o transistor comporta-se como um dispositivo linear estando a corrente na saída (I_C) relacionada com a corrente na entrada (I_B) através duma constante β_{CC} ($\beta_{CC} = I_C / I_B$).

β_{CC} é o *ganho estático de corrente do transistor*. Também se utiliza o transistor na zona ativa para amplificar pequenos sinais de tensão (variáveis no tempo), sendo neste caso o ganho da ordem das centenas.

- **FUNCIONAMENTO NAS REGIÕES DE CORTE E SATURAÇÃO**

Em Eletrônica Digital é importante a definição de 2 níveis bem distintos, a que se associam muitas vezes os valores lógicos "0" e "1" (ou "verdadeiro" e "falso"). O comportamento do transistor na região de corte e na de saturação pode, numa primeira aproximação, considerar-se em tudo idêntico ao dum interruptor (fig.4) aberto e fechado, respectivamente.

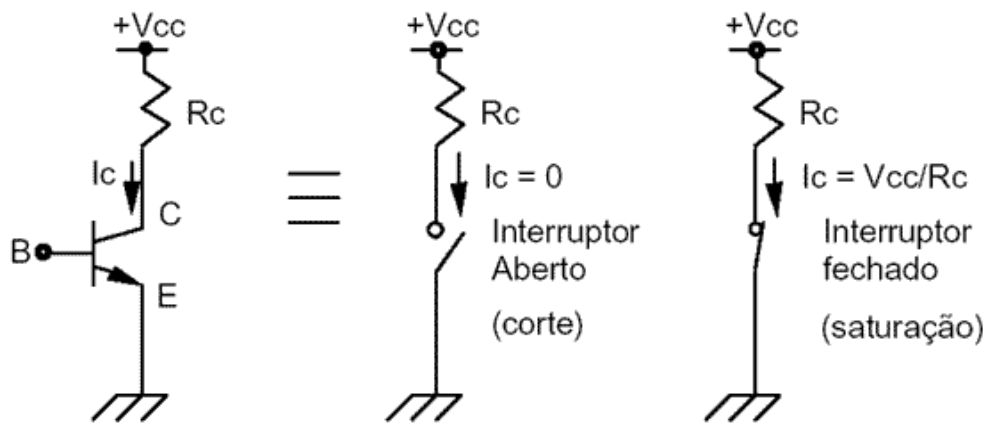


Fig. 4 - Funcionamento do transistor na Região de Corte e na de Saturação.

O funcionamento na **zona de corte** (interruptor aberto) caracteriza-se, pois pela ausência de corrente de coletor ($I_C = 0$) e conseqüentemente $V_{CE} = V_{CC}$. Para tal é necessário fazer $I_B \cong 0$.

No funcionamento na **zona de saturação** (interruptor fechado). Registra-se uma tensão V_{CE} praticamente nula (tipicamente da ordem de 0.2V para transistores de Silício), atingindo a corrente de coletor o seu valor máximo, limitado apenas pela resistência de coletor R_C ($I_C = V_{CC} / R_C$).

Para garantir a saturação é necessário que $I_C \ll \beta_{CC} * I_B$ e o valor da tensão base-emissor (V_{BE}) é tipicamente 0.7V (para os transistores de Silício).

- **A FUNCIONAMENTO NA REGIÃO DE RUPTURA (OU BREAKDOWN)**

A região de ruptura indica a máxima tensão que o **transistor pode suportar sem riscos de danos**.

POLARIZAÇÃO DE UM TRANSISTOR (Ponto Quiescente)

Os transistores são utilizados, principalmente, como elementos de AMPLIFICAÇÃO de corrente e tensão, ou como CONTROLE ON-OFF (liga-desliga). Tanto para estas, como para outras aplicações, o transistor deve estar polarizado.

Polarizar um transistor quer dizer escolher o seu ponto de funcionamento em corrente contínua, ou seja, definir a região em que vai funcionar.

A escolha do ponto quiescente (quiescent, motionless) é feita em função da aplicação que se deseja para o transistor, ou seja, ele pode estar localizado nas regiões de corte, saturação ou ativa da curva característica de saída.

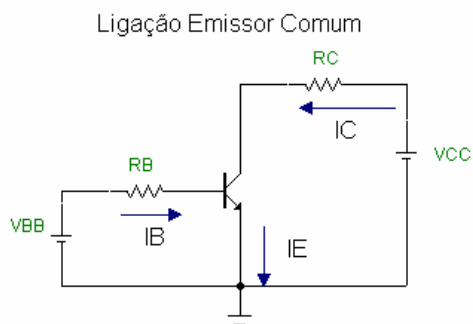
O método para determinação do Ponto de Operação é o mesmo do utilizado nos diodos, o da **Reta de Carga**.

RETA DE CARGA

A reta de carga é o lugar geométrico de todos os pontos quiescentes possíveis para uma determinada polarização.

1. CIRCUITO DE POLARIZAÇÃO EM EMISSOR COMUM (EC)

Nesta Configuração, a junção base-emissor é polarizada diretamente e a junção base-coletor reversamente. Para isso, utilizam-se duas baterias e dois resistores para limitar as correntes e fixar o ponto quiescente do circuito.



$$\text{Malha de entrada : } R_B \cdot I_B + V_{BE} = V_{BB}$$

$$\text{Portanto: } R_B = (V_{BB} - V_{BE}) / I_B$$

$$\text{Malha de saída : } R_C \cdot I_C + V_{CE} = V_{CC}$$

$$\text{Portanto: } R_C = (V_{CC} - V_{CE}) / I_C$$

Usa-se a reta de carga em transistores para obter a corrente I_C e V_{CE} considerando a existência de um R_C . Através da análise da malha a direita do circuito obtém-se a corrente I_C como mostrado abaixo:

$$I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$$

Nesta equação existem duas incógnitas, I_C e V_{CE} .

A solução deste impasse é utilizar o gráfico $I_C \times V_{CE}$. Com o gráfico em mãos, basta Calcular os extremos da reta de carga:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC} / R_C \Rightarrow \text{ponto superior da reta}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} \Rightarrow \text{ponto inferior da reta}$$

A partir da reta de carga e definido uma corrente I_B chega-se aos valores de I_C e V_{CE} .

Exemplo - No circuito da Figura acima, suponha $R_B = 500 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1500 \text{ }\Omega$ e $V_{CC} = V_{BB} = 15\text{V}$. Construa a reta de carga no gráfico da curva característica do transistor e determine I_C e V_{CE} de operação ou (quiescentes).

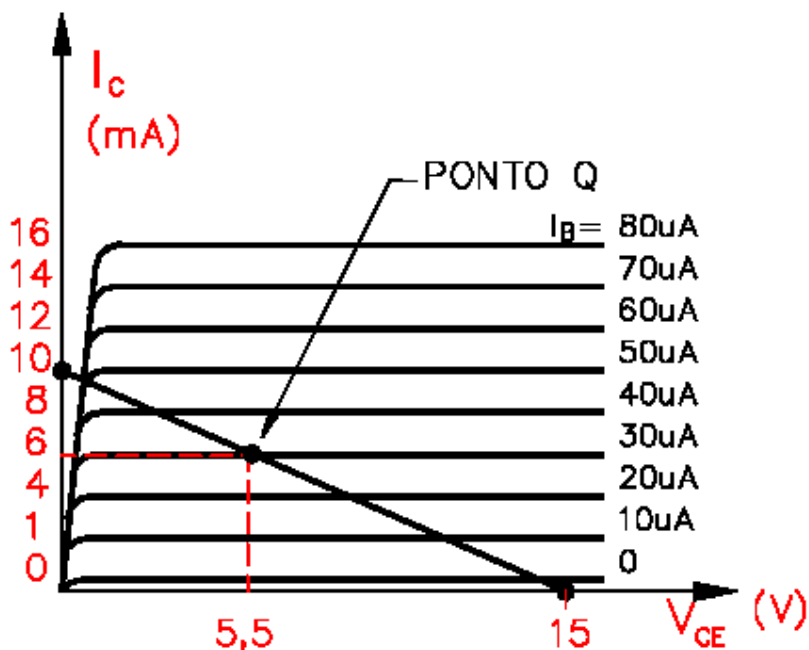
SOLUÇÃO: Os dois pontos da reta de carga são:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC} / R_C = 15 / 1\text{k}5 = 10\text{mA} \quad \text{ponto superior}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15\text{V} \quad \text{ponto inferior}$$

O corrente de base é a mesma que atravessa o resistor R_B :

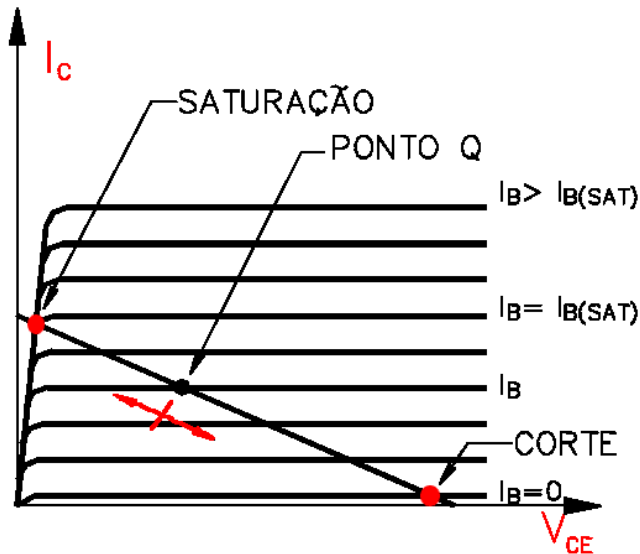
$$I_B = (15 - 0,7) / 500\text{k} = 29 \text{ }\mu\text{A}$$



Após traçar a reta de carga na curva do transistor chega-se aos valores de $I_C = 6\text{mA}$ e $V_{CE} = 5,5\text{V}$. Este é o ponto de operação do circuito (ponto Q - ponto quiescente).

O ponto Q varia conforme o valor de I_B . um aumento no I_B aproxima o transistor para a região de saturação, e uma diminuição de I_B leva o transistor região de corte. Ver Figura a seguir. O ponto onde a reta de carga intercepta a curva $I_B = 0$ é conhecido como corte. Nesse ponto a corrente de base é zero e corrente do coletor é muito pequena (I_{CEO}).

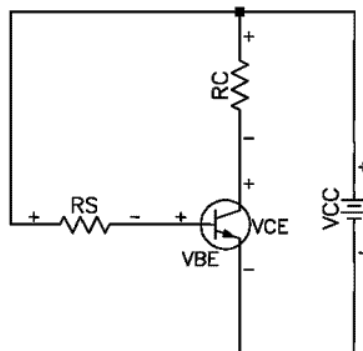
A interseção da reta de carga e a curva $I_B = I_{B(SAT)}$ é chamada saturação. Nesse ponto a corrente de coletor é máxima.



Teremos em nosso exemplo um I_{Cmax} de aproximadamente 9,8 mA.

Circuito de polarização EC com corrente de base constante

Na prática, não é interessante utilizar mais de uma fonte de alimentação para alimentar um circuito, a não ser em casos muito especiais. Para eliminar a fonte de alimentação da base V_{BB} , pode-se fazer um divisor de tensão entre o resistor de base R_S e a junção base-emissor, utilizando apenas a fonte V_{CC} como mostra a figura a seguir:



Para garantir a polarização direta da junção base-emissor, e reversa da junção base-coletor, R_S deve ser maior que R_C .

Malha de entrada: $R_S \cdot I_B + V_{BE} = V_{CC}$

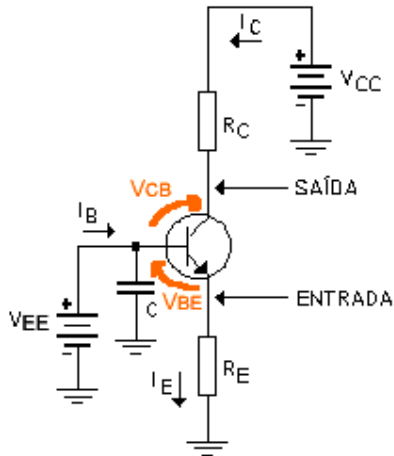
Portanto: $R_S = (V_{CC} - V_{BE}) / I_B$

Malha de saída: $R_C \cdot I_C + V_{CE} = V_{CC}$

Portanto: $R_C = (V_{CC} - V_{CE}) / I_C$

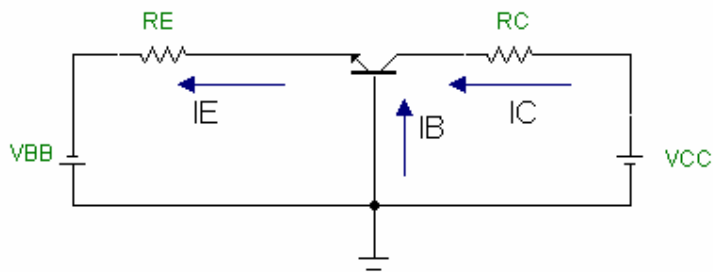
Neste circuito, como V_{CC} e R_S são valores constantes e V_{BE} praticamente não varia, a variação da tensão de base é desprezível. Por isso, este circuito é chamado de polarização EC com corrente de base constante.

2. Circuito de Polarização Base Comum



O capacitor "C" ligado da base a terra assegura que a base seja efetivamente aterrada para sinais alternados.

Ligação Base Comum



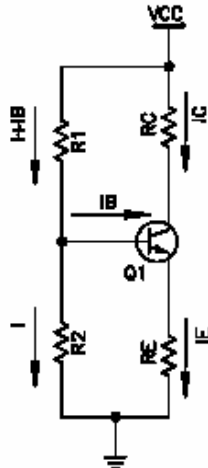
$$R_E = (V_{BB} - V_{BE}) / I_E$$

$$R_C = (V_{CC} - V_{CB}) / I_C$$

Lembrando que V_{BE} para transistor de silício = 0,7V e para transistor de germânio = 0,3V.

Circuito de Polarização BC com uma fonte de alimentação

Na prática, não é interessante utilizar mais de uma fonte de alimentação para alimentar um circuito, a não ser em casos muito especiais. Uma forma de solucionar este problema no circuito de polarização de base B_C , é colocar um divisor de tensão na base e alimentá-lo com uma única fonte V_{CC} , de modo que a tensão em R_2 faça o papel de $V_{BB} = V_{EE}$ do circuito de polarização anterior.



Para a análise da tensão em V_{R2} , observar que R_1 e R_2 formam um divisor de tensão. Supondo $I \gg I_B$:

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

* a tensão V_{R2} não depende de β_{CC}

De posse do valor de V_{R2} é simples o cálculo de I_E . Deve-se olhar a malha de entrada:

$$V_{R2} = V_{BE} + V_E$$

como: $V_E = I_E R_E$

$$I_E = \frac{V_{R2} - V_{BE}}{R_E}$$

Análise da malha de saída:

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

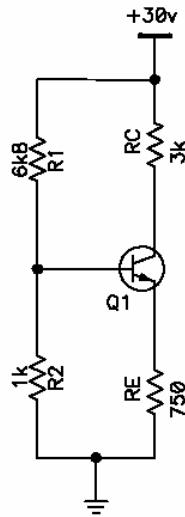
considerando $I_E = I_C$

$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

Notar que β_{CC} não aparece na fórmula para a corrente de coletor. Isto quer dizer que o circuito é imune a variações em β_{CC} , o que implica um ponto de operação estável. Por isso a polarização por divisor de tensão é amplamente utilizada.

EXEMPLO: Encontre o V_B , V_E , V_{CE} e I_E para o circuito da Figura abaixo:



SOLUÇÃO: Cálculo de V_{R2}

$$V_B = V_{R2} = \frac{1K}{6K8 + 1K} 30 = 3,85V$$

$$I_E = \frac{3,85 - 0,7}{750} = 4,2mA$$

cálculo de V_E

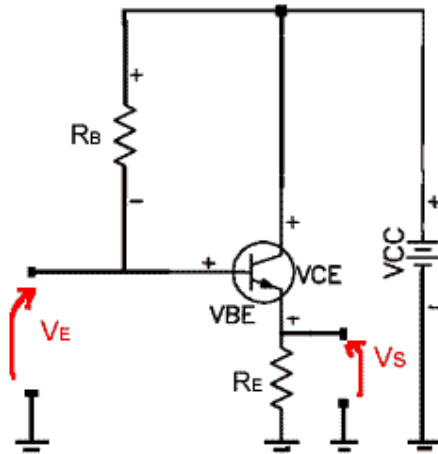
$$V_E = I_E R_E = 4,2m \cdot 750 = 3,15V$$

cálculo de V_{CE}

$$V_{CE} = 30 - 4,2m \cdot (3k + 750) = 14,3V$$

3. Circuito de Polarização em Coletor Comum (CC)

Para a polarização da configuração coletor comum, uma aplicação merece destaque. É o circuito Seguidor de Emissor.



Observa-se que, como não existe resistor de coletor, este terminal fica ligado diretamente ao pólo positivo da fonte de alimentação.

Porém, para sinais alternados, uma fonte de tensão constante é considerada um curto. Neste caso é como se o coletor estivesse conectado ao terminal comum ou terra da fonte de alimentação, ou seja, para sinais alternados, o coletor é comum às tensões de entrada V_E e saída V_S .

$$V_S = V_E - V_{BE}$$

Este circuito é chamado de seguidor de emissor porque a tensão de saída (tensão do emissor) segue as variações da tensão de entrada (tensão de base).

Outra característica deste circuito é que ele tem uma alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, sendo muito utilizado para fazer o **casamento de impedâncias** entre circuitos.

Malha de saída:

$$R_E = (V_{CC} - V_{CE}) / I_E$$

Malha de entrada:

$$R_B = (V_{CC} - V_{BE} - R_E * I_E) / I_B$$