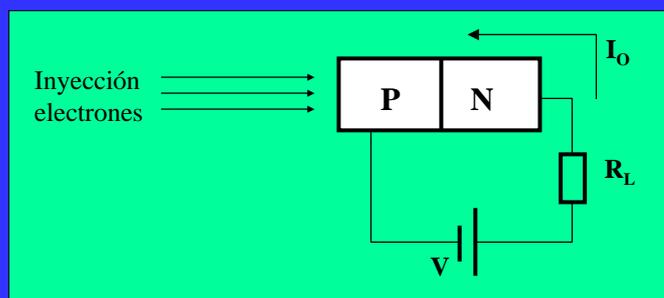


TEMA 5

EL TRANSISTOR BIPOLAR

ESTRUCTURA BÁSICA

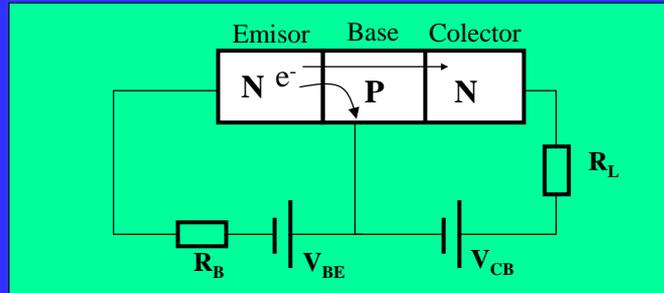
Partimos de una unión P-N polarizada en inversa:



Sólo pueden atravesar la unión los portadores minoritarios generados térmicamente. La corriente inversa I_o depende sólo de la temperatura, siendo independiente de V y R_L en un margen amplio.

▶ INYECCIÓN DE ELECTRONES

- Con cañón electrónico
- Con otra unión polarizada directamente



Emisor: emite portadores

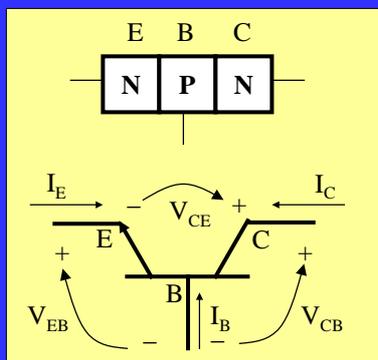
Colector: recoge (colecciona) portadores

Transistor Bipolar de Unión: BJT (Bipolar Junction Transistor)

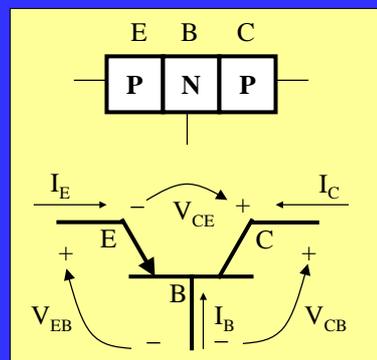
ANÁLISIS CUALITATIVO

Se puede:

- Inyectar electrones en zona P => Transistor NPN
- Inyectar huecos en zona N => Transistor PNP



$$I_E + I_B + I_C = 0$$



$$V_{CE} + V_{EB} - V_{CB} = 0$$

▶ CARACTERÍSTICAS

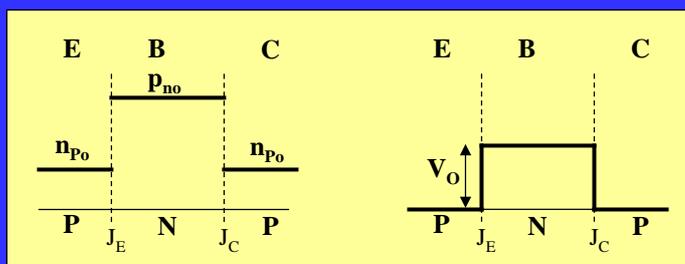
- Base estrecha y poco dopada para que la mayoría de portadores procedentes del emisor pasen al colector
- Emisor más impurificado que el colector para inyectar un elevado número de portadores

TRANSISTOR EN CIRCUITO ABIERTO

- Todas las corrientes nulas
- Barreras de potencial de las uniones se ajustan a los potenciales de contacto:

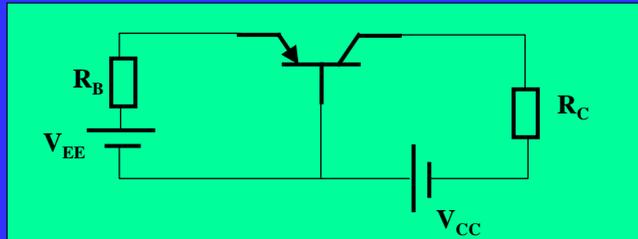
$$V_O = V_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

- Si las concentraciones de Emisor y Colector son iguales, los perfiles de minoritarios sería:



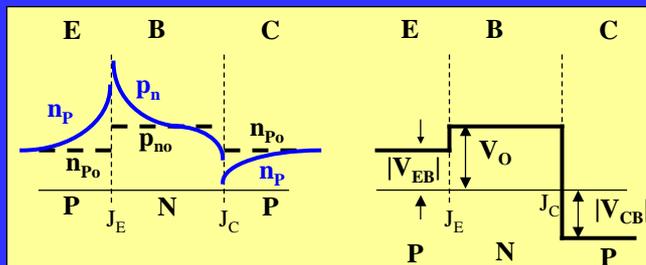
POLARIZACIÓN EN REGIÓN ACTIVA

- Región activa => unión de emisor (J_E) polarizada en directa y la unión de colector (J_C) polarizada en inversa

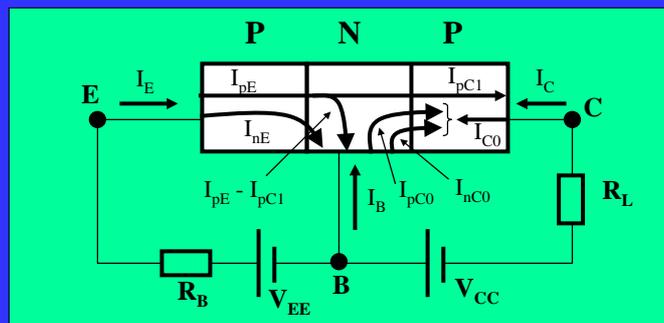


Ley de la unión:

$$p_n(0) = p_{n0} \cdot e^{\frac{V}{\eta \cdot V_T}}$$



COMPONENTES DE LA CORRIENTE



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

↑ Ya que E mucho más impurificado que B

$$I_B = -I_{nE} - \underbrace{(I_{pE} - I_{pC1})}_{\text{Corriente de recombinación en la base}} + I_{pC0} + I_{nC0}$$

$$I_C = I_{C0} - I_{pC1} = I_{C0} - \alpha \cdot I_E \approx -\alpha \cdot I_E$$

↑ $\alpha = \frac{I_{pC1}}{I_E} \approx \frac{|I_C|}{I_E}$

GANANCIA DE CORRIENTE α CON GRANDES SEÑALES

$$\alpha = - \frac{\text{incremento } I_C \text{ desde corte}}{\text{incremento } I_E \text{ desde corte}} = - \frac{I_C - I_{C0}}{I_E - 0}$$

→ I_E en circuito abierto

$0,9 < \alpha < 0,995$

→ Depende de I_E , V_{CB} y Temperatura

ECUACIÓN GENERALIZADA

$$I_C = I_{C0} - \alpha \cdot I_E \approx -\alpha \cdot I_E \quad \text{Sólo es válida en la región activa}$$

- ▶ Para generalizar la ecuación: reemplazar I_{C0} por la corriente de un diodo P-N.

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{J_C}$$

$$I_{\text{diodo}} = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \begin{cases} I_0 = -I_{C0} \\ V = V_{CB} \end{cases} \Rightarrow I_{J_C} = -I_{C0} \left(e^{\frac{V_{CB}}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

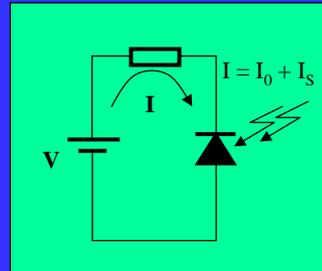
$$I_C = -\alpha \cdot I_E - I_{C0} \left(e^{\frac{V_{CB}}{\eta V_T}} - 1 \right) = -\alpha \cdot I_E + I_{C0} \left(1 - e^{\frac{V_{CB}}{\eta V_T}} \right)$$

Ecuación generalizada del transistor

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{C0} \left(1 - e^{\frac{V_{CB}}{\eta \cdot V_T}} \right)$$

► Ecuación similar a la del fotodiodo:

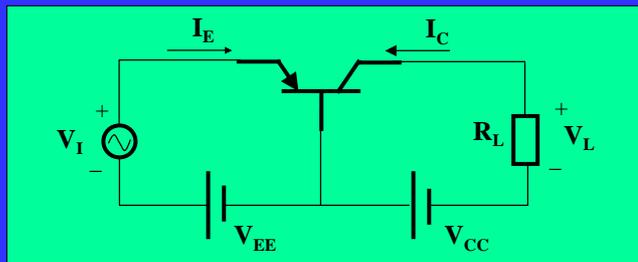
$$I = I_0 \left(1 - e^{\frac{V}{\eta \cdot V_T}} \right) + I_S$$



Aquí los portadores minoritarios son creados por la luz

En el transistor los portadores minoritarios son inyectados por la unión de emisor polarizada en directa

EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR



En zona activa: $I_C \approx -\alpha \cdot I_E$

$$\Delta I_C = -\alpha \cdot \Delta I_E$$

$$\Delta V_L = -R_L \cdot \Delta I_C = R_L \cdot \alpha \cdot \Delta I_E$$

$$\Delta V_I = r_e \cdot \Delta I_E$$

$$A = \frac{\Delta V_L}{\Delta V_I} = \frac{\alpha \cdot R_L \cdot \Delta I_E}{r_e \cdot \Delta I_E} = \frac{\alpha \cdot R_L}{r_e}$$

Ganancia

resistencia dinámica de J_E

$$A = \frac{\alpha \cdot R_L}{r_e}$$

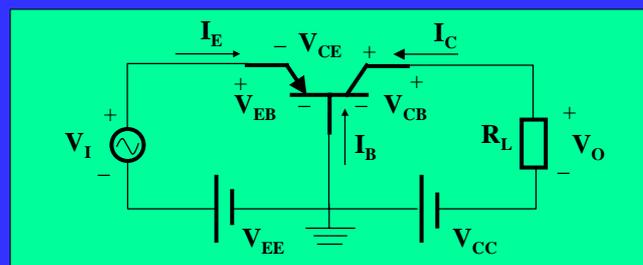
▸ Ejemplo

$$\text{Si } \left\langle \begin{array}{l} r_e = 40\Omega \\ R_L = 3K\Omega \\ \alpha \approx 1 \end{array} \right\rangle \Rightarrow A = 75$$

La corriente se transfiere desde el circuito de entrada, de baja resistencia, al circuito de salida de resistencia más elevada

TRANSISTOR = TRANSFER RESISTOR

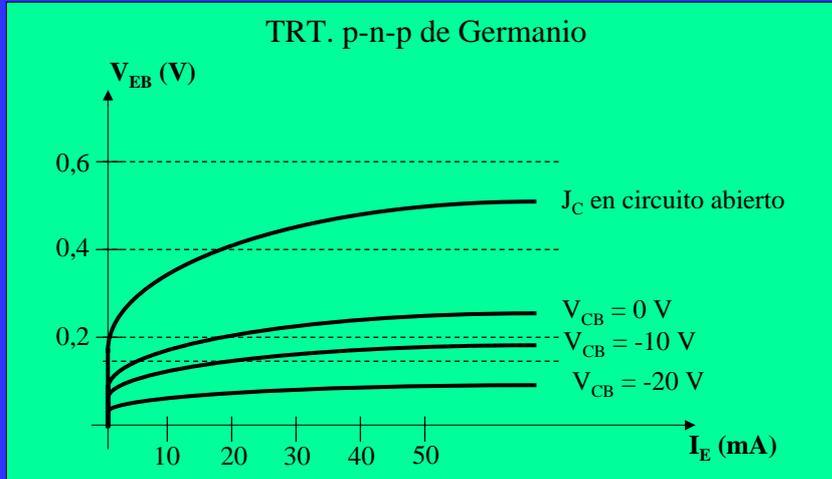
CONFIGURACIÓN EN BASE COMÚN



TRT. pnp en región activa

- I_E positiva
- I_B, I_C negativas
- V_{EB} positiva
- V_{CB} negativa

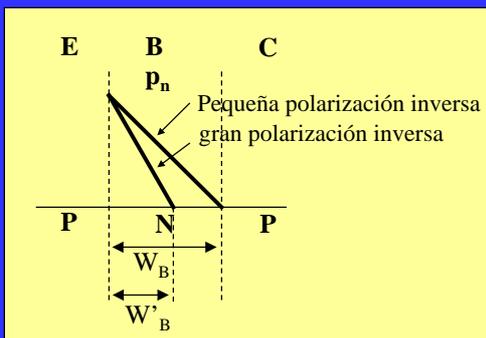
▶ CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA: $V_{EB} = \phi_1(I_E, V_{CB})$



Si $|V_{CB}|$ aumenta con V_{EB} constante $\Rightarrow I_E$ aumenta por el efecto Early (ΔI_E si ∇p_n aumenta)

Efecto Early

Efecto Early: Variación del perfil de concentración de portadores minoritarios en la base con V_{CB}



Anchura efectiva de la base:

$$W'_B = W_B - W$$

↙
↘

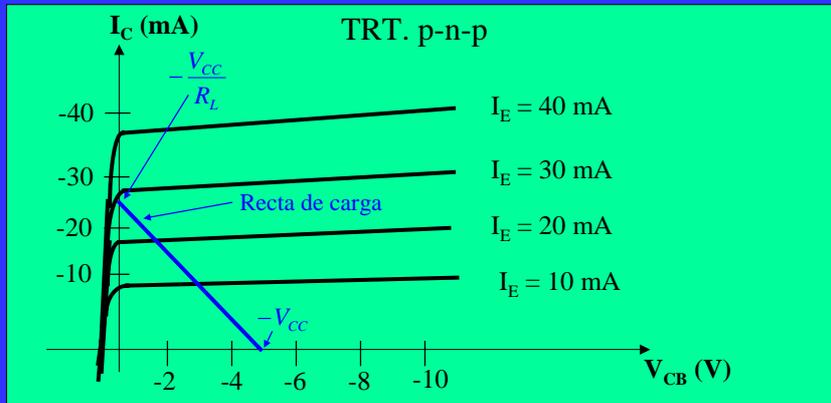
ancho real base ancho zona carga espacial

Consecuencias del efecto Early:

- menor recombinación en la base cuando $|V_{CB}|$ aumenta
- $|V_{CB}|$ aumenta $\Rightarrow \alpha$ aumenta e I_B disminuye
- ∇p_n aumenta cuando $|V_{CB}|$ aumenta $\Rightarrow I_E$ aumenta
- W'_B puede reducirse a cero \Rightarrow peligro de perforación de la base

► CARACTERÍSTICAS DE SALIDA: $I_C = \phi_2(V_{CB}, I_E)$

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{C0} \left(1 - e^{\frac{V_{CB}}{\eta V_T}} \right)$$

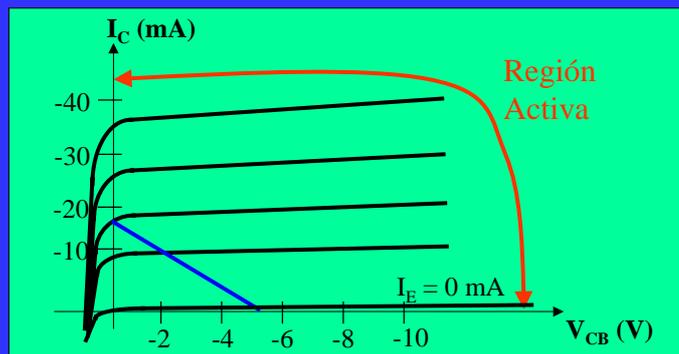


Recta de carga: $V_{CB} = -I_C \cdot R_L - V_{CC}$

$$I_C = -\frac{V_{CC}}{R_L} - \frac{V_{CB}}{R_L} \quad \text{Pendiente: } -\frac{1}{R_L}$$

Región activa

J_E polarizada en directa } Primer cuadrante de la gráfica
 J_C polarizada en inversa }

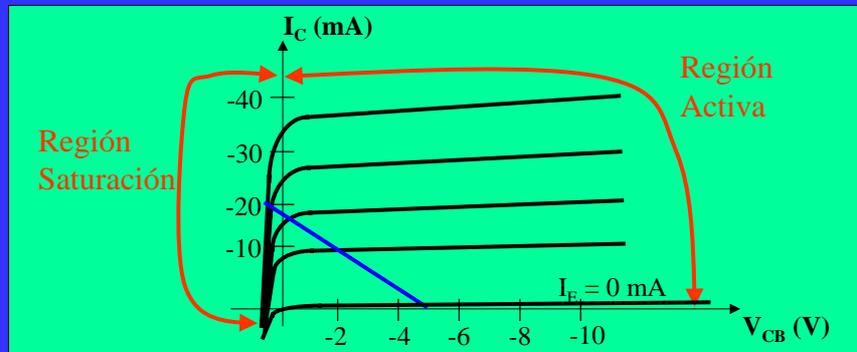


$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{C0} \left(1 - e^{\frac{-|V_{CB}|}{\eta V_T}} \right) \approx -\alpha \cdot I_E$$

I_C prácticamente independiente de V_{CB} ->
 ligera pendiente ($\approx 0,5\%$) por el efecto Early: menor recombinación en la base => α aumenta e I_B disminuye

Región de saturación

J_E polarizada en directa
 J_C polarizada en directa } Segundo cuadrante de la gráfica



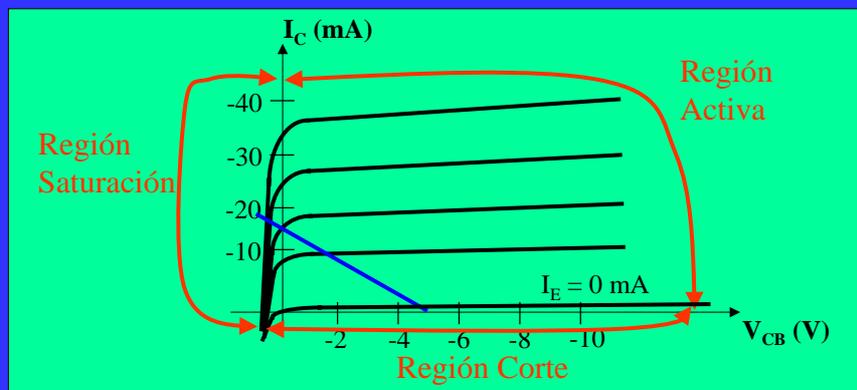
La saturación se produce cuando I_E aumenta demasiado para una determinada $R_L \rightarrow I_C$ aumenta exponencialmente con la tensión V_{CB} de acuerdo con la característica del diodo:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V_{CB}}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

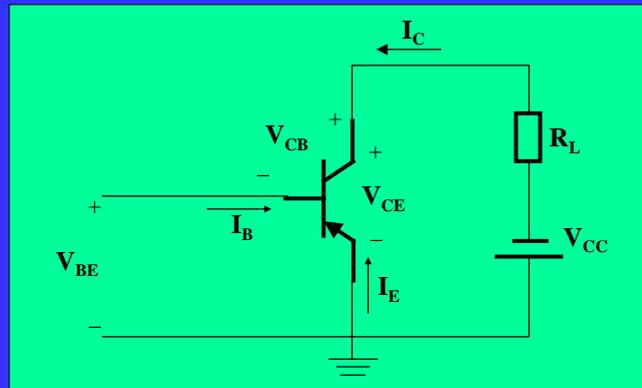
Región de corte

J_E polarizada en inversa
 J_C polarizada en inversa } Prácticamente eje de abscisas

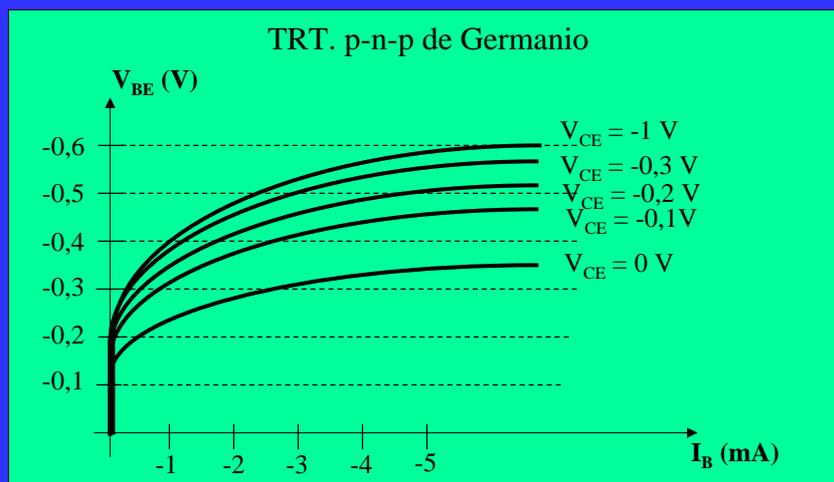
$$I_E \leq 0$$
$$I_C \approx I_{C0}$$



CONFIGURACIÓN EN EMISOR COMÚN

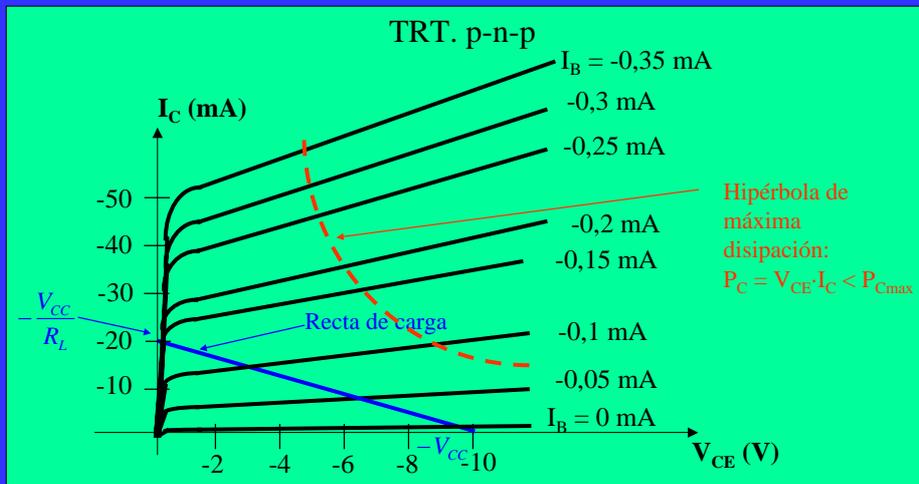


▶ CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA: $V_{BE} = f_1(I_B, V_{CE})$



Si $|V_{CE}|$ aumenta con V_{BE} constante $\Rightarrow I_B$ disminuye por el efecto Early (menor recombinación en la base)

▶ CARACTERÍSTICAS DE SALIDA: $I_C = f_2(V_{CE}, I_B)$

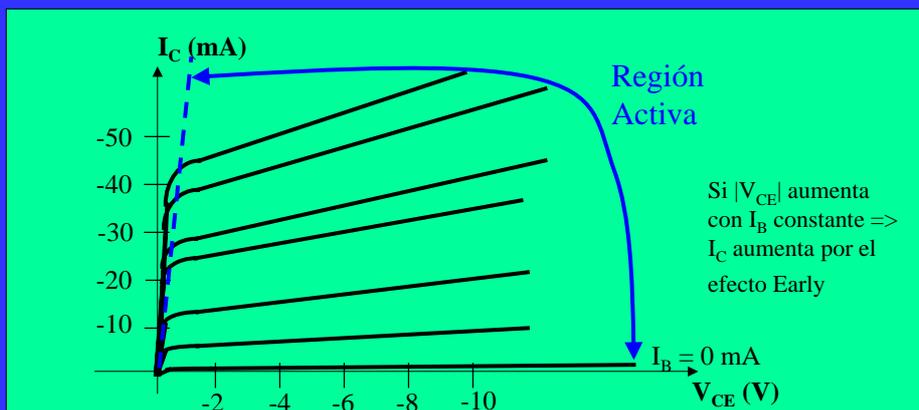


Recta de carga: $V_{CC} + I_C \cdot R_L + V_{CE} = 0$

$$I_C = -\frac{V_{CC}}{R_L} - \frac{V_{CE}}{R_L} \quad \text{Pendiente: } -\frac{1}{R_L}$$

Región activa

J_E polarizada en directa; J_C polarizada en inversa



$$I_C = I_{C0} - \alpha \cdot I_E = I_{C0} + \alpha \cdot (I_C + I_B)$$

$$I_C = \frac{I_{C0}}{1 - \alpha} + \frac{\alpha \cdot I_B}{1 - \alpha} = \frac{I_{C0}}{1 - \alpha} + \beta \cdot I_B = (1 + \beta) \cdot I_{C0} + \beta \cdot I_B$$

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

$$I_C = \frac{I_{C0}}{1-\alpha} + \beta \cdot I_B = \underbrace{(1+\beta)}_{\text{Termino despreciable}} \cdot I_{C0} + \beta \cdot I_B \approx \beta \cdot I_B$$

Termino despreciable, ya que I_{C0} tiene un valor muy pequeño (del orden de μA o nA)

Por lo tanto se puede decir que en zona activa:

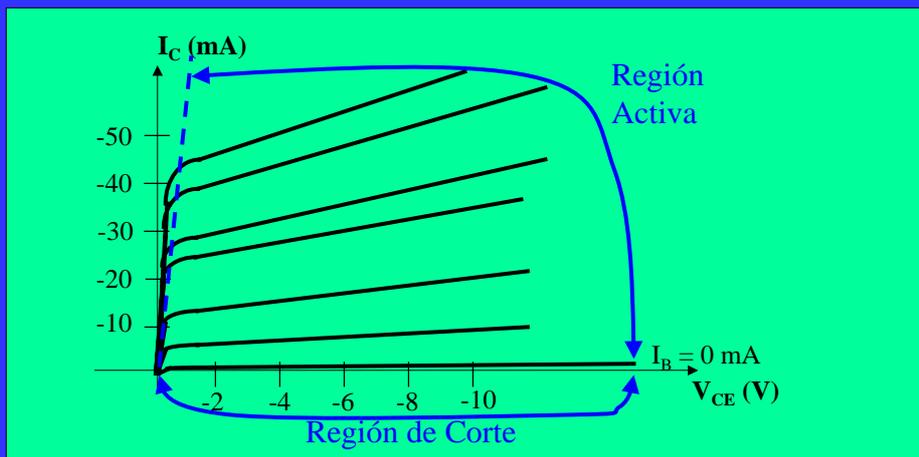
$$I_C \approx \beta \cdot I_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \longrightarrow \text{Parámetro de gran dispersión}$$

$$\begin{aligned} \alpha = 0,9 &\Rightarrow \beta = 9 \\ \alpha = 0,99 &\Rightarrow \beta = 99 \\ \alpha = 0,995 &\Rightarrow \beta = 199 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0,9 < \alpha < 0,995 \\ 9 < \beta < 199 \end{aligned}$$

Región de corte J_E polarizada en inversa; J_C polarizada en inversa



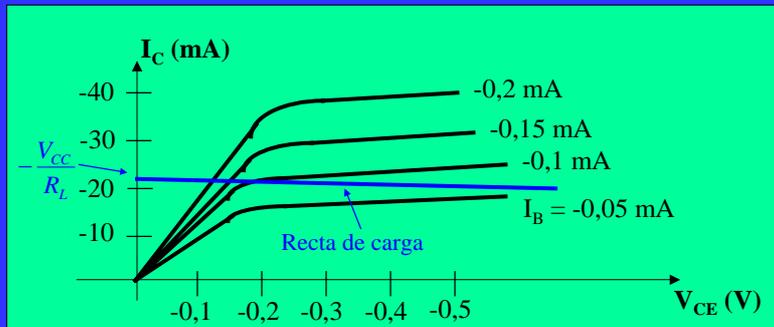
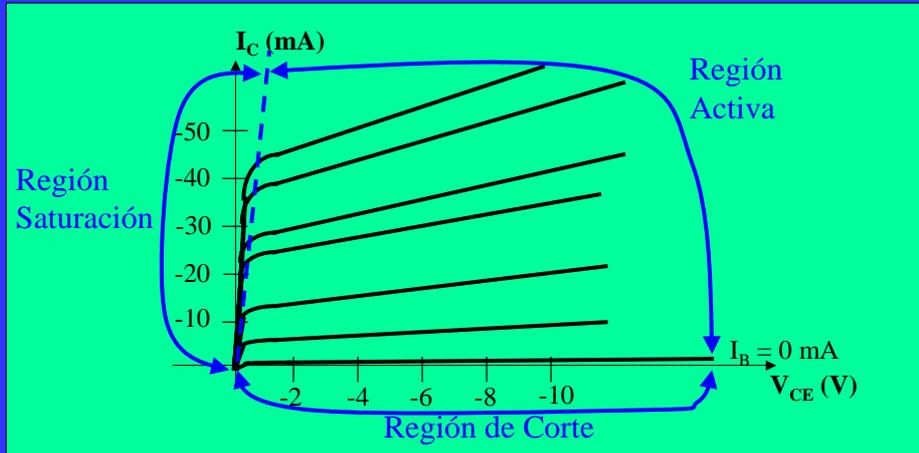
$$I_E = 0 \Rightarrow I_C = -I_B = I_{C0}$$

Realmente I_C es algo superior a I_{C0} debido a las corrientes de fugas superficiales: átomos superficiales \Rightarrow enlaces rotos \Rightarrow huecos

Región de saturación J_E polarizada en directa; J_C polarizada en directa

Se denomina así porque I_C no aumenta más con I_B .

No se cumple $I_C = \beta \cdot I_B$



J_E y J_C polarizadas en directa $\Rightarrow V_{CE} = V_{BE} - V_{BC} =$ décimas de voltio

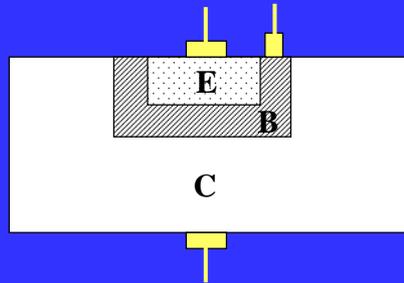
Trt. pnp Ge $\Rightarrow V_{CB} = V_{CE} + V_{EB} > 0,2 \text{ V}$; $V_{CE} > 0,2 \text{ V} - V_{EB} \approx -0,2 \text{ V}$

Recta de carga: $V_{CC} = -I_C \cdot R_L - V_{CE}$

$$I_C = -\frac{V_{CC}}{R_L} - \frac{V_{CE}}{R_L} \approx -\frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$R_{CEsat} = \frac{V_{CEsat}}{I_{Csat}}$$

► RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE BASE (r_{bb})



Construcción planar
(difusión) de transistores

Sección base mucho menor que secciones de emisor y colector. Dopado de base menor que dopado de emisor y colector.

=> resistencia óhmica de la base mucho mayor que la resistencia óhmica del emisor y colector.

La resistencia óhmica de la base se denomina resistencia de dispersión de la base (r_{bb}). Valores típicos en torno a los 100 Ω .

► GANANCIA DE CORRIENTE CONTINUA (β o h_{FE})

* β de continua

Relación directa de transferencia en continua

En zona activa

$$I_C = \frac{I_{C0}}{1-\alpha} + \beta \cdot I_B = (1+\beta) \cdot I_{C0} + \beta \cdot I_B \approx \beta \cdot I_B$$

$$\Rightarrow \frac{I_C}{I_B} = \beta \equiv h_{FE} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

En saturación

$$I_{Csat} \approx \frac{V_{CC}}{R_L}$$

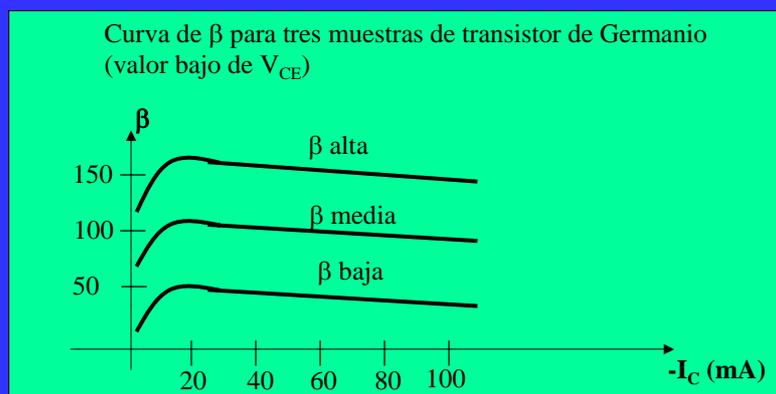
Conociendo β en saturación se puede calcular I_{Bsat}

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} \approx \frac{V_{CC}}{\beta \cdot R_L}$$

→ Corriente de base mínima para saturar al transistor

En saturación => $I_B > I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta}$

El parámetro α depende de I_E , además de T y V_{CB} =>
 β también depende de I_E => β también depende de I_C



β parámetro de gran dispersión

$$0,9 < \alpha < 0,995$$

$$9 < \beta < 199$$

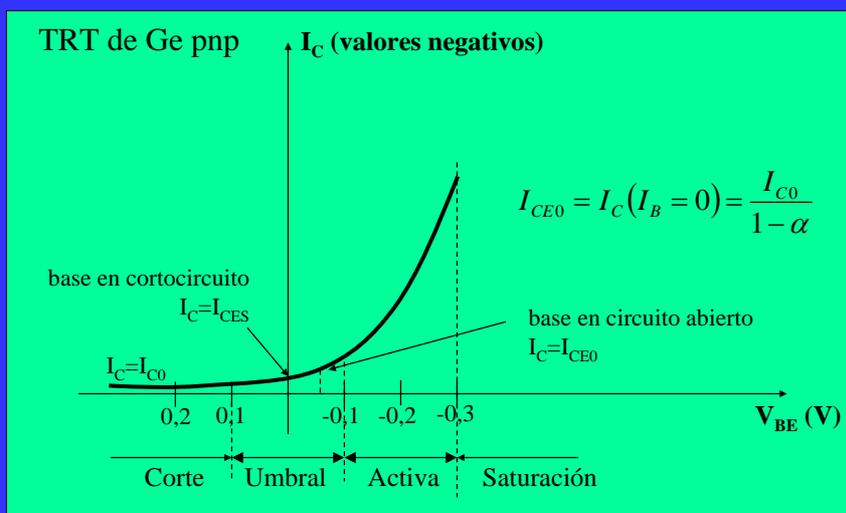
▶ VALORES TÍPICOS DE TENSIONES EN LOS TRANSISTORES

Transistor pnp

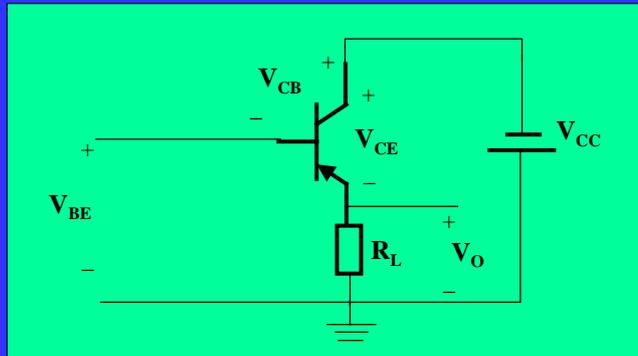
	V_{CEsat}	V_{BEsat}	V_{BEact}	$V_{BEumbral}$	$V_{CEcorte}$
Si	-0,2 V	-0,8 V	-0,7 V	-0,5 V	0 V
Ge	-0,1 V	-0,3 V	-0,2 V	-0,1 V	0,1 V

Transistor npn => mismos valores pero con signos contrarios

▶ CURVAS DE CORRIENTE DE COLECTOR EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN BASE-EMISOR



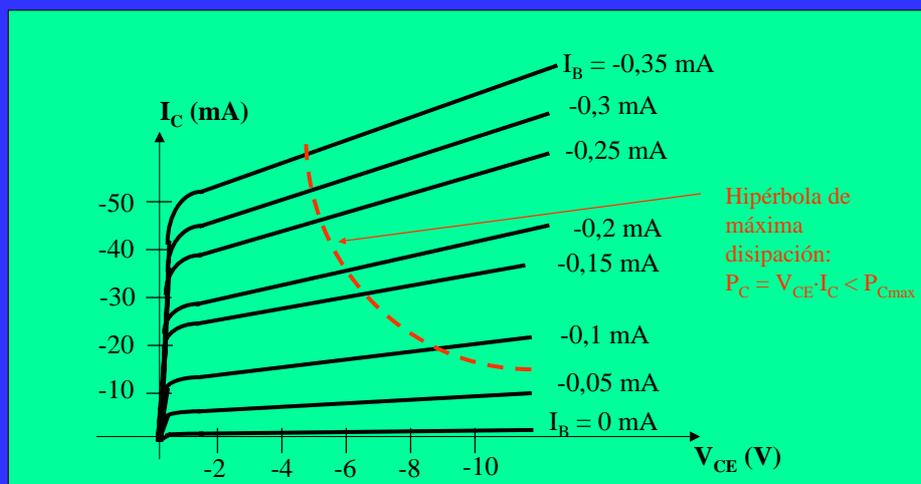
CONFIGURACIÓN EN COLECTOR COMÚN (SEGUIDOR DE EMISOR)



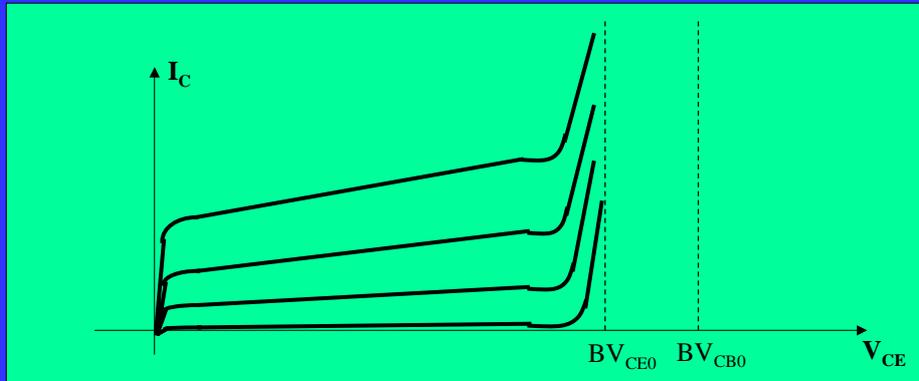
Mismas gráficas que en Emisor Común

MÁXIMA TENSIÓN ALCANZABLE

► POTENCIA MÁXIMA



▶ RUPTURA POR AVALANCHA



BV_{CB0} -> máxima tensión C-B con Emisor en circuito abierto

BV_{CE0} -> máxima tensión C-E con Base en circuito abierto

$$BV_{CE0} = BV_{CB0}^n \sqrt{\frac{1}{\beta}}; \quad 2 < n < 10$$

▶ RUPTURA POR PERFORACIÓN

Debido al efecto Early la ampliación de la zona de carga espacial al aumentar la polarización inversa de la unión de colector con V_{CB} , puede llegar a ocupar toda la base =>

la base desaparece (se produce perforación) =>

corriente de colector a emisor aumenta enormemente y se puede destruir el transistor.

El límite máximo de tensión viene dado por la potencia máxima, la avalancha o la perforación. El límite lo marca el valor más restrictivo, es decir, la tensión que sea más baja en cada transistor.