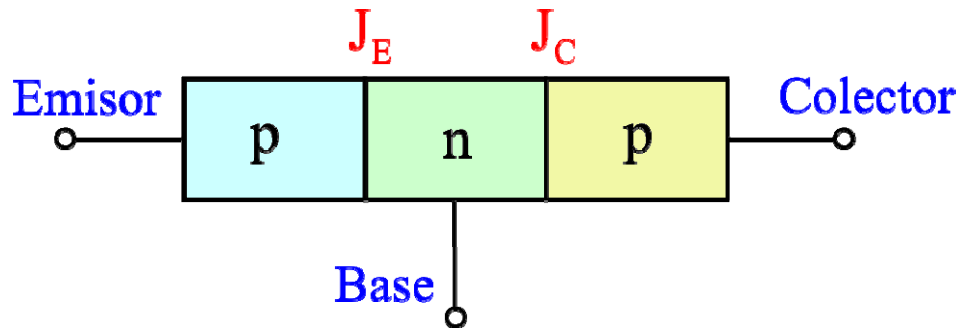


# EL TRANSISTOR BIPOLAR. BJT (*Bipolar Junction Transistor*)

- 1.- Introducción.
- 2.- Componentes de las corrientes
  - 2.1.- Corrientes en la zona activa.
  - 2.2.- Ecuación generalizada del transistor.
- 3.- Curvas características.
  - 3.1.- Configuración en base común.
  - 3.2.- Configuración en emisor común.
- 4.- Punto de funcionamiento.
- 5.- Polarización del transistor.
- 6.- El transistor como amplificador y como interruptor.
  - 6.1.- El transistor como amplificador.
  - 6.2.- El transistor como interruptor.

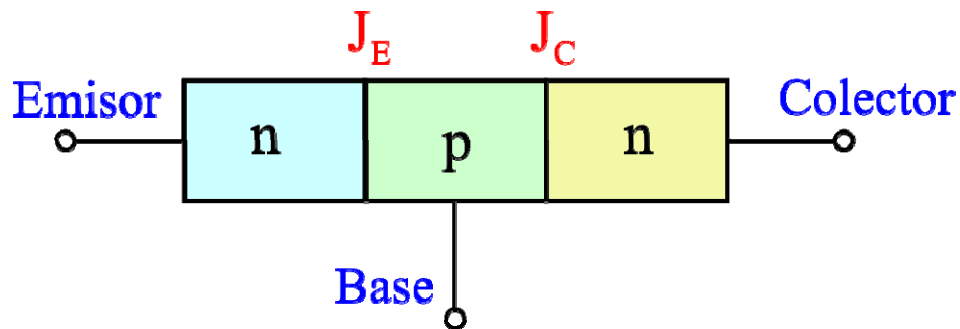
# 1.- Introducción.

## Transistor pnp



**Emisor** = Zona que emite portadores mayoritarios  $e^-$  en un npn y  $h^+$  en un pnp. Es la zona más dopada

## Transistor npn

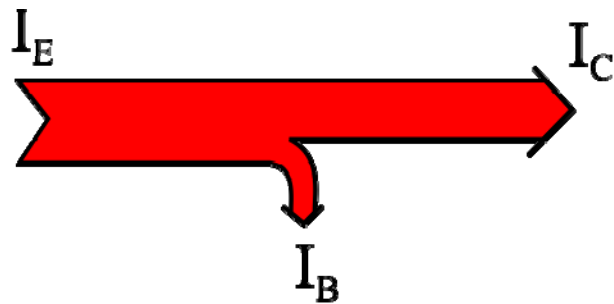
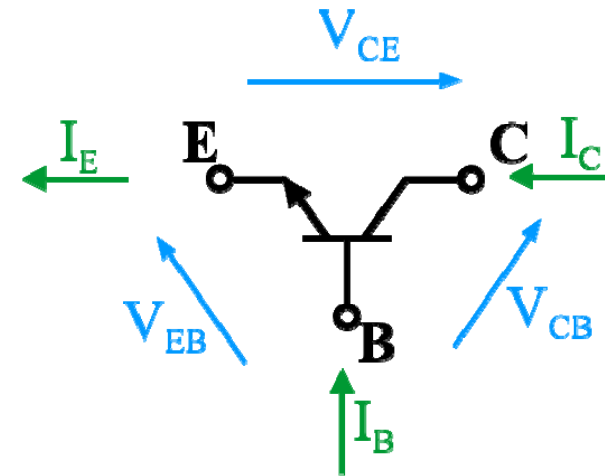
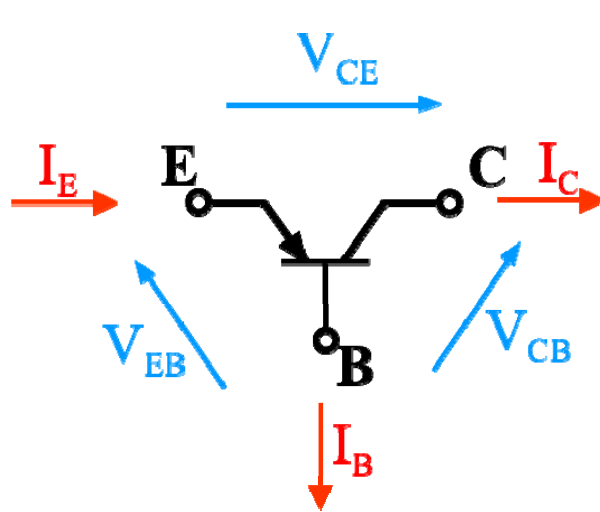


**Base** = Zona muy estrecha que debe dejar pasar hacia el colector la mayoría de los portadores inyectados por el emisor. Tiene un dopaje intermedio

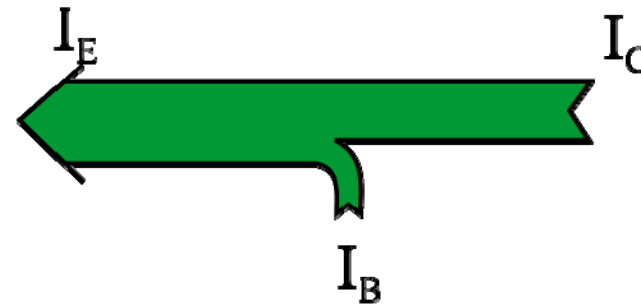
**Colector** = Zona encargada de recoger los portadores que inyectados por el emisor han atravesado la base. Es la zona menos dopada.

# 1.- Introducción.

Símbolos y sentidos de las corrientes.



**pnp**

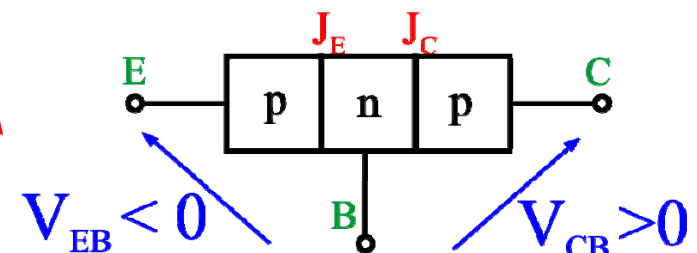
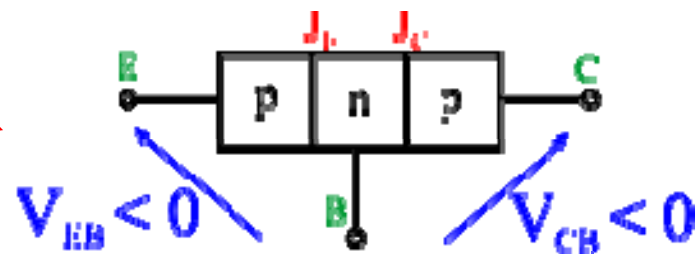
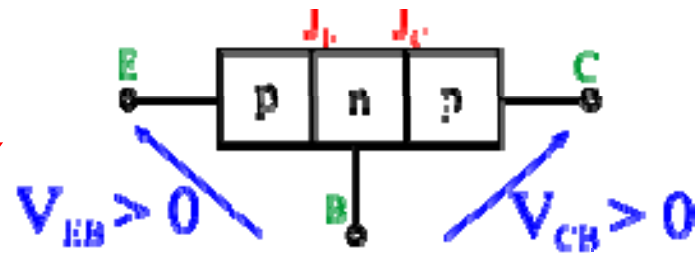
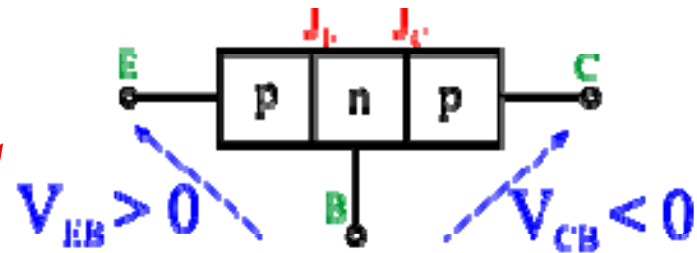


**npn**

# 1.- Introducción.

## Zonas de Funcionamiento.

$J_E$	$J_C$	Zona de trabajo
Directa	Inversa	Activa
Directa	Directa	Saturación
Inversa	Inversa	Corte
Inversa	Directa	Activa inversa

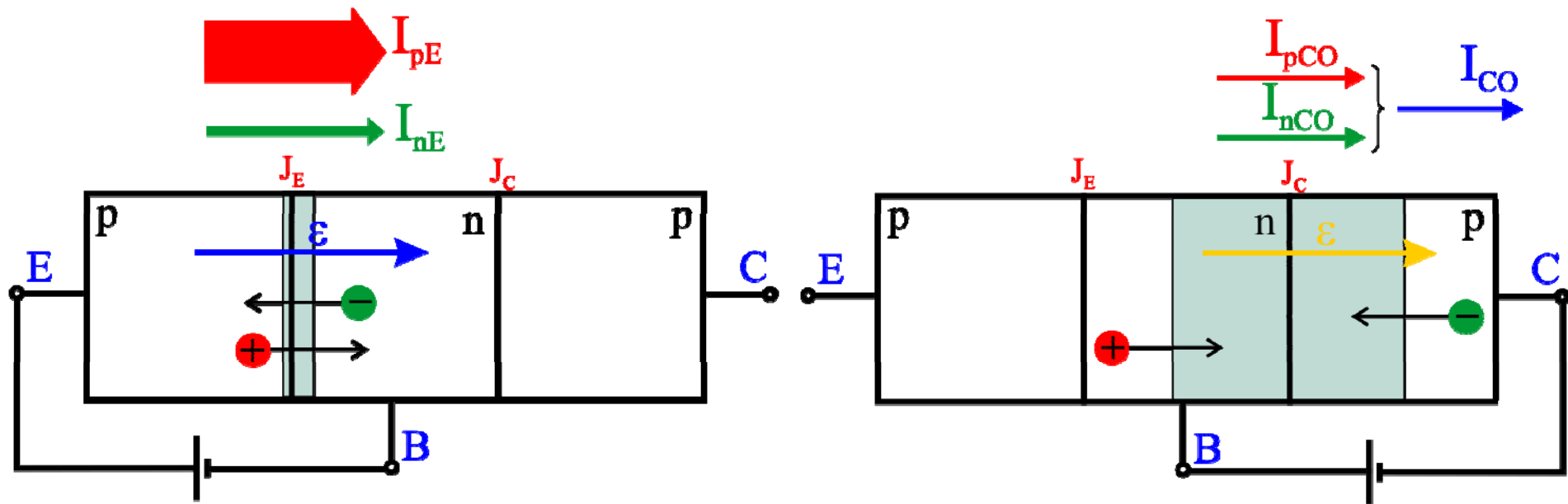


## 2.- Componentes de las corrientes.

### 2.1.- Componentes de las corrientes en la zona activa.

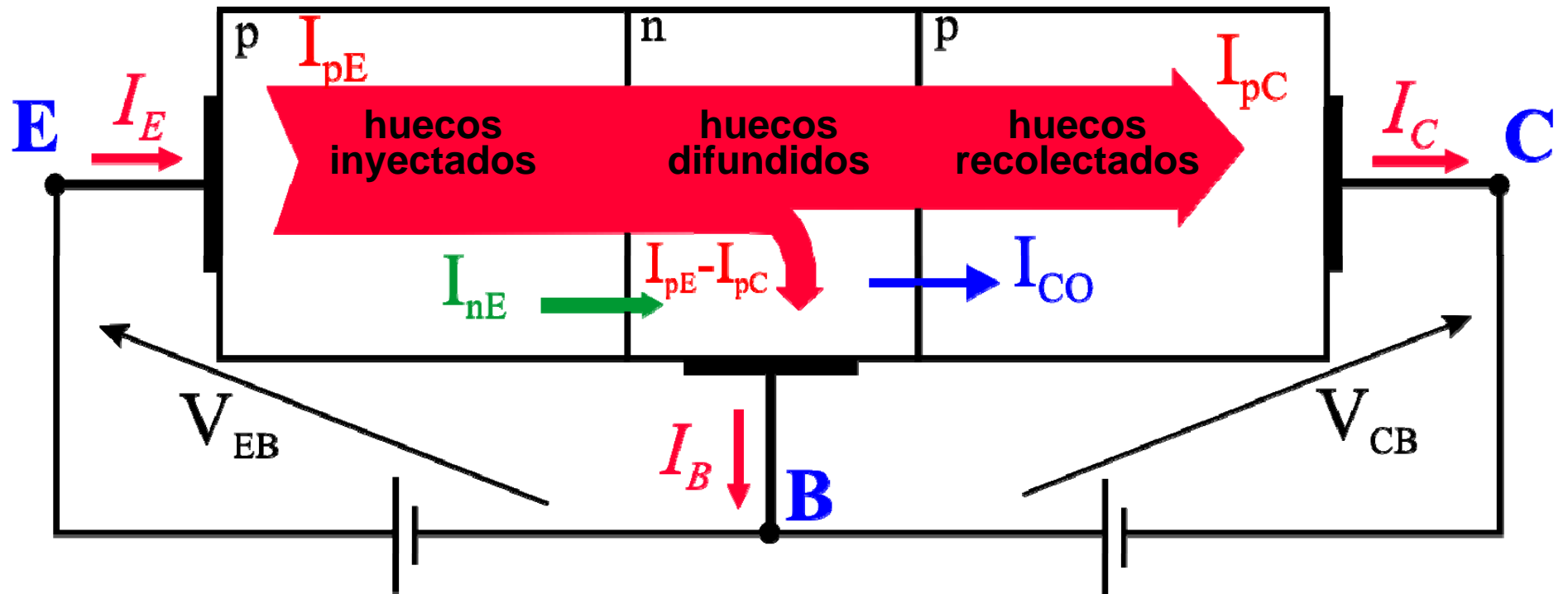
*Unión de emisor polarizada en directa*

*Unión de colector polarizada en inversa*



## 2.- Componentes de las corrientes.

### 2.1.- Componentes de las corrientes en la zona activa.



$$I_E = I_{pE} + I_{nE}$$

$$I_B = I_{nE} + (I_{pE} - I_{pC}) - I_{CO}$$

$$I_C = I_{pC} + I_{CO}$$

$I_{CO}$  = Corriente de fugas (Corriente de colector con el emisor en circuito abierto)

## 2.- Componentes de las corrientes.

### 2.1.- Componentes de las corrientes en la zona activa.

$$I_C = I_{pC} + I_{CO}$$

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CO}$$
$$I_C \approx \alpha \cdot I_E$$

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CO}}{I_E - 0}$$

$$0,9 \leq \alpha \leq 0,998$$

$\alpha$  = Ganancia de corriente para grandes señales.

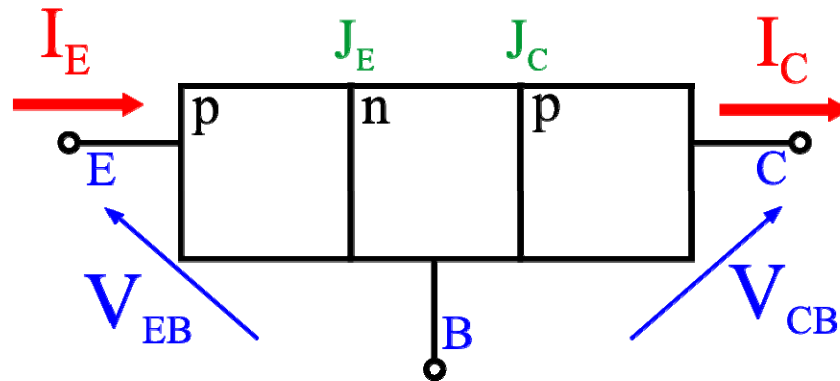
Fracción de corriente que inyectada por el emisor llega al colector.

Relación entre el incremento de la corriente de colector desde el corte ( $I_C = I_{CO}$ ) y la variación de la corriente de emisor desde el corte ( $I_E = 0$ )

## 2.- Componentes de las corrientes.

### 2.2.- Ecuación generalizada del transistor.

$$I_C = \alpha_F \cdot I_E - I_{CO} \left( \exp \frac{V_{CB}}{V_T} - 1 \right)$$



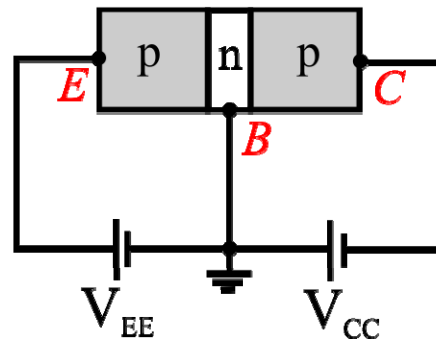
$$I_C = \alpha_F \cdot I_{EO} \left( \exp \frac{V_{EB}}{V_T} - 1 \right) - I_{CO} \left( \exp \frac{V_{CB}}{V_T} - 1 \right)$$



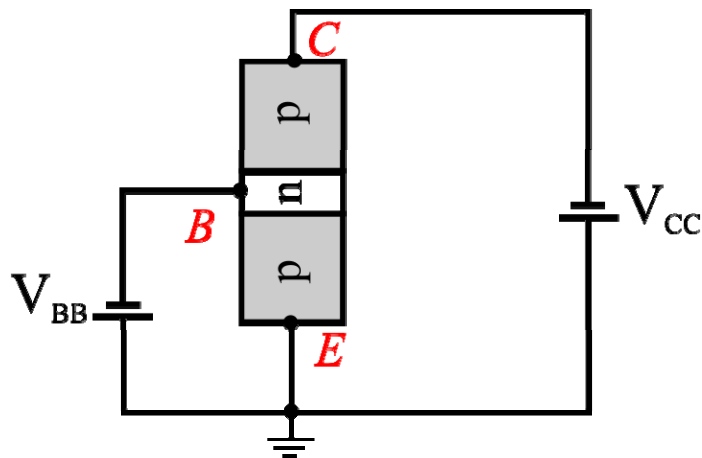
## 2.- Componentes de las corrientes.

Se necesitan dos circuitos de polarización para polarizar las dos uniones

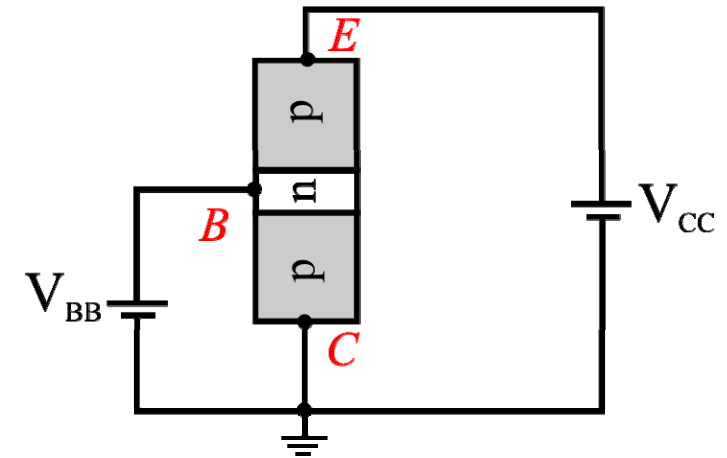
En función del terminal común a los dos circuitos surgen las distintas configuraciones



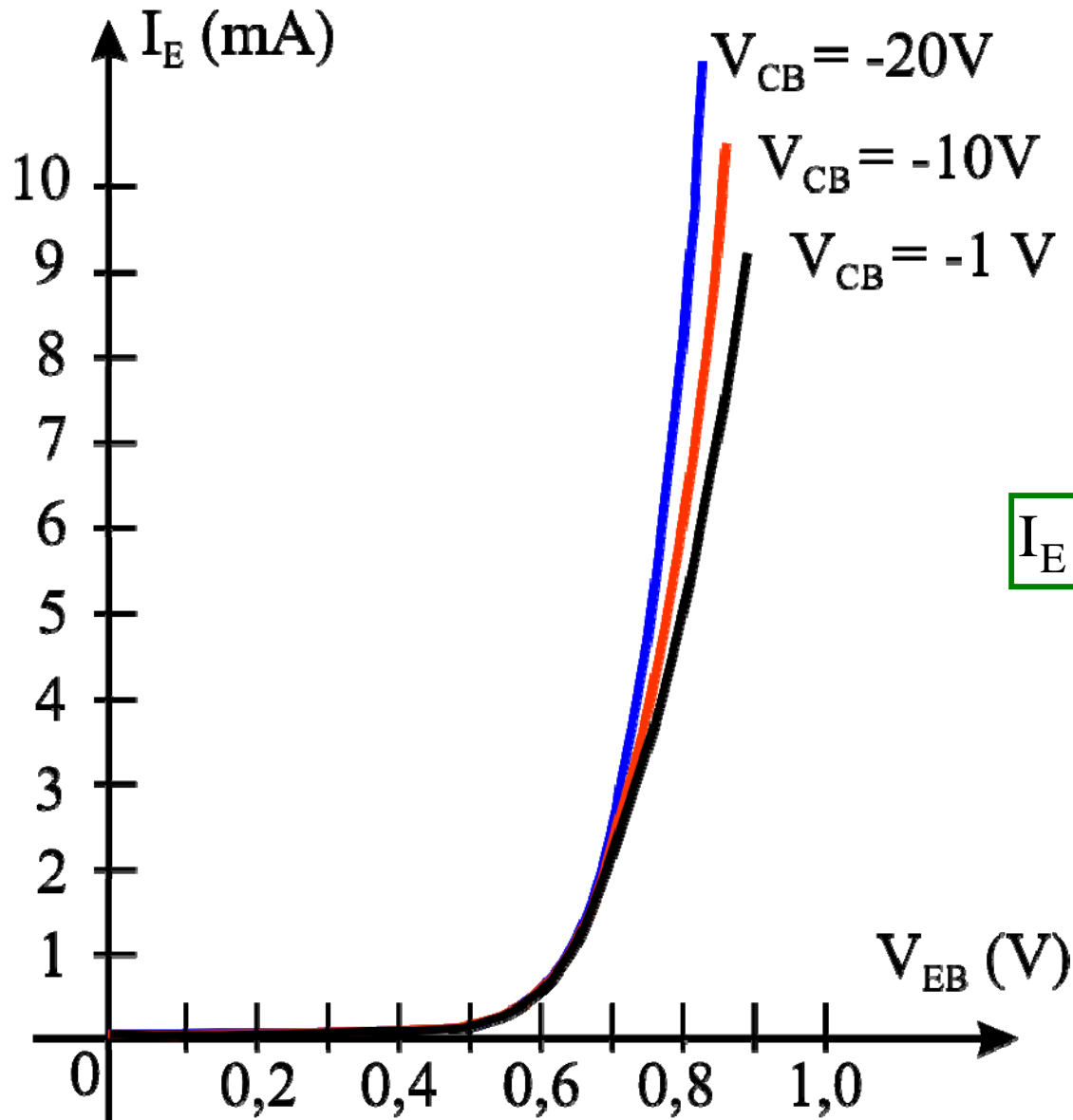
*Base Común*



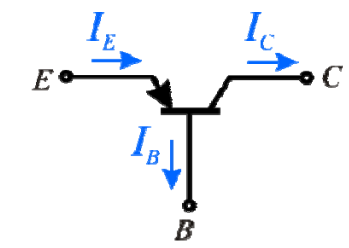
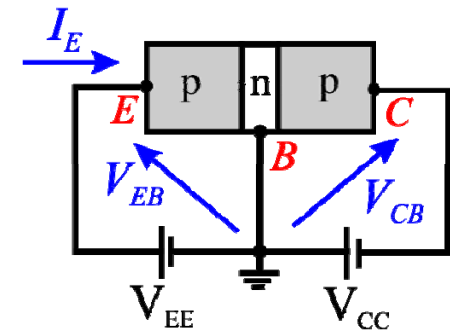
*Emisor Común*



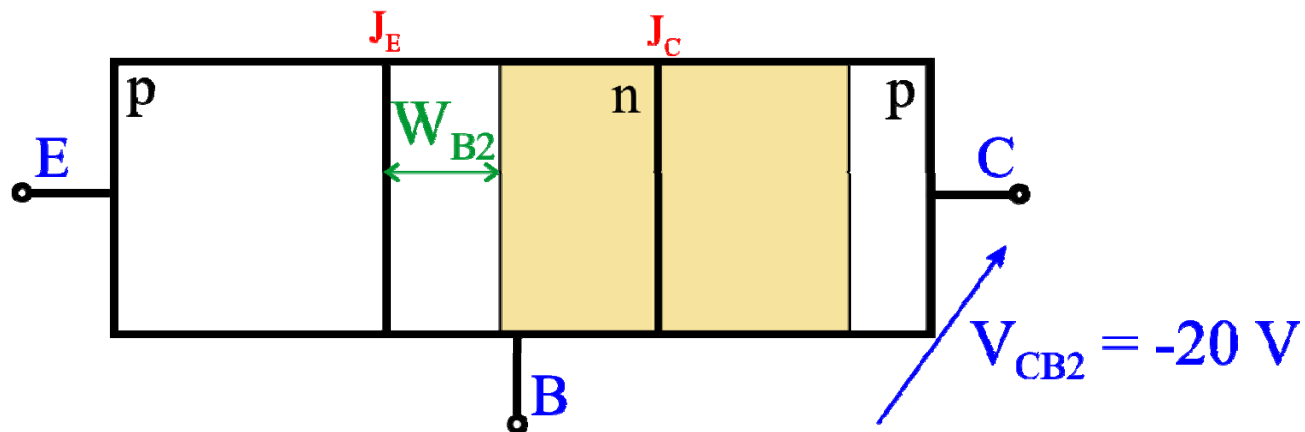
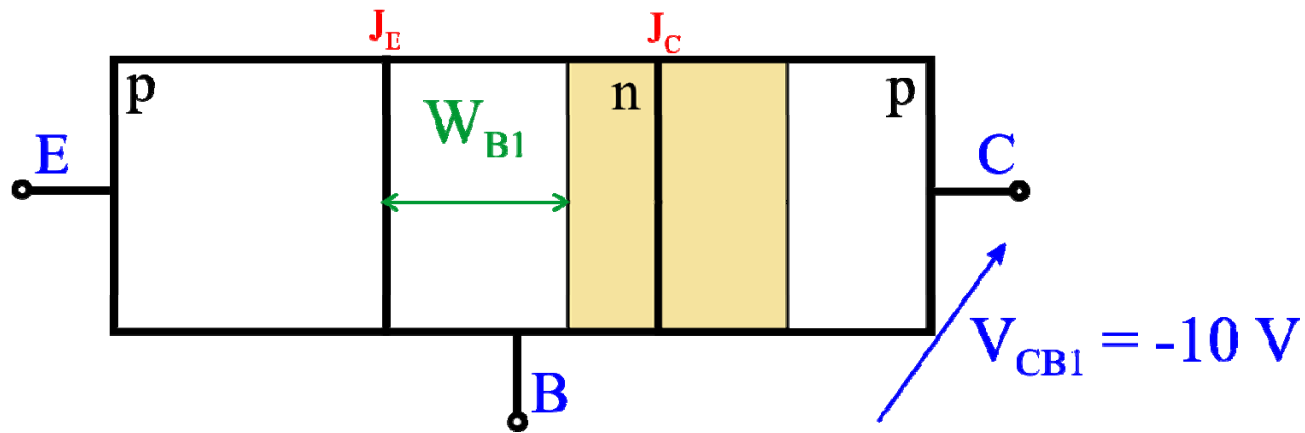
*Colector Común*



$$I_E = f(V_{EB}, V_{CB})$$



Efecto Early o de modulación de anchura de la base.

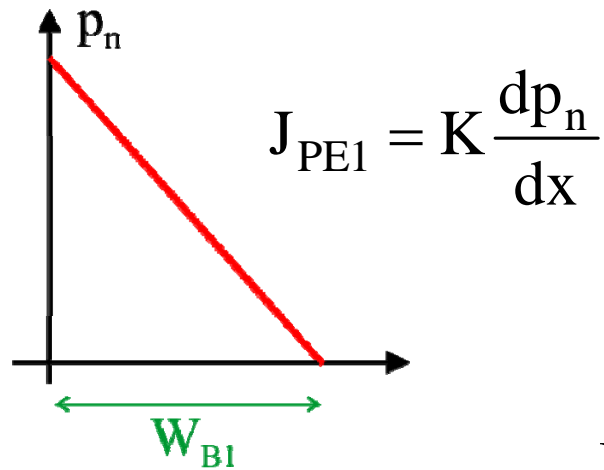


$$|V_{CB2}| > |V_{CB1}|$$

$$W_{B2} < W_{B1}$$

## Efecto Early o de modulación de anchura de la base.

Los huecos inyectados por el emisor, en la base se mueven por difusión  
 La corriente de difusión es proporcional al gradiente de la concentración

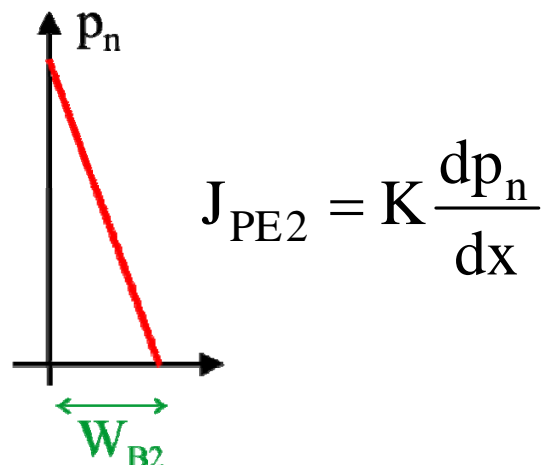


$$|V_{CB2}| > |V_{CB1}|$$

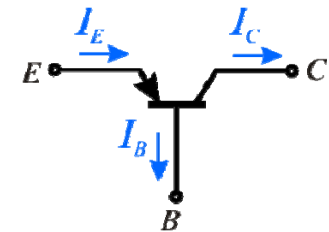
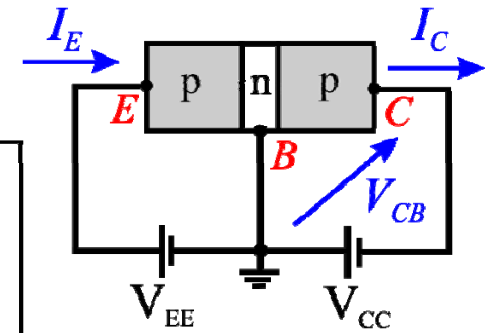
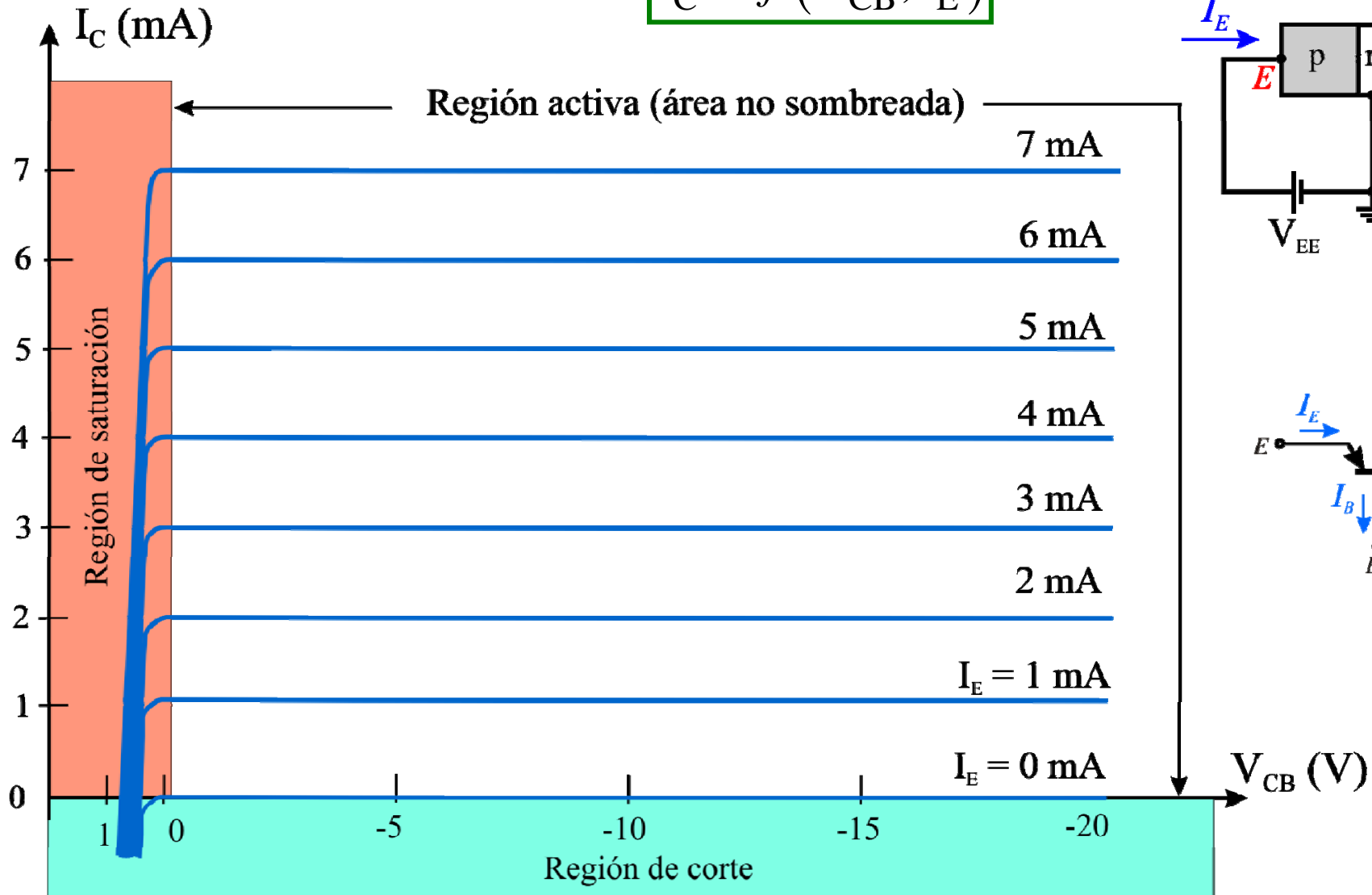
$$W_{B2} < W_{B1}$$

$$J_{PE2} > J_{PE1}$$

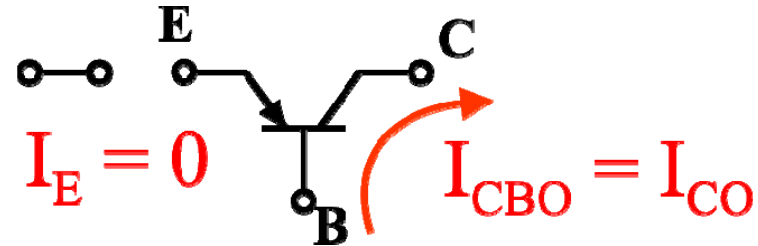
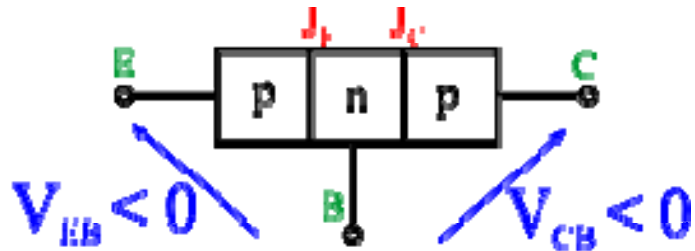
$$I_{E2} > I_{E1}$$



$$I_C = f(V_{CB}, I_E)$$

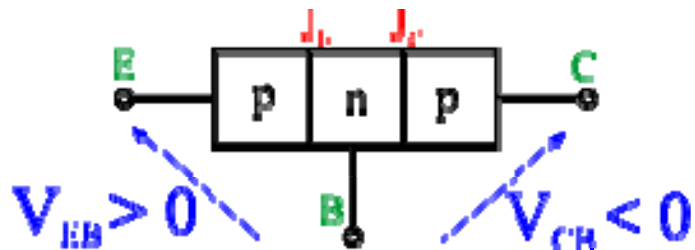


## Región de Corte



$I_{CBO}$  = Corriente entre la base y el colector con el emisor en circuito abierto

## Región activa



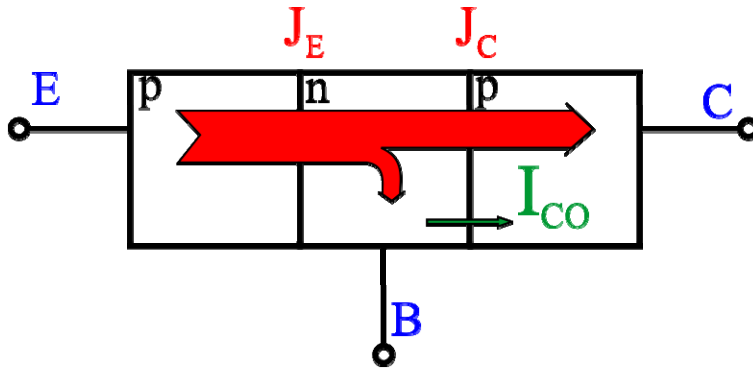
$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CO}$$

$$I_C \approx \alpha \cdot I_E \quad 0,9 \leq \alpha \leq 0,998$$

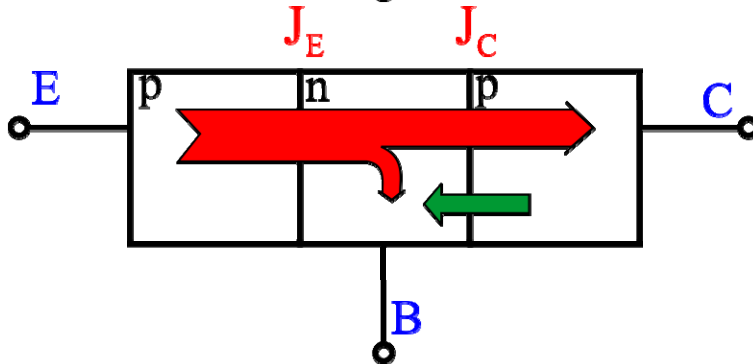
$$I_C \approx I_E$$

$I_C$  No depende de  $V_{CB}$

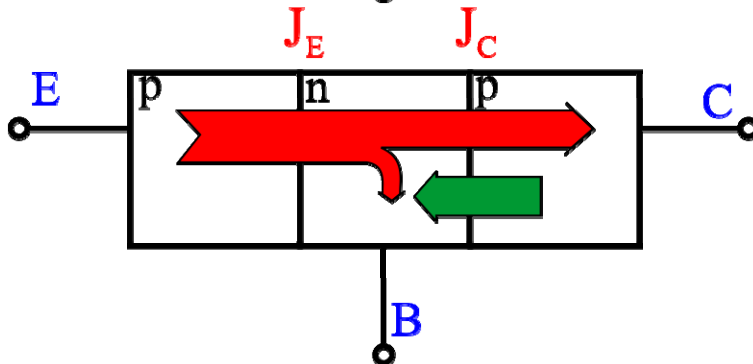
## Región de saturación



$$V_{CB} < 0,6 \text{ V}$$

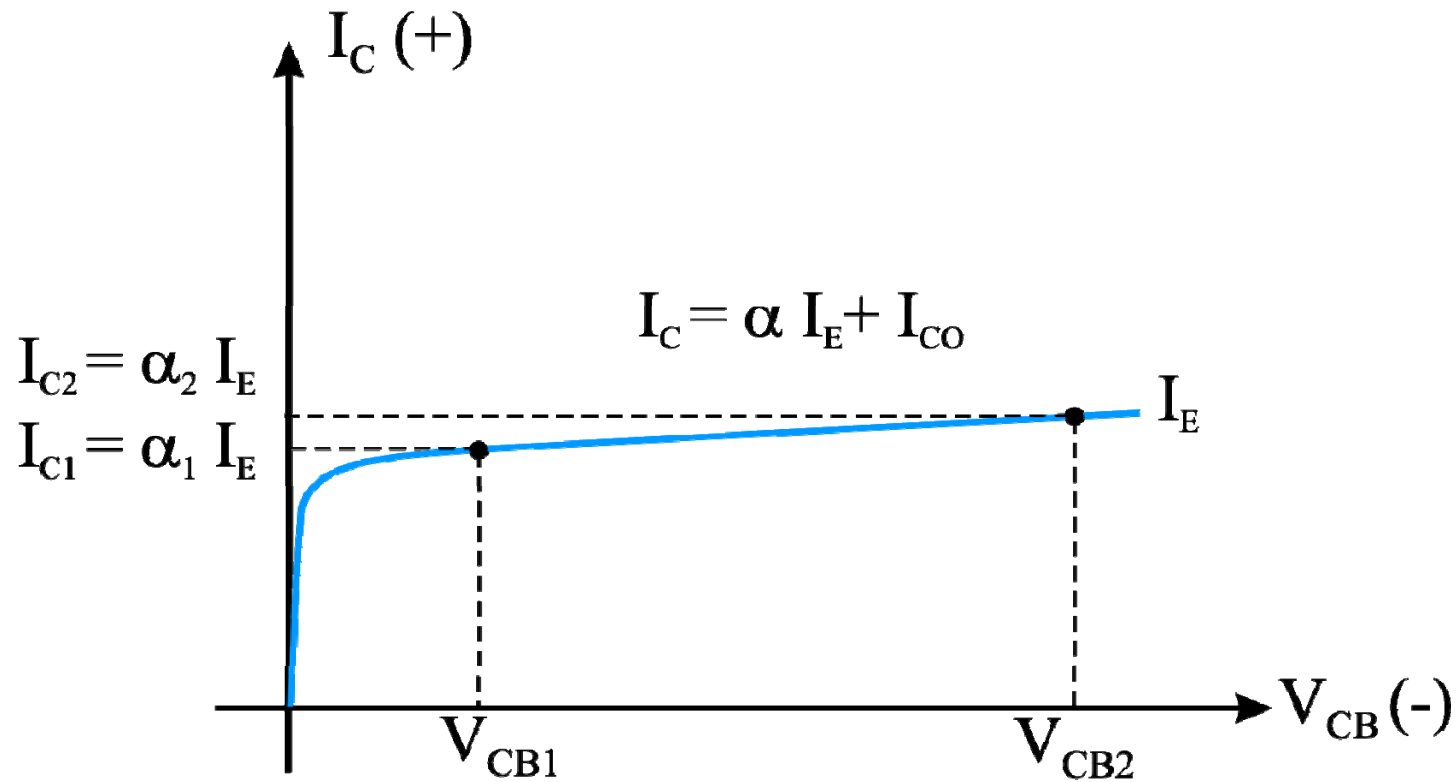


$$V_{CB} = 0,7 \text{ V}$$



$$V_{CB} = 0,8 \text{ V}$$

Efecto Early o de modulación de anchura de la base.



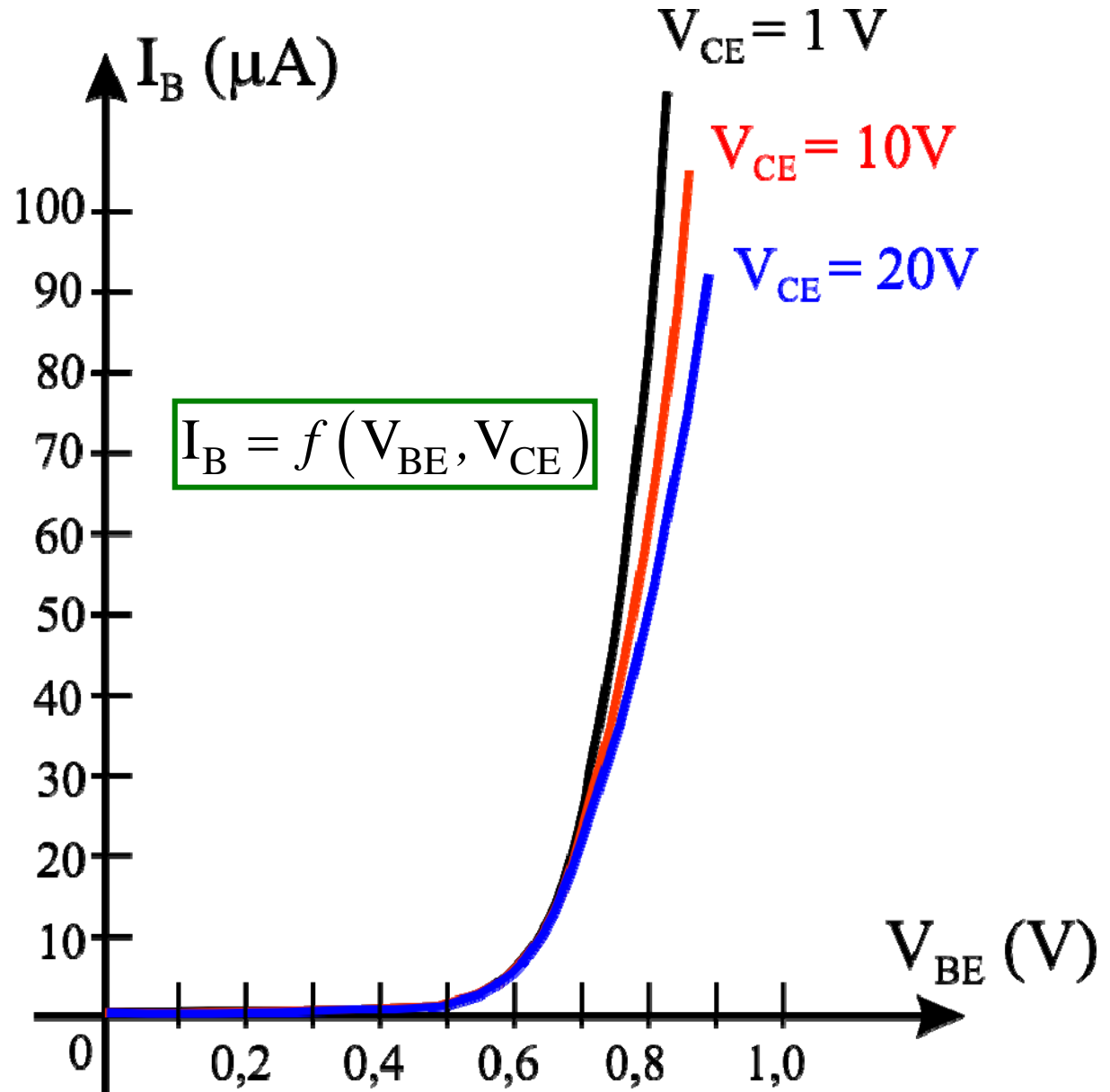
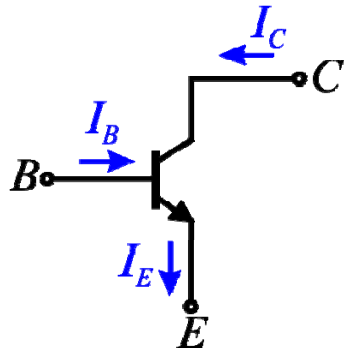
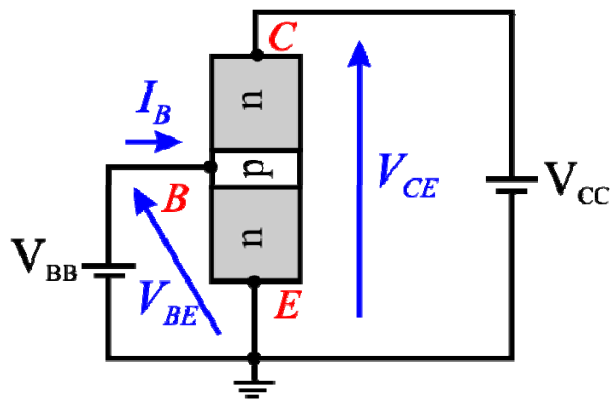
$$|V_{CB2}| > |V_{CB1}|$$

$$W_{B2} < W_{B1}$$

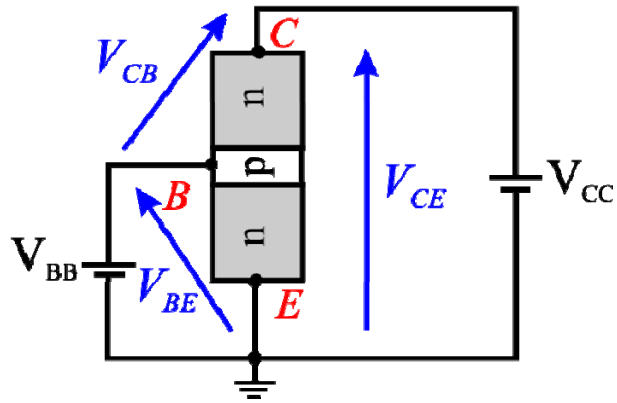
$$\alpha_2 > \alpha_1$$

$$I_{C2} > I_{C1}$$





Efecto Early o de modulación de anchura de la base.



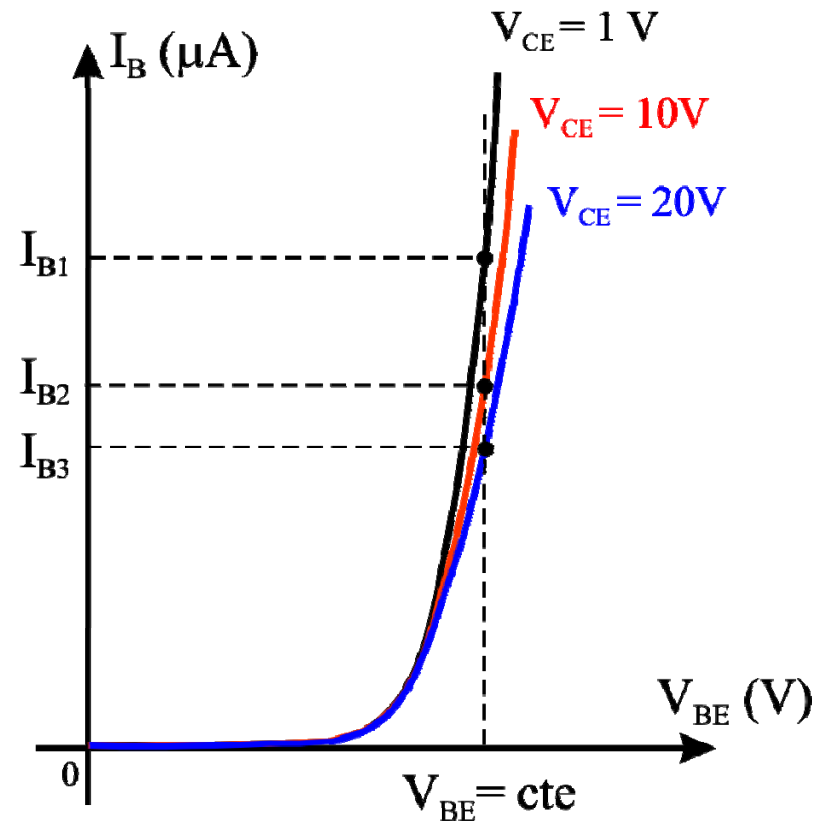
$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

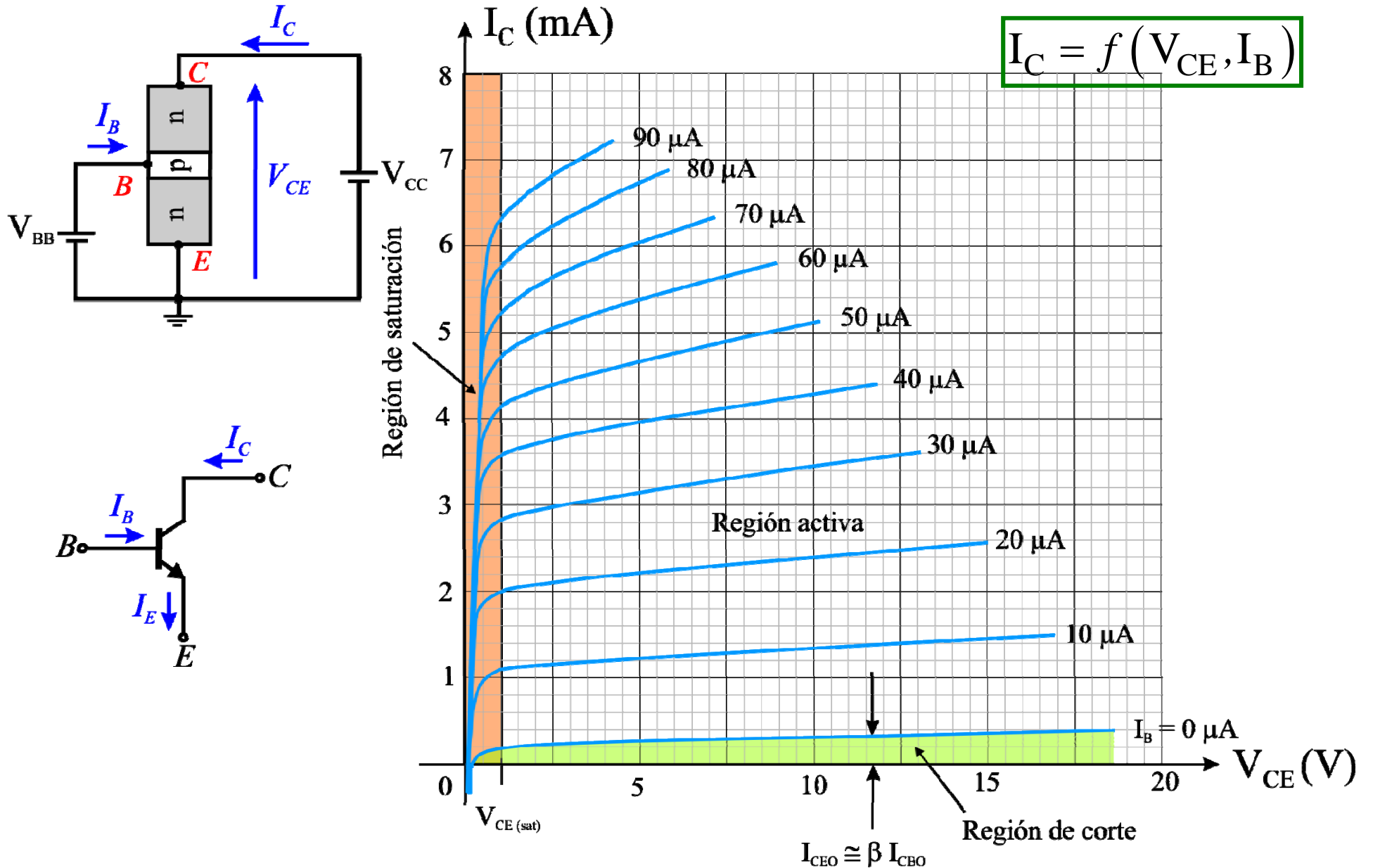
$$V_{CE} \uparrow \Rightarrow V_{CB} \uparrow$$

$$V_{CB} \uparrow \Rightarrow W_B \downarrow$$

$$W_B \downarrow \Rightarrow \alpha \uparrow$$

$$\alpha \uparrow \Rightarrow I_B \downarrow$$





## Región activa

$$\left. \begin{aligned} I_C &= \alpha \cdot I_E + I_{CO} \\ I_E &= I_B + I_C \end{aligned} \right\} I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CO}$$

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

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CO}$$

$$\beta = \frac{I_C - I_{CO}}{I_B + I_{CO}}$$

Despreciando  $I_{CO}$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

No depende de  $V_{CE}$

## Región activa

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \\ 0,9 \leq \alpha \leq 0,998 \end{aligned} \right\} 9 \leq \beta \leq 499$$

$$\begin{array}{ccc} \alpha_1 = 0,995 & \xrightarrow{\Delta\alpha = 0,1\%} & \alpha_2 = 0,996 \\ \beta_1 = 199 & \xrightarrow{\Delta\beta = 25\%} & \beta_2 = 249 \end{array}$$

Pequeñas variaciones de  $\alpha \Rightarrow$  grandes variaciones de  $\beta$

$\beta$  varía mucho de un transistor a otro

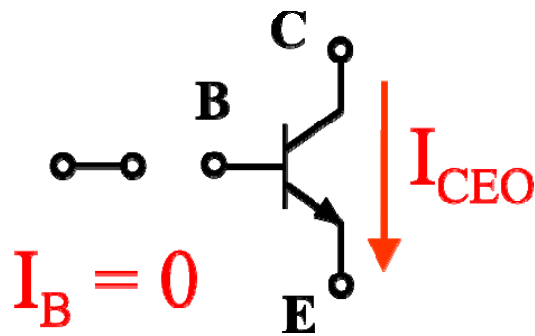
$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$h_{FE} = \beta$$

$$\beta = \frac{I_C - I_{CO}}{I_B + I_{CO}}$$

## Región de Corte

No hay corrientes por el transistor

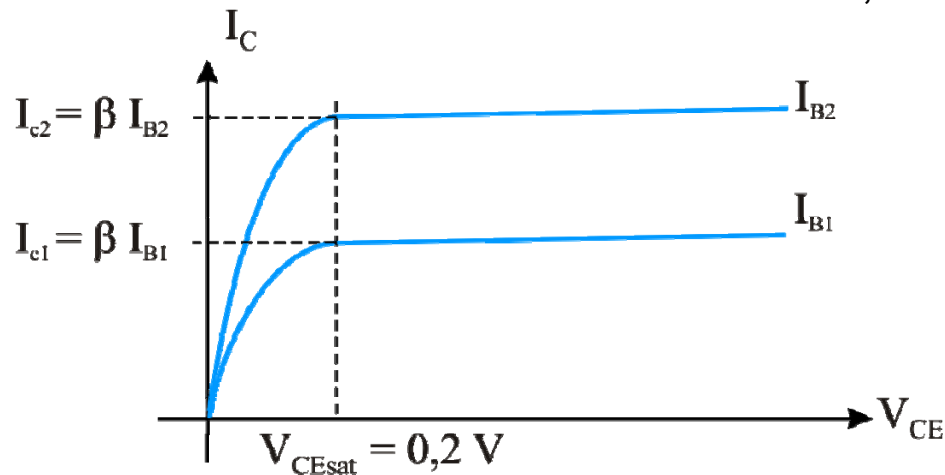


$$\left. \begin{aligned} I_C &= \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CO} \\ I_C &= \beta I_B + (\beta + 1) I_{CO} \end{aligned} \right\} I_C = \frac{1}{1-\alpha} I_{CO} = (\beta + 1) I_{CO} = I_{CEO}$$

$I_{CEO}$  = puede ser hasta  $500 \cdot I_{CO}$

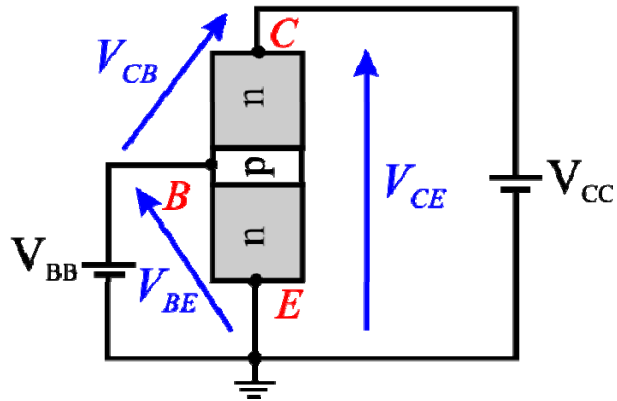
## Región de saturación

En 0,2 V las corrientes de colector se anulan



$$I_{Csat} < \beta \cdot I_B$$

Efecto Early o de modulación de anchura de la base.



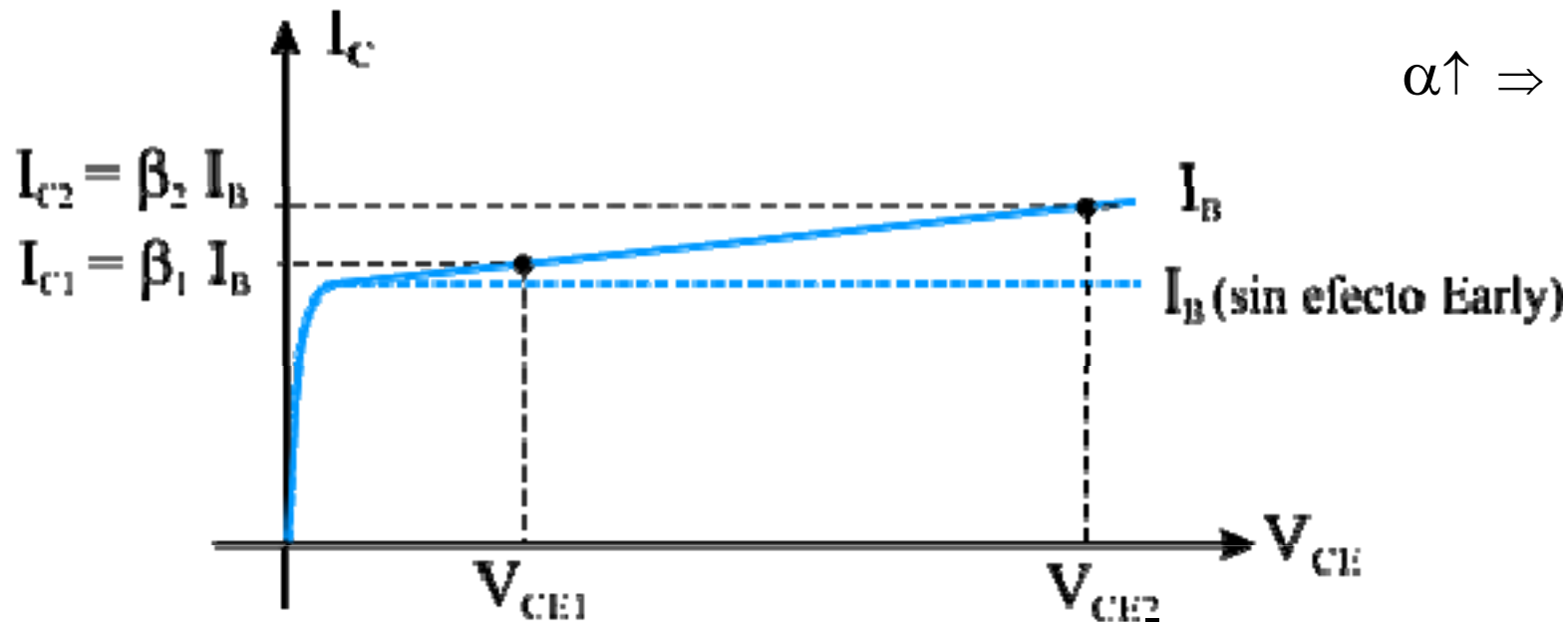
$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

$$V_{CE} \uparrow \Rightarrow V_{CB} \uparrow$$

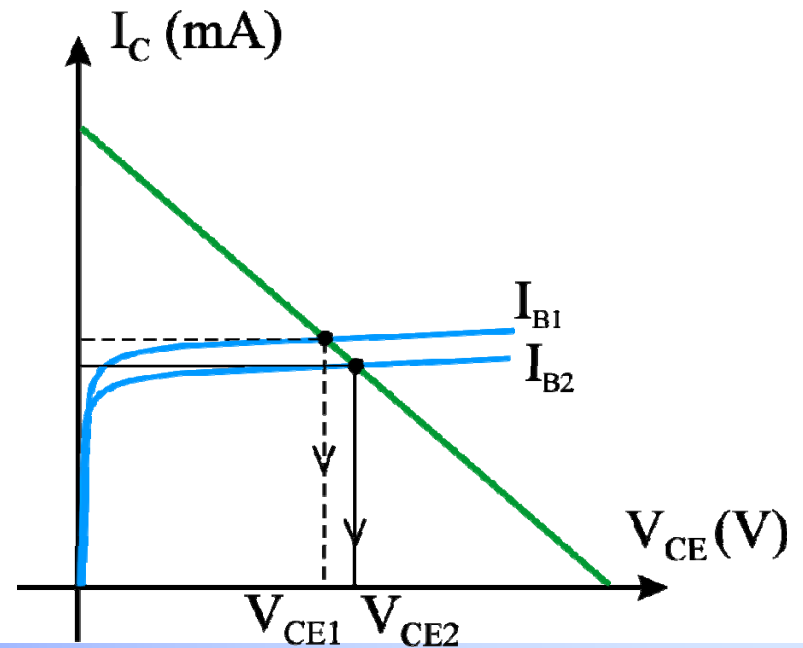
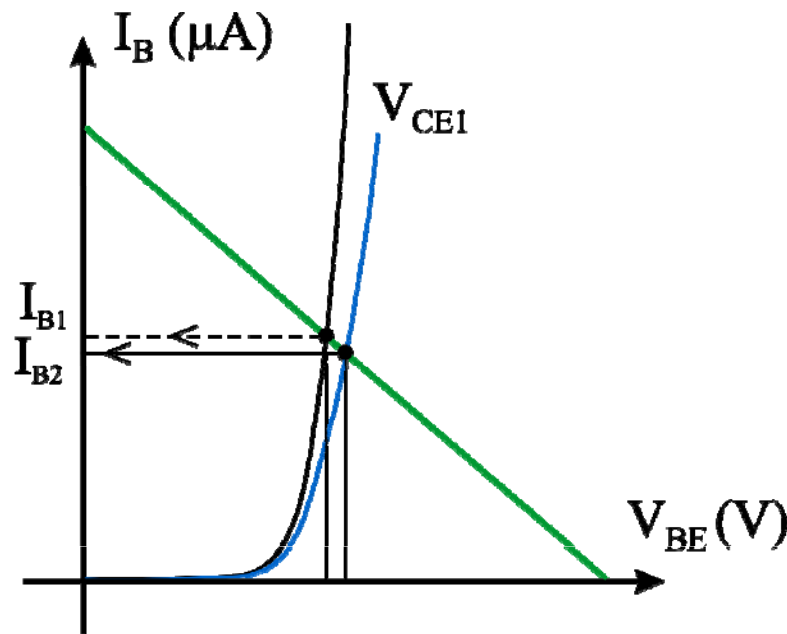
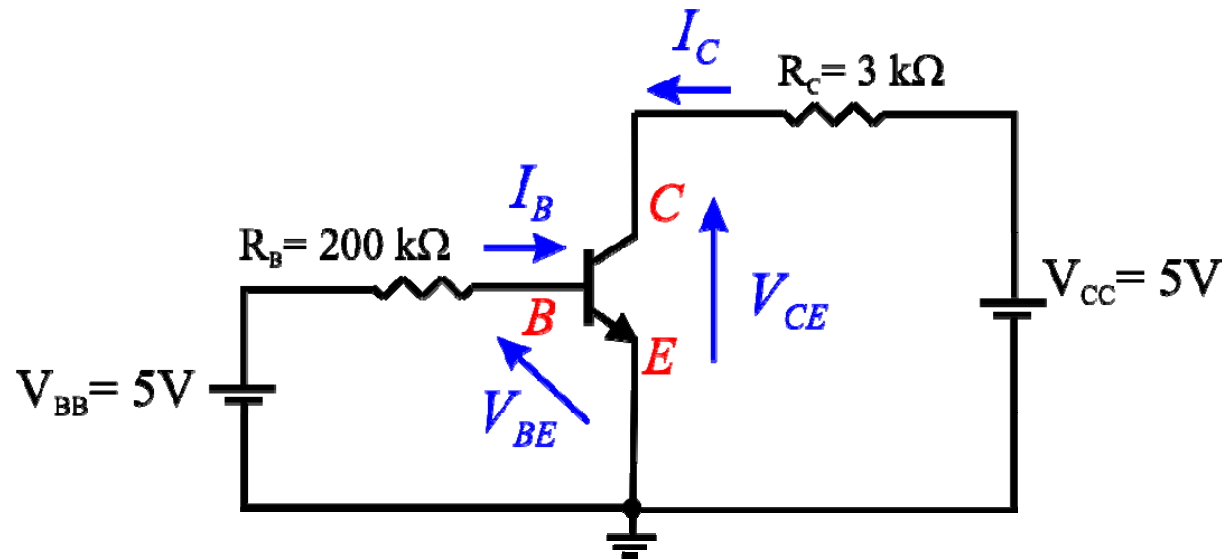
$$V_{CB} \uparrow \Rightarrow W_B \downarrow$$

$$W_B \downarrow \Rightarrow \alpha \uparrow$$

$$\alpha \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \uparrow$$

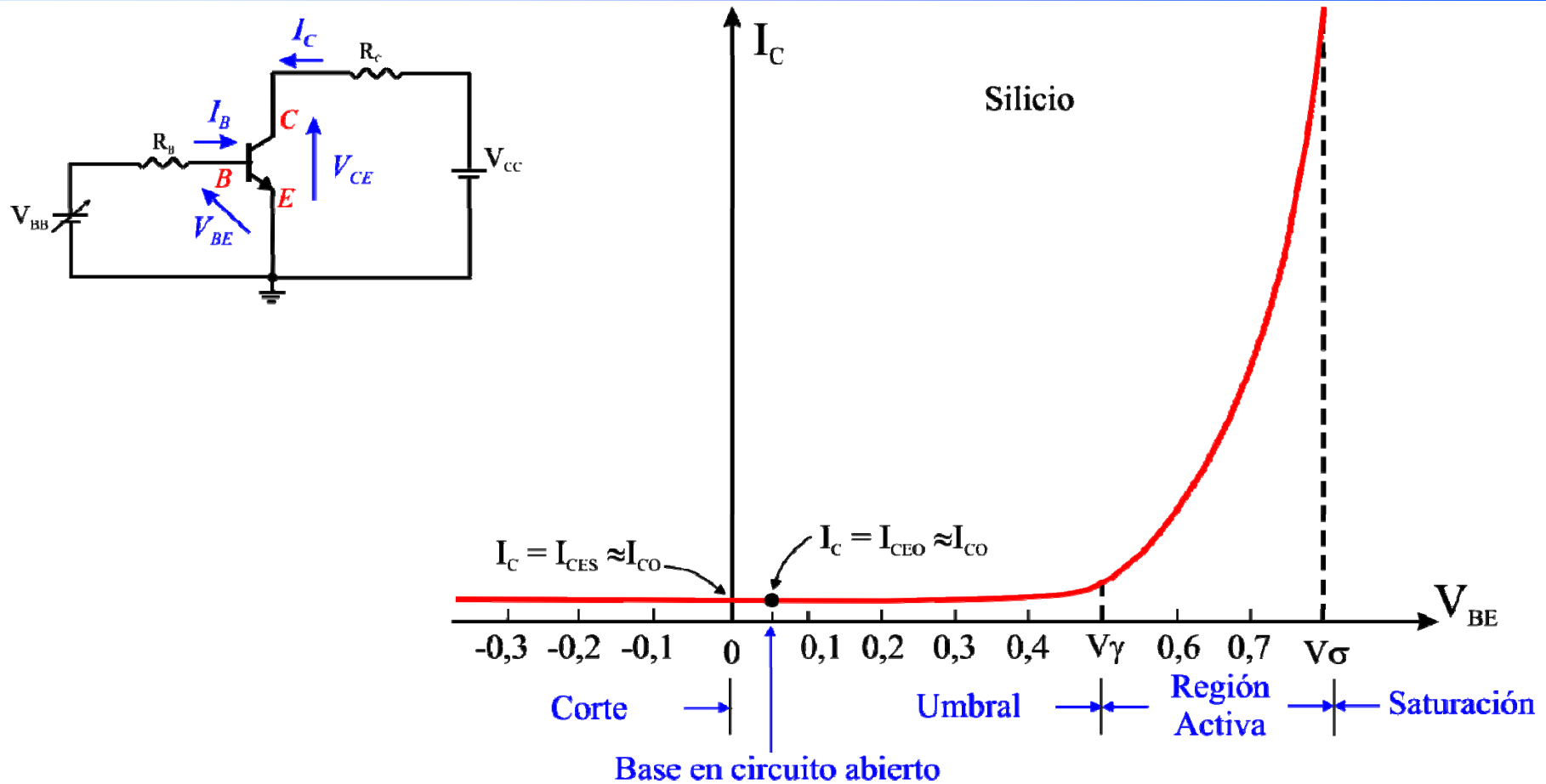


## 4.1.- Punto de funcionamiento.



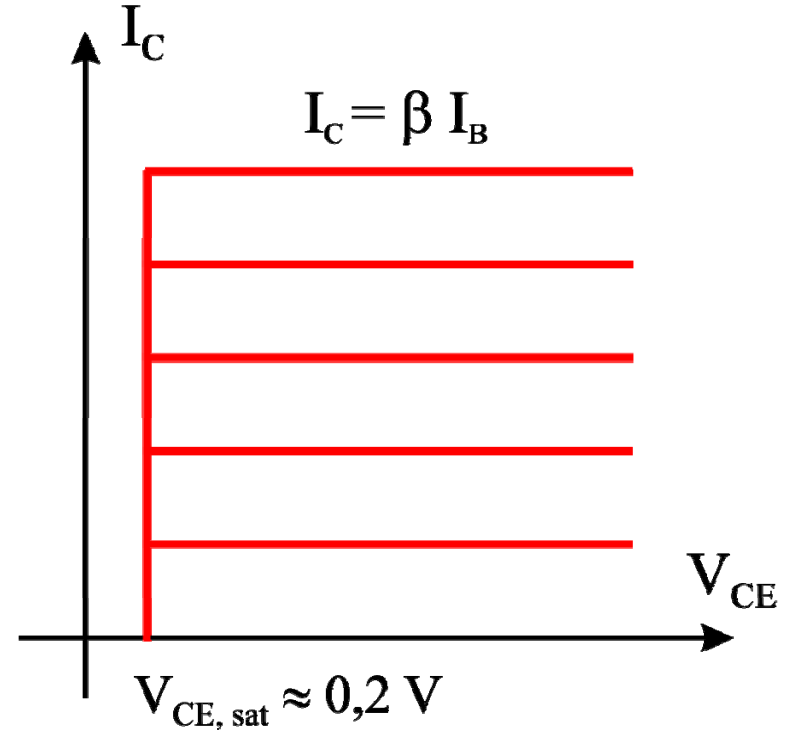
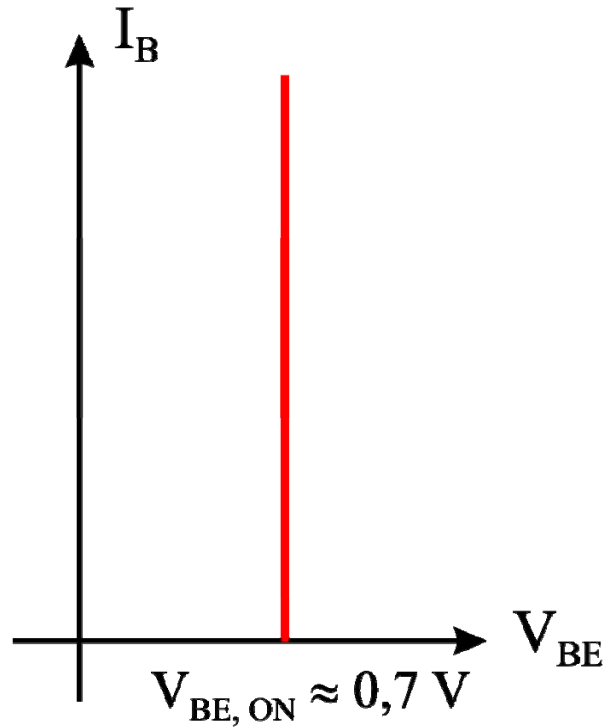


## 4.2.- Curva de puntos característicos.



	$V_{CE, sat}$	$V_{BE, sat} \equiv V_{\sigma}$	$V_{BE, activa}$	$V_{BE, umbral} \equiv V_{\gamma}$	$V_{BE, corte}$
<b>Si</b>	0,2	0,8	0,7	0,5	0,0
<b>Ge</b>	0,1	0,3	0,2	0,1	-0,1

# Modelo del transistor ideal.



$$V_{BE} < V_{BE,ON} \Rightarrow I_C = 0$$

**Corte**

$$V_{BE} = V_{BE,ON} \begin{cases} V_{CE} > V_{CE,sat} \Rightarrow I_C = \beta \cdot I_B \\ V_{CE} < V_{CE,sat} \Rightarrow I_C < \beta \cdot I_B \end{cases}$$

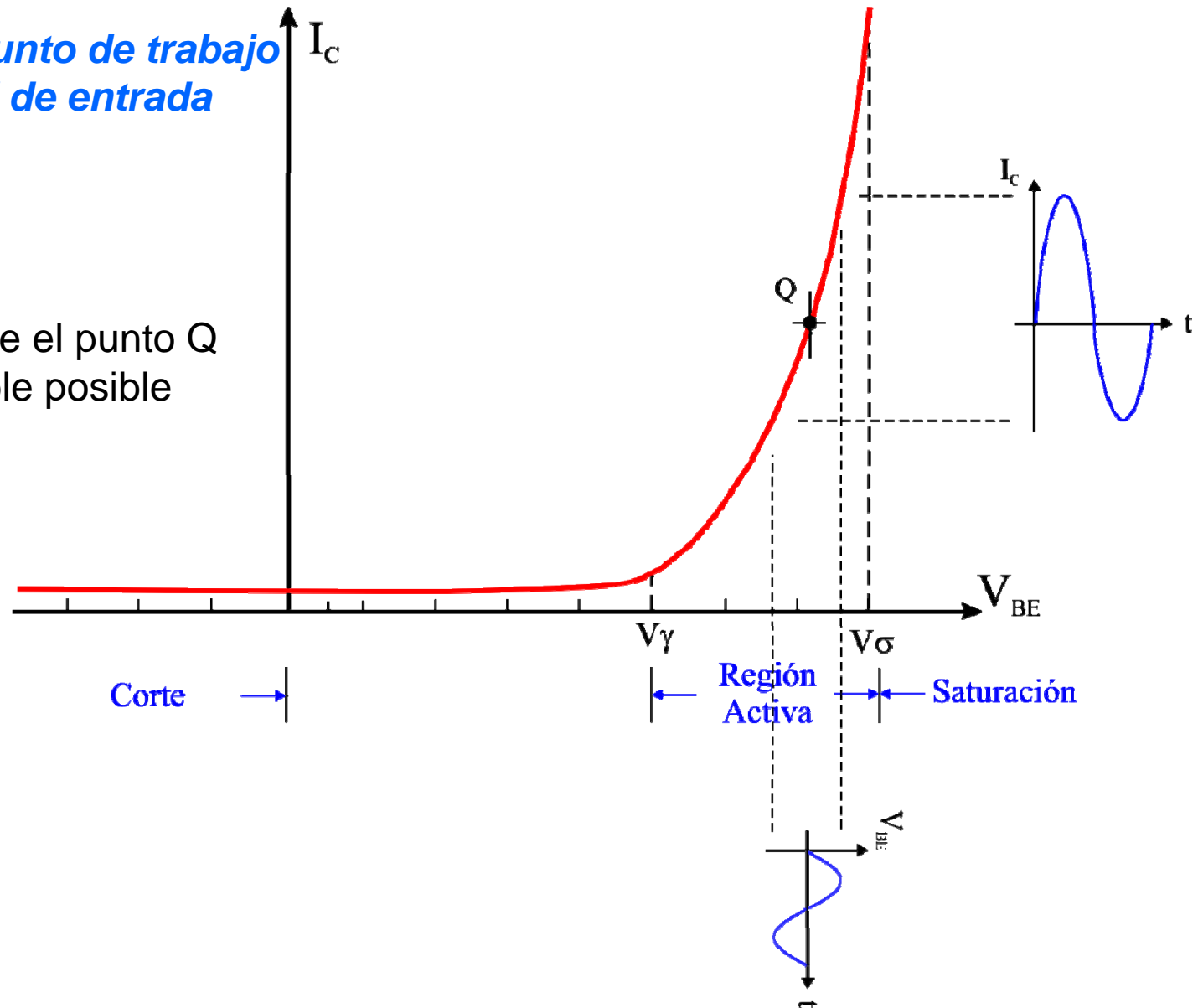
**Activa**

**Saturación**

## 5.- Polarización del transistor.

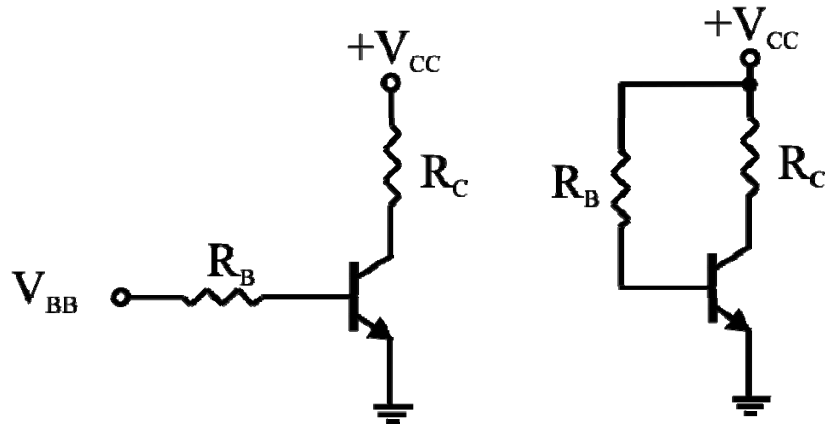
Consiste en fijar el punto de trabajo en ausencia de señal de entrada

Hay que procurar que el punto Q sea lo más estable posible

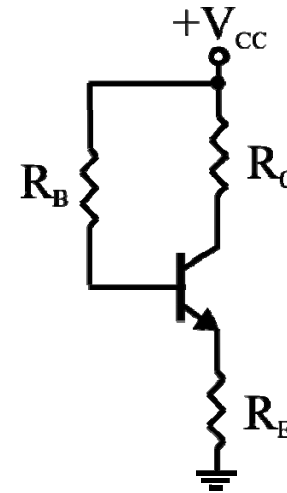


## 5.1.- Circuitos de polarización.

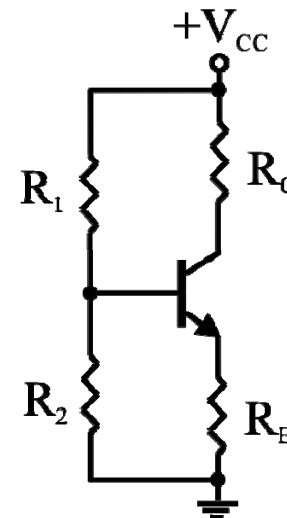
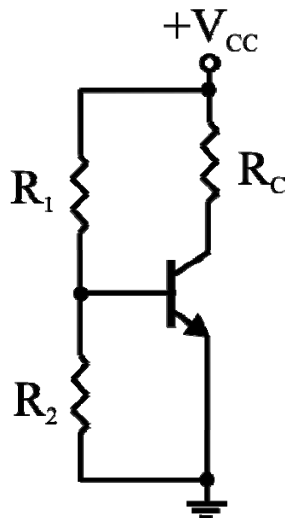
*Polarización de base*



*Con  $R_E$*

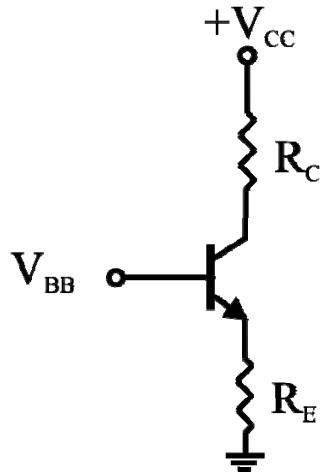


*Polarización por divisor de tensión*

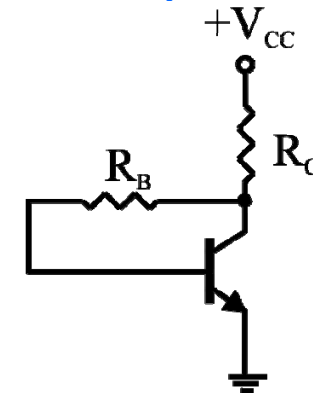


## 5.1.- Circuitos de polarización.

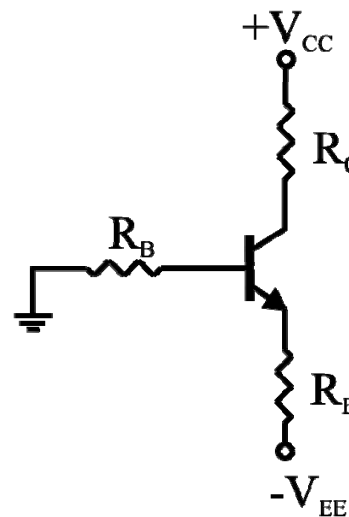
*Polarización por  
realimentación de emisor*



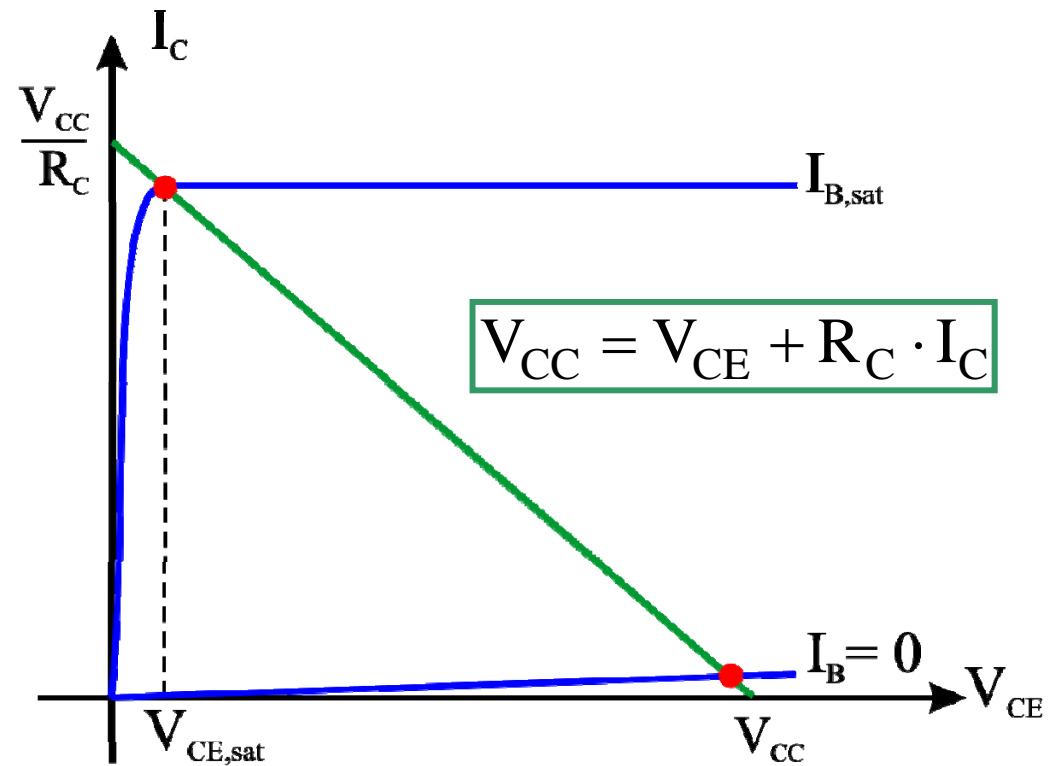
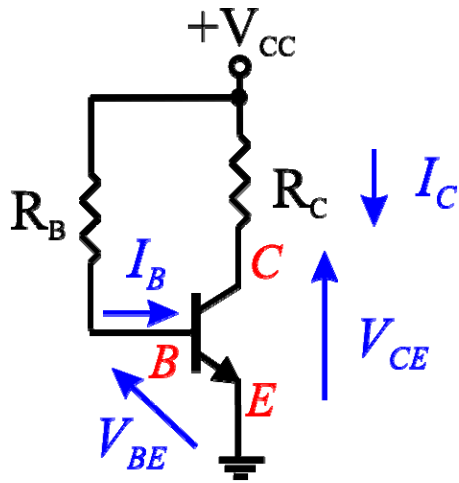
*Polarización por  
realimentación de colector  
(autopolarización)*



*Polarización de emisor  
con dos fuentes de tensión*



## 5.2.- Polarización de base (polarización fija).

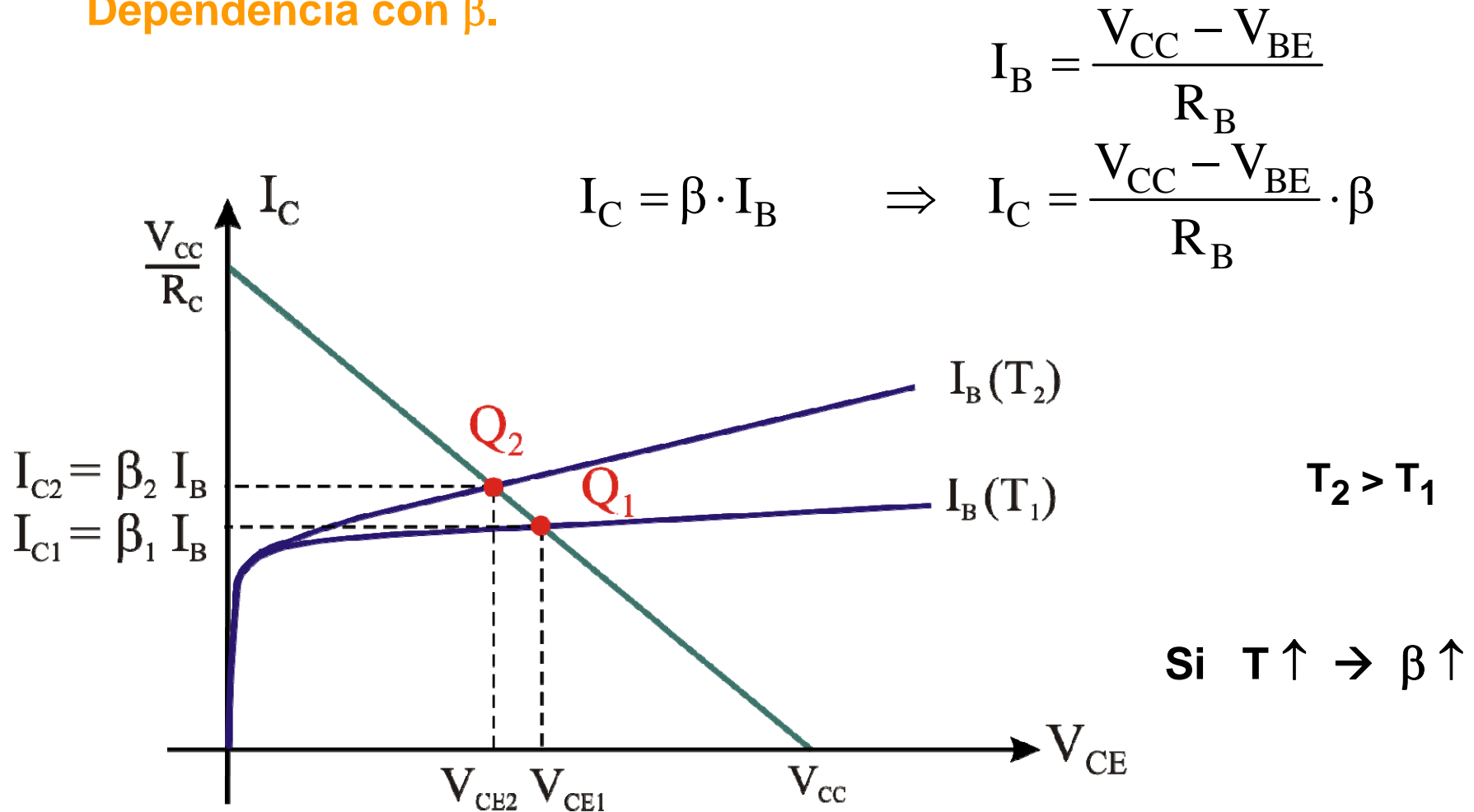


De la malla de entrada

$$V_{CC} = V_{BE} + R_B \cdot I_B \quad \rightarrow \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

## 5.2.- Polarización de base (polarización fija).

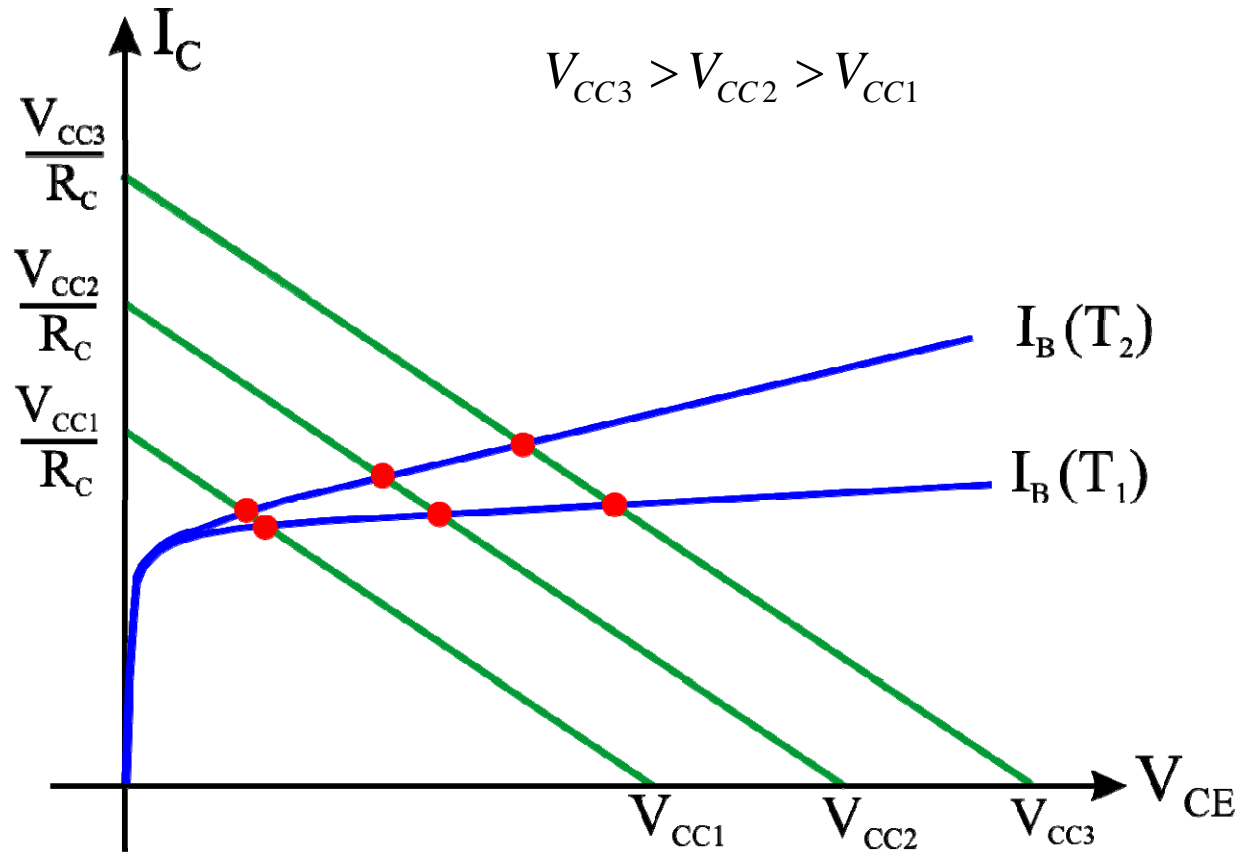
Dependencia con  $\beta$ .



*El punto Q no es estable frente a las variaciones de  $\beta$*

## 5.2.- Polarización de base (polarización fija).

### Influencia de $V_{CC}$ .

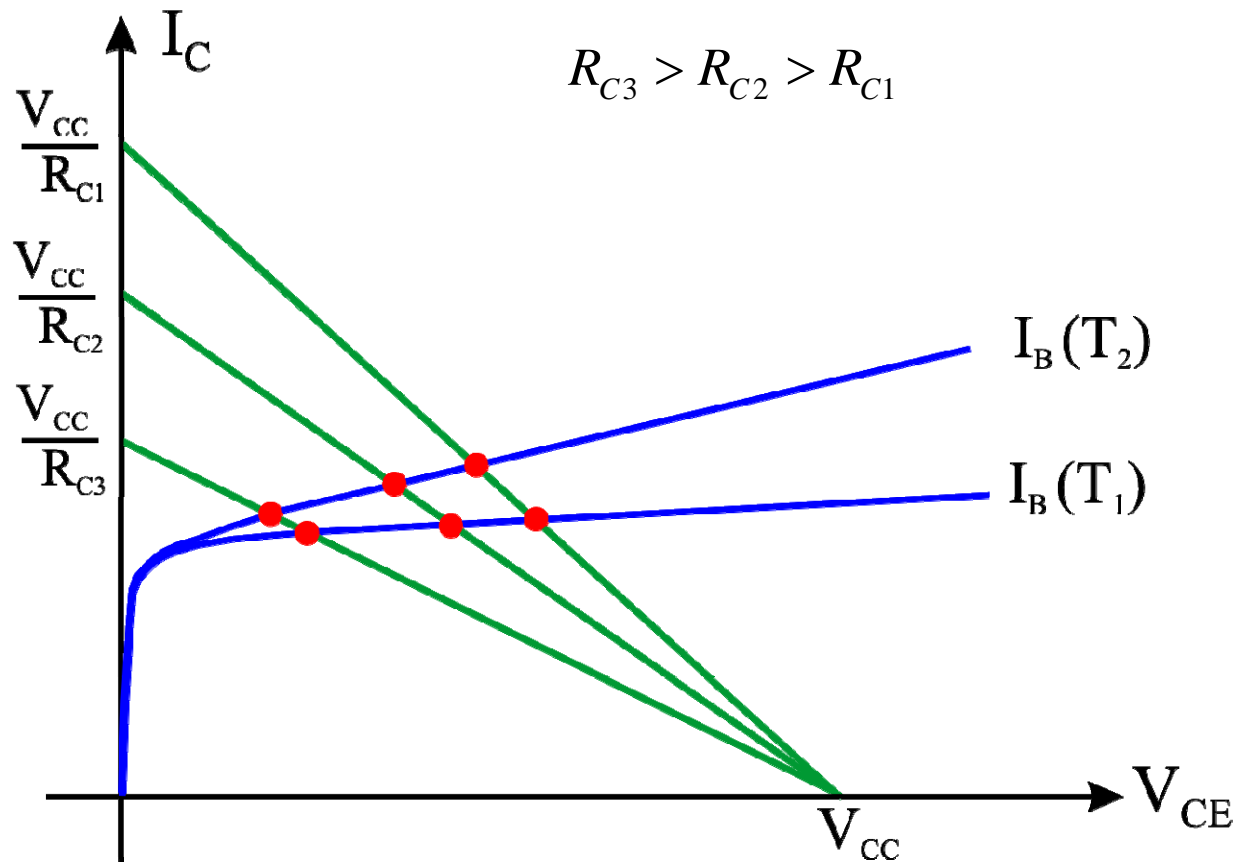


*Cuanto mayor sea  $V_{CC}$  mayor será el desplazamiento del punto  $Q$  ante una variación de  $\beta$*



## 5.2.- Polarización de base (polarización fija).

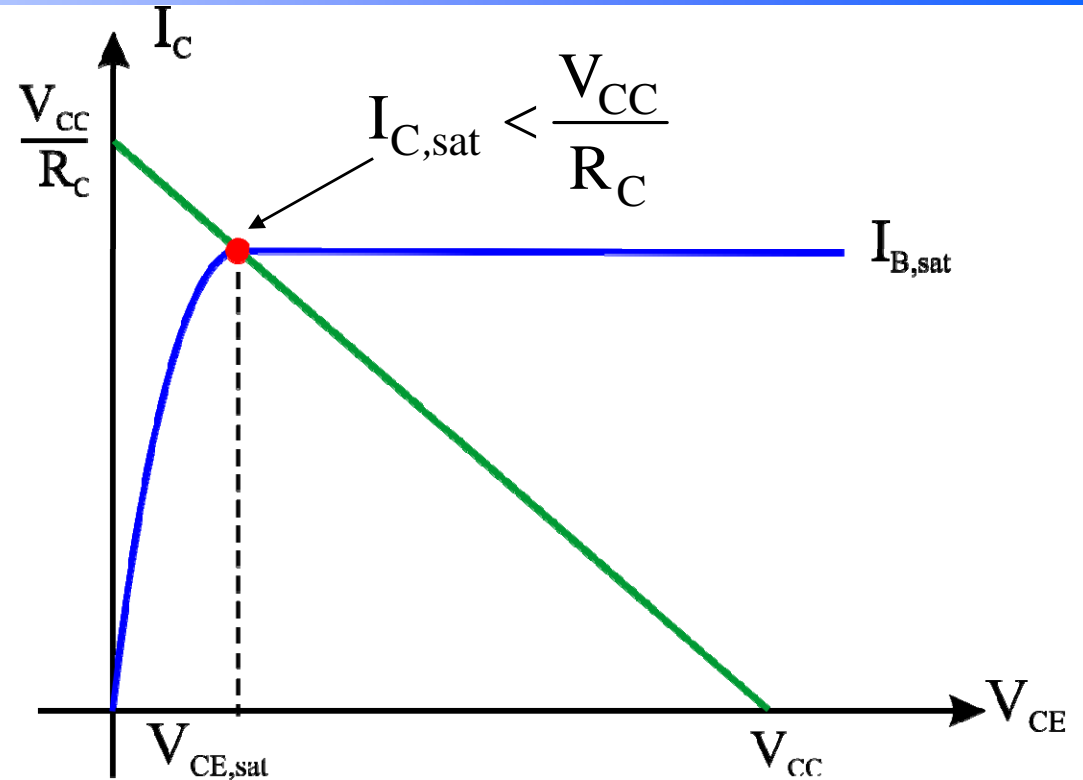
### Influencia de $R_C$ .



*Cuanto mayor sea  $R_C$  menor será el desplazamiento del punto Q ante una variación de  $\beta$*

## 5.2.- Polarización de base (polarización fija).

Influencia de  $R_B$ .



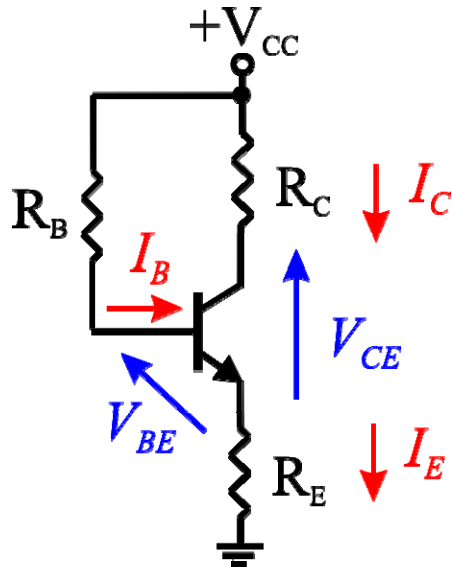
$$R_B = \beta \cdot R_C$$

$$\rightarrow I_{C1} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta}} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \approx I_{C,sat}$$

$$R_B < \beta \cdot R_C$$

$$\rightarrow I_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta}} > \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \Rightarrow \text{Saturación}$$

## 5.3.- Polarización de base con $R_E$ .



$$V_{CC} = R_E \cdot I_E + V_{BE} + R_B \cdot I_B = \text{cte.}$$

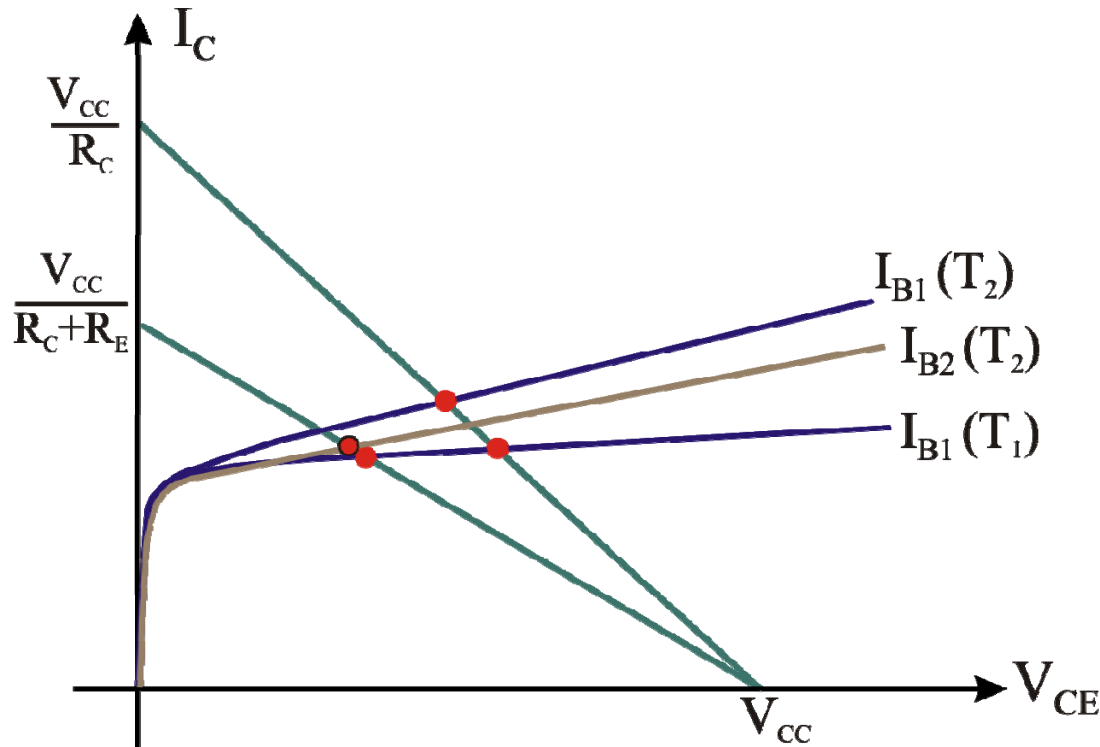
$$\left. \begin{array}{l} I_E = I_B + I_C \\ I_C = \beta \cdot I_B \end{array} \right\} I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot I_C \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$\text{Si } \beta \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow$$

$$\text{Si } R_E \cdot I_E \uparrow \Rightarrow R_B \cdot I_B \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow$$

***El circuito reacciona oponiéndose a la causa que ha originado la perturbación***

## 5.3.- Polarización de base con $R_E$ .



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

$$I_E \approx I_C$$

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

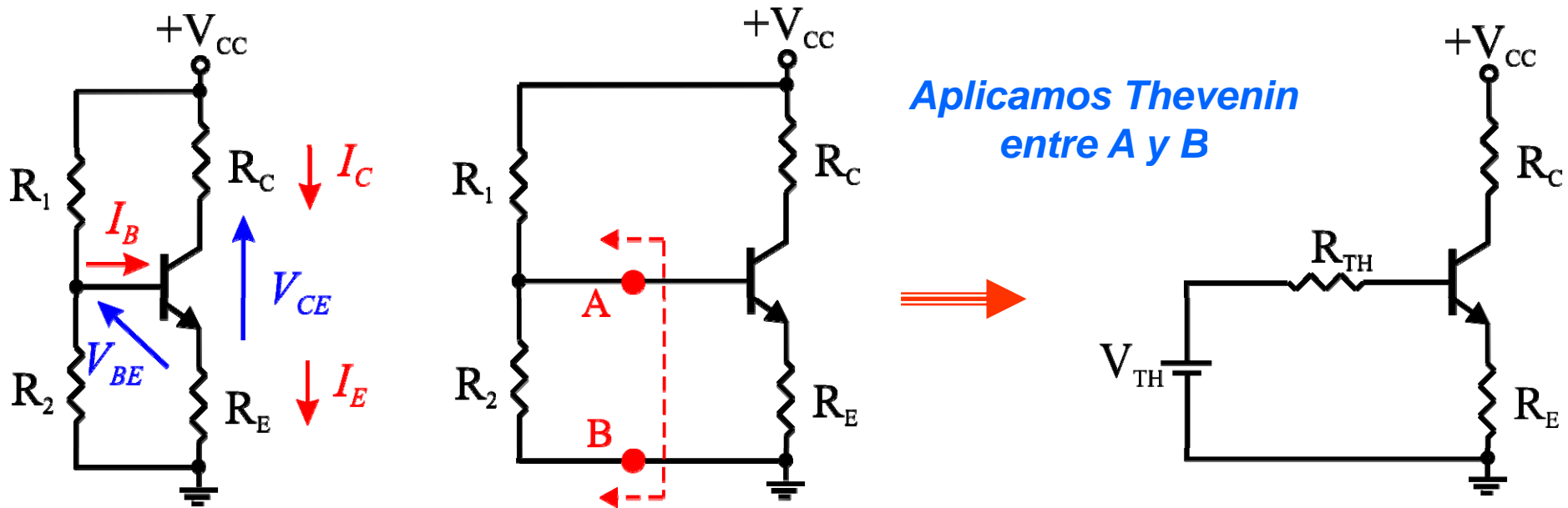
$$\text{Si } R_E \gg \frac{R_B}{\beta} \quad \left( R_E > 100 \frac{R_B}{\beta} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{CC} = R_E \cdot I_E + V_{BE} + R_B \cdot I_B \\ \left\{ \begin{array}{l} I_C = \beta \cdot I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} \\ \text{Si } \beta \gg 1, I_E \approx I_C \end{array} \right. \end{array} \right\} I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E}$$

**Circuito Estable**

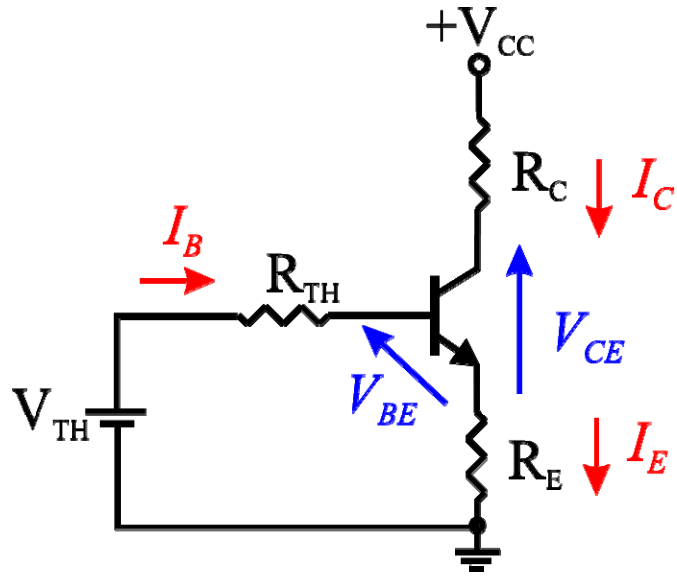
## 5.4.- Polarización por divisor de tensión.



$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{TH} = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## 5.4.- Polarización por divisor de tensión.



$$V_{TH} = R_E \cdot I_E + V_{BE} + R_{TH} \cdot I_B$$

$$\left. \begin{aligned} I_E &= I_B + I_C \\ I_C &= \beta \cdot I_B \end{aligned} \right\}$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot I_C \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$I_C = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{TH}}{\beta}}$$

$$I_C = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$$

**Circuito Estable**

**Divisor firme**

Si  $R_E \gg \frac{R_{TH}}{\beta}$   $\left( R_E > 100 \frac{R_{TH}}{\beta} \right)$

$$R_{TH} < \frac{1}{100} \beta \cdot R_E$$

$$R_{TH} < \frac{1}{10} \beta \cdot R_E$$

## 5.4.- Polarización por divisor de tensión.

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 > R_2$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \approx R_2$$

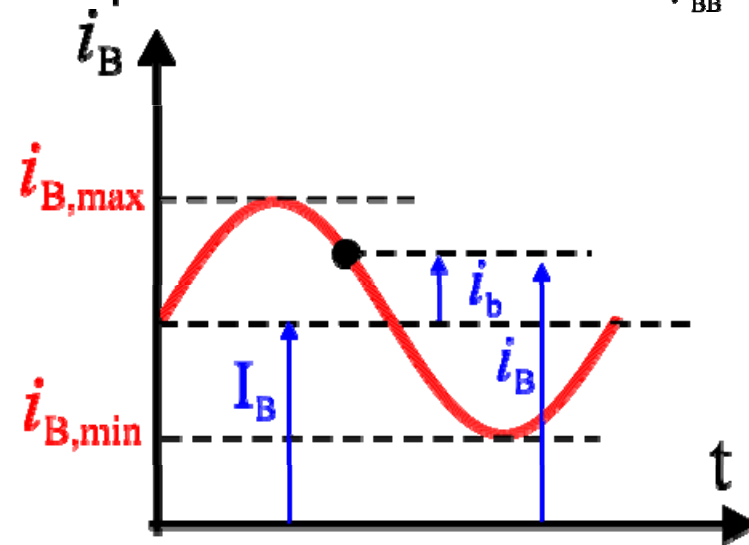
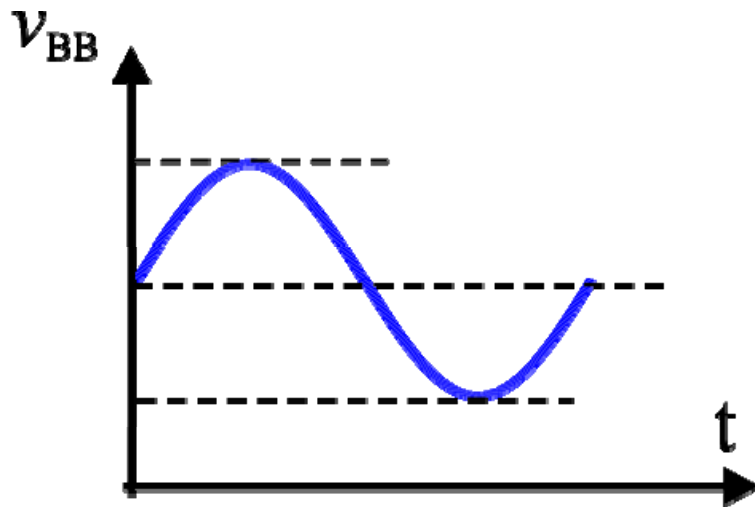
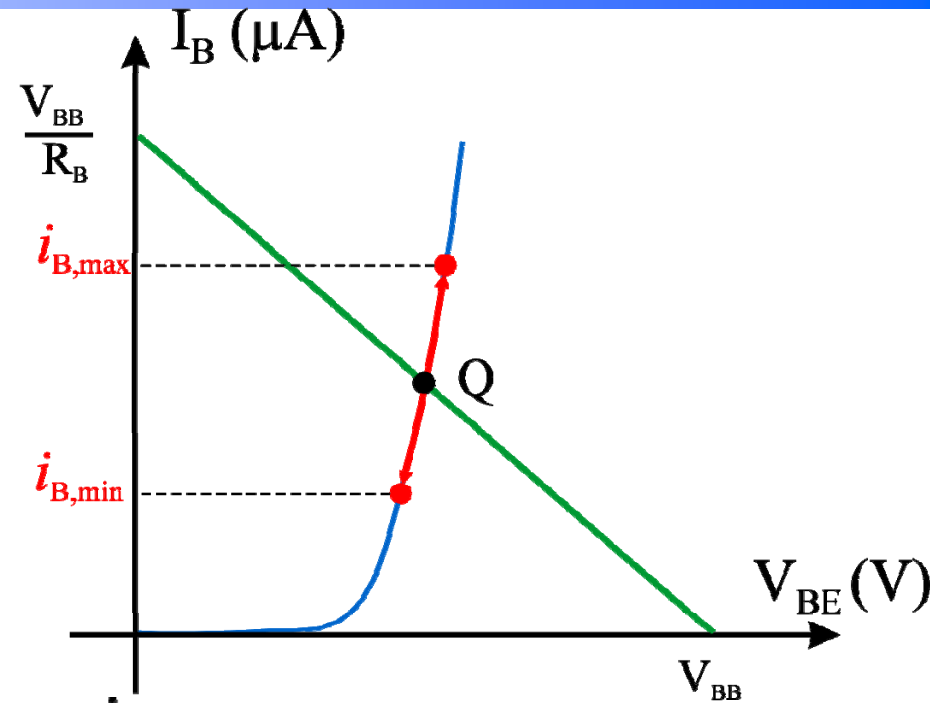
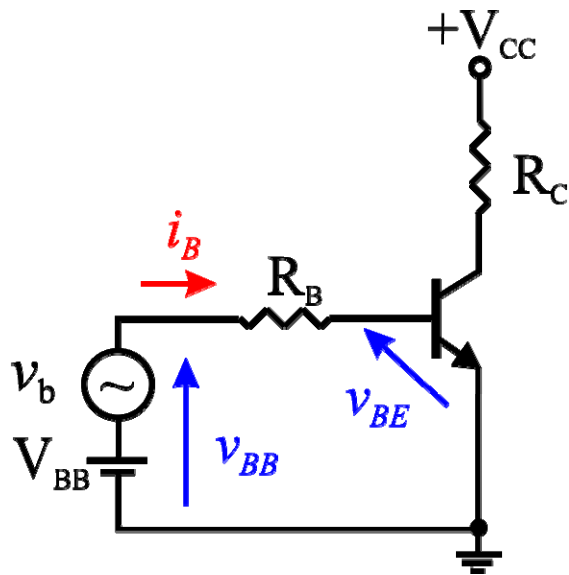
**Circuito Estable**

$$R_2 < \frac{1}{100} \beta \cdot R_E$$

**Divisor firme**

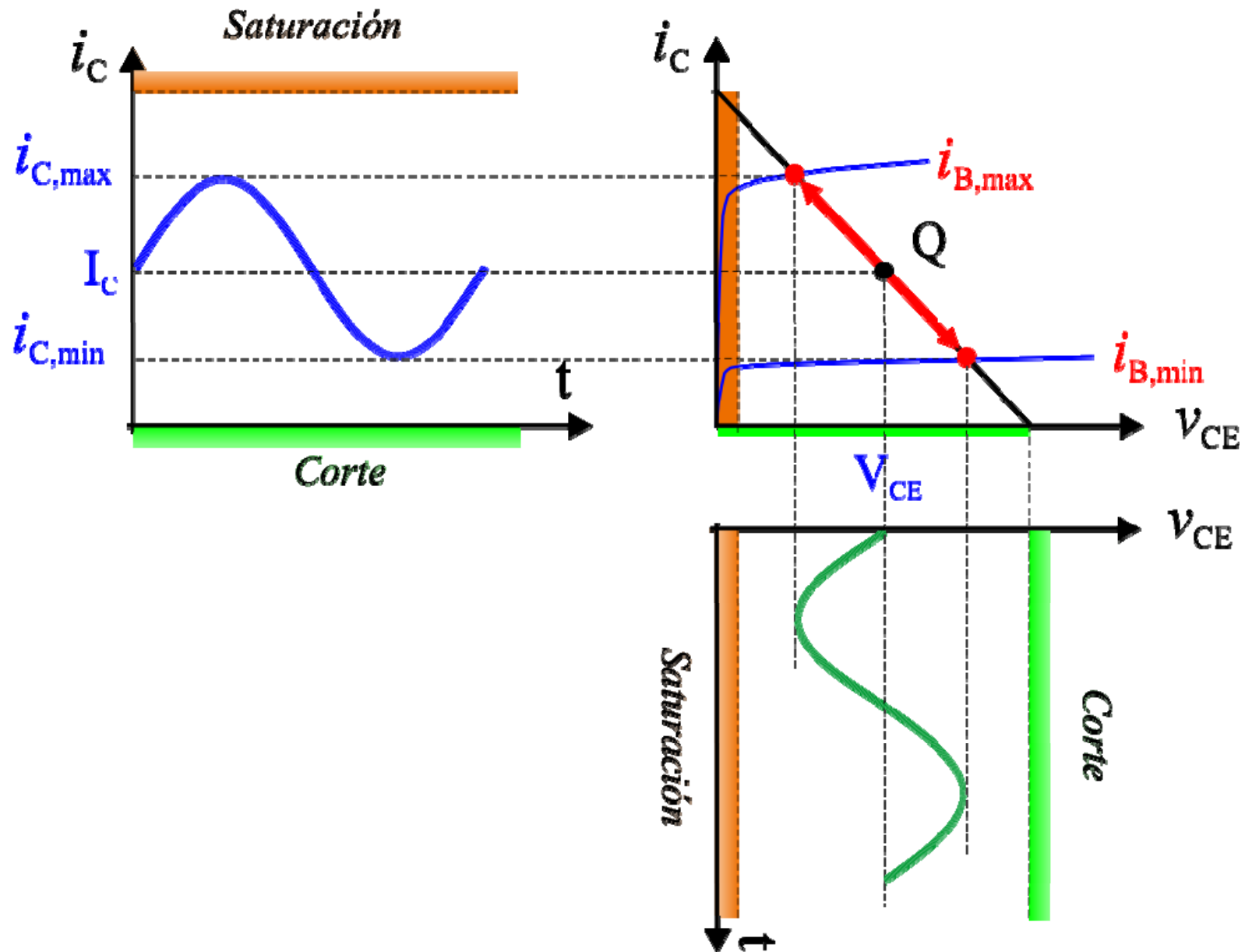
$$R_2 < \frac{1}{10} \beta \cdot R_E$$

## 6.1.- El transistor como amplificador.

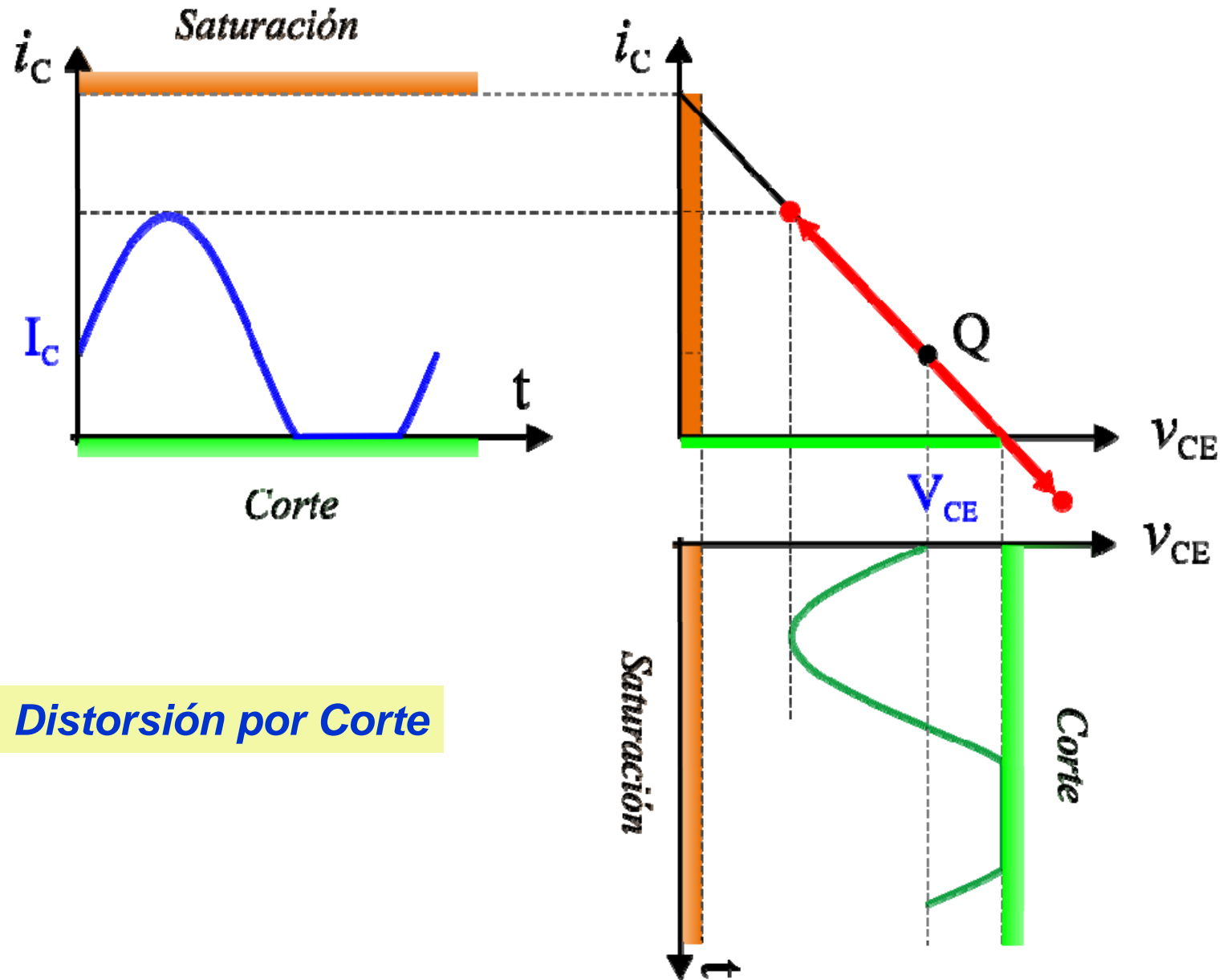




## 6.1.- El transistor como amplificador.

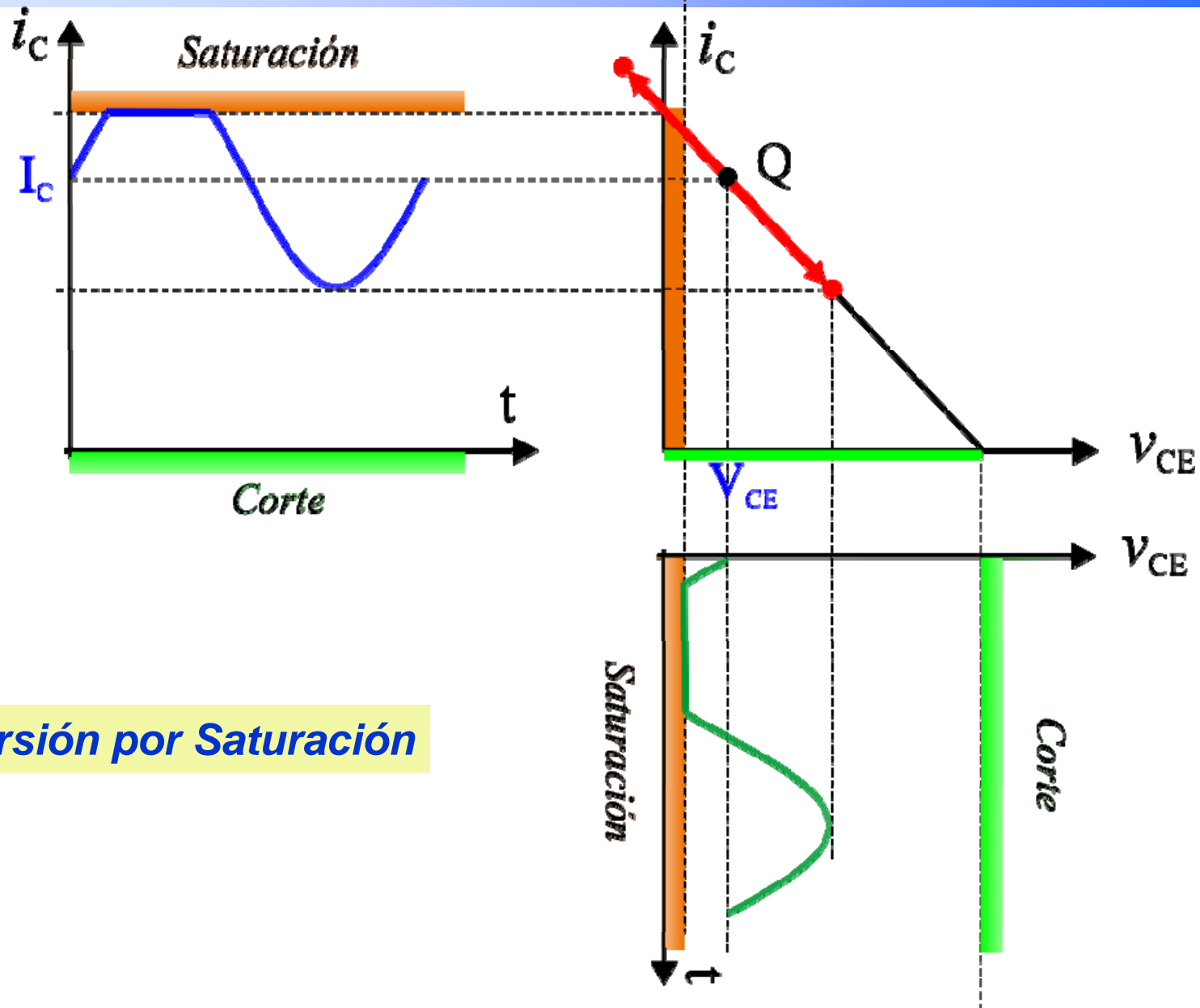


## 6.1.- El transistor como amplificador.



**Distorsión por Corte**

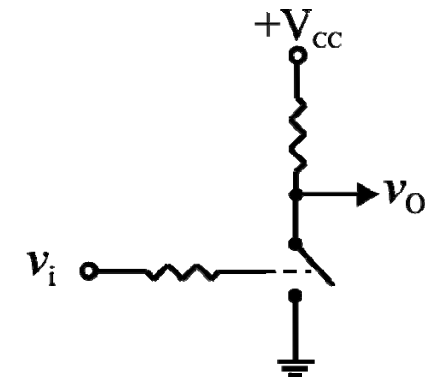
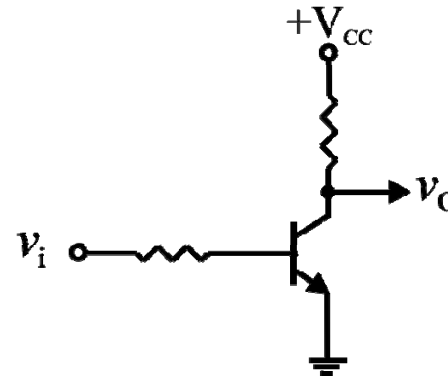
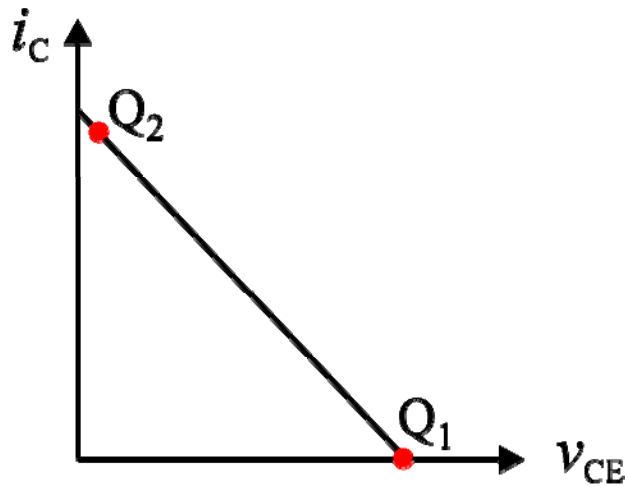
## 6.1.- El transistor como amplificador.



*Distorsión por Saturación*

## 6.1.- El transistor como interruptor.

Se trata de que el transistor trabaje en corte ( $Q_1$ ) o en saturación ( $Q_2$ )



Si  $v_i = 0 \Rightarrow V_{BE} = 0 \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0$  ( $Q_1$ )  $\Rightarrow V_O = V_{CC}$

Si  $v_i = V_{CC} \Rightarrow I_B \uparrow \uparrow \Rightarrow$  Saturación ( $Q_2$ )  $\Rightarrow V_{CE} = 0,2 \text{ V} \approx 0 \text{ V}$

