

# FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA

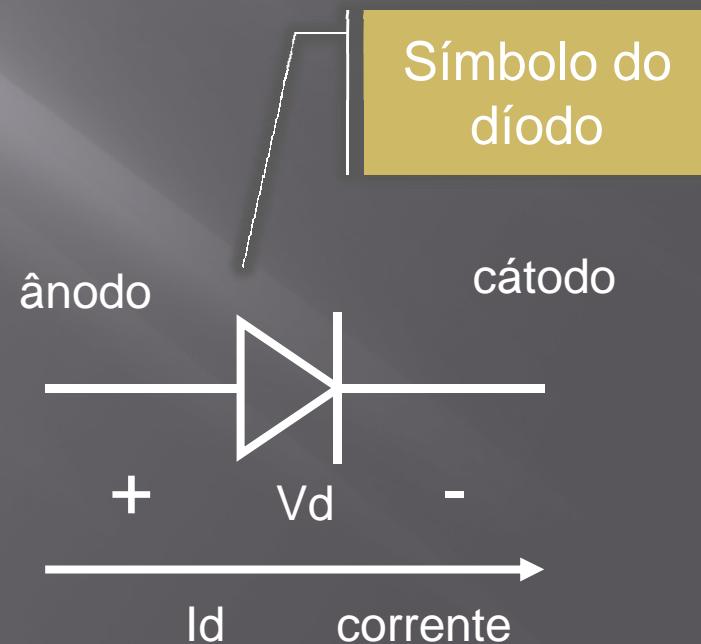
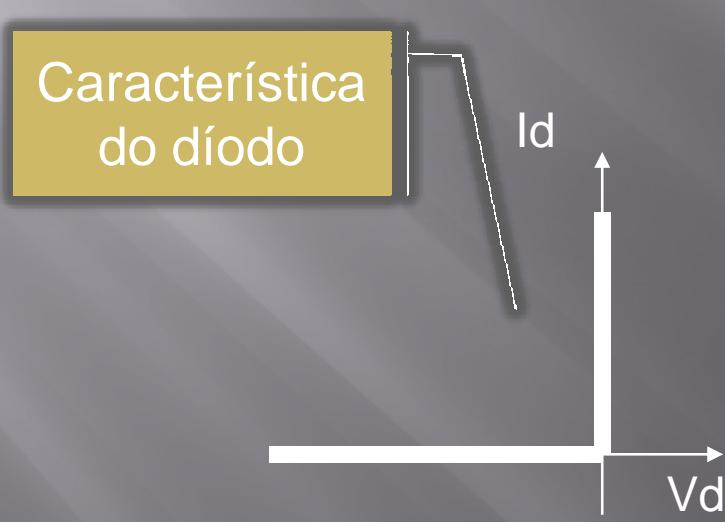
Díodos

# Díodos

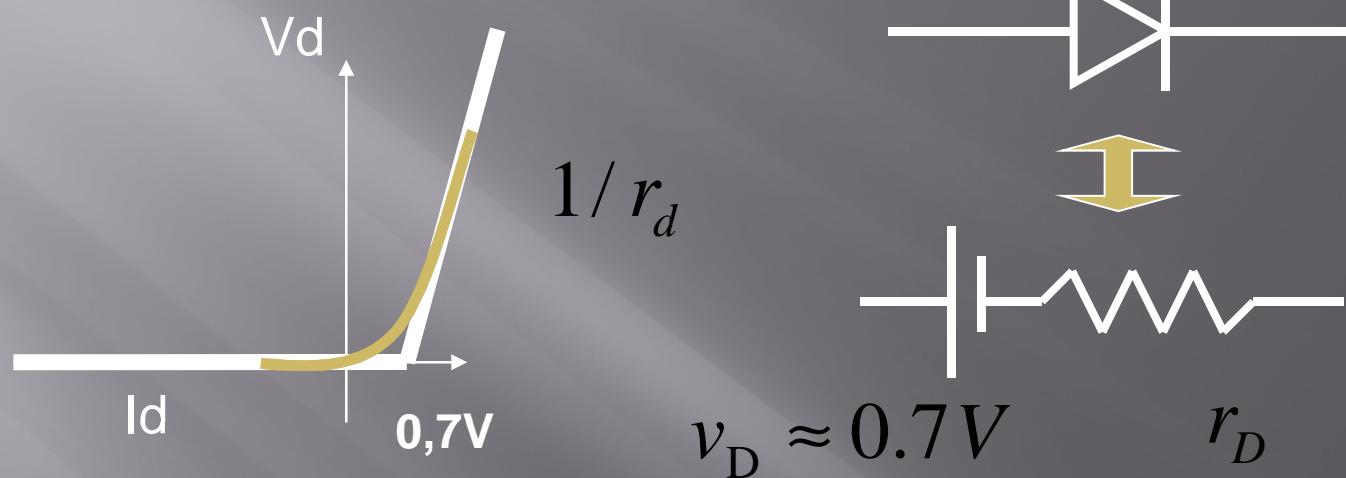
- O díodo ideal
- Noções sobre o funcionamento do díodo semicondutor
- Equações aos terminais
- Modelo de pequenos sinais

# O Díodo Ideal

- Um díodo é um componente que só permite a passagem de corrente num sentido.
- (Simbolicamente é comparado a uma válvula de retenção)

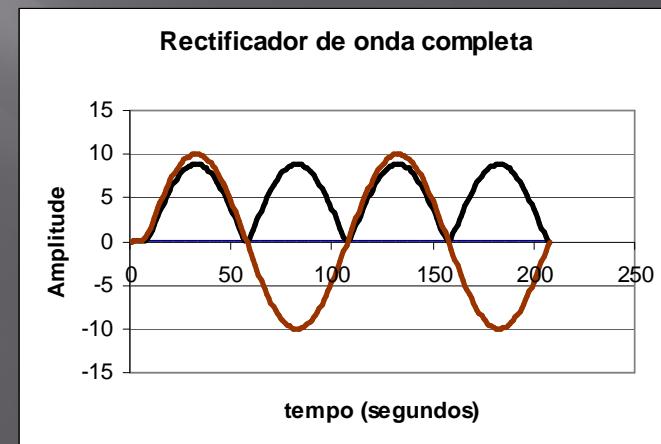
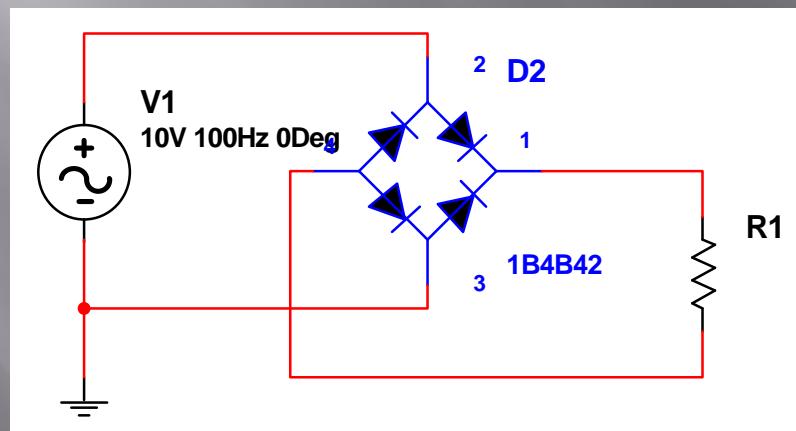
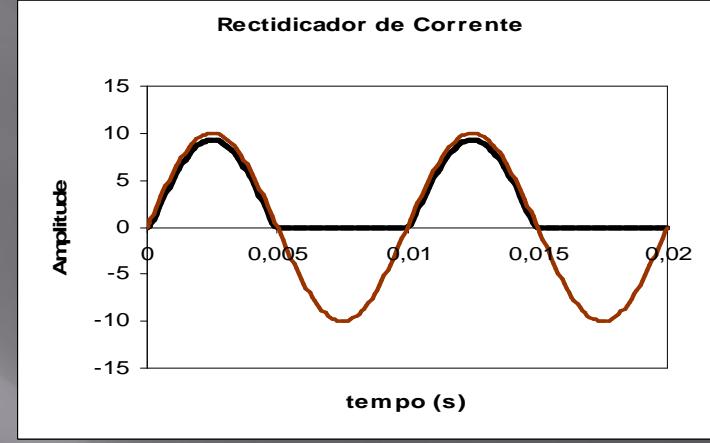
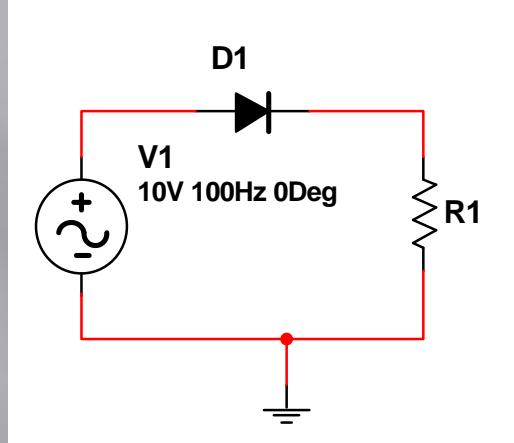


# Modelo simplificado



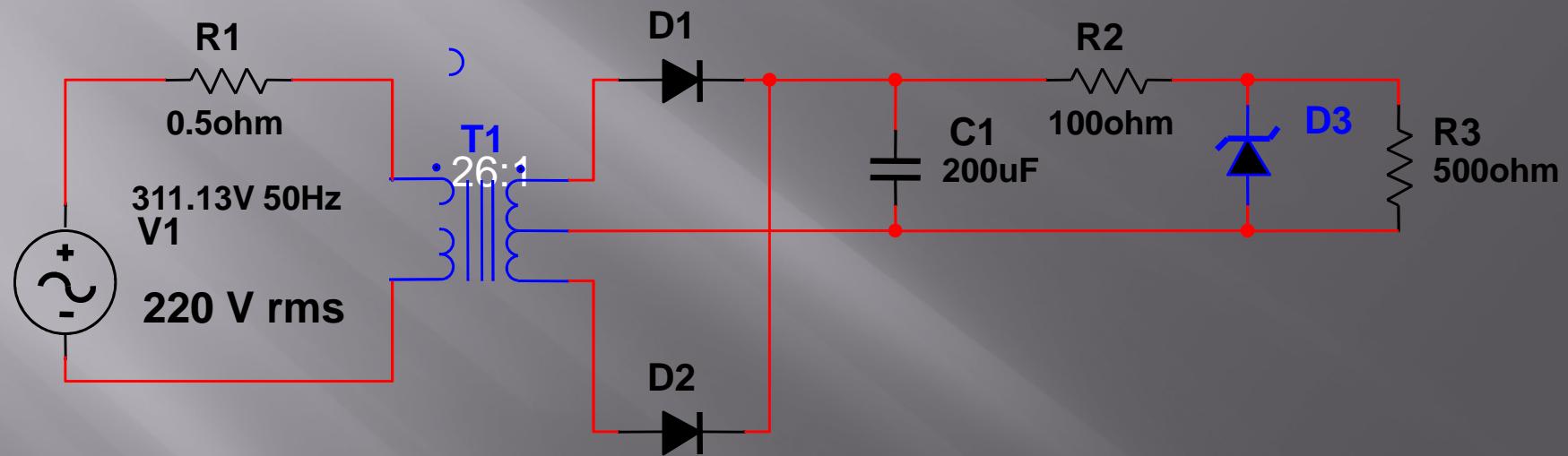
- Devido ao carácter exponencial da característica do díodo  $V_d$  pode ser bem aproximado a  $0.7V$  para um grande gama de valores de  $I_s$  e correntes.
- A resistência  $r_d$  assume normalmente valores reduzidos

# Rectificador de corrente

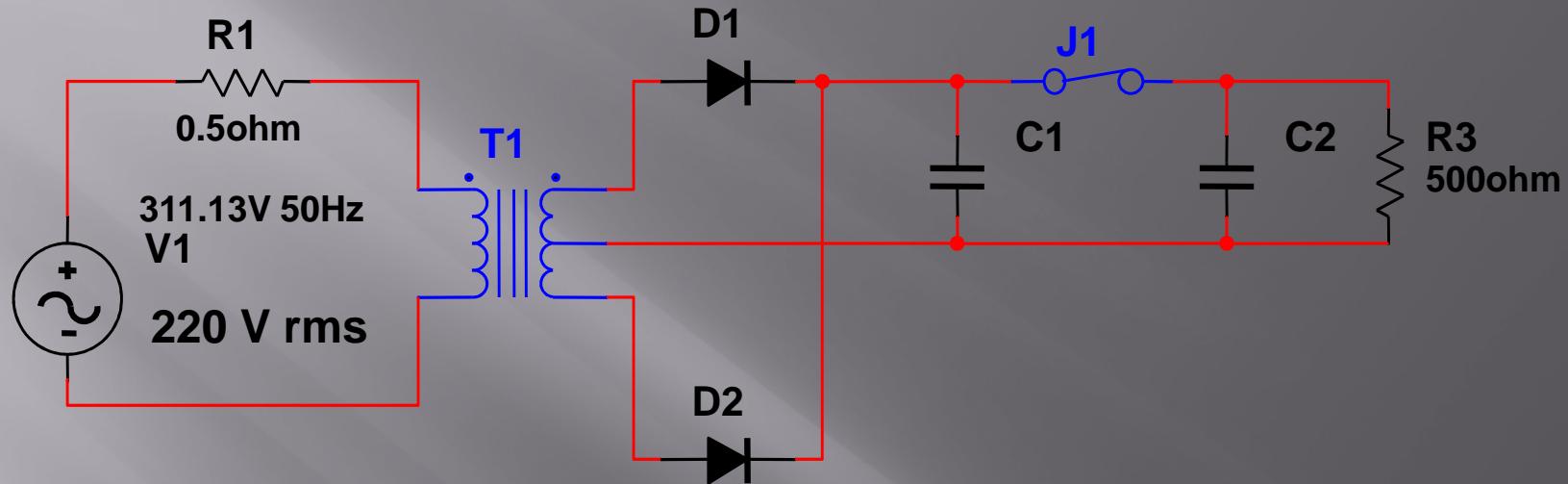


Nota: a massa na saída não é igual à massa na entrada

# Fonte linear



# Fonte comutada



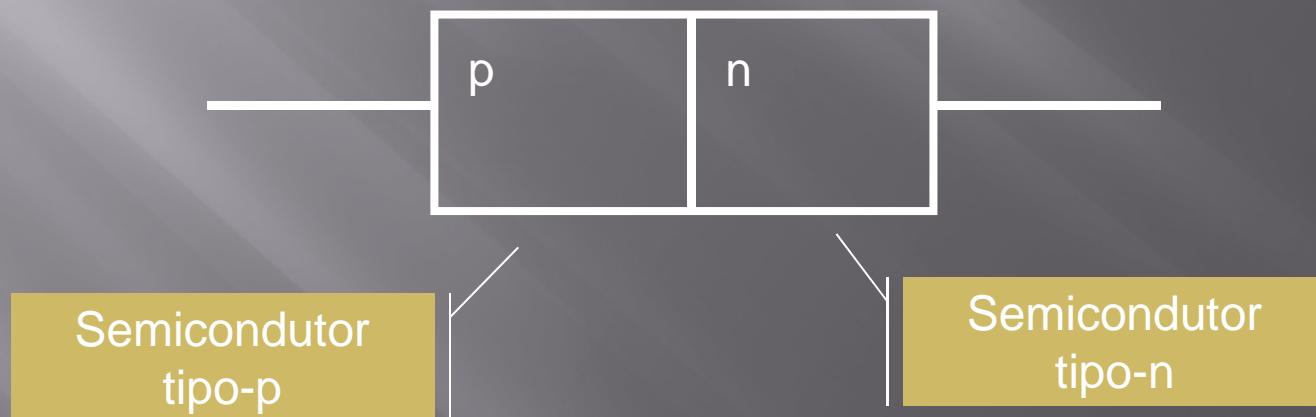
Um exemplo muito simples de uma fonte comutada  
(conversor AC/DC).

Sempre que o a tensão em  $C_2$  baixe dos 5V  $J_1$  liga e desliga quando subir acima dos 5V. O interruptor liga e desliga com uma frequência elevada de forma a manter uma tensão continua de 5V na saída.

# A Junção p-n

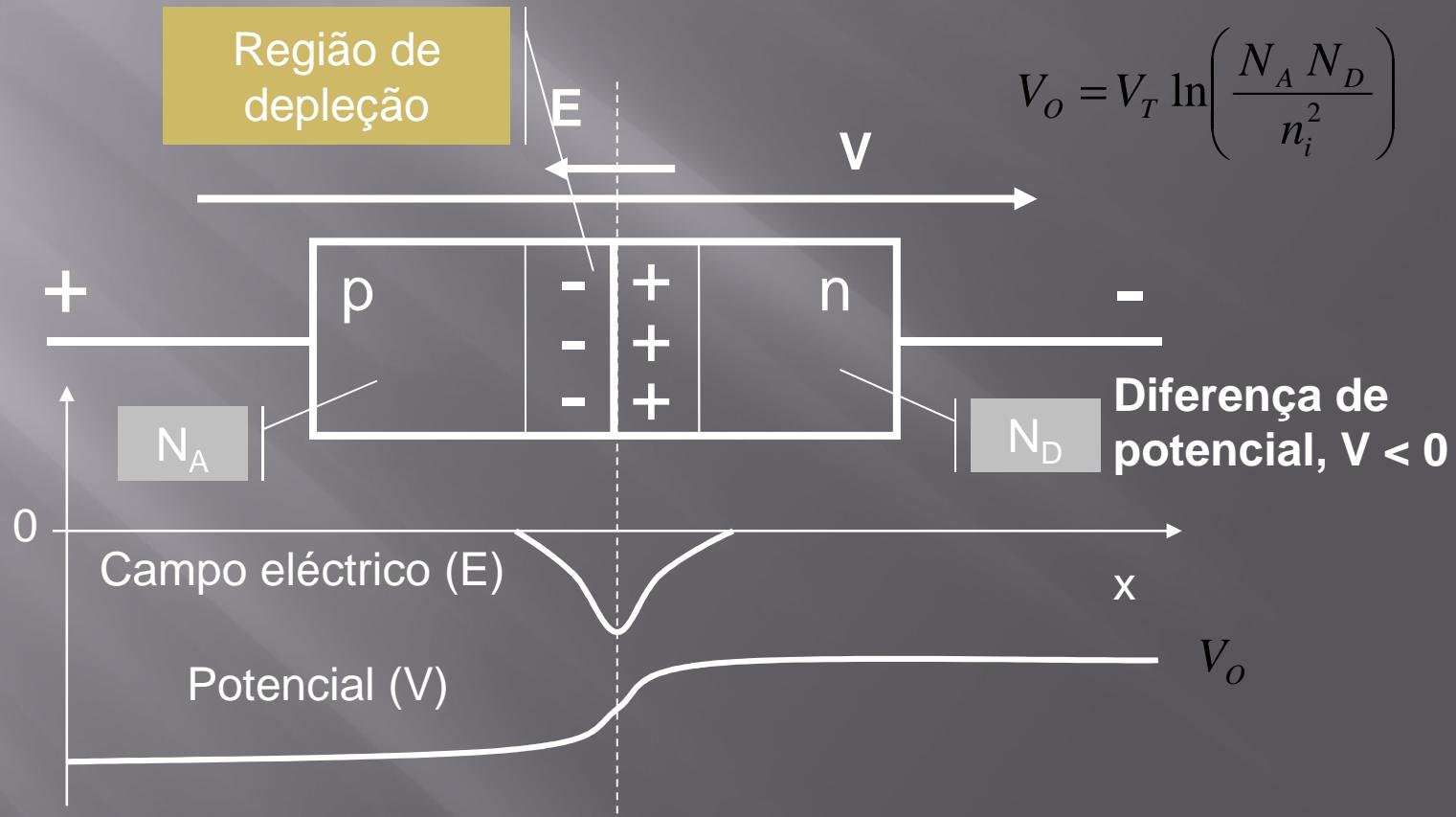
## ■ Junção p-n

- É uma aproximação do díodo real.
- Constituída pela junção de dois materiais semicondutores, **tipo-p** e **tipo-n**.

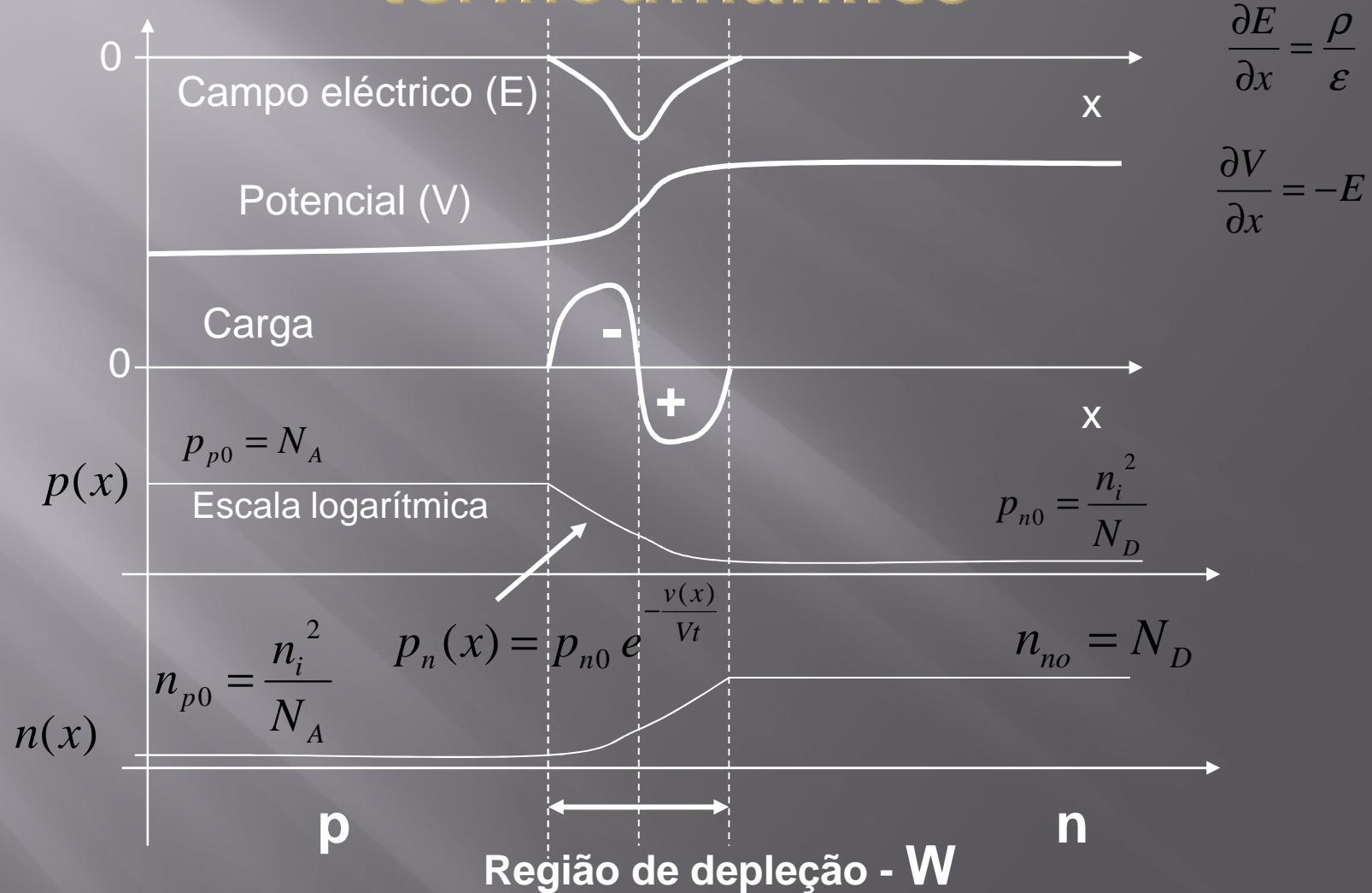


# A junção p-n em equilíbrio termodinâmico

- A junção dos dois semicondutores produz uma corrente de difusão de electrões livres e de lacunas de tal forma que se forma uma barreira de potencial.



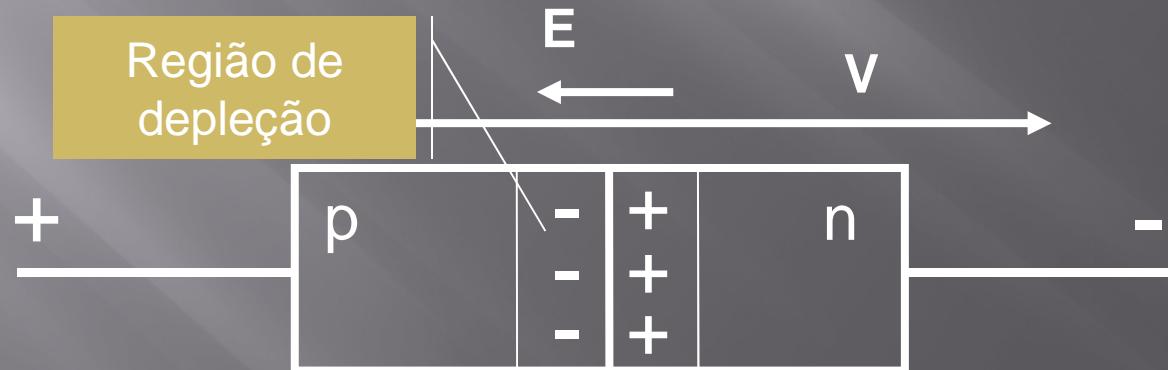
# A junção p-n em equilíbrio termodinâmico



# Região de depleção

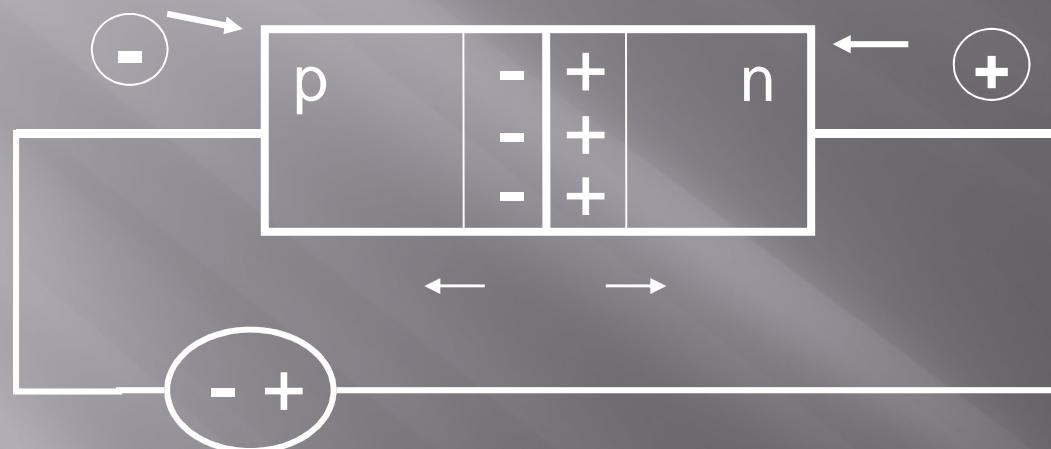
- Devido à recombinação entre electrões e livres e lacunas existe uma região em que a concentração destes está bastante abaixo do restante:

Região de depleção  
ou região de transição



# Junção polarizada inversamente

## ■ Polarização inversa



- Provoca o alargamento da região de depleção e o aumento da barreira de potencial, até bloquear a passagem da corrente.
- Funciona como um condensador cuja carga é armazenada na região de depleção.

# Junção polarizada directamente

## ■ Polarização directa



- Provoca o estreitamento da região de depleção e a diminuição da barreira de potencial. Facilita a passagem da corrente.

# Equações aos terminais

$$i_d = I_S \left( e^{\frac{v_d}{nV_t}} - 1 \right)$$

$$I_s = A q n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

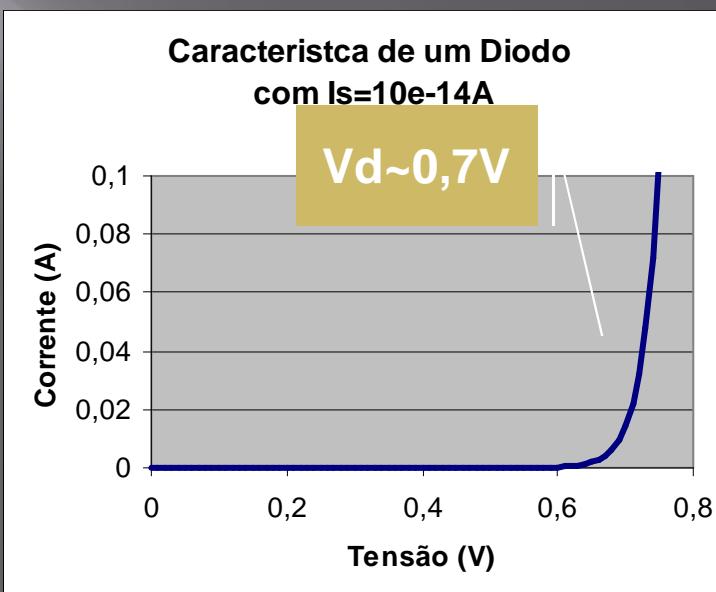
Tempo de vida médio

Comprimento  
de difusão

$I_S$  – corrente

de saturação

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25mV$$

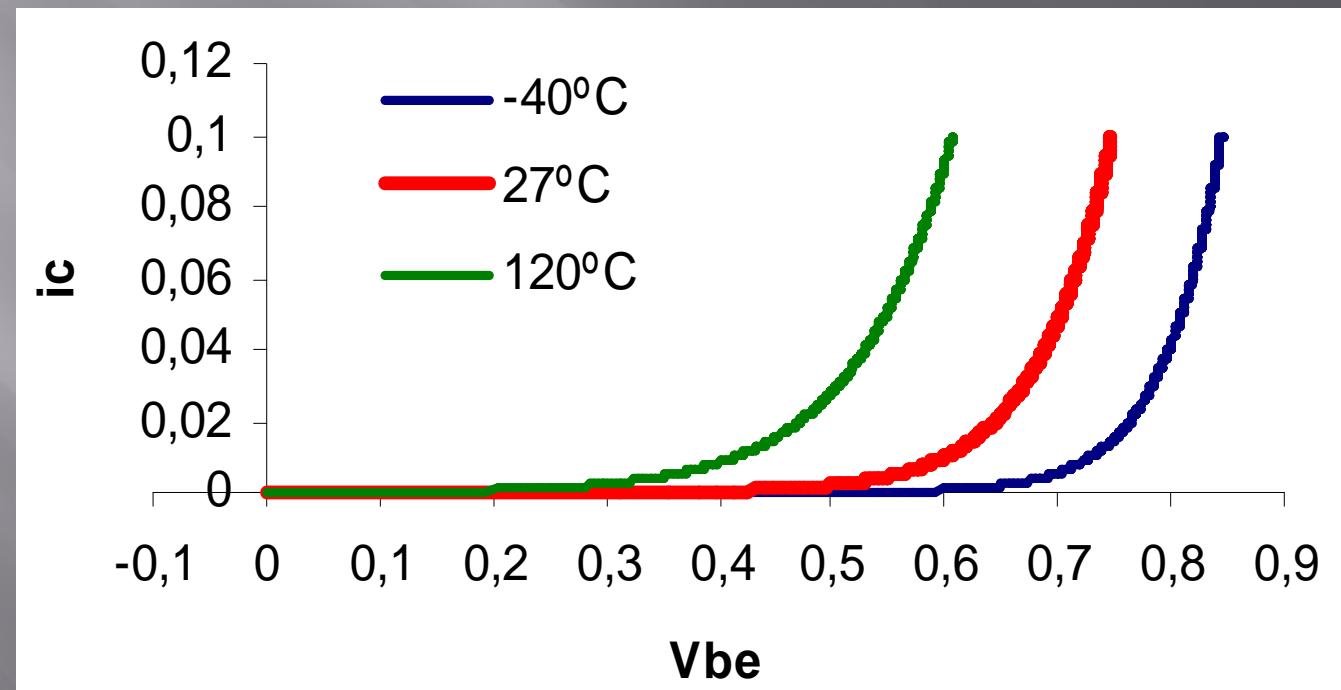


# Região de disrupção

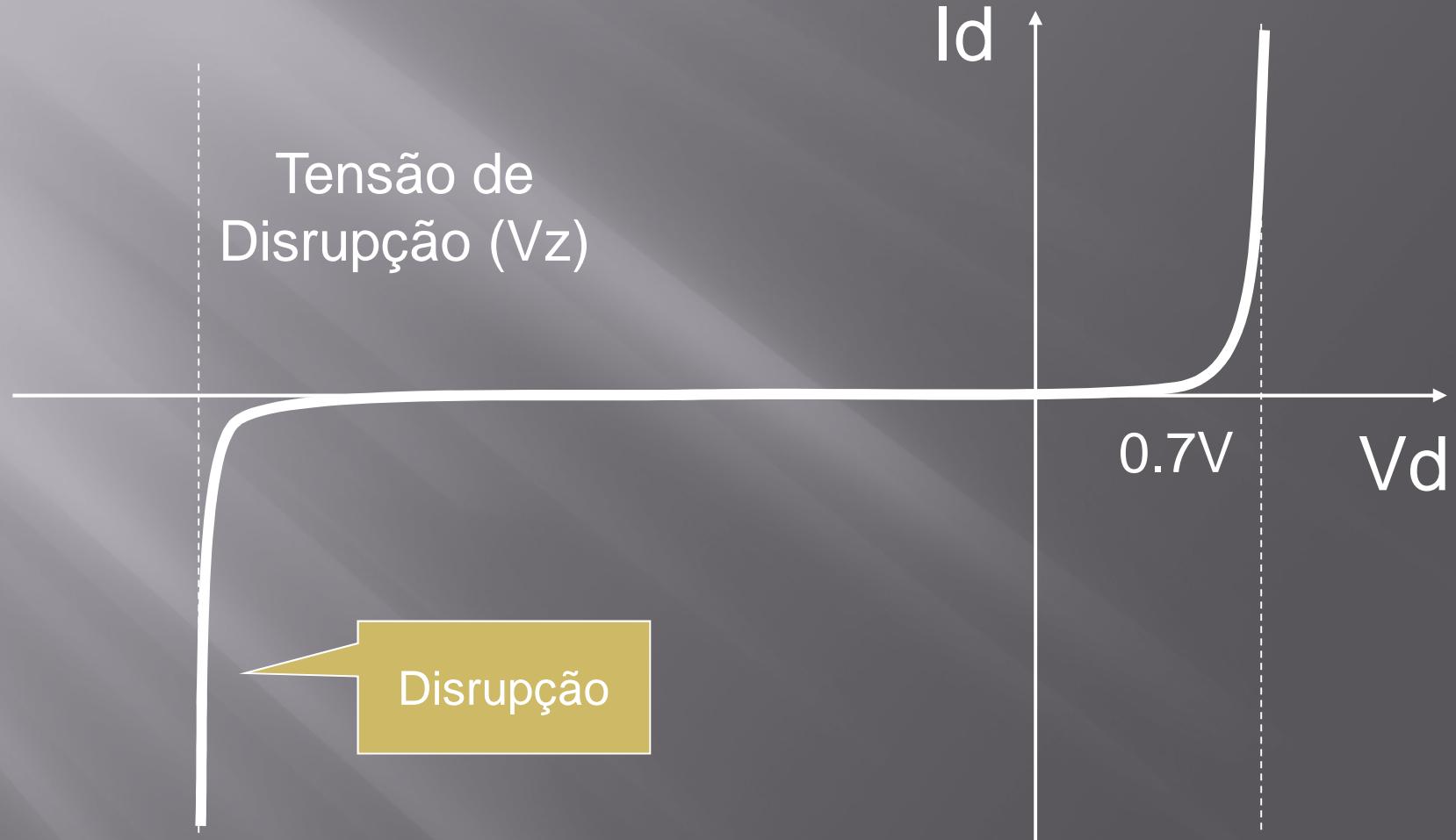
- Se a tensão inversa aplicada a um díodo for muito forte dá-se um fenómeno de disrupção, segundo o qual o díodo passa a conduzir. Existem dois efeitos que podem dar origem á disrupção:
  - Efeito de Zener
    - O campo eléctrico é suficientemente forte para gerar pares electrão buraco na região de depleção. Resulta em díodos com esta região bem definida.
  - Efeito de Avalanche
    - A energia cinética dos portadores minoritários sobe a influência do campo eléctrico é suficiente elevada para quebrar as ligações covalentes.

# Sensibilidade à temperatura

- $V_{be}$  varia cerca de  $-2\text{mV/C}^{\circ}$  para valores semelhantes de  $I_c$ .



# Característica do Díodo (com zona de disrupção)

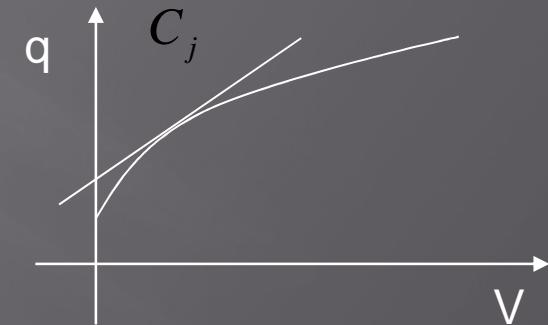


# A capacidade da junção (em polarização inversa)

- Largura variável da região de depleção:

$$\omega_{dep} = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{q}\right)\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_O + V_R)}$$

$$V_O = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$



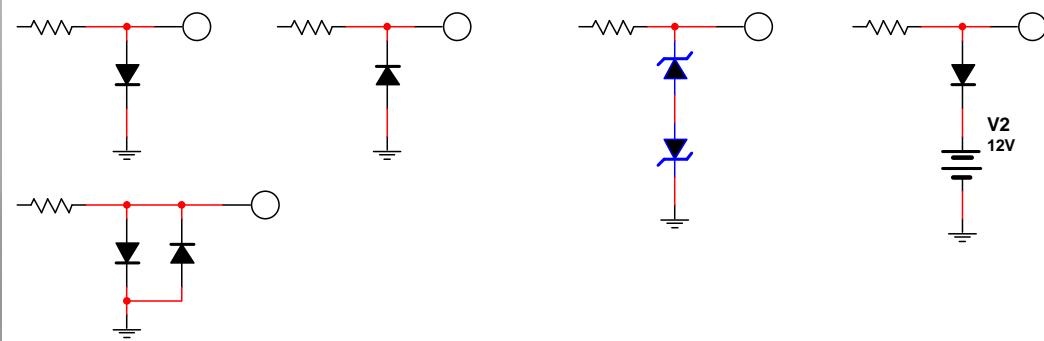
- A carga armazenada não é proporcional à tensão. De facto a tensão aumenta aproximadamente com o quadrado da carga.

Para pequenos  
sinais:

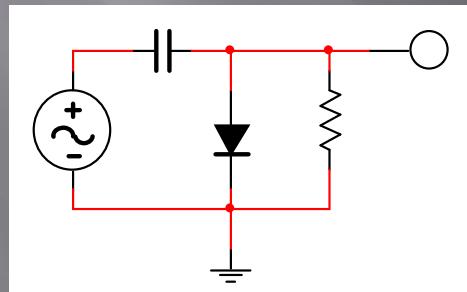
$$C_j = A\epsilon_s / \omega_{dep}$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_O}}} \quad C_{j0} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2} \left(N_A^{-1} + N_D^{-1}\right)^{-1} V_O^{-1}}$$

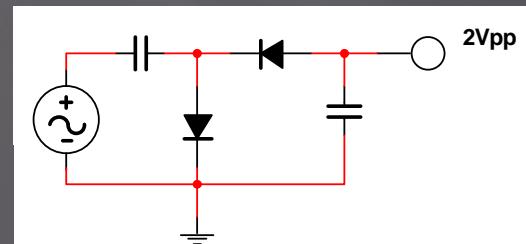
# Circuitos limitadores



Circuito de clamping



Duplicador de tensão

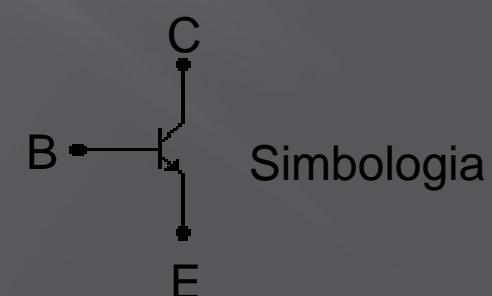
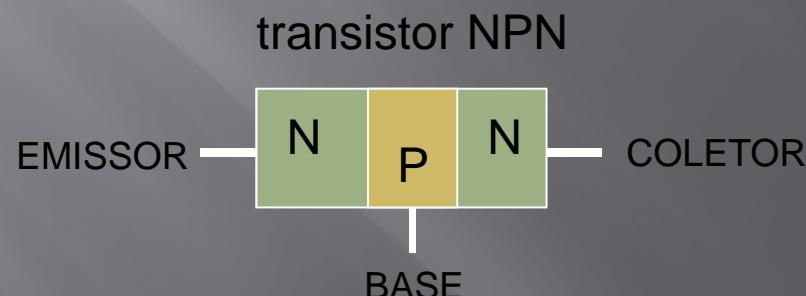
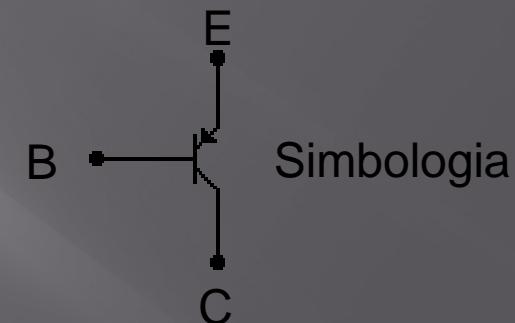
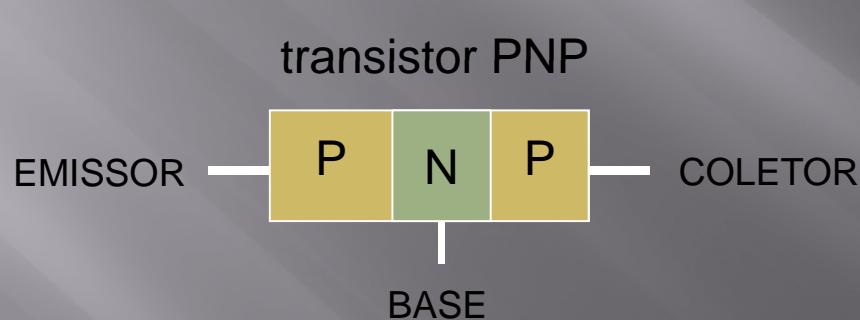


# Díodos especiais

- ❑ Schottky-barrier díodo
  - Metal semicondutor tipo n
  - Para dopagem elevada não se produz díodo (contactos ohmicos)
  - Vd de 0.3 a 0.5V
  - Muito utilizado em circuitos de Arseneto de Gálio (As-Ga)
- ❑ Varactors
  - Condensadores variáveis, coeficiente m=3, 4
- ❑ Photodiodes
  - Díodo polarizado inversamente
  - Fotões incidentes na região de depleção geram pares electrão lacunas que transportam corrente (sensores de luminancia)
  - Polarização directa corresponde às células solares
- ❑ LEDs
  - A recombinação de pares electrões lacunas gera fotões
  - Led+photodiodo = isolador óptico

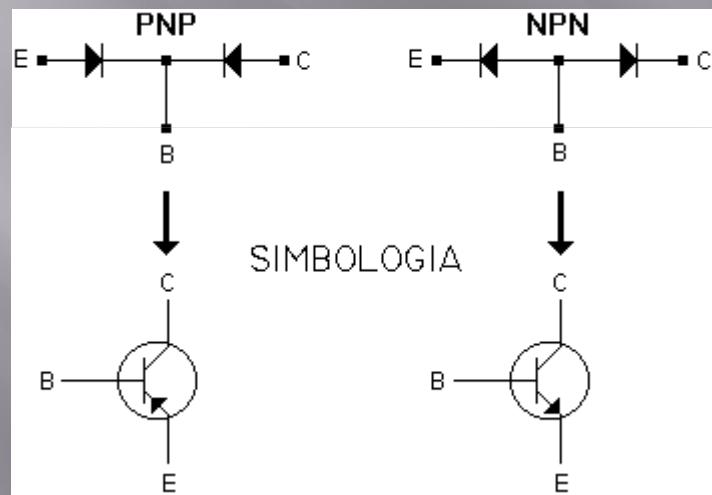
# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

- ❑ O transistor de junção é um dispositivo que atua como amplificador de corrente
- ❑ Consiste em duas junções PN colocadas em oposição
- ❑ O termo bipolar refere-se ao fato dos portadores lacunas e elétrões fazerem parte do processo do fluxo de corrente



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

- podemos representar o transistor como um circuito T equivalente com diodos, ligados de tal forma a permitir a identificação da polarização das junções

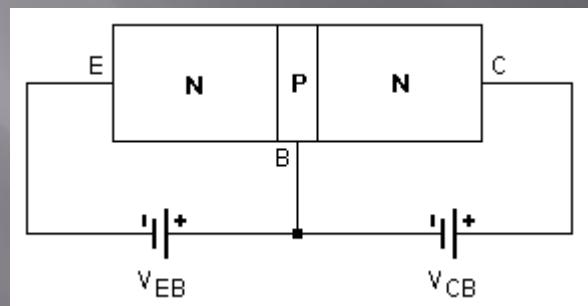


Observa-se que no transístor *pnp* a junção dos dois cátodos do díodo forma a base, que é negativa, sendo o emissor e o colector positivos, enquanto que no transístor *npn* a junção dos dois ânodos forma a base que é positiva, sendo o emissor e o colector negativos.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Polarização

- Para que um transistor funcione é necessário polarizar corretamente as suas junções, da seguinte forma:
  - 1 - Junção base-emissor: deve ser polarizada diretamente
  - 2 - Junção base-coletor: deve ser polarizada reversamente
- Esse tipo de polarização deve ser utilizado para qualquer transistor de junção bipolar, seja ele npn ou pnp.

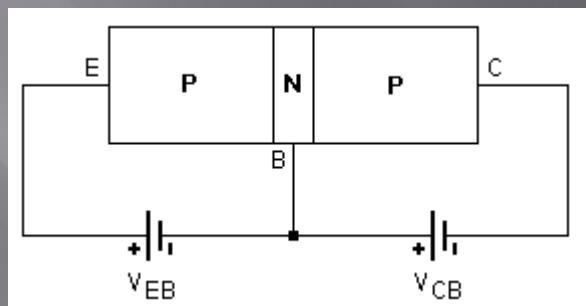


Transistor **npn** com polarização direta entre base e emissor e polarização reversa entre coletor e base.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Polarização

- Para que um transistor funcione é necessário polarizar corretamente as suas junções, da seguinte forma:
  - 1 - Junção base-emissor: deve ser polarizada diretamente
  - 2 - Junção base-coletor: deve ser polarizada reversamente
- Esse tipo de polarização deve ser utilizado para qualquer transistor de junção bipolar, seja ele npn ou pnp.



Transistor *pnp* com polarização direta entre base e emissor e polarização inversa entre coletor e base

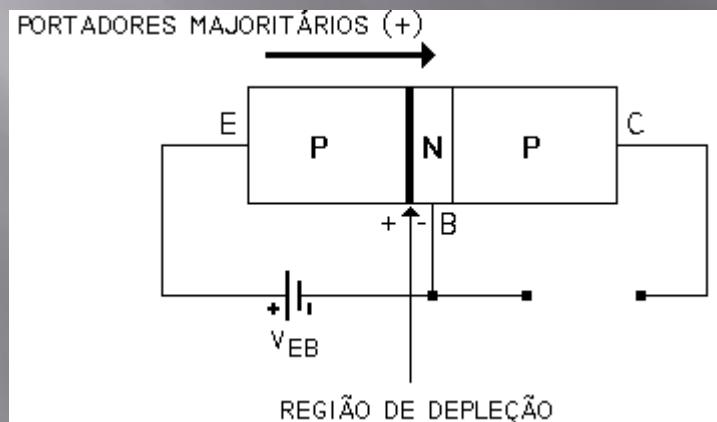
Observe atentamente nas figuras acima a polaridade das baterias.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Funcionamento básico

### 1 - Junção diretamente polarizada:

A figura abaixo mostra o desenho de um transístor *pnp* com a polarização directa entre base e colector. Para estudar o comportamento da junção directamente polarizada, foi retirada a bateria de polarização inversa entre base e colector.



Observa-se então uma semelhança entre a polarização directa de um diodo com a polarização directa entre base e emissor, onde aparece uma região de depleção estreita.

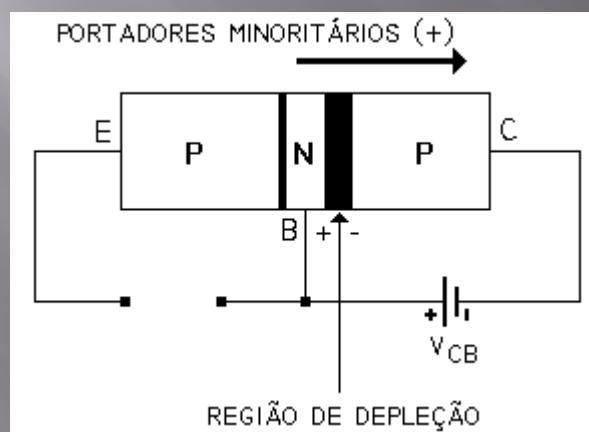
Neste caso haverá um fluxo relativamente intenso de portadores maioritários do material *p* para o material *n*.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Funcionamento básico

### 2 - Junção inversamente polarizada:

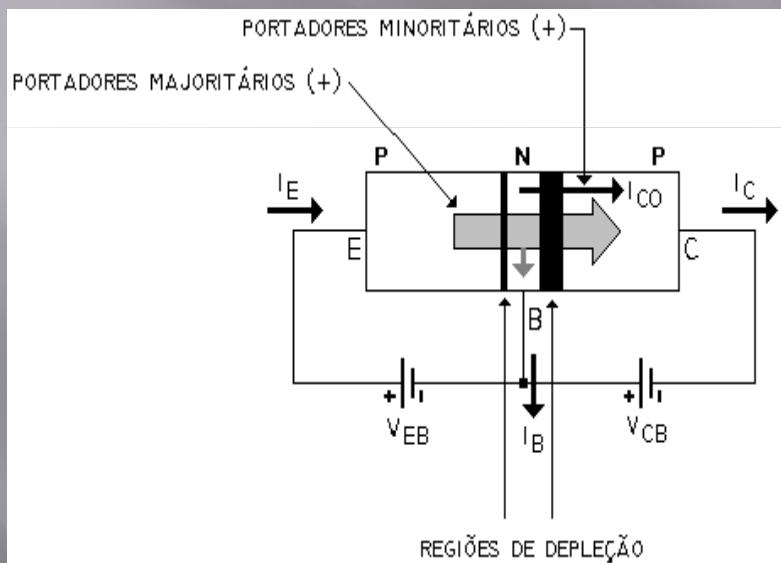
Passemos a analisar o comportamento da junção inversamente polarizada, conforme mostra a figura abaixo. Neste caso, foi removida a bateria de polarização directa entre emissor e base.



Observa-se agora, em virtude da polarização inversa um aumento da região de depleção semelhante ao que acontece com os diodos de junção, isto é ocorre um fluxo de portadores minoritários (corrente de fuga nos diodos), fluxo este que depende também da temperatura. Podemos então dizer que uma junção  $p-n$  deve ser directamente polarizada (base-emissor) enquanto que a outra junção  $p-n$  deve ser inversamente polarizada (base-coletor).

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente



Quando um transistor é polarizado corretamente, haverá um fluxo de corrente, através das junções e que se difundirá pelas camadas formadas pelos cristais *p* ou *n*.

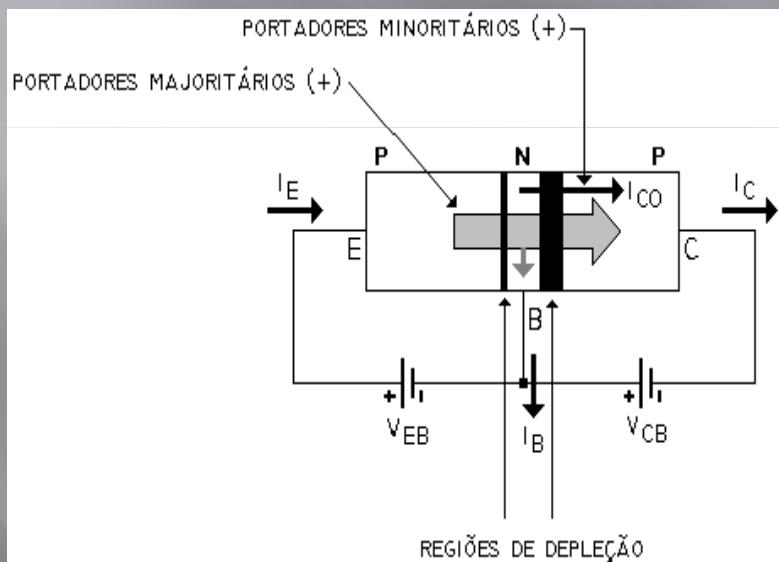
Essas camadas não tem a mesma espessura e dopagem, de tal forma que:

A base é a camada mais fina e menos dopada;  
O emissor é a camada mais dopada;

O coletor é uma camada mais dopada  
do que a base e menos dopada do que o  
emissor.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente



A corrente que fica retida na base recebe o nome de corrente de base ( $I_B$ ), sendo da ordem de microampères. As correntes de coletor e emissor são bem maiores, ou seja da ordem de miliampères, isto para transistores de baixa potência, podendo alcançar alguns ampères em transistores de potência. Da mesma forma, para transistores de potência, a corrente de base é significativamente maior.

Uma pequena parte dos portadores majoritários ficam retidos na base. Como a base é uma película muito fina, a maioria atravessa a base e se difunde para o coletor.

Podemos então dizer que o emissor (E) é o responsável pela emissão dos portadores majoritários; a base (B) controla esses portadores enquanto que o coletor (C) recebe os portadores majoritários provenientes do emissor.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente

A exemplo dos diodos reversamente polarizados, ocorre uma pequena corrente de fuga, praticamente desprezível, formada por portadores minoritários. Os portadores minoritários são gerados no material tipo *n* (base), denominados também de corrente de fuga e são difundidos com relativa facilidade até ao material do tipo *p* (coletor), formando assim uma corrente minoritária de lacunas. Lembre-se de que os portadores minoritários em um cristal do tipo *n* são as lacunas.

Desta forma a corrente de coletor ( $I_C$ ), formada pelos portadores maioritários provenientes do emissor soma-se aos portadores minoritários ( $I_{CO}$ ) ou ( $I_{CBO}$ ). Aplicando-se a lei de Kirchhoff para corrente, obtemos:

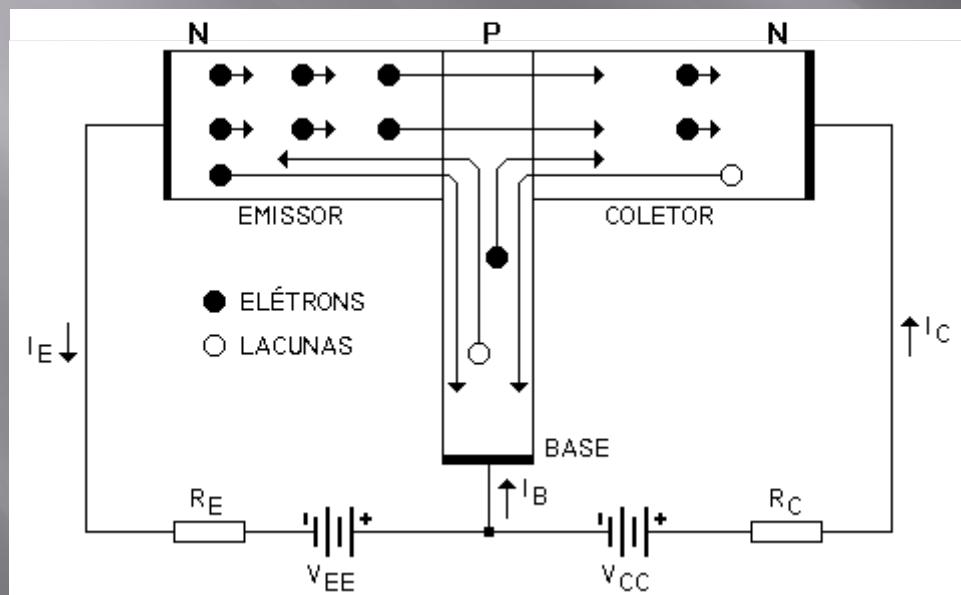
$$I_E = I_C + I_B, \text{ onde:}$$

$$I_C = I_{C (\text{PORTADORES MAIORITÁRIOS})} + I_{CO} \text{ ou } I_{CBO (\text{PORTADORES MINORITÁRIOS})}$$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente

Para uma melhor compreensão, a figura a seguir ilustra o fluxo de corrente em um transistor *npn*, através de uma outra forma de representação. No entanto, o processo de análise é o mesmo.



Observa-se que os portadores minoritários ( $I_{CO}$  ou  $I_{CBO}$ ) provenientes da base são os elétrões, que se somarão à corrente de coletor.

Verifica-se ainda em relação ao exemplo anterior (transistor *pnp*), que a corrente de base ( $I_B$ ) tem um sentido oposto, uma vez que, essa corrente é formada por lacunas. Da mesma forma as correntes de emissor ( $I_E$ ) e de coletor ( $I_C$ ) também tem sentidos opostos, por serem formadas por elétrons.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente

OBS: Os transistores do tipo *pnp* e *npn* são submetidos ao mesmo processo de análise, bastando para isso, inverter a polaridade das baterias de polarização e lembrar que:

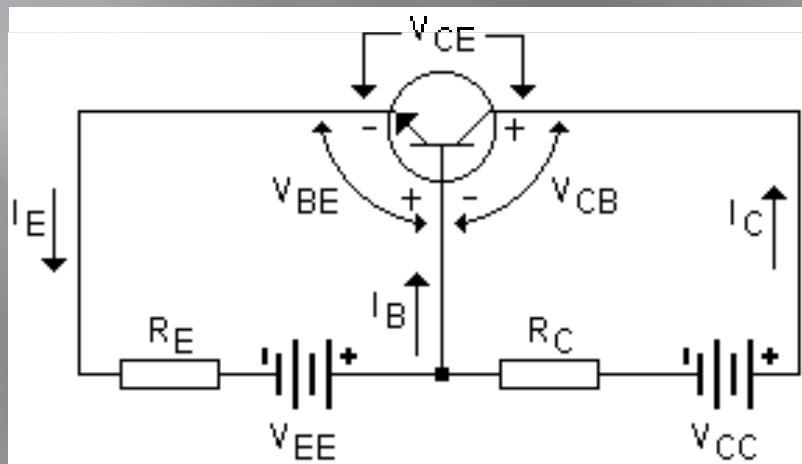
**Cristal N - os portadores maioritários são os elétrões e os minoritários as lacunas;**

**Cristal P - os portadores maioritários são as lacunas e os minoritários os elétrões.**

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente

A figura abaixo mostra um circuito com transistor *npn*.



A quantidade de corrente que chega no coletor proveniente do emissor depende do tipo de material e dopagem do emissor. Essa quantidade de corrente varia de acordo com o tipo de transistor.

A constante de proporcionalidade dessa corrente é definida como  $\alpha$  (alfa), de forma que, a corrente de coletor é representada por  $\alpha I_E$ . Os valores típicos de  $\alpha$  variam de 0,9 a 0,99. Isto significa que parte da corrente do emissor não chega ao coletor.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente: Exemplo I

Qual é a corrente de coletor de um transistor com  $\alpha = 0,95$ , sabendo-se que a corrente de emissor é 2mA?

Solução:  $I_C = \alpha I_E \quad I_C = 0,95 \cdot 2\text{mA} = 1,9\text{mA}$

Caso  $I_{CBO}$  não seja desprezada, a corrente de coletor é dada por:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (I)$$

Como dito anteriormente, parte da corrente do emissor que fica retida na base forma a corrente de base, assim:

$$I_E = I_C + I_B \quad (II)$$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente: Exemplo I

Qual é a corrente de coletor de um transistor com  $\alpha = 0,95$ , sabendo-se que a corrente de emissor é 2mA?

Solução:

Substituindo (I) em (II), podemos calcular a corrente de base:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (I)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (II)$$

$$I_E = \alpha I_E + I_{CBO} + I_B$$

$$I_B = (1 - \alpha) \cdot I_E - I_{CBO}$$

$$I_B = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \times I_C - \frac{I_{CBO}}{\alpha}$$

A relação  $\alpha / (1 - \alpha)$  é representada por  $\beta$  (beta).

Podemos então estabelecer as relações:

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

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

O símbolo  $h_{FE}$  é algumas vezes usado no lugar de  $\beta$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Fluxo de corrente: Exemplo II e III

a) Um transistor possui um fator  $\alpha = 0,92$ . Qual é o fator  $\beta$ ?

*Solução:*

$$\beta = \frac{0,92}{1-0,92} = \frac{0,92}{0,08} = 11,5$$

b) Um transistor possui um fator  $\beta = 100$ . Qual é o fator  $\alpha$ ?

*Solução:*

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{100}{101} = 0,99$$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Conclusões...

Podemos então estabelecer uma relação entre  $\alpha$  e  $\beta$

Temos então:

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

$\beta$  assume valores muito mais elevados em relação a  $\alpha$  (o valor típico de  $\beta$  é da ordem de 30 a 300). Então, quanto maior for o valor de  $\beta$ , mais o valor de  $\alpha$  tende a aproximar-se de 1.

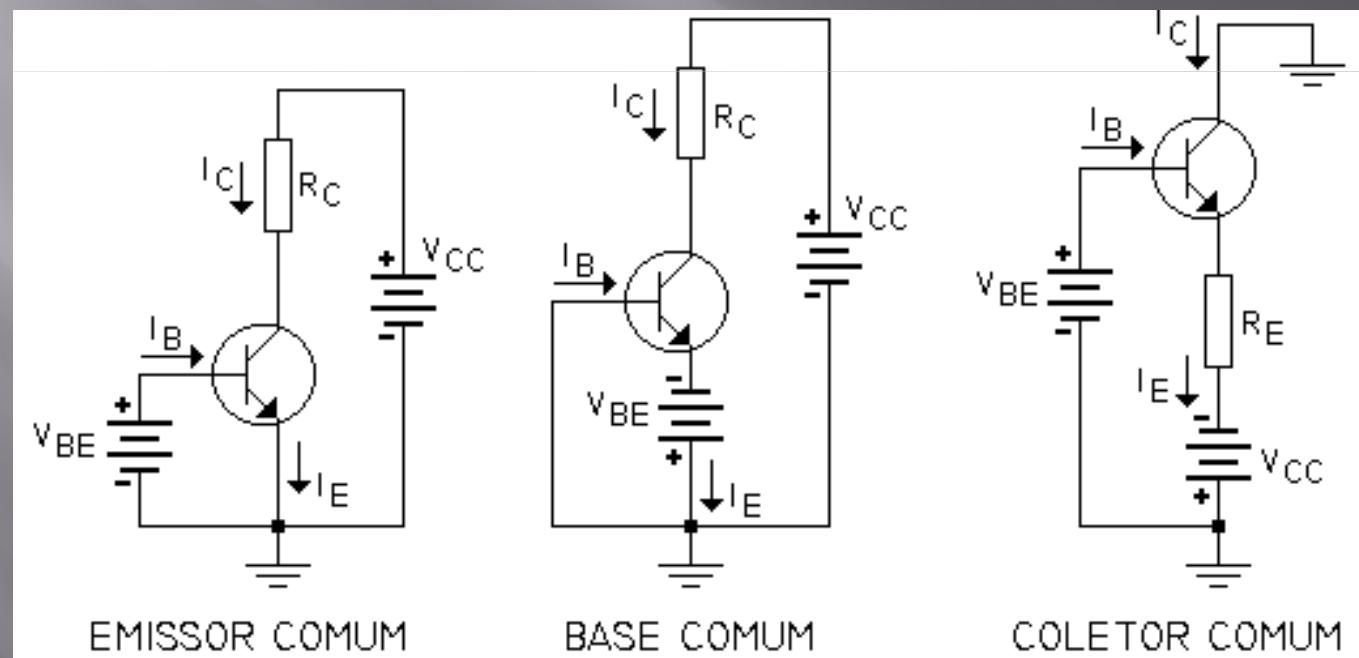
Assim, levando-se em conta que  $I_C = \alpha I_E$ , para um valor de  $\beta \geq 100$ , podemos considerar para fins práticos:

$$I_C = I_E$$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

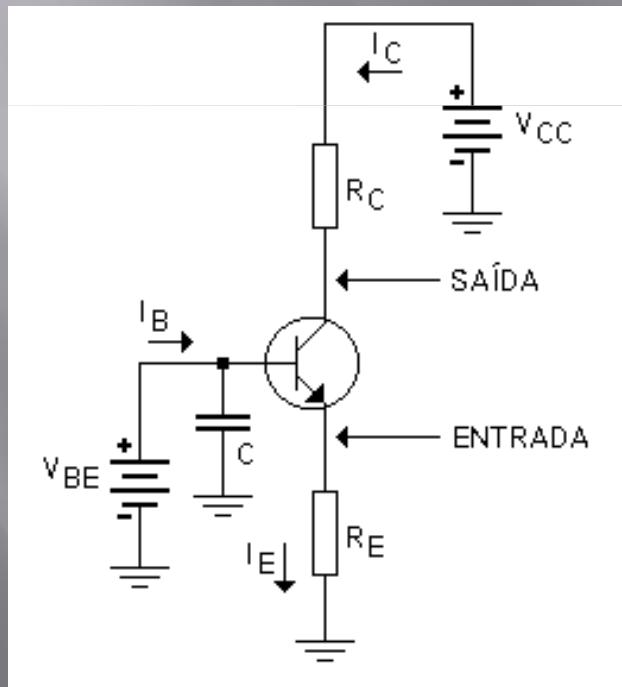
## Configurações...

Os transistores podem ser ligados em três configurações básicas: **base comum (BC)**, **emissor comum (EC)** e **coletor comum (CC)**. Essas denominações relacionam-se aos pontos onde o sinal é injetado e retirado, ou ainda, qual dos terminais do transistor é referência para a entrada e saída de sinal.



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Base Comum



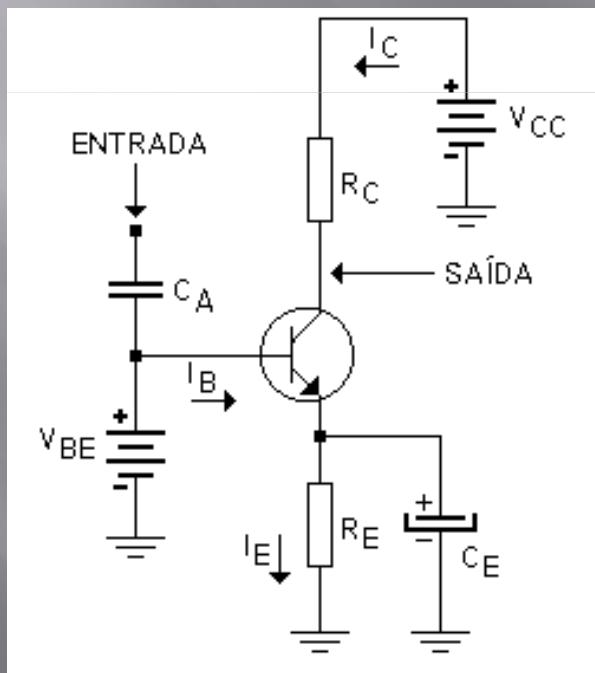
Desta forma, pode-se dizer que a base é o terminal comum para a entrada e saída do sinal. O condensador "C" ligado da base a terra assegura que a base seja efetivamente aterrada para sinais alternados.

### 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

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Emissor Comum



No circuito emissor comum, o sinal é aplicado entre base e emissor e retirado entre coletor e emissor. O condensador no emissor " $C_E$ " assegura o aterramento do emissor para sinais alternados.  $C_A$  é um condensador de acoplamento de sinal

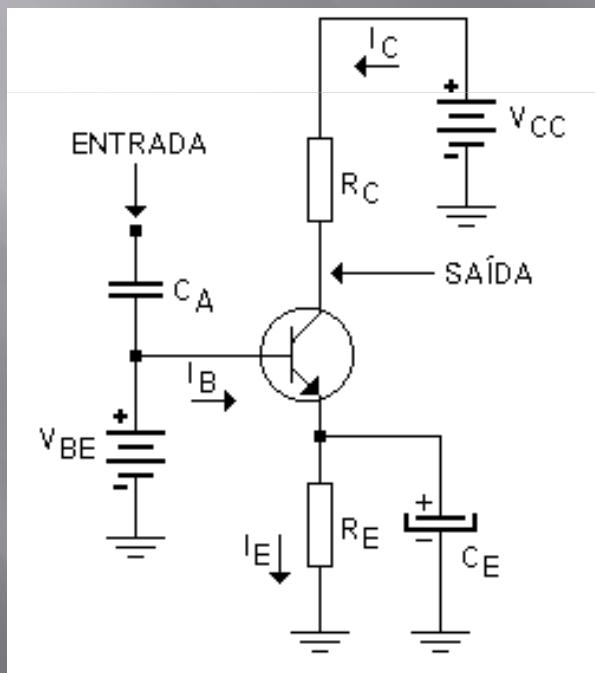
### CARACTERÍSTICAS:

- Ganhos de corrente ( $G_i$ ): elevado
- Ganhos de tensão ( $G_v$ ) elevado
- Resistência de entrada ( $R_{IN}$ ) média
- Resistência de saída ( $R_{OUT}$ ) alta

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Colector Comum

A configuração coletor comum também é conhecida como seguidor de emissor. Essa denominação é dada devido a tendência de todo o sinal aplicado na entrada estar praticamente presente na saída (circuito de emissor).



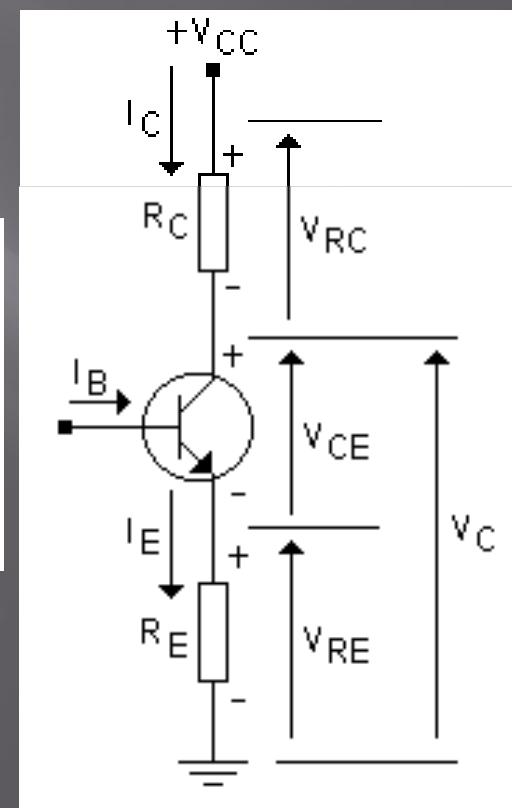
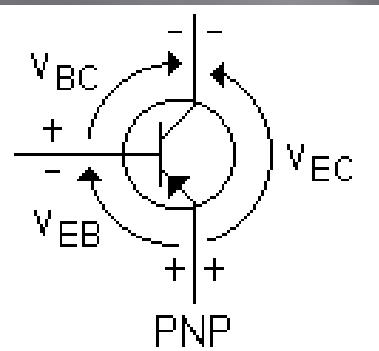
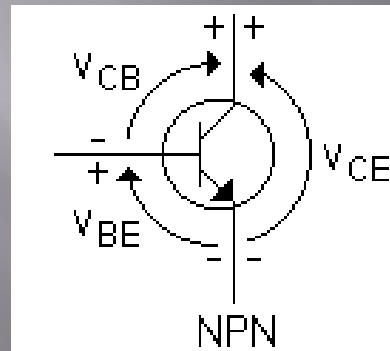
O sinal de entrada é aplicado entre base e coletor e retirado do circuito de emissor. O condensador "C<sub>C</sub>" ligado do coletor a terra assegura que o coletor esteja aterrado para sinais alternados. C<sub>A</sub> é um condensador de acoplamento de sinal.

### CARACTERÍSTICAS:

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

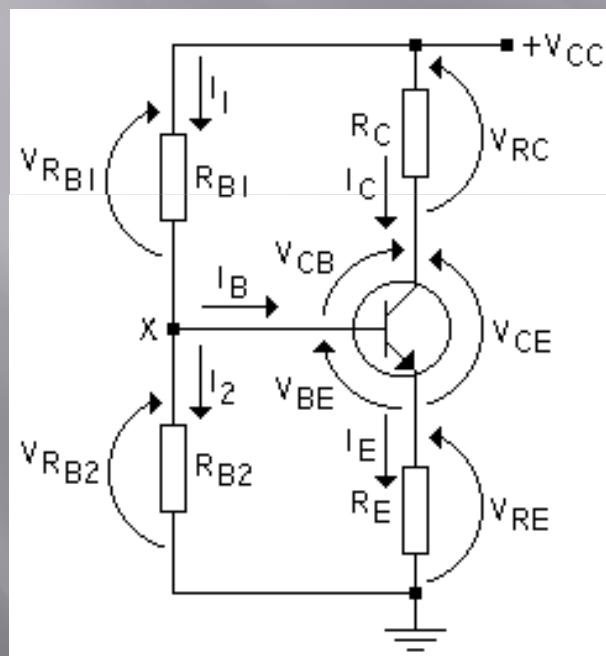
# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

Representação de tensões correntes



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Polarização



Temos visto até agora a polarização de transístores utilizando duas baterias, sendo uma para polarização da junção base-emissor e outra para a junção base-coletor.

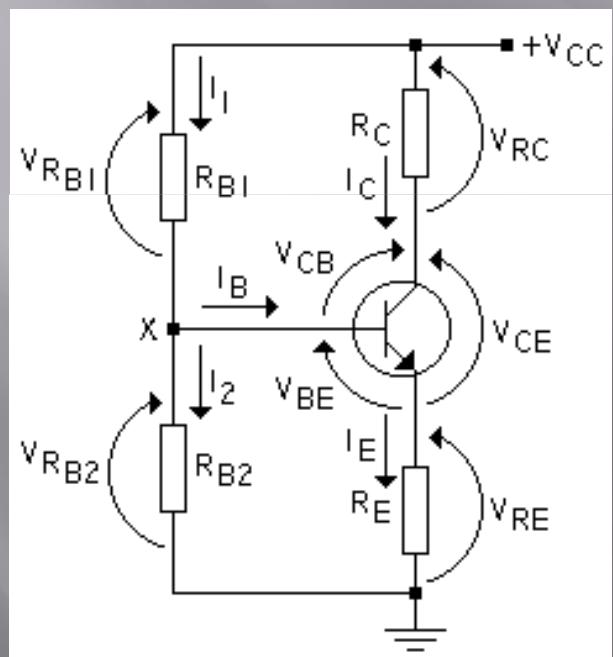
Na maioria das vezes, uma única bateria pode polarizar um circuito transistorizado, visto que o mesmo comporta-se como um circuito fechado.

As tensões nas junções do transistor e nos componentes externos, como resistencias, condensadores, bobinas, etc. podem ser calculadas utilizando-se as leis de Kirchhoff.

Da mesma forma, as correntes podem ser calculadas aplicando-se as leis de Kirchhoff.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Polarização



Aplicando-se as de Chrichhoff, podemos obter várias equações:

1.  $V_{CC} - V_{RC} - V_{CE} - V_{RE} = 0$
2.  $V_{CE} - V_{BE} - V_{CB} = 0$
3.  $V_{CC} - V_{RB1} - V_{RB2} = 0$
4.  $V_{RB1} - V_{RC} - V_{CB} = 0$
5.  $V_{RB2} - V_{BE} - V_{RE} = 0$
6.  $V_{CC} - V_{RC} - V_{CB} - V_{BE} - V_{RE} = 0$

Aplicand-se LKC no ponto X, temos:

1.  $I_B = I_1 - I_2$
2.  $I_1 = I_2 + I_B$

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Curvas Características

As curvas características definem a região de operação de um transístor, tais como: região de saturação, região de corte, região activa e região de ruptura.

De acordo com as necessidades do projecto essas regiões de operação devem ser escolhidas. Quando necessitamos de um transístor como comutador, normalmente as regiões de corte e saturação são seleccionadas; no caso de transístor operando como amplificador, por regra, escolhe-se a região activa.

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

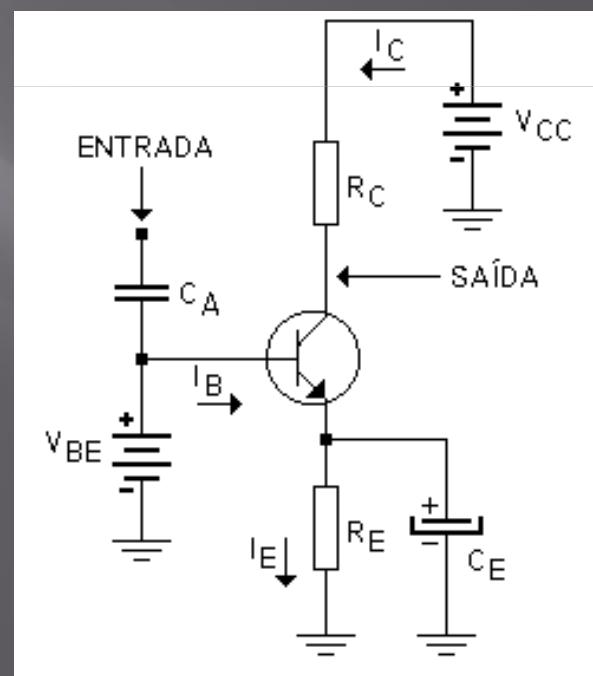
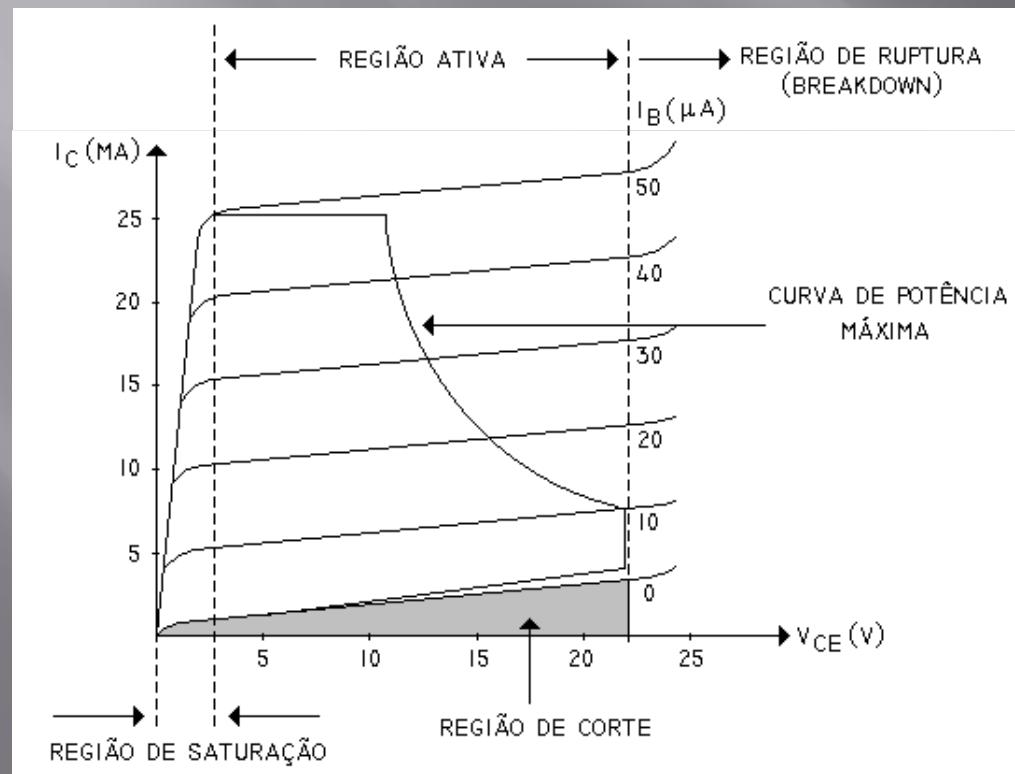
A seguir são mostradas algumas curvas características, apenas como fim didáctico, não sendo obedecido a rigor nenhum tipo de escala.

# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Curvas Características

A região de corte é mostrada na área sombreada, onde  $I_B = 0$ .

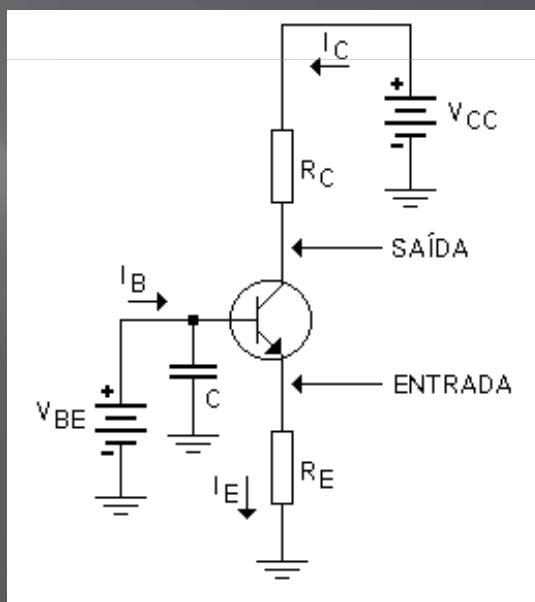
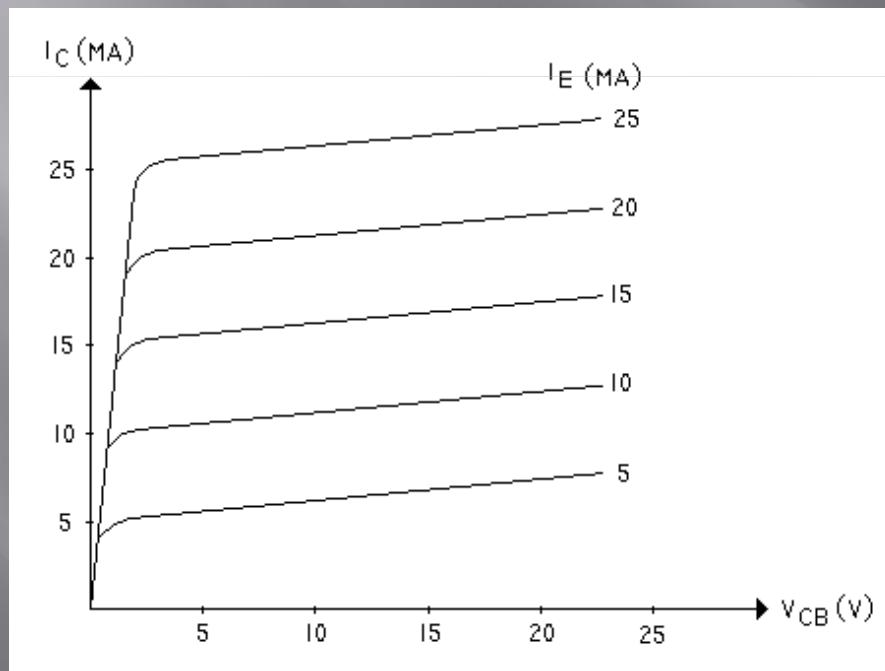
A curva de potência máxima representa a máxima potência que pode ser dissipada pelo transistor.



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Curvas Características

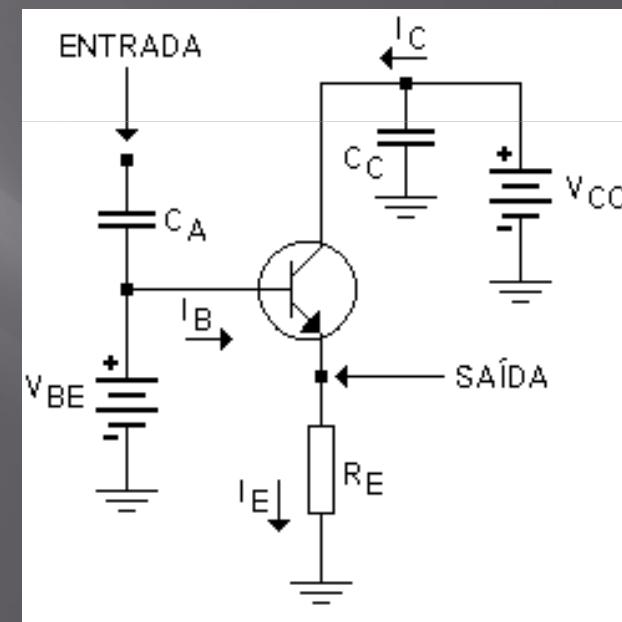
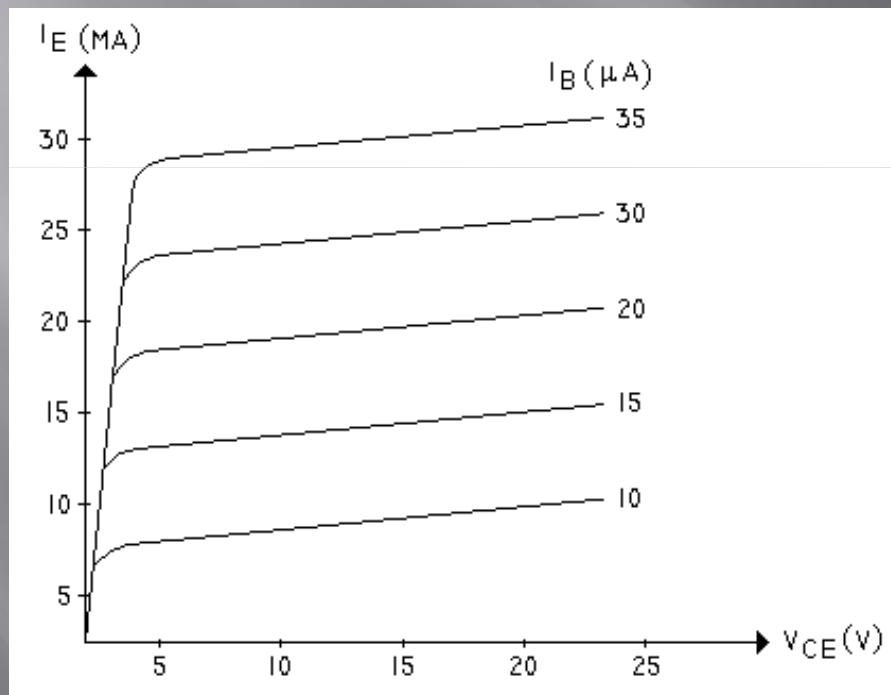
Observa-se na curva característica para a configuração em base comum, que a corrente de emissor controla a corrente de coletor, enquanto que na curva característica para a configuração em emissor comum, a corrente de base controla a corrente de coletor.



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Curvas Características

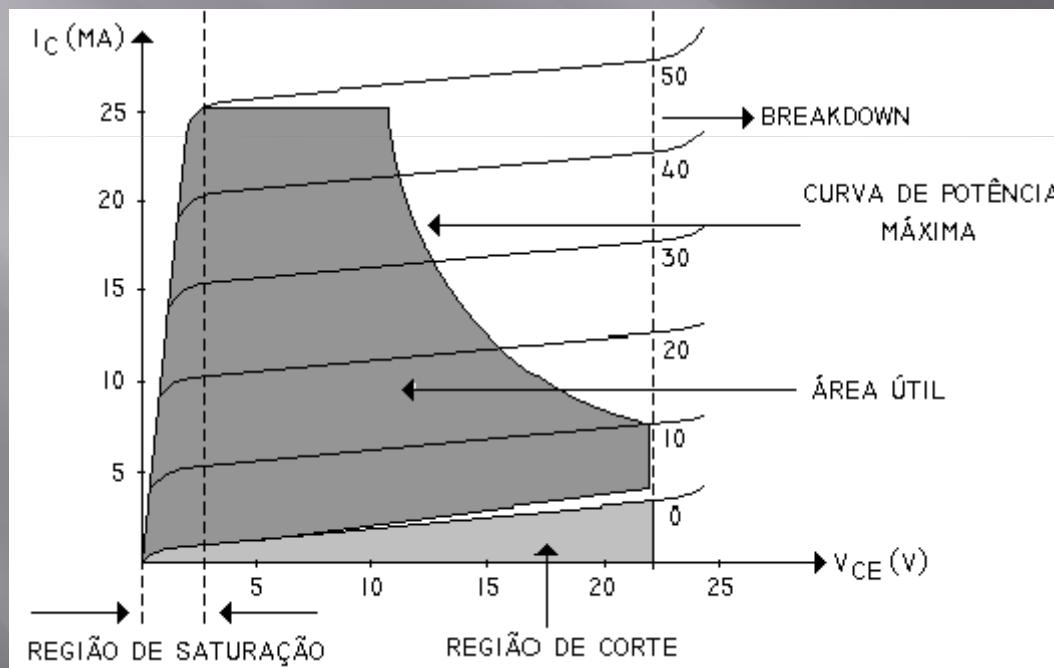
Observe a escala dos eixos de tensão e corrente para a montagem em coletor comum, onde a corrente de base controla a corrente de emissor.



# TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLEAR

## Curvas Características

A figura a seguir mostra a curva característica para emissor comum semelhante a vista anteriormente, no entanto, observe a área sombreada, a qual é denominada de área útil, na qual o transístor opera com total segurança.



A região útil é delimitada pela curva de potência máxima e conforme dito anteriormente, o transístor trabalha com segurança, não ultrapassando a máxima potência permitida.