

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

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

5.5 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 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).

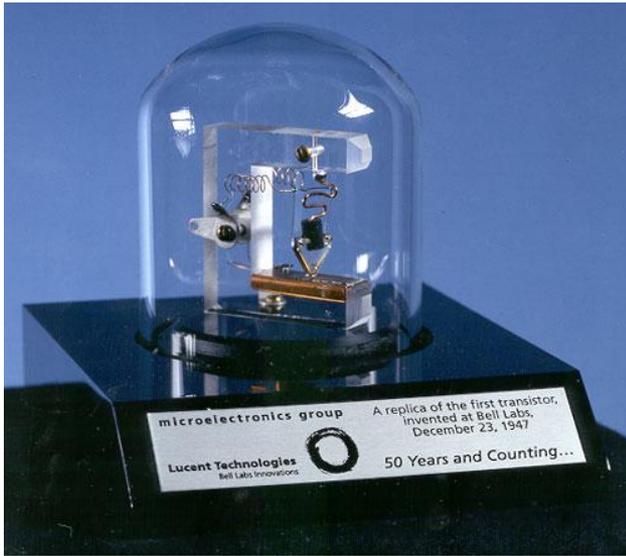
- Su reducido tamaño ha permitido integrar millones de ellos en un solo C.I.

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

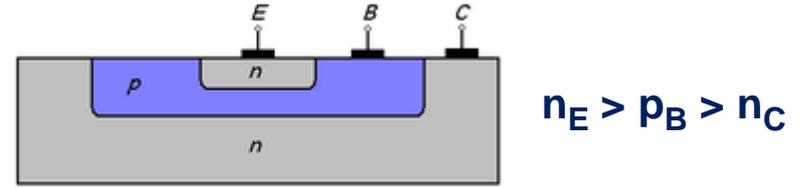
The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the 'Cartagena' part. The text is set against a light blue and white background with a subtle wave-like pattern.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

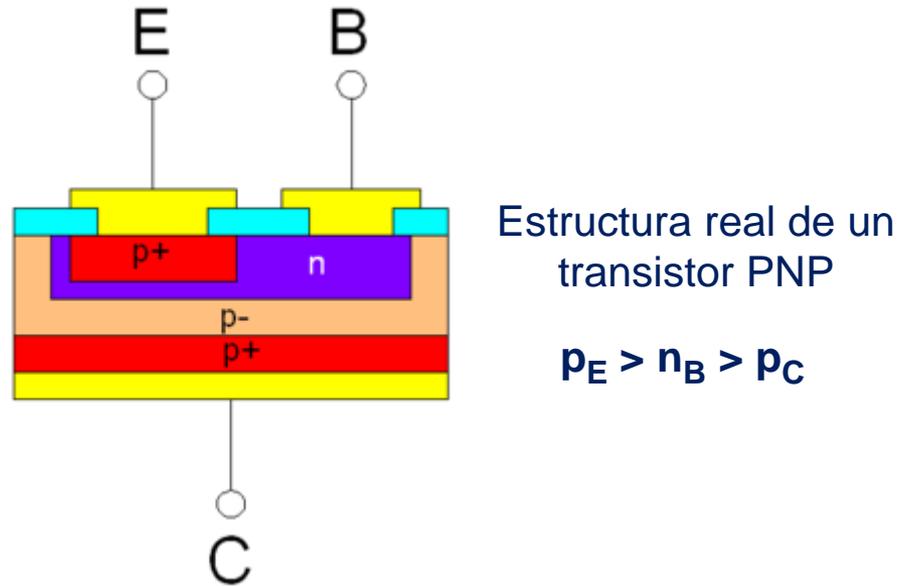
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



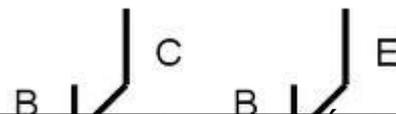
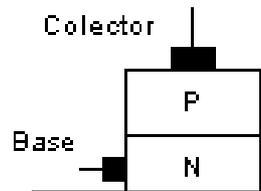
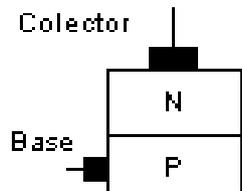
Replica del primer transistor de válvula



Estructura simplificada de un transistor NPN



Estructura real de un transistor PNP

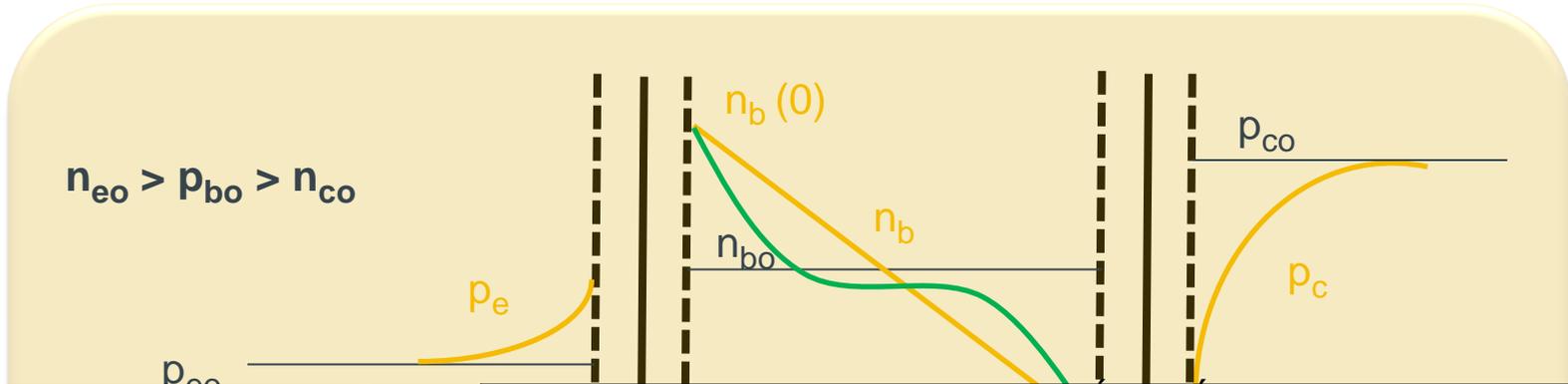
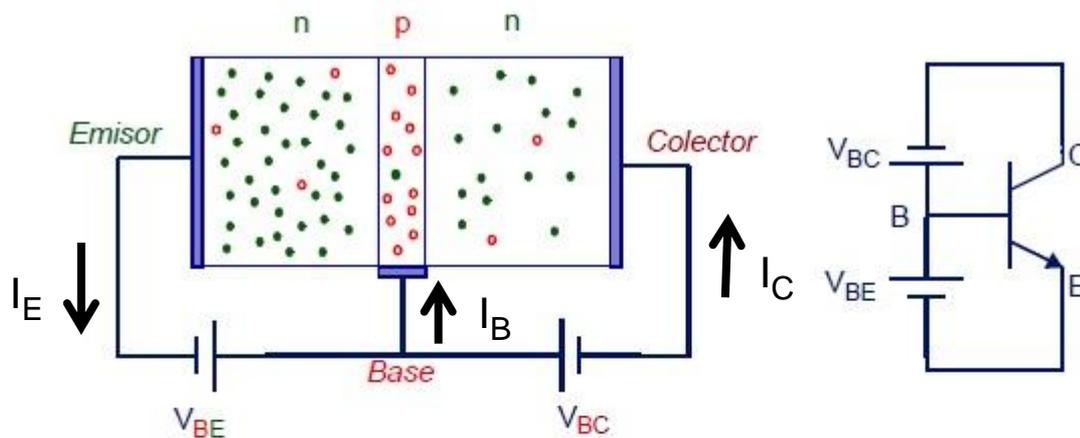


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.2 Funcionamiento del transistor en Zona Activa Directa



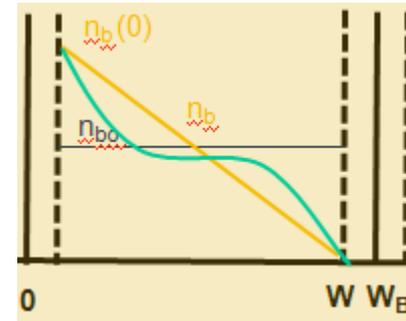
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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



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

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

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

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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 $\rightarrow I_C \sim I_E$

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Exceso de Carga en la Base

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

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

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

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Corriente de Base

En general interesa que IB 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

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

Cartagena99

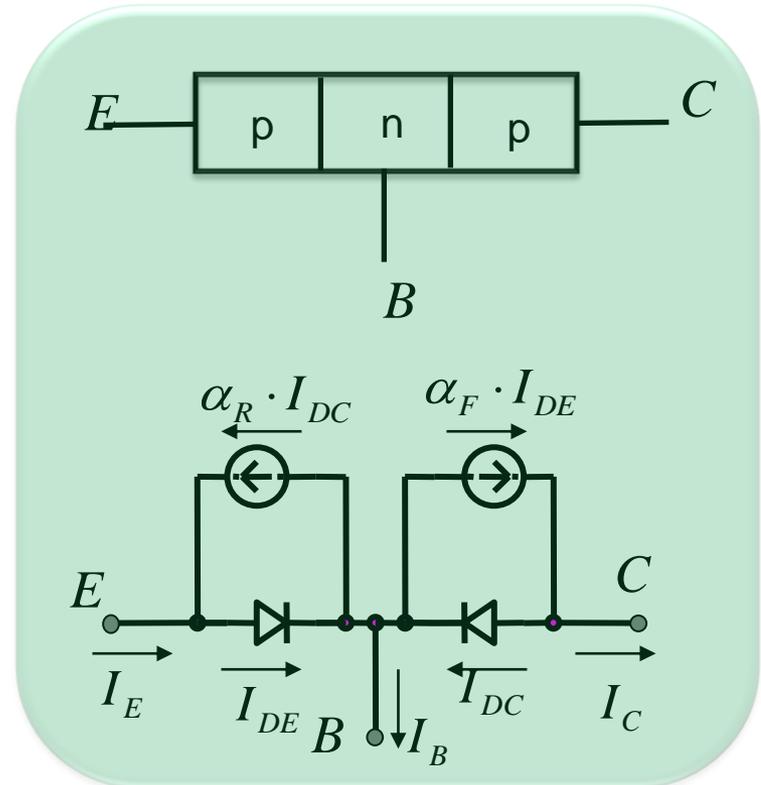
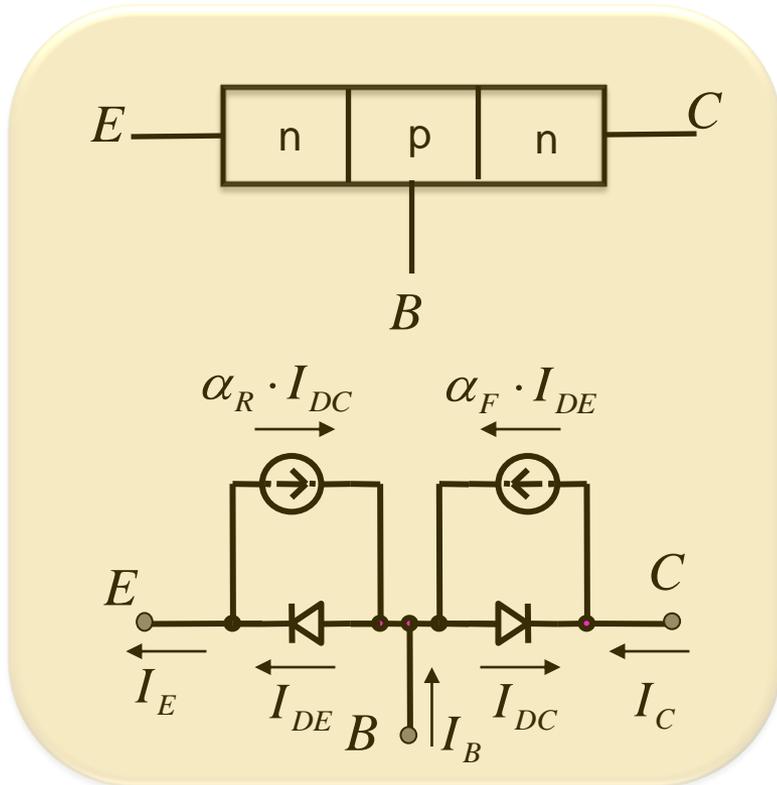
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$I_{BC} - I_{BC} \left(e^{-V_{BC}/V_{TE}} - 1 \right) \quad V_{BC} < 0 \Rightarrow I_{BC} \downarrow$

5.3 Modelo de Corrientes del Transistor

Modelo de Ebers-Moll



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

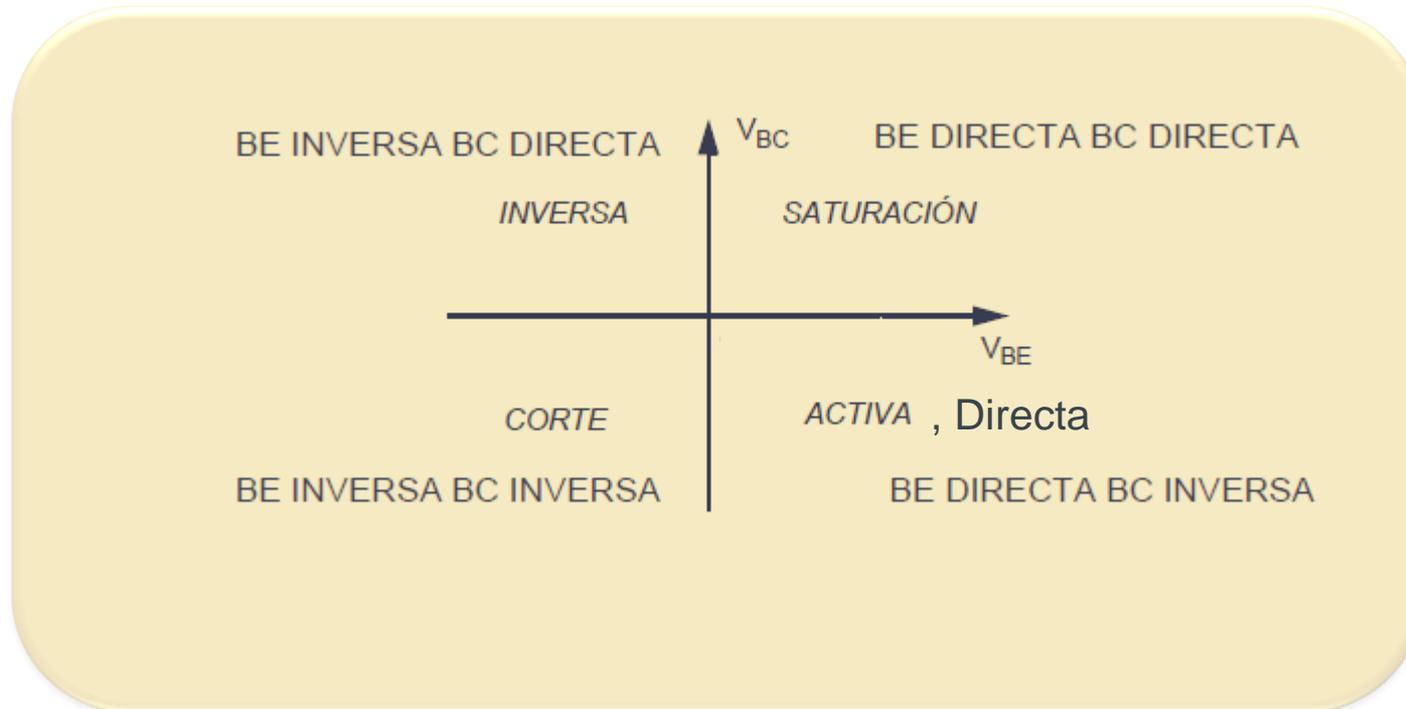
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

valores típicos: $\alpha_F = 0.99$ $\alpha_R = 0.00$ $I_{ES} = 10^{-14}$ A $I_{CS} = 10^{-14}$ A

5.4 Modos o Zonas de Operación



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Zona Activa Directa

Ecuaciones de Ebers-Moll

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

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

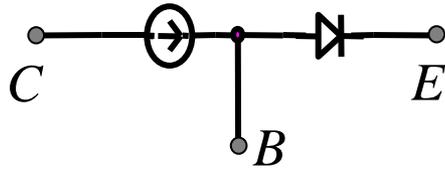
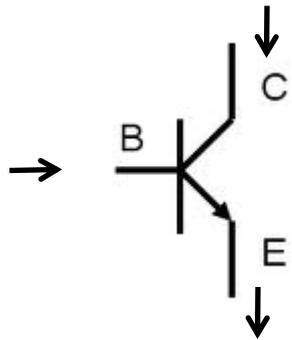
$$\left. \begin{aligned}
 I_C &= \alpha_F (I_E - \alpha_R I_{CS}) + I_{CS} \\
 I_C &= \alpha_F I_E + I_{C0} \\
 I_{C0} &\equiv I_{CS} (1 - \alpha_F \alpha_R) \\
 I_E &= I_B + I_C
 \end{aligned} \right\} \quad I_C = \alpha_F I_C + \alpha_F I_B + I_{C0} \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B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

Cartagena99

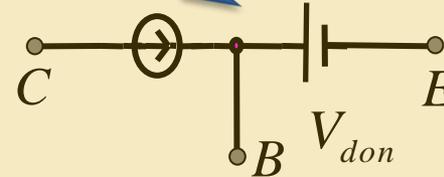
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Zona Activa Directa



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



Valores Típicos:

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Zona Activa Inversa

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

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

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

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

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

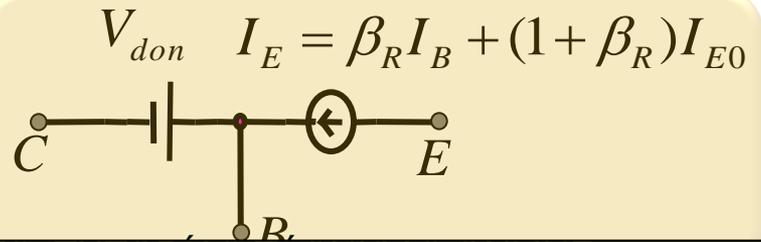
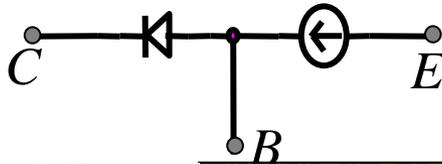
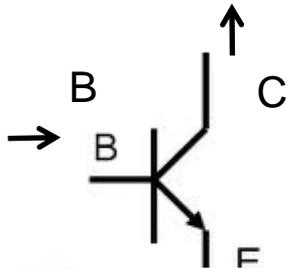
$$I_E = \beta_R I_B + (1 + \beta_R) I_{EO}$$

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

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

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

$\beta_R \downarrow$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Zona Corte

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

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

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



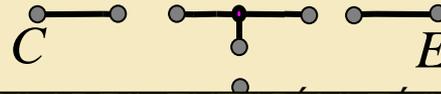
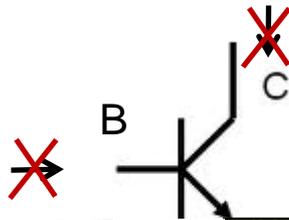
$$I_E = -I_{ES} + \alpha_R I_{CS}$$

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

$$I_E \approx 0$$

$$I_C \approx 0$$

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Zona Saturación

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

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

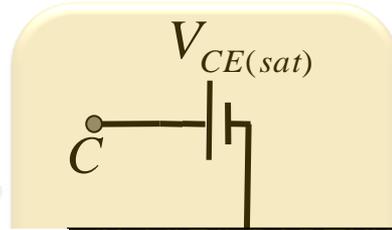
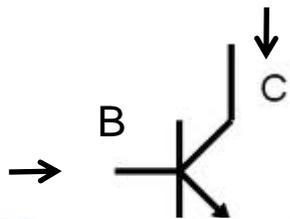
$V_{BC} > V_{don}$
 $V_{BE} > V_{don}$

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

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

¡¡ No se pueden simplificar más !!

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



Valores Típicos:

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

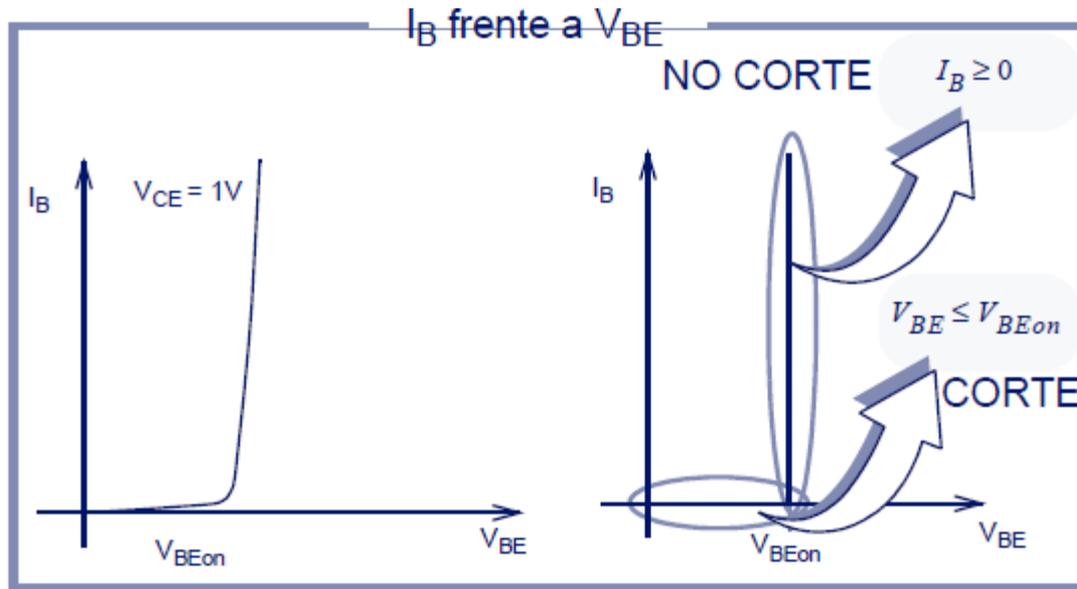
$$V_{CE(sat)} \in [0.05, 0.2]V$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Gráficas de Intensidad



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

0.2V

antes de saturación

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



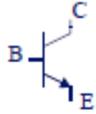
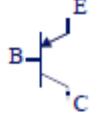
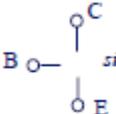
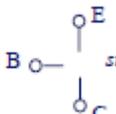
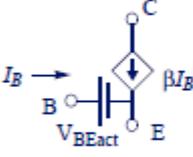
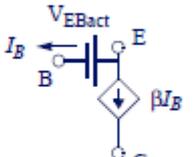
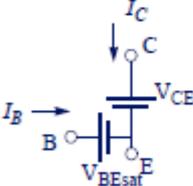
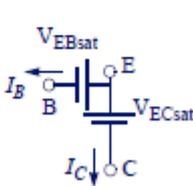
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

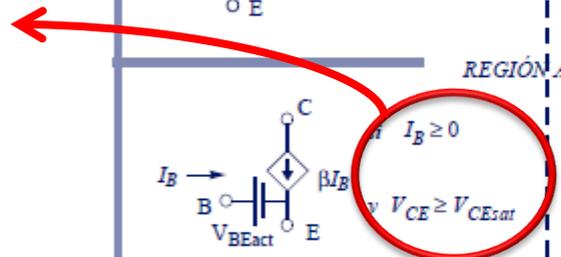
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

0.2V

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>si $I_B \geq 0$ y $\beta I_B \geq I_C$</p>	 <p>si $I_B \geq 0$ y $\beta I_B \geq I_C$</p>
REGIÓN ACTIVA INVERSA	

Condiciones a Verificar

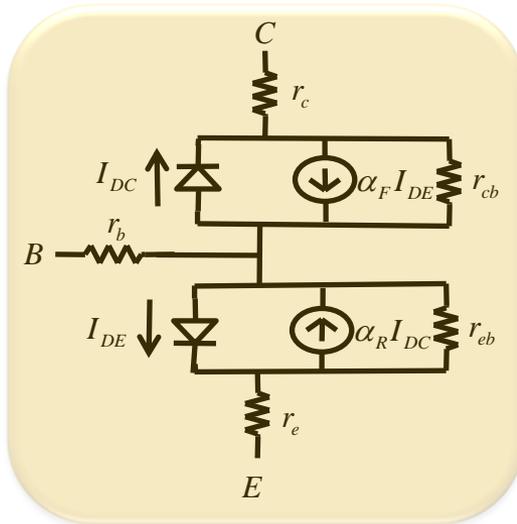


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

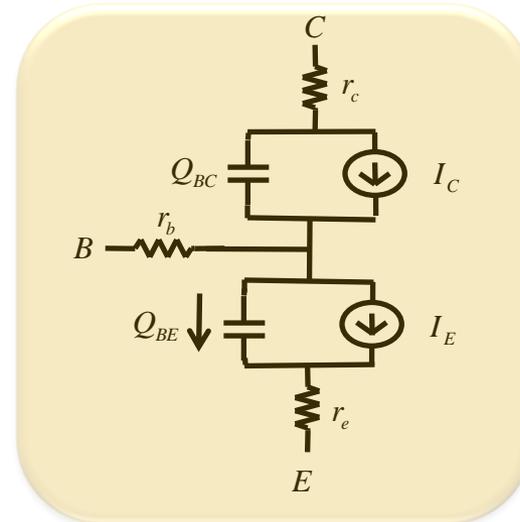
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

5.5 Modelos SPICE



Modelo Ebers-Moll, incluyendo efectos de 2º orden



Modelo dinámico del BJT en Spice

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

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

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



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70