

AULA: 07 - Transistor

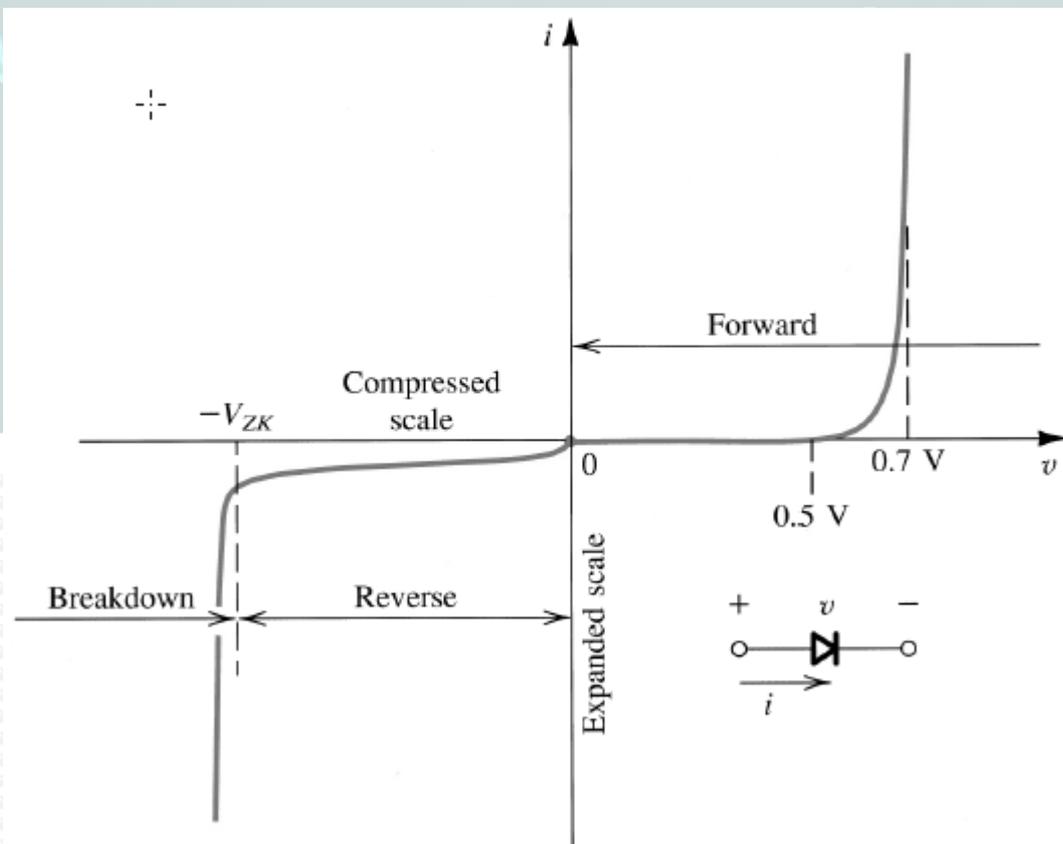
O transistor é um elemento ativo e principal da eletrônica. Sendo um elemento ativo o transistor é utilizado ativamente na construção dos circuitos lineares e digitais. Os transistores podem ser dos tipos: junção conhecido como bipolar, unijunção e de efeito de campo. Possui limitações em frequências, tensões e potências. O objetivo no estudo dos transistores é conhecer essas limitações e reunir condições para projeto com esse dispositivo. O estudo deve iniciar com transistor bipolar observando a física do semicondutor, curvas características e polarizações em corrente contínua. Estudar as regiões de operações dos transistores no corte, ativa e saturação e estudo do inversor digital.

7.1 DIODO DE JUNÇÃO.

Antes de estudar a tecnologia de implementação do transistor um estudo rápido de uma junção:

a) Características elétricas nos diodos de junção.

A figura a seguir mostra numa escala expandida a relação $i - v$ do diodo.



A curva característica do diodo apresenta 3 regiões de operações distintas a saber:

- Região de polarização direta, definida em $v > 0$;
- Região de polarização reversa definida em $v < 0$ e
- Região de ruptura definida por $v < -V_{ZK}$.

a.1) Para a região de polarização direta.

Na região de polarização direta $v > 0$ a relação $i - v$ é aproximadamente por:

$$i = I_S (e^{\frac{v}{nV_T}} - 1)$$
, onde I_S é a corrente de saturação e é uma corrente proporcional à seção transversal do diodo. É uma função da temperatura, da tensão V_T chamada de tensão térmica e é dada por:

$$V_T = \frac{kT}{q}$$
, onde k é a constante de Boltzmann e igual a $1,38 \times 10^{-23}$ joules/kelvin e

T é igual a temperatura absoluta em kelvin igual a 273 mais a temperatura em Celsius e q é o valor da carga do elétron e igual a $1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb.

Na temperatura de 20°C o valor de $V_T = 25,2\text{mV}$. A constante n tem o valor entre 1 e 2, dependendo do material e da estrutura física do diodo.

a.2) Para a região de polarização reversa.

Na região de polarização reversa $v < 0$ o termo exponencial é desprezível e a relação $i - v$ é aproximadamente por:

$$i = -I_S,$$

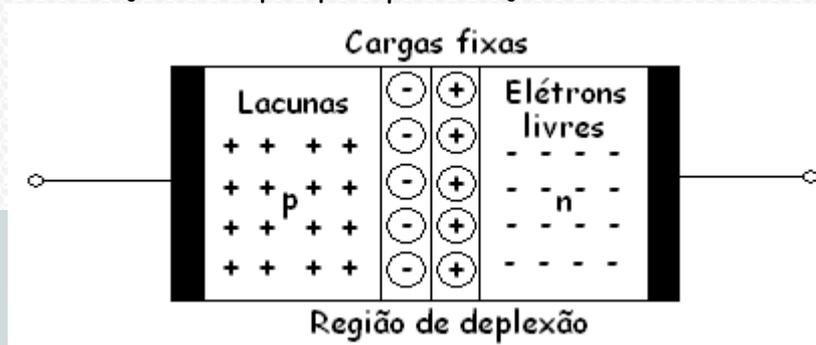
a.3) Região de ruptura.

Na região de ruptura a tensão reversa excede a tensão reversa do diodo e é chamada de tensão de ruptura. Essa tensão no "joelho" é chamada de V_{ZK} , onde Z é chamada de Zener e k é de joelho (Knee). Nessa região a corrente reversa aumenta muito e a queda de tensão é praticamente a mesma. Se a potência dissipada for controlada no diodo, não há danos no dispositivo.

b) Conceitos básicos de uma junção PN.

Para compreender o diodo, o transistor bipolar e o transistor de efeito de campo de junção são necessários entender a física de uma junção.

b.1) A junção PN condição sem qualquer polarização.



Corrente de difusão I_D - Pelo fato de ser alta a concentração de lacunas no lado p e baixa no lado n, as lacunas se difundem através da junção do lado p para o lado n, de maneira similar os elétrons tem alta concentração no lado n e baixa no lado p, os elétrons se difundem através da junção do lado n para o lado p. Essas duas correntes de difusões se somadas formam a corrente de difusão I_D cujo sentido é do lado p para o lado n.

Região de depleção - Tanto as lacunas como os elétrons quando se difundem através da junção se recombinam com elétrons livres e lacunas. Esse processo de recombinação tanto das lacunas como de elétrons não consegue mais neutralizar as lacunas e os elétrons e assim haverá uma região depletada de elétrons livres e de lacunas contendo cargas fixas positivas e negativas.

b.2) A junção PN condição reversa.

A corrente I será constituída por elétrons circulando pelo circuito externo do material n para o material p (sentido oposto ao de I). Isso faz com que elétrons deixem o material n e lacunas deixem o material p. Isso acarreta um aumento nas cargas fixas e um aumento na zona de depleção. Isso resulta numa tensão maior na zona de depleção e é uma barreira de potencial maior que faz com que a corrente I_D diminua, tal que: $I_S - I_D = I$.

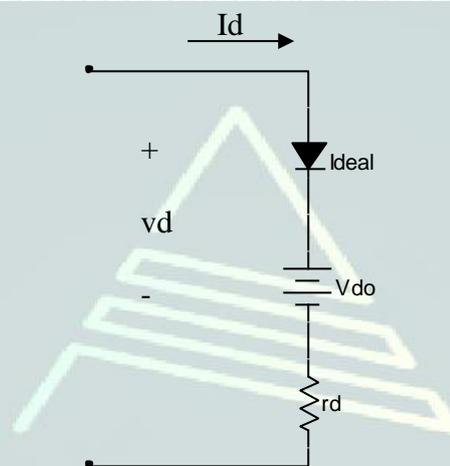
b.3) A junção PN condição direta.

Passando uma corrente no sentido direto de p para n resulta no fornecimento de portadores majoritários em ambos os lados da junção pelo circuito externo. Essa

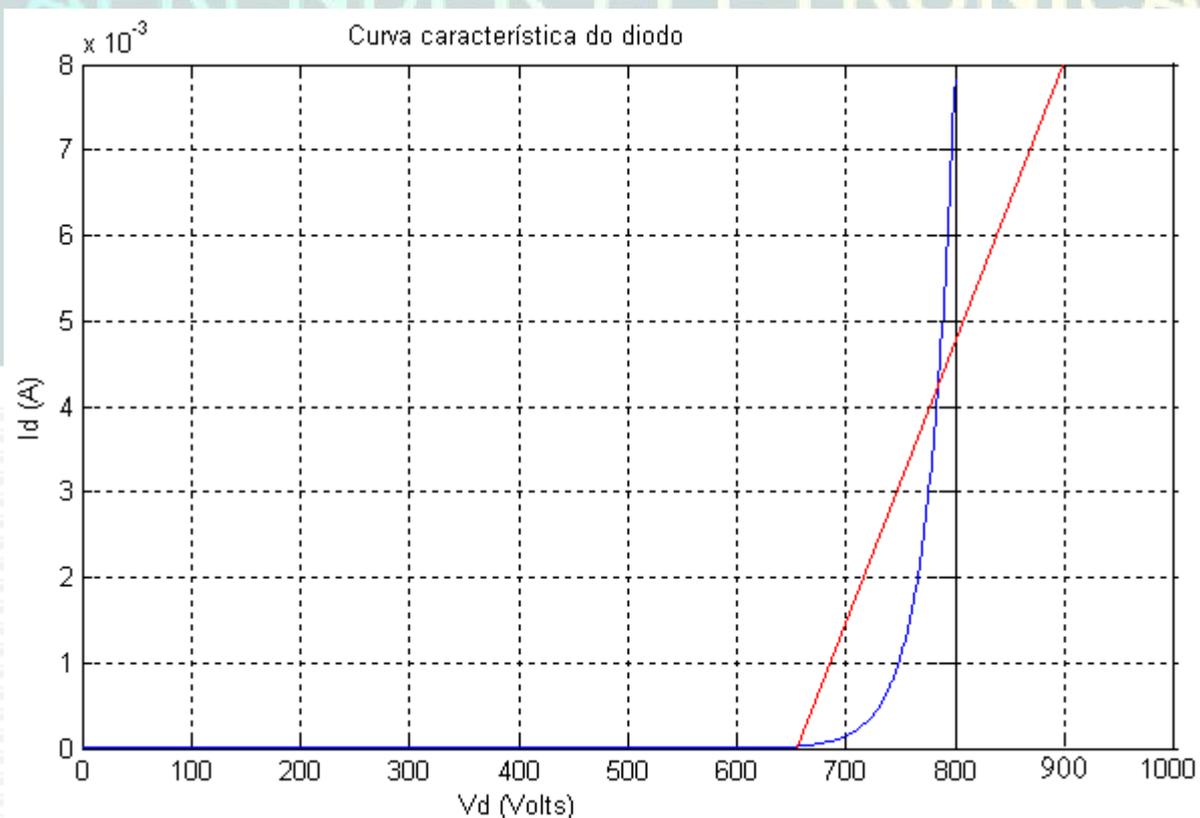
neutralização das cargas fixas diminui a tensão de barreira de potencial e consequentemente um aumento na corrente I_D , tal que $I = I_D - I_S$.

c) Modelo simplificado do diodo.

A característica exponencial do diodo é apresentada na figura a seguir e o ponto onde a reta cruza o eixo da tensão v_d é V_{do} é a tensão equivalente a uma bateria em série com a resistência r_d , equivalente à inclinação da reta $1/r_d$. O modelo de segmentos lineares da característica e representação do diodo é apresentado a seguir.



Representação do modelo equivalente de um diodo

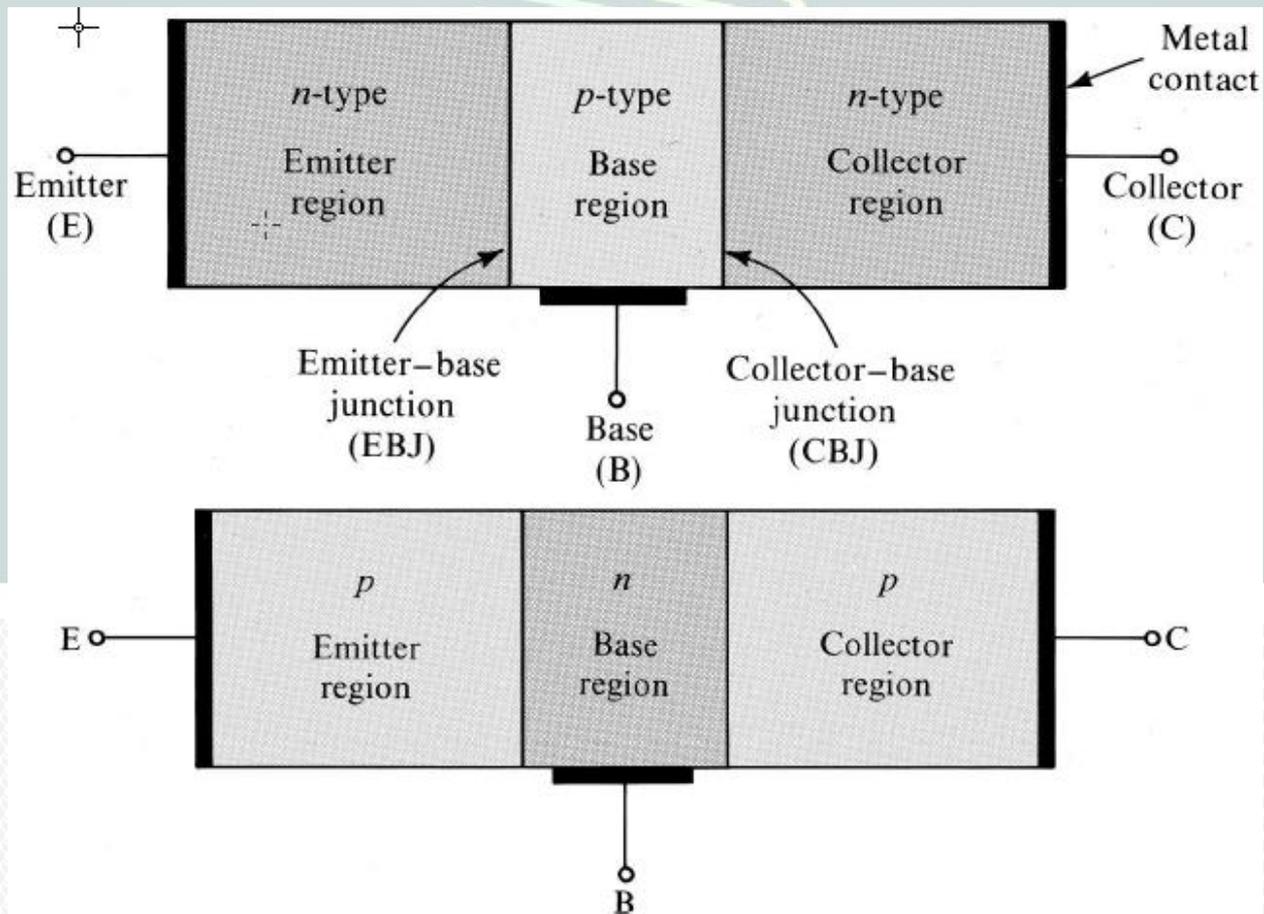


7.2 TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (TJB)

O transistor bipolar de junção conhecido como TJB tem esse nome por possuir 2 junções a saber: base-coletor e base-emissor e a condução são elétrons e lacunas. Um transistor bipolar possui 3 regiões semicondutoras: para um transistor do tipo NPN as regiões são: a região do emissor (tipo n), a região da base (tipo p) e a região do coletor (tipo n). Um terminal denominado de emissor (E), base (B) e coletor (C). O transistor tem 2 junções PN sendo base-emissor e base-coletor. Dependendo da condição de polarização das junções permite diferentes modos de operações do transistor. O transistor operando na região ativa é uma aplicação do transistor como amplificador (região linear) e nas regiões de corte e saturação é uma aplicação de chaveamento usado em circuitos lógicos digitais.

Estrutura física e modos de operação do transistor (TJB)

Os tipos de transistores NPN e PNP são apresentados a seguir.

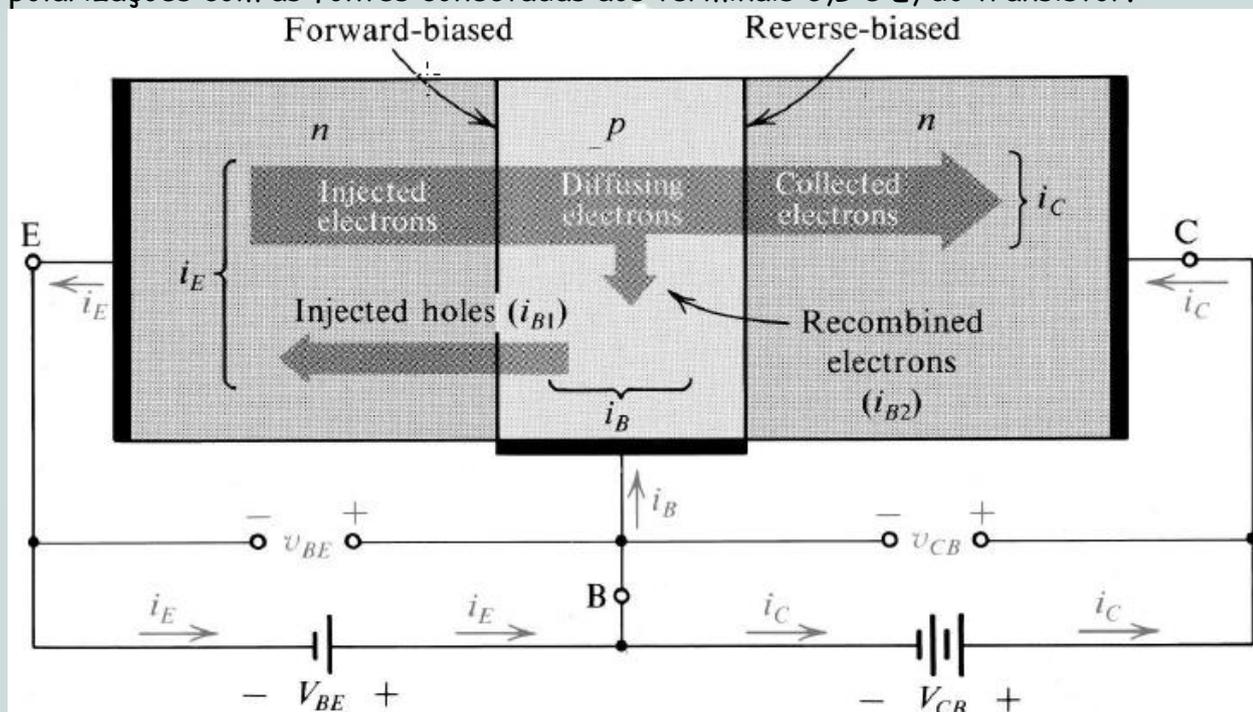


Os modos de operação do TJB.

Modo	JEB	JCB
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Saturação	Direta	Direta

7.3 MODO DE OPERAÇÃO NPN MODO ATIVO

No modo ativo foram introduzidas 2 fontes de tensões: uma polarizando diretamente o terminal da base em relação ao terminal de emissor (V_{BE}) e a segunda fonte conectando o terminal de coletor e a base (V_{BC}). A junção B-E é polarizada diretamente e a junção B-C é reversamente polarizada. A figura a seguir mostra as polarizações com as fontes conectadas aos terminais C, B e E, do transistor.



a) O fluxo de corrente

- As correntes de deriva devidas aos portadores minoritários gerados termicamente são pequenas e desprezadas na análise;
- A polarização direta da junção emissor-base fará com que uma corrente circule pela junção composta de 2 componentes: elétrons injetados no emissor e lacunas injetadas na base;
- A componente de elétrons é muito maior que a de lacunas, isto é obtido usando-se um emissor fortemente dopado e uma base levemente dopada e bem estreita;

- O fato de a base ser muito estreita faz com que os elétrons injetados na base se difundam (corrente de difusão) em direção ao coletor;
- No caminho, alguns elétrons que estão se difundindo através da região da base se recombinam com as lacunas (portadores majoritários na base), mas como ela é muito estreita e fracamente dopada, a porcentagem de elétrons perdidos por recombinação é muito pequena.

b) A corrente de coletor

- A maioria dos elétrons que se difundem alcançará a região de depleção coletor-base;
- Pelo fato do coletor ser mais positivo que a base, esses elétrons serão arremessados através da região de depleção para o coletor, constituindo a

$$\text{corrente de coletor } i_c = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}};$$

- Observe que o valor de i_c independe de V_{CB} ;
- A corrente de saturação I_S é inversamente proporcional à largura da base e diretamente proporcional à área de JEB, dobrando a cada $5^\circ C$ de aumento de temperatura.

c) A Corrente de Base

- A corrente de base pode ser representada por uma parcela de i_c tal que

$$i_B = \frac{i_c}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

- A constante β , denominada **ganho de corrente de emissor comum**, é um dos parâmetros característicos de um transistor;
- Para transistores modernos, β fica na faixa de 100 a 200, podendo chegar a 1000 em dispositivos especiais.

d) A Corrente de Emissor

- É a soma da corrente de coletor com a corrente de base.

$$i_E = i_C + i_B = i_C + \frac{i_C}{\beta} = i_C \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = i_C \frac{\beta + 1}{\beta}$$

- Define-se $i_C = \alpha \cdot i_E$, onde $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$ ou $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$.
- Observe que se $\beta = 100$, então $\alpha \cong 0,99$;
- α é chamado de ganho de corrente em base comum.

$$\alpha = \frac{\beta / \beta}{1 / \beta + 1} = \frac{1}{1 / \beta + 1} \Rightarrow \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\alpha} - 1 = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

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

RESUMO DE FÓRMULAS.

1. $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$ (I_{CBO} é corrente de fuga)
2. $I_C = \beta I_B + I_{CBO}$.
3. $I_E = I_C + I_B$.
4. $I_E = (\beta + 1)I_B$.
5. $I_E = 1 / (1 - \alpha) \cdot I_B$.
6. $V_{BE} + V_{CB} = V_{CE}$.
7. $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$.