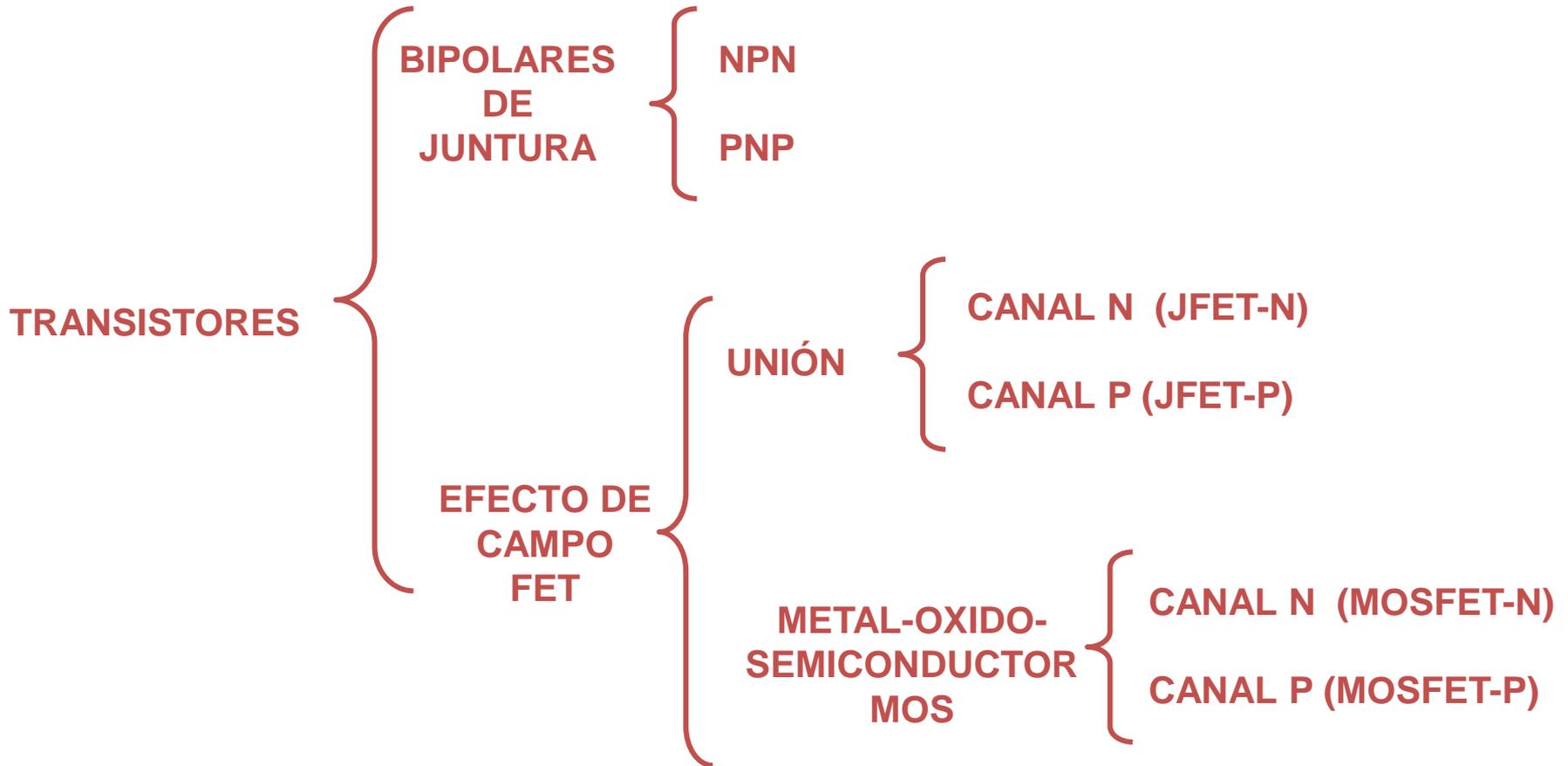


Transistor Bipolar

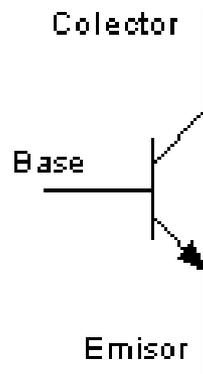
Tipos de Transistores



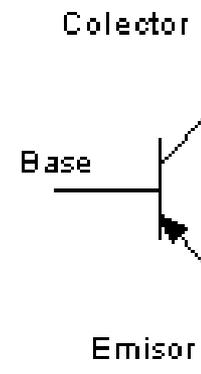
* FET : Field Effect Transistor

Definición Cualitativa

- **Dispositivo Semiconductor de 3 terminales**
- **Función en el circuito:**
 - **Amplificar Corriente**
 - **Fuente de Corriente**
 - **Llave Electrónica**
- **Tipos de Transistores:**
 - **NPN**
 - **PNP**



NPN



PNP

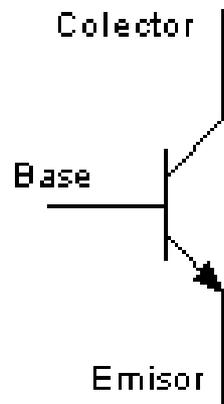
- **Símbolos que lo representan en el Circuito**

Definición

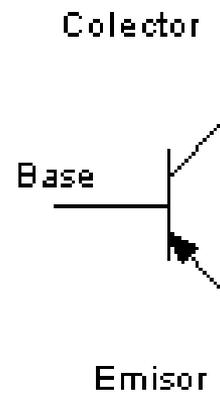
El transistor es un dispositivo de 3 terminales con los siguientes nombres: Base (B), Colector (C) y Emisor (E), coincidiendo siempre el emisor con el terminal que tiene la flecha en el gráfico de transistor.

El transistor es un Amplificador de Corriente, esto quiere decir que si le introducimos una corriente por uno de sus terminales llamado Base (I_B), entregará por otro terminal llamado Colector, una corriente (I_C) mayor en un factor que se llama ganancia de corriente en emisor común.

Este factor se llama β (Beta) y es un dato propio de cada transistor. $I_C = \beta I_B$

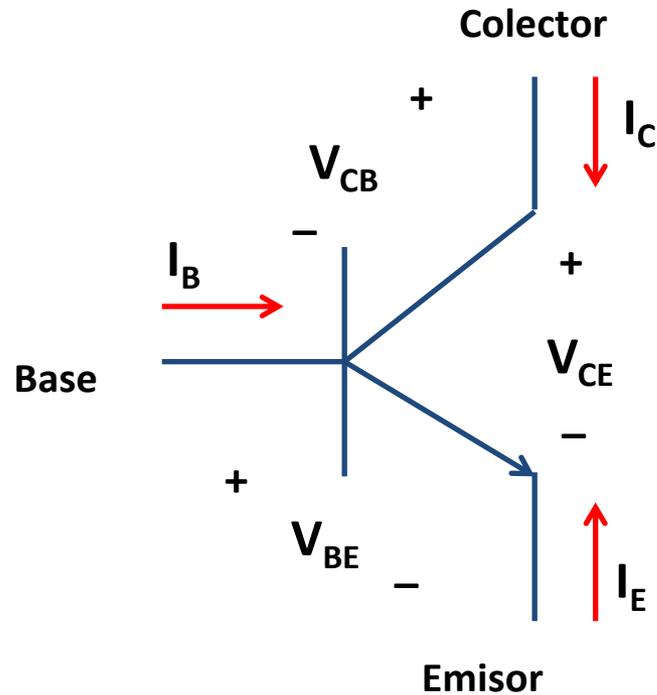


NPN



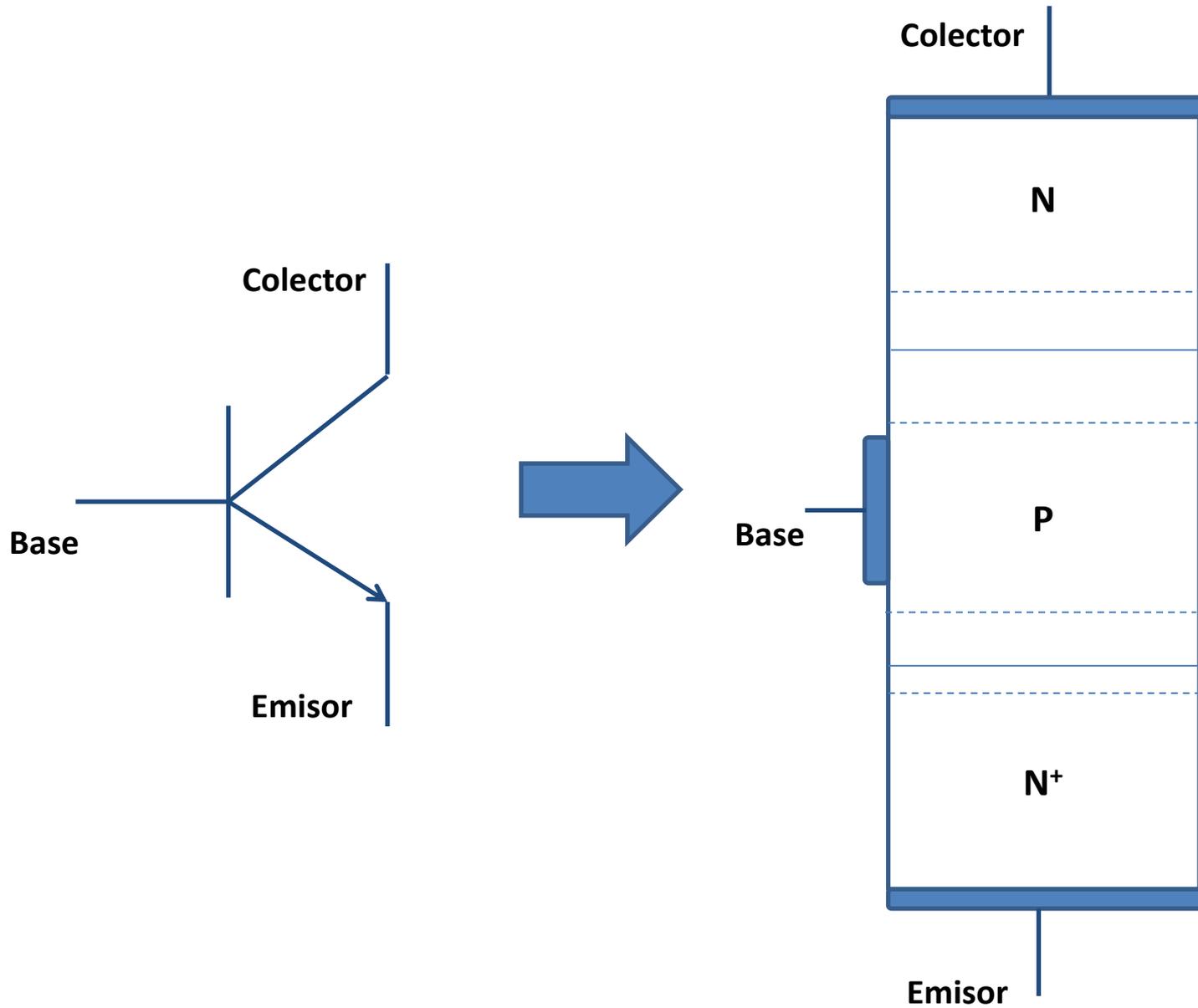
PNP

Convenciones V-I

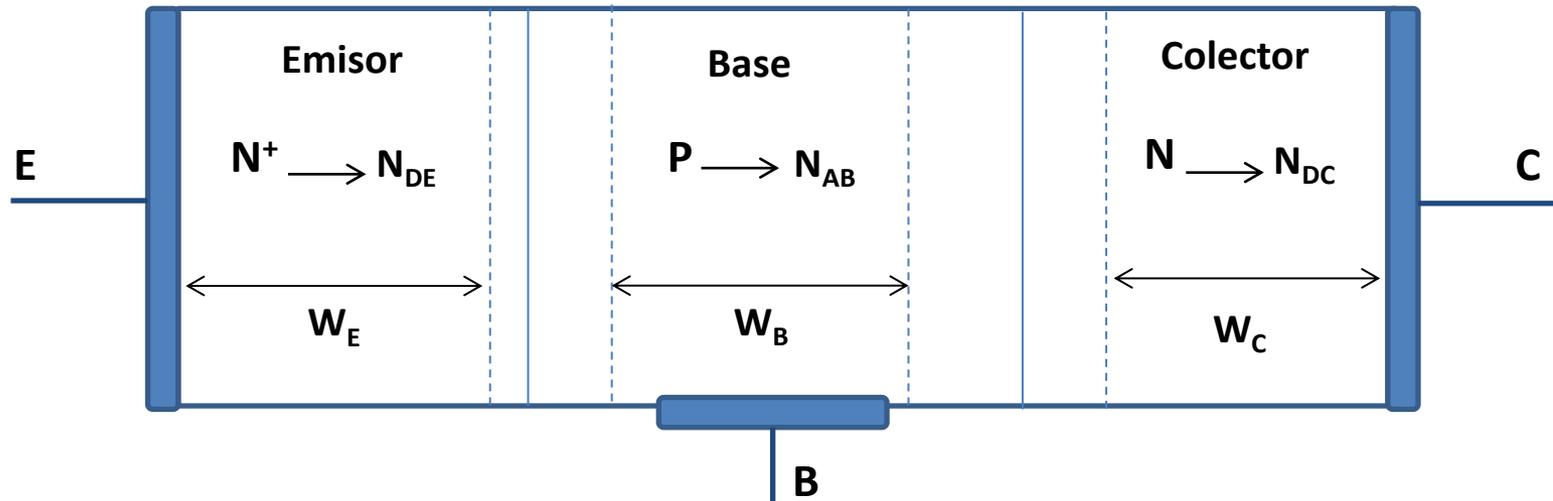


- Corrientes positivas cuando entran al dispositivo
- Tensiones indicadas por subíndices

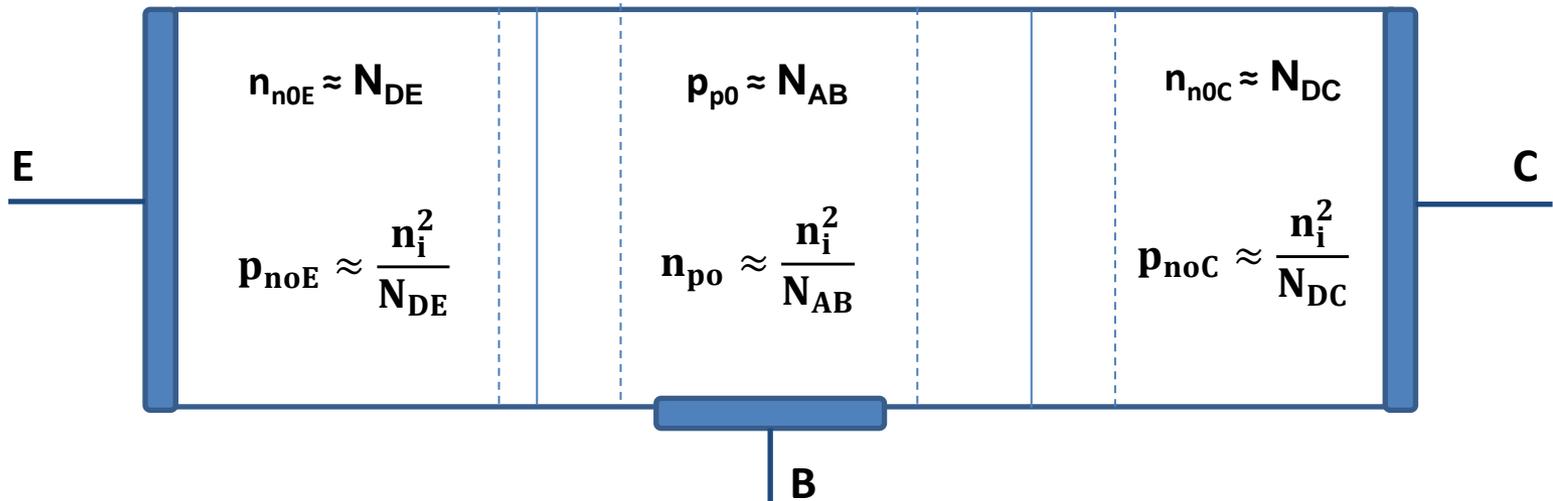
Estructura Física



Estructura Física

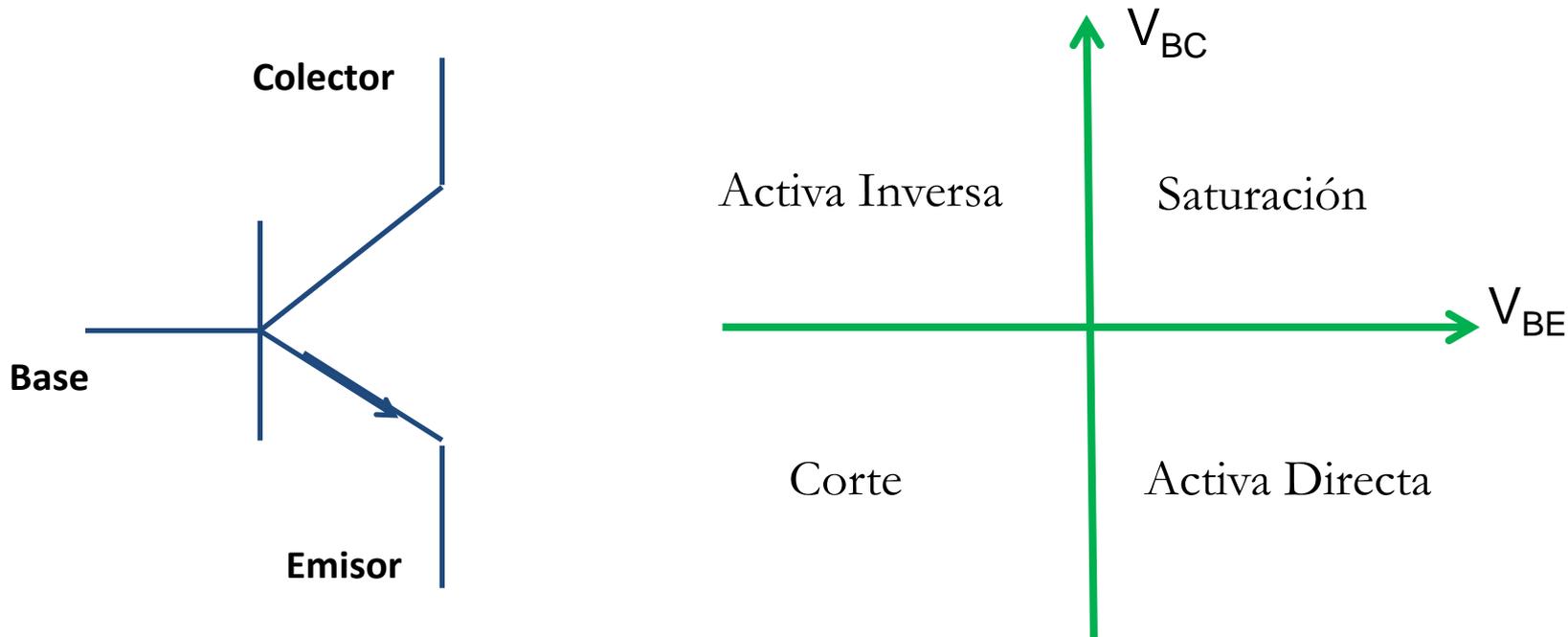


Concentración de portadores



Zonas de Operación

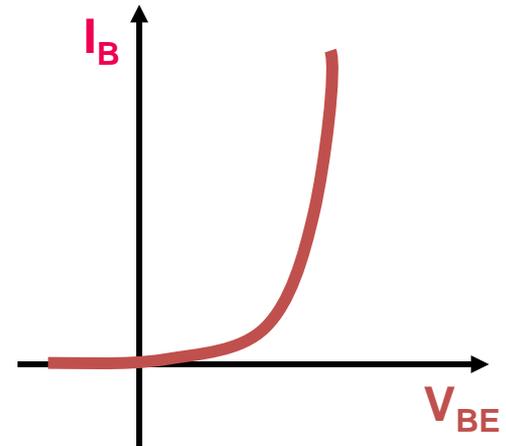
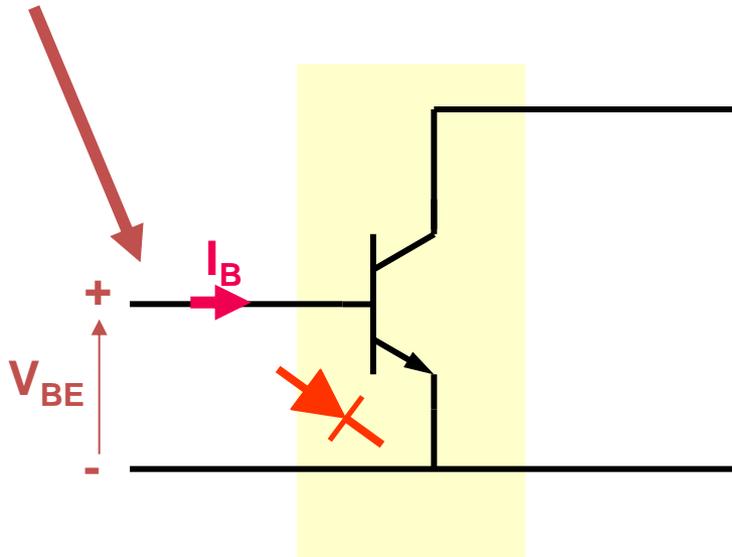
Juntura B-E	Juntura B-C	Zona de Operación
Directa	Inversa	Activa Directa
Directa	Directa	Saturación
Inversa	Inversa	Corte
Inversa	Directa	Activa Inversa



Características V-I de Base

Transistor NPN

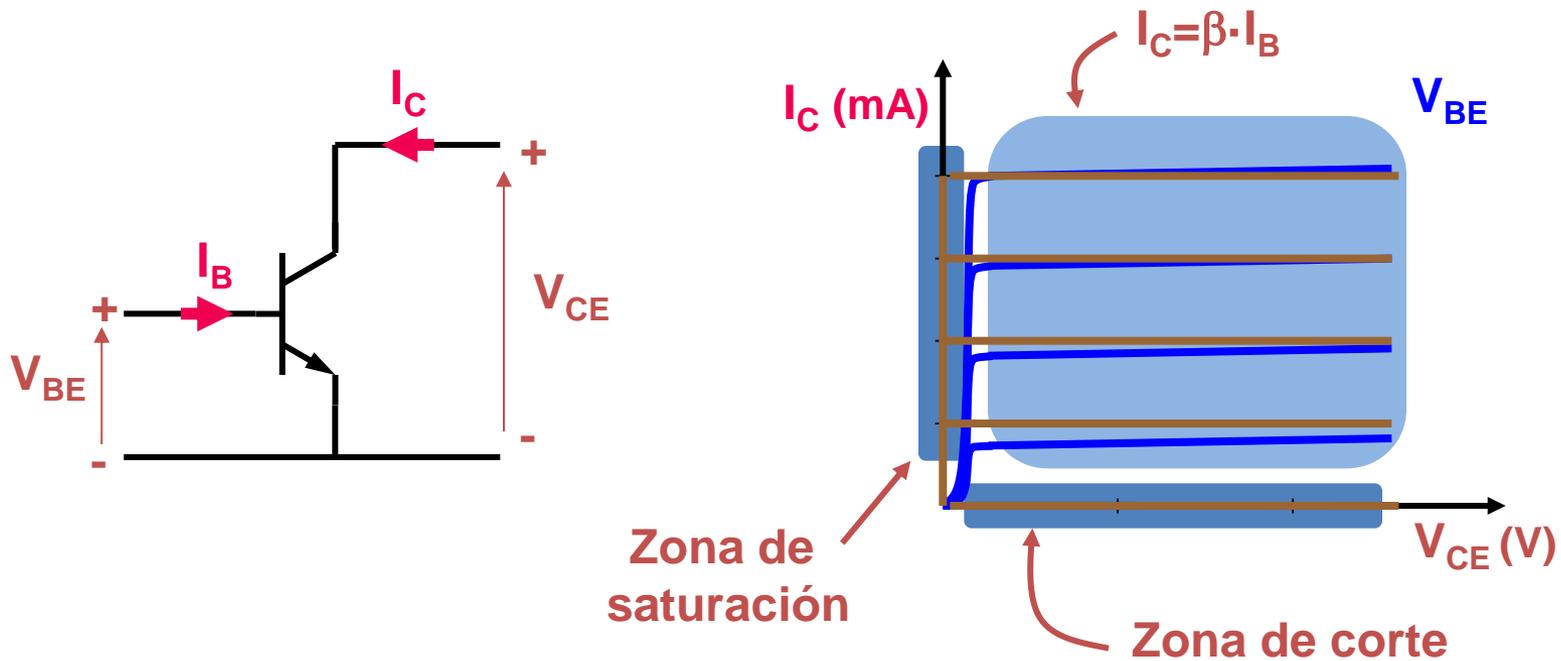
$I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$ Característica de entrada



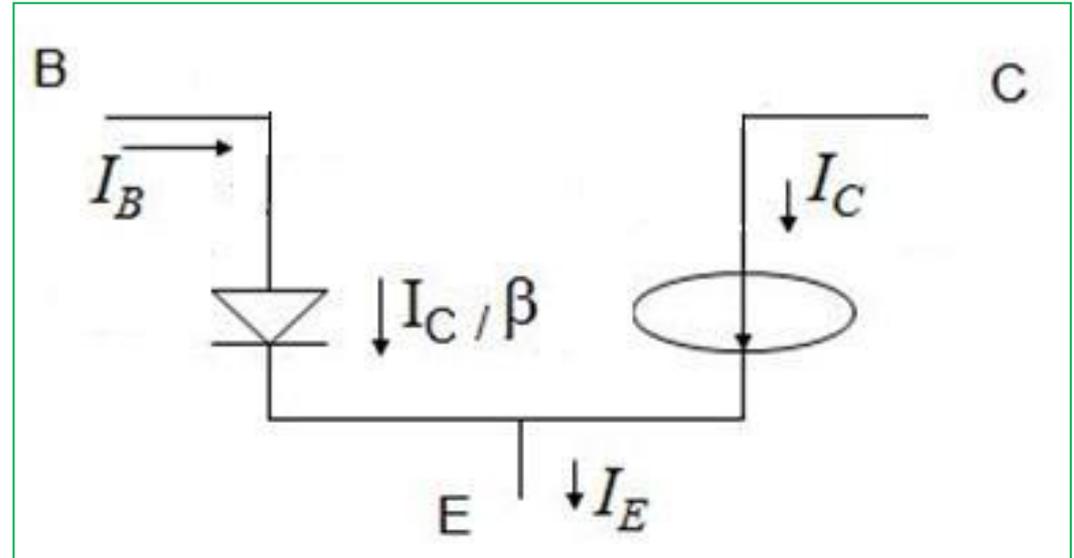
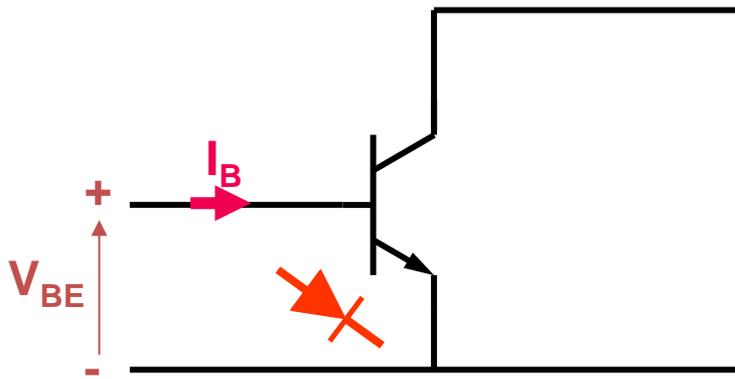
Entre base y emisor el transistor se comporta como un diodo.

Características V-I de Colector

Transistor NPN



Modelo para Zona Activa Directa

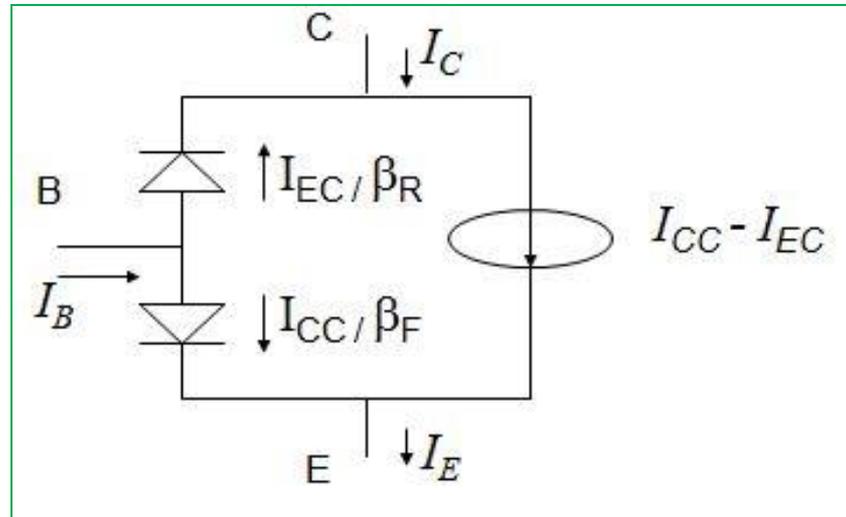
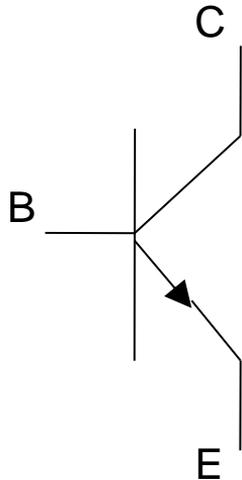


$$I_B = I_C / \beta$$

$$I_C = I_S \exp(V_{BE}/U_T)$$

Parámetros I_S y β

Modelo de Eber & Moll



$$I_{CC} = I_S [\exp (V_{BE}/U_T) - 1]$$

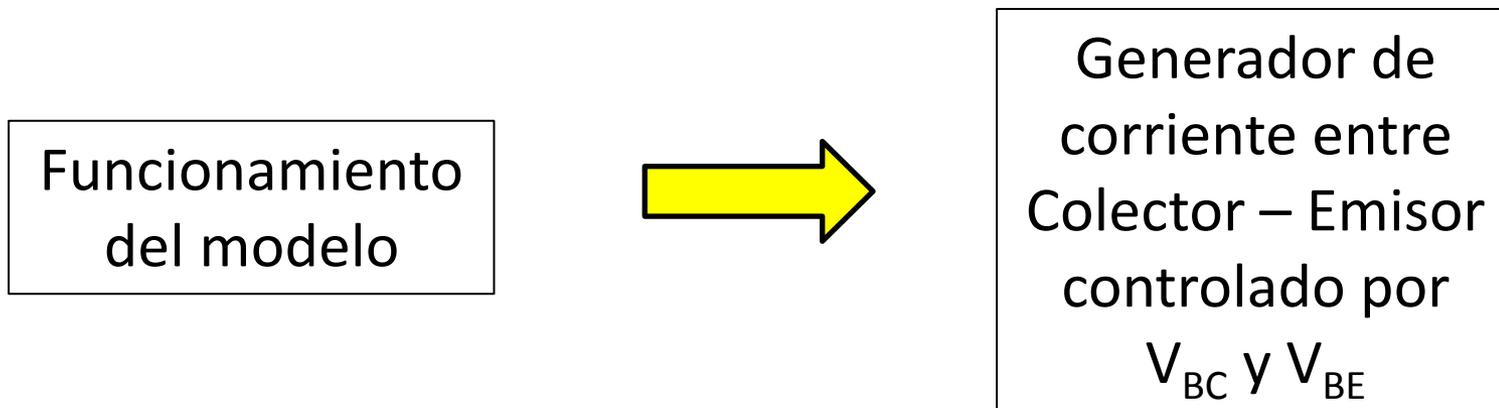
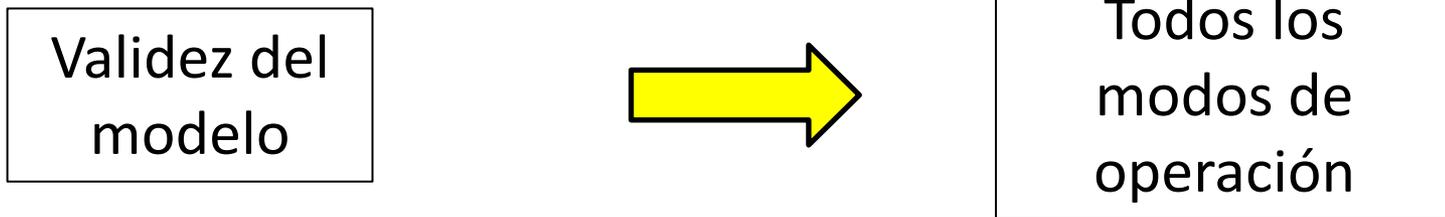
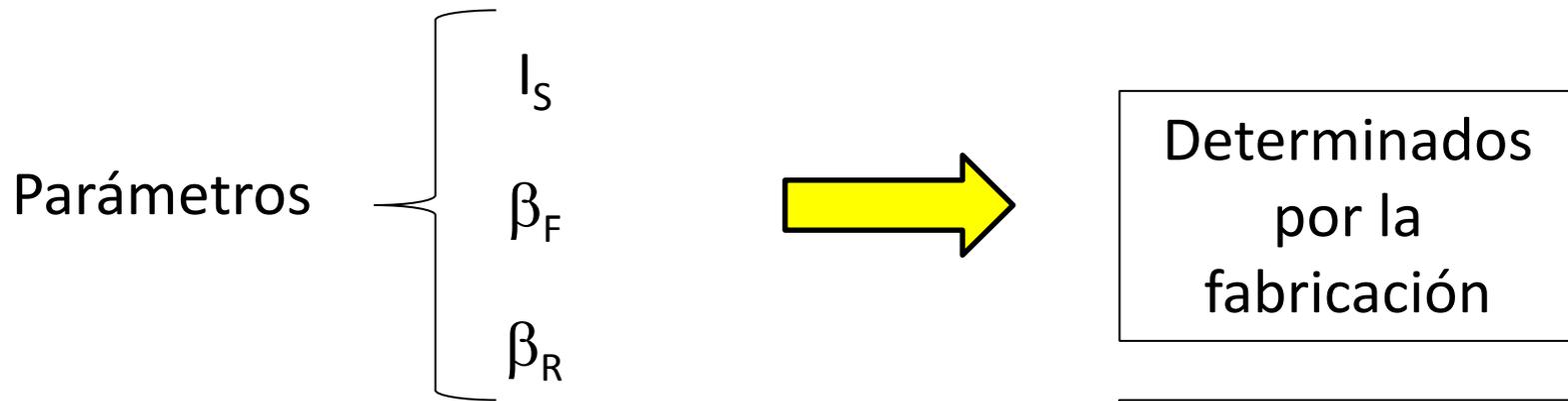
$$I_{EC} = I_S [\exp (V_{BC}/U_T) - 1]$$

$$I_B = I_{EC} / \beta_R + I_{CC} / \beta_F$$

Parametros

$$I_S - \beta_F - \beta_R$$

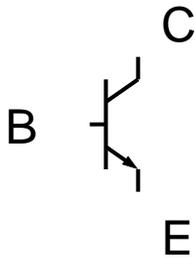
Características del Modelo de Eber & Moll



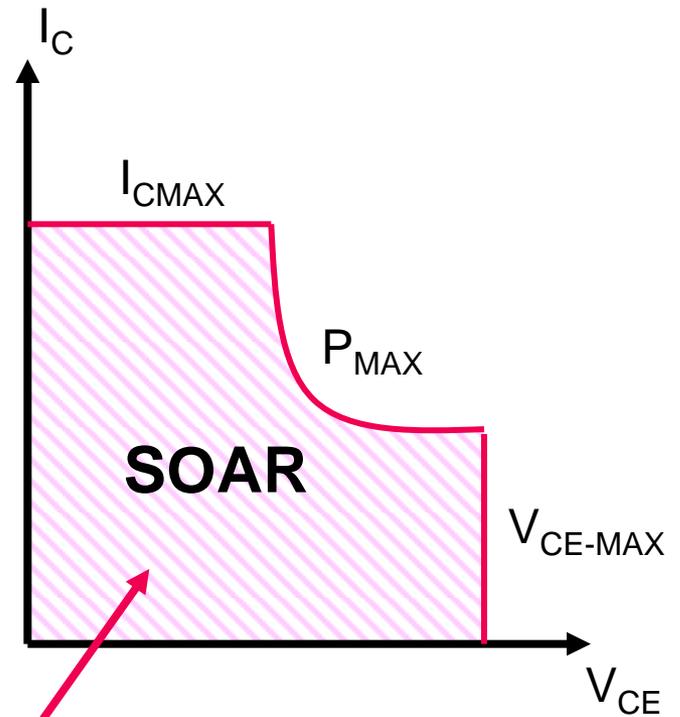
MODELO UTILIZADO POR LOS SIMULADORES

Limitaciones del Modelo

- No contempla Máximas Tensiones, Corrientes y Potencia
(Zona de Operación Segura SOAR)

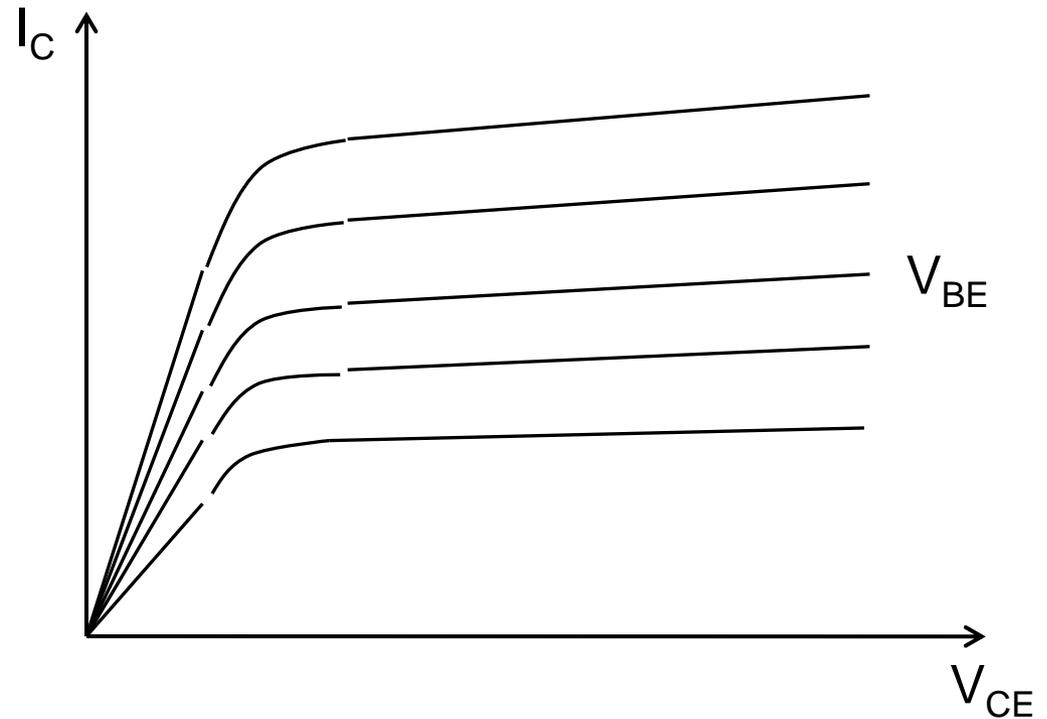
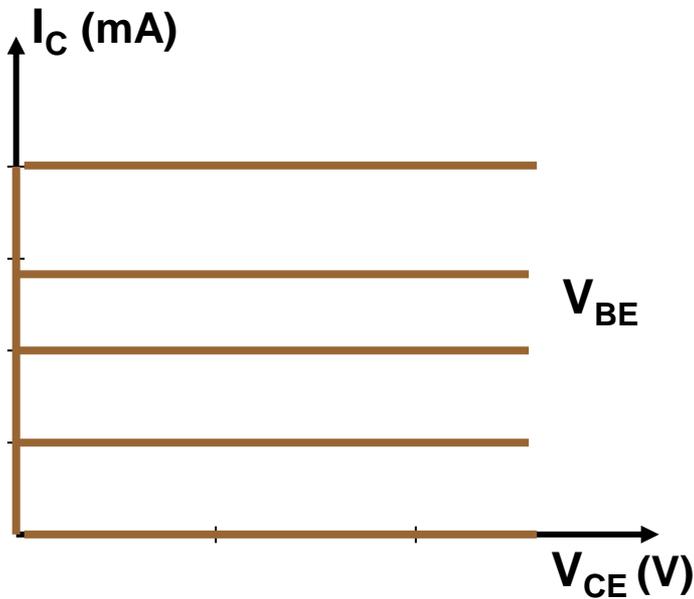


I_{C-MAX}	Corriente máxima de colector
V_{CE-MAX}	Tensión máxima CE
P_{MAX}	Potencia máxima

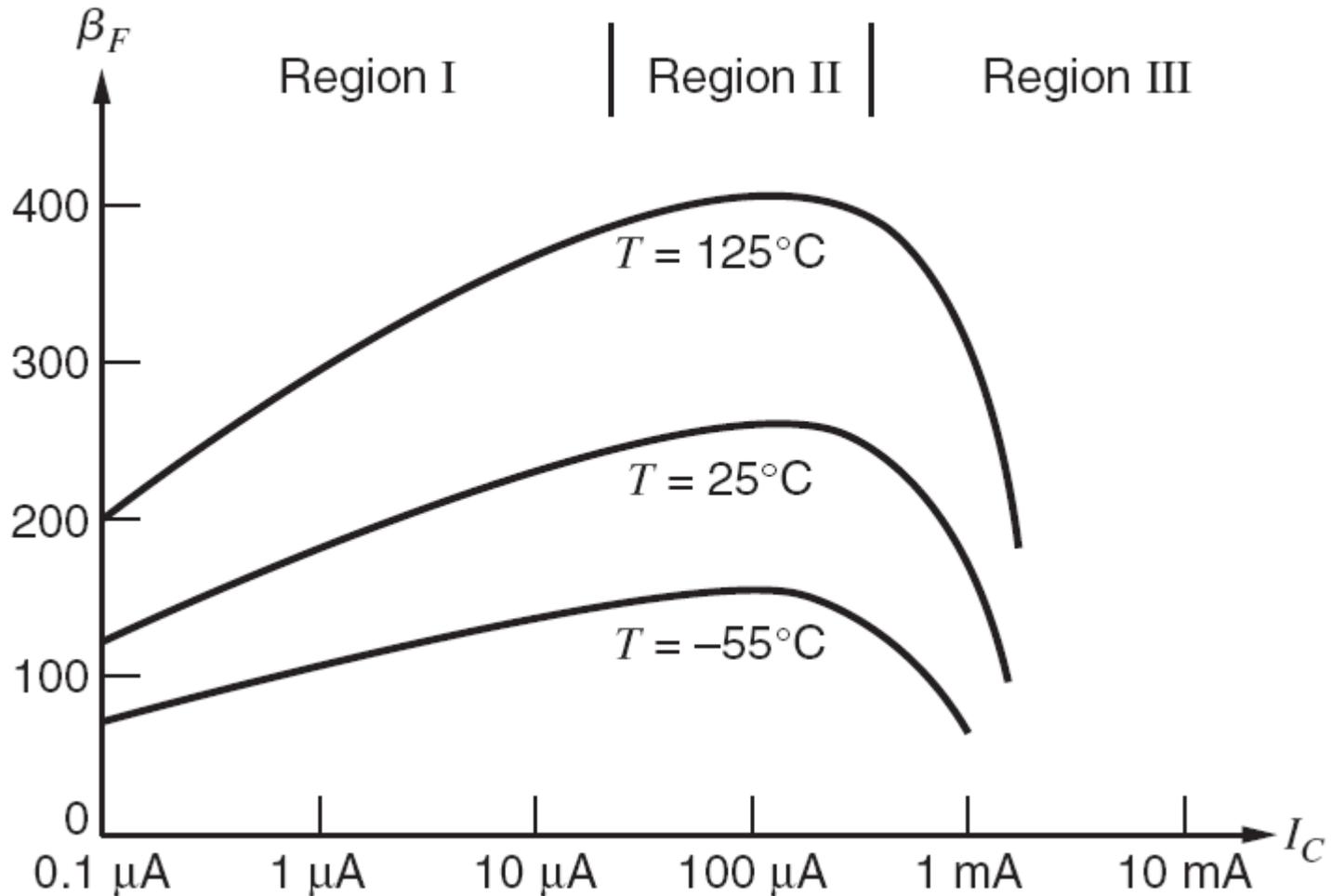


Área de operación segura
(Safety Operation Area)

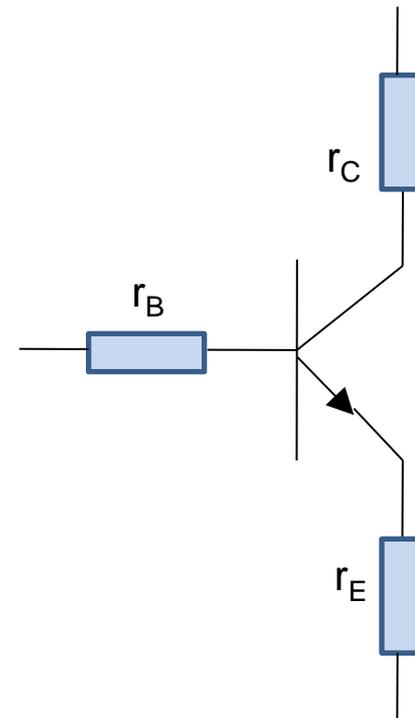
- No representa la variación de la corriente I_C con la tensión V_{CE}
(Modulación del ancho de la base)



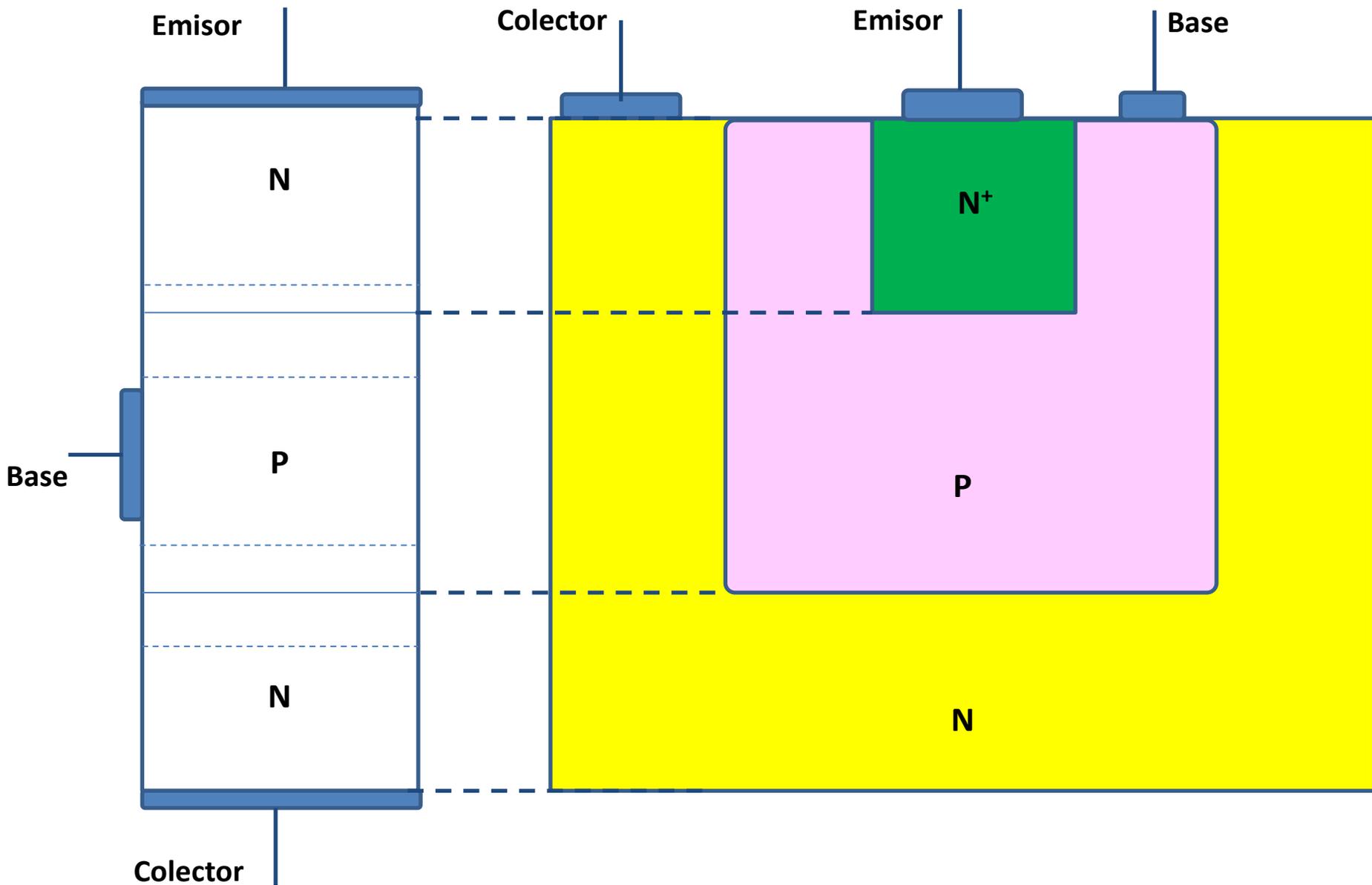
- No representa la dependencia del valor de β con la corriente I_C .
- No contempla la dependencia de β con la temperatura



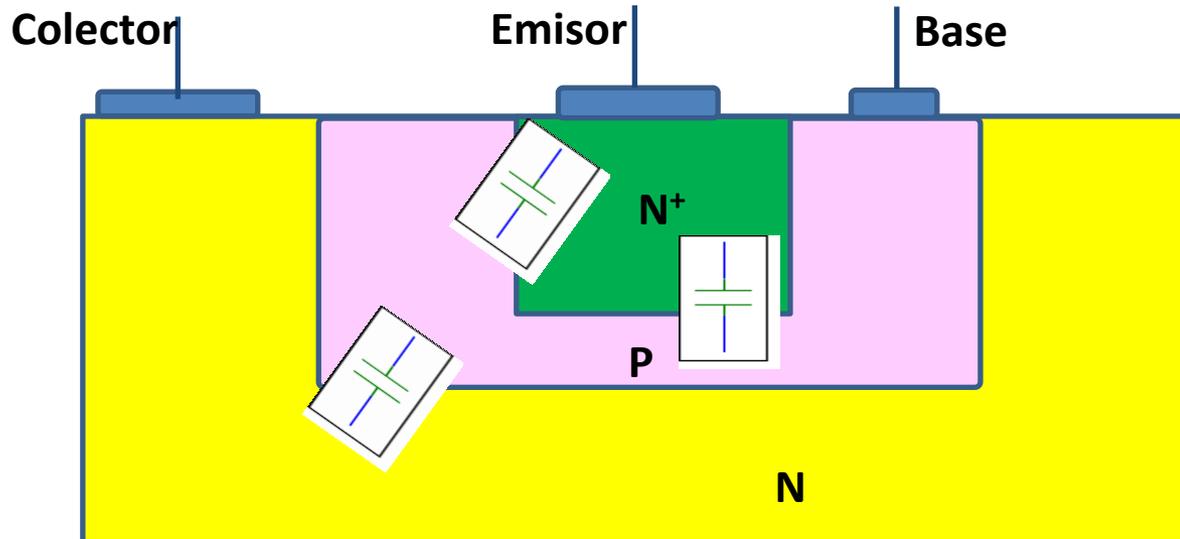
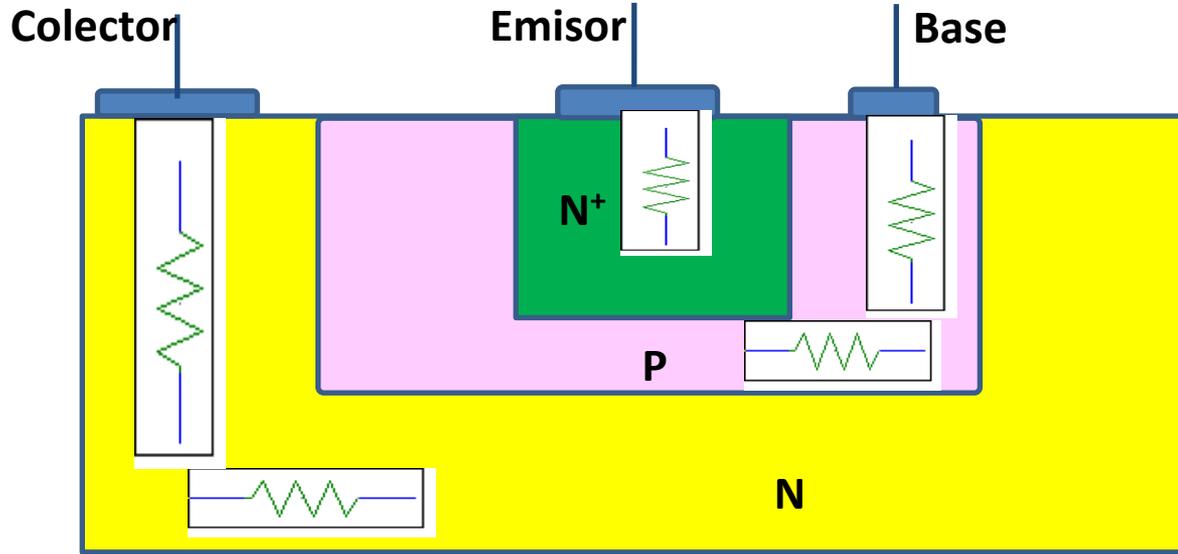
- No contempla los **Efectos Capacitivos** de las junturas que afecta al funcionamiento en altas frecuencias
 - Capacidades de juntura C_{JC} (Colector – Base) C_{jE} (Emisor – Base)
 - Capacidades de difusión C_{DC} (Colector – Base) C_{DE} (Emisor – Base)
- La tecnología de fabricación de los TBJ introduce **Resistencias Parásitas** en serie con los terminales
 - Base (r_B),
 - Colector (r_C)
 - Emisor (r_E).



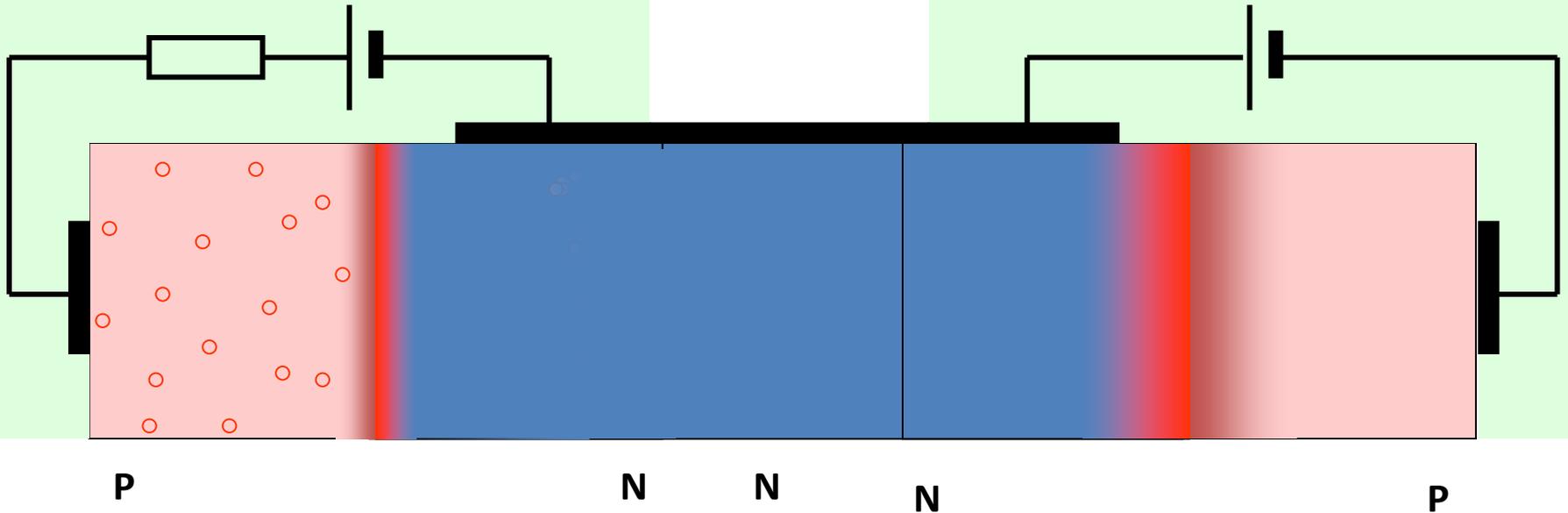
Corte Transversal de un TBJ NPN



Elementos parásitos

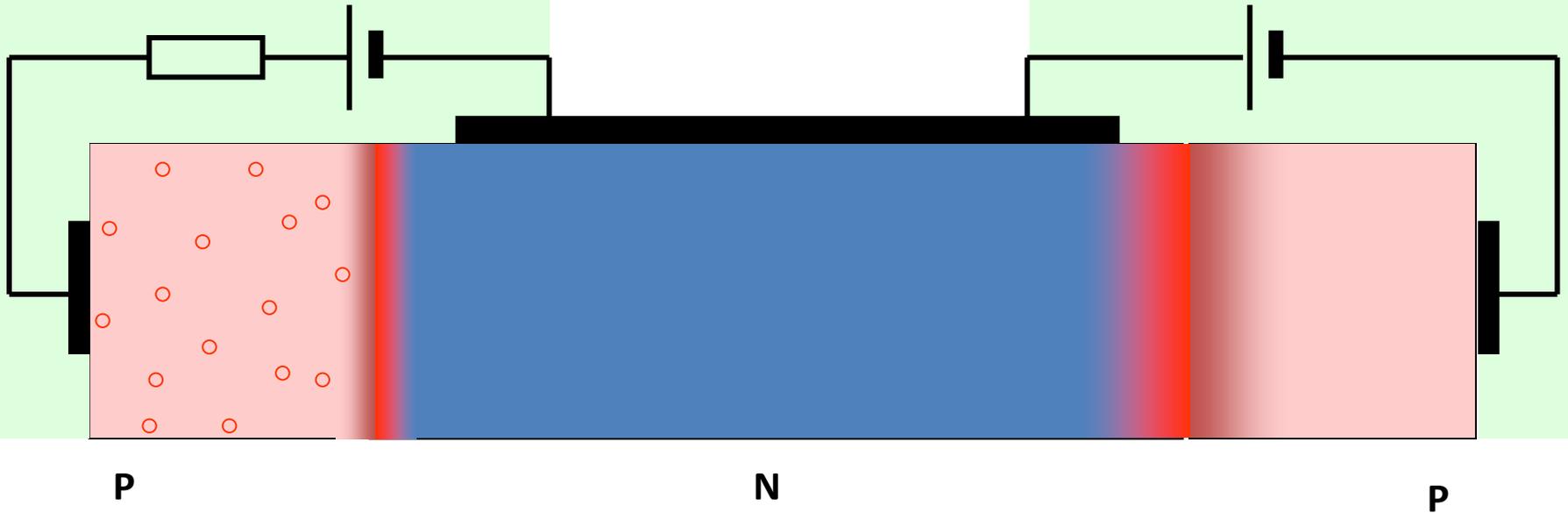


Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar

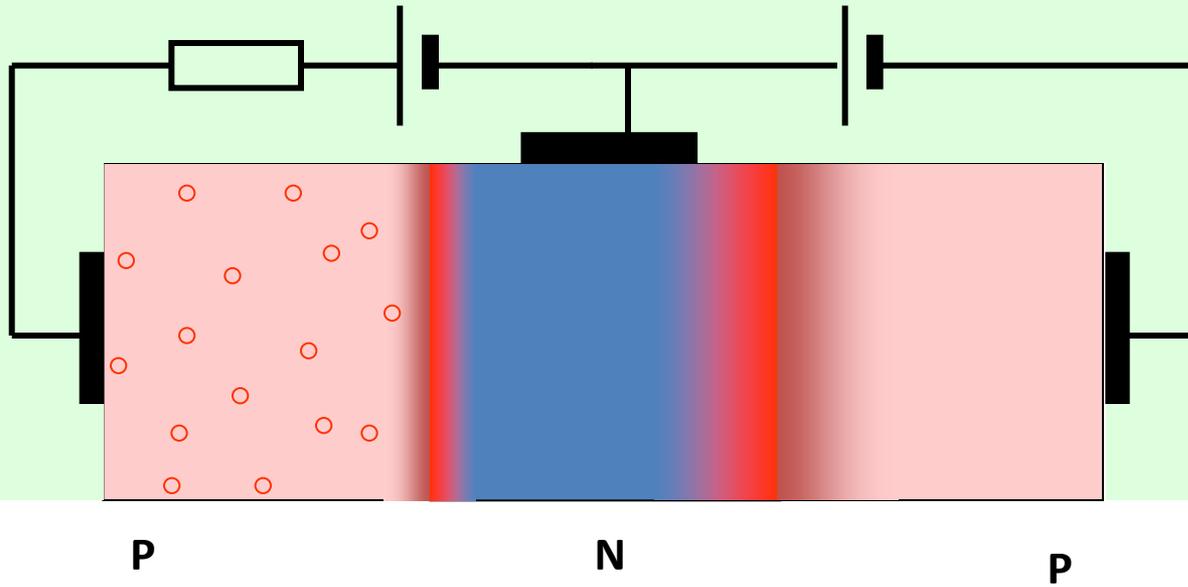


Si la zona central es muy ancha el comportamiento es el de dos diodos en serie: el funcionamiento de la primera unión no afecta al de la segunda

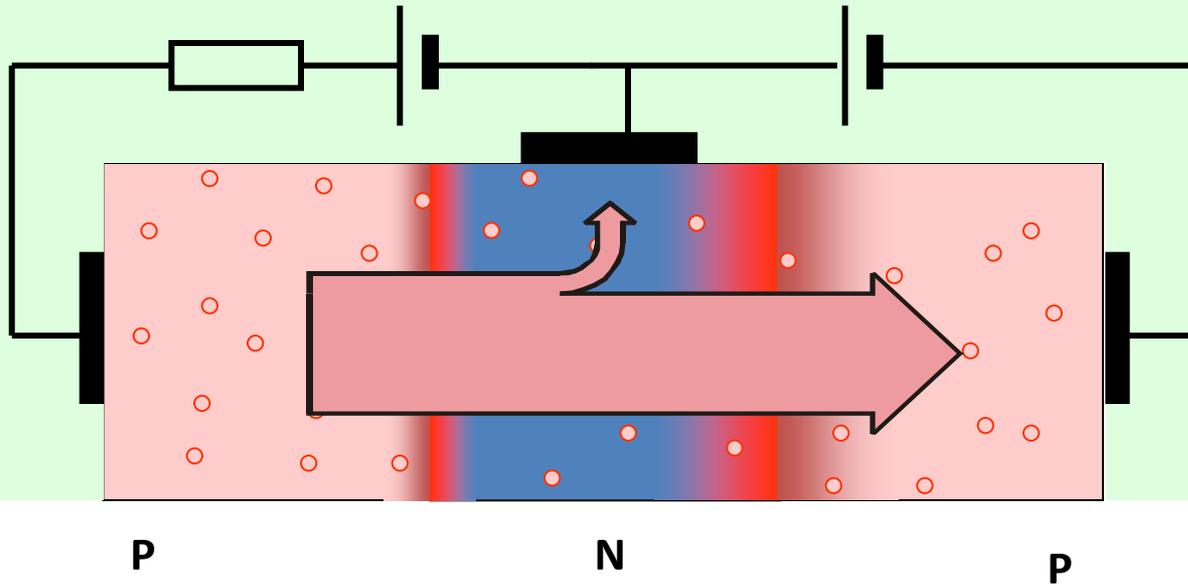
Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar



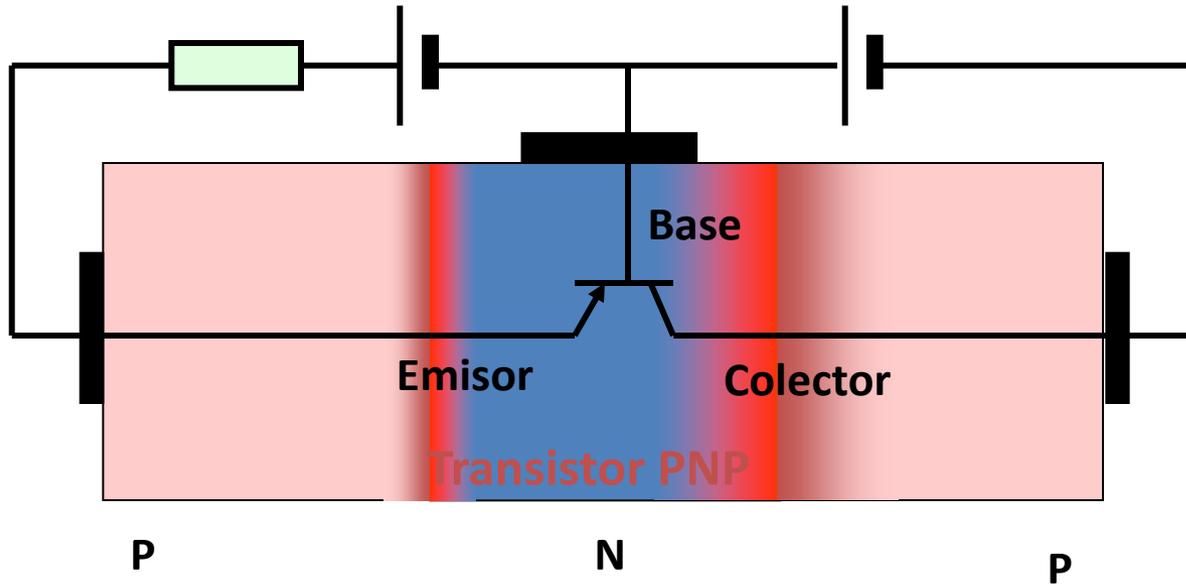
Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar



Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar



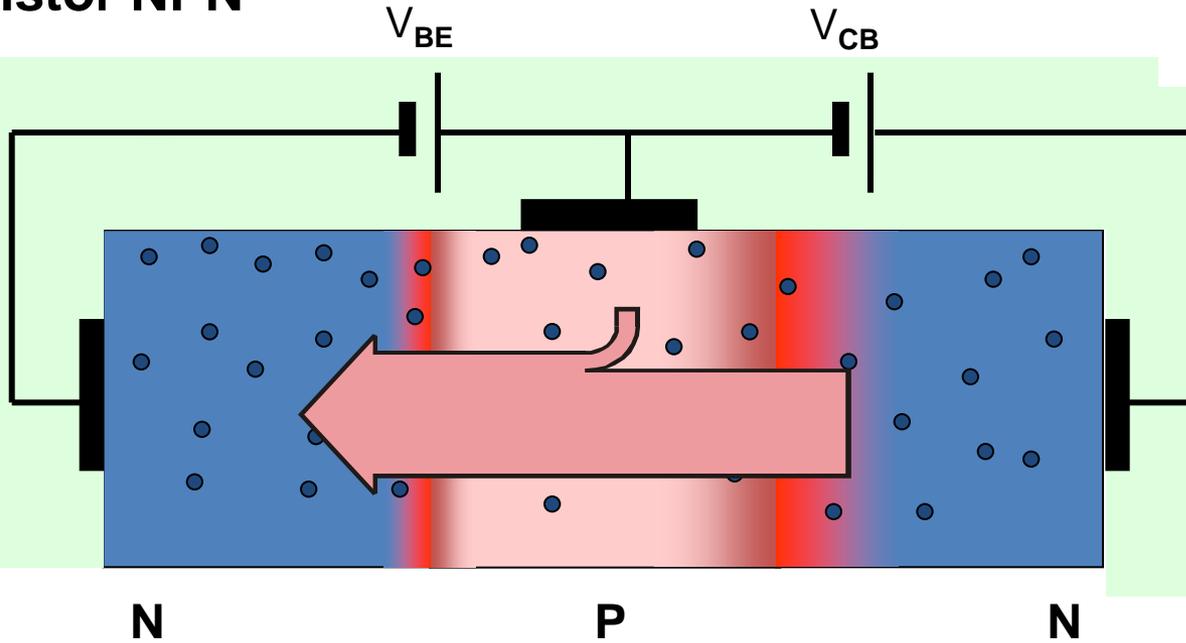
Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar



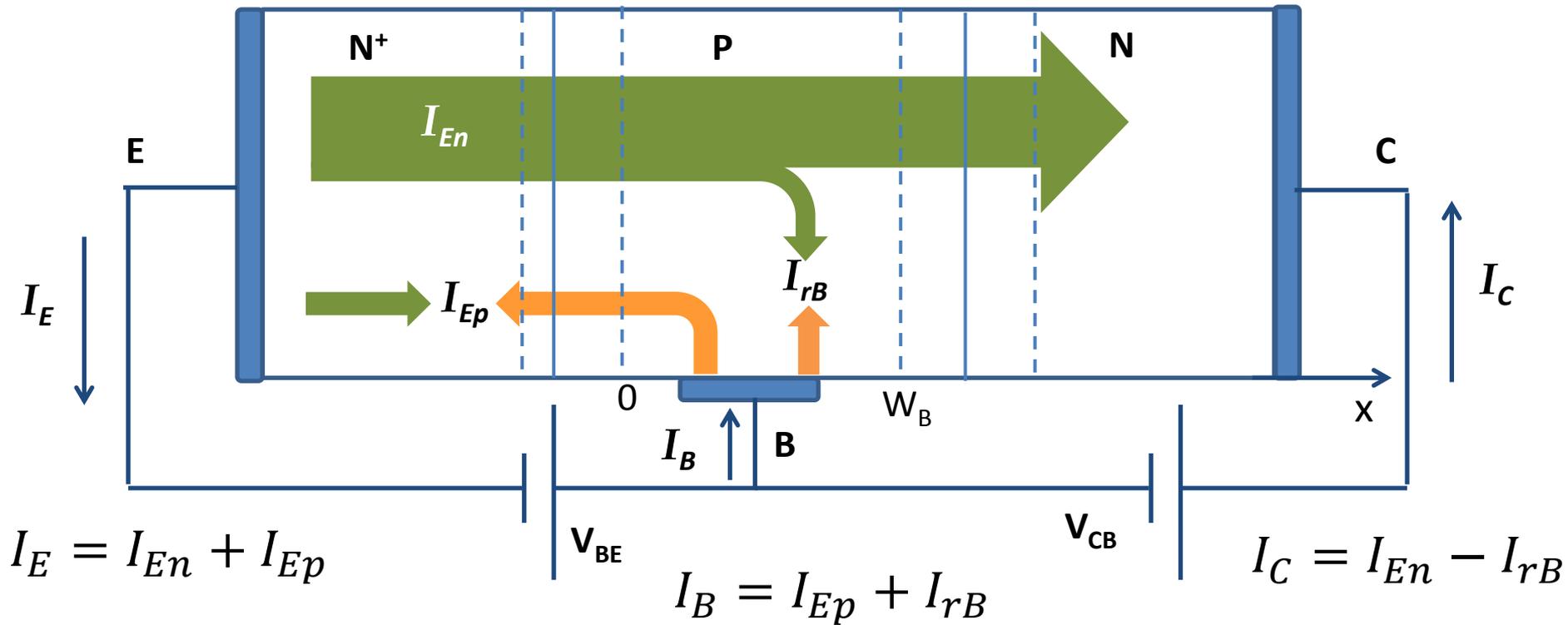
El terminal de base actúa como terminal de control manejando una fracción de la corriente mucho menor a la de emisor y el colector.

Principio de Funcionamiento del Transistor Bipolar

Transistor NPN



Desplazamiento de portadores en Zona Activa Directa



$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\beta = \frac{I_{En} - I_{rB}}{I_{Ep} + I_{rB}}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\alpha = \frac{I_{En} - I_{rB}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

$$\alpha = \left(\frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} \right) \left(\frac{I_{En} - I_{rB}}{I_{En}} \right)$$

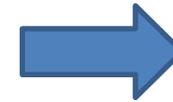
$\frac{\text{Corriente de electrones en la juntura } B - E}{\text{Corriente total en la juntura } B - E}$



$\gamma_E \rightarrow$ Eficiencia de inyección

$$\alpha = \left(\frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} \right) \left(\frac{I_{En} - I_{rB}}{I_{En}} \right)$$

$\frac{\text{Corriente de electrones que llega a la juntura } B - C}{\text{Corriente de electrones que pasa por la juntura } B - E}$



$\alpha_T \rightarrow$ Factor de transporte de base

$$\alpha = \gamma_E \alpha_T$$

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

β alto $\Rightarrow \alpha \approx 1$

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

$\alpha \approx 1$



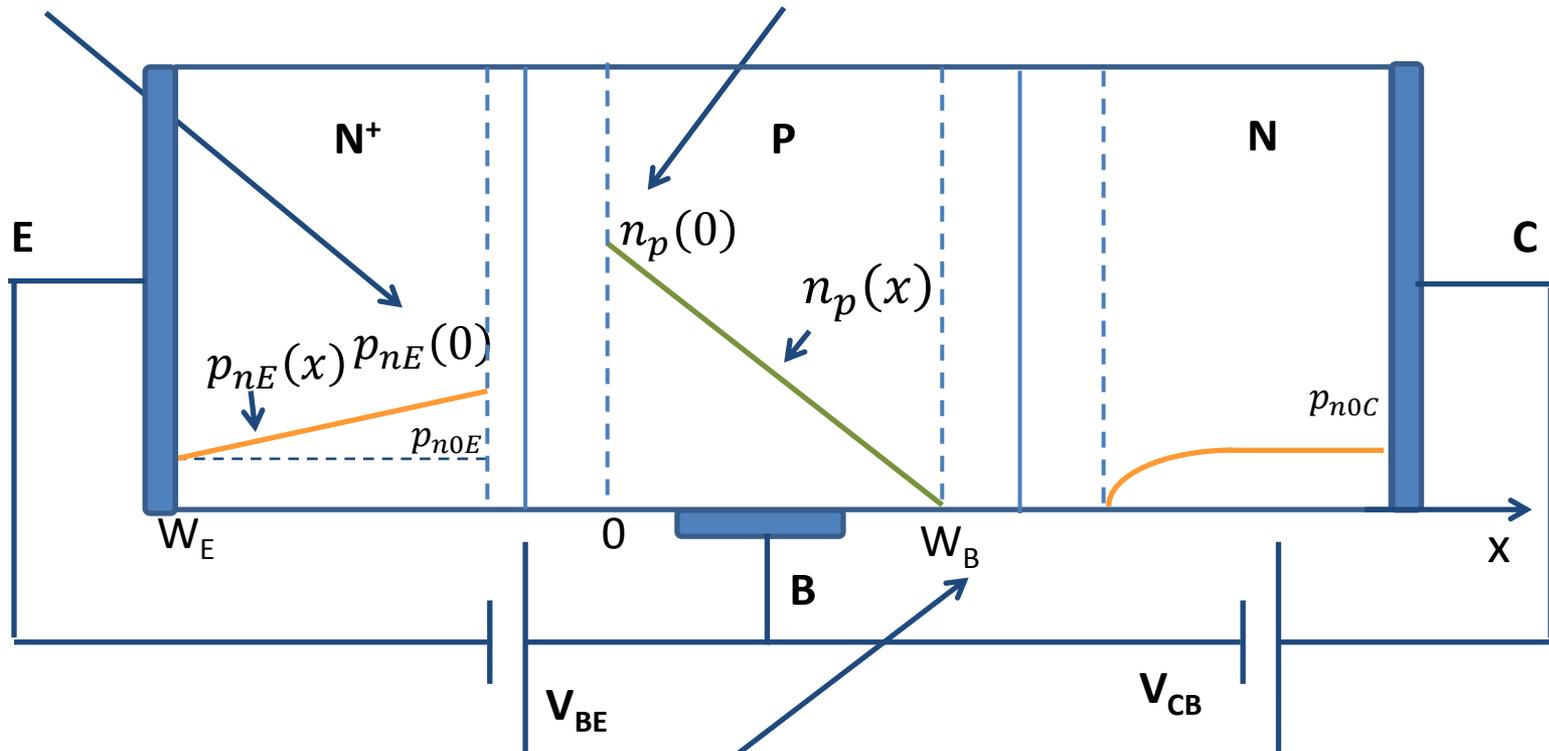
$\gamma_E \approx 1$

$\alpha_T \approx 1$

Concentraciones de portadores en Zona Activa Directa

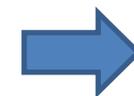
$$p_{nE}(0) = p_{n0E} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$$n_p(0) = n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$



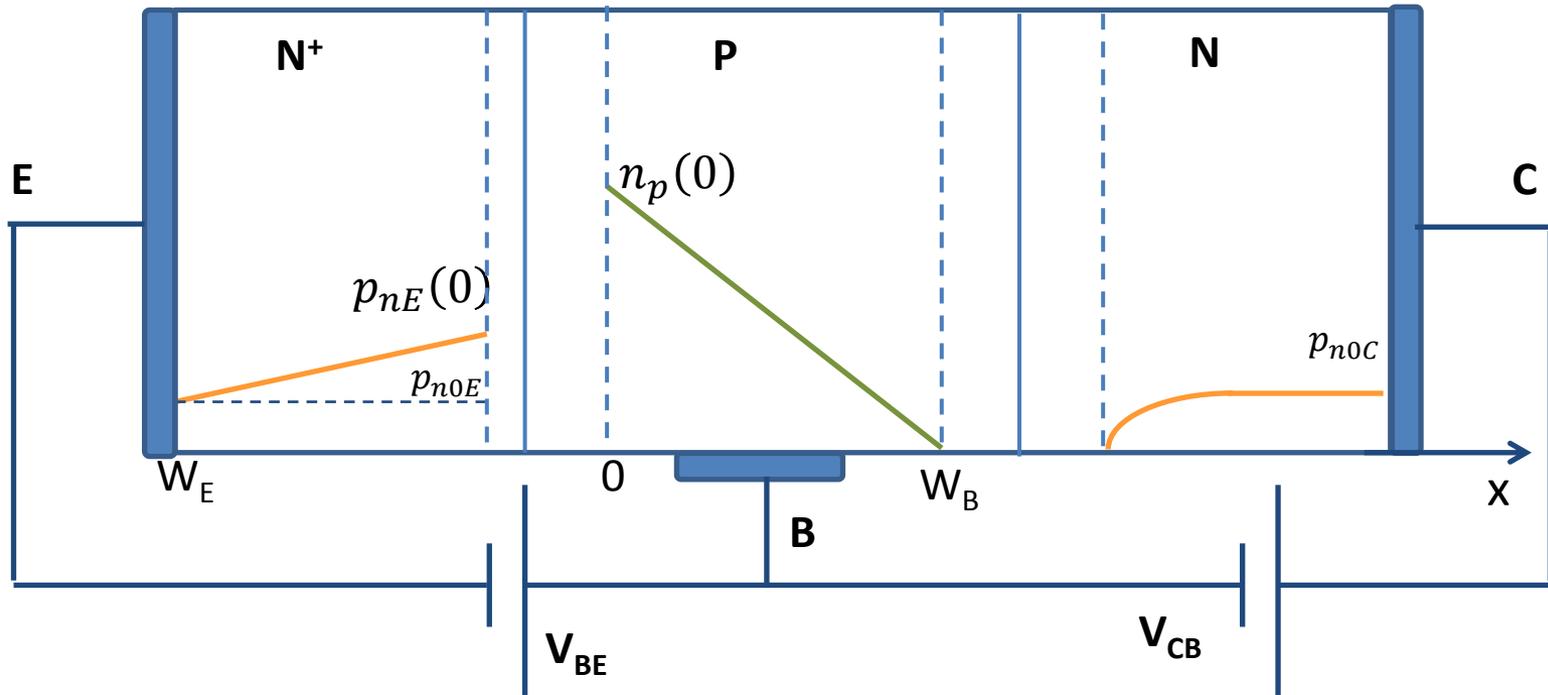
$$V_{BC} < 0$$

$$n_p(W_B) = n_{p0} e^{\frac{V_{BC}}{U_T}}$$



$$n_p(W_B) \approx 0$$

Corrientes en Zona Activa Directa



$$I_{En} = qA_E D_n \left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

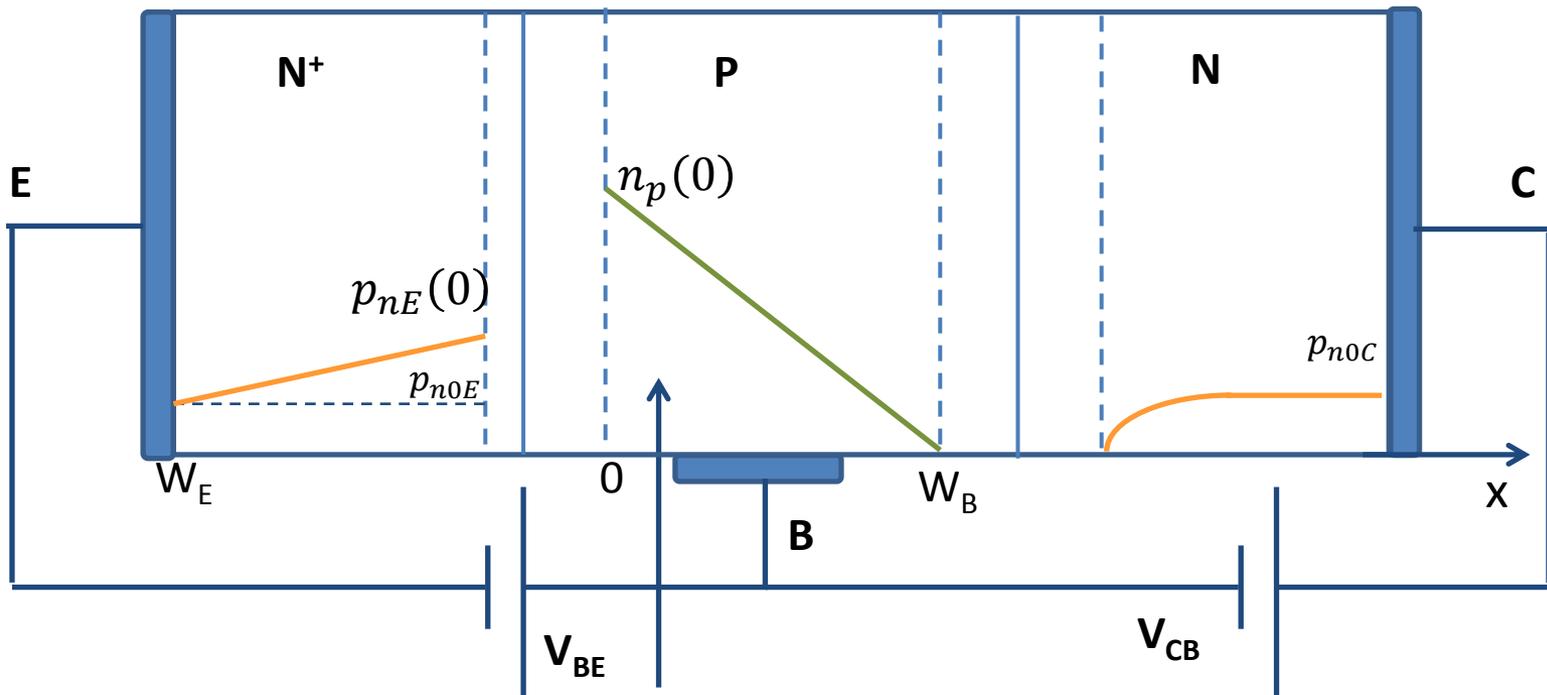
$$\left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{n_p(0)}{W_B}$$

$$I_{En} = -qA_E D_n \frac{n_p(0)}{W_B}$$

$$I_{Ep} = -qA_E D_p \left. \frac{dp_{nE}(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

$$\left. \frac{dp_{nE}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{p_{nE}(0)}{W_E}$$

$$I_{Ep} = -qA_E D_p \frac{p_{nE}(0)}{W_E}$$



$Q_B \rightarrow$ Carga almacenada en base

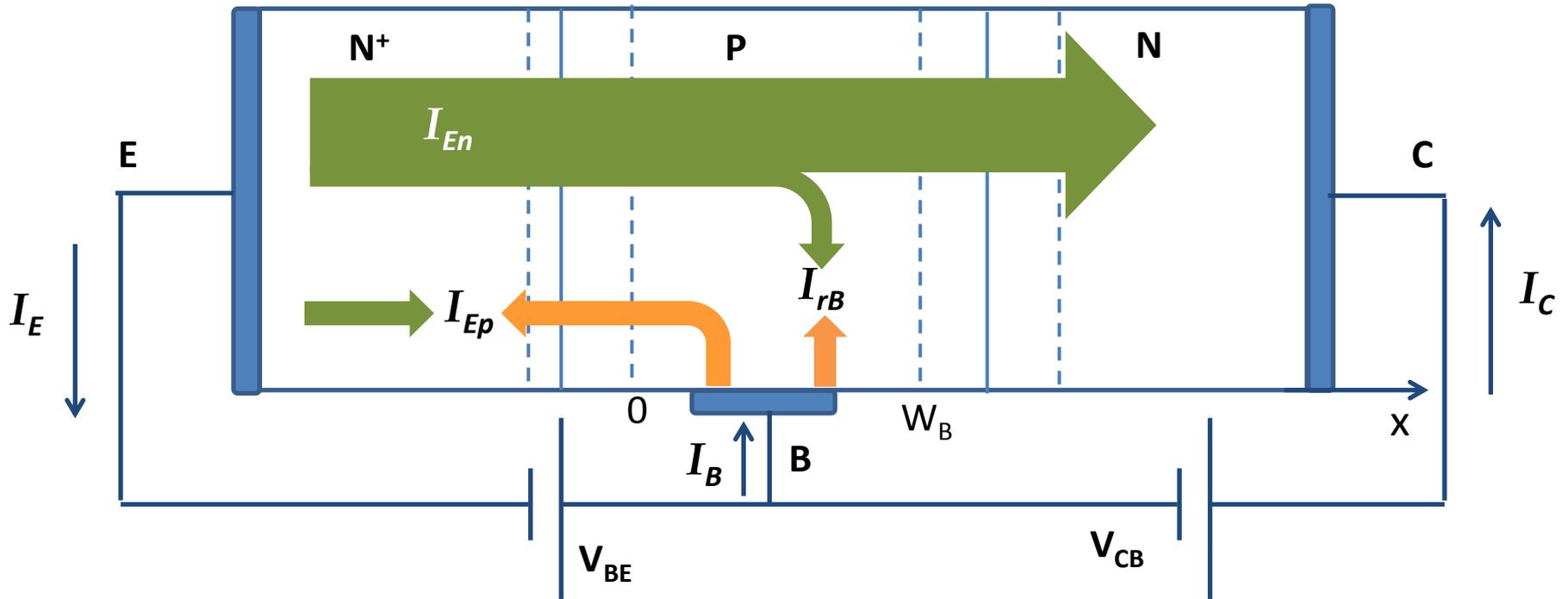
$$I_{rB} = \frac{Q_B}{\tau_n}$$

$\tau_n \rightarrow$ Tiempo de vida medio de electrones en base

$$Q_B = \frac{1}{2} q A_E W_B n_p(0)$$

$$I_{rB} = -\frac{1}{2} \frac{q A_E W_B}{\tau_n} n_p(0)$$

RELACION I_C vs V_{BE}



$$I_C = I_{En} - I_{rB}$$

$$\text{si } I_{rB} \ll I_{En}$$

$$I_C \approx -I_{En}$$

$$I_{En} = -qA_E D_n \frac{n_p(0)}{W_B}$$

$$n_p(0) = n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$$I_C = \frac{qA_E D_n n_{p0}}{W_B} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$$I_S = \frac{qA_E D_n n_{p0}}{W_B}$$

Ganancia de Corriente β

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \beta = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} - 1} \quad \alpha = \gamma_E \alpha_T$$

$$\alpha = \left(\frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} \right) \left(\frac{I_{En} - I_{rB}}{I_{En}} \right) \quad \alpha = \left(\frac{1}{\frac{I_{Ep}}{I_{En}} + 1} \right) \left(1 - \frac{I_{rB}}{I_{En}} \right)$$

$$\gamma_E = \left(\frac{1}{\frac{I_{Ep}}{I_{En}} + 1} \right) \quad \frac{I_{Ep}}{I_{En}} = \frac{D_p p_{n0E} W_B}{D_n n_{p0} W_E}$$

$$I_{Ep} = -q A_E D_p \frac{p_{nE}(0)}{W_E}$$

$$I_{En} = -q A_E D_n \frac{n_p(0)}{W_B}$$

$$\alpha_T = \left(1 - \frac{I_{rB}}{I_{En}} \right) \quad \frac{I_{rB}}{I_{En}} = \frac{W_B^2}{2 D_n \tau_n}$$

$$I_{rB} = \frac{1}{2} \frac{q A_E W_B}{\tau_n} n_p(0)$$

$$\alpha = \gamma_E \alpha_T$$

↓

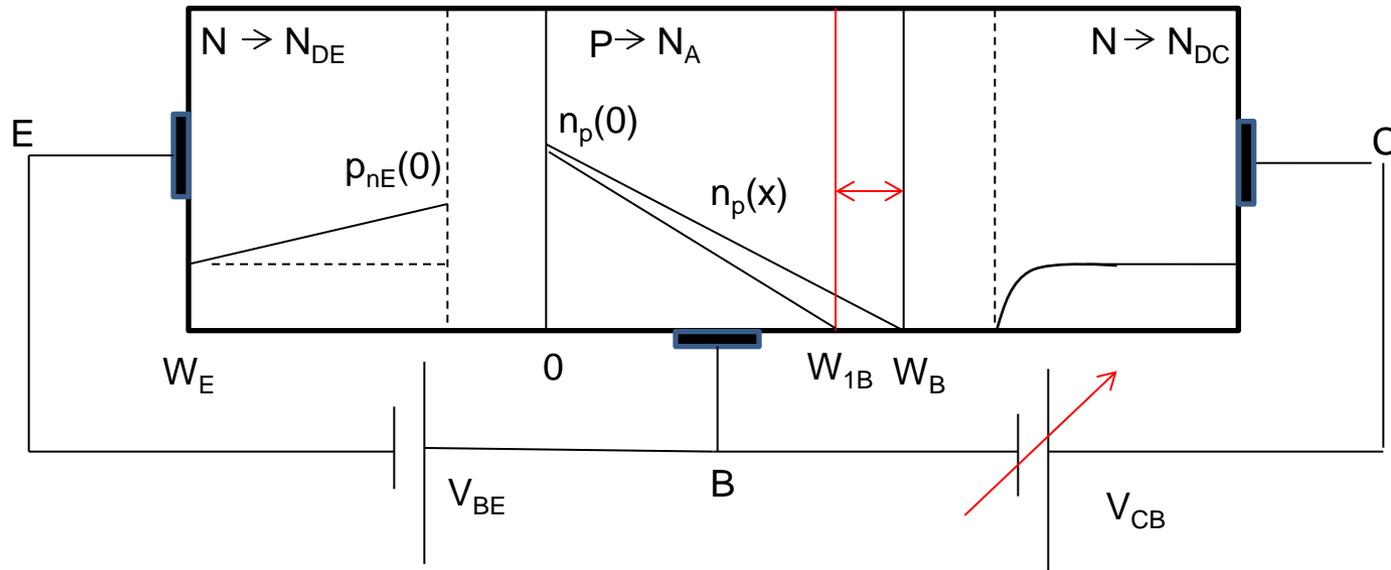
$$\text{Si } \alpha_T \approx 1 \quad \alpha \approx \gamma_E \quad \longrightarrow \quad \beta \approx \frac{1}{\frac{1}{\gamma_E} - 1} \quad \gamma_E = \left(\frac{1}{\frac{I_{Ep}}{I_{En}} + 1} \right)$$

$$\frac{1}{\gamma_E} = 1 + \frac{I_{Ep}}{I_{En}} \quad \frac{1}{\gamma_E} - 1 = \frac{I_{Ep}}{I_{En}} \quad \beta \approx \frac{I_{En}}{I_{Ep}}$$

$$\frac{I_{En}}{I_{Ep}} = \frac{D_n n_{p0} W_E}{D_p p_{n0E} W_B} \quad \beta \approx \frac{D_n W_E n_{p0}}{D_p W_B p_{n0E}} \quad \begin{array}{l} \nearrow n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} \\ \searrow p_{n0E} = \frac{n_i^2}{N_{DE}} \end{array}$$

$$\beta \approx \frac{D_n N_{DE} W_E}{D_p N_{AB} W_B}$$

Modulación del ancho de la base (Efecto EARLY)



$$\frac{dn_p(x)}{dx} = - \frac{n_p(0)}{W_B}$$

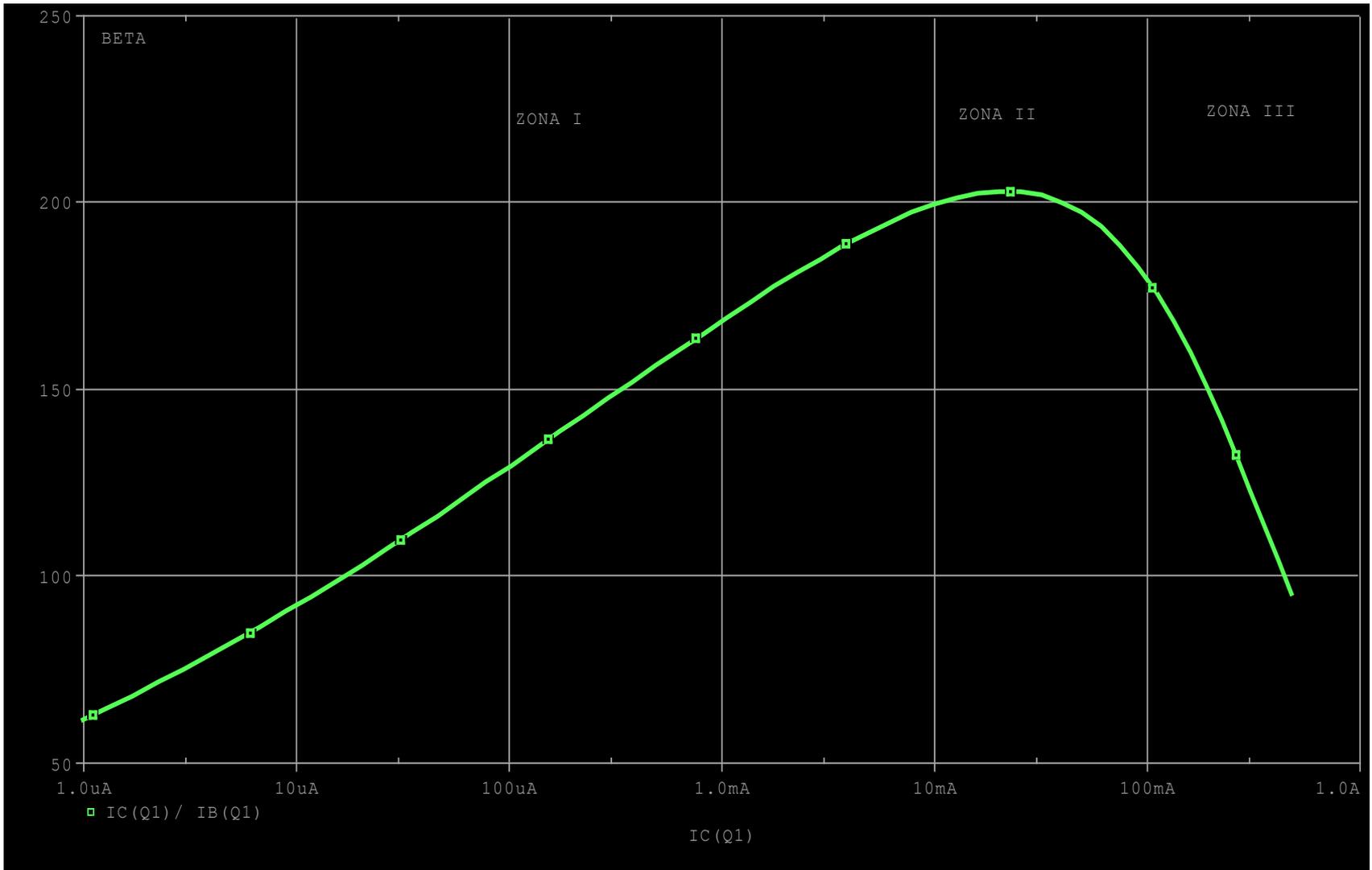
$$\frac{dn_{1p}(x)}{dx} = - \frac{n_p(0)}{W_{1B}}$$



$$I_{En} = q D_n A_E \left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{x=W_B}$$

$$I_C = (1 + V_{CE}/V_A) I_S \exp(V_{BE}/U_T)$$

β vs IC



$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \rightarrow \begin{cases} I_C \simeq I_{nE} \\ I_B = I_{pE} + I_{rB} \end{cases} \rightarrow \beta = \frac{I_{nE}}{I_{pE} + I_{rB}}$$

$I_{pE} \uparrow$ $I_{nE} \uparrow$

Zona I • La corriente I_{rB} es del orden de I_{pE} por lo que no puede despreciarse

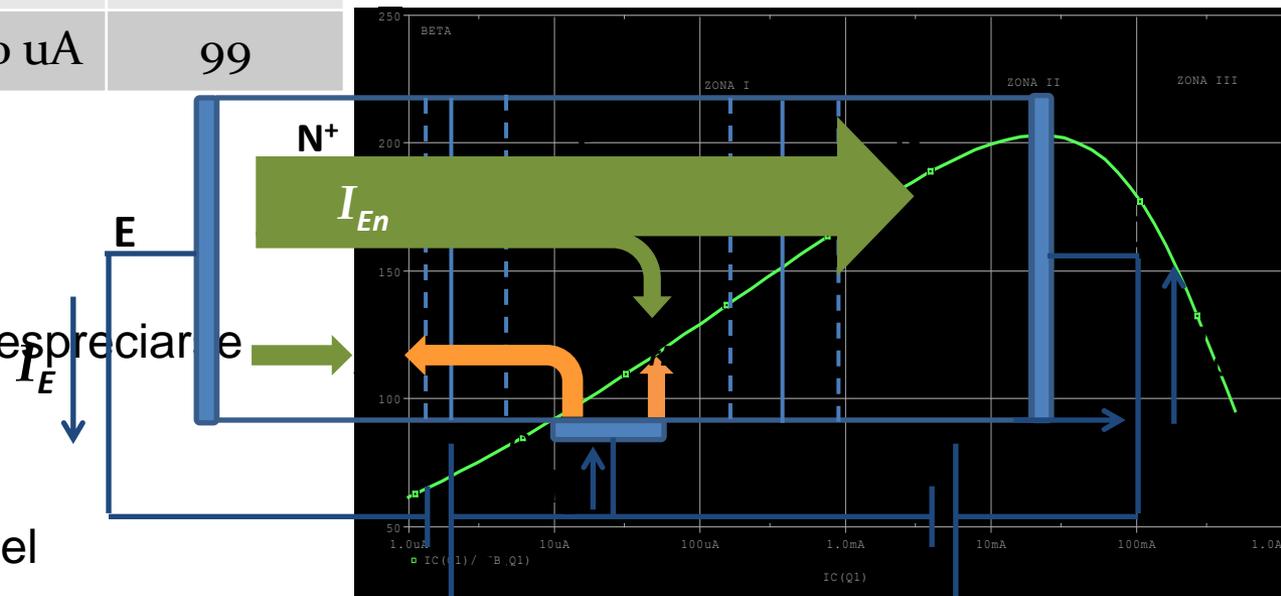
I_{rB}	I_{pE}	I_{nE}	β
1 μ A	1 μ A	100 μ A	50
1 μ A	10 μ A	1000 μ A	90
1 μ A	100 μ A	10000 μ A	99

Zona II

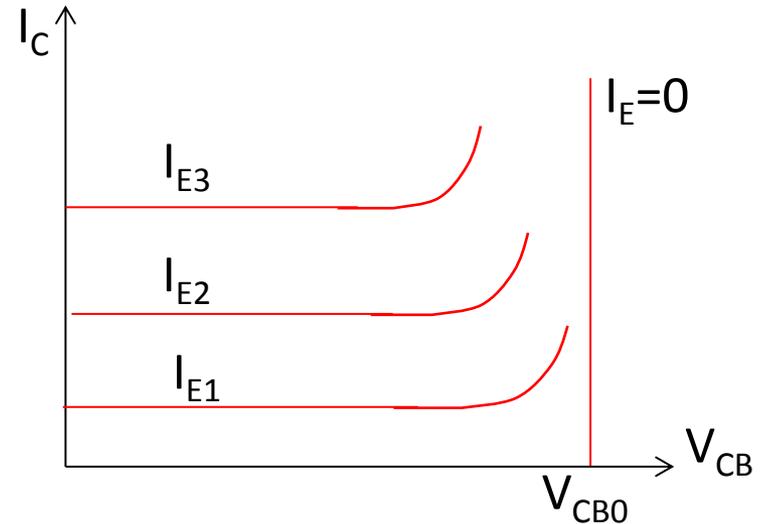
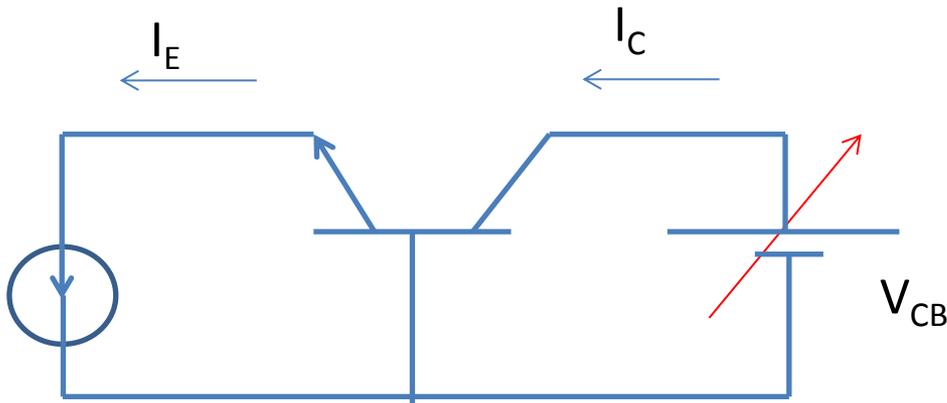
• La corriente I_{rB} puede despreciarse

Zona III

• Inyección de alto nivel



Tensión de ruptura V_{CB}



$$I_C = -\alpha * M * I_E$$

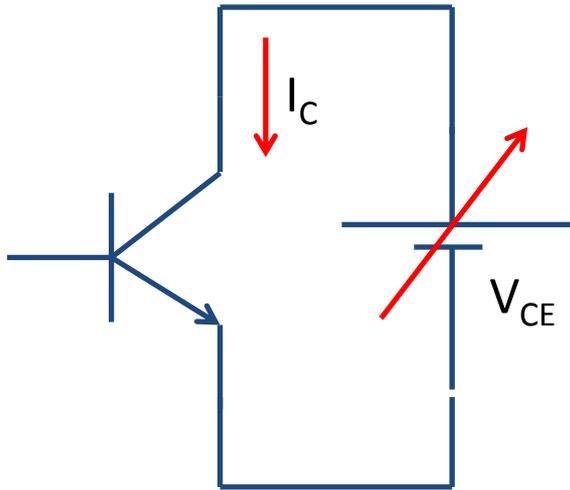
Cuando llega a la ruptura $\alpha M > 1$

M: Factor de Multiplicación

V_{CB0} : Parámetro del TBJ

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{V_{CB0}}\right)^n}$$

Tensión de ruptura V_{CE}



$$I_C = \beta I_B \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \frac{\alpha M}{1 - \alpha M} I_B$$

Cuando $\alpha M = 1$

$$I_C \rightarrow \infty$$

$$\alpha M = \frac{\alpha}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{V_{CB0}}\right)^n} = 1$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{V_{CB}}{V_{CB0}}\right)^n$$

$$\frac{V_{CB}}{V_{CB0}} = \sqrt[n]{1 - \alpha}$$

$$V_{CB} = V_{CB0} \sqrt[n]{1 - \alpha}$$

$$V_{CB} \approx V_{CE}$$

$$V_{CE} = V_{CB0} \sqrt[n]{1 - \alpha}$$

Multiplico y divido el segundo miembro por α

$$\alpha \approx 1$$

$$V_{CE} = V_{CB0} \sqrt[n]{\frac{1 - \alpha}{\alpha}}$$

$$V_{CE} = \frac{V_{CB0}}{\sqrt[n]{\beta}}$$

Cuanto más grande sea el valor de β menor es la ruptura V_{CEO}

Tensión de ruptura V_{CE}

