



# TRANSÍSTORES DE JUNÇÃO BIPOLARES

## CAPÍTULO 5

(SEDRA & SMITH)

## Estrutura do dispositivo e operação física

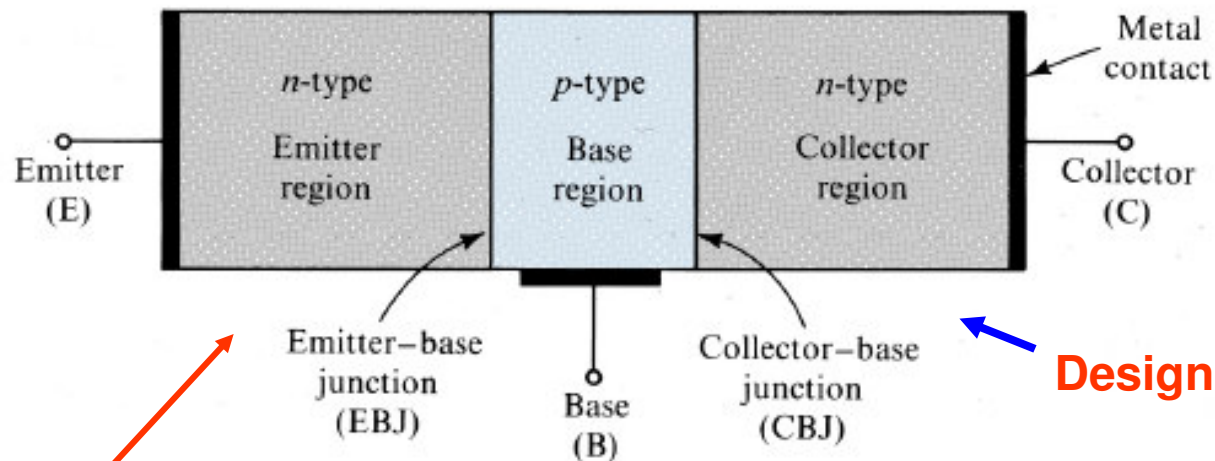


Fig. 5.1

**Designação:** transístor NPN

**Estrutura simplificada de um BJT (três regiões semicondutoras)**

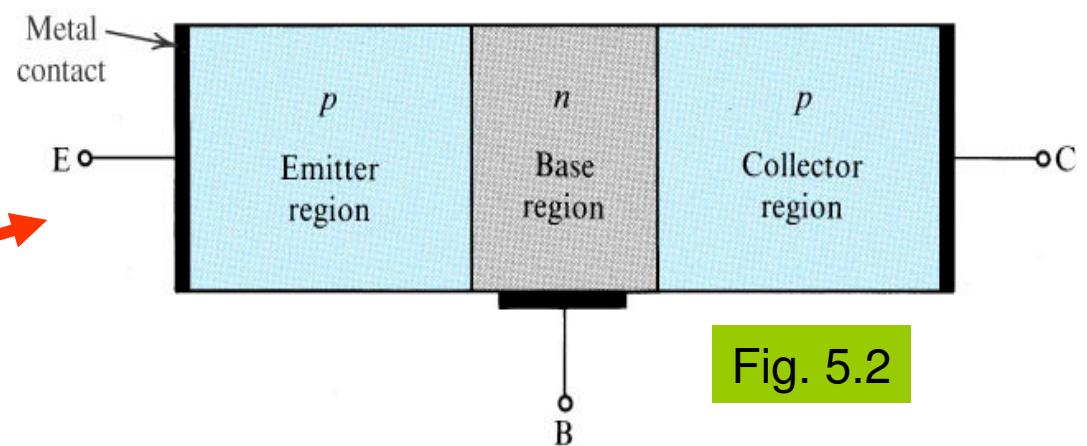


Fig. 5.2

**Designação:** transístor PNP



### Constituição:

- Dispositivo com três terminais → emissor, base e colector
- 2 junções: junção emissor-base (EBJ) e junção colector-base (CBJ)
- Dependendo da polarização de cada uma das junções, diferentes modos de operação podem ser obtidos – **modo de corte, modo activo e modo de saturação**

MODE	EBJ	CBJ
corte	inversa	inversa
Activo	directa	inversa
Saturação	directa	directa

- **Modo activo**, também designado **modo activo directo**, é usado se o transistor operar como **amplificador**.
- **Modo de corte e modo de saturação**: Aplicações que envolvam **comutação**.
- Ambos os tipos de portadores (electrões e lacunas) participam no processo de condução num transistor bipolar, daí o nome **bipolar**.

## Operação de um transistor NPN no modo activo

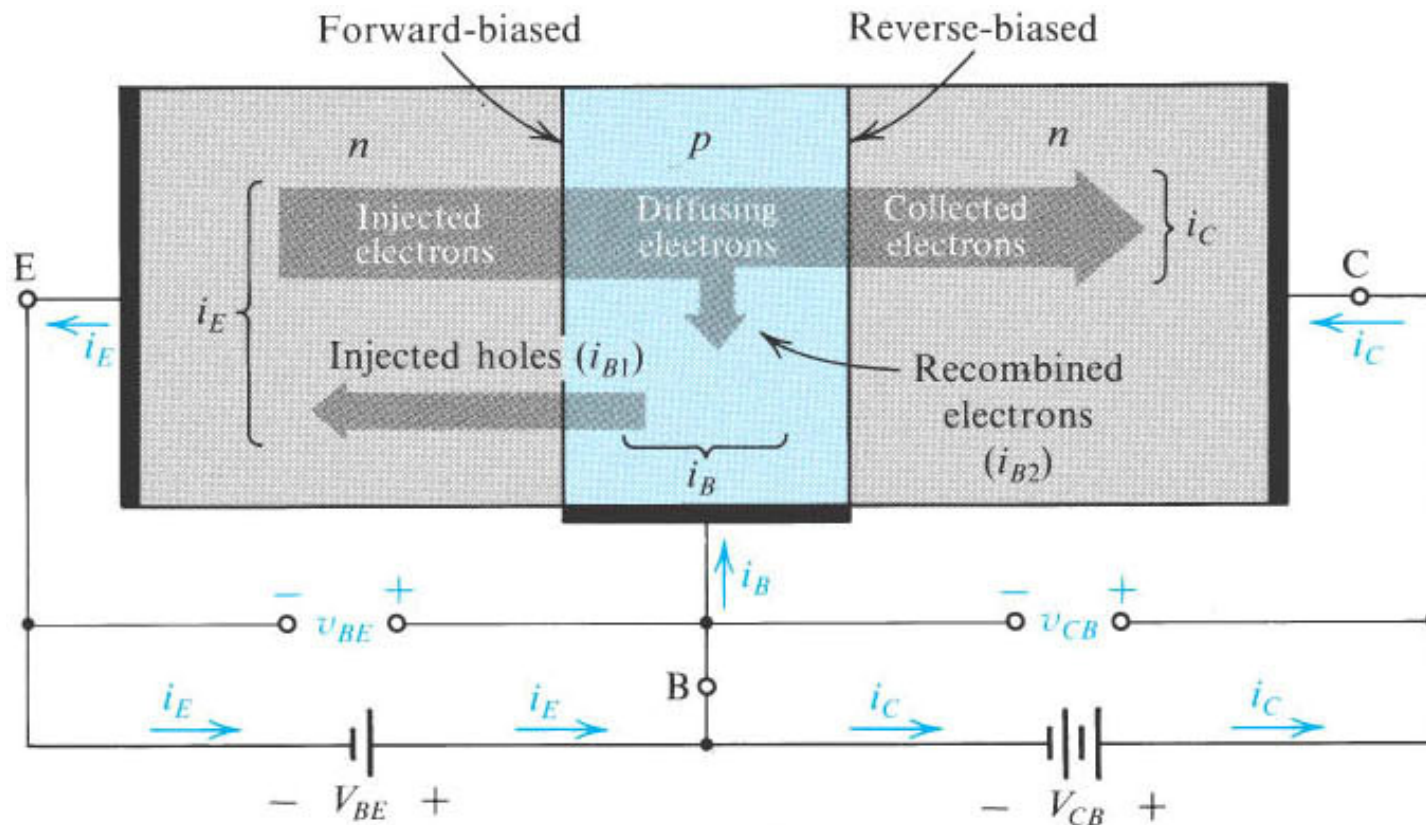
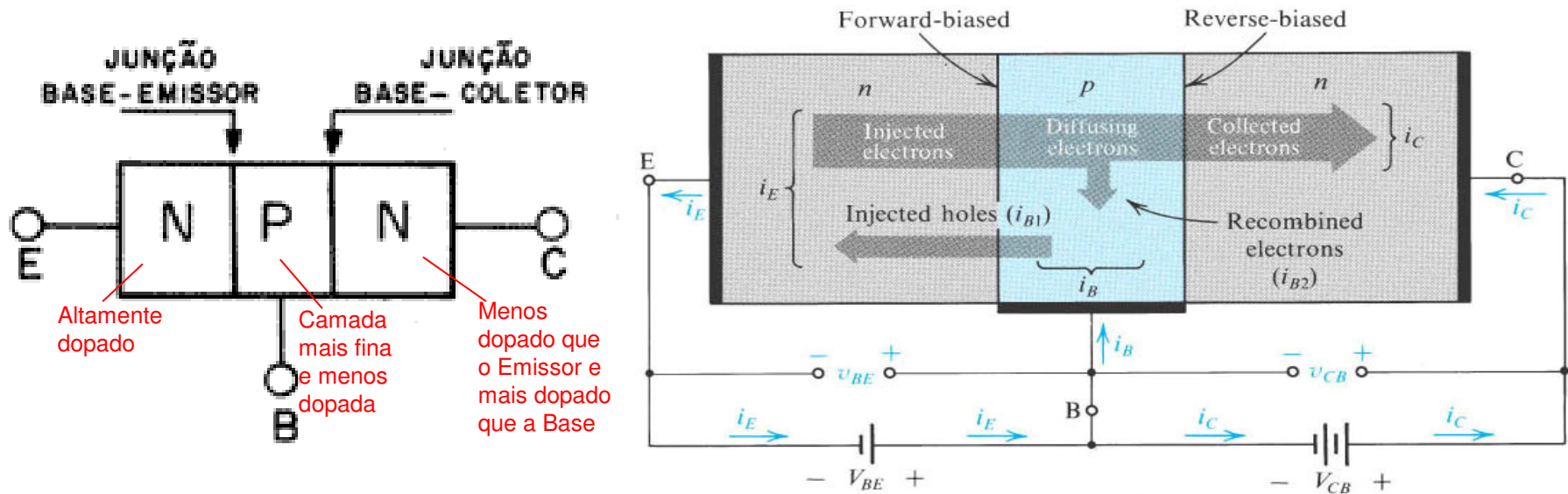


Fig. 5.3

■ Duas fontes de tensão externas são usadas para estabelecer as condições de polarização para funcionamento no modo activo: **EBJ é directamente polarizada e a CBJ é inversamente polarizada.**

## Operação de um transistor NPN no modo activo (Cont.)



## Fluxo de corrente (apenas componentes de corrente por difusão são consideradas)

- A **Polarização directa** da EBJ origina fluxo de corrente através da junção: Consiste em duas componentes: **electrões injectados do emissor para a base** e **lacunas injectadas da base para emissor**.
- A corrente que flui através da EBJ constitui a corrente  $i_E$ . Soma de duas componentes.
- A componente de electrões é muito maior de que a componentes de lacunas

➡ A corrente do emissor é dominada pela componente de electrões

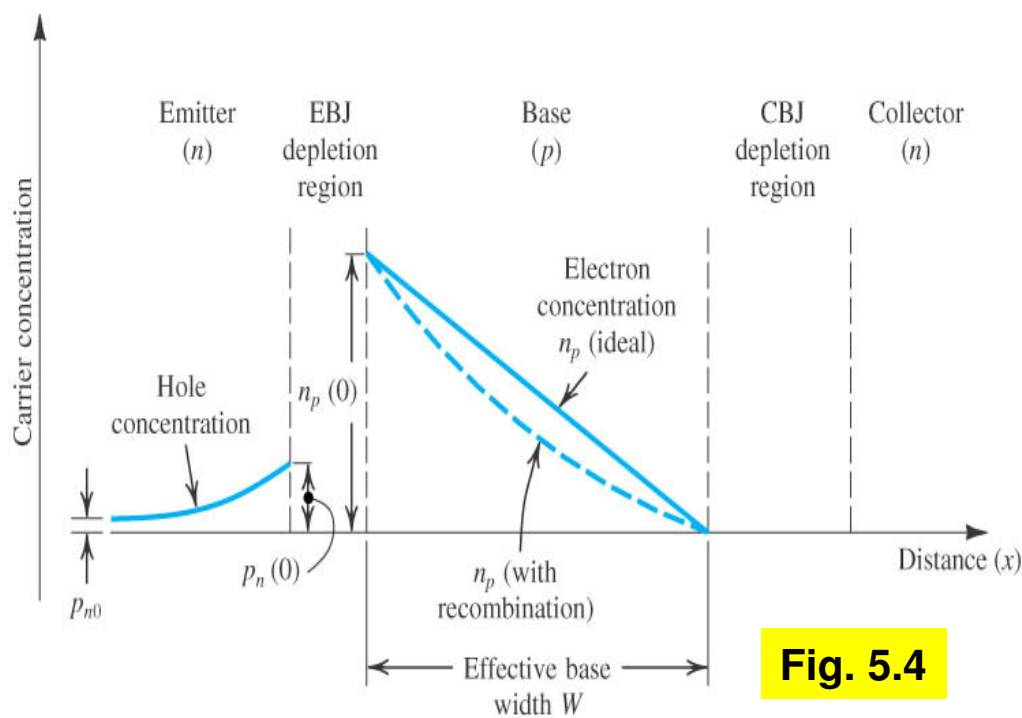


## Operação de um transistor NPN no modo activo (Cont.)

Fluxo de corrente (Cont.) → Considere-se electrões injectados do emissor para a base

↓  
**Portadores minoritários** na região da base

■ Como a região da base é estreita, em regime permanente o **excesso de concentração de portadores minoritários** (electrões) na base apresenta um perfil de (quase) **linha recta**.



**Fig. 5.4**

■ A concentração é muito elevada do lado do emissor ( $n_p(0)$ ) e muito baixa do lado do colector.

■ Para qualquer **junção pn** directamente polarizada, a concentração  $n_p(0)$  é proporcional a  $e^{v_{BE}/V_T}$ .

$$n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE}/V_T} \quad (1)$$

$n_{p0}$  → concentração de portadores minoritários (electrões) na região base.

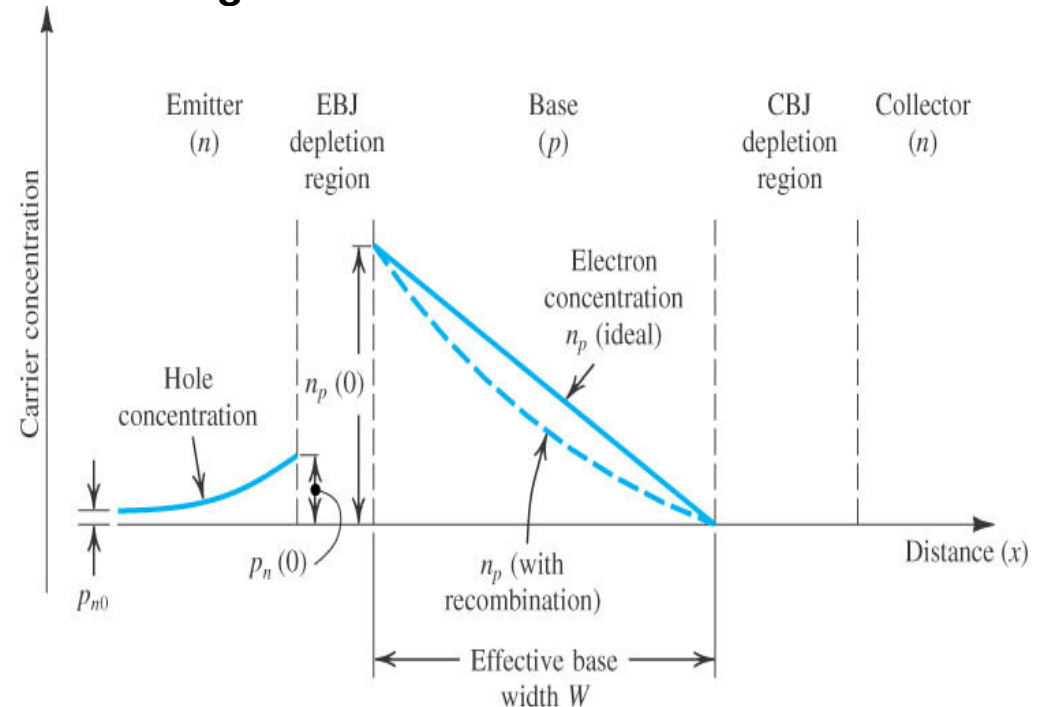
## Operação de um transistor NPN no modo activo (Cont.)

Fluxo de corrente (Cont.) → Considere-se electrões injectados do emissor para a base

**Portadores minoritários na região da base**

■ A razão para uma **concentração zero** na base no lado do colector, deve-se ao facto da tensão positiva do colector  $V_{CB}$ , provocar a difusão desses electrões através da região de depleção da junção base-colector.

■ O perfil de concentração de portadores minoritários leva a que os electrões injectados na base se difundam através da região da base em direcção ao colector.



■ Esta corrente de difusão  $I_n$  é directamente proporcional à inclinação do perfil de concentração (linha recta)

$$I_n = A_E q D_n \left( \frac{dn_p(x)}{dx} \right) = A_E q D_n \left( - \frac{n_p(0)}{W} \right) \quad (2)$$





### Operação de um transistor NPN no modo activo (Cont.)

Fluxo de corrente (Cont.) → Considere-se electrões injectados do emissor para a base

↓  
Portadores minoritários na região da base

$$I_n = A_E q D_n \left( \frac{dn_p(x)}{dx} \right) = A_E q D_n \left( - \frac{n_p(0)}{W} \right)$$

↖  
Secção transversa da junção base-emissor

Devido ao declive negativo da concentração de portadores minoritários, resulta uma corrente  $I_n$  negativa, através da base, isto é, a corrente  $I_n$  flui da direita para a esquerda (direcção negativa de  $x$ ).

■ Alguns dos **electrões que se difundem através da base** combinam-se com lacunas, que são maioritárias na base. Contudo, uma vez que a base é usualmente muito estreita, a percentagem de electrões “perdidos” através deste processo de recombinação será muito pequena. Em todo o caso, a **recombinação na região da base origina que o perfil da concentração de portadores minoritários em excesso se desvie da linha recta** e tome a forma ligeiramente côncava indicada a traço interrompido na figura 5.3.





### Corrente de colector

- A inclinação do perfil da concentração do lado da junção de emissor é ligeiramente maior do que do lado da junção de colector, sendo a diferença devida ao pequeno número de electrões perdidos por recombinação na base.
- Do exposto decorre que a maior parte dos electrões que se difundem na base atingem a fronteira da região de depleção colector-base. Uma vez que o colector é mais positivo do que a base ( de  $v_{CB}$  volt), estes electrões são varridos através da região de depleção para o colector. São, assim, “colectados” para constituir a **corrente de colector  $i_C$** . **Por convenção, o sentido da corrente  $i_C$  é o oposto do fluxo de electrões; assim,  $i_C$  fluirá para dentro do colector.**
- Outra observação importante a fazer diz respeito à **independência do valor de  $i_C$  relativamente a  $v_{CB}$** . Isto é, desde que o colector seja positivo relativamente à base, os electrões que atingem a junção base-colector são varridos para dentro do colector e **contribuem para a corrente do colector.**



### Corrente de colector (Cont.)

Como  $I_c = I_n$ , substituindo a equação (1) em (2), podemos representar a corrente de colector por

$$(3) \quad i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad \xrightarrow{\text{Corrente de saturação}} \quad I_S = qA_E D_n n_{p0} / W$$

$$\text{Substituindo } n_{p0} = n_i^2 / N_A \quad \xrightarrow{\quad} \quad I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W} \quad (4)$$

- A corrente de saturação  $I_S$  é inversamente proporcional à largura da base  $W$  e directamente proporcional à área da junção base-emissor. Tipicamente,  $I_S$  varia entre  $10^{-12}$  e  $10^{-18}$  A (dependendo do tamanho do transístor).
- Porque  $I_S$  é proporcional a  $n_i^2$ , é fortemente dependente da temperatura, duplicando aproximadamente por cada  $5^\circ\text{C}$  de aumento da temperatura.
- Uma vez que  $I_S$  é directamente proporcional à área da junção (i.e., ao tamanho do transístor) é também referida como **corrente de escala**. Dois transístores idênticos, excepto que um deles tem uma área da junção de emissor, por exemplo, dupla, este terá uma corrente de saturação igualmente dupla. Assim, para o mesmo valor de  $v_{BE}$ , o transístor maior conduzirá uma **corrente de colector duas vezes maior**. Este conceito é frequentemente utilizado no projecto de circuitos integrados.

## Corrente de base

■ A corrente de base  $i_B$  consiste em **duas componentes**. A **componente dominante  $i_{B1}$**  é devida às lacunas injectadas pela base na região do emissor. Esta corrente é proporcional a  $e^{v_{BE}/V_T}$ ,

$$i_{B1} = \frac{A_E q D_p n_i^2}{N_D L_P} e^{v_{BE}/V_T} \quad (5)$$

$D_p$ : taxa de difusão das lacunas no emissor;  
 $L_p$ : comprimento de difusão de lacunas no emissor;  
 $N_D$ : concentração de dopantes no emissor.

■ A segunda **componente,  $i_{B2}$** , é devida às **lacunas que são fornecidas pelo circuito exterior** para substituir as lacunas perdidas pela base no processo de recombinação.

■ Uma expressão para  $i_{B2}$  pode ser obtida notando que se o **tempo médio para um electrão minoritário se recombinar com uma lacuna maioritária na base, for designado por  $\tau_b$**  (tempo de vida do portador minoritário), então **em  $\tau_b$  segundos verifica-se um uma carga recombinada na base  $Q_n$** .

■ Claro que em **regime permanente,  $Q_n$  é re-preenchida através da injeção de electrões a partir do emissor**.

■ Para **re-preencher as lacunas**, a corrente  $i_{B2}$  deve fornecer a base com uma carga positiva igual a  $Q_n$  todos os  $\tau_b$  segundos.

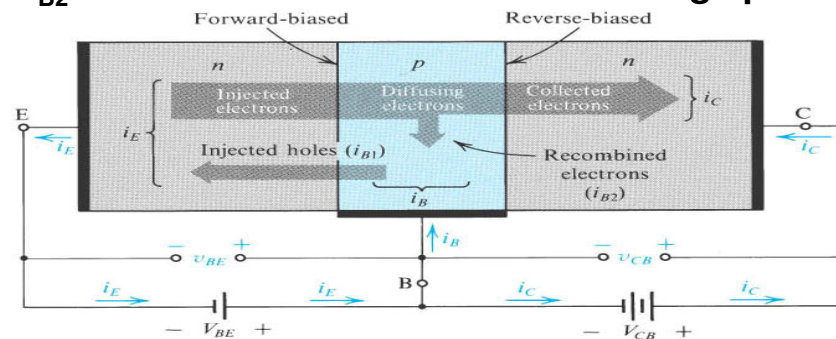


Fig. 5.3



## Corrente de base (Cont.)

$$i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b} \quad (6)$$

■ De acordo com a figura 5.3,  $Q_n$  pode ser representada pela área do triângulo na base, abaixo do segmento de recta. Assim,

$$Q_n = A_E q \frac{1}{2} n_p(0) W$$

■ Substituindo  $n_p(0)$ , usando a eq. (1), e substituindo  $n_{p0}$  por  $n_i^2/N_A$ , vem:

$$Q_n = \frac{A_E q W n_i^2}{2 N_A} e^{v_{BE}/V_T} \quad (7) \quad \longrightarrow \quad i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b} = \frac{1}{2} \frac{A_E q W n_i^2}{\tau_b N_A} e^{v_{BE}/V_T} \quad (8)$$

■ Combinando as equações (5) e (8) e usando (4), resulta:

$$i_B = I_s \left( \frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_P} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad (9)$$

■ Comparando eqs. (3) e (9),  $i_B$  pode ser representada como uma fracção de  $i_C$ :

$$i_B = i_{B1} + i_{B2} = \frac{i_C}{\beta} \quad (10) \quad \longrightarrow \quad i_B = \left( \frac{I_s}{\beta} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad (11)$$



### Corrente de base (Cont.)

Com  $\longrightarrow$

$$\beta = 1 / \left( \frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_P} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right) \quad (12)$$

**Nota:**  $\beta$  é constante para um transistor específico. Para um transistor **npn**  $\beta$  varia entre 50 a 200, podendo atingir valores tão elevados quanto 1000.

$\beta$   $\longleftarrow$  Ganho em corrente emissor-comum

■ Da equação (12) verifica-se que o valor de  $\beta$  é fortemente influenciado por dois factores: a largura da região da base e a relação entre as concentrações das regiões do emissor e da base. Para se obter um elevado  $\beta$  (o que é altamente desejável, uma vez que  $\beta$  é um parâmetro de ganho), a base deve ser estreita e pouco dopada e o emissor muito dopado. A análise que fizemos pressupôs uma situação ideal, em que  $\beta$  é uma constante para um dado transistor.



## Corrente de Emissor

■ Uma vez que a soma das correntes do transistor tem de ser nula (lei da corrente de Kirchhoff). Assim, de acordo com a fig. 5.3, a corrente de emissor  $i_E$  é igual à soma da corrente de colector  $i_C$  com a corrente de base  $i_B$ ,

$$i_E = i_C + i_B \quad (13) \quad \xrightarrow{\text{Usando eqs. (10) e (13)}} \quad i_E = \left( \frac{\beta + 1}{\beta} \right) i_C \quad (14)$$

ou

$$i_E = \left( \frac{\beta + 1}{\beta} \right) I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (15)$$

$$i_C = \alpha i_E \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (17)$$

$$i_E = \left( \frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad (18)$$

■ Representando  $\beta$  em função de  $\alpha$ :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (19)$$



### Corrente de Emissor (Cont.)

■ Como se vê pela Eq. (17),  $\alpha$  é uma constante (para o transistor em questão) menor do que, mas muito **próxima da unidade**. Por exemplo, se  $\beta = 100$ , então  $\alpha \cong 0,99$ . A Eq. (17) revela um facto importante: **pequenas variações em  $\alpha$  correspondem a grandes variações em  $\beta$** . Esta observação puramente matemática tem uma consequência física extraordinariamente relevante: **transístores do mesmo tipo podem ter valores muito diferentes de  $\beta$** . Por razões que adiante serão evidentes,  $\alpha$  **chama-se ganho em corrente base-comum**.

### Resumo

Apresentámos um modelo de 1ª ordem para o funcionamento do transistor *npn* em **modo activo**. Basicamente, **a tensão de polarização directa  $v_{BE}$  causa uma corrente de colector  $i_C$  exponencialmente dependente**. Esta corrente é independente do valor da tensão de colector desde que a junção base-colector esteja inversamente polarizada, i.e.,  $v_{CB} \geq 0$ . Assim, **em modo activo, o terminal do colector comporta-se como uma fonte de corrente controlada ideal** em que o **valor da corrente é determinado por  $v_{BE}$** . A corrente de base  $i_B$  é um factor  $1/\beta$  da corrente de colector e a **corrente de emissor** é igual à **soma das correntes de colector e de base**. Uma vez que  $i_B$  é muito menor do que  $i_C$  (i.e.,  $\beta \gg 1$ ),  $i_E \cong i_C$ . Mais precisamente, a **corrente de colector é uma fracção  $\alpha$  da corrente de emissor, com  $\alpha$  menor, mas aproximadamente igual à unidade**.





## Modelos de circuitos equivalentes

O modelo elementar de funcionamento do transistor descrito atrás pode ser representado pelo circuito equivalente mostrado na fig. 5.5(a).

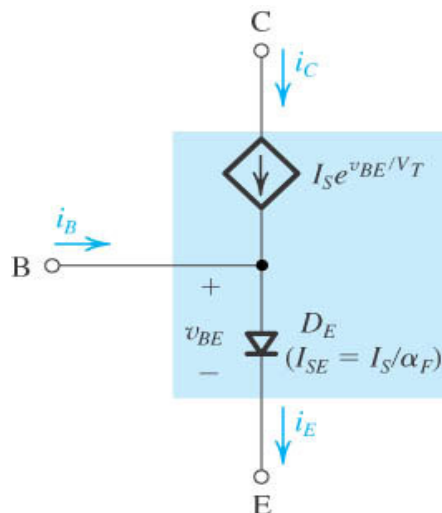


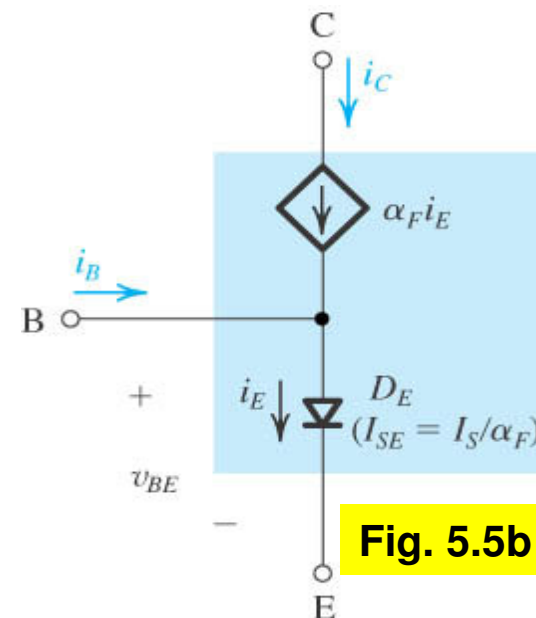
Fig. 5.5a

- Como se vê, o diodo  $D_E$  tem uma corrente inversa de saturação igual a  $I_S/\alpha$ , fornecendo assim uma corrente  $i_E$  relacionada com  $v_{BE}$  de acordo com a Eq. (18).
- A corrente da fonte controlada, que é igual à corrente de colector, é controlada por  $v_{BE}$  segundo a relação exponencial indicada pela eq. (3).
- Este modelo é, essencialmente, uma **fonte de corrente controlada por tensão**, não linear.



### Modelos de circuitos equivalentes (Cont.)

- Pode ser convertido no modelo com **fonte de corrente controlada por corrente** mostrado na fig. 5.5(b), exprimindo a corrente da fonte controlada como  $\alpha i_E$ .
- Note-se que este modelo é também não linear em virtude da relação exponencial da corrente  $i_E$  do diodo  $D_E$  com a tensão  $v_{BE}$ .
- Neste modelo vemos que se o transístor for encarado como um quadripolo, com o **porto de entrada entre E e B**, e o **porto de saída entre C e B** (i.e., com **B como terminal comum**), então o ganho de corrente é  $\alpha$ . É por esta razão que  $\alpha$  se chama **ganho em corrente base comum**.



**Fig. 5.5b**

**Exercício 5.1** – Considere um transístor *npn* com  $v_{BE}=0.7V$  para  $i_C=1mA$ . Determine  $v_{BE}$  para  $i_C=0.1mA$  e  $10mA$ .

**Solução:**  $v_{BE}=0.64 V$ ;  $v_{BE}=0.76 V$



### Modelos de circuitos equivalentes (Cont.)

**Exercício 5.2** – Transístores de um certo tipo são especificados ter valores para  $\beta$  na gama de 50-150. Determine a gama dos respectivos  $\alpha$ .

**Solução:** 0.98 a 0.993.

**Exercício 5.3** – Medidas efectuadas num transístor npn mostraram uma corrente de base  $14.46 \mu\text{A}$ , corrente de emissor  $1.46 \text{ mA}$  e tensão base-emissor  $0.7 \text{ V}$ . Determine  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $I_S$ .

**Solução:** 0.99; 100;  $10^{-15}$ .

**Exercício 5.4** – Calcule  $\beta$  para dois transístores para os quais  $\alpha = 0.99$  e  $0.98$ . Para correntes de colector de  $10 \text{ mA}$ , determine a corrente de base de cada transístor.

**Solução:** 99; 49;  $0.1 \text{ mA}$ ;  $0.2 \text{ mA}$ .



### Estrutura dos transístores reais

■ A fig. 5.6 mostra uma secção transversal simplificada, mas mais realista de um transístor npn.

■ Note-se que o colector praticamente envolve a região do emissor, tornando assim mais difícil que os electrões injectados na estreita base escapem de ser colectados. Desta forma, o  $\alpha$  resultante é próximo da unidade e  $\beta$  é grande.

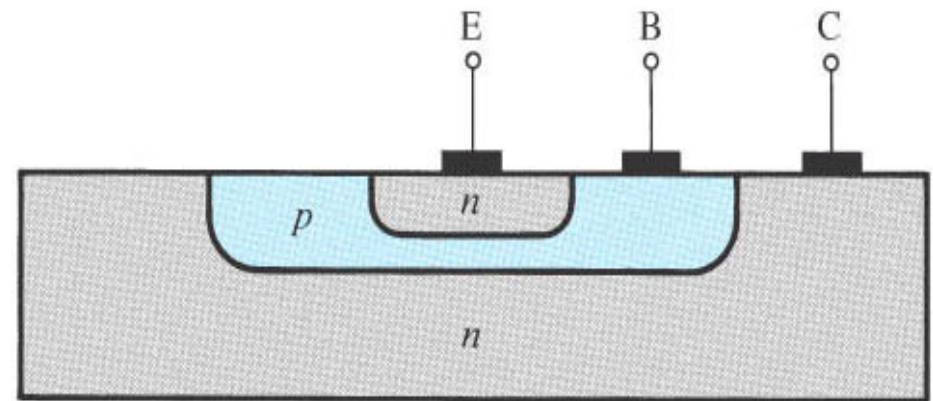
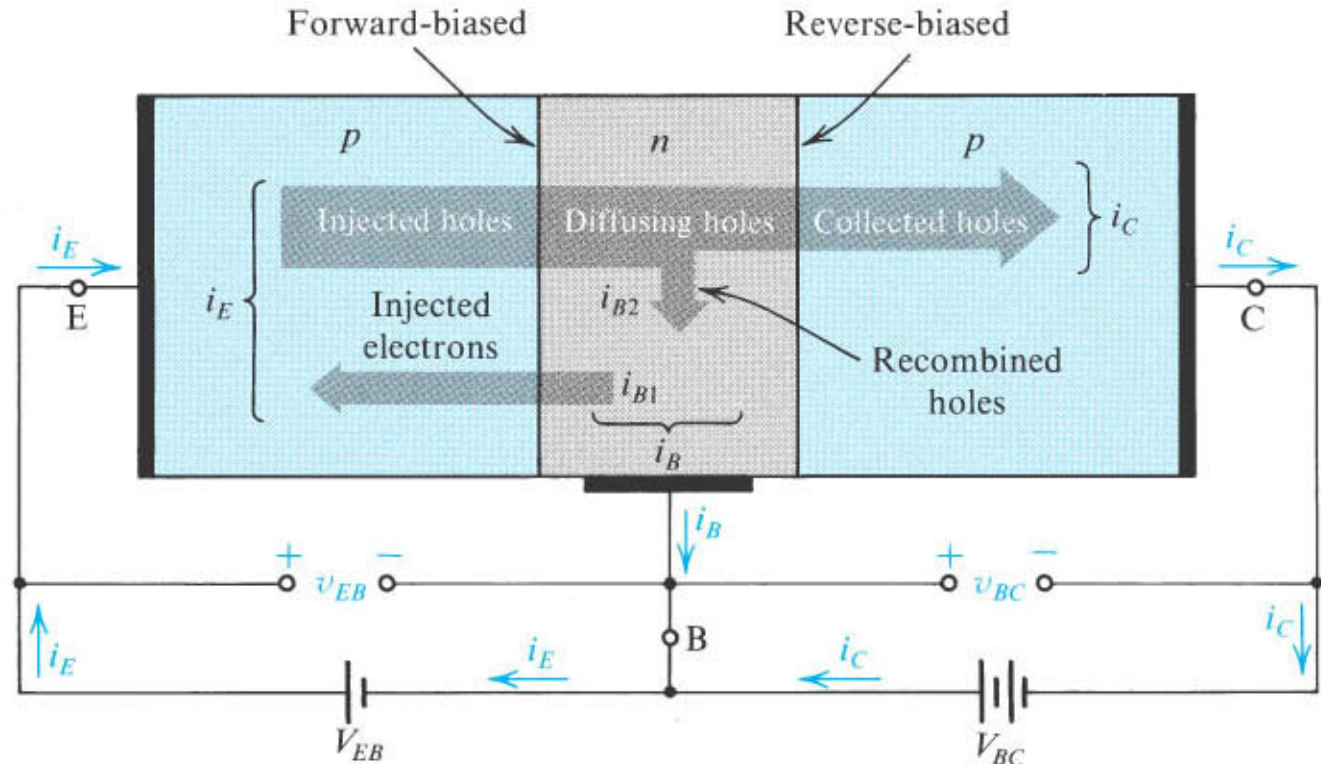


Fig. 5.6

Transistor pnp

Fig. 5.7

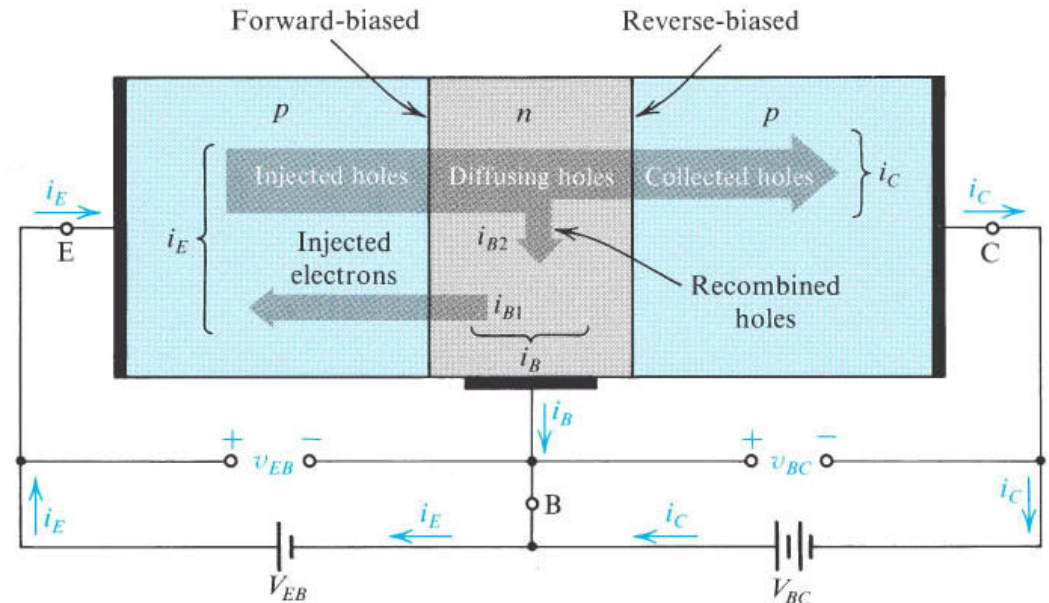


- O transistor pnp funciona de uma forma semelhante à do transistor npn. A fig. 5.7 mostra um **transistor pnp polarizado para funcionar em modo activo**.
- Como se vê, a tensão  $V_{EB}$  polariza directamente a junção base-emissor, enquanto a junção colector-base é polarizada inversamente pela tensão  $V_{BC}$ .

## Transistor pnp (cont.)

■ Ao contrário do transistor npn, a corrente no transistor pnp é principalmente devida a **lacunas injectadas pelo emissor na base em resultado da tensão de polarização directa  $V_{EB}$** . Uma vez que a componente da corrente do emissor correspondente aos electrões injectados pela base no emissor é muito pequena, em virtude de a base ser muito pouco dopada, a corrente de emissor é **essencialmente uma corrente de lacunas**.

■ Os electrões injectados pela base no emissor constituem a componente dominante,  $i_{B1}$ , da corrente de base. Algumas das lacunas injectadas na base recombinam-se com os portadores maioritários da base (electrões), perdendo-se assim. Estes electrões têm de ser substituídos pelo circuito exterior, originando a segunda componente da corrente de base,  $i_{B2}$ .



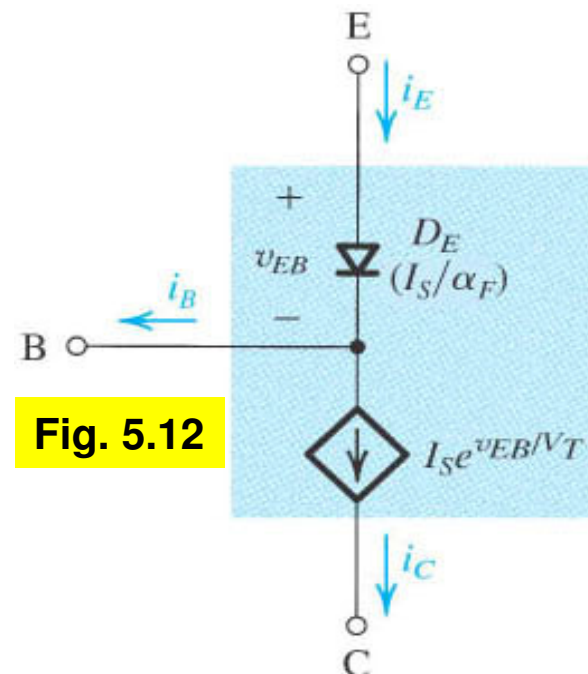
■ As lacunas que conseguem atingir a fronteira da região de depleção da junção colector-base são aceleradas pelo campo eléctrico aí existente e penetram no colector, constituindo a corrente de colector.



## Transistor pnp (cont.)

■ Conclui-se facilmente desta descrição que as **relações corrente-tensão do transistor pnp são idênticas às do transistor npn, substituindo  $v_{BE}$  por  $v_{EB}$ .**

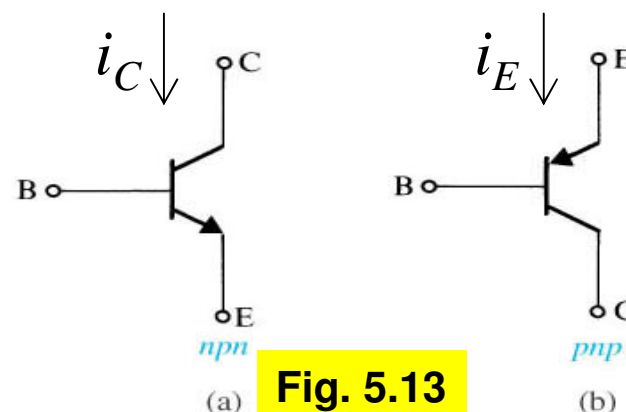
■ O **funcionamento em modo activo**, para grandes sinais, do transistor pnp pode ser modelizado pelo circuito representado na fig. 5.12



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO

■ A fig. 5.13 mostra os símbolos usados para representar os esquemas de circuito dos transistores npn (a) e pnp (b).

■ Em ambos os símbolos o **emissor distingue-se por uma seta.**







## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

■ A polaridade do transistor - *npn* ou *pnp* - é indicada pelo sentido da ponta da seta do emissor. O sentido desta seta indica o sentido da corrente normal do emissor e também o sentido da polarização directa da junção emissor-base.

■ Uma vez que, normalmente se desenham os circuitos por forma que **as correntes fluam de cima para baixo**, desenharemos os transistores, em geral, da forma indicada na fig.5.13, i.e., os **npn com o emissor em baixo** e os **pnp com o emissor em cima**.

■ A fig. 5.14 mostra transistores npn e pnp polarizados para funcionarem no modo activo.

Note-se, entretanto, que o método de polarização indicado, com duas fontes de alimentação, é meramente simbólico. Veremos adiante esquemas práticos de polarização. A fig.5.14 indica também os sentidos verdadeiros das correntes do transistor. Adoptaremos por convenção como sentidos de referência os verdadeiros, pelo que, normalmente, não encontraremos valores negativos para  $i_E$ ,  $i_B$  ou  $i_C$ .

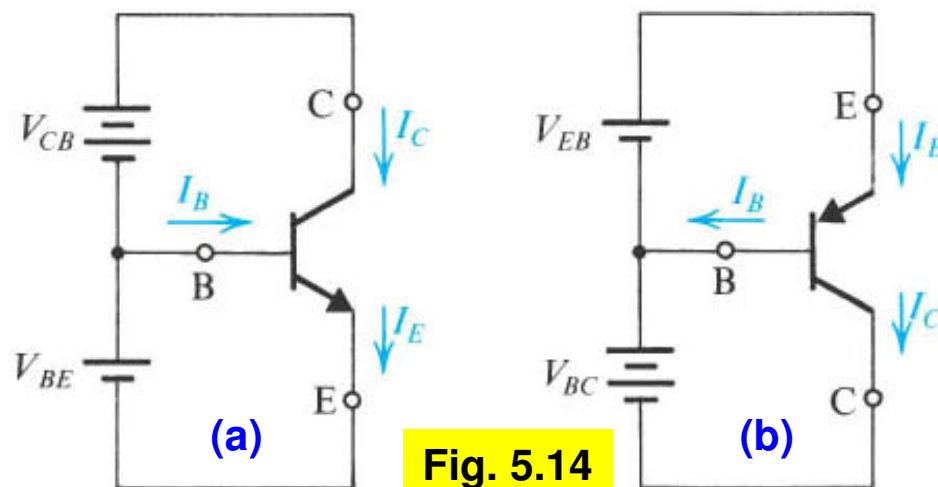


Fig. 5.14



### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

■ A conveniência das convenções adoptadas revela-se óbvia pela simples observação da fig. 5.14. Note-se que as correntes fluem de cima para baixo e que as tensões são mais altas em cima do que em baixo. Como a seta do emissor também indica a polaridade que deve ter a tensão emissor-base para polarizar directamente essa junção, um simples relance ao símbolo do transistor pnp, por exemplo, mostra que a tensão do emissor deve ser maior do que a da base (de  $v_{EB}$ ) para que a corrente flua no sentido indicado (para baixo). Note-se que a notação  $v_{EB}$  significa a tensão entre E (tensão mais alta) e B (tensão mais baixa). Assim, para um transistor pnp, funcionando no modo activo,  $v_{EB}$  é positiva, enquanto para um npn, é  $v_{BE}$  que é positiva.

■ Da análise que fizemos anteriormente decorre que um **transistor npn**, cuja **junção base-emissor está polarizada directamente**, **funcionará em modo activo** desde que o **potencial do colector seja mais alto do que o da base**. De facto, o transistor funcionará em modo activo se a *tensão do colector não for inferior à da base de um valor aproximadamente igual a 0.4 V*. Caso contrário, a junção do colector ficará polarizada directamente e o transistor entra no modo de saturação.



### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

■ De forma análoga, o transistor *pnp* funcionará em **modo activo** se a **junção emissor- base for directamente polarizada** e a **tensão do colector não for superior à da base por mais de que 0.4 volts**. Caso contrário, a junção base-colector fica directamente polarizada e o **transistor pnp entra em saturação**.

#### A corrente inversa colector-base ( $I_{CBO}$ )

- Na análise anterior do fluxo de corrente no transistor, ignorámos as pequenas correntes inversas devidas aos **portadores minoritários gerados termicamente**.
- Apesar de nos transistores modernos, estas correntes poderem ser desprezadas sem significativa perda de rigor, a **corrente inversa da junção colector- base** merece alguma referência.
- Esta corrente, designada por  $I_{CBO}$ , é a corrente inversa que flui do colector para a base com o **emissor em circuito aberto** (daí o índice “O” de “open”). Esta corrente é usualmente da **ordem do nanoampère**, um valor que é muitas vezes maior do que o seu valor teoricamente previsto.  $I_{CBO}$  **depende fortemente da temperatura, duplicando aproximadamente por cada 10°C de aumento**.



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Resumo das relações corrente-tensão do TJB no modo activo de operação

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left( \frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE}/V_T} \quad i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left( \frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE}/V_T}$$

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

$$\begin{aligned} i_C &= \alpha i_E & i_B &= (1-\alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta+1} \\ i_C &= \beta i_B & i_E &= (\beta+1) i_B \end{aligned}$$

$$V_T = \text{tensão térmica} = \frac{kT}{q} \\ \cong 25 \text{ mV na temperatura ambiente}$$

**NOTA:** Para transístores *pnp*, substitua  $v_{BE}$  por  $v_{EB}$

## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Exemplo

■ Considere-se o circuito da fig. 5.15(a), em que o transistor tem  $\beta = 100$  e exibe uma tensão  $v_{BE}$  de 0,7 V para  $i_C = 1$  mA. Pretende-se projectar o circuito (calcular  $R_C$  e  $R_E$ ) por forma que a corrente de colector seja de 2 mA e a tensão do colector seja +5 V.

### Resolução

■ Como se indica na fig. 5.15(b), para obter uma tensão  $V_C = +5$  V, a queda de tensão em  $R_C$  deve ser  $15 - 5 = 10$  V. Assim, uma vez que se pretende  $I_C = 2$  mA, o valor de  $R_C$  deve ser escolhido igual a

$$R_C = \frac{10V}{2mA} = 5k\Omega$$

Uma vez que  $v_{BE} = 0,7$  V para  $i_C = 1$  mA, o valor de  $v_{BE}$  para  $i_C = 2$  mA é,

$$V_{BE} = 0,7 + V_T \ln\left(\frac{2}{1}\right) = 0,717V$$

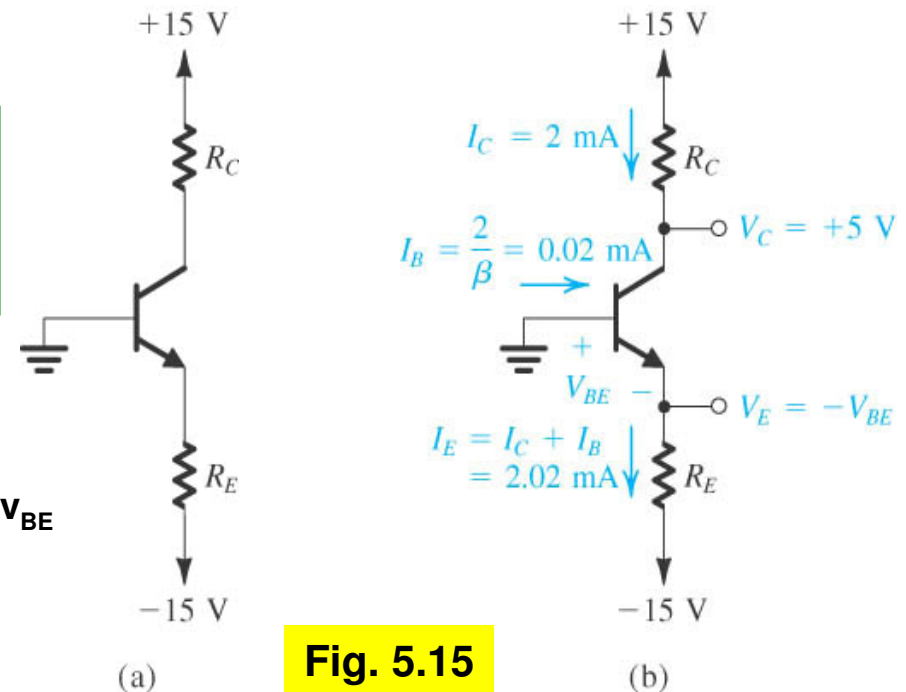


Fig. 5.15



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Resolução (cont.)

■ Uma vez que a tensão da base é 0 V, a tensão do emissor deve ser

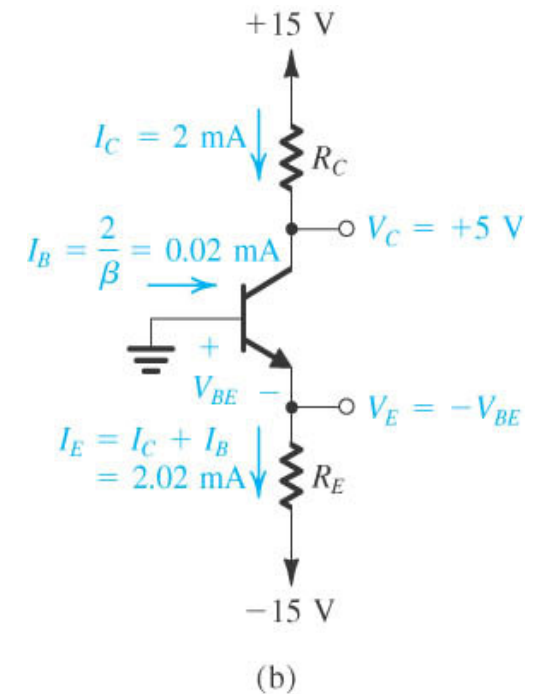
$$V_E = -0,717 \text{ V}$$

■ Com  $\beta=100$ ,  $\alpha = 100/101 = 0,99$ . Assim, a corrente de emissor é,

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{2}{0,99} = 2,02 \text{ mA}$$

■ O valor requerido para  $R_E$  é determinado pela lei de Ohm:

$$\begin{aligned} R_E &= \frac{V_E - (-15)}{I_E} \\ &= \frac{-0,717 + 15}{2,02} = 7,07 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$





## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### EXERCÍCIO 5.10

No circuito mostrado na figura E5.10, foi medida uma tensão no emissor de  $-0.7\text{ V}$ . Se  $\beta = 50$ , determine  $I_E$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  e  $V_C$ .

Solução:  $0.93\text{ mA}$ ;  $18,2\text{ }\mu\text{A}$ ;  $0.91\text{ mA}$ ;  $5.45\text{ V}$ .

### EXERCÍCIO 5.11

No circuito mostrado na figura E5.11, foram medidos as seguintes grandezas:  $V_B = 1\text{ V}$ ;  $V_E = 1.7\text{ V}$ . Determine  $\alpha$  e  $\beta$  para este transistor. Que tensão é esperada no colector.

Solução:  $0.994$ ;  $165$ ;  $-1.75\text{ V}$

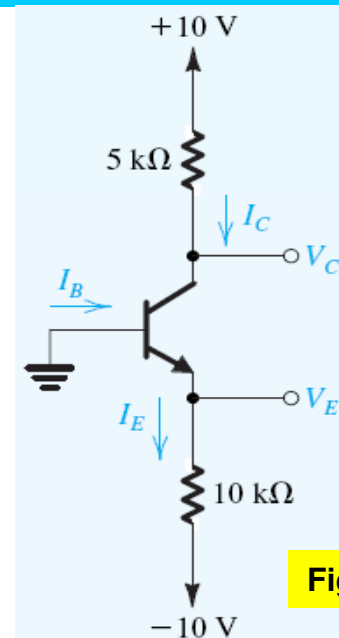


Fig. E5.10

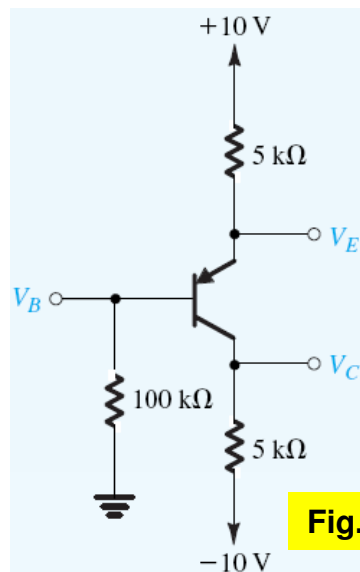


Fig. E5.11





## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

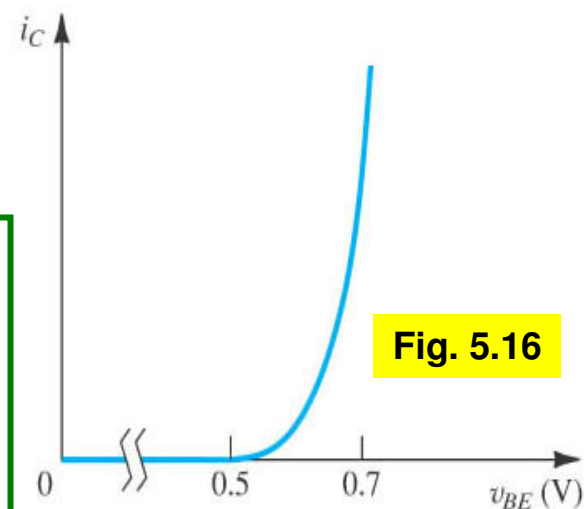
### Representação gráfica das características dos transístores

- É útil, por vezes, descrever graficamente as características i-v do transístor.
- Figura 5.16 mostra a característica  $i_C - v_{BE}$ ,

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

idêntica (à excepção da constante n) à relação i-v do díodo.

■ As características  $i_E - v_{BE}$  e  $i_B - v_{BE}$  são também exponenciais mas com diferentes correntes inversas de saturação:  $I_S/\alpha$  para  $i_E$  e  $I_S/\beta$  para  $i_B$ . Uma vez que a constante do expoente,  $1/V_T$  é bastante elevada ( $\cong 40$ ), a curva sobe abruptamente.



■ Para  $v_{BE}$  menor do que cerca de 0,5 V, a corrente é desprezável, e para a gama habitual de correntes a **tensão  $v_{BE}$  situa-se entre 0,6 e 0,8 V**. Ao realizar análises rápidas, admitimos, habitualmente, que  $V_{BE} \cong 0,7$  V que é uma aproximação semelhante à que usamos na análise dos circuitos com díodos. Para um **transístor pnp**, a característica  $i_C - v_{EB}$  tem um aspecto idêntico à da fig. 5.16.



### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

#### Representação gráfica das características dos transístores (Cont.)

■ Como nos díodos de silício, a tensão da junção base-emissor diminui cerca de 2mV por cada aumento de 1°C da temperatura, em **condições de corrente constante**. A fig. 5.17 ilustra esta dependência com a temperatura com a representação de curvas  $i_C$ -  $v_{BE}$  de um transístor *npn* para três temperaturas diferentes.

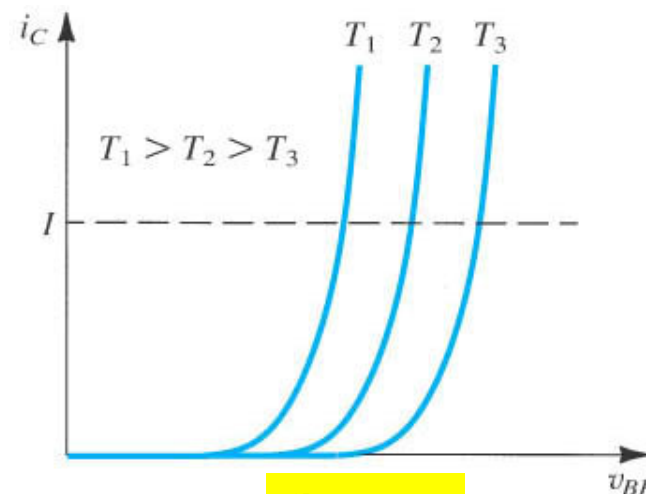


fig. 5.17

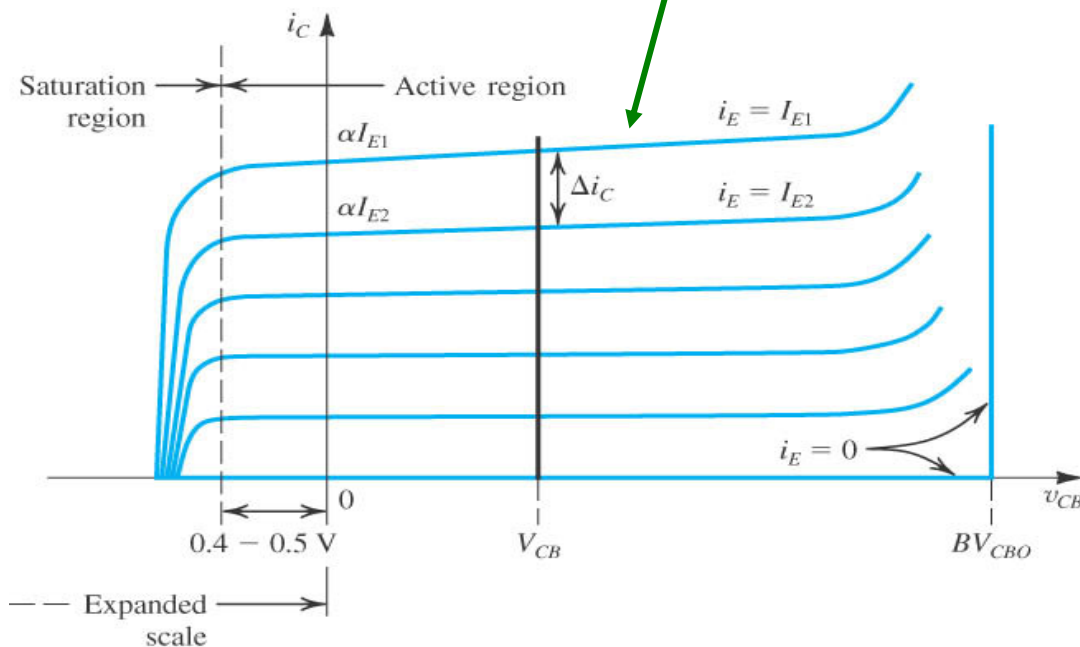
#### Características base-comum

- Um modo de descrever o **funcionamento de um transístor bipolar** consiste em representar  $i_C$  em função de  $v_{CB}$ , **para vários valores de  $i_E$** .
- Um circuito experimental para a medição de tais características é mostrado na figura 5.18a.

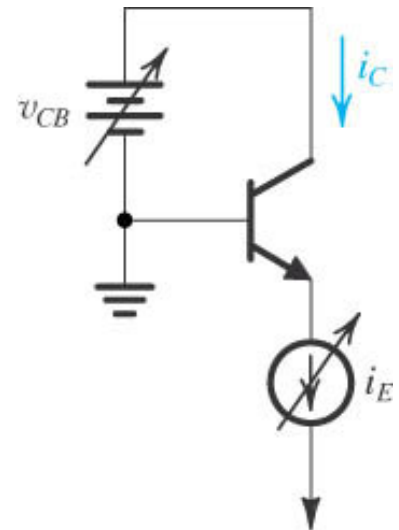
## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Representação gráfica das características dos transístores (Cont.)

Note-se que nestas medições, a **tensão de base é mantida constante (ao potencial de ground)**. A base serve, assim, como terminal comum entre os portos de entrada e de saída. Como resultado, o conjunto de características, mostrado na figura 5.18b, são conhecidas como **características base-comum**.



(b)



(a)

Fig. 5.18



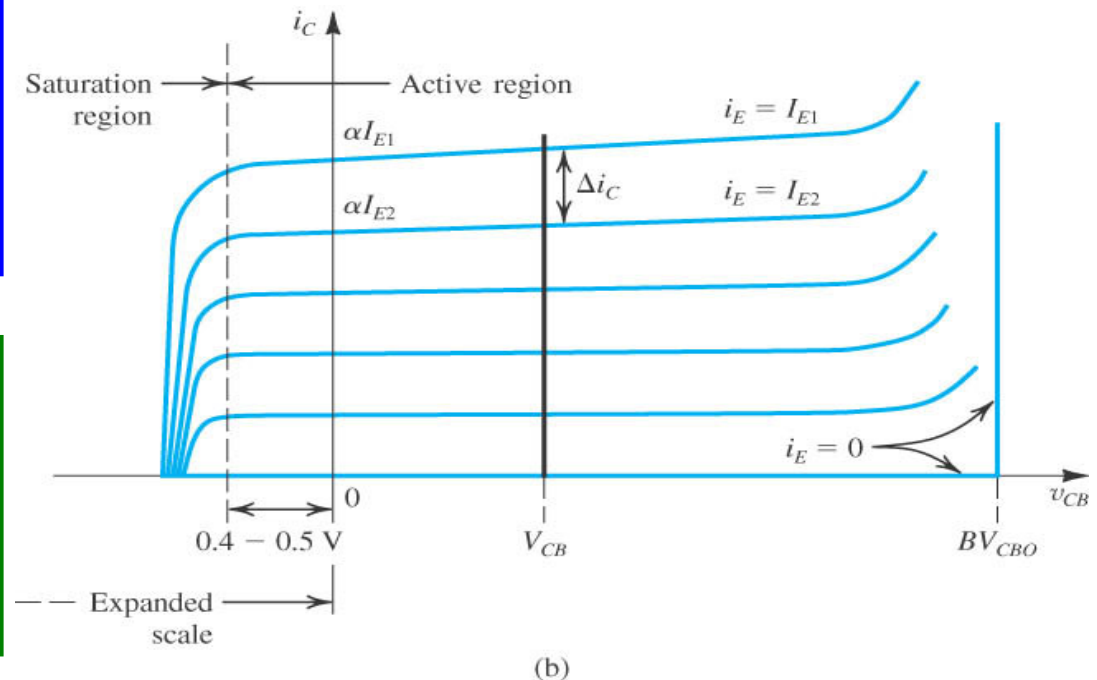
## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Representação gráfica das características dos transístores (Cont.)

- Na região activa de operação, obtida para  $v_{CB} \geq -0.4 \text{ V}$ , as curvas desviam-se do esperado em **dois aspectos**.
- **Primeiro**, as curvas não são linhas rectas horizontais, mas apresentam um pequeno declive positivo, indicando que  $i_C$  **depende ligeiramente de  $v_{CB}$  no modo activo**.

■ **Segundo**, para valores relativamente grandes de  $v_{CB}$ , a corrente de colector mostra um rápido incremento, o qual constitui um **fenómeno de ruptura**.

■ Cada uma das curvas características intersecta o eixo vertical para um nível de corrente igual a  $\alpha I_E$  onde  $I_E$  é a corrente constante de emissor para a qual a curva particular é medida.



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Representação gráfica das características dos transístores (Cont.)

■ O valor resultante de  $\alpha$ , é um  $\alpha$  **total** ou de **grande-sinal**, i.e.,  $\alpha = i_C / i_E$ .

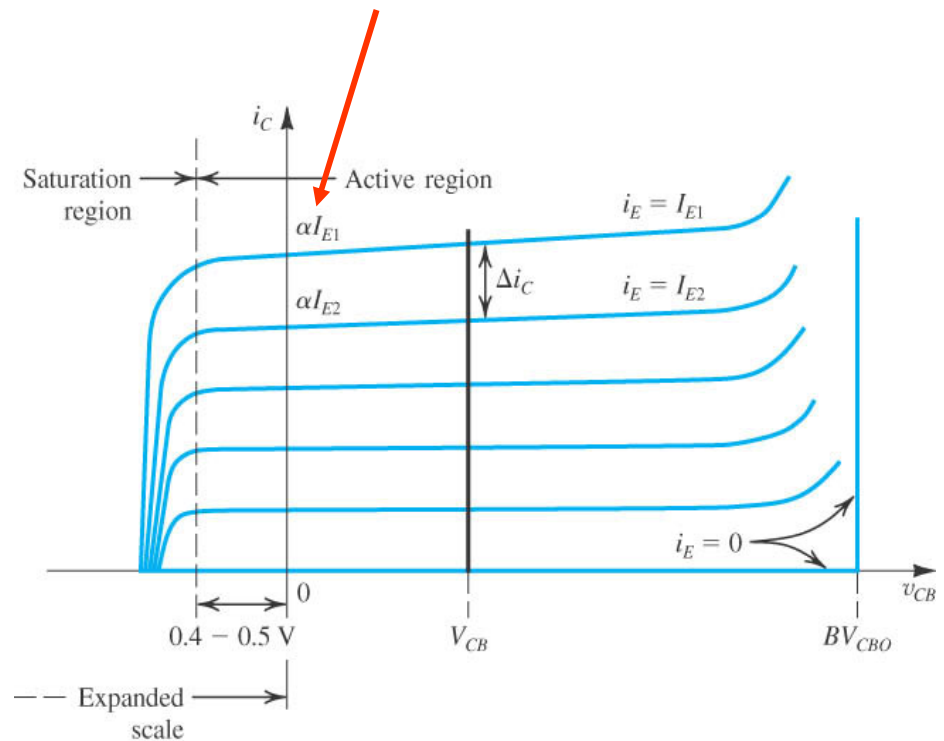
■ Um  $\alpha$  **para pequenos sinais ou incremental**, pode ser determinado medindo a variação em  $i_C$ ,  $\Delta i_C$ , obtida como resultado da variação de  $i_E$ , através de um incremento  $\Delta i_E$ ,

$$\alpha = \Delta i_C / \Delta i_E$$

■ Esta medição é usualmente efectuada para uma tensão  $v_{CB}$  **constante** ( ver figura 5.18b).

■ Em geral os valores do  $\alpha$  incremental e total diferem pouco e não será feita distinção entre eles.

#### Ganho de corrente em base-comum



(b)

## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Dependência de $i_C$ relativamente à tensão de colector – O EFEITO DE EARLY

- Na região activa, os transístores bipolares reais mostram alguma dependência da corrente de colector relativamente à tensão do colector, resultando que as **características  $i_C - v_{CB}$  não são rectas perfeitamente horizontais**, como observado.
- Para **analisar mais claramente esta dependência**, considere-se o circuito conceptual da fig. 5.19a.

■ O transístor está ligado em **configuração de emissor comum** e a sua  $V_{BE}$  pode ser ajustada através da fonte de tensão variável ligada entre a base e o emissor. Para cada valor de  $V_{BE}$ , a correspondente curva **característica  $i_C - v_{CE}$**  pode ser medida ponto a ponto, **variando o valor da fonte de tensão dc ligada entre o colector e o emissor** e **medindo a correspondente corrente de colector**. O resultado é a família de curvas  $i_C - v_{CE}$  mostradas na fig. 5.19(b).

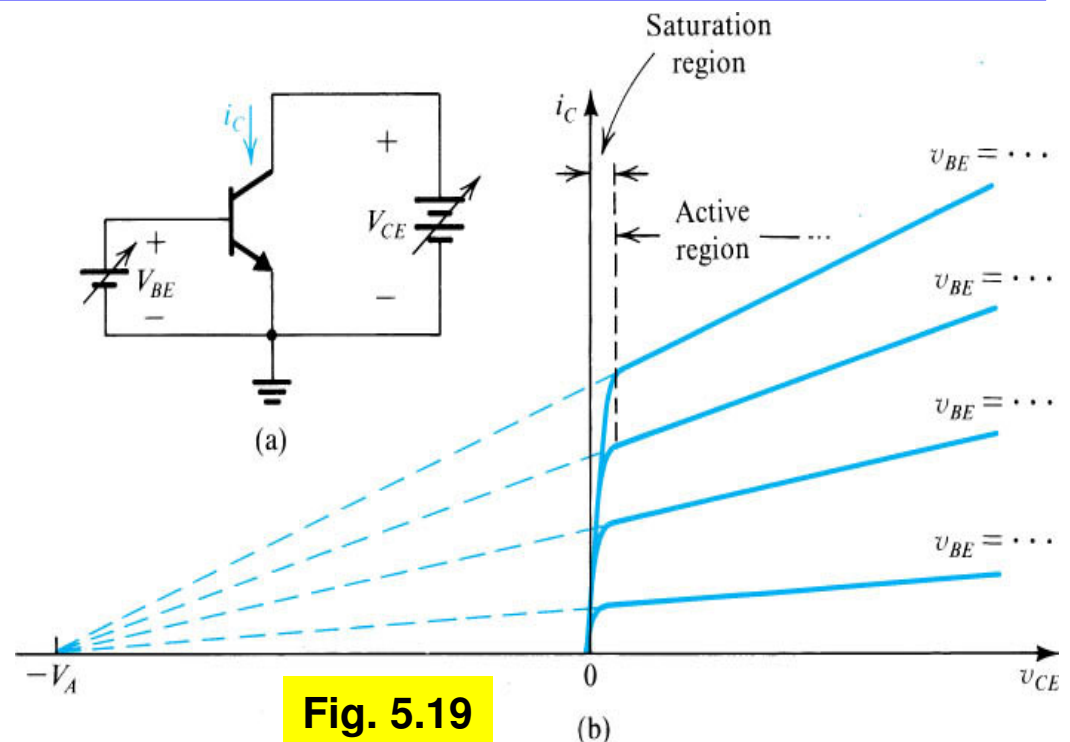


Fig. 5.19



### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

#### Dependência de $i_c$ relativamente à tensão de colector – O EFEITO DE EARLY

- Para baixos valores de  $v_{CE}$ , à medida que a tensão de colector se torna inferior à da base de um valor inferior a 0.4V, a junção colector-base fica polarizada directamente, pelo que o transístor deixa o modo activo e entra no **modo de saturação**.
- Examine-se mais em pormenor as características na região activa.
- Observa-se que, apesar de serem linhas rectas, não são horizontais, i.e., têm inclinação não nula.
- De facto, prolongando essas rectas para a parte negativa do eixo de  $v_{CE}$ , verificamos que se intersectam num único ponto desse eixo, para  $v_{CE} = -V_A$ .
- A tensão  $V_A$ , um número positivo, é um parâmetro para o BJT, com valores típicos na gama de 50 a 100 V.
- É designada por **tensão de Early**, em homenagem ao cientista (J.M. Early) que primeiro estudou este fenómeno.
- Para um dado valor de  $v_{BE}$ , aumentando  $v_{CE}$  **umenta a tensão inversa da junção base-colector** e, assim, **umenta a largura da região de depleção desta junção**. Isto, por sua vez, **provoca uma diminuição da largura efectiva da base  $W$** . Recordando que  $I_s$  **é inversamente proporcional a  $W$** , **vê-se que  $I_s$  aumentará e  $i_c$  aumenta proporcionalmente**. É este o **efeito de Early**, também conhecido como **efeito da modulação da largura da base**.





## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Dependência de $i_C$ relativamente à tensão de colector – O EFEITO DE EARLY

■ A dependência linear de  $i_C$  com  $v_{CE}$  pode ser tida em conta admitindo que  $I_S$  permanece constante e incluindo o factor  $(1 + v_{CE} / V_A)$  na equação de  $i_C$  como segue:

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \quad (5.36)$$

■ A inclinação não nula das rectas  $i_C - v_{CE}$  indica que a resistência de saída vista do colector não é infinita. Pelo contrário, é finita e definida por,

$$r_o \equiv \left[ \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \bigg|_{v_{BE}=\text{constante}} \right]^{-1} \quad (5.37) \xrightarrow{\text{Usando (5.36)}} r_o = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \quad (5.38)$$

onde  $I_C$  e  $V_{CE}$  são as coordenadas do ponto para as quais o BJT opera na curva particular  $i_C - v_{CE}$  (i.e., a curva obtida para  $v_{BE} = V_{BE}$ ). Alternativamente, pode escrever-se,

$$r_o = \frac{V_A}{I'_C} \quad (5.38a) \quad \text{Valor da corrente de colector com o efeito de Early desprezado, i.e.:}$$

$$I'_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (5.38b)$$

## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Dependência de $i_C$ relativamente à tensão de colector – O EFEITO DE EARLY

- Raramente é necessário incluir a dependência de  $i_C$  com  $v_{CE}$  no projecto de polarização e análise em corrente contínua.
- Todavia, a **resistência de saída finita  $r_o$  pode ter um efeito significativo no ganho de amplificadores com transístores**, como se verá adiante.
- **A resistência de saída  $r_o$  pode ser inserida no modelo de circuito para o transístor.**
- Tal é ilustrado na fig. 5.20 (modelos de circuitos para **grandes sinais de um transístor *npn* operando em modo activo**).
- Os dois modelos diferem apenas na função de controlo: Na figura 5.20(a), a **tensão  $v_{BE}$  controla a fonte de corrente do colector**, enquanto que no circuito da figura 5.20(b) **é a corrente de base que controla a fonte de corrente ( $\beta i_B$ )**.

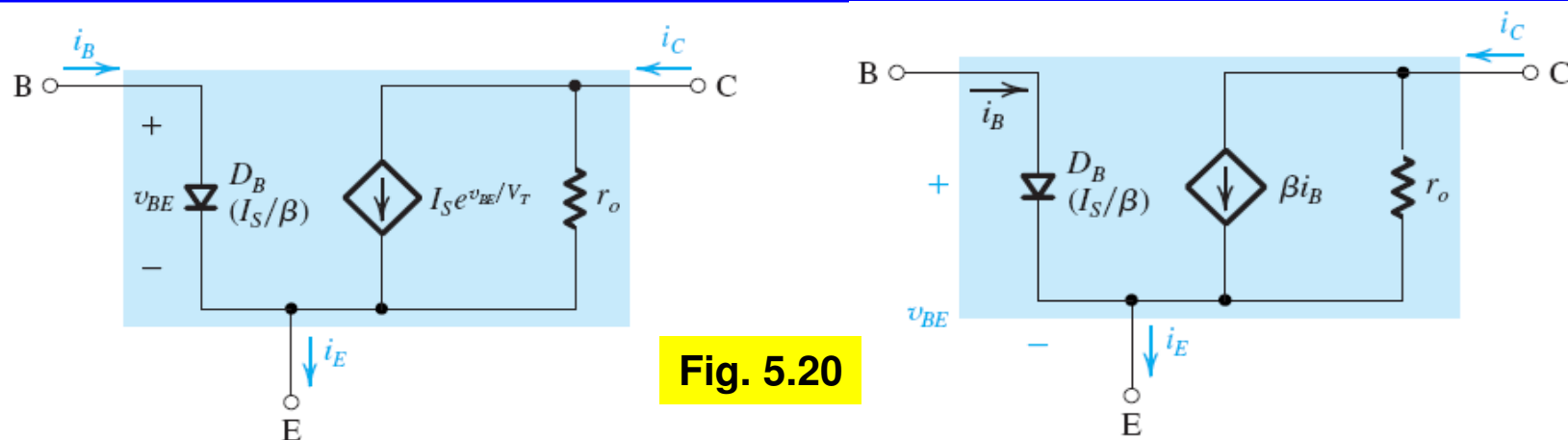


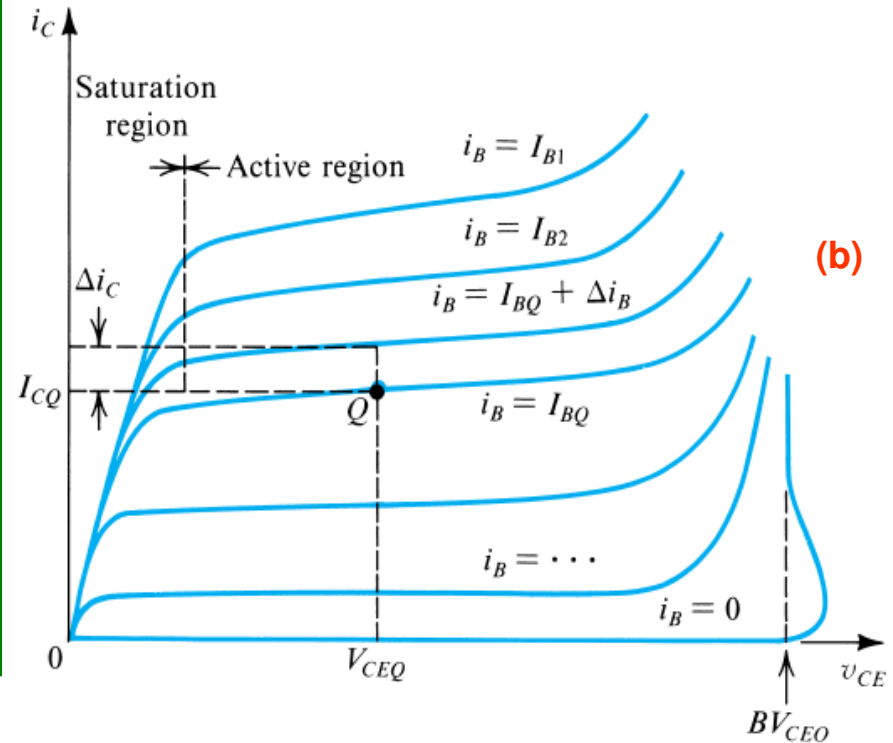
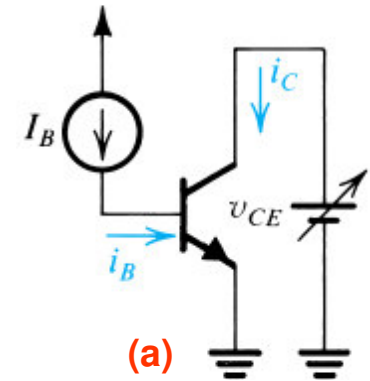
Fig. 5.20

## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Características Emissor - Comum

- Um modo alternativo de representação das características do transístor emissor-comum é ilustrado na figura 5.21.
- A corrente de base  $i_B$  é usada como parâmetro em vez da tensão base-emissor  $V_{BE}$ .
- Isto é, cada curva  $i_C$ - $v_{CE}$  é medida com a base alimentada por uma corrente constante  $I_B$ .
- As curvas características são similares às da figura 5.19 excepto, o fenómeno de ruptura mostrada aqui.

Fig. 5.21





## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

Características Emissor – Comum  $\Rightarrow$  Ganho em corrente  $\beta$

■ Importante parâmetro do transístor  $\rightarrow$  relação entre a corrente de colector e a corrente na base.

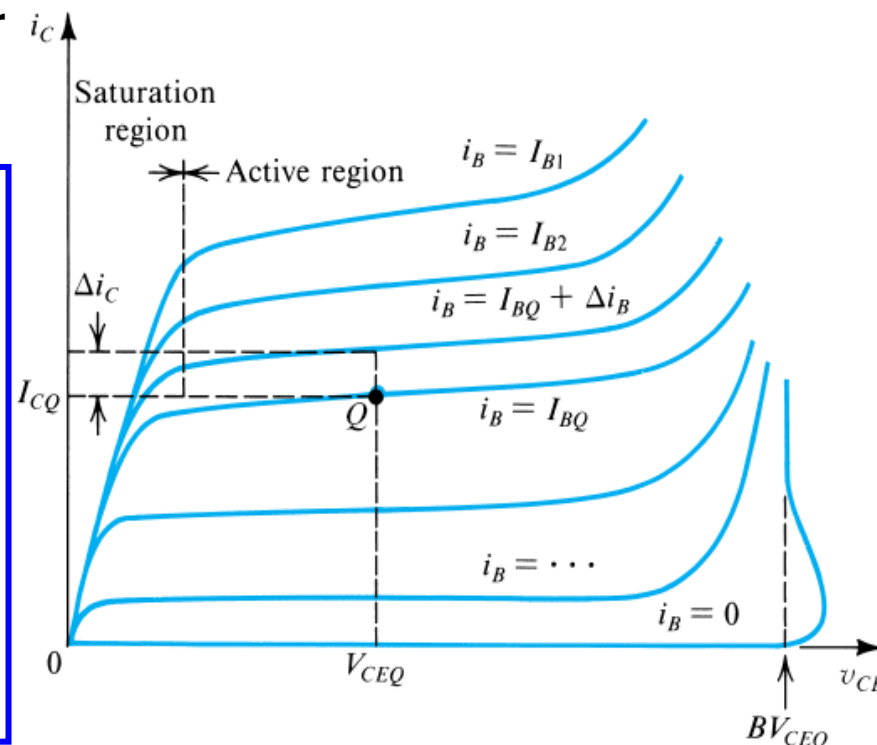
■ Assumido constante para um dado transístor

- Considere-se o transístor operando no modo activo no ponto Q:
- A relação entre a corrente de colector e a corrente de base traduz o  $\beta$  de grandes sinais ou dc:

$$\beta_{dc} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

5.39

- Nos datasheets este parâmetro surge referenciado por  $h_{FE}$ .





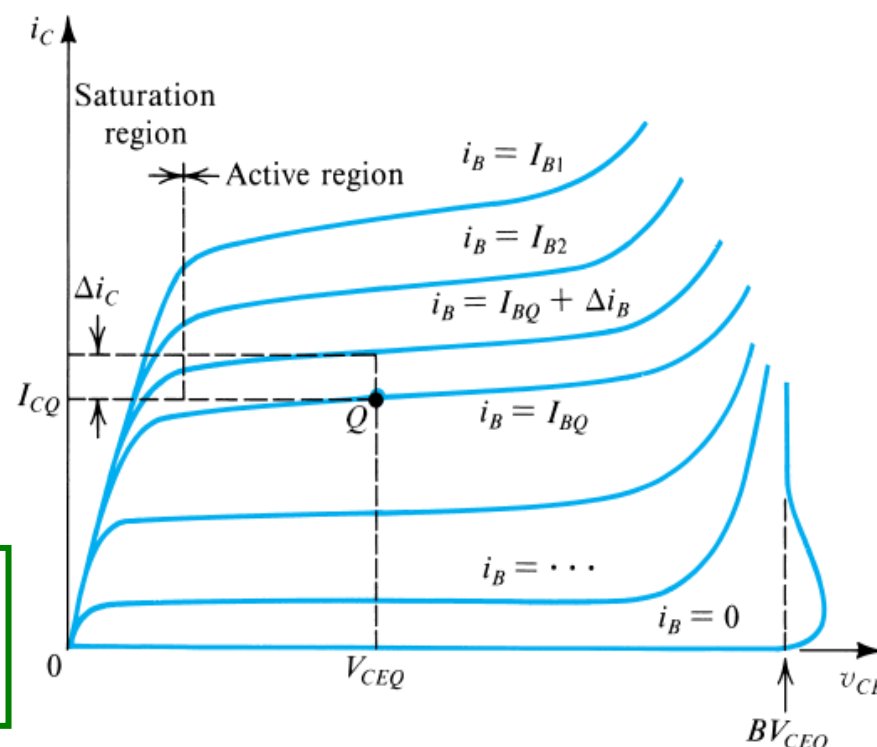
## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Características Emissor – Comum $\Rightarrow$ Ganho em corrente $\beta$

- Pode ser definido um outro  $\beta$ , baseado em pequenos sinais.
- De acordo com o gráfico, mantendo  $v_{CE}$  constante no valor  $V_{CEQ}$  e variando  $i_B$  de um valor  $I_{BQ}$  até  $(I_{BQ} + \Delta i_B)$ , resulta um  $i_C$  variando de  $I_{CQ}$  a  $(I_{CQ} + \Delta i_C)$ .
- Define-se, assim, o  $\beta$  incremental ou ac, como:

$$\beta_{ac} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}=\text{constante}} \quad 5.40$$

- As amplitudes de  $\beta_{ac}$  e  $\beta_{dc}$  diferem, tipicamente, de 10% a 20%.
- O parâmetro  $\beta_{ac}$  também é conhecido pelo  $h_{fe}$ .



- Pelo facto do  $\beta$  para pequenos sinais ser definido e medido para uma tensão  $v_{CE}$  constante, i.e., com uma componente de sinal nula entre colector e emissor, é conhecido como ganho de corrente emissor-comum em curto-circuito.



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Características Emissor – Comum $\Rightarrow$ Ganho em corrente $\beta$

■ O valor de  $\beta$  depende da corrente com que o transístor opera e essa relação toma a forma ilustrada na figura 5.22.

■ A figura 5.22 mostra, também, a variação de  $\beta$  com a temperatura.

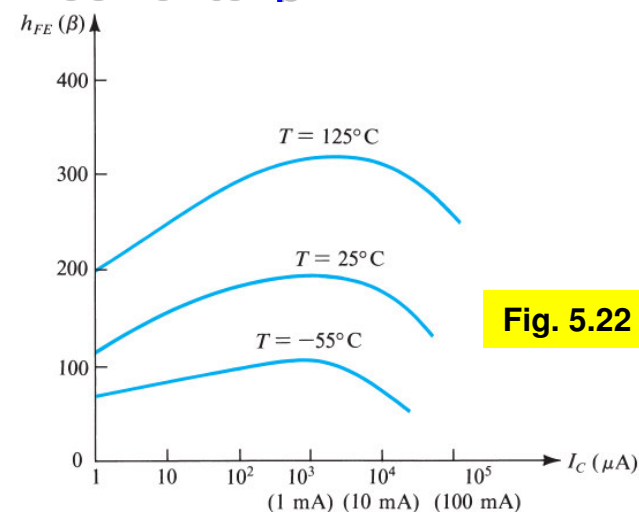


Fig. 5.22

### Tensão de Saturação $V_{CEsat}$ e Resistência de Saturação $R_{CEsat}$

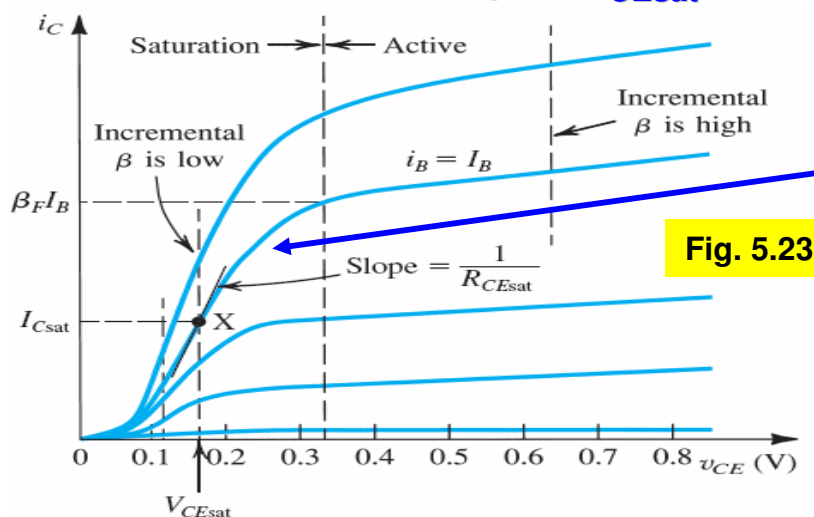


Fig. 5.23

Representação expandida da região de saturação das características emissor comum

O  $\beta$  nesta região é menor de que na região activa



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

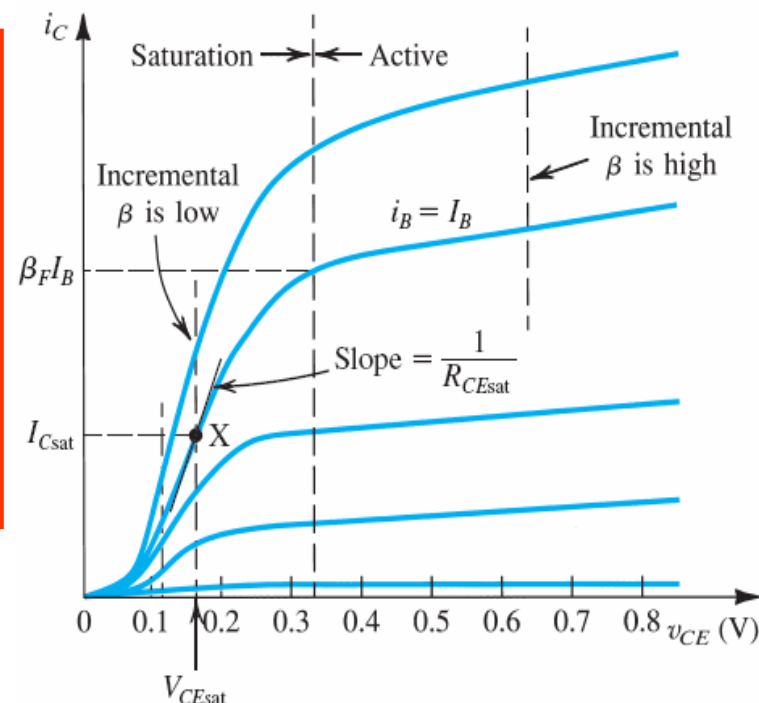
### Tensão de Saturação $V_{CEsat}$ e Resistência de Saturação $R_{CEsat}$

- Um ponto de operação possível está assinalado com X.
- É caracterizado por uma corrente de base  $I_B$ , uma corrente de colector  $I_{Csat}$  e uma tensão colector-emissor  $V_{CEsat}$ .
- Note-se que  $I_{Csat} < \beta_F I_B$ .
- Visto que o valor da corrente  $I_{Csat}$  é estabelecida pelo projectista, um transistor saturado é referido operar com um  $\beta$  forçado dado por,

$$\beta_{forçado} = \frac{I_{Csat}}{I_B}$$

(5.41)

com  $\beta_{forçado} < \beta_F$  (5.42)



- As curvas  $i_C$ - $v_{CE}$  na região de saturação, são bastante inclinadas indicando que o transistor saturado exibe uma resistência colector-emissor baixa,

$$R_{CEsat} = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{\substack{i_B = I_B \\ i_C = I_{Csat}}} \quad (5.43)$$

Nota: Tipicamente,  $R_{CEsat}$  varia de alguns ohms até algumas dezenas de ohms

## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Tensão de Saturação $V_{CEsat}$ e Resistência de Saturação $R_{CEsat}$

- A figura 5.24b mostra uma curva característica  $i_C$ - $v_{CE}$  do transistor em saturação ilustrado na figura 5.24a.
- A curva intersecta o eixo  $v_{CE}$  em  $V_T \ln(1/\alpha_R)$ , valor comum a todas as curvas  $i_C$ - $v_{CE}$ .

- A tangente no ponto de operação X, possui uma inclinação dada por  $1 / R_{CEsat}$ .
- A tangente intersecta o eixo  $v_{CE}$  para uma tensão  $V_{CEoff}$ , tipicamente de 0.1 V.

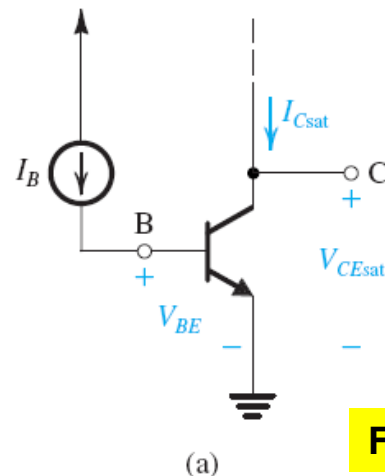
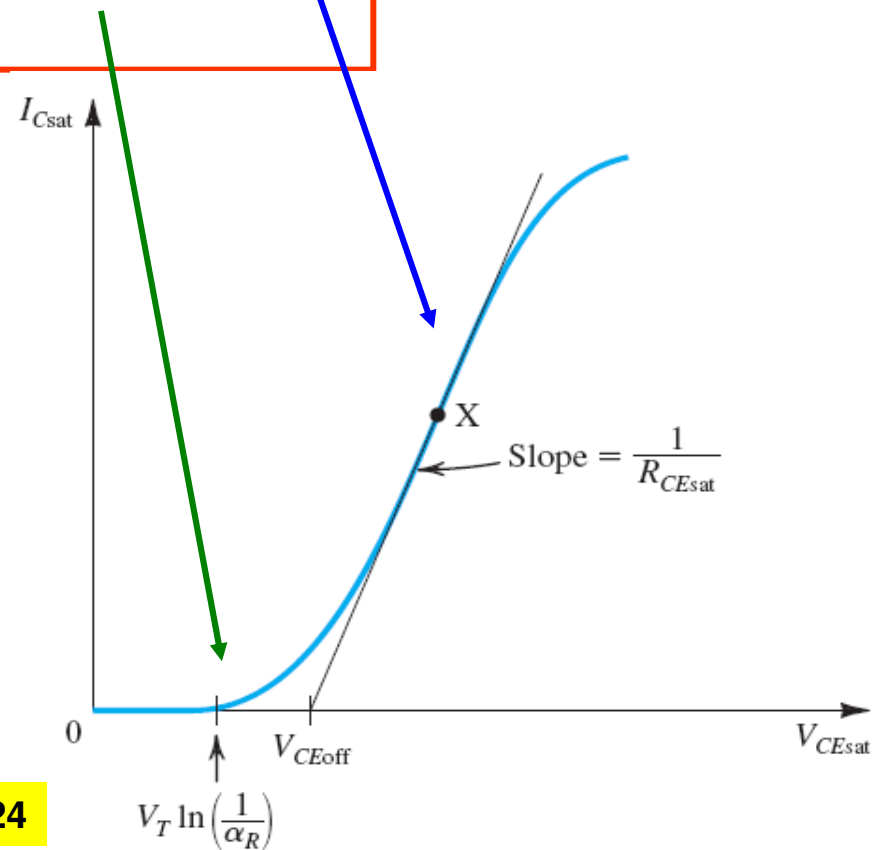


Fig. 5.24





## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

### Tensão de Saturação $V_{CEsat}$ e Resistência de Saturação $R_{CEsat}$

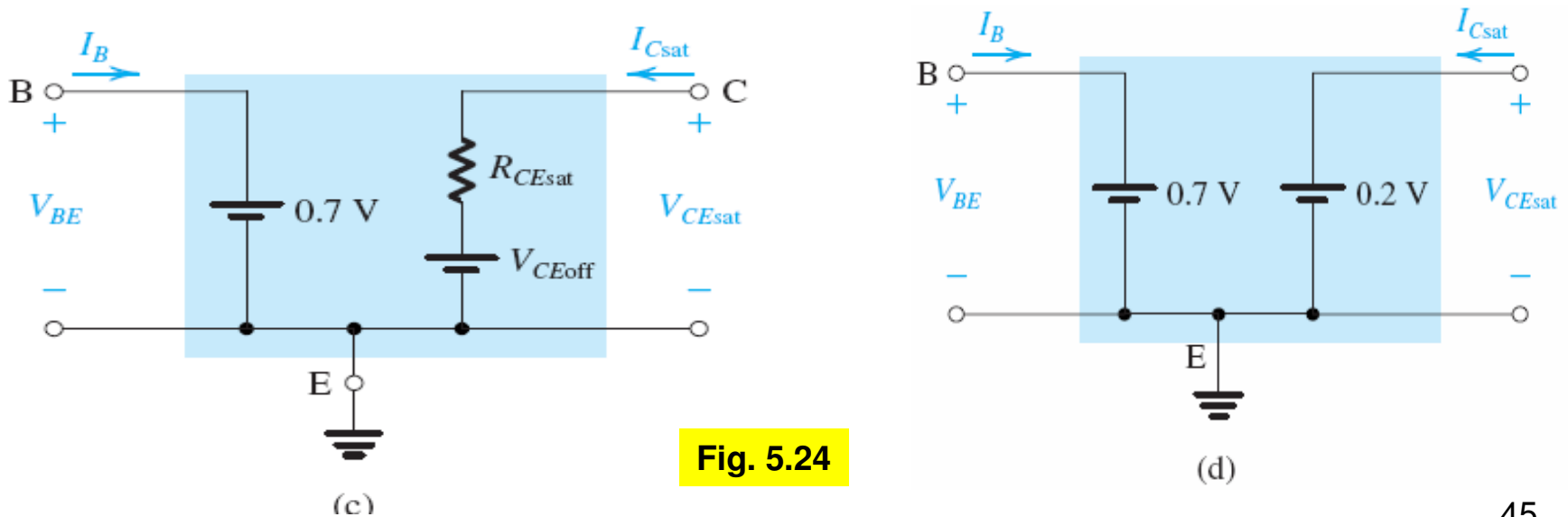
■ A característica  $i_C$ - $v_{CE}$  de um transistor em saturação, pode ser aproximadamente representada pelo circuito equivalente da figura 5.24c.

■ Do lado do colector, o transistor é representado pela resistência  $R_{CEsat}$ , em série com uma fonte  $V_{CEoff}$ .

■ A tensão de saturação  $V_{CEsat}$ , pode ser calculada através de, 
$$V_{CEsat} = V_{CEoff} + I_{Csat} R_{CEsat} \quad (5.44)$$

■ Tipicamente,  $V_{CEsat}$  varia entre 0.1 e 0.3 V.

■ Para a maioria das aplicações é aceitável usar o modelo mais simples, mostrado na figura 5.24d.



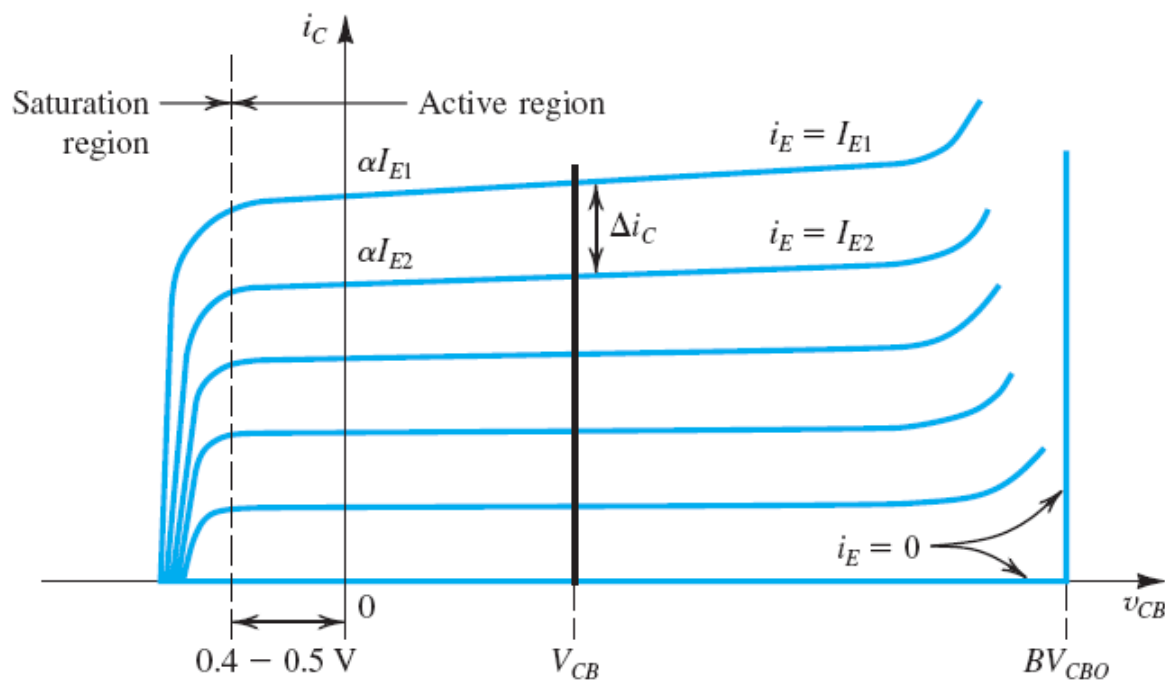


### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)



### Ruptura do transistor

- As tensões máximas que podem ser aplicadas a um BJT, são limitadas pelos efeitos de **ruptura das junções base-emissor e base-colector**.
- A característica  $i_C$ - $v_{CB}$  mostrada, indica que para  $i_E = 0$ , (emissor em circuito aberto) a junção base-colector entra em ruptura para uma tensão designada por  $BV_{CBO}$ .
- Para  $i_E > 0$ , a ruptura ocorre para valores inferiores a  $BV_{CBO}$ . Tipicamente  $BV_{CBO}$  é maior de que 50V.





### CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)



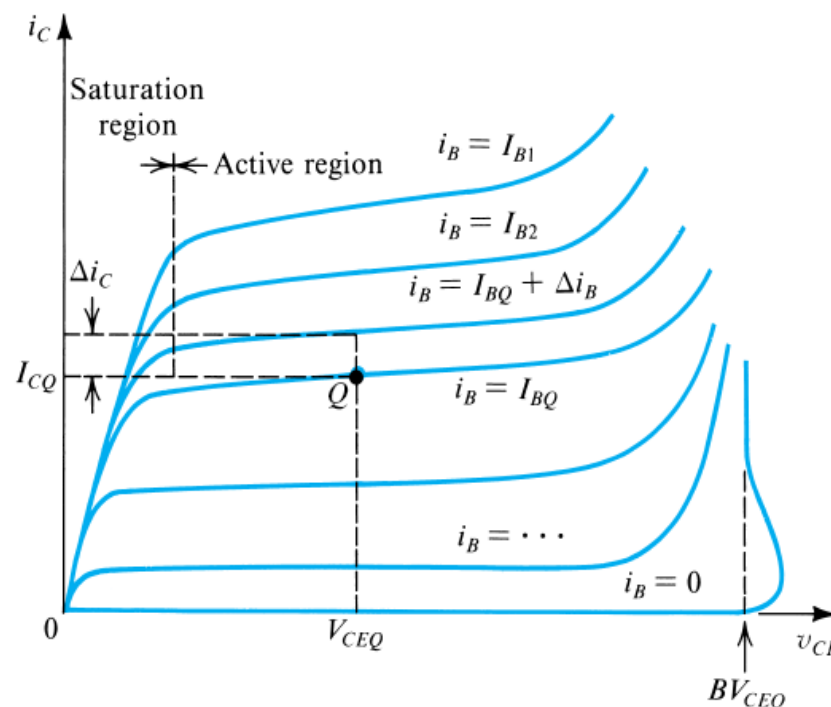
### Ruptura do transístor

- A característica  $i_C$ - $v_{CE}$  mostrada, ilustra a ocorrência de ruptura para uma tensão  $BV_{CEO}$ .
- $BV_{CEO}$  é cerca de metade de  $BV_{CBO}$ .
- A ruptura da junção base-colector, tanto em **configuração base-comum** como em **configuração emissor-comum**, **não é destrutiva** desde que a dissipação de potência no dispositivo seja mantida dentro de limites aceitáveis.

■ O mesmo não se passa com a junção base-emissor, cuja **ruptura é destrutiva**.

■ A EBJ entra em **ruptura do tipo avalanche** para uma tensão  $BV_{EBO}$  muito menor de que  $BV_{CBO}$ .

■ Tipicamente,  $BV_{EBO}$  varia entre 6 – 8 V.

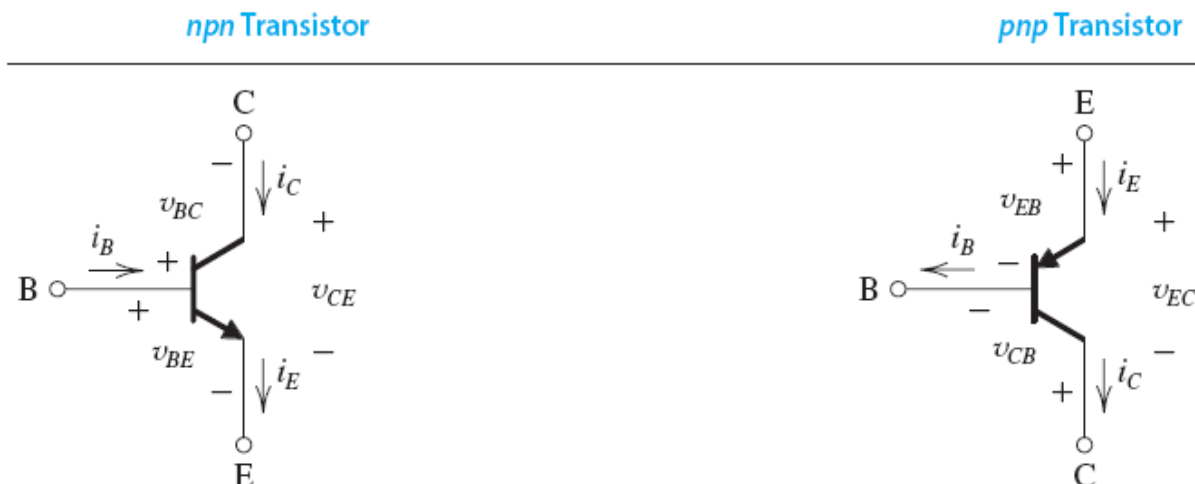




## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

## RESUMO

### Símbolos e sentido das correntes



### Operação em modo activo (Aplicação do BJT como amplificador)

#### Condições:

1. EBJ com polarização directa.
2. CBJ com polarização inversa

$$v_{BE} > V_{BEon}; V_{BEon} \cong 0.5 \text{ V}$$

$$\text{Typically, } v_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$v_{BC} \leq V_{BCon}; V_{BCon} \cong 0.4 \text{ V}$$

$$\Rightarrow v_{CE} \geq 0.3 \text{ V}$$

$$v_{EB} > V_{EBon}; V_{EBon} \cong 0.5 \text{ V}$$

$$\text{Typically, } v_{EB} = 0.7 \text{ V}$$

$$v_{CB} \leq V_{CBon}; V_{CBon} \cong 0.4 \text{ V}$$

$$\Rightarrow v_{EC} \geq 0.3 \text{ V}$$



*pnp*

### Relações corrente-tensão

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T}$$

$$i_B = i_C / \beta \Leftrightarrow i_C = \beta i_B$$

$$i_E = i_C / \alpha \Leftrightarrow i_C = \alpha i_E$$

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

$$\beta = \beta_F, \alpha = \alpha_F$$

■  $I_S$  = Transistor scale current; proportional to EBJ area; doubles for every 5°C rise in temperature.

■  $V_T$  = Thermal voltage =  $kT/q \cong 25$  mV at room temperature.

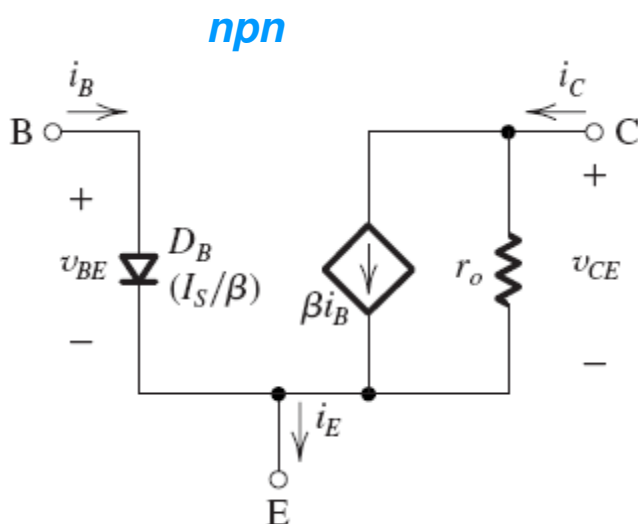
■ At a constant  $I_E$ ,  $|V_{BE}|$  decreases by 2 mV for every 1°C rise in temperature.



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

RESUMO

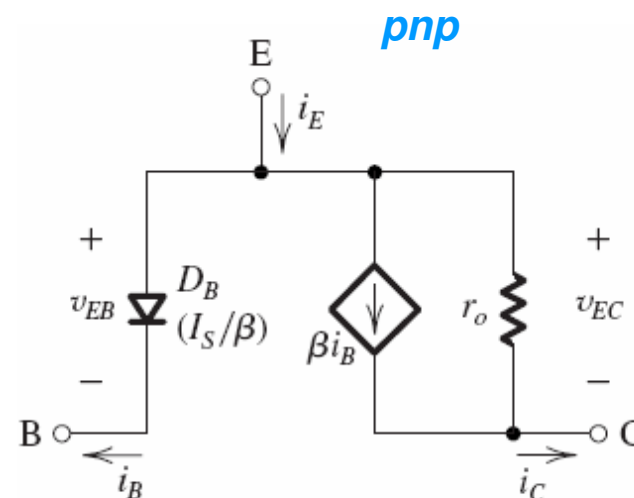
Modelo de circuito equivalente para grandes sinais (inclui efeito de Early)



$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$r_o = V_A / (I_S e^{v_{BE}/V_T})$$



$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{v_{EB}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T} \left(1 + \frac{v_{EC}}{|V_A|}\right)$$

$$r_o = |V_A| / (I_S e^{v_{EB}/V_T})$$



## CARACTERÍSTICAS CORRENTE – TENSÃO (Cont.)

## RESUMO

### Operação no modo de saturação

Condições:

1. EBJ com polarização directa.
2. CBJ com polarização directa

*nnp*

$$v_{BE} > V_{BEon}; V_{BEon} \cong 0.5 \text{ V}$$

$$\text{Typically, } v_{BE} = 0.7\text{--}0.8 \text{ V}$$

$$v_{BC} \geq V_{BCon}; V_{BCon} \cong 0.4 \text{ V}$$

$$\text{Typically, } v_{BC} = 0.5\text{--}0.6 \text{ V}$$

$$\Rightarrow v_{CE} = V_{CEsat} = 0.1\text{--}0.2 \text{ V}$$

*pnp*

$$v_{EB} > V_{EBon}; V_{EBon} \cong 0.5 \text{ V}$$

$$\text{Typically, } v_{EB} = 0.7\text{--}0.8 \text{ V}$$

$$v_{CB} \geq V_{CBon}; V_{CBon} \cong 0.4 \text{ V}$$

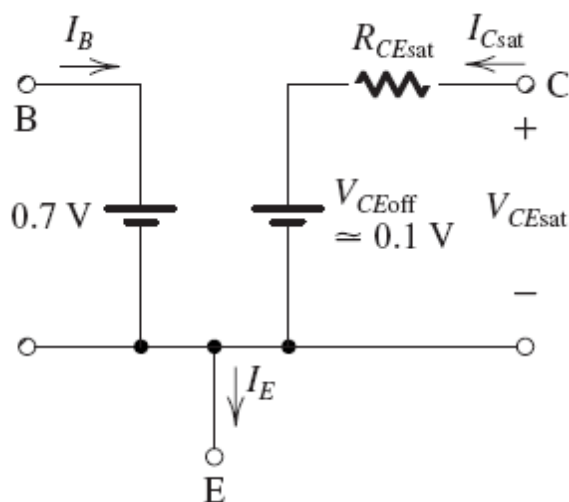
$$\text{Typically, } v_{CB} = 0.5\text{--}0.6 \text{ V}$$

$$\Rightarrow v_{EC} = V_{ECsat} = 0.1\text{--}0.2 \text{ V}$$

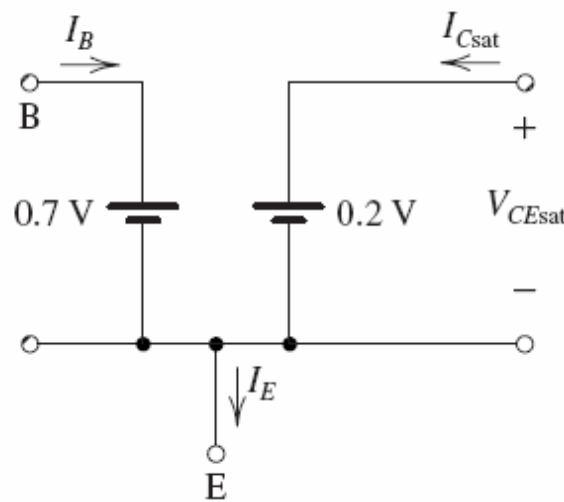
### Correntes

$$I_{Csat} = \beta_{forced} I_B$$

$$\beta_{forced} \leq \beta_F, \quad \frac{\beta_F}{\beta_{forced}} = \text{Overdrive factor}$$



ou





### O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL

- A base subjacente à **aplicação como amplificador** deve-se ao facto de que quando o BJT é **operado em modo activo**, este actua como uma fonte de corrente controlada por tensão.
- Isto é, variações na tensão base- emissor  $v_{BE}$  dão origens a variações na corrente de colector  $i_C$ .
- Assim, no modo activo, o BJT pode ser usado para implementar um **amplificador de transcondutância**.
- Estamos interessados em **amplificação linear**. O transístor tem um comportamento altamente não linear, i.e., a corrente de colector  $i_C$  é exponencialmente relacionada com  $v_{BE}$ .
- Será usada a aproximação descrita no capítulo I.
- Mais especificamente, o **transístor será polarizado de modo a funcionar com uma tensão base – emissor dc  $V_{BE}$  e uma corrente de colector  $I_C$** .
- Posteriormente **sobrepõe-se à tensão dc  $V_{BE}$  o sinal a ser amplificado  $v_{be}$** .
- Mantendo o **sinal  $v_{be}$  com baixa amplitude**, pode-se restringir o transístor de modo a que este opere na região linear da **característica  $i_C - v_{BE}$** . Deste modo a variação da corrente de colector será linearmente relacionada com  $v_{be}$ .
- **Primeiramente, considere-se o funcionamento de um amplificador BJT para grandes sinais.**





## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

Operação para grandes sinais 

Característica de transferência

- A figura 5.26(a) mostra a estrutura básica do amplificador BJT mais comumente usado, “circuito emissor-comum (CE).
- A **tensão total de entrada**  $v_i$  (polarização + sinal) é aplicada entre a base e o emissor; isto é,  $v_{BE} = v_i$
- A **tensão total de saída**  $v_o$  (polarização + sinal) é medida entre colector e ground; i.e.,  $v_o = v_{CE}$
- A **Resistência**  $R_C$  tem **duas funções**: Estabilizar a tensão de polarização dc desejada no colector e converter a corrente de sinal do colector  $i_c$  numa tensão de saída  $v_{ce}$  or  $v_o$ .
- A tensão da fonte  $V_{CC}$  é *necessária para polarizar o BJT bem como fornecer a potência necessária para o funcionamento do amplificador.*

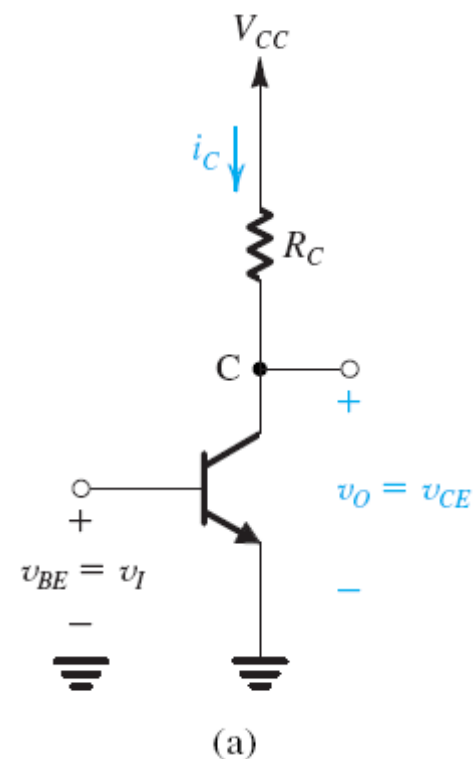


Fig. 5.26

## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

Operação para grandes sinais

Característica de transferência

■ A Figura 5.26(b) mostra a característica de transferência do circuito em emissor comum mostrado na figura 5.26a.

■ Para se perceber como surge esta característica, represente-se a tensão  $v_o$ .

$$v_o = v_{CE} = V_{CC} - R_C i_C \quad (5.50)$$

■ Visto que  $v_{BE} = v_i$ , o transistor estará ao corte para  $v_i < 0.5$  V.

■ Assim, para  $0 < v_i < 0.5$  V,  $i_C$  será desprezável e  $v_o$  é igual à tensão da fonte  $V_{CC}$  (segmento XY da curva de transferência).

■ À medida que  $v_i$  é maior de que 0.5 V, o transistor começa a conduzir e  $i_C$  aumenta.

■ Da equação (5.50), vê-se que  $v_o$  decresce.

■ O BJT está a operar no modo activo (segmento YZ)

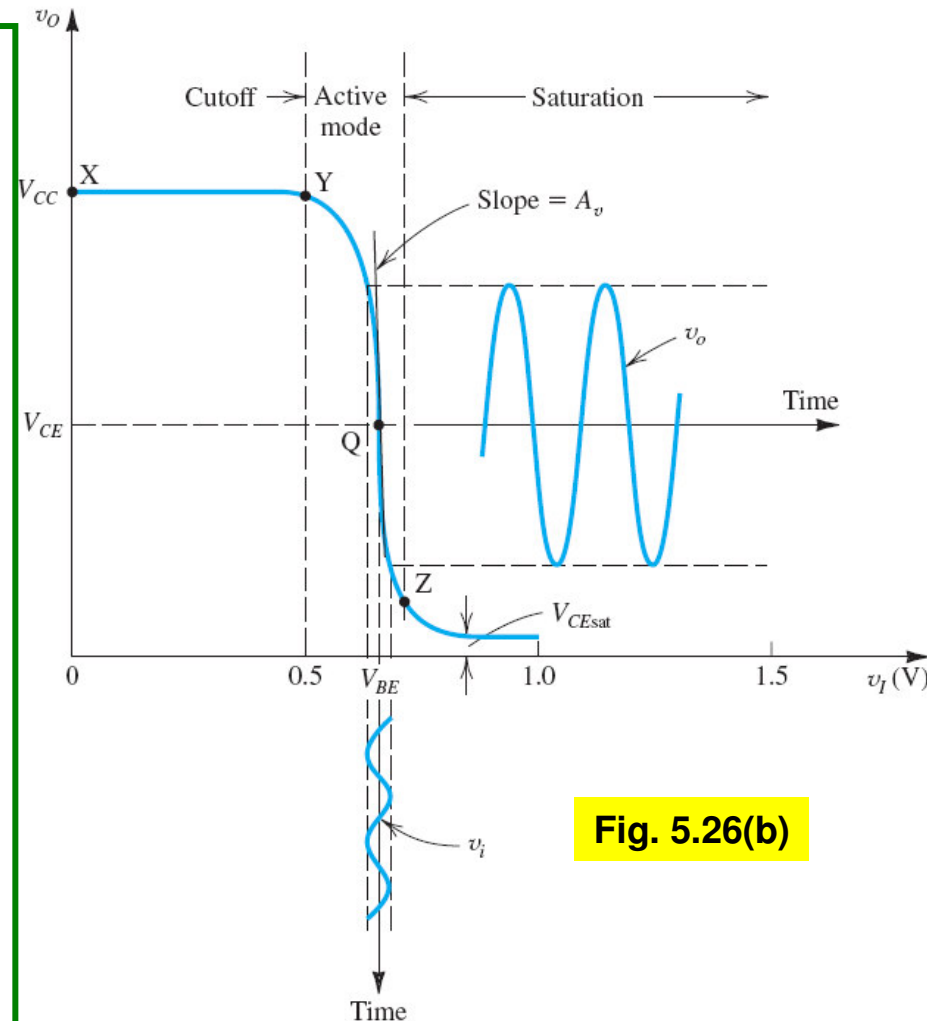


Fig. 5.26(b)



## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

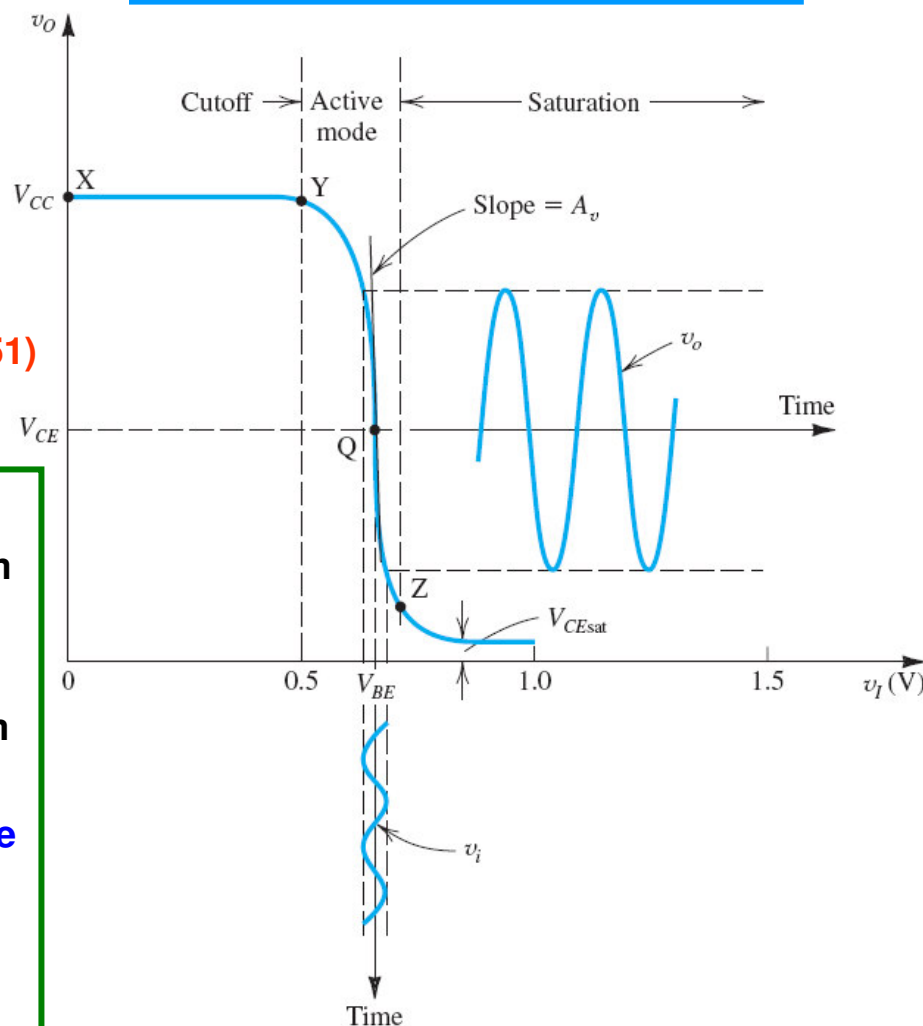
Operação para grandes sinais

Característica de transferência

■ A equação para o segmento YZ, pode ser obtida substituindo na equação (5.50) a expressão para  $i_C$  em modo activo,

$$\begin{aligned} i_C &\cong I_S e^{v_{BE}/V_T} \\ &= I_S e^{v_I/V_T} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad v_O = V_{CC} - R_C I_S e^{v_I/V_T} \quad (5.51)$$

- Por simplicidade **desprezou-se o efeito de Early.**
- O termo exponencial na equação (5.51) dá origem a uma **inclinação acentuada do segmento YZ.**
- A operação em modo activo termina quando a tensão de colector ( $v_O$  ou  $v_{CE}$ ) é inferior em 0.4 V em relação à base ( $v_I$  ou  $v_{BE}$ ).
- Neste ponto, a **CBJ fica directamente polarizada e o transistor entra na região de saturação.**
- Tal é indicado pelo ponto Z, na curva de transferência.



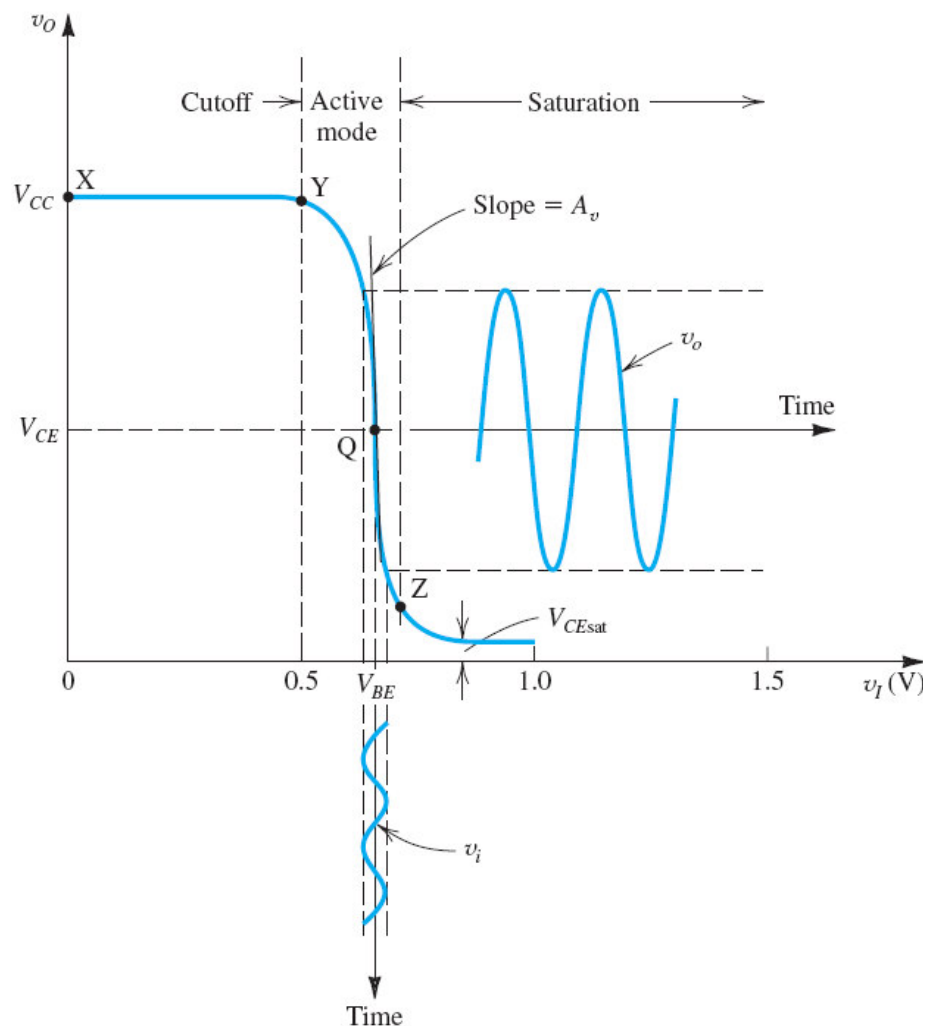


## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

Operação para grandes sinais

Característica de transferência

- Um incremento adicional em  $v_{BE}$  conduz apenas a um decréscimo ligeiro de  $v_{CE}$ .
- Na região de saturação  $v_{CE} = V_{CEsat}$ , a qual se situa na gama estreita de 0.1 a 0.2 V.
- É este valor quase constante  $V_{CEsat}$  que dá a esta região de operação do BJT o nome de saturação.
- A corrente de colector também permanece praticamente constante no valor  $I_{Csat}$ .



$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} \quad (5.52)$$



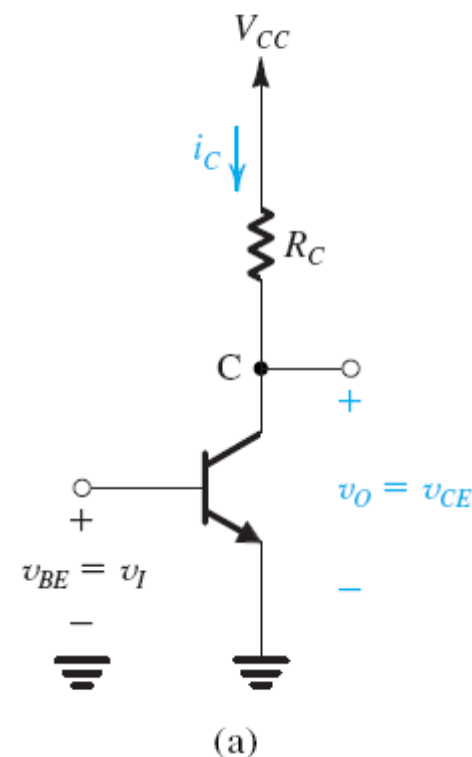
## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

Operação para grandes sinais



Característica de transferência

- O BJT na região de saturação exibe uma **resistência muito baixa entre o colector e o emissor** ( $R_{CEsat}$ ).
- Assim, o transistor da figura 5.26a proporciona um **percurso de baixa resistência** entre o nó C do colector e o ground.
- Apresenta, assim, um **comportamento de interruptor fechado**.
- Quando o BJT está ao corte, este praticamente não conduz, **actuando como interruptor em circuito aberto**.
- O estado do interruptor (aberto ou fechado) é **determinado pelo valor da tensão de controlo  $v_{BE}$** .
- O interruptor BJT pode também ser controlado pela corrente da base.





## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

### Ganho do amplificador

■ Para **operar o BJT como amplificador linear**, este tem de ser polarizado num ponto da região activa.

■ A figura ilustra um desses pontos (Q), caracterizado por uma tensão base- emissor de  $V_{BE}$  e por uma tensão colector- emissor de  $V_{CE}$ .

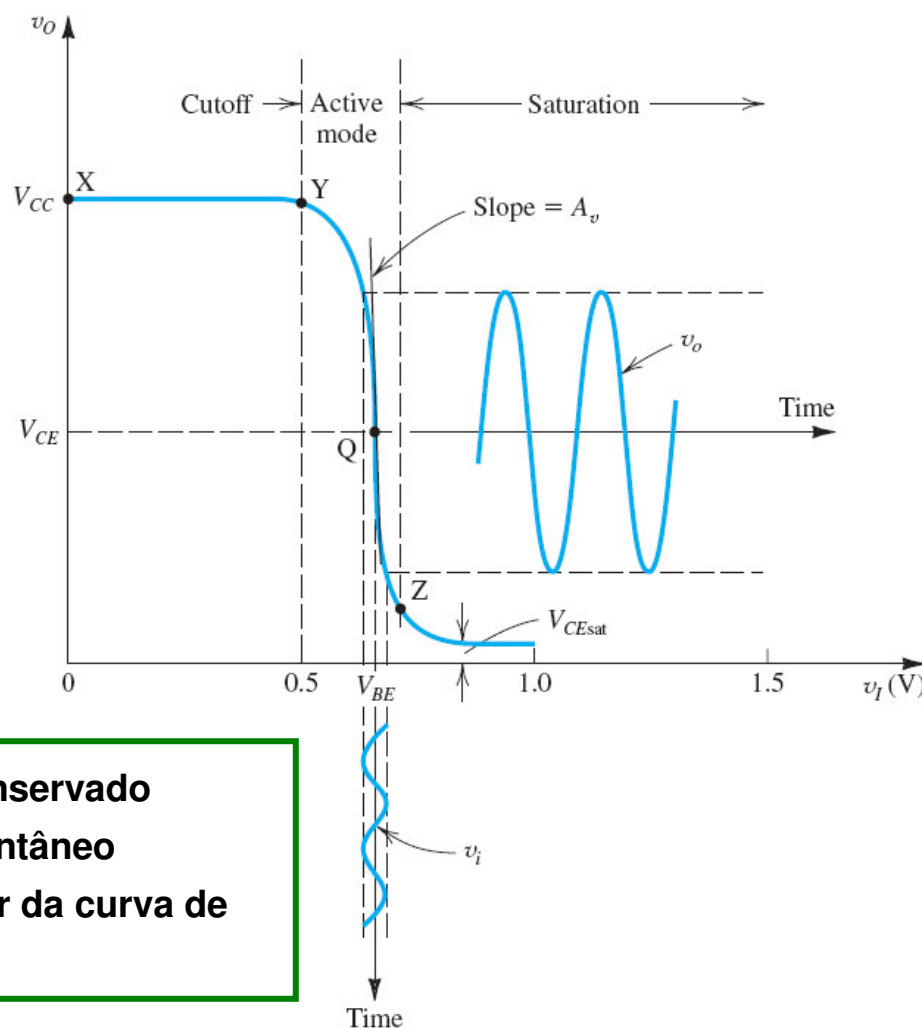
■ A corrente de colector para este valor de  $V_{BE}$  é,

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad (5.53)$$

■ Do circuito da figura 5.26a, vem:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \quad (5.54)$$

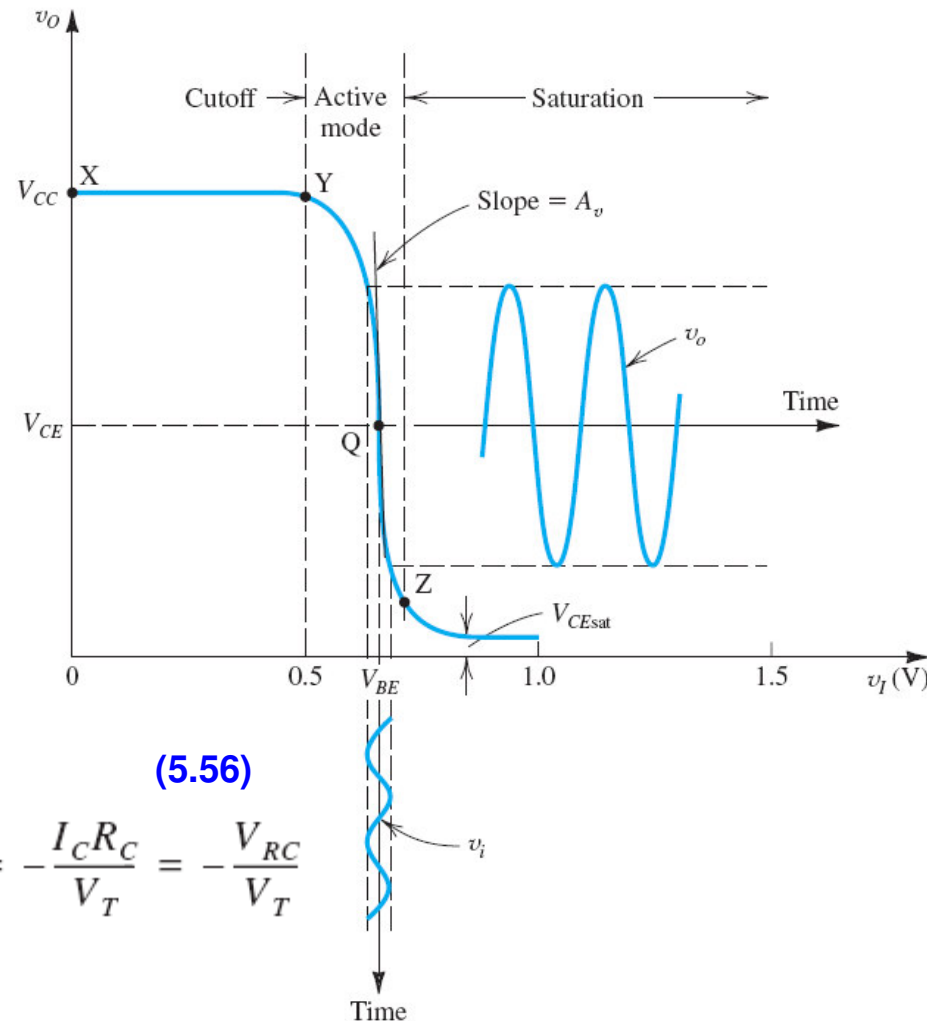
■ Se o **sinal a amplificar  $v_i$  for sobreposto a  $V_{BE}$**  e conservado suficientemente pequeno, o ponto de operação instantâneo permanecerá restringido a um segmento quase linear da curva de transferência, em torno do ponto Q.



## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

### Ganho do amplificador

- O declive deste segmento de recta será igual ao declive da tangente à curva de transferência no ponto Q.
- Este declive é o **ganho em tensão** do amplificador para **sinais de entrada pequenos em torno de Q**.
- Uma expressão para o ganho ( $A_v$ ) pode ser obtida diferenciando a expressão (5.51) e calculando o valor da derivada no ponto Q, i.e., para  $v_I = V_{BE}$ .



$$A_v \equiv \left. \frac{dv_O}{dv_I} \right|_{v_I = V_{BE}} \quad (5.55)$$

$$A_v = -\frac{1}{V_T} I_S e^{V_{BE}/V_T} R_C$$

Usando (5.53) →

$$A_v = -\frac{I_C R_C}{V_T} = -\frac{V_{RC}}{V_T} \quad (5.56)$$

onde  $V_{RC}$  é a queda de tensão aos terminais de  $R_C$ .

$$V_{RC} = V_{CC} - V_{CE} \quad (5.57)$$



### O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

#### Ganho do amplificador

- Note que o **amplificador em emissor – comum é inversor**, i.e., o sinal de saída surge  $180^\circ$  desfasado em relação ao sinal de entrada.
- A equação (5.56) ilustra um ganho em tensão para o amplificador EC, como sendo a relação entre a queda de tensão em  $R_C$  e a tensão térmica (25mV à temperatura ambiente).
- Conclui-se (da eq.) que a **maximização do ganho em tensão**, passa pelo **uso de uma queda de tensão aos terminais de  $R_C$  o mais elevada possível**.
- Para um dado valor de  $V_{CC}$ , a eq. (5.57) indica que **um aumento de  $V_{RC}$  implica operar com um valor baixo de  $V_{CE}$** .
- Todavia, de acordo como a figura 5.26b, um muito baixo  $V_{CE}$ , significa um ponto de polarização Q muito próximo do fim do segmento da região activa, o que pode não garantir que o sinal de saída negativo ondule, sem que o transistor entre na região de saturação.
- Se o ponto Q se posicionar demasiado alto, verifica-se uma redução do ganho (menor  $V_{RC}$ ) e pode limitar a livre ondulação do sinal de saída positivo.
- No extremo positivo, a limitação é imposta pelo corte do BJT: os picos positivos são limitados a um nível igual a  $V_{CC}$ .





### O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

### Ganho do amplificador

- Finalmente, é útil notar que o **ganho máximo teórico**  $A_v$ , é obtido polarizando o BJT no limiar da saturação.
- Tal, evidentemente, não permite que a parte negativa do sinal de saída ondule sem limitação.
- O ganho resultante é dado por,

$$A_v = -\frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{V_T} \quad (5.58)$$

Assim,

$$A_{vmax} \cong -\frac{V_{CC}}{V_T} \quad (5.59)$$

- Como pode ser observado, elevados ganhos podem ser obtidos usando fontes de tensão de valor elevado.
- Existem outras alternativas que estudarão em electrónica II.



### O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

#### EXAMPLE 5.2

Considere um circuito emissor – comum com um BJT tendo  $I_S = 10^{-15}$  A, uma resistência de colector  $R_C = 6.8$  k $\Omega$ , e uma fonte de tensão  $V_{CC} = 10$  V.

- (a) Determine o valor da tensão de polarização  $V_{BE}$ , requerida para operar o transistor a uma tensão  $V_{CE} = 3.2$  V. Qual é o correspondente valor de  $I_C$ .
- (b) Determine o ganho em tensão  $A_v$  para este ponto de polarização. Se um sinal de entrada sinusoidal de 5 mV (pico) for sobreposto a  $V_{BE}$ , qual o valor da amplitude da saída (assuma operação linear).
- (c) Determine o incremento positivo em  $v_{BE}$  (acima de  $V_{BE}$ ) que conduz o transistor ao limiar da saturação, onde  $v_{CE} = 0.3$  V.
- (d) Determine o incremento negativo em  $v_{BE}$  que conduz o transistor a 1% do limiar de corte (i.e.,  $v_O = 0.99 V_{CC}$ )



## O BJT COMO AMPLIFICADOR DE SINAL (CONT.)

### Solução

(a)

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$
$$= \frac{10 - 3.2}{6.8} = 1 \text{ mA}$$

O valor de  $V_{BE}$  pode ser determinado por,

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$1 \times 10^{-3} = 10^{-15} e^{V_{BE}/V_T}$$



$$V_{BE} = 690.8 \text{ mV}$$

(b) 
$$A_v = -\frac{V_{CC} - V_{CE}}{V_T} = -\frac{10 - 3.2}{0.025} = -272 \text{ V/V}$$

$$\hat{V}_o = 272 \times 0.005 = 1.36 \text{ V}$$

(c) Para  $v_{CE} = 0.3 \text{ V}$ ,

$$i_C = \frac{10 - 0.3}{6.8k} = 1.426 \text{ mA}$$

Para elevar  $i_C$  de 1mA para 1.426mA,  $v_{BE}$  deve ser incrementada de,

$$\Delta v_{BE} = V_T \ln\left(\frac{1.426}{1}\right) = 8.87 \text{ mV}$$

(d) Para  $v_o = 0.99 V_{CC} = 9.9\text{V}$ ,

$$i_C = \frac{10 - 9.9}{6.8} = 0.0147 \text{ mA}$$

Para reduzir  $i_C$  de 1mA para 0.0147mA,  $v_{BE}$  deve ser variar de,

$$\Delta v_{BE} = V_T \ln\left(\frac{0.0147}{1}\right) = -105.5 \text{ mV}$$