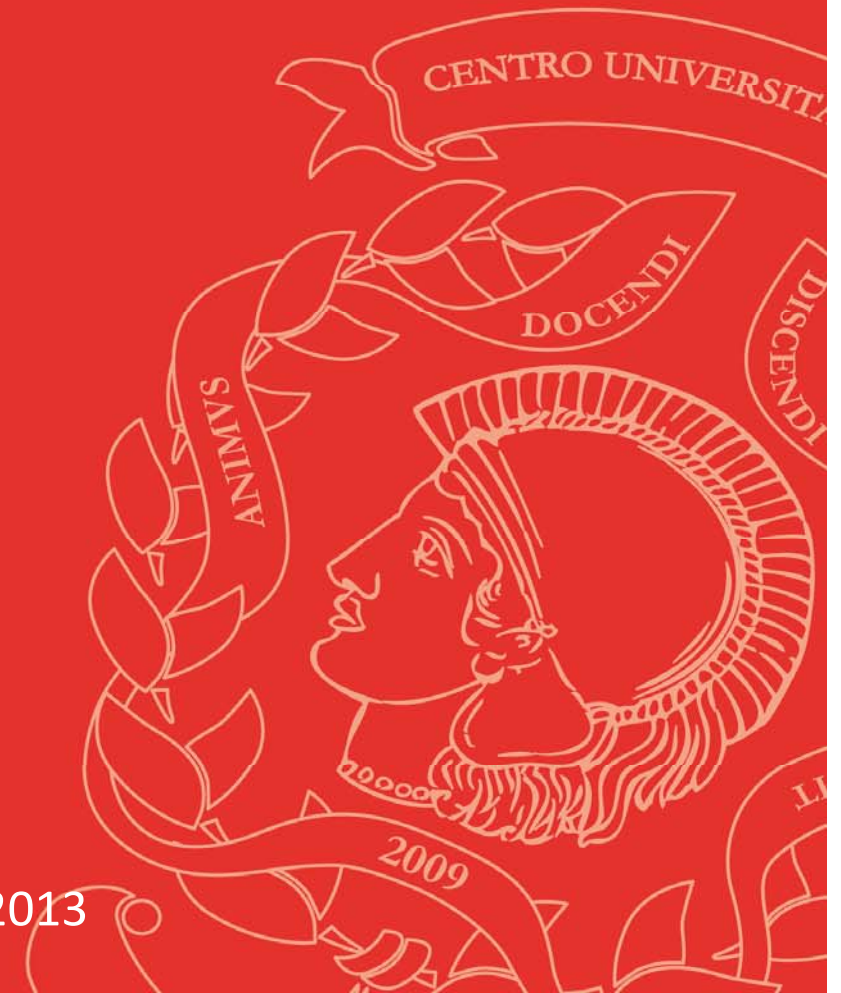




**Centro Universitario  
de la Defensa Zaragoza**

# TRANSISTOR BIPOLAR: TEMA 2.1

Zaragoza, 12 de noviembre de 2013



# TRANSISTOR BIPOLAR

## Tema 2.1

- Introducción
- Las corrientes en el BJT
- Ecuaciones de Ebers-Moll



# TRANSISTOR BIPOLAR

## Tema 2.1

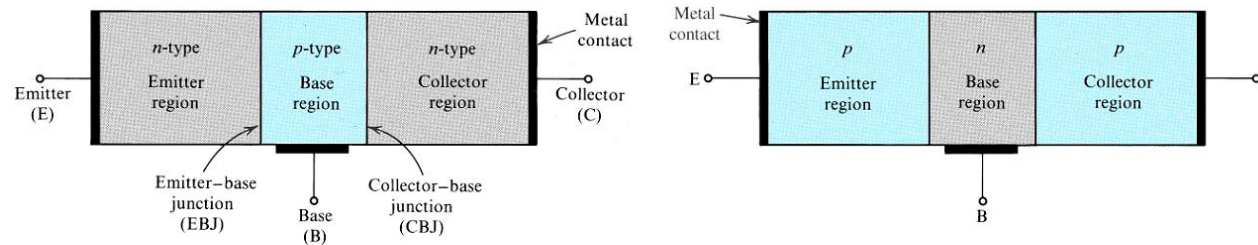
- Introducción
- Las corrientes en el BJT
- Ecuaciones de Ebers-Moll



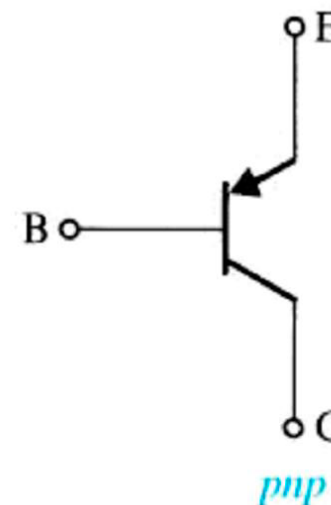
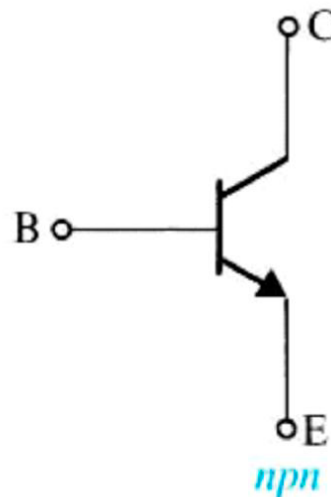
- El transistor bipolar de unión fue el primer dispositivo activo de estado sólido
- Inventado en 1949 en los Laboratorios Bell por W. Shockley, J. Bardeen y W. Brattain (Premio Nobel en 1956)
- Fueron construidos originalmente en Germanio



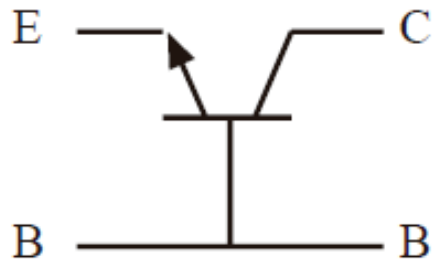
- El BJT (bipolar junction transistor) es un dispositivo formado por dos uniones PN con tres terminales llamados emisor, base y colector.
- Aplicaciones:
  - Analógicas: amplificadores, seguidores de tensión, ...
  - Digitales: conmutadores
- Hay dos tipos, npn y pnp:



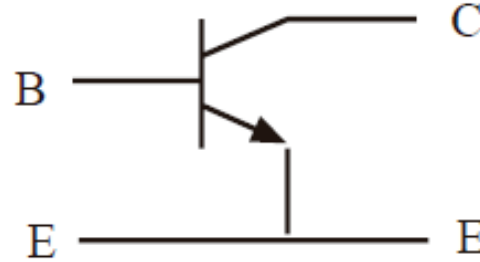
La flecha situada en el Emisor indica el sentido de la corriente.  
(La dirección es del p al n)



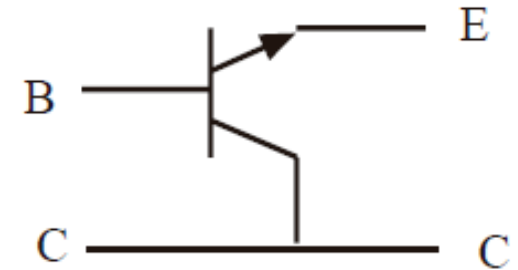
# CONFIGURACIONES



Base común



Emisor común



Colector común

En cada configuración uno de los terminales es común para la entrada y la salida



# OBJETIVO

- El objetivo del análisis de un circuito es conocer los valores de tensión y corriente.

INCOGNITAS:

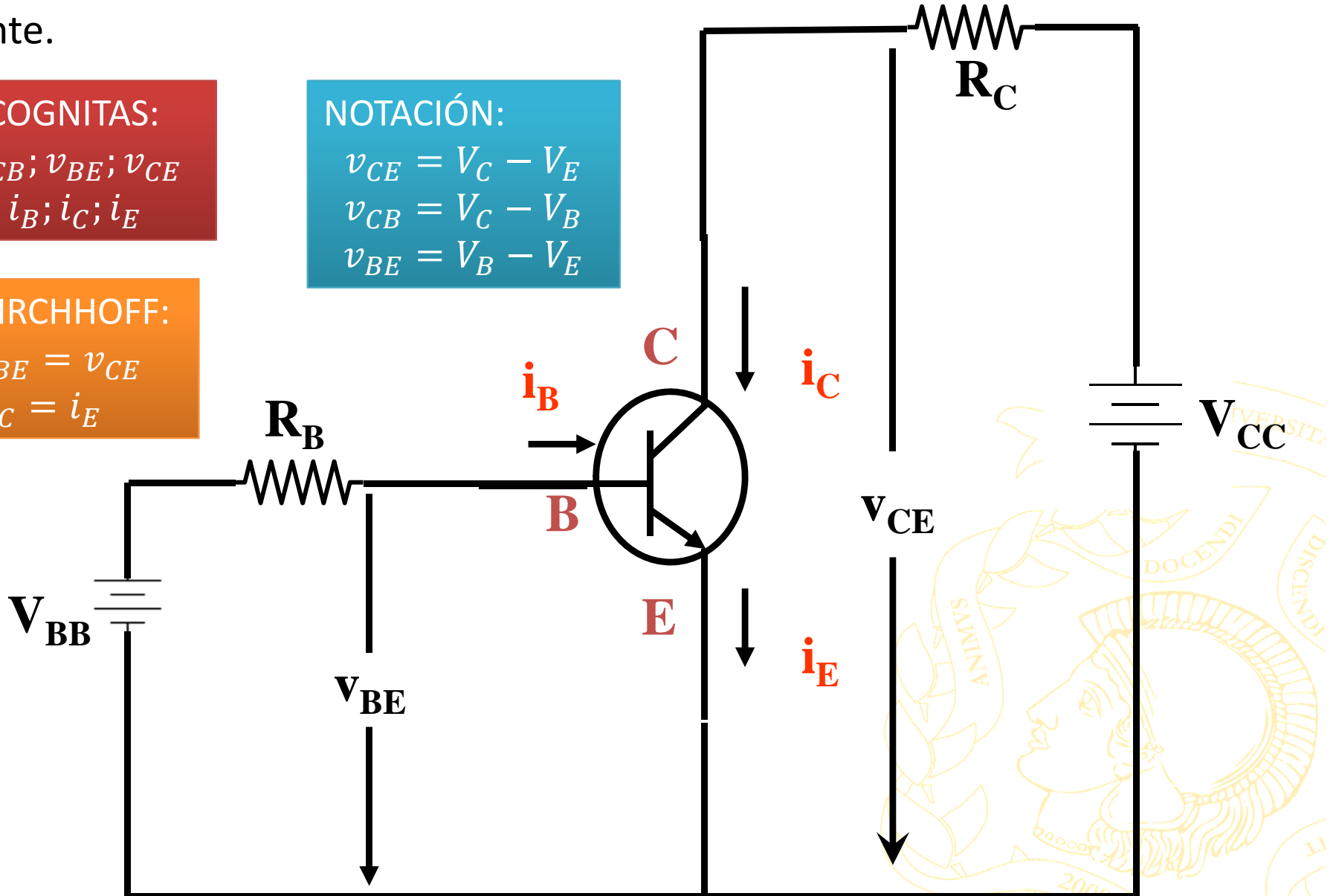
$$v_{CB}; v_{BE}; v_{CE}$$
$$i_B; i_C; i_E$$

NOTACIÓN:

$$v_{CE} = V_C - V_E$$
$$v_{CB} = V_C - V_B$$
$$v_{BE} = V_B - V_E$$

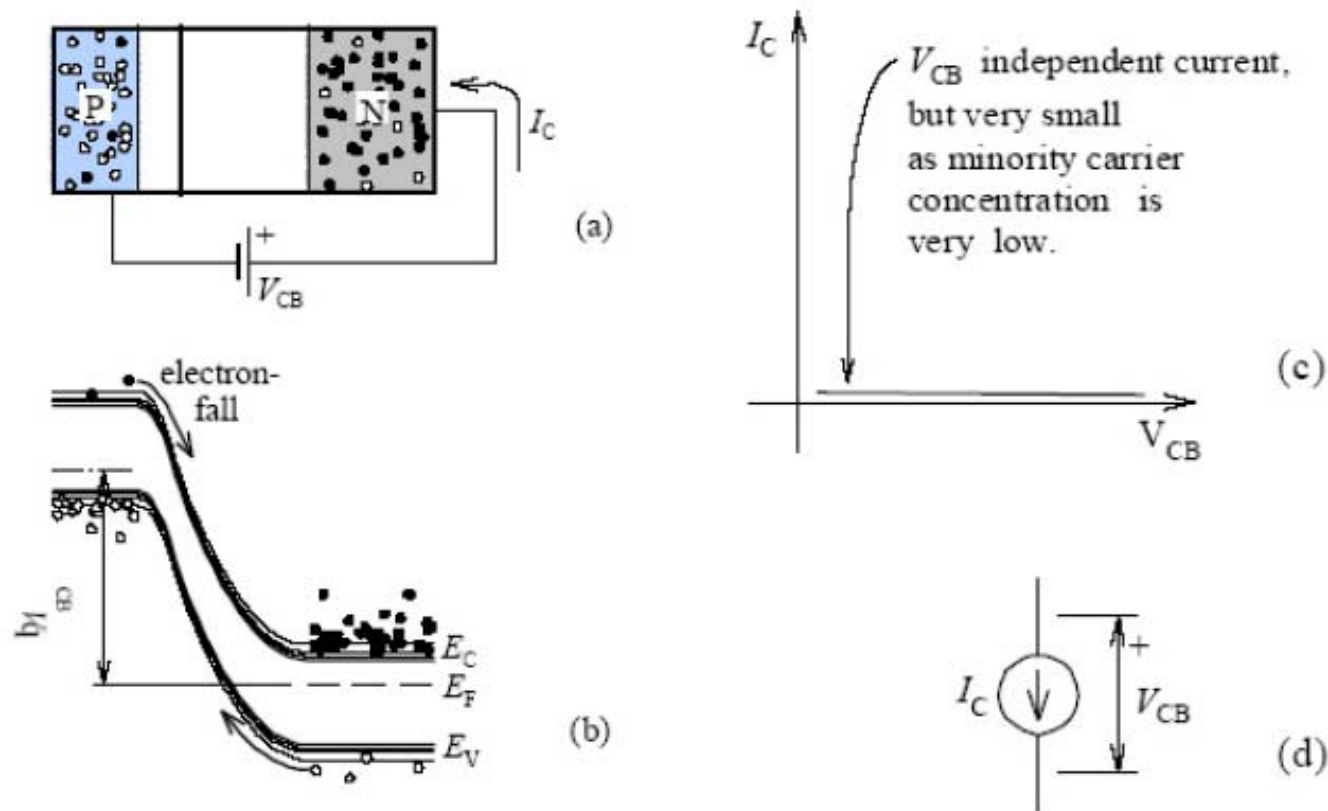
LEYES DE KIRCHHOFF:

$$v_{CB} + v_{BE} = v_{CE}$$
$$i_B + i_C = i_E$$



# EL BJT COMO FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR VOLTAJE

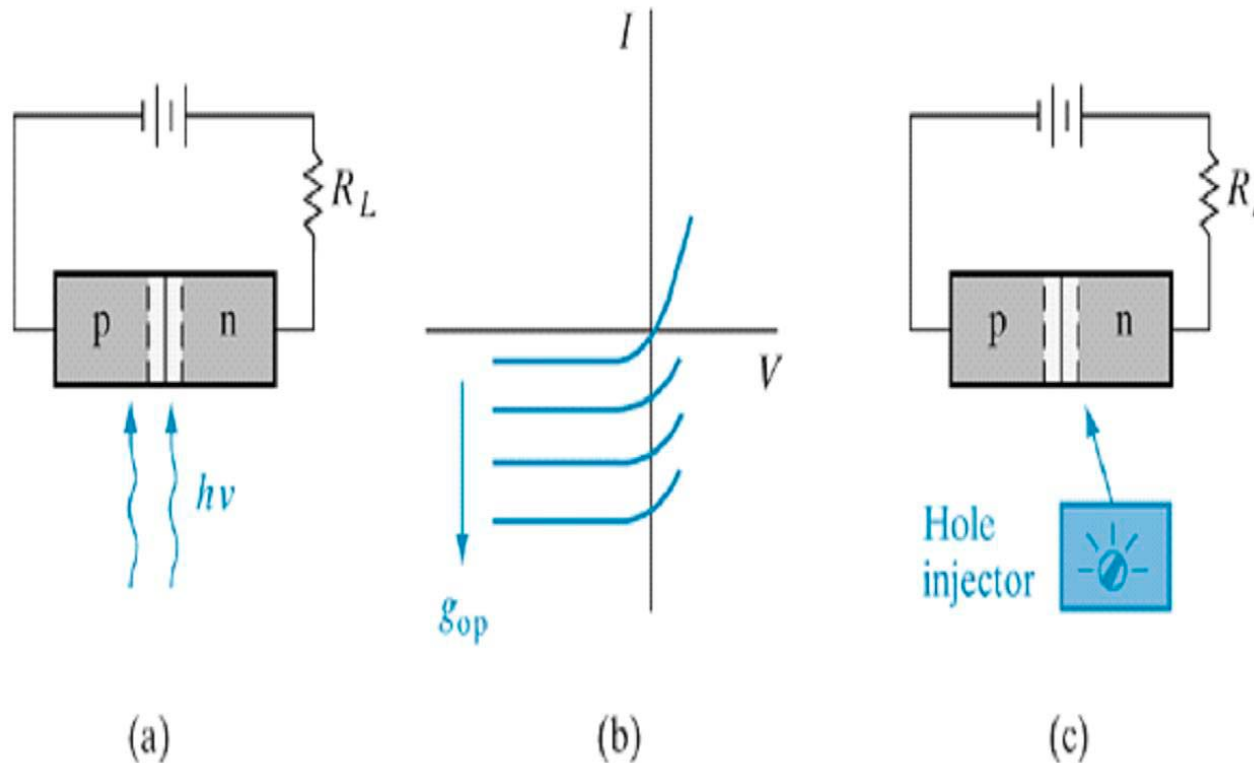
- Una fuente de corriente controlada por voltaje se puede comportar como un amplificador de tensión.
- Supongamos una unión PN polarizada en inverso. Se puede considerar que es una fuente de corriente casi ideal porque la corriente que la atraviesa es independiente de la tensión entre sus extremos:





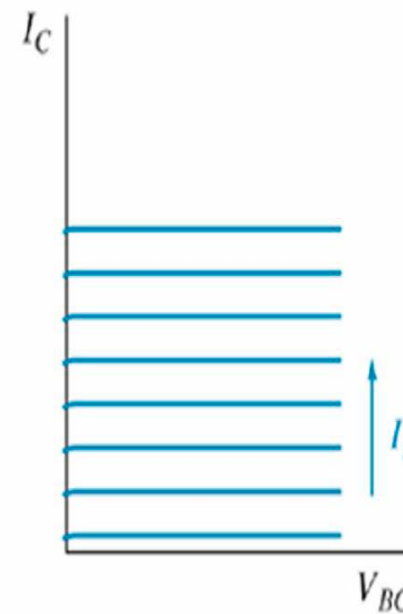
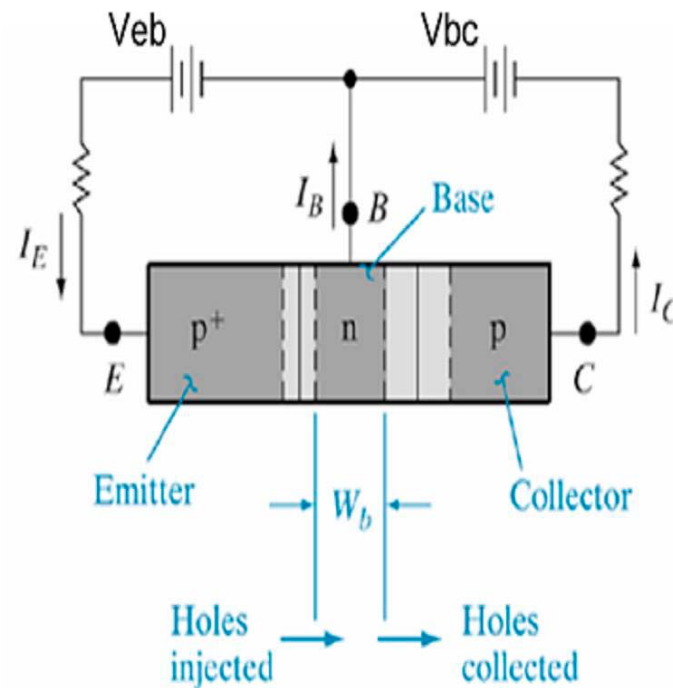
# EL BJT COMO FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR VOLTAJE

- Inconveniente: la corriente es muy pequeña ( $I_S$ ) y está limitada por la generación térmica de minoritarios en las cercanías de la unión
- Podría incrementarse generando minoritarios (ej. iluminando)n:



# EL BJT COMO FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR VOLTAJE

- Es interesante poder realizar este control de forma eléctrica
- En una unión P<sup>+</sup>N se inyectan huecos en la zona N desde la zona P<sup>+</sup>
- El número de huecos inyectados depende de la tensión aplicada en esta unión => tenemos una fuente de corriente controlada por tensión



# TRANSISTOR BIPOLAR

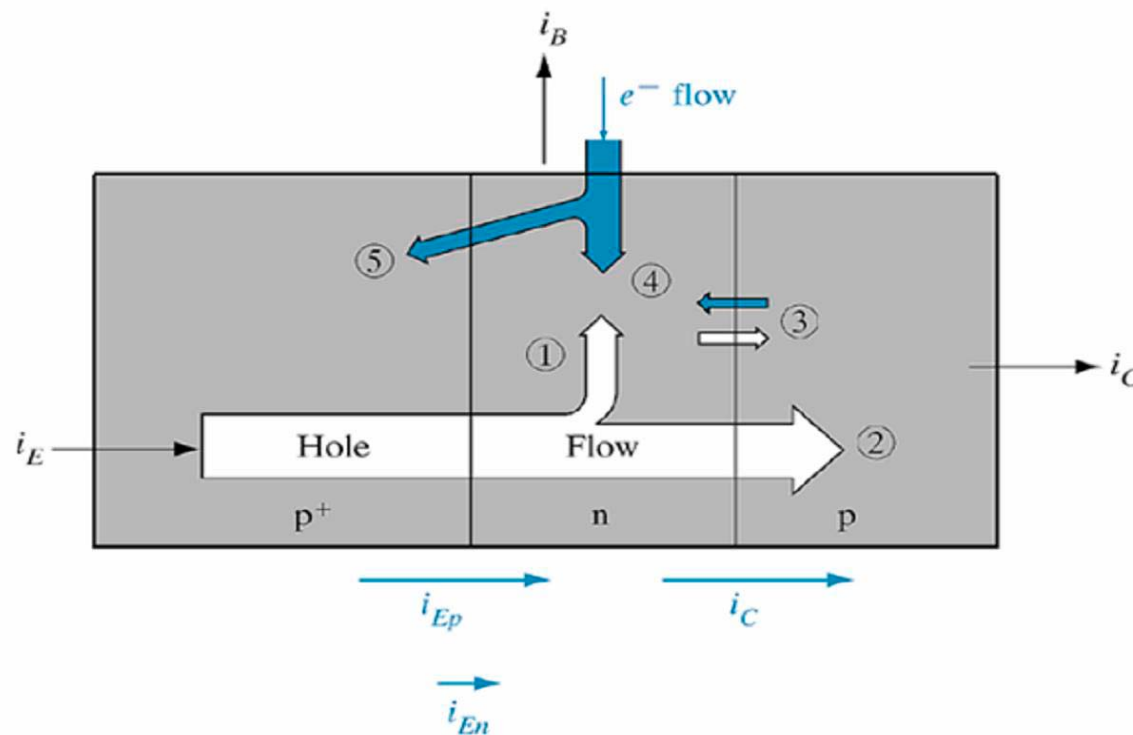
## Tema 2.1

- Introducción
- Las corrientes en el BJT
- Ecuaciones de Ebers-Moll



# LAS CORRIENTES EN EL BJT. FLUJO DE PORTADORES

1. Huecos inyectados que se recombinan sin llegar al colector
2. Huecos inyectados en el colector
3. Corriente inversa de saturación en la unión PN de la base y el colector
4. Electrones suministrados por el contacto de base para recombinarse con los huecos en la base
5. Electrones inyectados en el emisor debido a que el emisor y la base forman una unión PN polarizada en directo



- En un buen transistor, casi todos los huecos aportados por el emisor llegan al colector => poca recombinación en la base. Se define el factor de transporte:

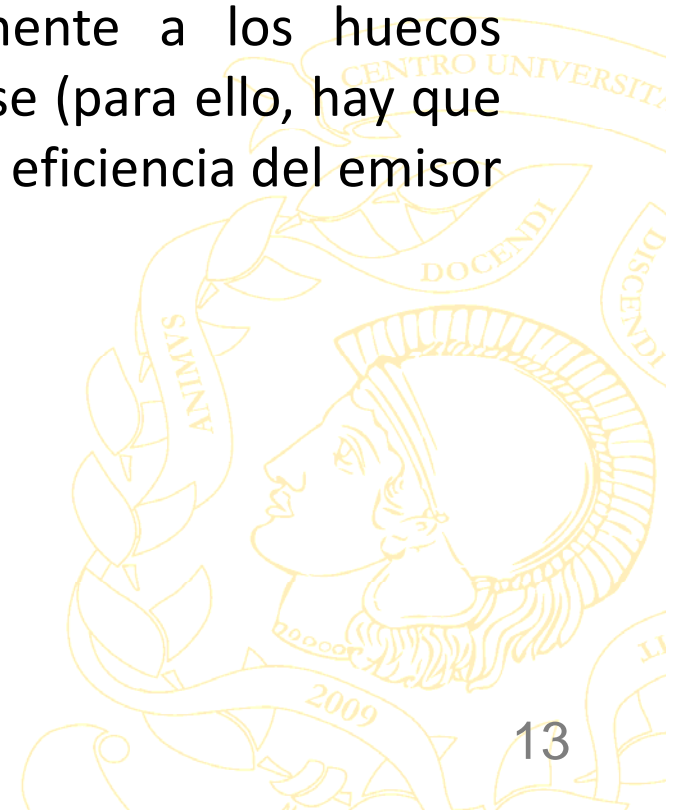
$$\alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \approx \frac{I_C}{I_{Ep}}$$

En un buen transistor,  $\alpha_T \sim 1$

- La corriente de emisor se debe casi exclusivamente a los huecos inyectados, no a los electrones procedentes de la base (para ello, hay que dopar el emisor mucho más que la base). Se define la eficiencia del emisor como:

$$\gamma \equiv \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

En un buen transistor,  $\gamma \sim 1$



- Ganancia en base común

$$\alpha_F \equiv \frac{I_C}{I_E} \approx \frac{I_{Cp}}{I_{Ep} + I_{En}} = \alpha_T \gamma$$

En un buen transistor,  $\alpha_F \sim 1$

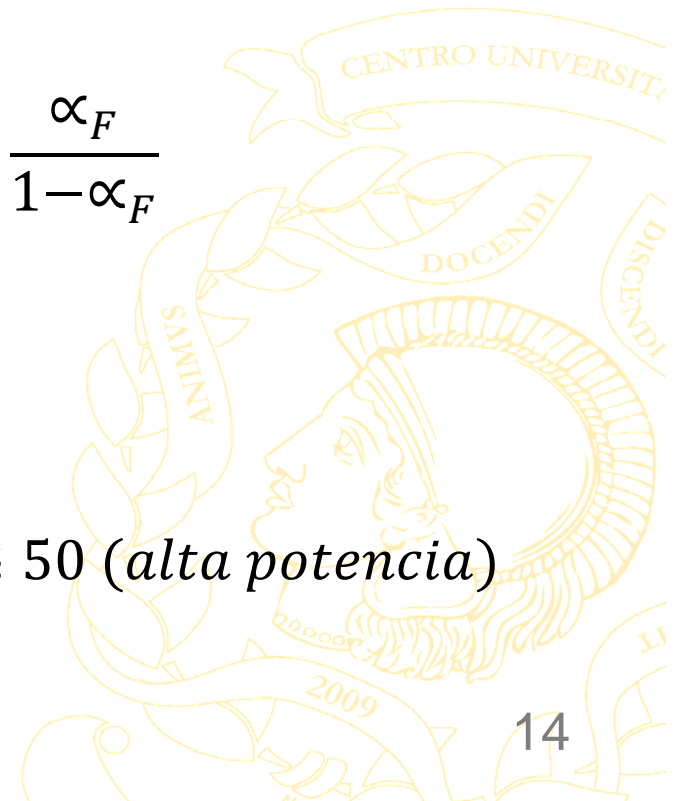
- Ganancia en emisor común

$$\beta_F \equiv \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{1}{\frac{I_E}{I_C} - 1} = \frac{1}{\alpha_F^{-1} - 1} = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

De donde también se deduce que:

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1}$$

Si  $\alpha_F \sim 1 \Rightarrow \beta_F \uparrow$ .     $\beta_F \cong 200$  (baja potencia)     $\beta_F \cong 50$  (alta potencia)



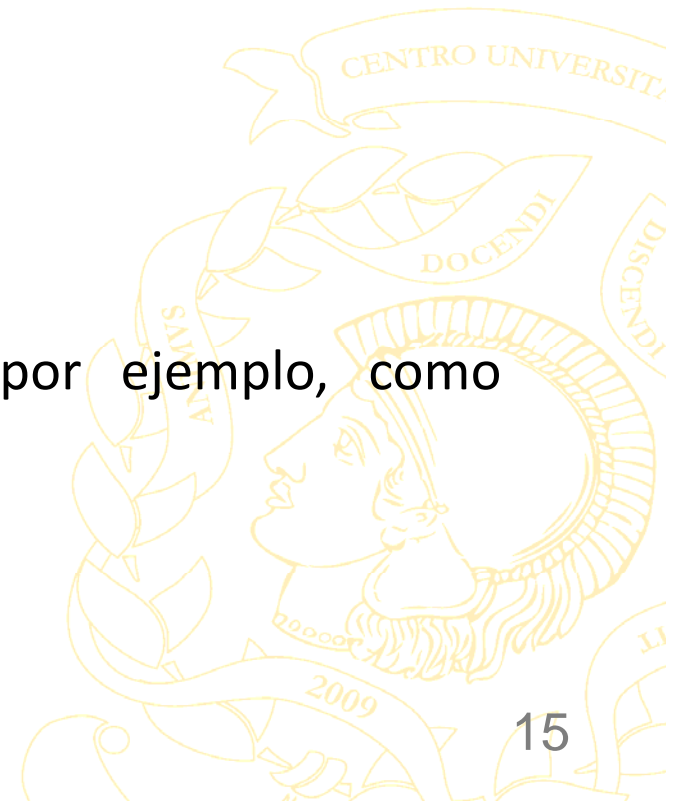
## Activa directa

- Es el modo anteriormente analizado:
  - unión BE en directo:  $|V_{BE}| \approx 0.7 V$
  - unión BC en inverso

- Se cumple:

$$I_C = \alpha_F I_E$$
$$I_C = \beta_F I_B$$

- Se usa sobre todo en aplicaciones analógicas (por ejemplo, como amplificador)



## Saturación

- Unión BE en directo:  $|V_{BE}| \approx 0.7 V$
  - Unión BC en directo:  $|V_{BC}| \approx 0.6 V$
- En estas condiciones la inyección de portadores ocurre desde el emisor, pero también desde el colector y, por tanto, se verifica (como luego comprobaremos con más detalle) que:

$$I_C < \alpha_F I_E$$
$$I_C < \beta_F I_B$$

- La diferencia de tensión entre el emisor y el colector es del orden de 0-0.2 V. Por ejemplo, para un pnp:

$$V_{EC} = V_{EB} + V_{CB} \approx (0,7 - 0,6) V = 0,1 V$$



## Modo de Corte

- Las dos uniones están en inverso => no hay inyección de portadores del emisor al colector
- Las corrientes son prácticamente nulas
- Los modos de corte y saturación se emplean sobre todo en aplicaciones digitales

## Activa inversa

- Unión BE en inverso
- Unión BC en directo:  $|V_{BC}| \approx 0.6 V$
- Normalmente el transistor no opera en esta región. Recuérdese que el BJT no es completamente simétrico y está optimizado para trabajar en modo activo normal (ej. el emisor se dopa más que el colector).

# TRANSISTOR BIPOLAR

## Tema 2.1

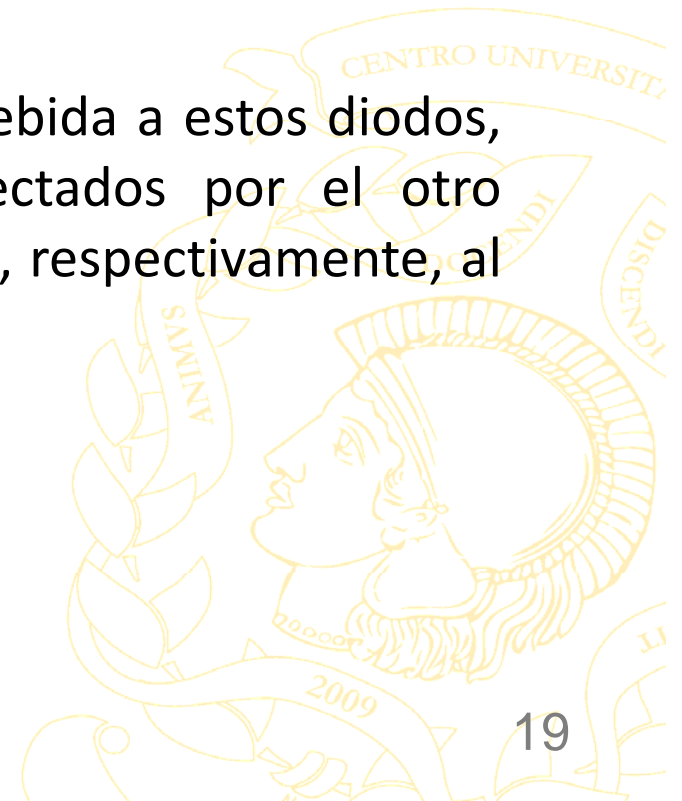
- Introducción
- Las corrientes en el BJT
- Ecuaciones de Ebers-Moll



# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS. ECS DE EBERS-MOLL

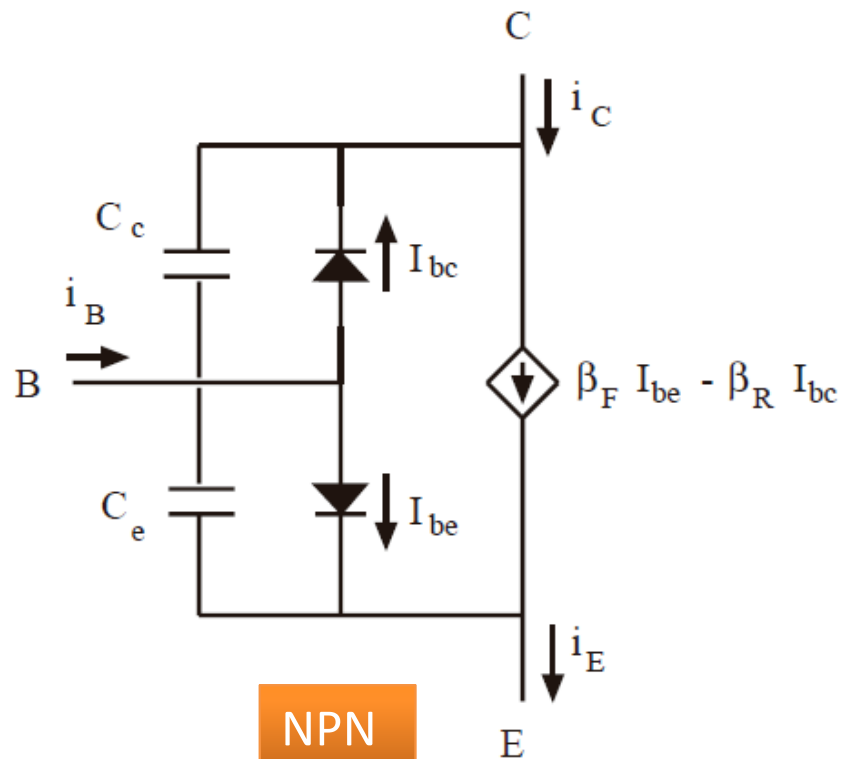
Para obtener las corrientes que circulan por el transistor nos basamos en que:

- Se buscan expresiones dependientes de parámetros fácilmente medibles.
- Para ello, se basan en que la inyección de portadores en la base se puede descomponer en dos contribuciones debidas a dos diodos independientes.
- Pero además de la corriente de emisor o colector debida a estos diodos, debemos superponer la contribución de los inyectados por el otro electrodo (colector o emisor) en la base y que llegan, respectivamente, al emisor o al colector.



# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS.

## ECS DE EBERS-MOLL



$$I_{be} = I_{se} \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_{bc} = I_{sc} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

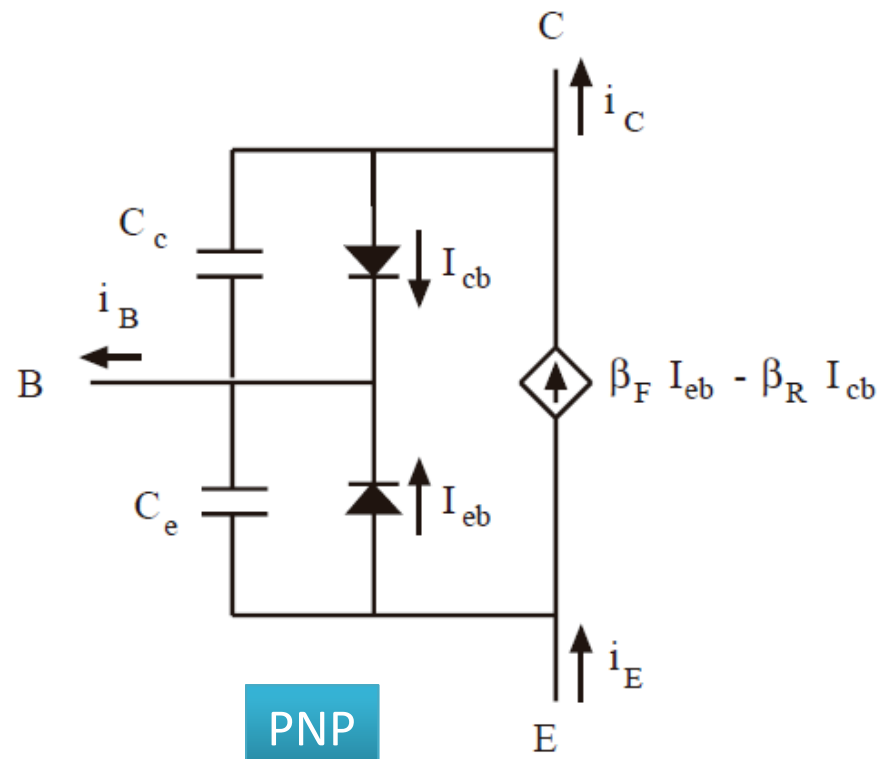
$I_{se}, I_{sc}$  corrientes de saturación

$$I_{se}\beta_F = I_{sc}\beta_R = I_s$$

Ejemplo:  $\beta_F = 100$

$$\beta_R = 1$$

$$I_s = 10^{-16} \text{ A}$$



$$I_{eb} = I_{se} \left( e^{v_{EB}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_{cb} = I_{sc} \left( e^{v_{CB}/V_T} - 1 \right)$$

$\beta_F$  - ganancia en directa

$\beta_R$  - ganancia en inversa

$$\beta_F \gg \beta_R$$

# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS. ECS DE EBERS-MOLL

- Vemos pues que este modelo está descrito por la corriente de dos diodos independientes y de dos fuentes de corriente que dan cuenta del acoplamiento entre las dos uniones de la estructura.
- Las ecuaciones de Ebers-Moll son las expresiones que relacionan las corrientes y tensiones en el BJT de acuerdo con este modelo de diodos acoplados.



NPN

$$\begin{aligned}i_C &= \beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc} - I_{bc} = \beta_F I_{be} - (\beta_R + 1) I_{bc} \\i_E &= \beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc} + I_{be} = (\beta_F + 1) I_{be} - \beta_R I_{bc} \\i_B &= I_{be} + I_{bc}\end{aligned}$$

$I_{se}$  e  $I_{sc}$  son corrientes inversas de saturación de los dos diodos del modelo y se cumple la siguiente relación:  $I_{se}\beta_F = I_{sc}\beta_R = I_s$

Aplicando esta relación a la ecuación anterior nos queda:

Ecuaciones Ebers-Moll

$$\begin{aligned}i_E &= \frac{I_s}{\alpha_F} (e^{v_{BE}/V_T} - 1) - I_s (e^{v_{BC}/V_T} - 1) \\i_C &= I_s (e^{v_{BE}/V_T} - 1) - \frac{I_s}{\alpha_R} (e^{v_{BC}/V_T} - 1)\end{aligned}$$

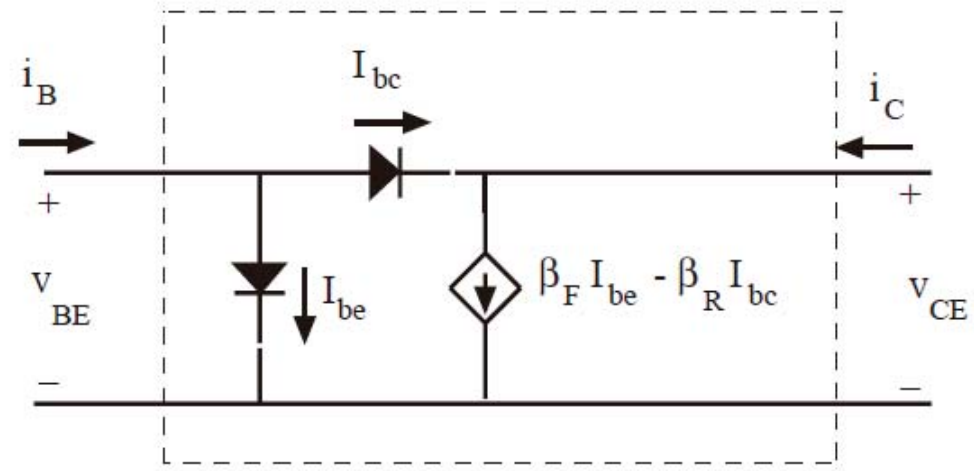
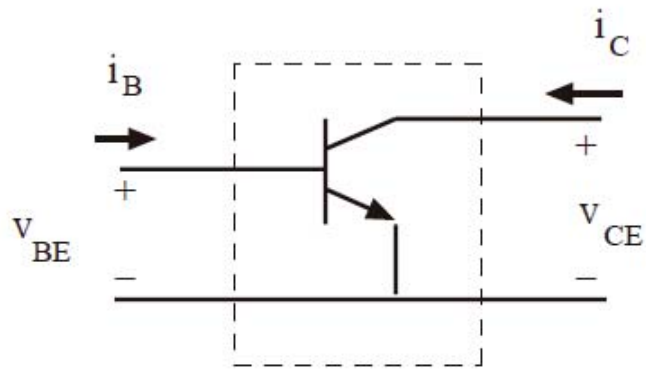
- Con el convenio de signos seguido en este trabajo, en el caso de un transistor npn las ecuaciones son exactamente iguales que las de un pnp. Sólo hay que cambiar las tensiones de signo o, lo que es lo mismo, sustituir  $v_{EB}$  por  $v_{EB}$  y  $v_{CB}$  por  $v_{BC}$

PNP

$$\begin{aligned}i_c &= \beta_F I_{eb} - \beta_R I_{cb} - I_{cb} \\i_E &= \beta_F I_{eb} - \beta_R I_{cb} + I_{eb} = (\beta_F + 1) I_{eb} - \beta_R I_{cb} \\i_B &= I_{eb} + I_{cb}\end{aligned}$$



### Emisor común



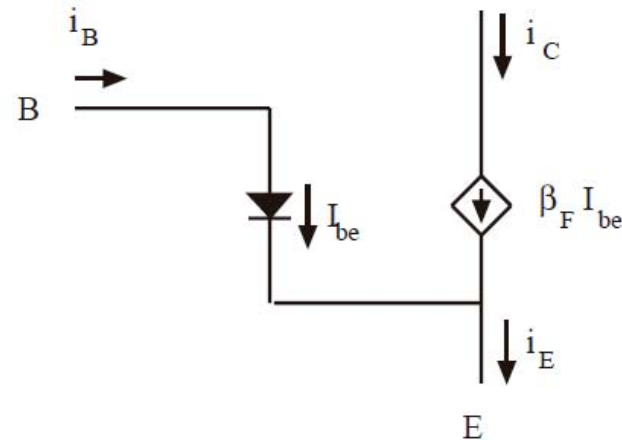
La corriente que circula por el colector  $I_C$  se controla mediante la corriente de base  $I_B$ .

- La representación gráfica de la relación entre  $(i_B, v_{BE})$  se denomina curvas **características de entrada**. (Se suelen representar varias curvas para diferentes valores de  $v_{CE}$ )
- La representación gráfica de la relación entre  $(i_C, v_{CE})$  se denomina curvas **características de salida**. (Se suelen representar varias curvas para diferentes valores de  $i_B$ )

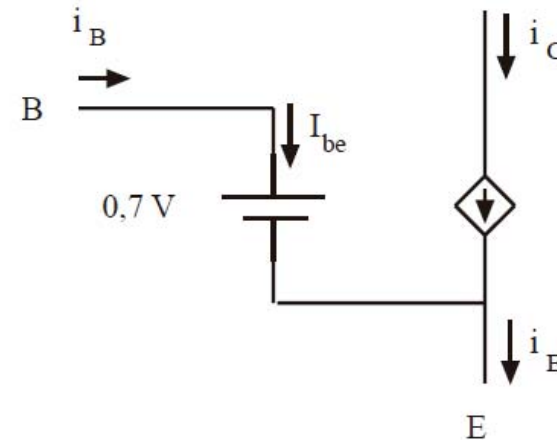


### Región activa

- $v_{BE} > 0$
- $v_{BC} < 0 \Rightarrow I_{bc} \approx 0$ . El diodo colector puede aproximarse por un circuito abierto.



Circuito equivalente



Circuito aproximado

$$i_B \cong I_{be} = I_{se} \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

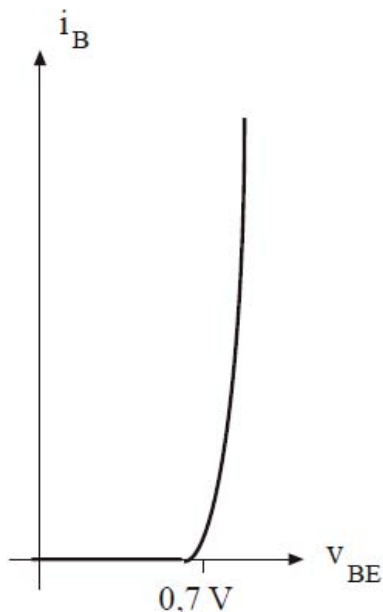
$$i_C \cong \beta_F I_{be} = \beta_F i_B$$

$$i_E = i_C + i_B = (\beta_F + 1) i_B = \left[ \frac{\beta_F + 1}{\beta_F} \right] i_C = \frac{1}{\alpha_F} i_C$$

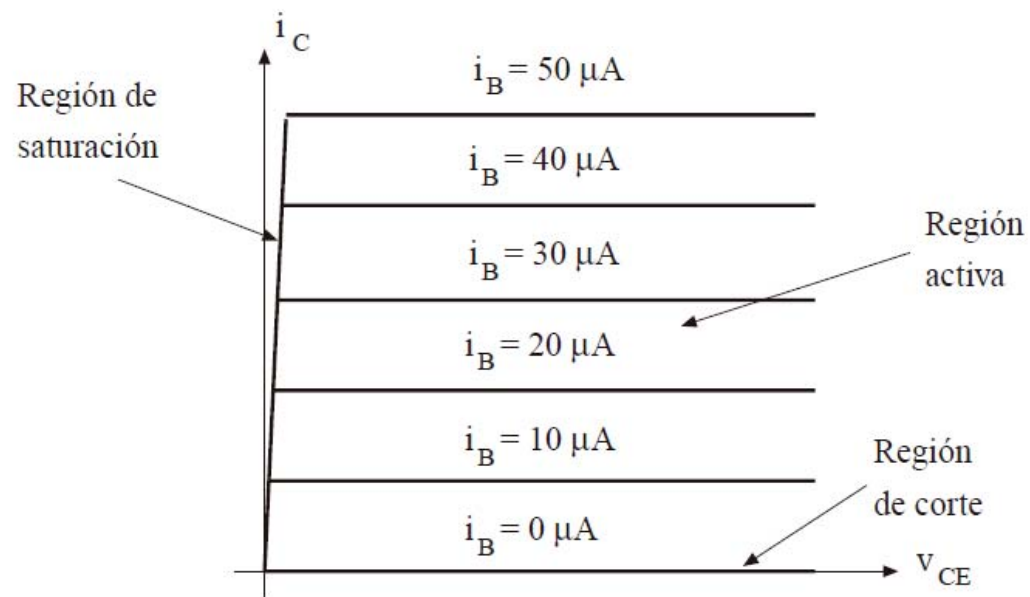


### ➤ Observaciones

- La característica de entrada es la curva del diodo emisor que es independiente de  $v_{CE}$
- La característica de salida son rectas horizontales (la corriente de colector es independiente de la tensión de salida)
- La corriente de colector es constante y vale  $\beta_F$  veces la de base  $\Rightarrow \beta_F$  ganancia en configuración emisor común



Característica de entrada



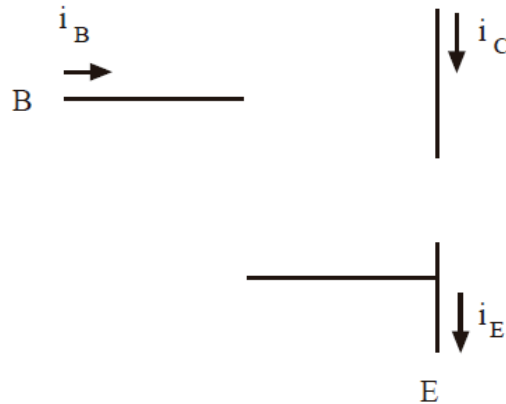
Característica de salida



# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS. ECS DE EBERS-MOLL

## Región de corte

- $v_{BE} < 0 \Rightarrow I_{be} \approx 0$ . El diodo colector puede aproximarse por un circuito abierto.
- $v_{BC} < 0 \Rightarrow I_{bc} \approx 0$ . El diodo emisor puede aproximarse por un circuito abierto.



Circuito aproximado



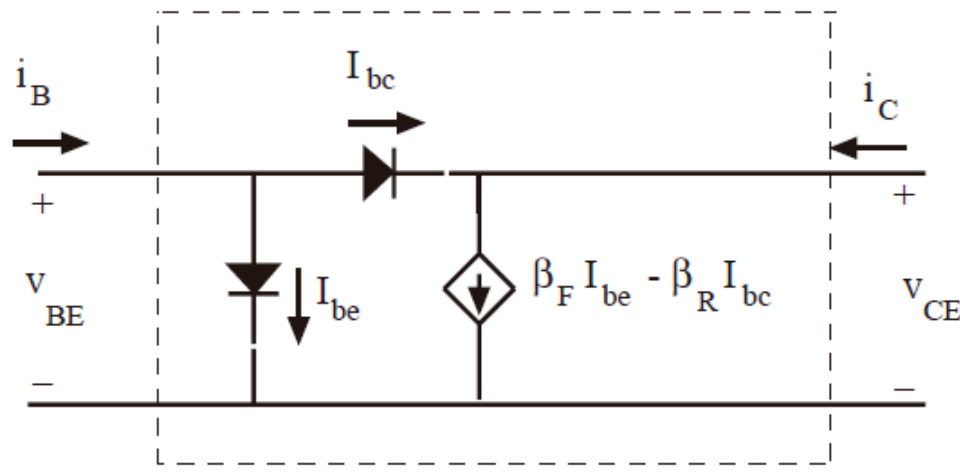
# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS.

## ECS DE EBERS-MOLL

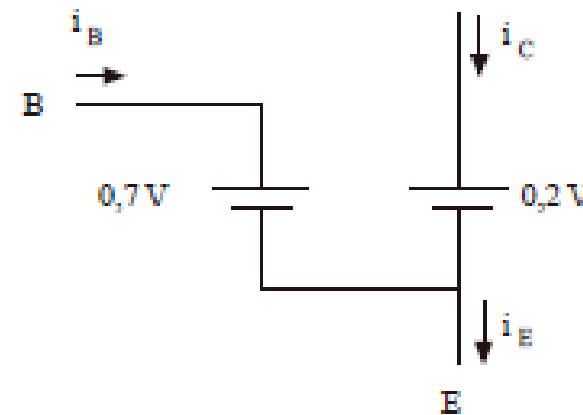
Región de saturación

➤  $v_{BE} > 0$

➤  $v_{BC} > 0$



Circuito equivalente



Circuito aproximado

$$i_C = \beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc} - I_{bc} = I_s \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_s}{\alpha_R} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

$$i_B = I_{be} + I_{bc}$$

$$i_E = i_C + i_B$$

Mismo termino que en directa

$$I_{se} \beta_F = I_{sc} \beta_R = I_s$$

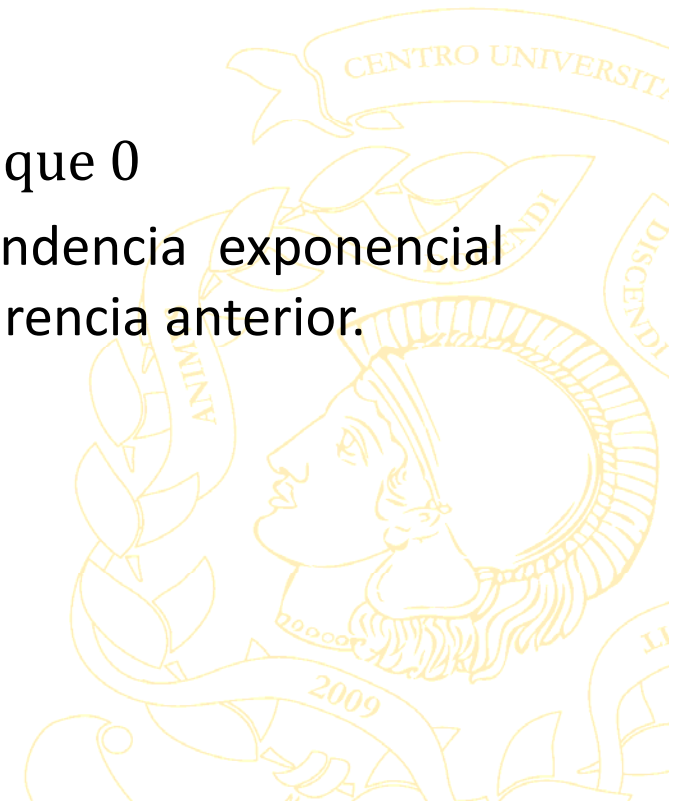
- Nótese que si  $\alpha_R$  fuera la unidad, la ecuación anterior indicaría que la corriente de colector sería nula para  $v_{BC}$  igual a  $v_{BE}$ , es decir, para una tensión  $v_{CE}$  nula.
- Como  $\alpha_R$  es menor que la unidad,  $v_{CE}$  será algo mayor que cero cuando  $i_C$  sea igual a cero.
- Como la curva característica se traza para un valor fijo de  $i_B$ , la tensión  $v_{BE}$  es constante. => Por esto, la disminución de  $i_C$  tendrá una dependencia exponencial respecto a  $v_{CE}$  ( $v_{CE} = v_{CB} + v_{BE}$ ).

En consecuencia, la curva característica en saturación se puede aproximar por una curva "casi" vertical, tal como se indica en la figura de la característica de salida.

- Se acostumbra a considerar que cuando el transistor se satura  $v_{CE}$  vale unos 0,2 V.

### Región de saturación (RESUMEN)

- En activa  $i_C = \beta_F i_B = I_S \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right)$ , que es el primer termino de la expresión anterior
- Cuando  $v_{BC}$  se incrementa el segundo termino de la expresión de la transparencia anterior aumenta  $\Rightarrow i_C$  disminuye hasta llegar a cambiar de signo.
- Si  $\alpha_R = 1 \Rightarrow i_C = 0$  para  $v_{BC} = v_{BE}$  ( $v_{CE} = 0$ )
- Como  $\alpha_R < 1$  para  $i_C = 0 \Rightarrow v_{CE}$  será algo mayor que 0
- Para un  $i_B$  fijo  $\Rightarrow v_{BE} = cte.$   $i_C$  tendrá una dependencia exponencial con  $v_{CE} = v_{CB} + v_{BE}$  según la ecuación de la transparencia anterior.
- En saturación  $v_{CE} \cong 0,2 V$



Ejemplo: Calcular  $v_{CE}$  en función de  $i_c/i_B$  en la región de saturación de un npn. (Despreciar la unidad frente a la exponencial)

$$i_c = \beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc} - I_{bc} = I_s \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_s}{\alpha_R} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

$$i_B = I_{be} + I_{bc}$$

$$I_{se}\beta_F = I_{sc}\beta_R = I_s$$

$$\frac{i_c}{i_B} = \frac{I_s \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_s}{\alpha_R} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)}{\frac{\beta_F}{\beta_F} I_{se} \left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{\beta_R}{\beta_R} I_{sc} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)}$$

$$= \beta_F \frac{\left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{1}{\alpha_R} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)}{\left( e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{\beta_F}{\beta_R} \left( e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)} \cdot \frac{e^{v_{BC}/V_T}}{e^{v_{BC}/V_T}} = \beta_F \frac{e^{v_{CE}/V_T} - 1 / \alpha_R}{e^{v_{CE}/V_T} + \beta_F / \alpha_R}$$

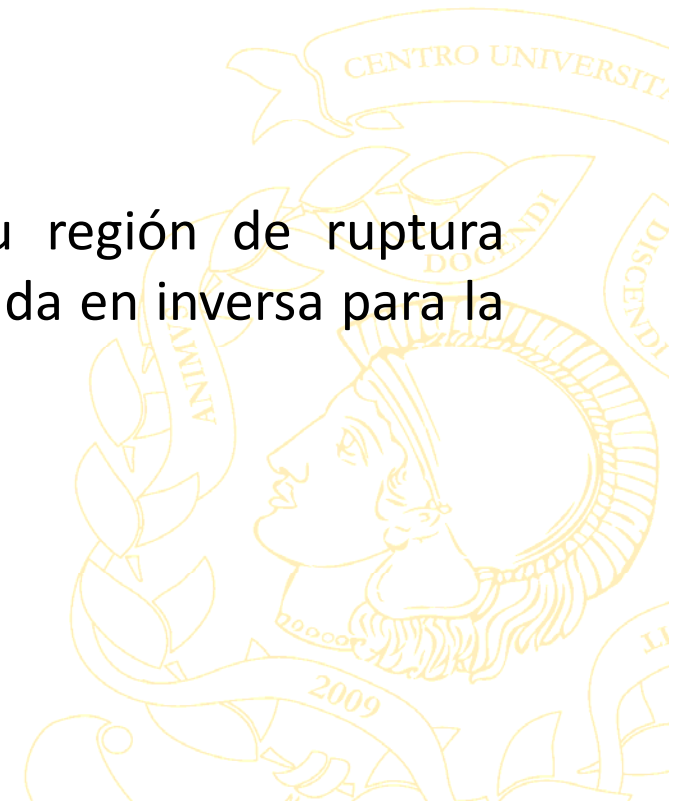
$$v_{CE} = V_T \ln \left[ \frac{1/\alpha_R + (i_c/i_B)/\beta_R}{1 - (i_c/i_B)/\beta_R} \right]$$

### Región inversa

- $v_{BE} < 0 \Rightarrow I_{be} \approx 0$ . El diodo emisor puede aproximarse por un circuito abierto.
- $v_{BC} > 0$
- Se comporta como en activa pero sustituyendo  $\beta_F$  por  $\beta_R$  y viceversa.
- Como  $\beta_R \ll \beta_F$  no interesa trabajar en esta región

### Región de ruptura

- Para  $v_{CE}$  elevadas el diodo colector entra en su región de ruptura (recordemos que la unión base colector está polarizada en inversa para la región activa)





		Unión emisora	
		Directa	Inversa
Unión colectora	Directa	<b>Saturación</b> $v_{BE} = 0,7V$ $v_{CE} = 0,2V$ $i_c < \beta_F i_B$	<b>Inversa</b> $v_{BE} > 0,2V$ $v_{CE} = 0,7V$ $i_c = \beta_R i_B$
	Inversa	<b>Activa</b> $v_{BE} = 0,7V$ $v_{CE} > 0,2V$ $i_c = \beta_F i_B$	<b>Corte</b> $v_{BE} < 0,7V$ $v_{BC} < 0,7V$ $i_c = 0$ $i_B = 0$

NPN

Unión emisora en directa si  $V_{BE} > 0$   
 Unión colectora en directa si  $V_{BC} > 0$

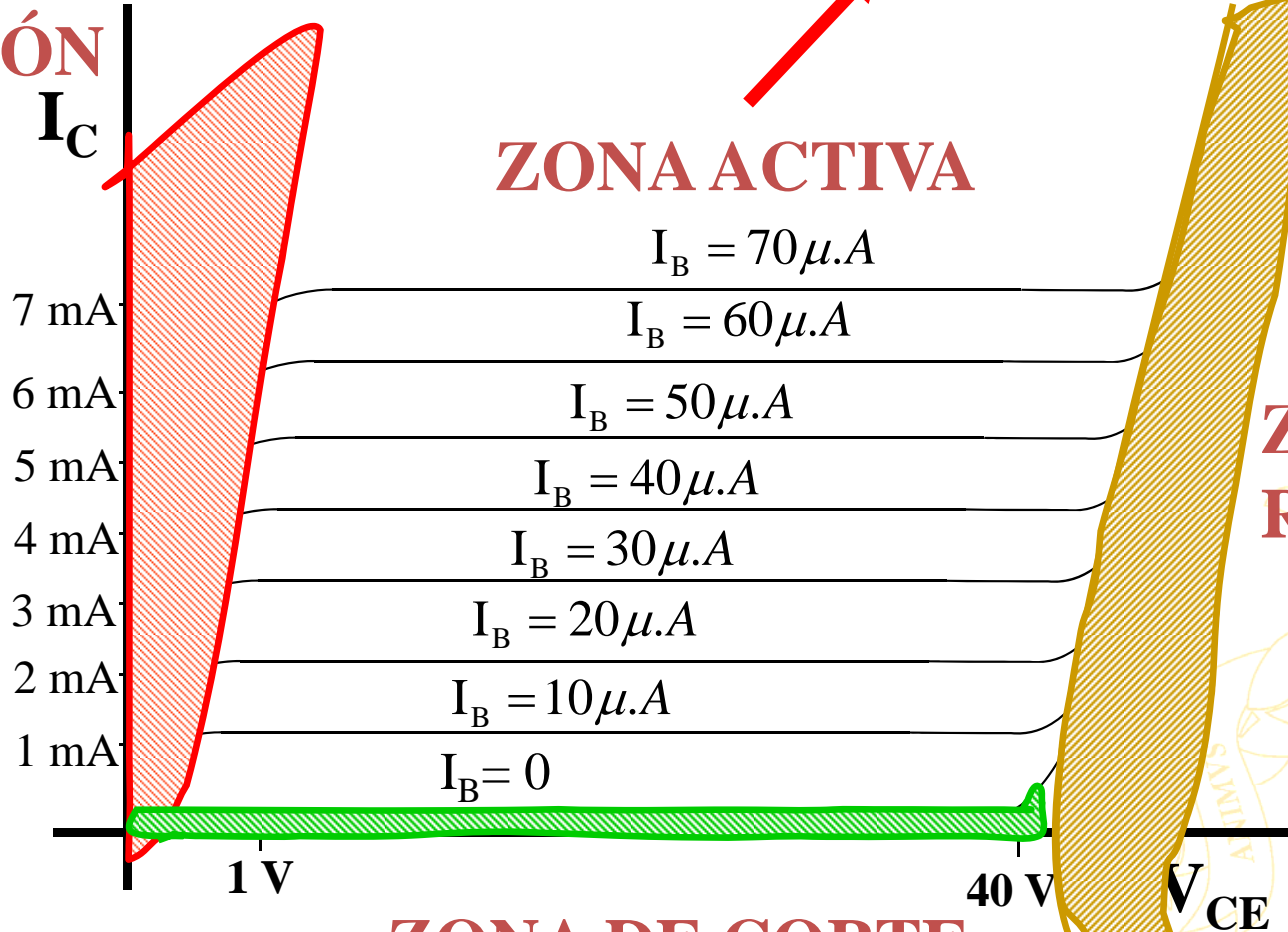
PNP

Unión emisora en directa si  $V_{EB} > 0$   
 Unión colectora en directa si  $V_{CB} > 0$

# EL MODELO DE DIODOS ACOPLADOS. ECS DE EBERS-MOLL

**ZONA DE SATURACIÓN**

**Amplificador → Polarización de emisor**



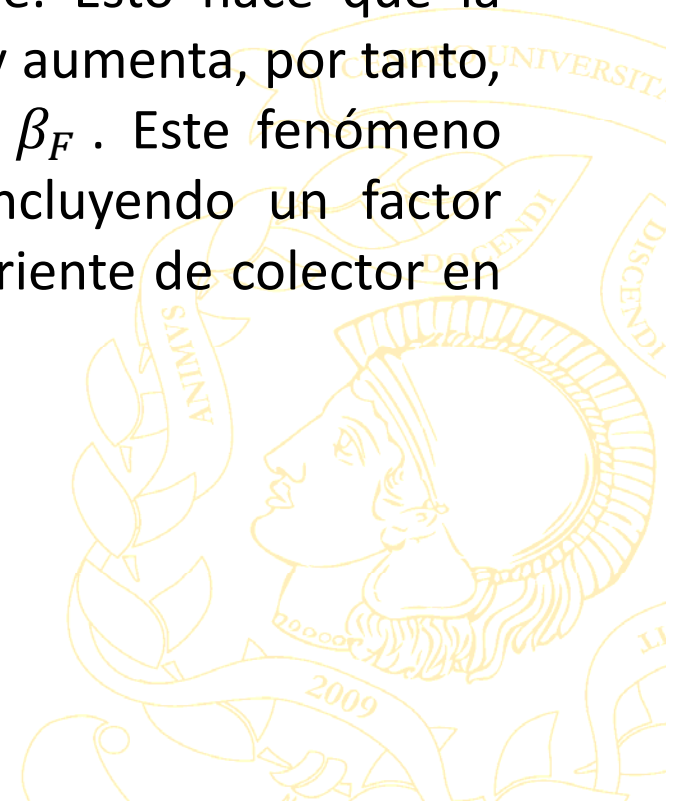
**Circuitos de conmutación → Polarización de base**

Curva característica de salida

- Cuando las curvas características se miden en un transistor real se puede apreciar un ligero aumento de  $i_C$  con  $v_{CE}$  en la región activa (en el caso ideal no había variación de  $i_C$  con  $v_{CE}$ )
- O lo que es lo mismo  $i_C$  es independiente de la tensión inversa aplicada en la unión BC
- Sin embargo, cuanto mayor sea esta tensión, mayor es la zona de carga espacial y menor es la anchura efectiva de la base. Esto hace que la probabilidad de recombinarse en la base sea menor y aumenta, por tanto, el factor de transporte  $\gamma$ , consiguientemente,  $\alpha_F$  y  $\beta_F$ . Este fenómeno (conocido como efecto Early) puede modelarse incluyendo un factor adicional en la expresión que nos proporciona la corriente de colector en activa:

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

donde  $V_A$  se conoce como tensión Early



# EFFECTO EARLY

