

# 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.

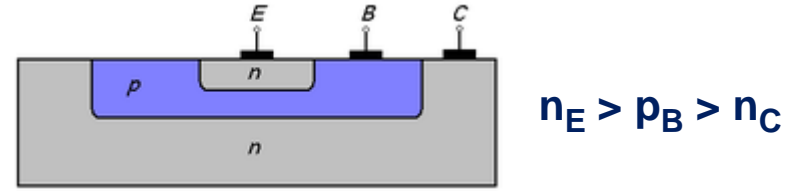
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

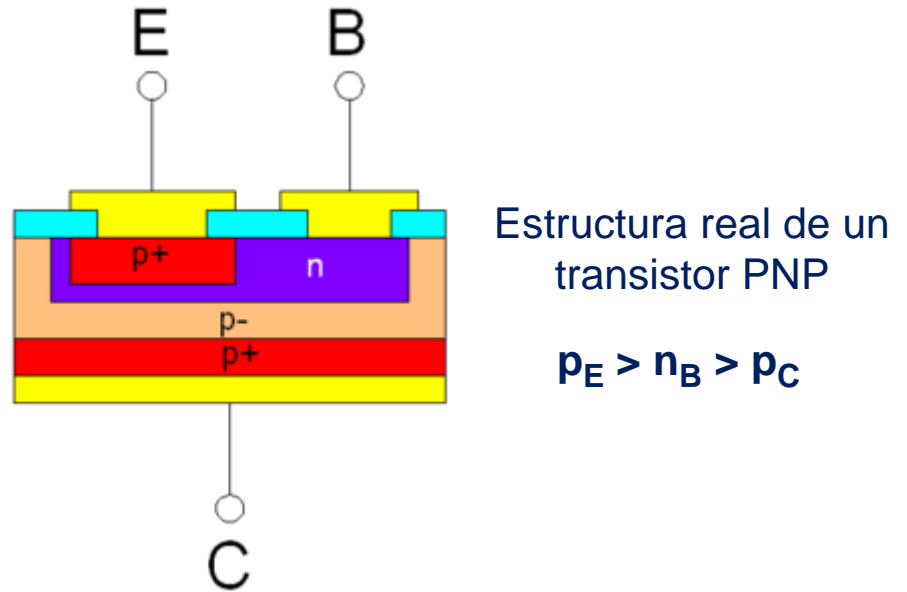
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



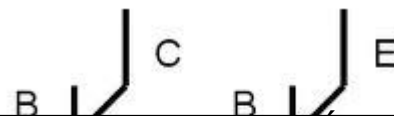
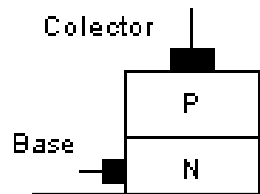
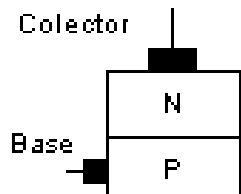
Replica del primer transistor de válvula



Estructura simplificada de un transistor NPN



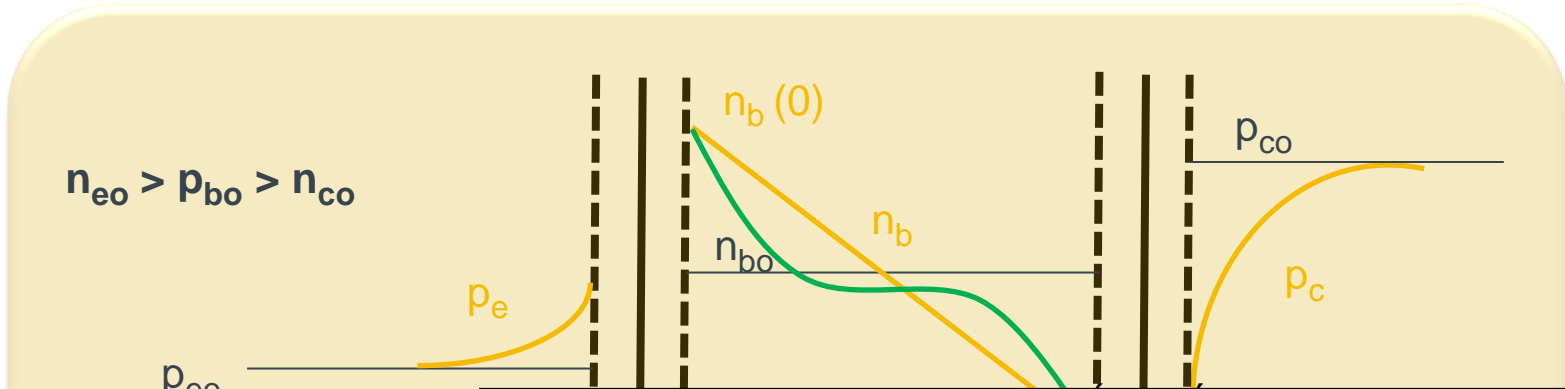
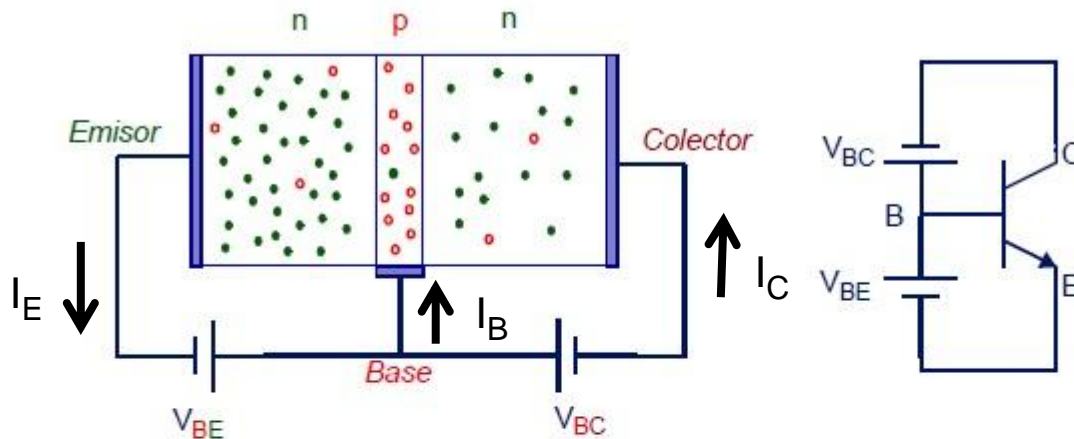
Estructura real de un transistor PNP



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



$n_{eo} > p_{bo} > n_{co}$

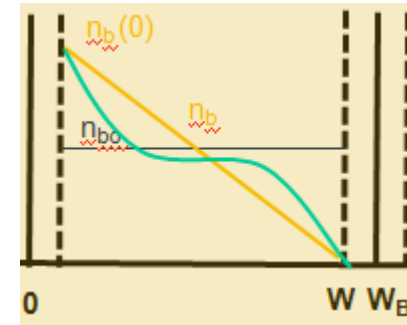
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

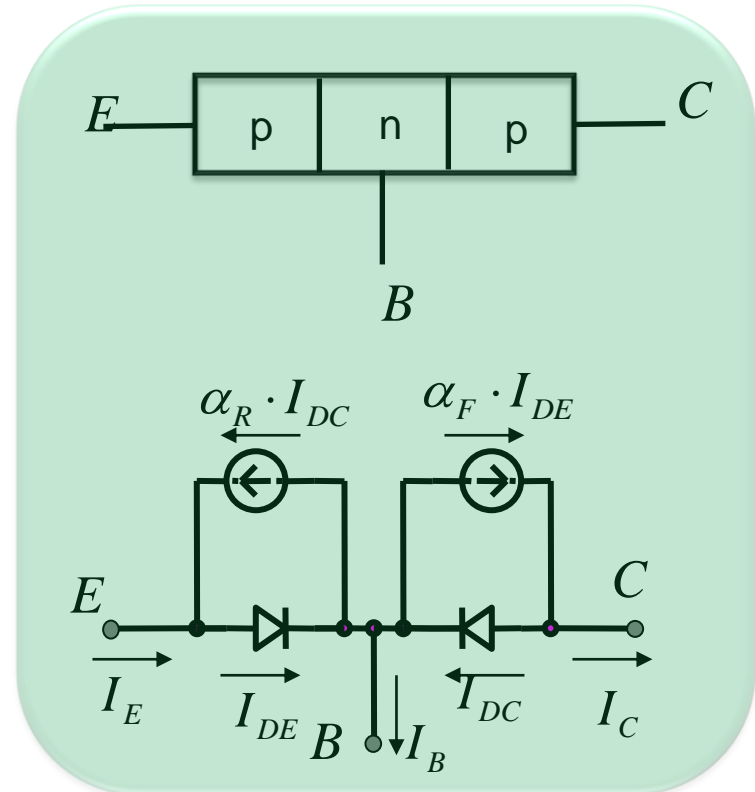
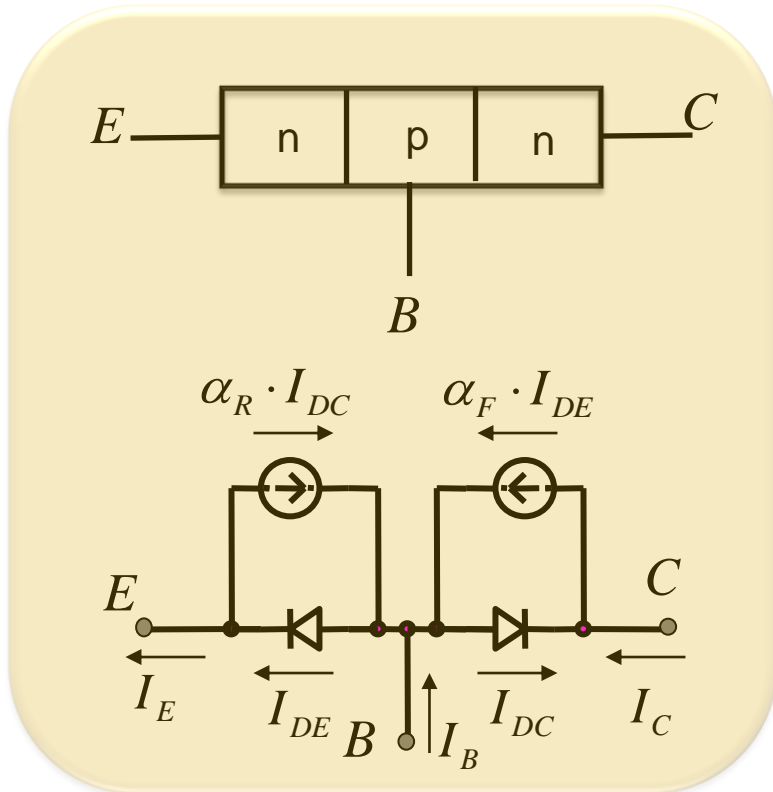
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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



# 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

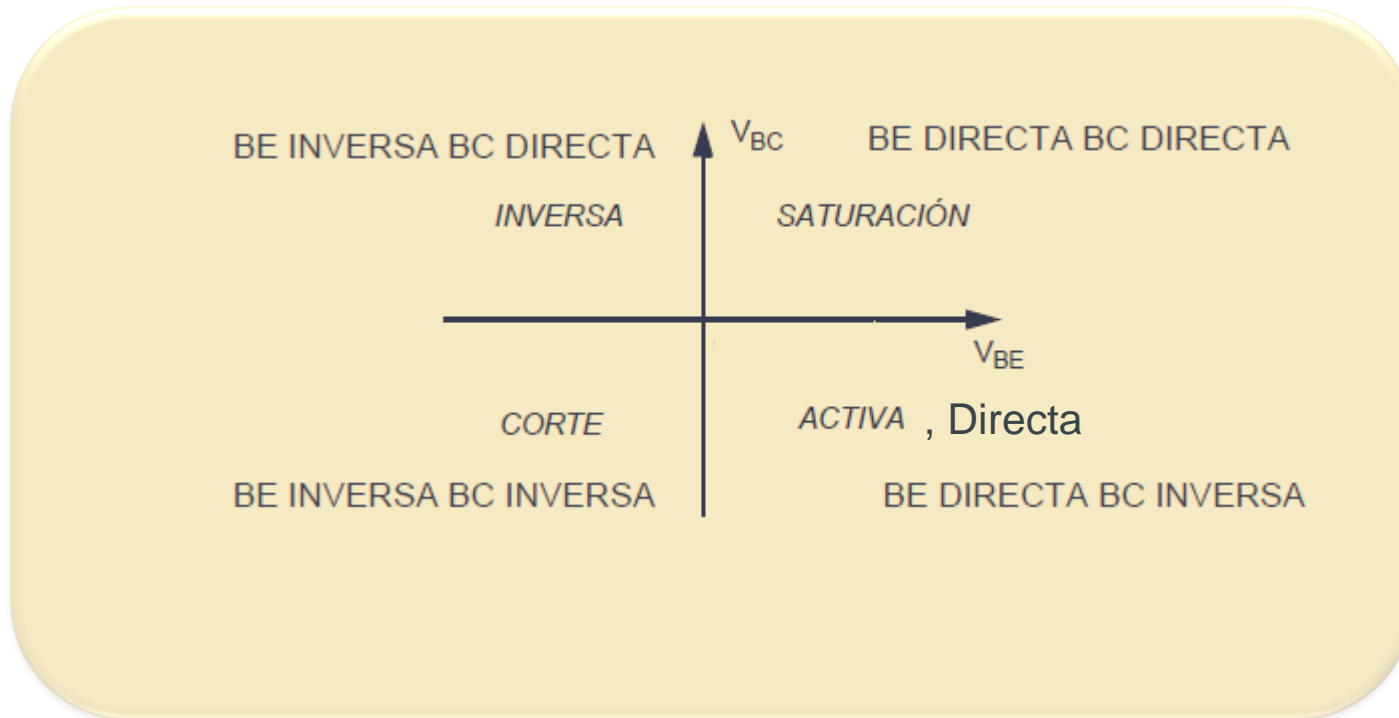
---

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

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

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

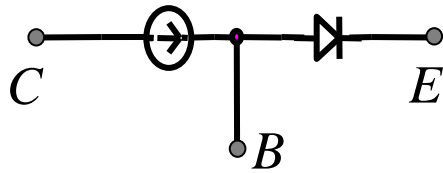
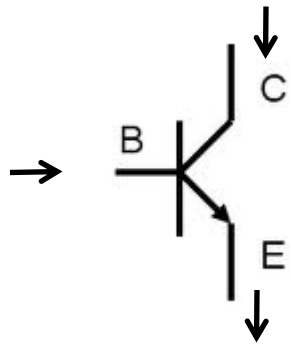
$$\left. \begin{array}{l}
 I_C = \alpha_F (I_E - \alpha_R I_{CS}) + I_{CS} \\
 I_C = \alpha_F I_E + I_{C0} \\
 I_{C0} \equiv I_{CS} (1 - \alpha_F \alpha_R) \\
 I_E = I_B + I_C
 \end{array} \right\}
 \quad
 I_C = \alpha_F I_C + \alpha_F I_B + I_{C0} \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B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

Cartagena99

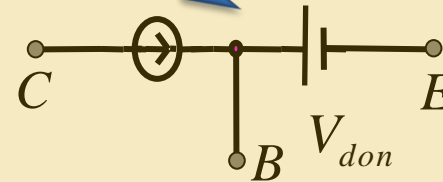
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

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

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

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

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

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

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

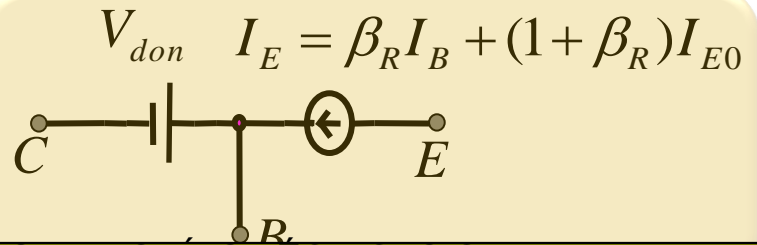
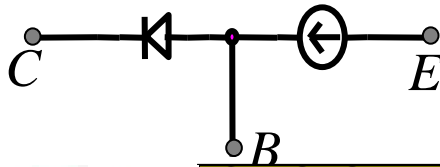
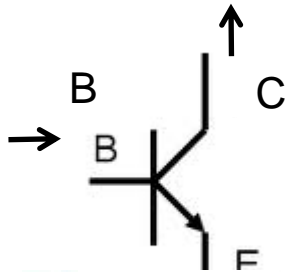
$$I_E = \beta_R I_B + (1 + \beta_R) I_{EO}$$

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

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

△  $\beta_R \equiv$  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

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

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

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



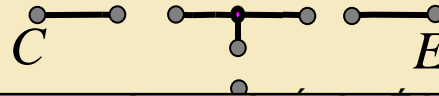
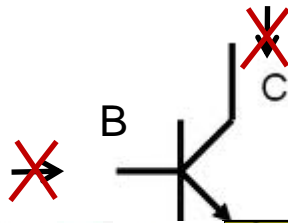
$$I_E = -I_{ES} + \alpha_R I_{CS}$$

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

$$I_E \approx 0$$

$$I_C \approx 0$$

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



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

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

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

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


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

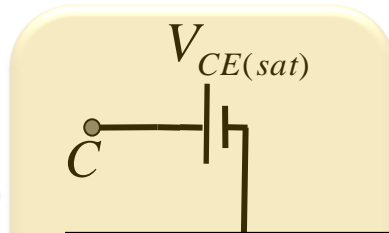
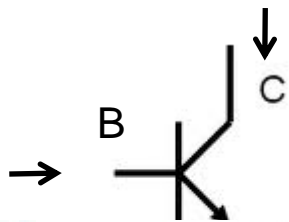
$$I_C = \alpha_F I_{ES} e^{V_{BE}/V_{TE}} - I_{CS} e^{V_{BC}/V_{TE}}$$

¡¡ No se pueden simplificar más !!

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



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



Valores Típicos:

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

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

**Cartagena99**

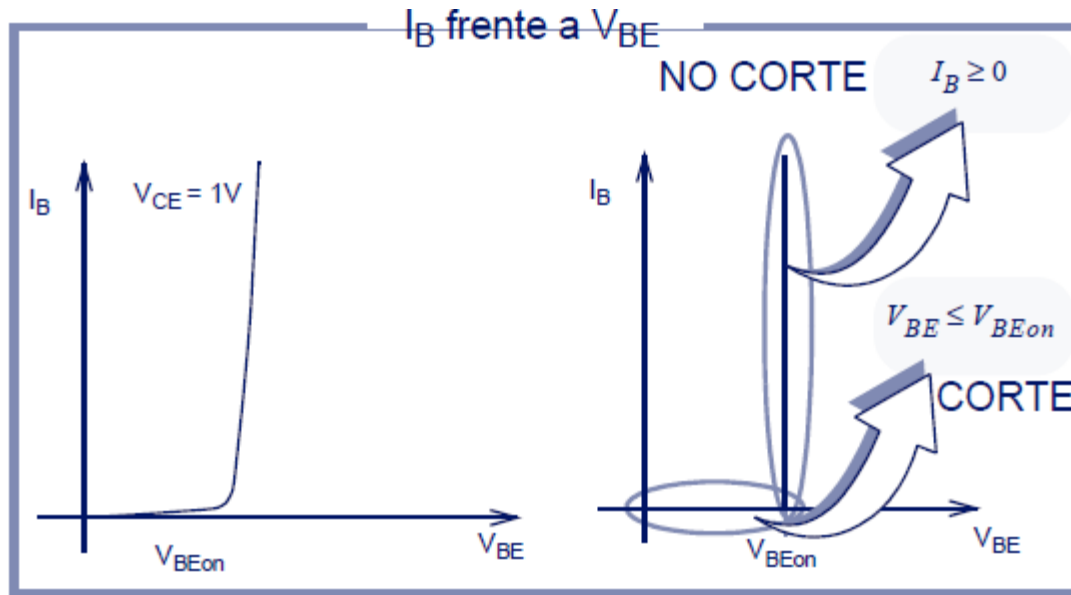
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

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

En la saturación

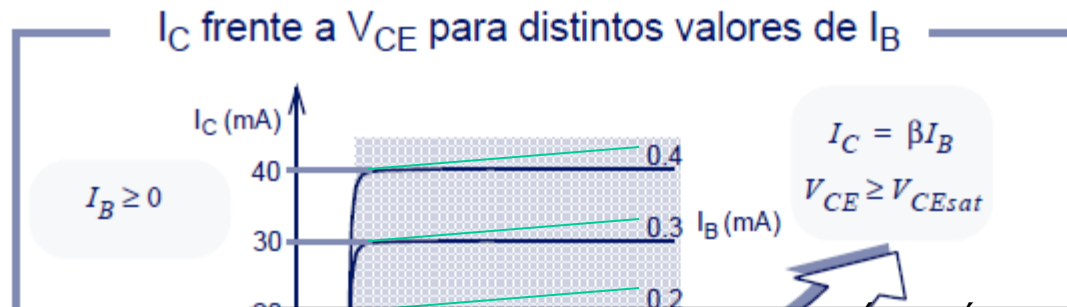
# Tensión Early

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

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

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

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

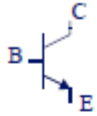
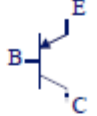
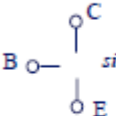
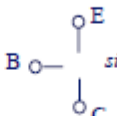
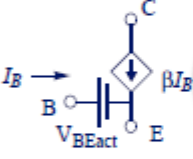
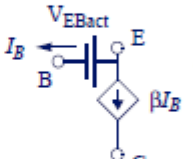
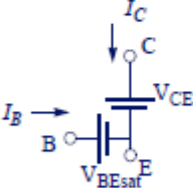
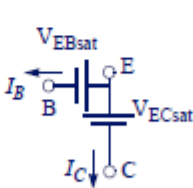


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

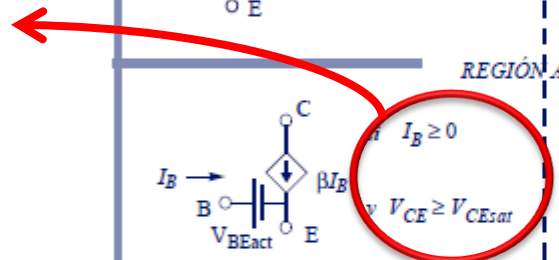
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

0.2V

TABLA RESUMEN DE MODELOS Y CONDICIONES

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

Condiciones a Verificar



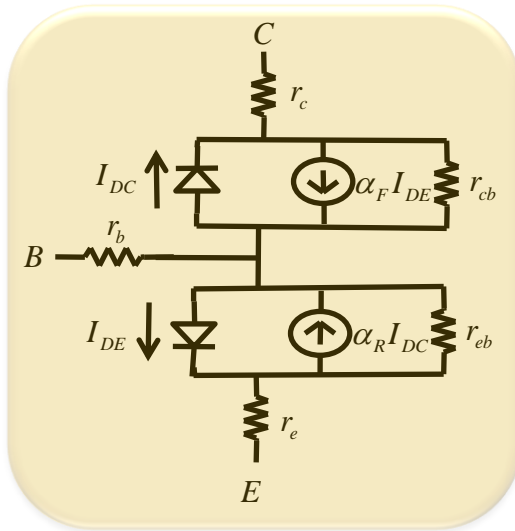
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

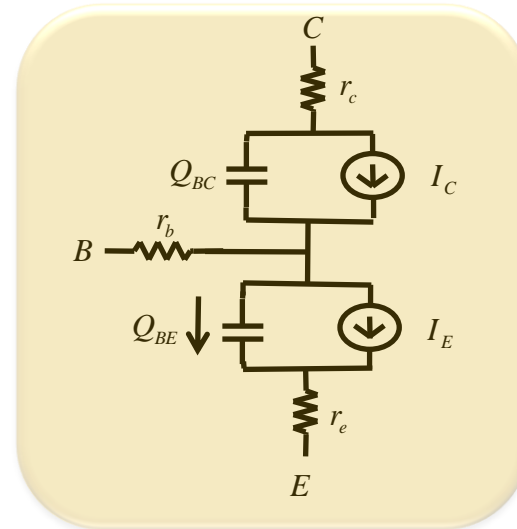
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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