

Tema 5: Transistor Bipolar de Unión (BJT)

Contenidos

5.1 Introducción

5.2 Funcionamiento del transistor en Zona Activa Directa

5.3 Modelo de Corrientes del Transistor.
Modelo de Ebers-Moll

5.4 Modos o Zonas de Operación

5.5 Modelos Spice

5.6 Ejemplos de puntos de operación

5.1 Introducción

- **BJT** (Bipolar Junction Transistor)

- Los transistores de unión bipolares, son dispositivos de estado sólido de tres terminales usados en circuitos de conmutación y procesamiento de señal. Existen 2 tipos de transistores bipolares: transistores **NPN** y transistores **PNP**

- El transistor se ha convertido en el dispositivo más empleado en electrónica, a la vez que se han ido incrementando sus capacidades de manejar potencias y frecuencias elevadas, con gran fiabilidad. (No existe desgaste por partes móviles).

- Su reducido tamaño ha permitido integrar millones de ellos en un solo C.I.

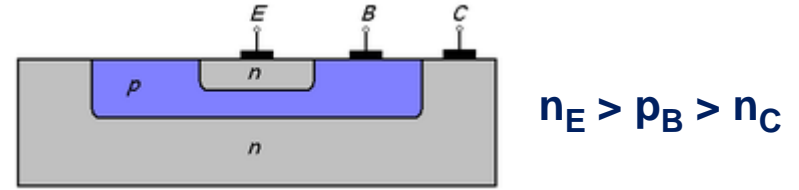
- Los transistores son dispositivos activos con características altamente no lineales.

- **Efecto Transistor:** el transistor es un dispositivo cuya resistencia interna puede variar en función de la señal de entrada. Esta variación de resistencia provoca que sea capaz de regular la corriente que circula por el circuito al que está conectado:

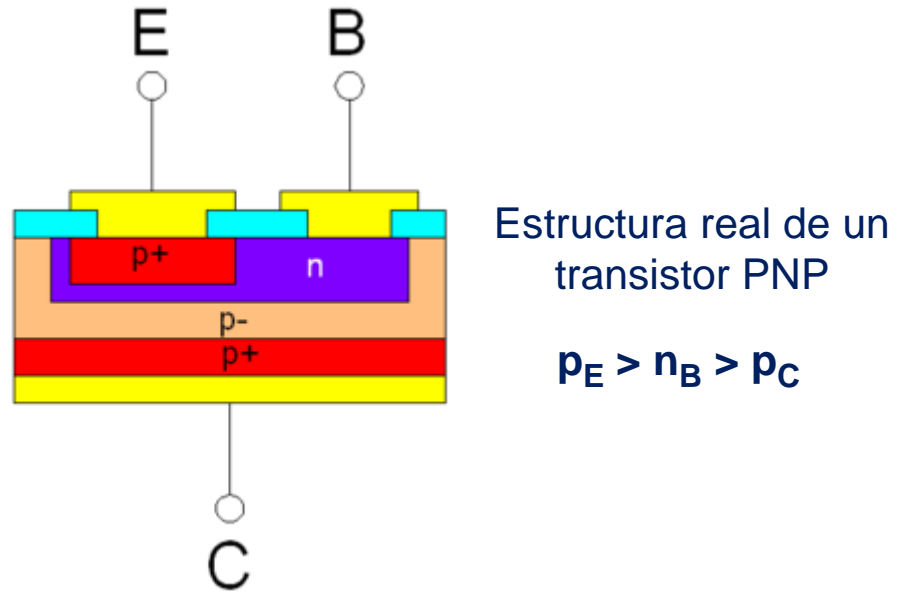
Transfer Resistor.



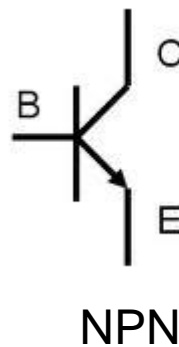
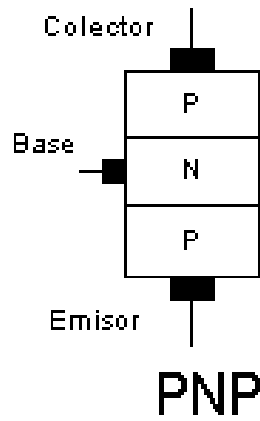
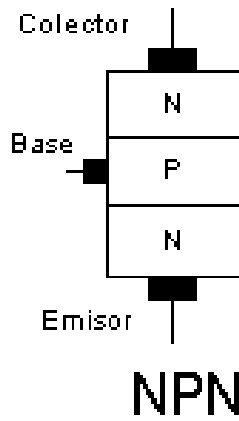
Replica del primer transistor de válvula



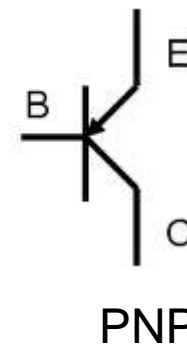
Estructura simplificada de un transistor NPN



Estructura real de un transistor PNP



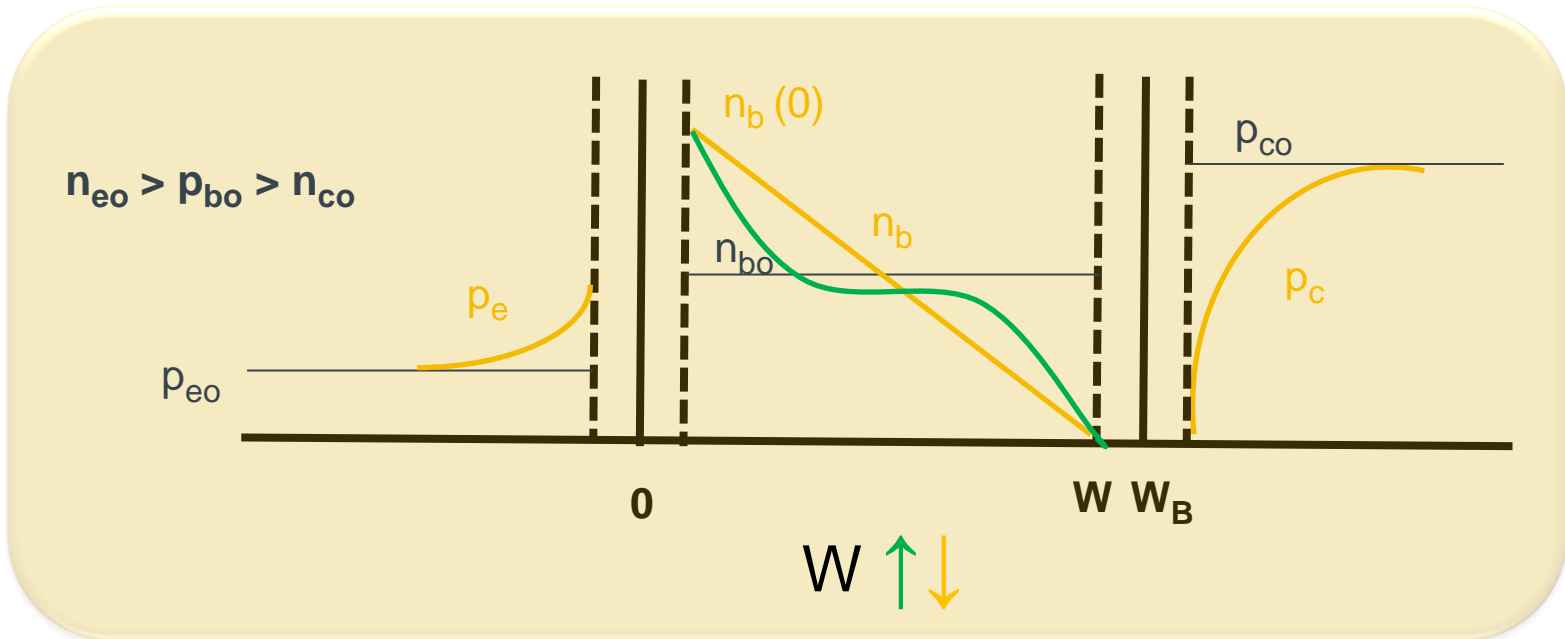
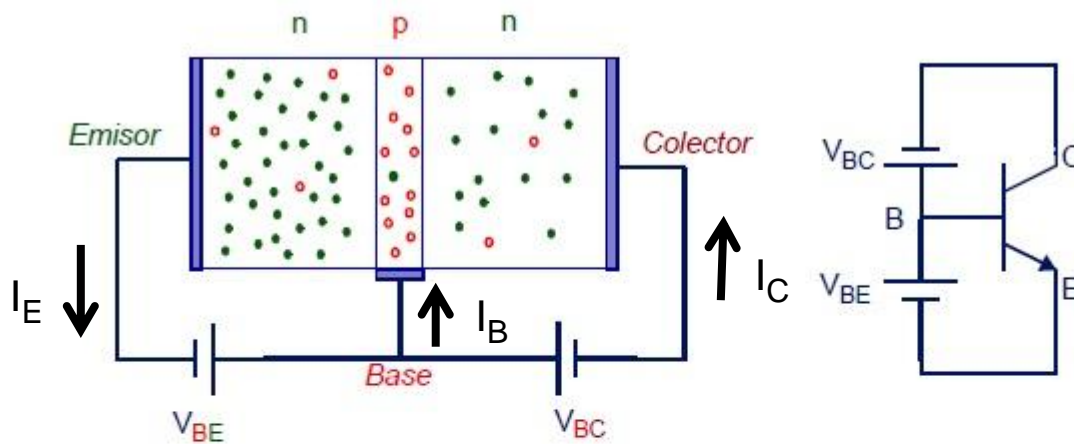
NPN



PNP

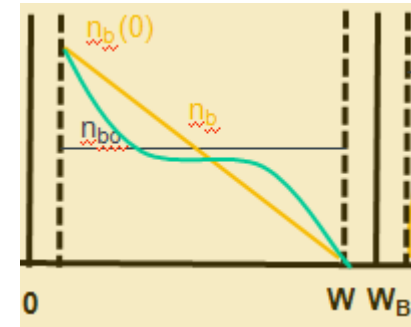
Símbolos del Transistor Bipolar de Unión

5.2 Funcionamiento del transistor en Zona Activa Directa



Suponemos:

- $W \sim W_B$; $W \downarrow$
- Baja inyección en la base, $n_b(0) \ll p_{b0}$
- No hay caída de potencial en las zonas neutras



Ley de la Unión



$$n_b(0) = n_{b0} e^{V_{BE}/V_{TE}}$$

$$n_b(W) = n_{b0} e^{V_{BC}/V_{TE}} \Rightarrow n_b(W) \approx 0$$

$$n'_b(x) = n_b(x) - n_{b0}$$

$$n'_b(0) = n_{b0} \left(e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1 \right)$$

$$n'_b(0) \gg n'_b(W)$$



$$n'_b(W) = n_{b0} \left(e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1 \right) \approx -n_{b0}$$

$$\frac{dn'}{dx} = \frac{n'_b(0) - n'_b(W)}{W} \approx \frac{n'_b(0)}{W}$$

Intensidad de Colector en Modo Activo Directo

$$I_C = qAD_b \left. \frac{dn'_b}{dx} \right|_{x=0}$$

$$I_C = \frac{qAD_b n_{b0}}{W} \left(e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1 \right)$$

Si $W \downarrow \rightarrow$ Poca recombinación-generación $\rightarrow I_C \sim I_E$

$$I_B = I_E - I_C \sim 0$$

Exceso de Carga en la Base

△ $Q_F \equiv$ Exceso de Carga en la Base

$$Q_F = qA \int_0^W n'_b(x) dx = \frac{qAWn'_b(0)}{2}$$

$$I_C = \frac{qAD_b n_{b0}}{W} \left(e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1 \right)$$

$$Q_F = \frac{W^2}{2D_b} I_C$$

△ $\tau_F \equiv$ Tiempo de transito en sentido directo

$$\tau_F \equiv \frac{W^2}{2D_b}$$

$$I_C = \frac{Q_F}{\tau_F}$$

Modelo de Control de Carga

I_C se encarga de mantener el exceso de portadores

Corriente de Base

En general interesa que I_B sea lo más **PEQUEÑO** posible, sin embargo en la realidad **NO** es **0**

I_B está compuesto por 3 componentes: $I_B = I_{BB} + I_{BE} + I_{BC}$

I_{BB}

Algunos minoritarios (e-) en su tránsito por la base se recombinan, para reemplazar estos huecos hay que suministrar una corriente externa, I_{BB}

$$I_{BB} = \frac{Q'_B}{\tau_B} = qA \int_0^W \frac{n'_b(x)}{\tau_b} dx \quad I_{BB} \downarrow \Rightarrow \begin{cases} W \downarrow \\ \tau_b \uparrow \end{cases}$$

I_{BE}

Corriente de difusión de los huecos desde la base al emisor

$$I_{BE} = \frac{qAD_e p_{e0}}{L_e} \left(e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1 \right) \quad I_{BE} \downarrow \Rightarrow p_{e0} \downarrow = \frac{n_i^2}{N_{DE}} \Rightarrow N_{DE} \uparrow$$

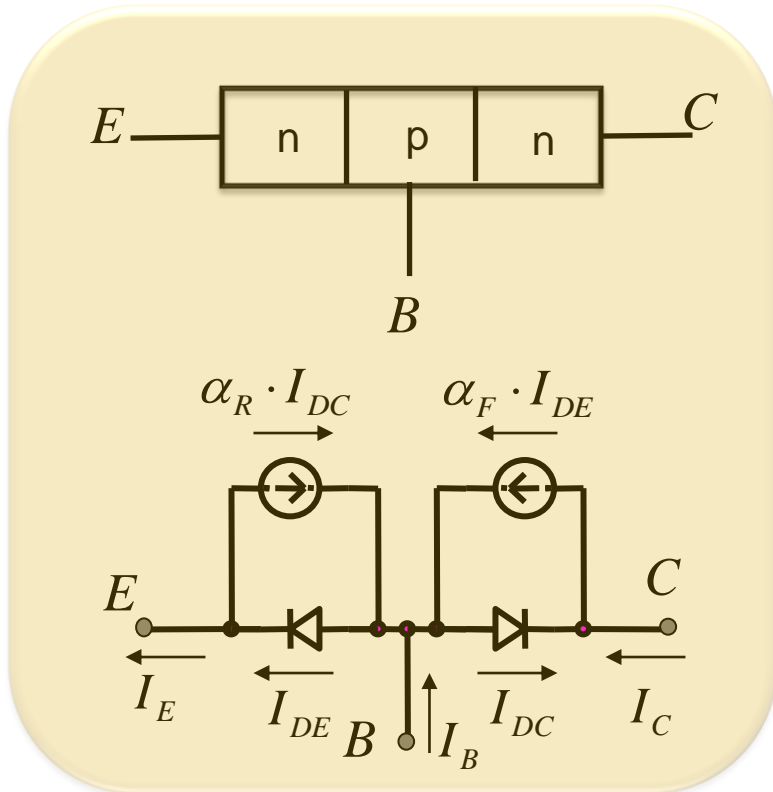
I_{BC}

Corriente de difusión de los huecos desde la base al colector

$$I_{BC} = \frac{qAD_c p_{c0}}{L_c} \left(e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1 \right) \quad V_{BC} < 0 \Rightarrow I_{BC} \downarrow$$

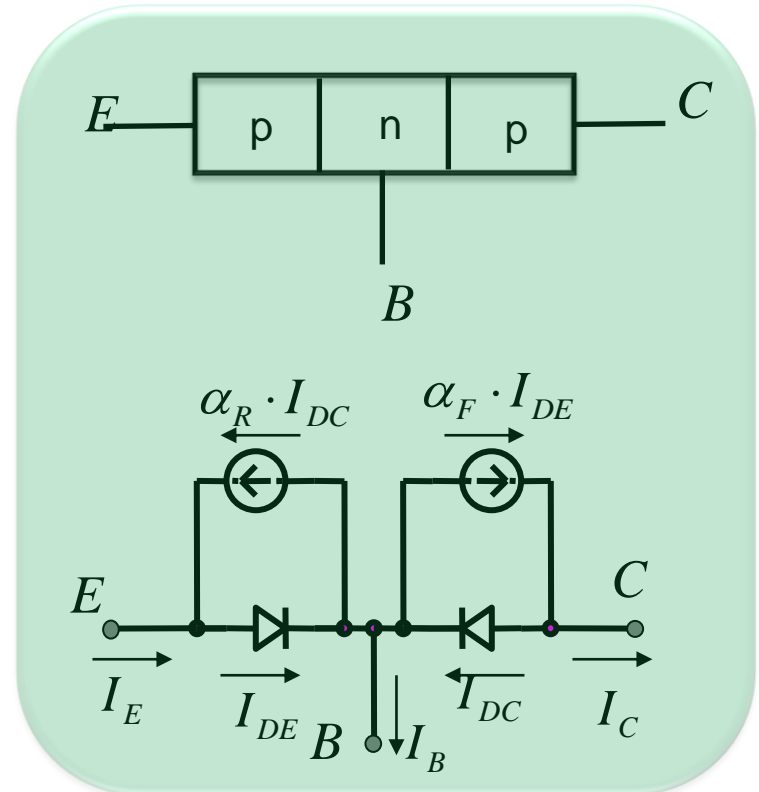
5.3 Modelo de Corrientes del Transistor

Modelo de Ebers-Moll



$$I_E = I_{DE} - \alpha_R I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{DE} - I_{DC}$$



$$I_E = I_{DE} - \alpha_R I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{DE} - I_{DC}$$

Modelo de Corrientes del Transistor

Modelo de Ebers-Moll

Transistor NPN

$$I_E = I_{DE} - \alpha_R I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{DE} - I_{DC}$$

$$I_E = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

Transistor PNP

$$I_E = I_{DE} - \alpha_R I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_F I_{DE} - I_{DC}$$

$$I_E = I_{ES} (e^{V_{EB}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{CB}/V_{TE}} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{EB}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{CB}/V_{TE}} - 1)$$

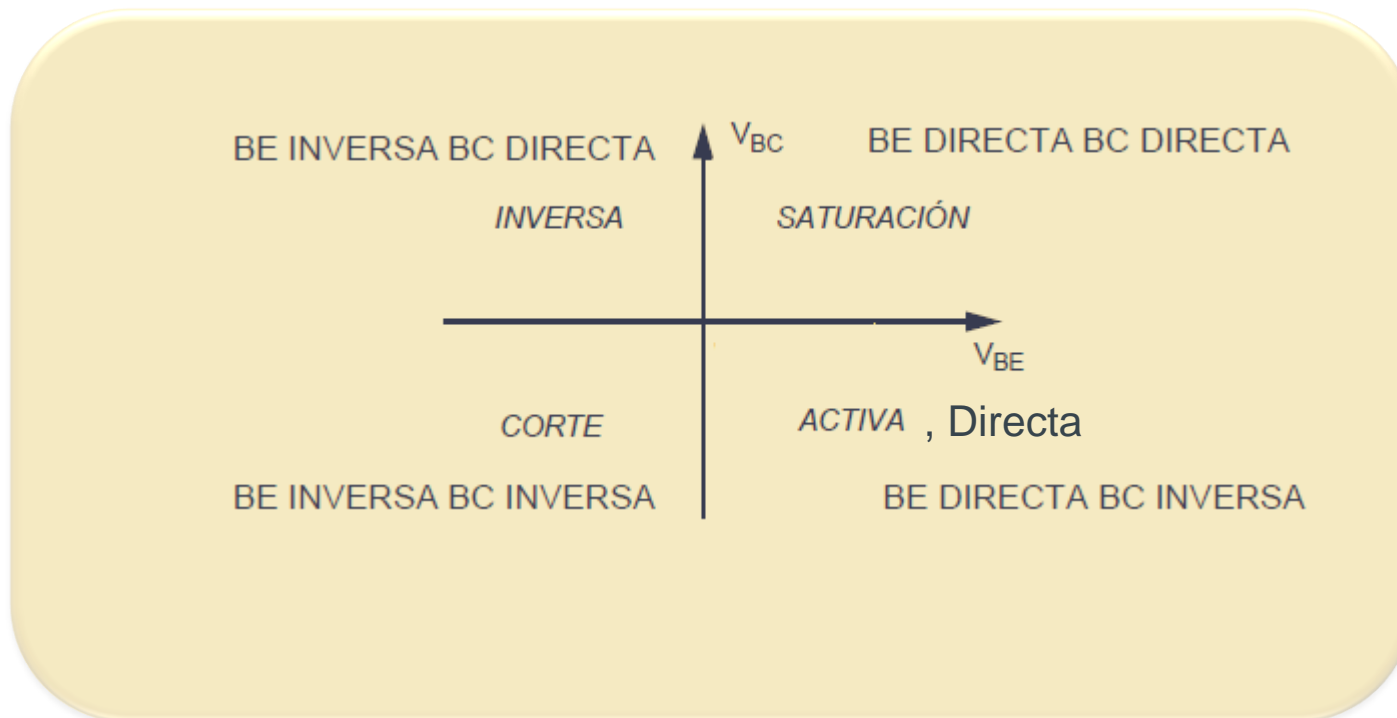
ECUACIONES NO LINEALES

Teorema de Reciprocidad

$$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$$

Valores Típicos: $\alpha_F=0.99$ $\alpha_R=0.66$ $I_{ES}=10^{-15}$ A $I_{CS}=10^{-15}$ A

5.4 Modos o Zonas de Operación



OBJETIVO: Encontrar un MODELO LINEAL para el transistor en cada modo de operación

Zona Activa Directa

Ecuaciones de Ebers-Moll

$$\begin{array}{l}
 I_E = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1) \\
 I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 V_{BE} > V_{don} \\
 V_{BC} < 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 I_E = I_{ES} e^{V_{BE}/V_{TE}} + \alpha_R I_{CS} \\
 I_C = \alpha_F I_{ES} e^{V_{BE}/V_{TE}} + I_{CS}
 \end{array}$$

Despejando el término exponencial de la primera y sustituyéndolo en la segunda:

$$\left. \begin{array}{l}
 I_C = \alpha_F (I_E - \alpha_R I_{CS}) + I_{CS} \\
 I_C = \alpha_F I_E + I_{C0} \\
 I_{C0} \equiv I_{CS} (1 - \alpha_F \alpha_R) \\
 I_E = I_B + I_C
 \end{array} \right\}
 \quad
 I_C = \alpha_F I_C + \alpha_F I_B + I_{C0} \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B + \frac{1}{1 - \alpha_F} I_{C0}$$

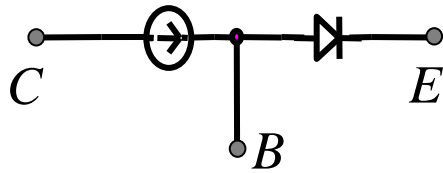
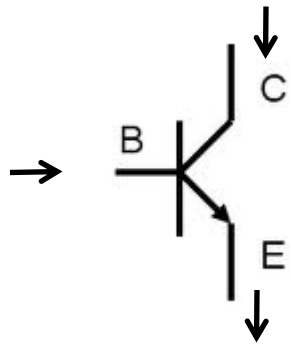
$$I_C = \beta_F I_B + (1 + \beta_F) I_{C0}$$

$$\beta_F \equiv \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

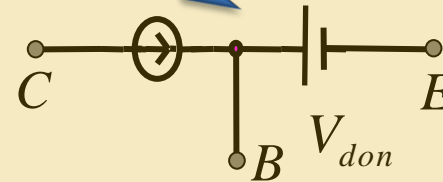
△ $\beta_F \equiv$ Ganancia de Corriente en directo, β

$\beta_F \uparrow \uparrow$

Zona Activa Directa



$$I_C = \beta_F I_B + (1 + \beta_F) I_{C0}$$



Valores Típicos:

$$\beta_F \in [50, 300]$$

$$V_{don} \in [0.5, 0.7]V$$

$$\beta_F I_B \gg I_{C0} (1 + \beta_F)$$

Zona Activa Inversa

$$I_E = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$V_{BC} > V_{don}$
 $V_{BE} < 0$

$$I_E = -I_{ES} - \alpha_R I_{CS} e^{V_{BC}/V_{TE}}$$

$$I_C = -\alpha_F I_{ES} - I_{CS} e^{V_{BC}/V_{TE}}$$

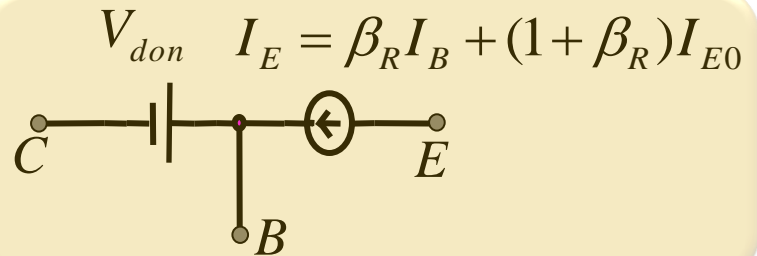
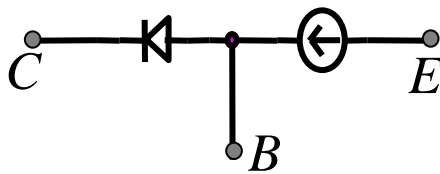
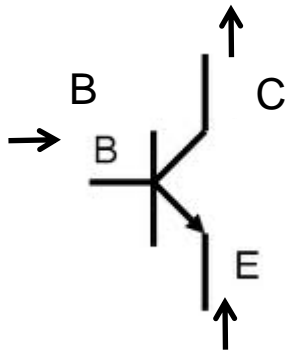
$$I_E = \beta_R I_B + (1 + \beta_R) I_{EO}$$

$$\beta_R \equiv \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

$$I_{EO} = I_{ES} (1 - \alpha_F \alpha_R)$$

△ $\beta_R \equiv$ Ganancia de Corriente en inverso

$\beta_R \downarrow$



Valores Típicos:

$$\beta_R \in [1, 10]$$

$$V_{don} \in [0.5, 0.7]V$$

$$\beta_R I_B \gg I_{EO} (1 + \beta_R)$$

Zona Corte

$$I_E = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$V_{BC} < 0$
 $V_{BE} < 0$

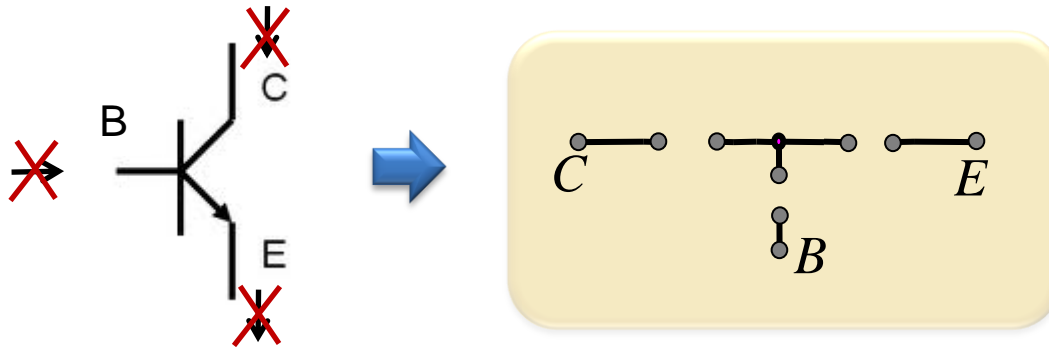
$$I_E = -I_{ES} + \alpha_R I_{CS}$$

$$I_C = -\alpha_F I_{ES} + I_{CS}$$

$$I_E \approx 0$$

$$I_C \approx 0$$


$$I_B = I_E - I_C \approx 0$$



Zona Saturación

$$I_E = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1)$$

$V_{BC} > V_{don}$
 $V_{BE} > V_{don}$


$$I_E = I_{ES} e^{V_{BE}/V_{TE}} - \alpha_R I_{CS} e^{V_{BC}/V_{TE}}$$

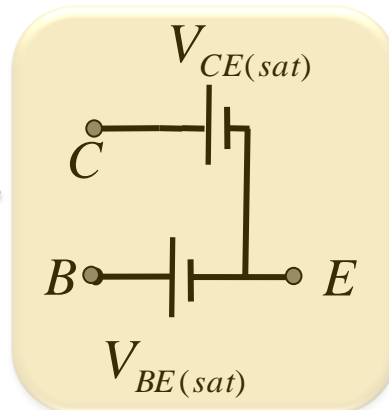
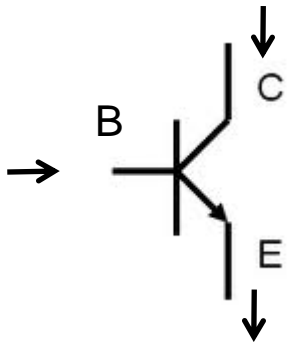
$$I_C = \alpha_F I_{ES} e^{V_{BE}/V_{TE}} - I_{CS} e^{V_{BC}/V_{TE}}$$

¡¡ No se pueden simplificar más !!

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



$$V_{CE(sat)} = V_{Te} \ln \left(\frac{1 + \frac{I_C}{I_B} \frac{1}{\beta_R}}{\alpha_R - \frac{I_C}{I_B} \frac{1}{\beta_R}} \right) \approx V_{Te} \ln \left(\frac{1}{\alpha_R} \right)$$



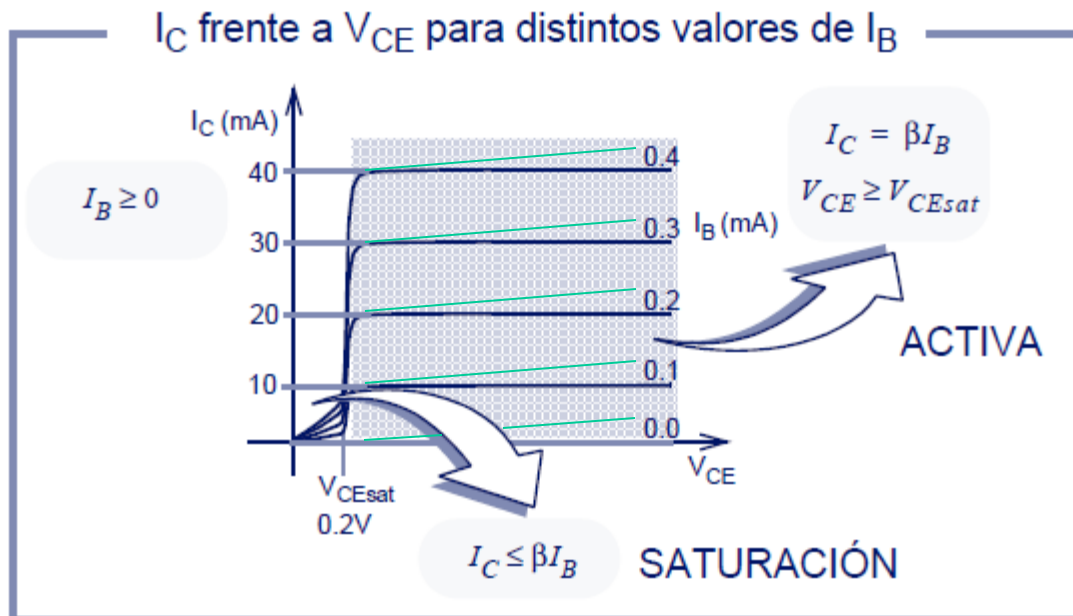
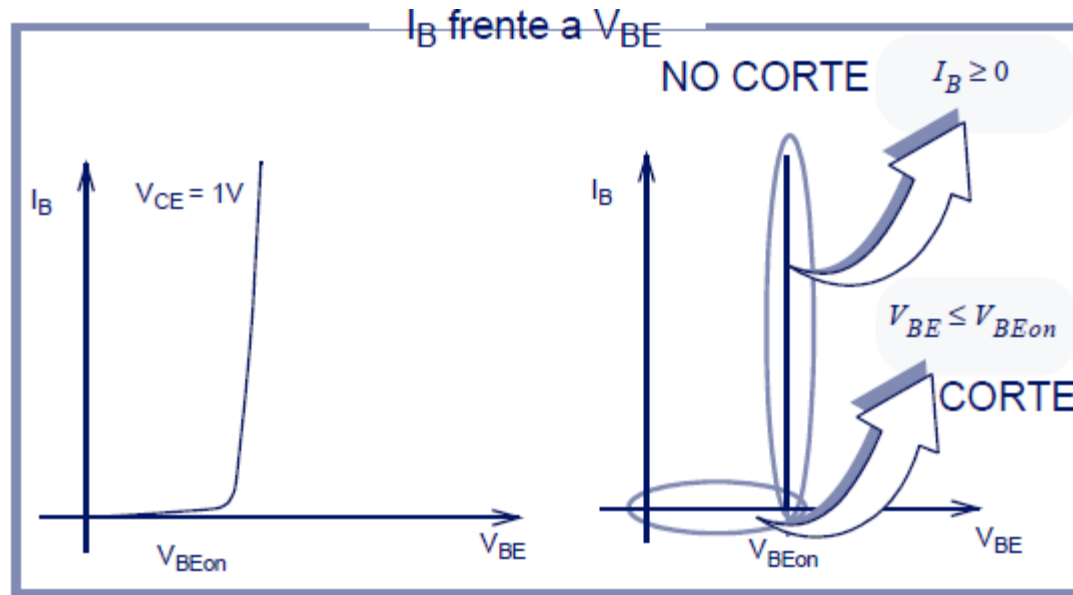
Valores Típicos:

$$V_{BE(sat)} \in [0.7, 0.8]V$$

$$V_{CE(sat)} \in [0.05, 0.2]V$$

$$I_C < \beta \cdot I_B$$

Gráficas de Intensidad



Tensión Early

$$I_C = [\beta_F I_B + (1 + \beta_F) I_{CO}] \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right]$$

$$I_C \approx \beta_F I_B \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right]$$

△ $V_A \equiv$ Tensión Early o Factor de Modulación de la Base

$V_A \uparrow \uparrow (>30V)$, es la pendiente de la curva en Z. Activa

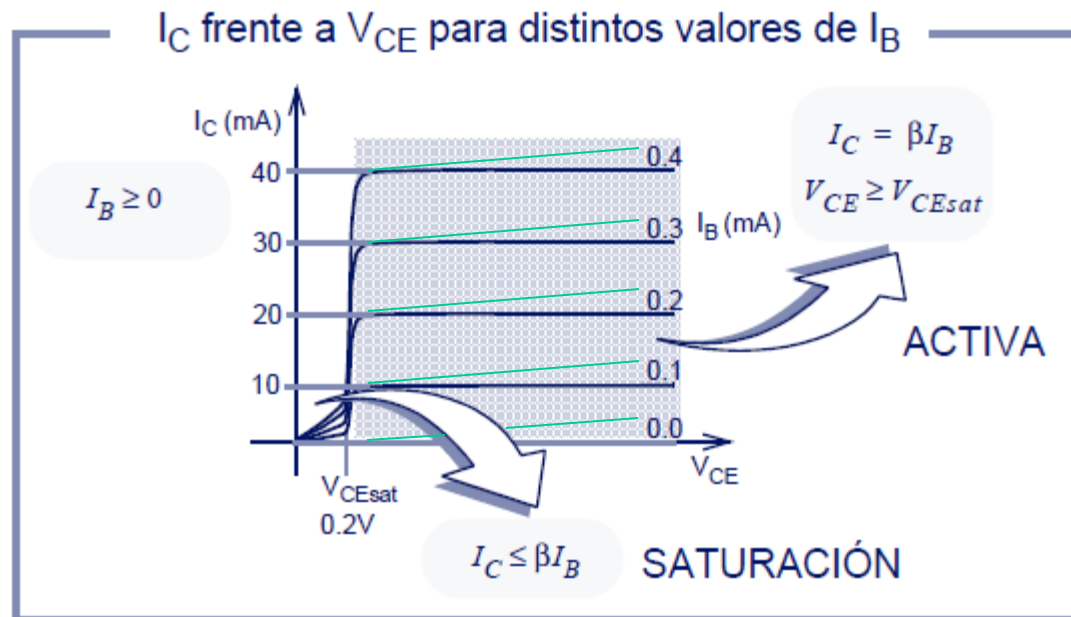
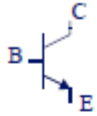
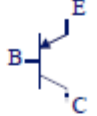
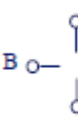
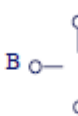
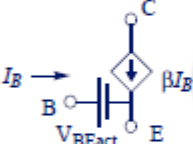
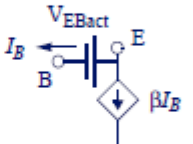
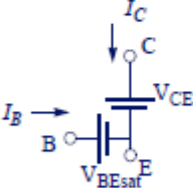
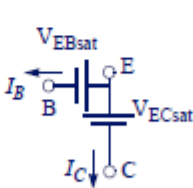
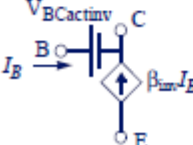
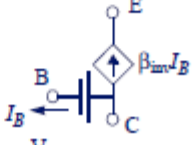
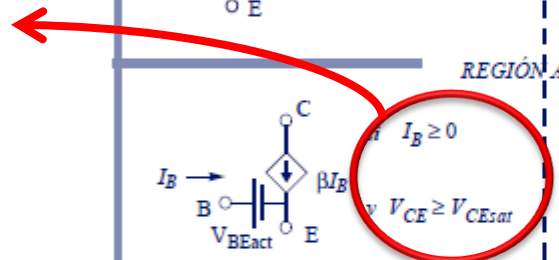


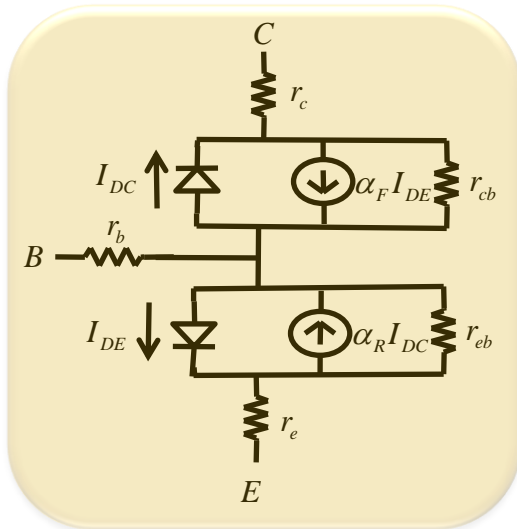
TABLA RESUMEN DE MODELOS Y CONDICIONES

NPN	PNP
	
REGIÓN DE CORTE	
 <p>si $V_{BE} \leq V_{BEon}$</p>	 <p>si $V_{EB} \leq V_{EBon}$</p>
REGIÓN ACTIVA	
 <p>$I_B \geq 0$ y $V_{CE} \geq V_{CEsat}$</p>	 <p>$I_B \geq 0$ y $V_{EC} \geq V_{ECsat}$</p>
REGIÓN DE SATURACIÓN	
 <p>$I_B \geq 0$ y $\beta I_B \geq I_C$</p>	 <p>$I_B \geq 0$ y $\beta I_B \geq I_C$</p>
REGIÓN ACTIVA INVERSA	
 <p>$I_B \geq 0$ y $V_{EC} \geq V_{CEsat}$</p>	 <p>$I_B \geq 0$ y $V_{CE} \geq V_{CEsat}$</p>

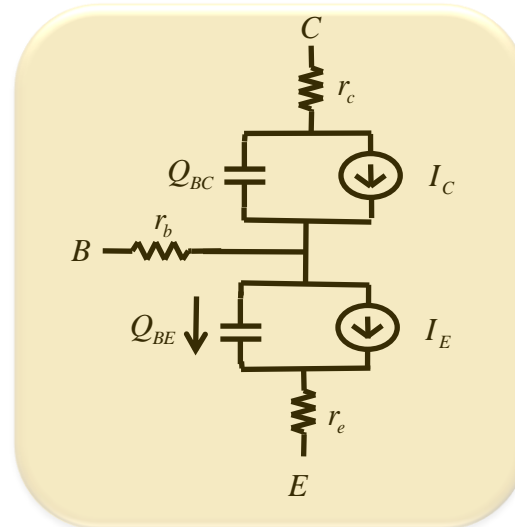
Condiciones a Verificar



5.5 Modelos SPICE



Modelo Ebers-Moll, incluyendo efectos de 2º orden



Modelo dinámico del BJT en Spice

$$Q_{BE} = \tau_F I_S (e^{V_{BE}/V_{TE}} - 1) + C_{je0} \int_0^{V_{BE}} \left(1 - V/\phi_e\right)^{-me} dV$$

$$Q_{BC} = \tau_R I_S (e^{V_{BC}/V_{TE}} - 1) + C_{jc0} \int_0^{V_{BC}} \left(1 - V/\phi_c\right)^{-mc} dV$$



$$C_{BE} = \frac{dQ_{BE}}{dV_{BE}} = \frac{\tau_F I_S e^{V_{BE}/V_{TE}}}{V_{TE}} + \frac{C_{je0}}{\left(1 - V_{BE}/\phi_e\right)^{me}}$$

$$C_{BC} = \frac{dQ_{BC}}{dV_{BC}} = \frac{\tau_R I_S e^{V_{BC}/V_{TE}}}{V_{TE}} + \frac{C_{jc0}}{\left(1 - V_{BC}/\phi_c\right)^{mc}}$$