

T4. Transistores de unión bipolar.

Transistores de unión bipolar

- ¶ **Objetivos.**
- ¶ **Introducción.**
- ¶ **Estructura física y funcionamiento.**
- ¶ **Modos de operación.**
- ¶ **Funcionamiento en un circuito.**
- ¶ **Aplicaciones: Analógicas y digitales.**

Objetivos

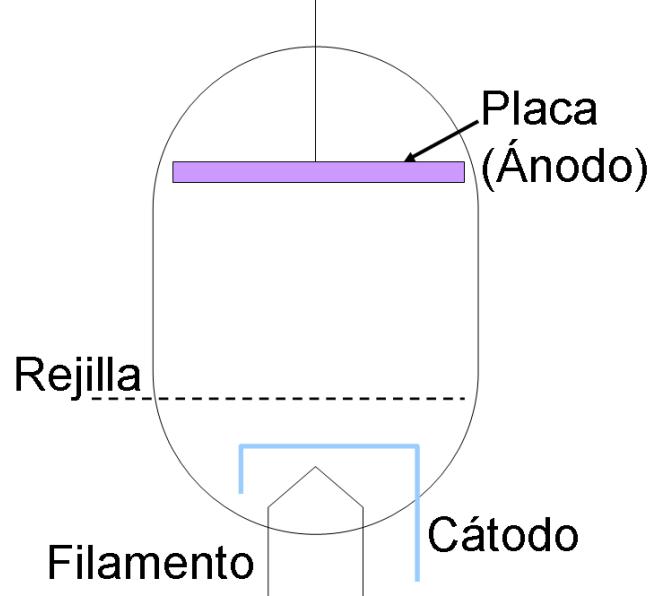
- ❶ Entender el funcionamiento del transistor de unión bipolar.
- ❷ Resolver circuitos que contienen transistores bipolares.
- ❸ Conocer (y entender) algunas de sus aplicaciones principales.

Introducción

💡 Predecesor del transistor: Triodo (tubo de vacío+rejilla).

» Inconvenientes: $t_{arranque}$, alto consumo, baja fiabilidad, tamaño, coste.

» Revolucionó el desarrollo de la electrónica: radio, televisión, teléfono, computación, etc.



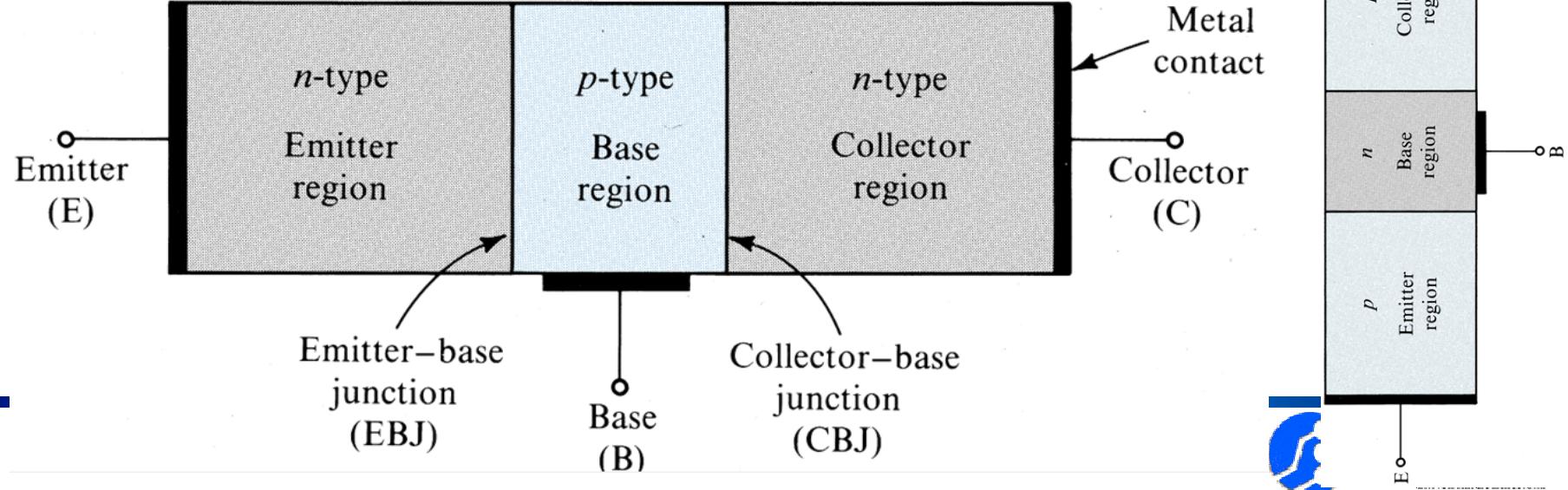
Introducción

- 💡 **Objetivo:** Diodo en el que se controle el valor de corriente que lo atraviesa con una señal de control pequeña (ampl).
 - » Siendo fiable, de bajo coste, pequeño tamaño, etc.

Estructura física y funcionamiento

💡 Estructura física básica:

- » Unión de 3 materiales N, P y N (ó P, N y P):
- » 3 terminales: Emisor, base y colector.
- » Emisor más dopado que colector (\rightarrow no simétrico).
- » Base estrecha.
- » Como dos diodos conectados en serie (opuestos).



Estructura física y funcionamiento

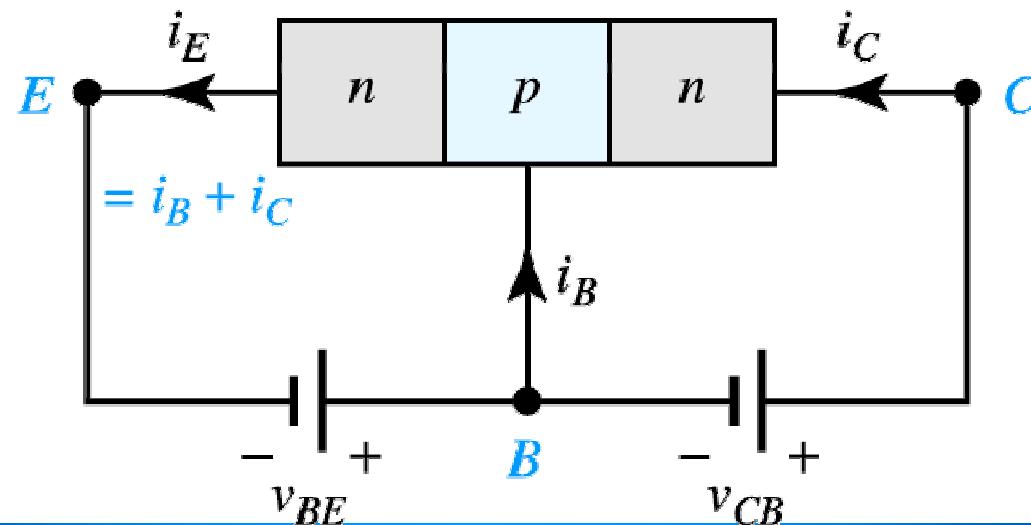
💡 Ecuaciones generales: Modelo de Ebers-Moll

$$I_E = A \left(e^{\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)} - 1 \right) - B \left(e^{\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right)} - 1 \right)$$

$$I_B = E \left(e^{\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)} - 1 \right) - F \left(e^{\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right)} - 1 \right)$$

$$I_C = C \left(e^{\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)} - 1 \right) - D \left(e^{\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right)} - 1 \right)$$

$$I_E = I_B + I_C$$



Modos de operación

4 modos de operación, según polaridad de V_{BE} y V_{CB} :

» $V_{BE} > 0, V_{CB} > 0$: Saturación.

- Diodos en directa.

» $V_{BE} > 0, V_{CB} < 0$: Activa directa.

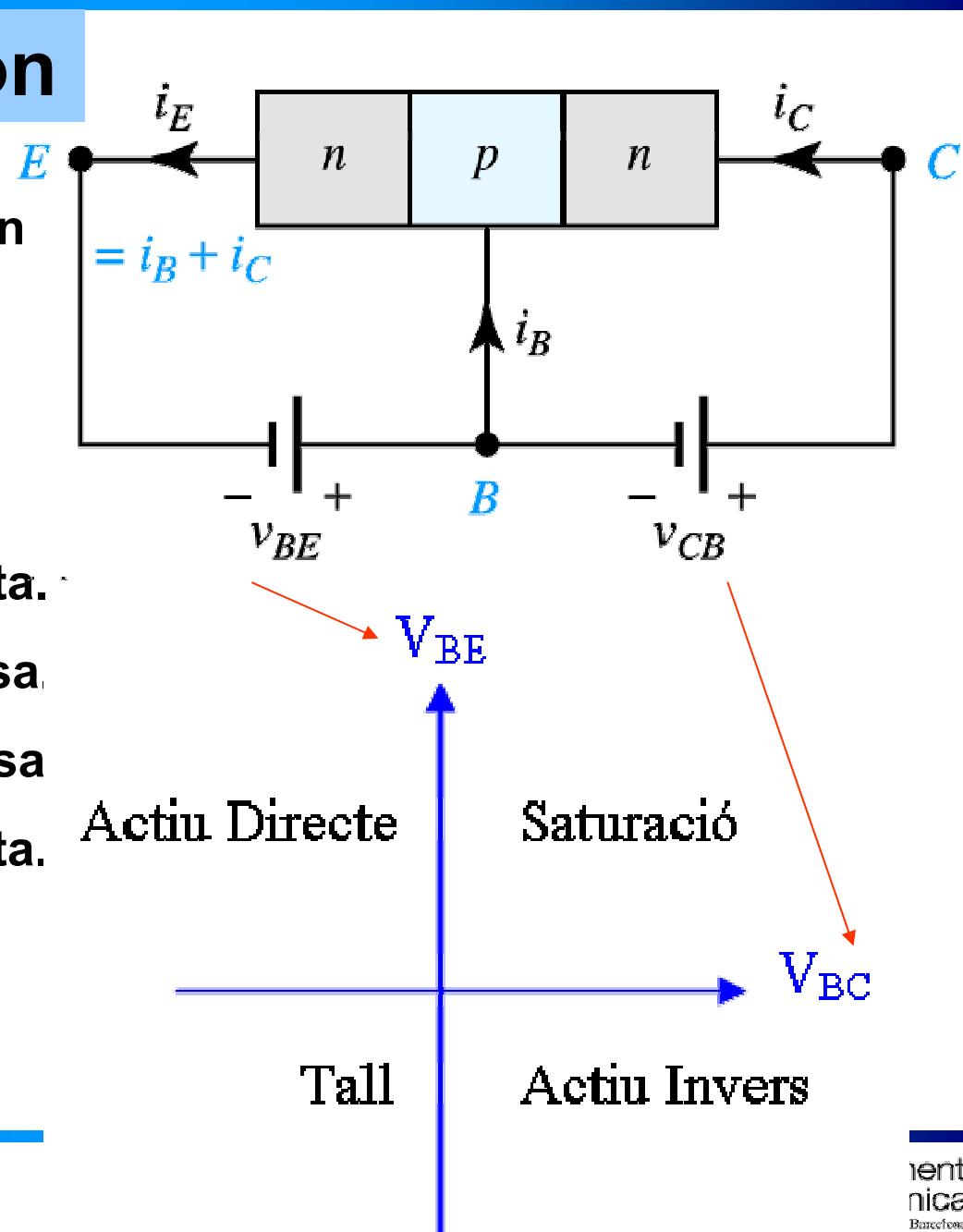
- BE: Directa, BC: inversa.

» $V_{BE} < 0, V_{CB} > 0$: Activa inversa

- BE: Inversa, BC: directa.

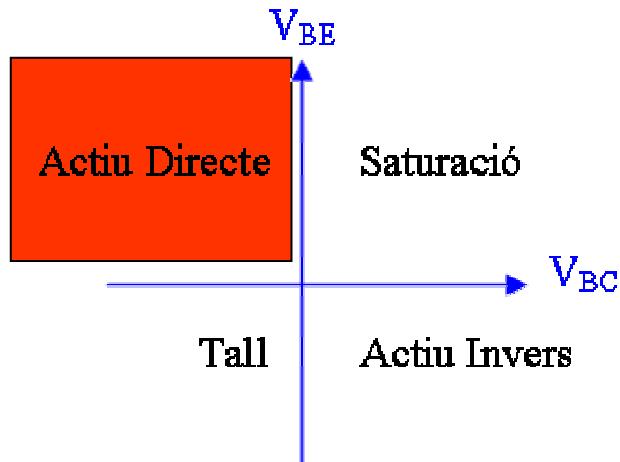
» $V_{BE} < 0, V_{CB} < 0$: Corte.

- Diodos en inversa.



Modos de operación

💡 Modo activa directa:



$$\frac{I_C}{I_B} = \beta$$

$$\text{Como } I_E = I_C + I_B \Rightarrow ; \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta + 1} = \alpha$$

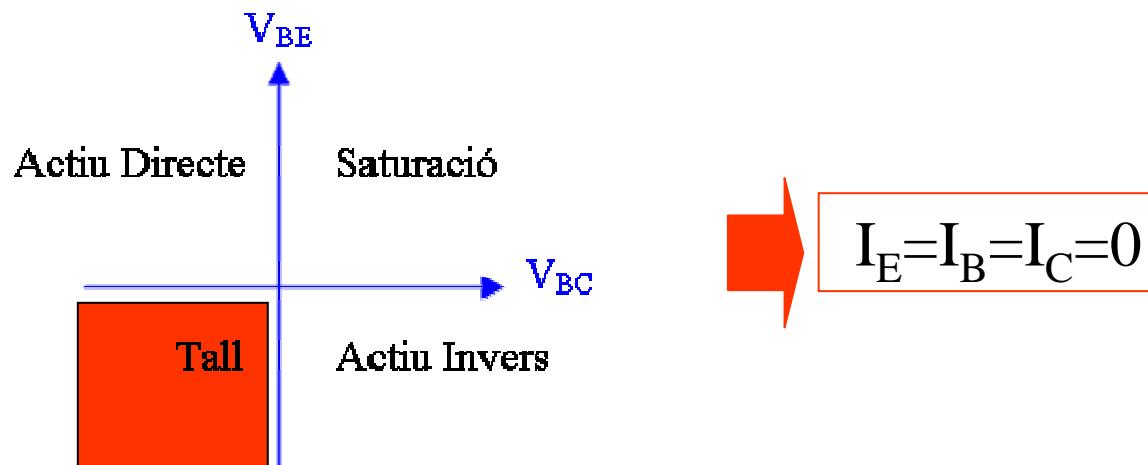
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

- » β se espera un valor alto (amplificación) ya que $I_B \ll I_C$.
- » α se espera un valor entorno a 1, ya que $I_C \sim I_E$.
- » Sabiendo una de la corrientes y uno de los parámetros (normalmente dado), se calculan automáticamente las otras dos corrientes.

Modos de operación

💡 Corte:

- » Los dos diodos en inversa → No pasará corriente.
- » Como interruptor, este estado sería OFF (cortado).



Modos de operación

💡 Saturación:

» Los dos diodos en directa.

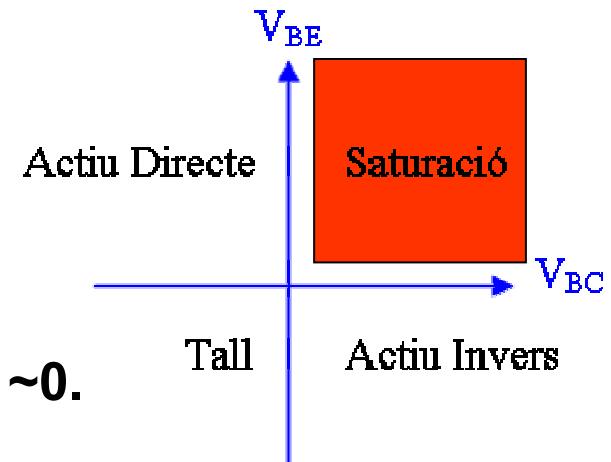
▣ Como están opuestos, $V_{CE} \sim V_{\gamma_1} - V_{\gamma_2} \sim 0$.

Realmente, $V_{CE} = 0.2V$

▣ Además, sabemos que siempre:

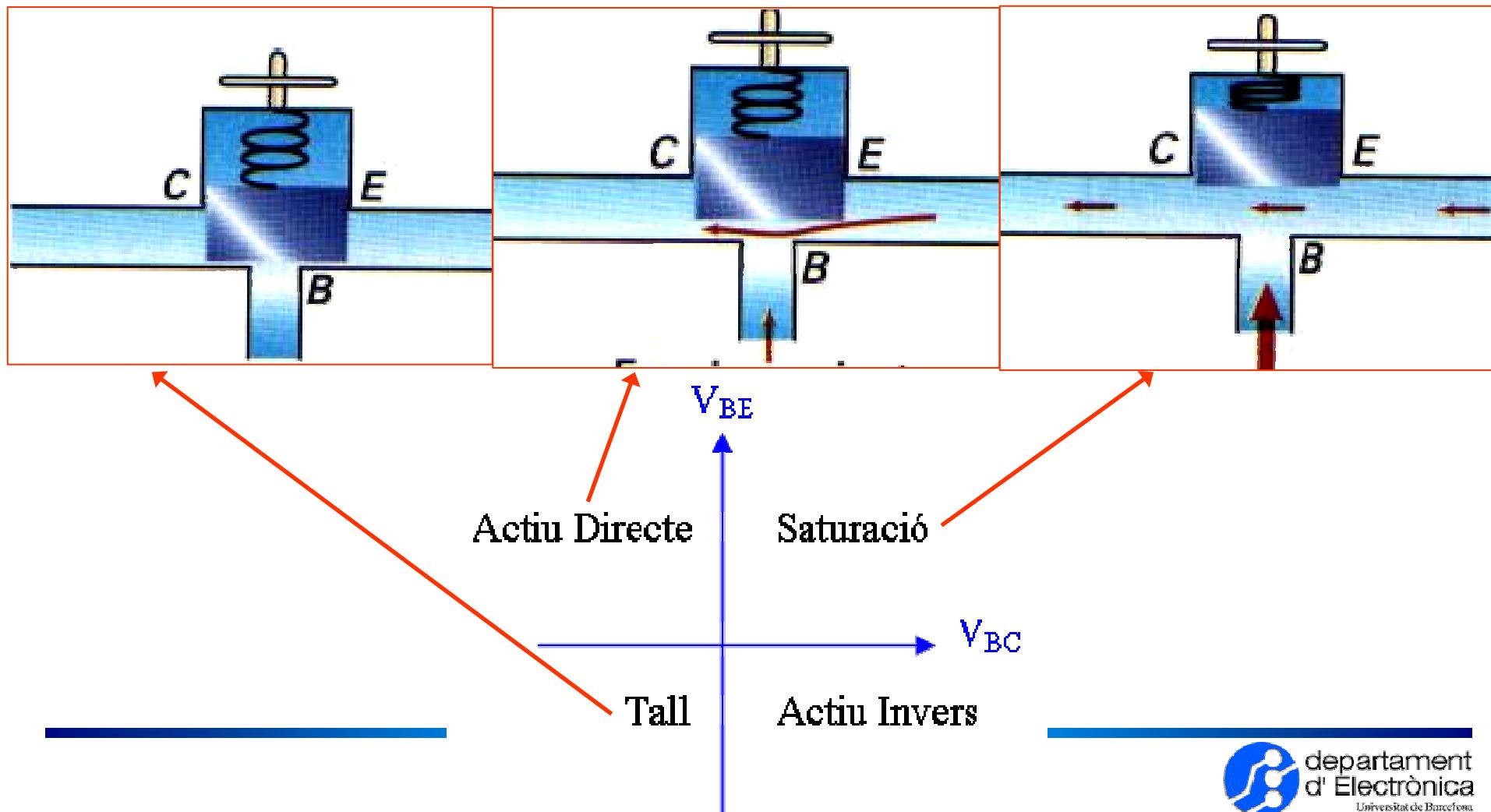
$$I_E = I_B + I_C$$

▣ Como interruptor entre E y C, este sería el estado ON (conduciendo).



Modos de operación

💡 Equivalencia hidráulica:

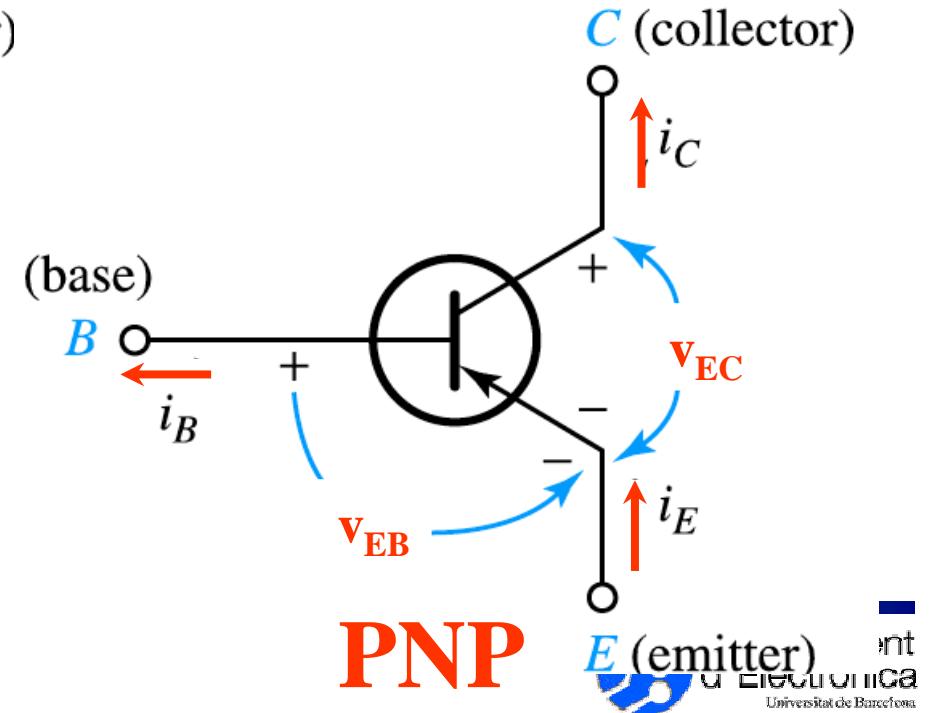
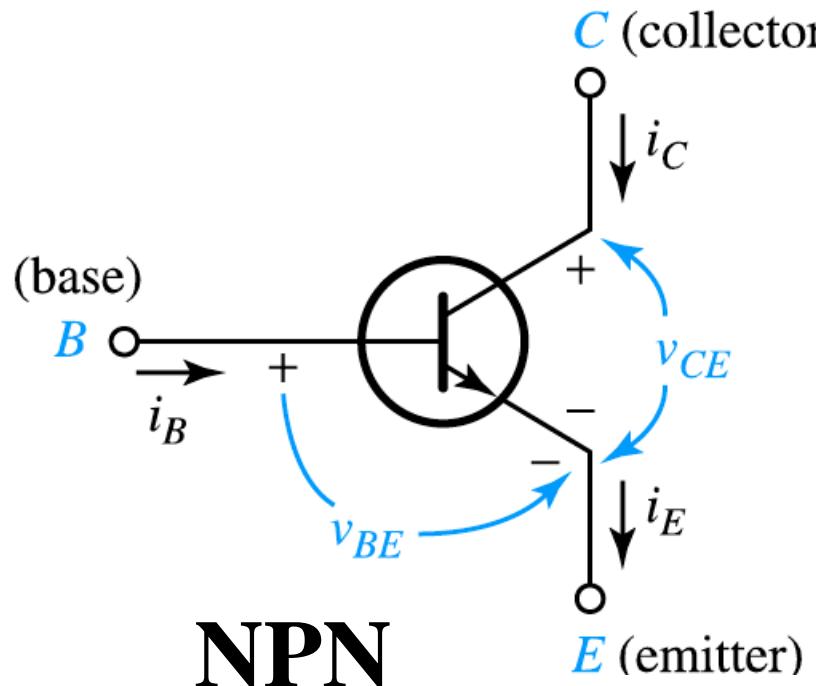


Funcionamiento en un circuito

💡 Símbolos y convenciones:

» **PNP**: Para que las ecuaciones sean exactamente las mismas, se toman las tensiones y corrientes cambiadas:

- Corrientes en sentido opuesto y tensiones con polaridades cambiadas.



Funcionamiento en un circuito

💡 Resolución de circuitos:

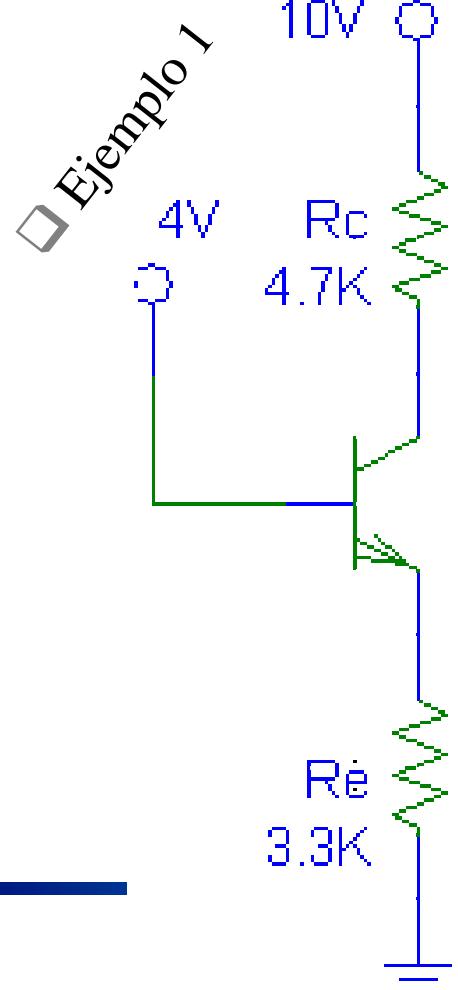
» Metodología general:

- ▣ 1º Intentar determinar a priori el posible modo de trabajo del transistor. (corte o activa directa).
- ▣ 2º No estando en corte, normalmente suponer que está en modo activa directa. (es más sencillo resolverlo que en saturación).
- ▣ 3º Resolver el circuito (como siempre, utilizando leyes de Kirchhoff). Coger mallas que incluyan V_{BE} (conocida 0.7V).
- ▣ 4º Con las corrientes obtenidas, determinar las tensiones V_B , V_E , V_C . Ver si son compatibles con modo activa directa.
- ▣ 5º Si no es compatible, resolver el circuito para modo de saturación. Normalmente requerirá al menos resolver dos mallas (una cogiendo V_{CE} (conocida: 0.2V) y otra V_{BE}).

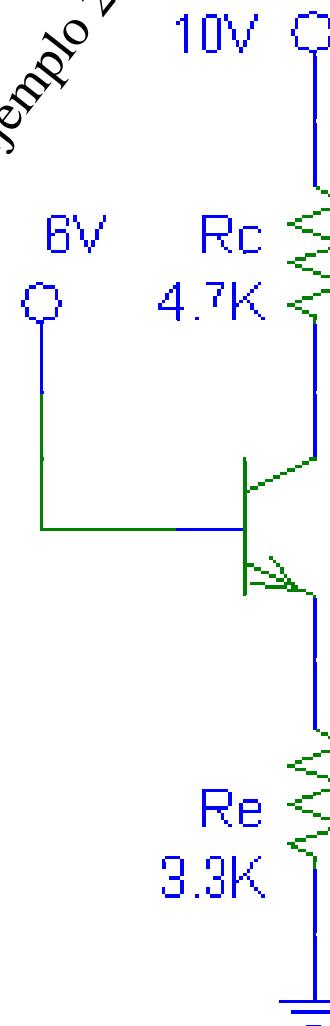
Funcionamiento en un circuito

Resolución de circuitos:

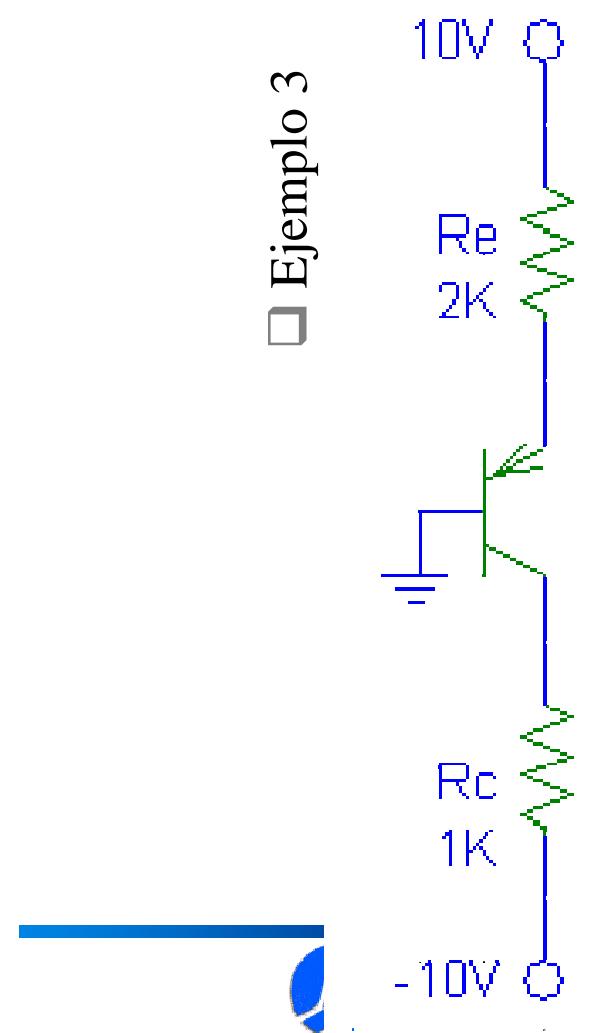
» Ejemplos:



Ejemplo 2



Ejemplo 3



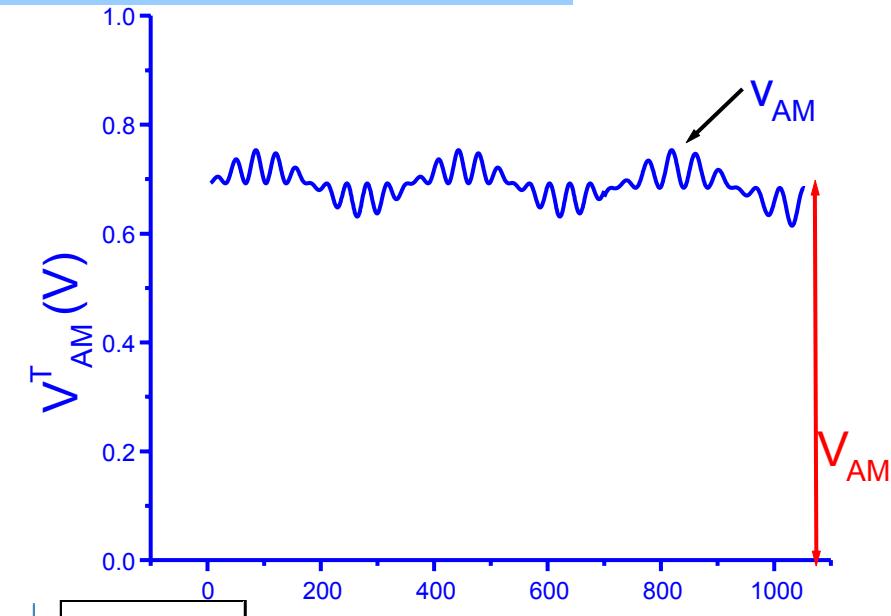
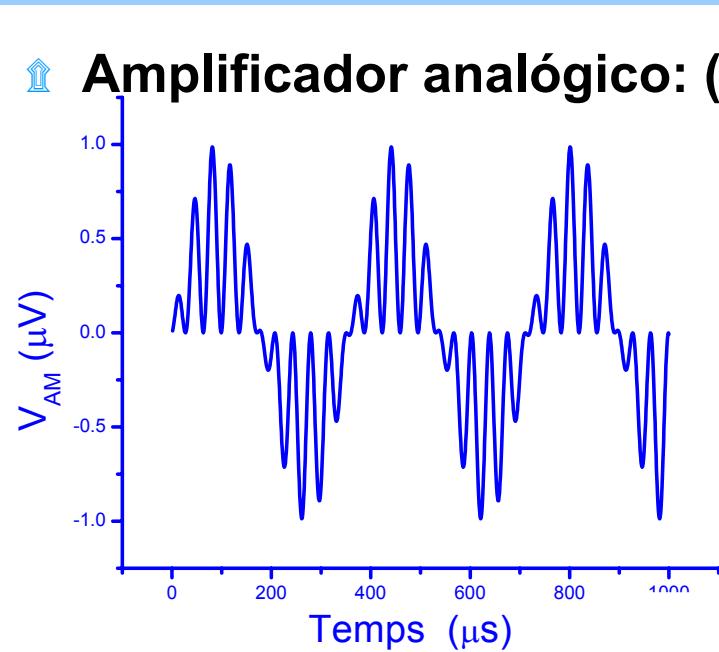
Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Amplificador analógico:

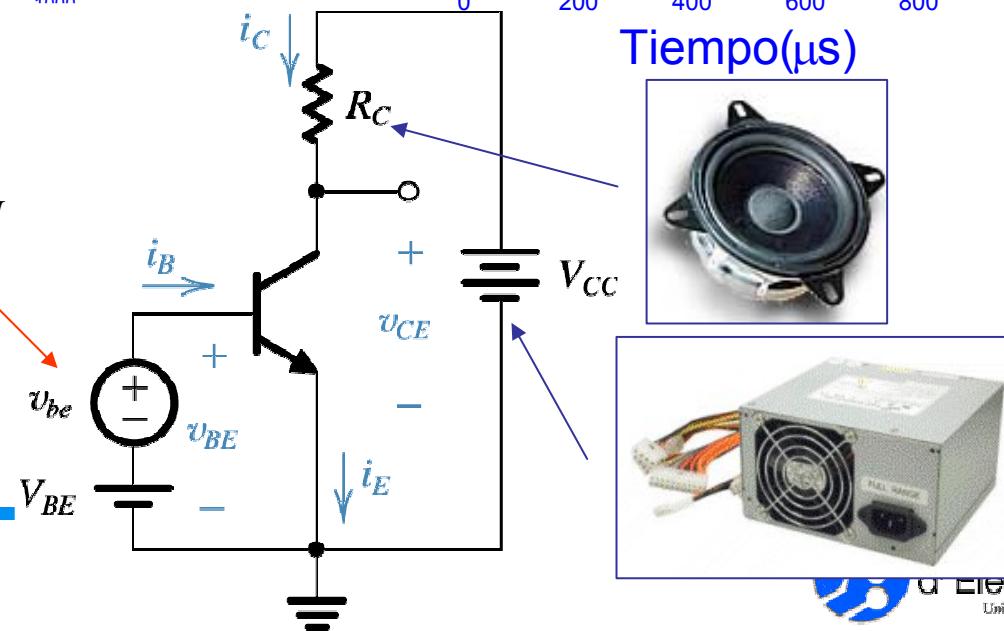
- » Pequeños cambios en I_B , provocan grandes cambios en I_C (ya que β es un valor alto). → Amplificación.
- » Las variaciones de I_B también pueden provocarse por variaciones de V_{BE} .
- » Tener en cuenta que para mantener el transistor en activa directa, V_{BE} ha de mantenerse a unos 0.7 V.
- » Utilidades de un amplificador:
 - ▣ Aumentar señales muy “débiles” → Audio, sensores.

Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Amplificador analógico: (cont.)

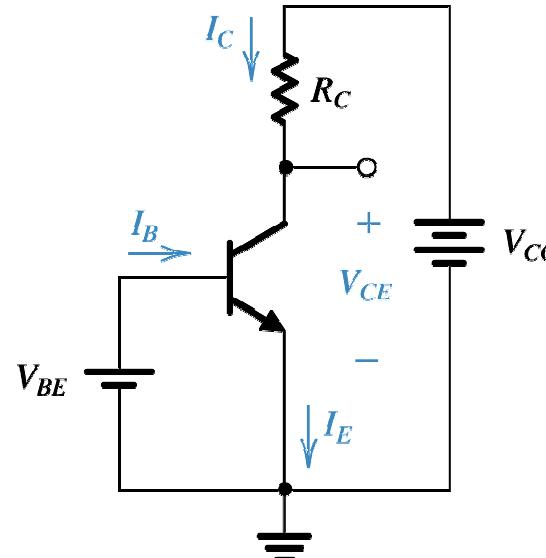
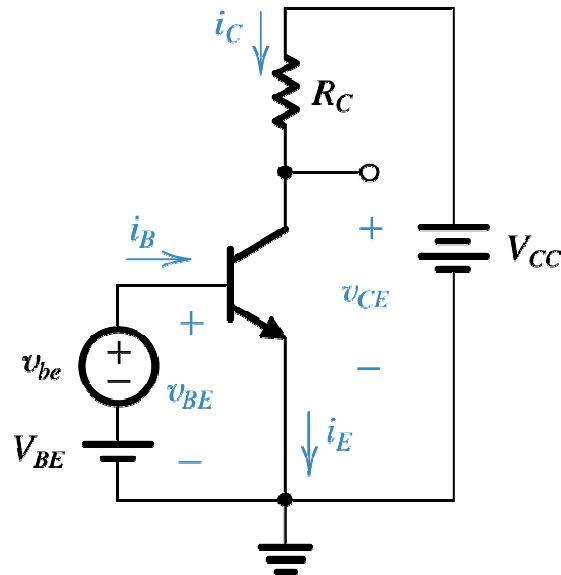


$$V_{AM}^T = V_{AM} + v_{AM}$$



Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Amplificador analógico: (cont.)



$$V_{BE}^T = V_{BE} + v_{BE}$$

$$I_C^T = I_C + i_C$$

$$I_C^T = I_o \cdot e^{\left(\frac{V_{BE}^T}{V_T}\right)} = I_o \cdot e^{\left\{\frac{V_{BE} + v_{BE}}{V_T}\right\}} = I_o \cdot e^{\left\{\frac{V_{BE}}{V_T}\right\}} \cdot e^{\left\{\frac{v_{BE}}{V_T}\right\}} = I_C \cdot e^{\left\{\frac{v_{BE}}{V_T}\right\}}$$

$$I_C = I_o \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

1

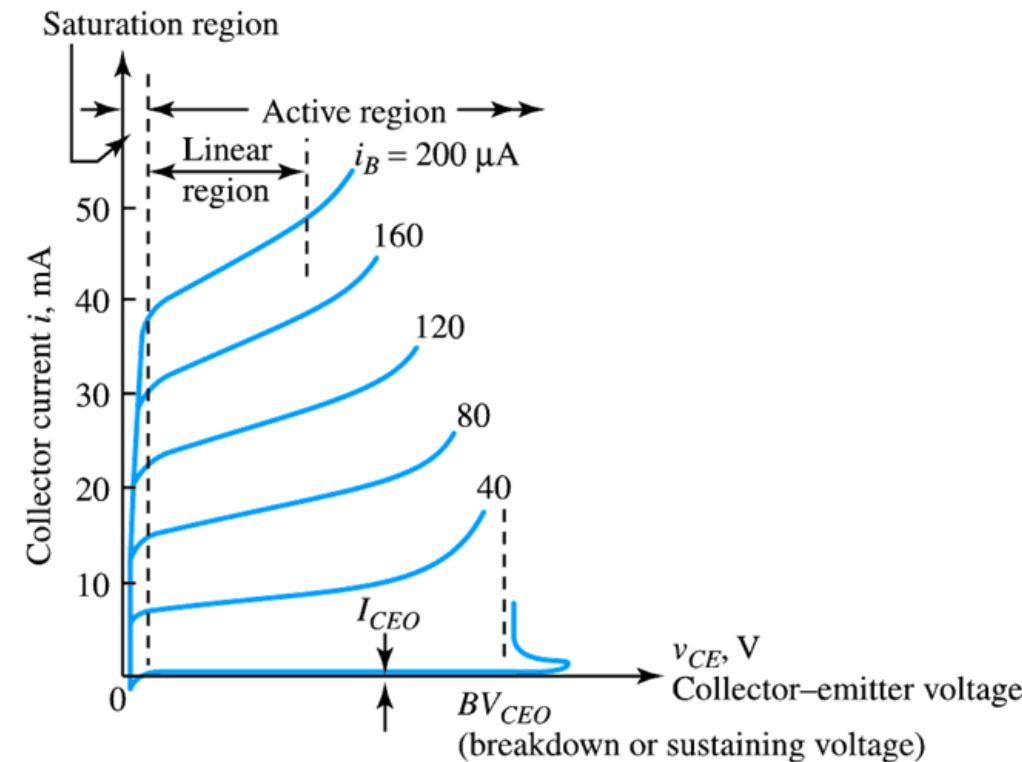
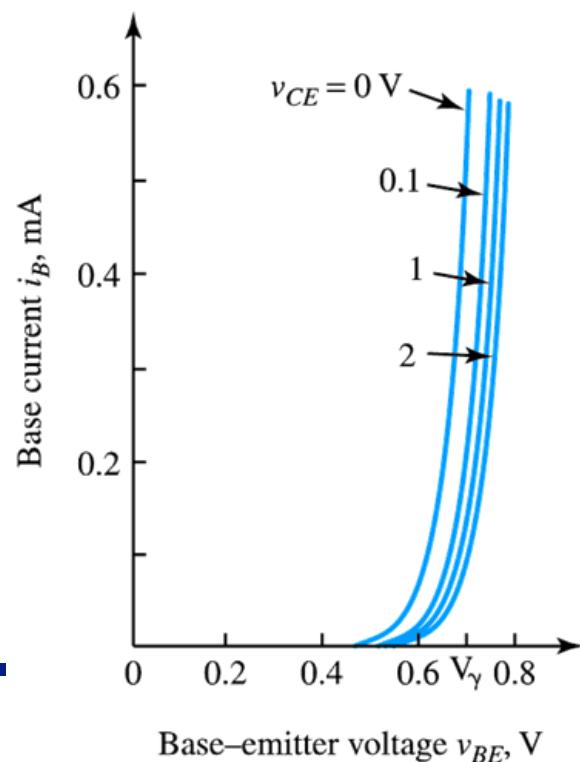
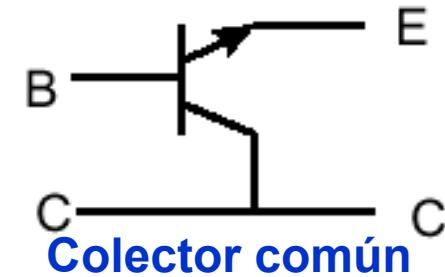
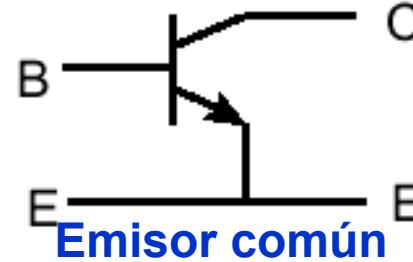
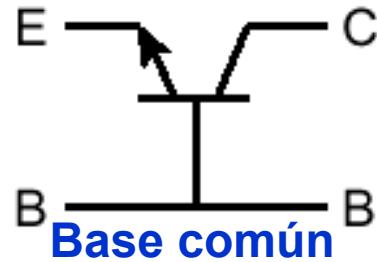
$$I_C^T \cong I_C + \underbrace{\frac{I_C}{V_T} \cdot v_{BE}}_{\text{AC}}$$

2

$$i_C = \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{BE}$$

Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Configuraciones básicas de amplificación monoetapa:



Aplicaciones: Analógicas y digitales

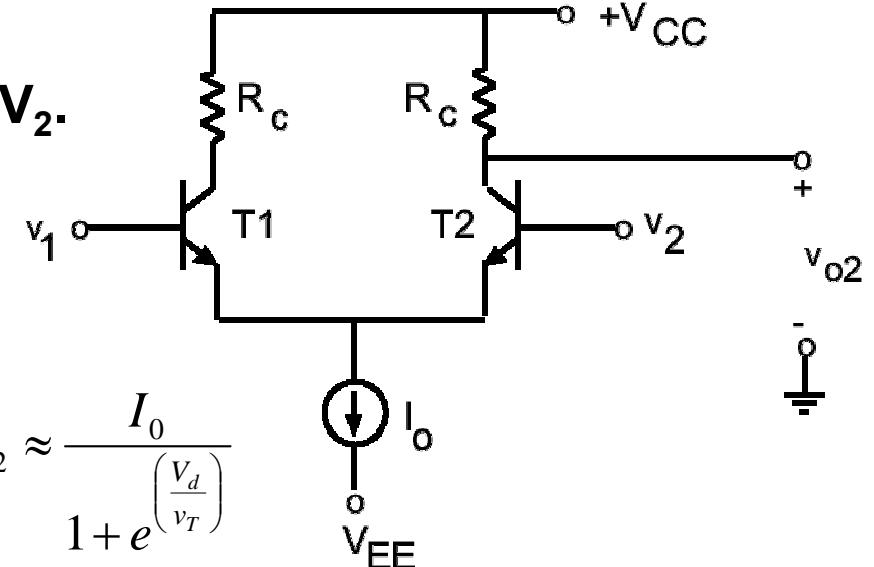
El amplificador diferencial:

» En la zona lineal, amplifica $V_d = V_1 - V_2$.

» Deducción (asumiendo $T1=T2$):

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{e^{\left(\frac{V_{BE1}}{v_T}\right)}}{e^{\left(\frac{V_{BE2}}{v_T}\right)}} = e^{\left(\frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{v_T}\right)} = e^{\left(\frac{V_d}{v_T}\right)}$$

$$I_0 \approx I_{C1} + I_{C2}$$



$$I_{C2} \approx \frac{I_0}{1 + e^{\left(\frac{V_d}{v_T}\right)}}$$

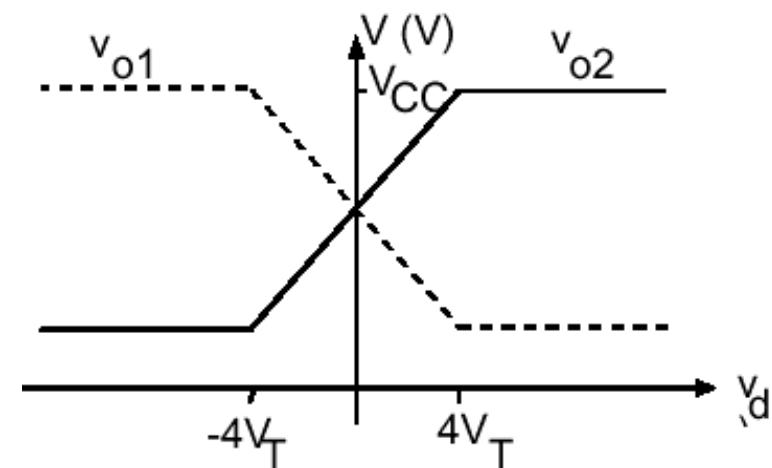
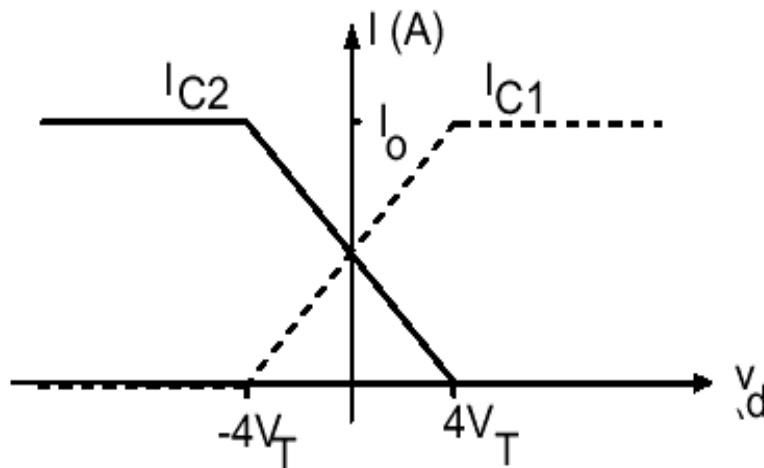
○ Para V_d pequeñas: $I_{C2} \approx \frac{I_0}{1 + e^{\left(\frac{V_d}{v_T}\right)}} \approx \frac{I_0}{2 + \frac{V_d}{v_T}} \approx \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot \left(1 - \frac{V_d}{2 \cdot v_T}\right)$

Aplicaciones: Analógicas y digitales

El amplificador diferencial: (cont.)

$$I_{C2} \approx \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot \left(1 - \frac{V_d}{2 \cdot v_T} \right)$$

$$V_{o2} \approx V_{CC} - R_C \cdot I_2$$



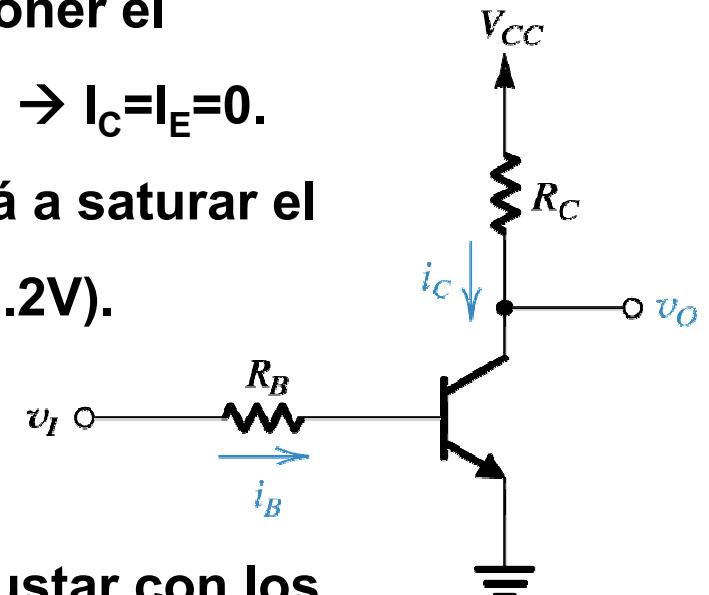
- » En zona lineal: amplificación analógica diferencial.
- » En la zona de saturación o corte → comparador lógico.

Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Interruptor:

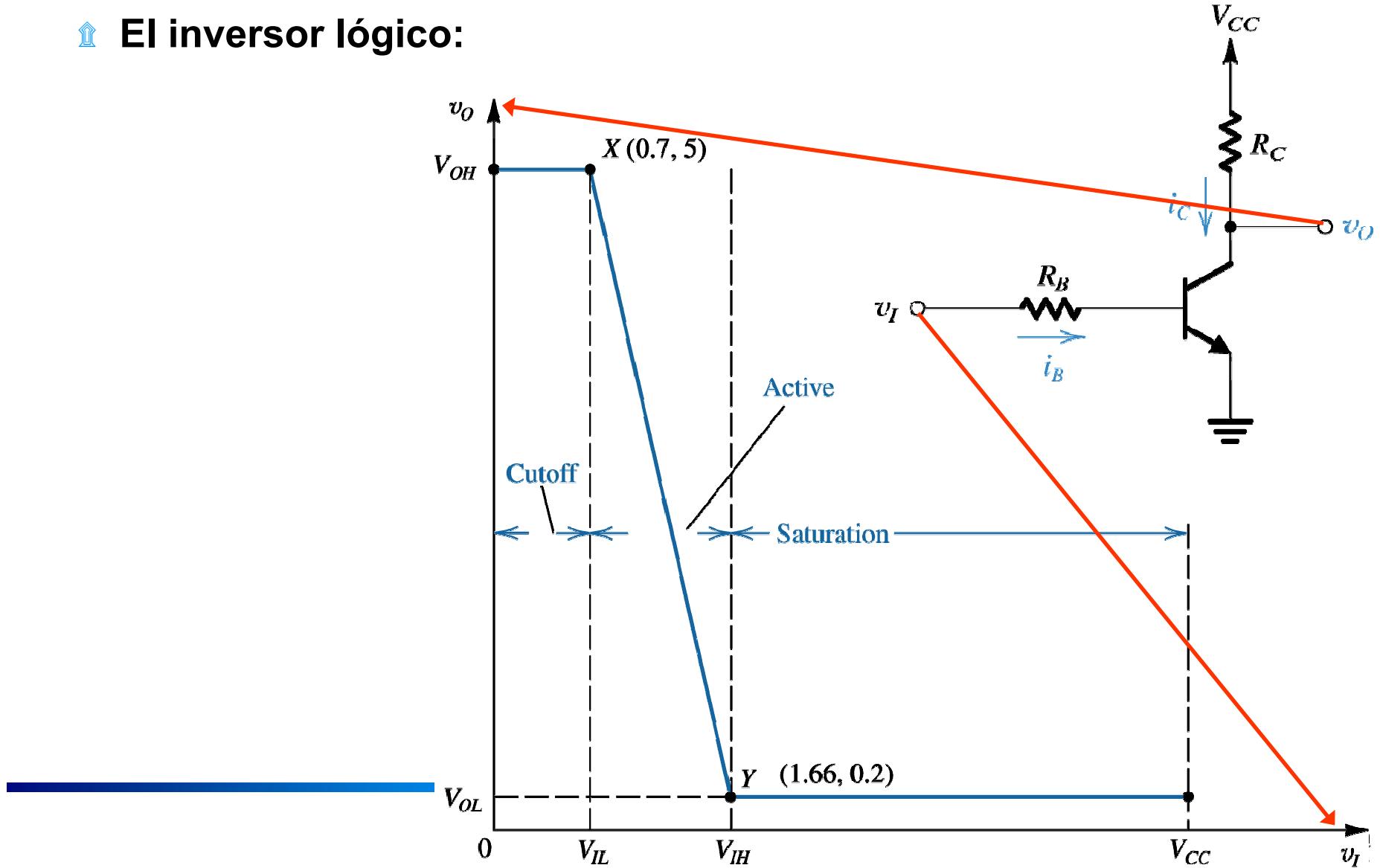
- » Si $V_i \downarrow (< \sim 0.5 \text{ V})$ insuficiente para poner el transistor en activa directa \rightarrow Corte $\rightarrow I_C = I_E = 0$.
- » Si V_i es suficientemente alto, llegará a saturar el transistor $\rightarrow I_C \uparrow$ (y $V_{CE} \sim 0.2 \text{ V} \rightarrow V_o \sim 0.2 \text{ V}$).

- » El valor V_i de saturación se puede ajustar con los valores de resistencia.



Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 El inversor lógico:



Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Familia lógica TTL:

» Define una tecnología de circuitos digitales.

» V_{CC} de 5V.

» Nivel alto : 2.4V – 5 V.

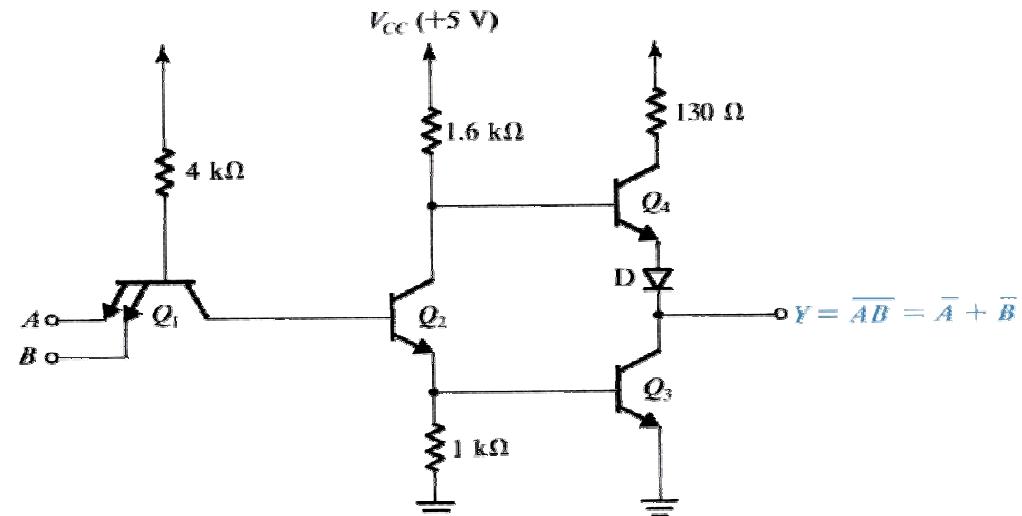
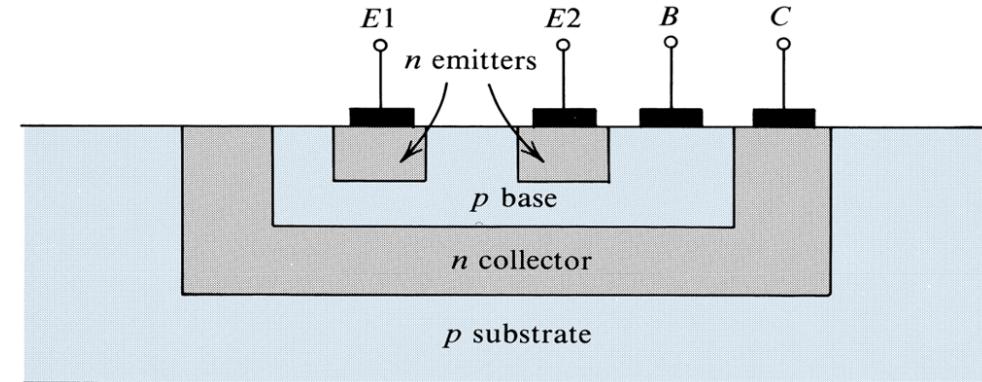
» Nivel bajo: 0.2 V – 0.8 V.

» Ventaja principal:

Velocidad alta

» Inconveniente principal:

Alto consumo.

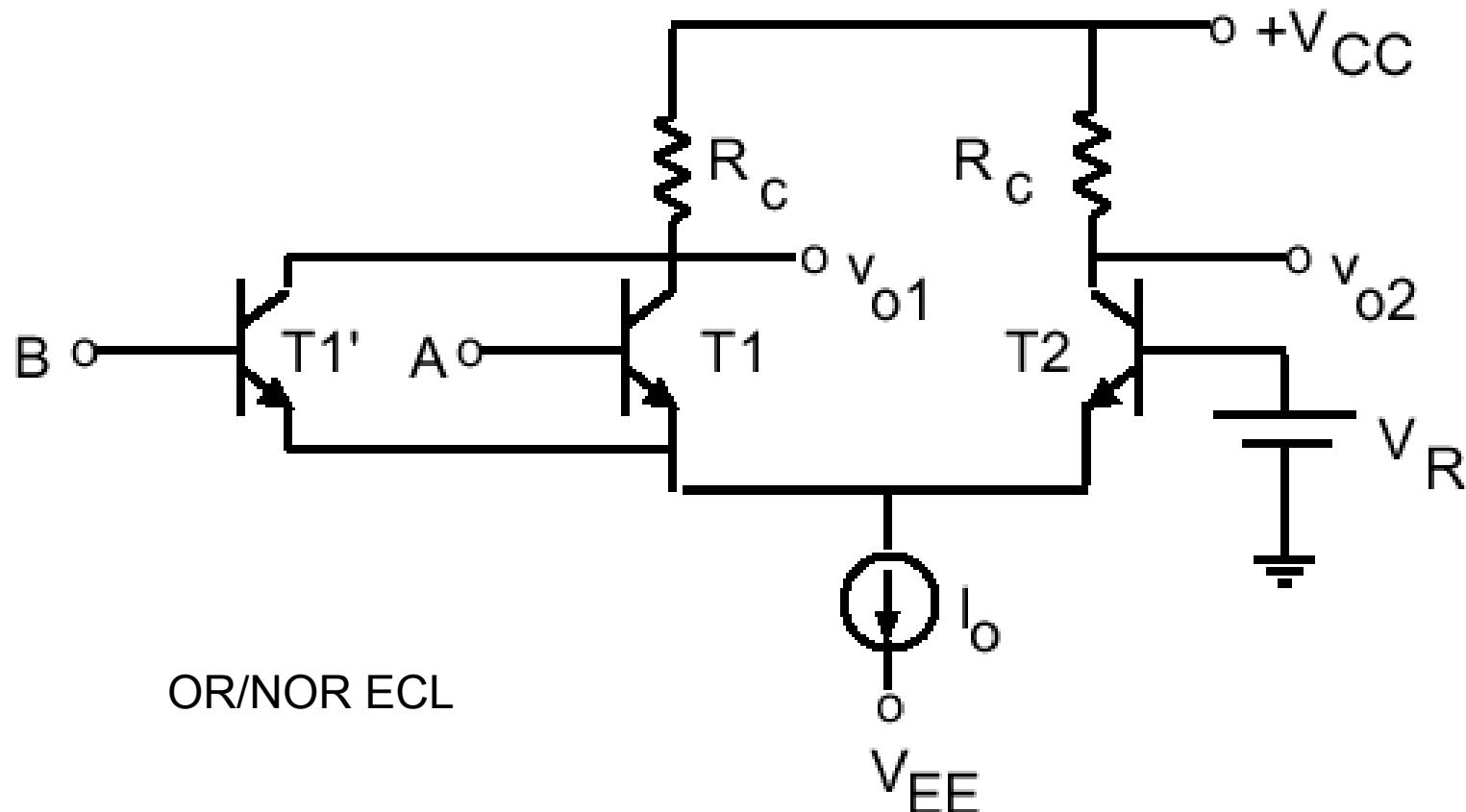


NAND TTL

Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Familia lógica ECL (Emitter Coupled Logic):

- » Familia basada en el amplificador diferencial.
- » Característica principal: alta velocidad de conmutación.



Aplicaciones: Analógicas y digitales

💡 Microprocesador:

» Todas las funciones realizadas por circuitos con transistores:

- ▣ ALU: Circuitos lógicos para las operaciones matemáticas.
- ▣ Registros: Realizado con flip-flops, hechos con puertas lógicas.
- ▣ Memorias → flip-flops.
- ▣ etc.

» Los transistores más usados son los del tema siguiente (de efecto campo).