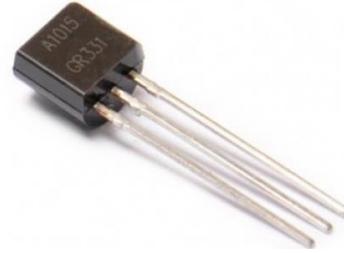


Transistores Bipolares

PABLO AGUIRRE

INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR



Historia del Transistor

Inventado en 1947 en Bell Labs.

Bell Labs fue el mayor centro de investigación e innovación tecnológica del s.XX:

- Tubos de vacío, naturaleza ondulatoria de los electrones, ruido térmico, estabilidad de sistemas realimentados, transistores, radiación de fondo de microondas, laser, célula fotoeléctrica, Teoría de la Información, cámaras digitales (CCD), satélites de comunicación, comunicación móvil celular, Unix, C/C++ ...
- Davisson, Nyquist, Norton, Karanagh, Hamming, Shockley, Shannon ...
- 9 Premios Nobel

Historia del Transistor

El transistor fue el comienzo de la era de los circuitos de estado sólido.

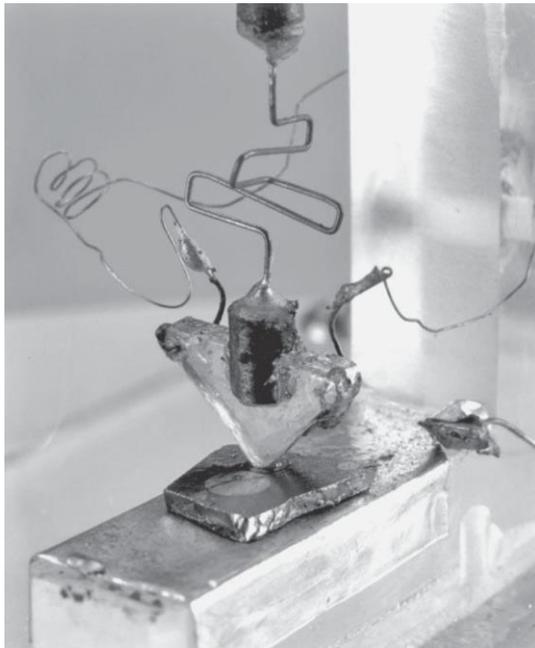
- Sustituyó los tubos de vacío
- Permitió la revolución tecnológica que cambió para siempre como trabajamos, nos comunicamos, como vivimos.

Inventores del Transistor:

- William Shockley
- Walter Brattain
- John Bardeen

Brattain y Bardeen inventaron el "Point-contact Transistor". Pocos meses después, Shockley (jefe del equipo) inventó el Transistor de Juntura, que mejoraba sensiblemente al anterior.

Los tres recibieron el Nobel de Física de 1956.



DATE Dec 24 1947
CASE No. 38177-1

We attained the following A. C. values at 1000 cycles

$$E_g = .016 \text{ V. m. s. volts} \quad E_p = 1.5 \text{ V. m. s. volts}$$
$$P_g = \frac{6 \times 10^{-5}}{5.4 \times 10^{-7}} \text{ watts} \quad P_p = 2.25 \times 10^{-5}$$

Voltage gain 100 Power gain 40
Current gain $\frac{1}{2.5}$

This unit was then connected in the following circuit.

This circuit was actually spoken over and by switching the audio in and out a distinct gain in speech level could be heard and seen on the scope presentation with no noticeable change in ~~power~~ quality. The measurements at a fixed frequency.

The Nobel Prize in Physics 1956



William Bradford Shockley
Prize share: 1/3



John Bardeen
Prize share: 1/3



Walter Houser Brattain
Prize share: 1/3



Historia del Transistor

En 1956 Shockley fundó “Shockley Semiconductor Laboratory” y se instaló en Mountain View, California.

Marca el comienzo de “**Silicon Valley**”

En 1957, hartos de Shockley, 8 empleados renunciaron y fundaron “Fairchild Semiconductors”. Se los conoce como **Los 8 traidores**:

- Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce, and Sheldon Roberts.

Docenas de empresas se fundaron en las siguientes décadas por ex-empleados de Fairchild:

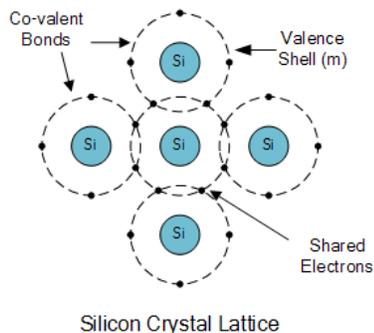
- Intel (G. Moore, R. Noyce), National Semiconductors, Linear Technologies, AMD, Zilog, Xilinx, Atmel ...
- Firma de capital de Riesgo (E. Kleiner): Amazon.com, Compaq, Electronic Arts, Google, Netscape, Sun Microsystems, Twitter ...

Repaso: Física de Semiconductores

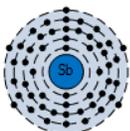
A Silicon Atom,
Atomic number = "14"



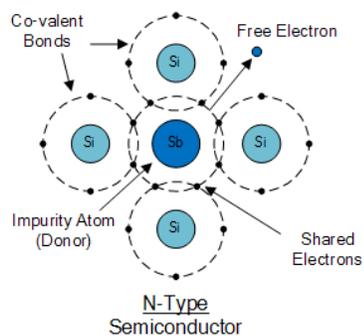
Silicon atom showing
4 electrons in its outer
valence shell (m)



An Antimony Atom,
Atomic number = "51"



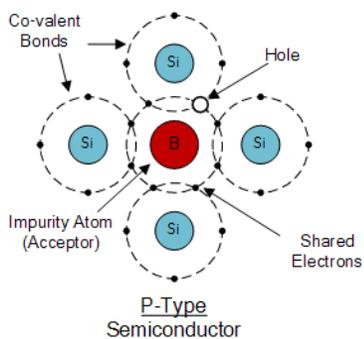
Antimony atom showing
5 electrons in its outer
valence shell (o)



A Boron Atom,
Atomic number = "5"



Boron atom showing
3 electrons in its outer
valence shell (L)

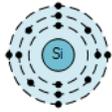


Semiconductores Intrínsecos:

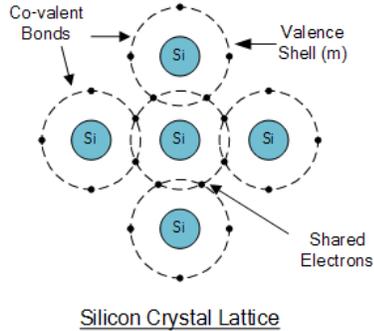
- Generación térmica de portadores libres
- $n = p = n_i$: Fuerte dependencia con T y el tipo de material
- Silicio: $n_i @ 300K = 1.5 \times 10^{10} \text{ portadores/cm}^3$
 - nota: Si tiene $5 \times 10^{22} \text{ atomos/cm}^3$
- $np = n_i^2$: Siempre se cumple, incluso si el semiconductor tiene impurezas (está dopado).

Repaso: Física de Semiconductores

A Silicon Atom, Atomic number = "14"

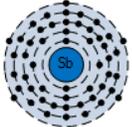


Silicon atom showing 4 electrons in its outer valence shell (m)

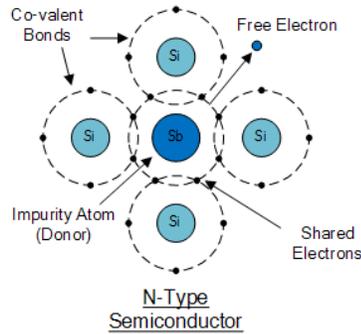


Silicon Crystal Lattice

An Antimony Atom, Atomic number = "51"



Antimony atom showing 5 electrons in its outer valence shell (o)

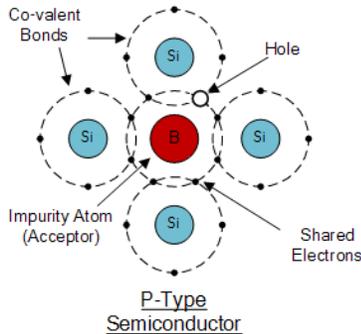


N-Type Semiconductor

A Boron Atom, Atomic number = "5"



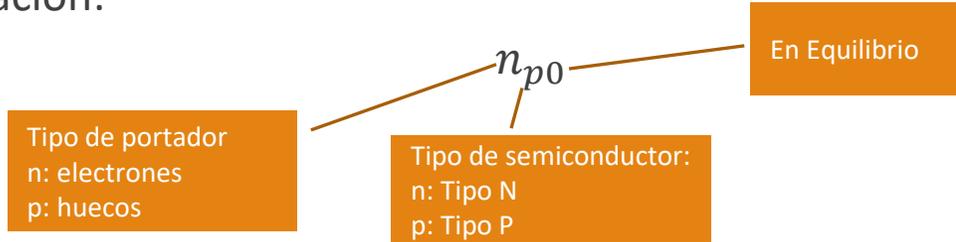
Boron atom showing 3 electrons in its outer valence shell (L)



P-Type Semiconductor

Semiconductores Dopados:

- Notación:



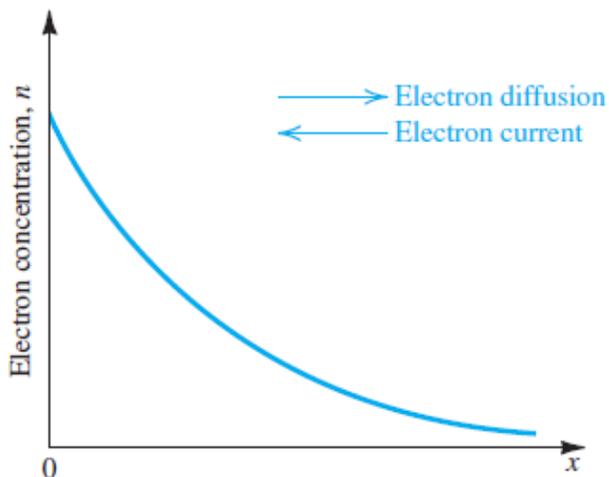
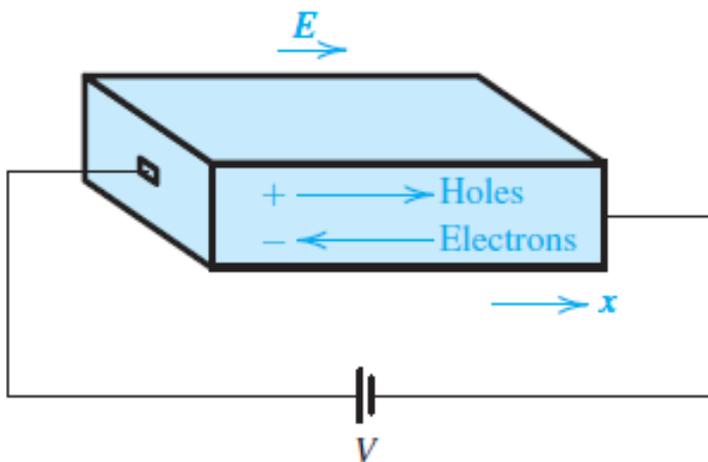
- Tipo N: $n_{n0} \approx N_D \gg n_i \Rightarrow p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \ll n_i$

Portadores "Mayoritarios"

Portadores "Minoritarios"

- Tipo P: $p_{p0} \approx N_A \gg n_i \Rightarrow n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A} \ll n_i$

Repaso: Física de Semiconductores



Corriente de Drift

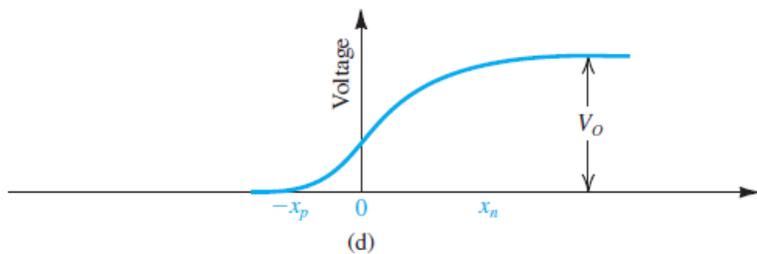
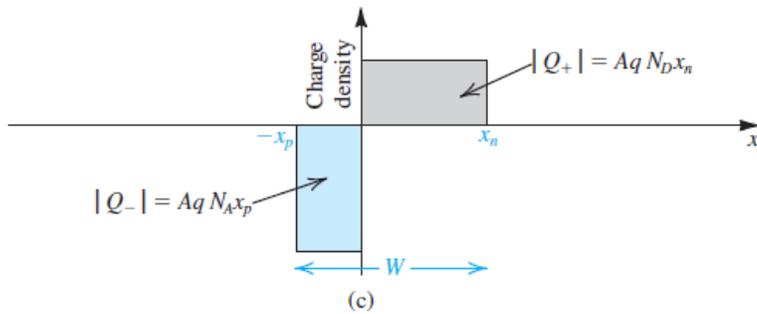
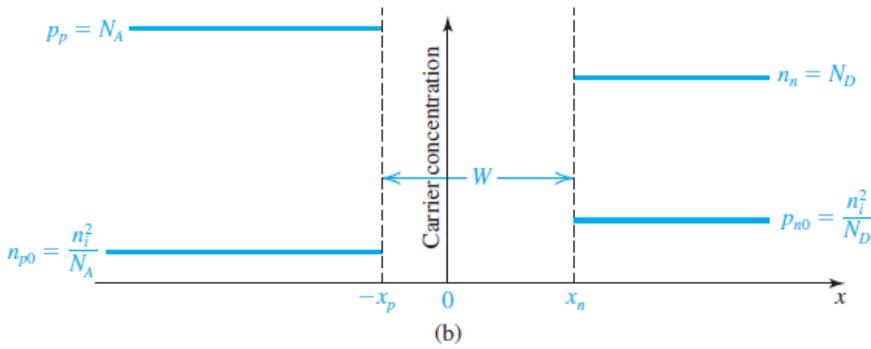
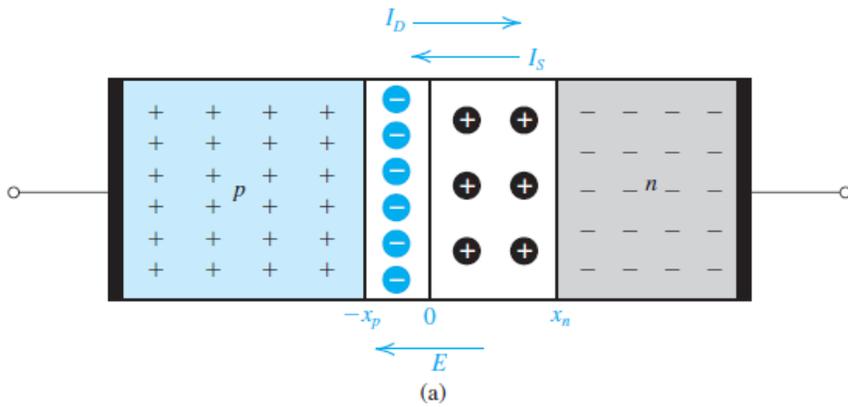
- Semiconductor sujeto a un campo eléctrico \vec{E}
- $J_p = qp\mu_p E$
 $J_n = qn\mu_n E$ } $\Rightarrow J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$
- Ej. Si:
 - $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/Vs$
 - $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/Vs$

Corriente de Difusión

- Ocurre debido a una concentración no-uniforme de portadores
- $J_p = -qD_p \frac{\partial p(x)}{\partial x}$
- $J_n = qD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x}$
- Ej. Si:
 - $D_n = 35 \text{ cm}^2/s$
 - $D_p = 12 \text{ cm}^2/s$

Relación de Einstein

- $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q}$



Repaso: Juntura p-n

Escalon en la concentración de portadores:

- ID: Corriente Difusión

$$|Q_+| = AqN_Dx_n = |Q_-| = AqN_Ax_p \Rightarrow \frac{x_p}{x_n} = \frac{N_D}{N_A}$$

$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$: Potencial de contacto

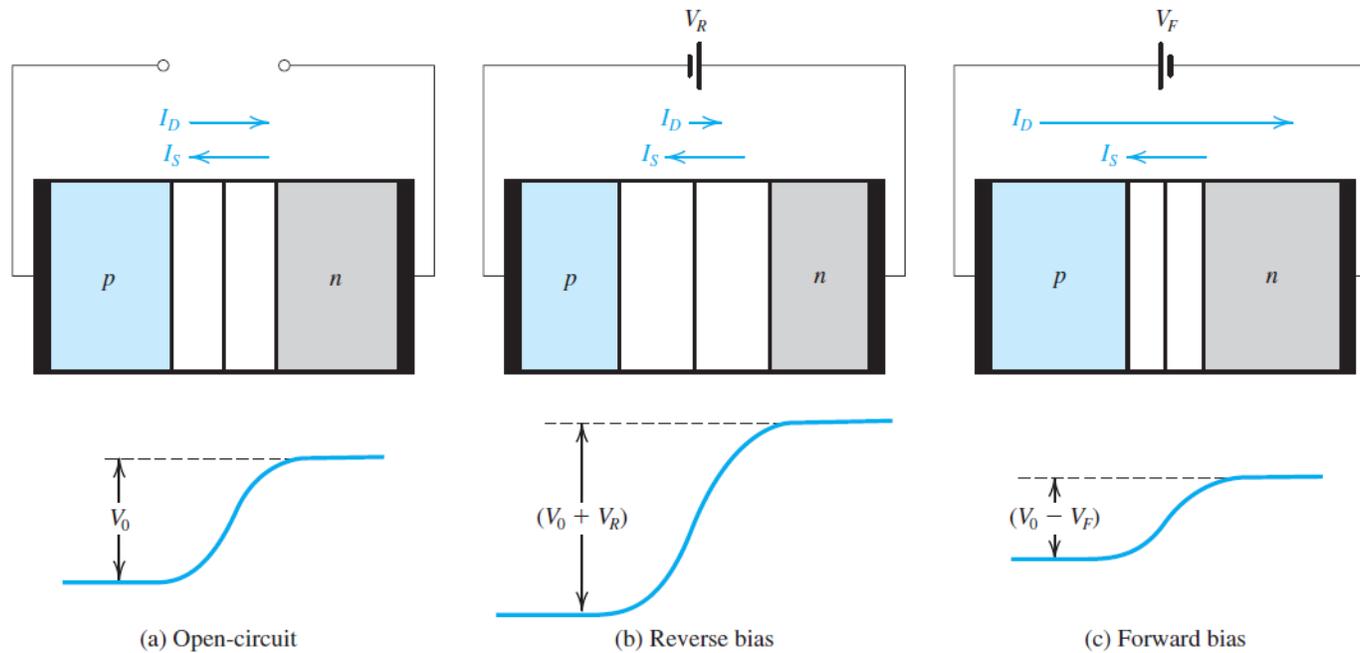
- $V_0 = 0.6 \dots 0.8V @300K$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) V_0} \quad \epsilon: \text{permitividad del Silicio}$$

Campo Eléctrico \vec{E} :

- IS: Corriente Drift

Equilibrio: $I_{Dh^+} = I_{Sh^+}, I_{De^-} = I_{Se^-}$



(a) Open-circuit (equilibrium)

Barrera potencial sube

- Zona Deplexión más ancha.
- Cada vez menos port. Mayoritarios pasan al otro lado. Con $V_R \approx 100mV$ ya no pasa ninguno.

Port. Minoritarios siguen pasando gracias a \vec{E}

- Nadie los repone, concentración casi 0 en los bordes: **Extracción de portadores minoritarios.**
- Corriente reversa muy chica.
- No depende de V_R , depende mucho de T.

(b) Reverse bias

Barrera potencial baja

- Zona Deplexión más angosta.

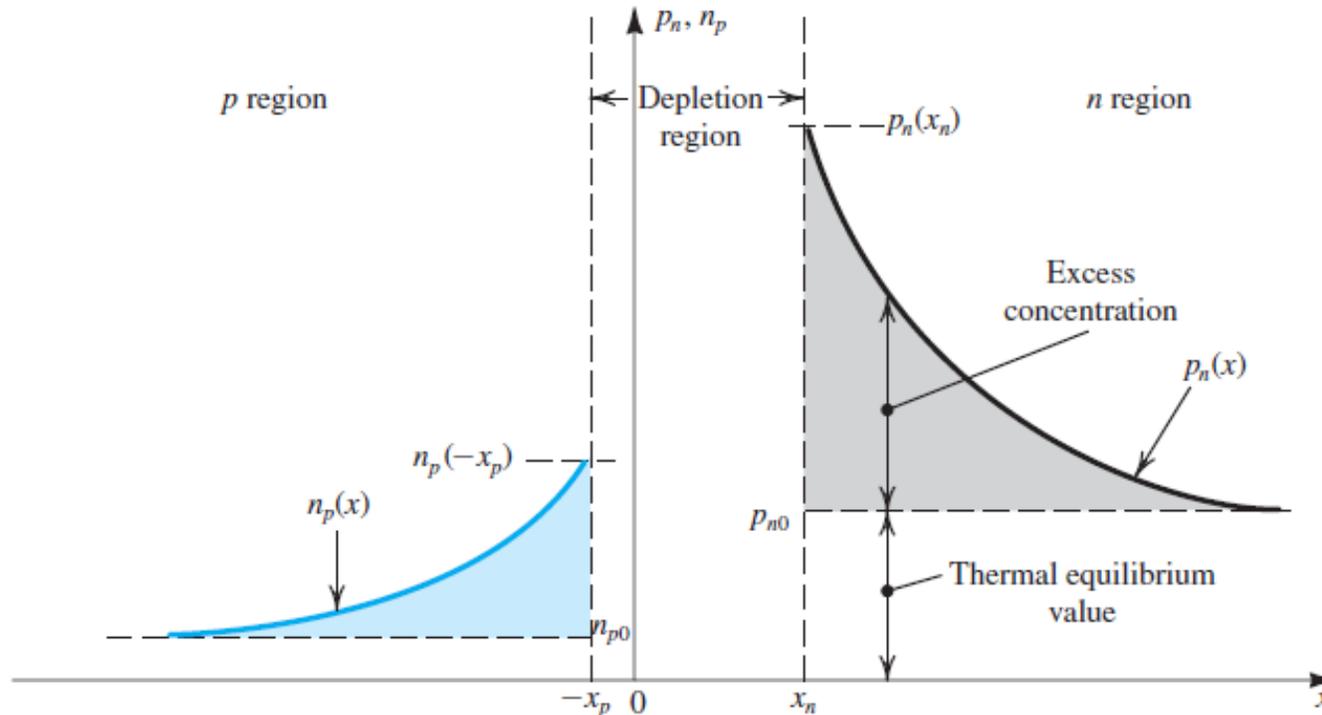
Muchísimos Port. Mayoritarios pasan al otro lado.

- Aumentan los port. Minoritarios a cada lado de la juntura.
- **Inyección de portadores minoritarios.**
- Hay muchísimos portadores para bancar la inyección.
- Corrientes enormes para poco V_F y aumenta muchísimo con un pequeño ΔV_F .

(c) Forward bias

Repaso: Juntura p-n con tensión aplicada

Repaso: Juntura p-n con tensión aplicada



Concentración de portadores:

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{(x-x_n)}{L_p}}$$

Lp, Ln: Diffusion length

$$n_p(x) = n_{p0} + n_{p0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{(x-x_p)}{L_n}}$$

- Con $V > 0$ describe **Inyección de port. Minoritarios.**
- Con $V < 0$ describe **Extracción de port. Minoritarios.**

Densidad de corriente en la zona de deplexión es constante e igual a su valor en el borde:

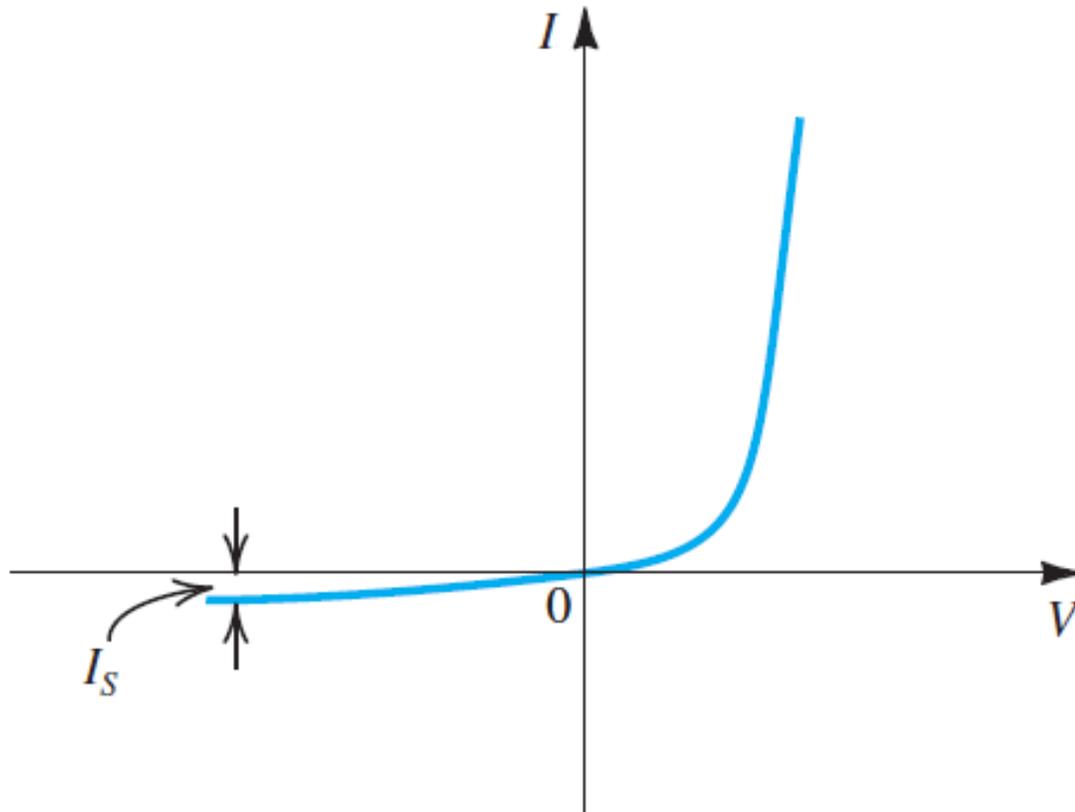
$$J_n = qD_n \frac{\partial n_p(x)}{\partial x} \Big|_{x=-x_p}, J_p = -qD_p \frac{\partial p_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_n}$$

$$\Rightarrow I = Aqn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

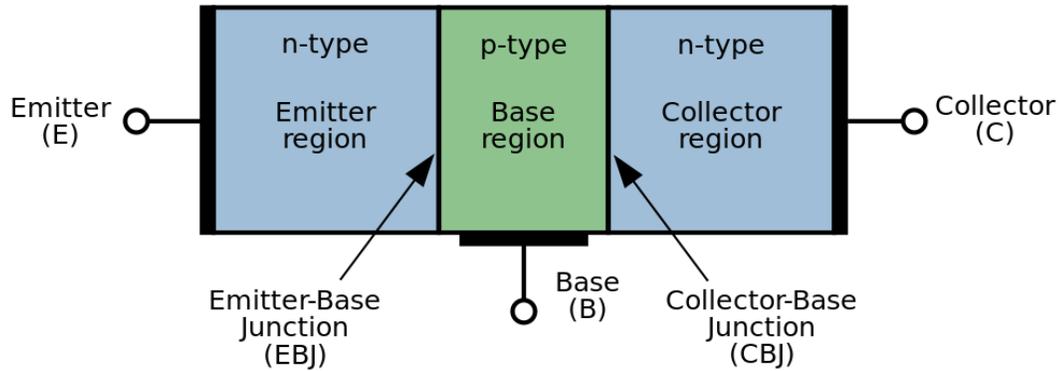
Repaso: Juntura p-n con tensión aplicada

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

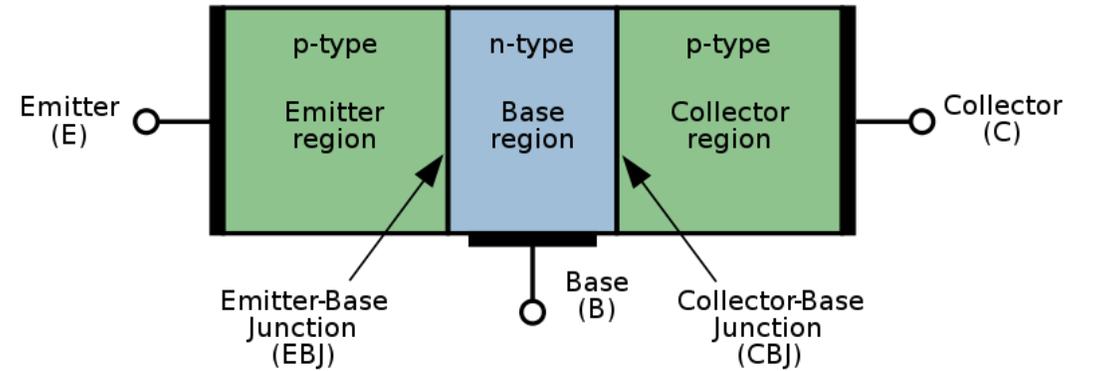
$$I_S = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$



NPN

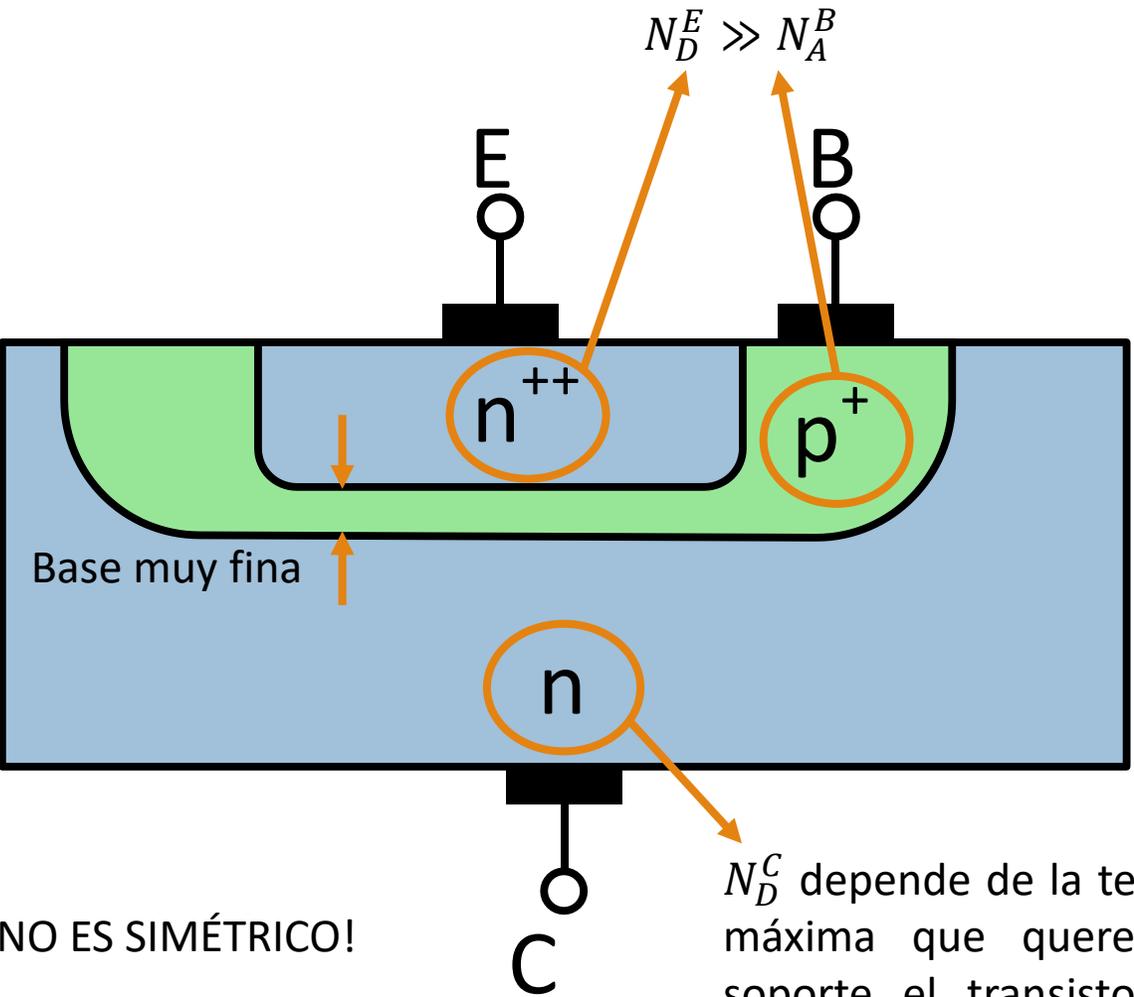


PNP



Zona o Modo	Juntura BE	Juntura BC	Aplicación

Transistor Bipolar: Estructura Física y Modos de Operación

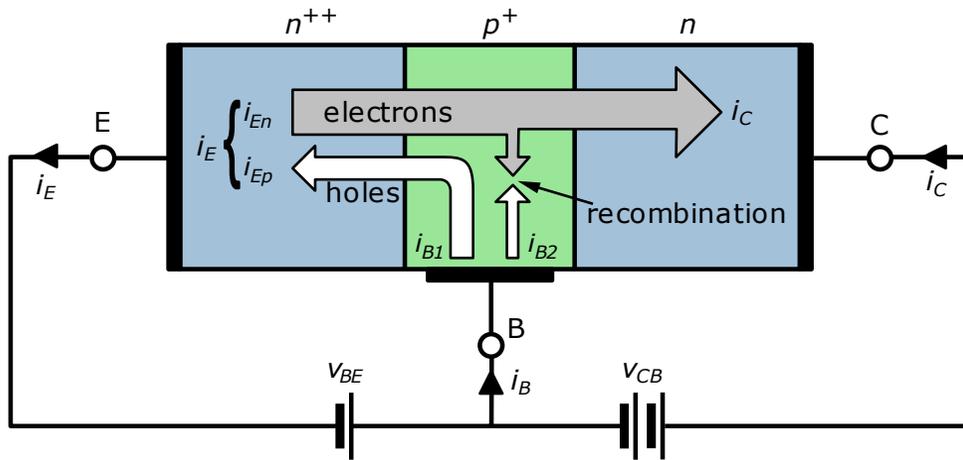


Estructura física real

NO ES SIMÉTRICO!

Participan portadores de ambas polaridades (h^+ , e^-):
 Transistor **Bipolar**.

N_D^C depende de la tensión V_{CB} máxima que queremos que soporte el transistor. Cuanto mayor N_D^C menos V_{CB} soporta. Por lo general $N_D^C < N_A^B$



Operación física: Zona Activa (NPN)

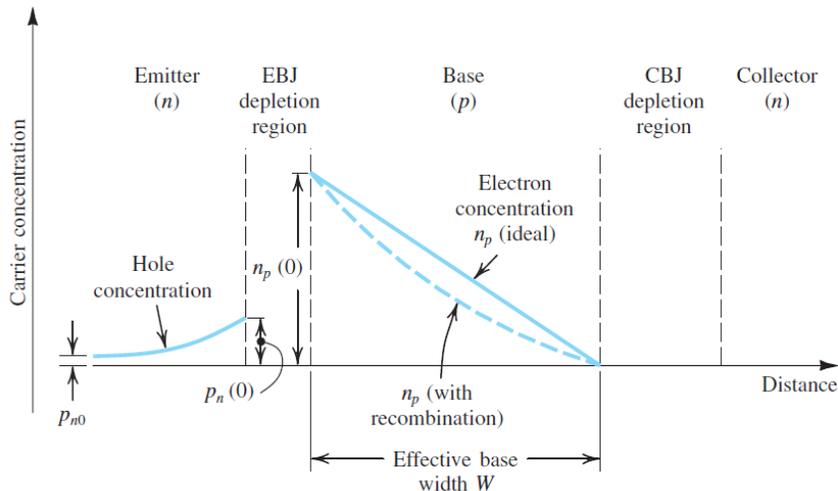
Análisis según la distribución de portadores minoritarios:

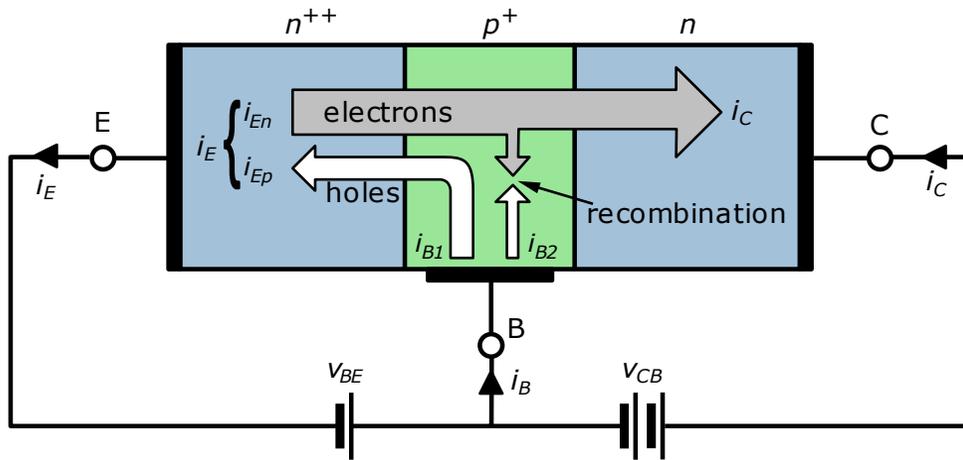
- Los e^- se inyectan de E a B y los h^+ se inyectan de B a E
- $N_D^E \gg N_A^B \Rightarrow n_p(0) \gg p_n(0)$
- Base: $n_p(0) = n_{p0} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$, Emisor: $p_n(0) = p_{n0} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$

Los e^- que llegan a la base difunden hacia la J. BC y son inmediatamente arrastrados (drift) hacia el colector.

- Son “colectados”.
- $n_p(W) = 0$
- La base es tan angosta que la distribución de e^- es casi lineal.
- $I_n = A_E q D_n \frac{\partial n_p(x)}{\partial x} = A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W} \right)$

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}, I_S = A_E q \frac{D_n n_i^2}{W N_A^B}$$



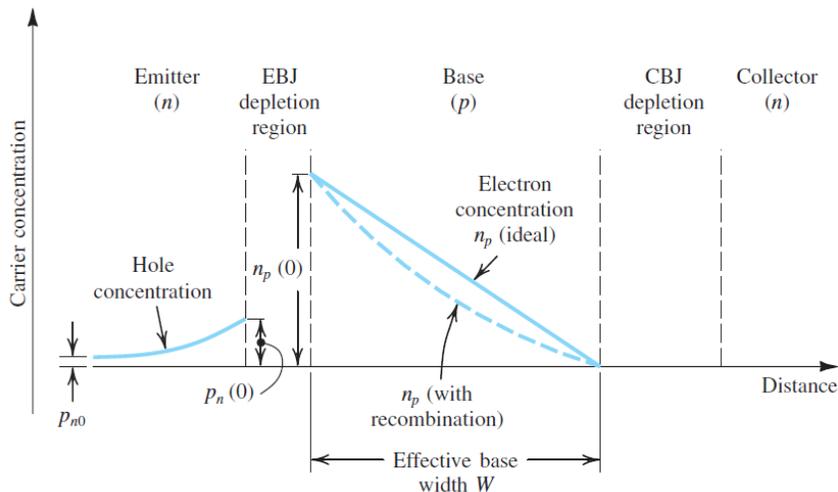


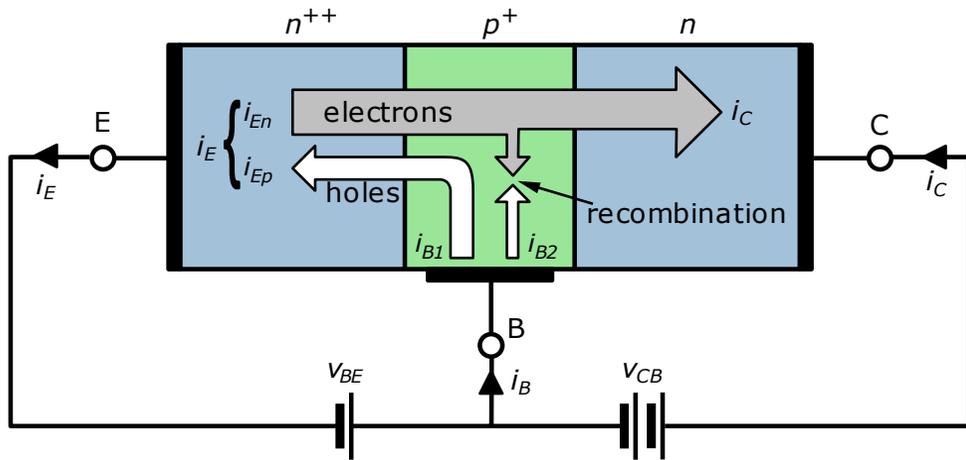
Operación física: Zona Activa (NPN)

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}, I_S = A_E q \frac{D_n n_i^2}{W N_A^B}$$

Características de i_C :

- Independiente de v_{BC}
 - Fuente de corriente controlada por una tensión externa – Ideal Amps.
- $I_S \propto A_E$
 - Se puede usar para escalar i_C según el tamaño del transistor.
- $I_S \propto n_i^2$
 - Fuerte dependencia con T (x2 cada $\Delta T = 5^\circ C$)
- Valores típicos de $I_S @ 300K$: $10^{-12} - 10^{-18} A$





Operación física: Zona Activa (NPN)

Corriente de Base: $i_B = i_{B1} + i_{B2}$

- i_{B1} : Difusión de h^+ en el Emisor
- Mismo razonamiento que para la difusión de e^- en la Base:

$$\Rightarrow i_{B1} = A_E q \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D^E} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

- i_{B2} : Recombinación de e^- en la Base

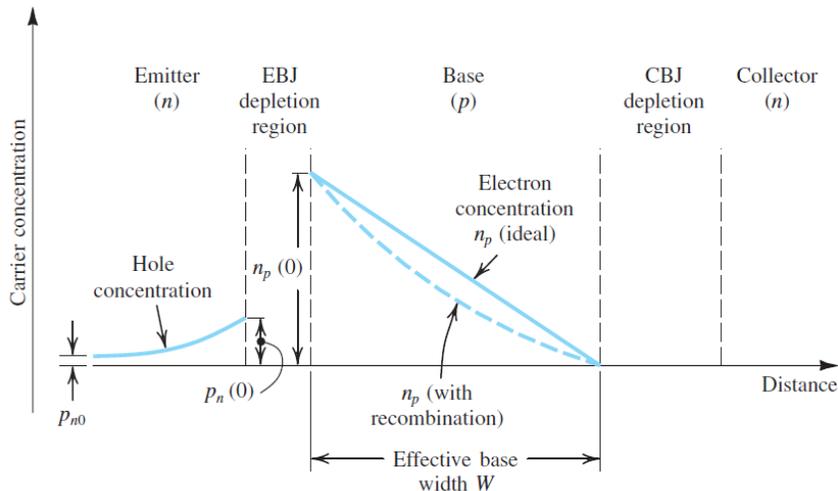
- τ_b tiempo medio de recombinación ($\tau_b = \frac{L_n^2}{D_n}$)

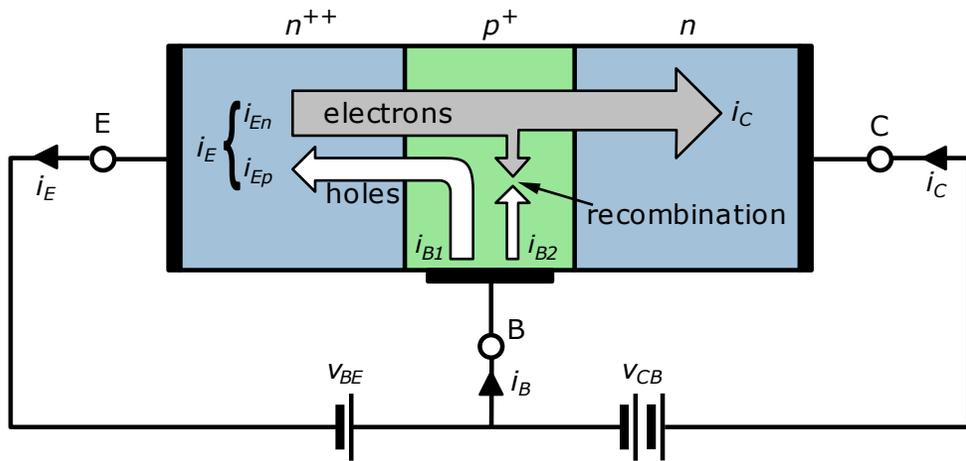
$$\circ i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b}, Q_n = A_E q \frac{1}{2} n_p(0) W$$

$$\Rightarrow i_{B2} = \frac{1}{2} A_E q \frac{D_n n_i^2 W}{L_n N_A^B} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$i_B = I_S \left(\frac{D_p N_A^B W}{D_n N_D^E L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{L_n^2} \right) e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$\frac{1}{\beta}$





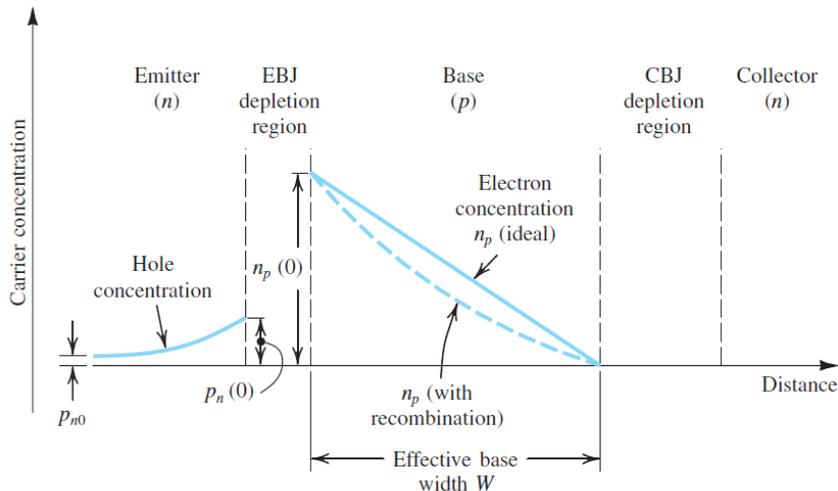
Operación física: Zona Activa (NPN)

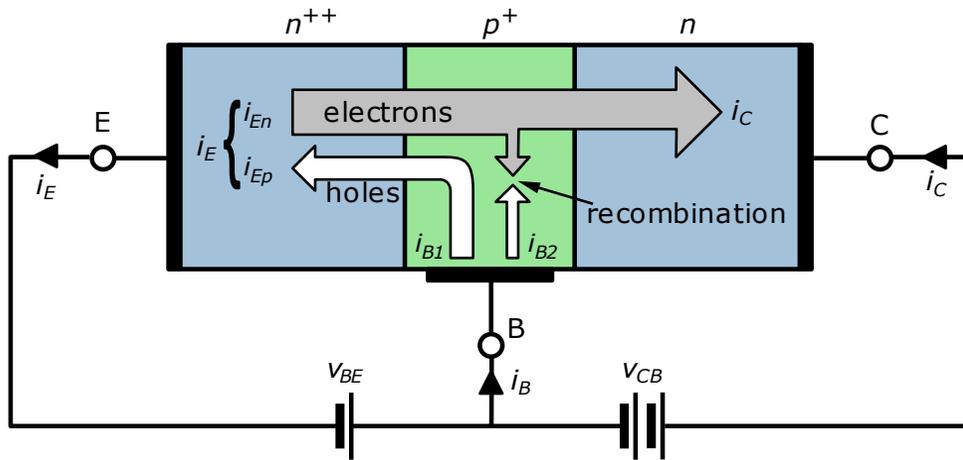
$$i_C = \beta i_B$$

$$\beta = \left(\frac{D_p N_A^B W}{D_n N_D^E L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{L_n^2} \right)^{-1}$$

Ganancia en corriente de emisor-común β :

- $L_n, L_p > W, N_D^E \gg N_A^B \Rightarrow \beta \gg 1$
- Valores típicos: 50 – 200
 - Puede llegar a 1000
 - En transistores de potencia puede ser tan bajo como 20.
- Es (prácticamente) constante en cada transistor.
- Pero varía mucho de un transistor a otro (fácil $\pm 50\%$)
- También se lo conoce como h_{FE} (p.ej. en hojas de datos).
- Activa Inversa tiene su propio $\beta_R \ll \beta$ (incluso $\beta_R < 1$)

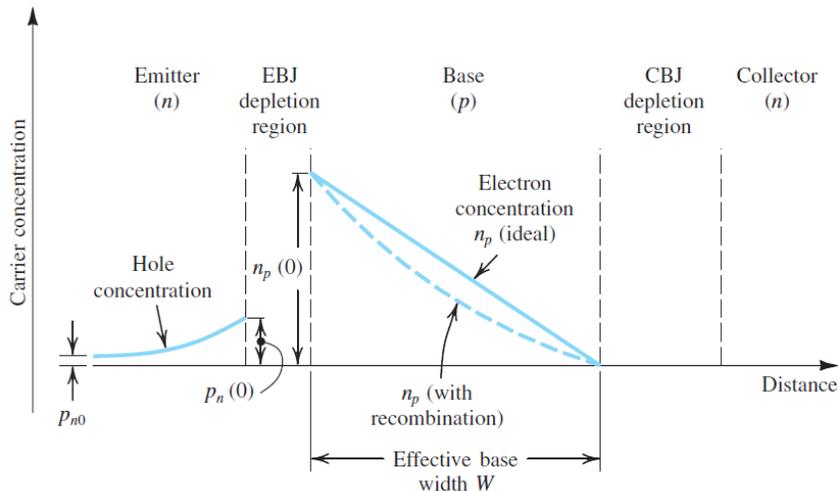




Operación física: Zona Activa (NPN)

Corriente de Emisor: $i_E = i_B + i_C$

$$i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$$



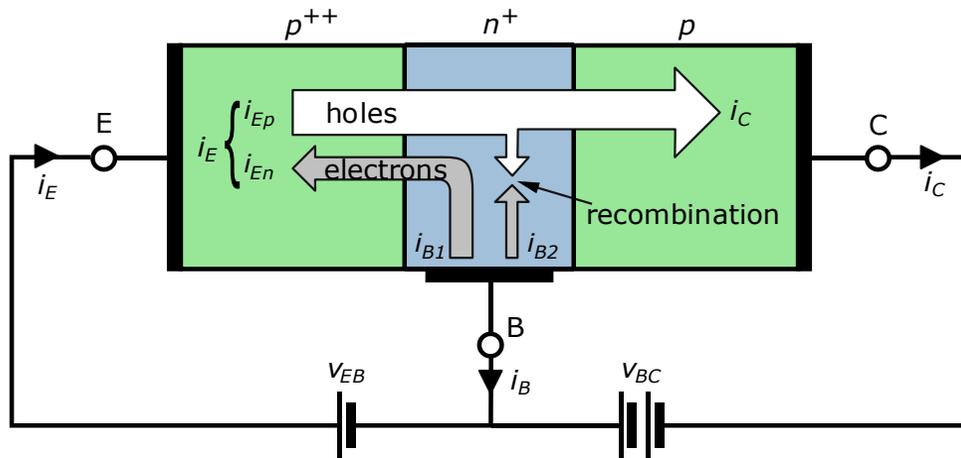
Si $\beta \gg 1$: $\begin{cases} i_E \simeq i_C \\ i_B \ll i_C \end{cases}$

$i_C = \alpha i_E$

α : Ganancia de corriente en Base Común.

$$\begin{cases} \alpha < 1 \\ \alpha \simeq 1 \end{cases} \quad \begin{cases} \beta = \frac{\alpha}{\alpha+1} \\ \alpha = \frac{\beta}{\beta+1} \end{cases}$$

Operación física: Zona Activa (PNP)



Zona Activa:

- J. EB Directa: $V_{EB} > 0$
- J. CB Inversa: $V_{BC} > 0$

Estructura física:

- Base fina
- $N_A^E \gg N_D^B$

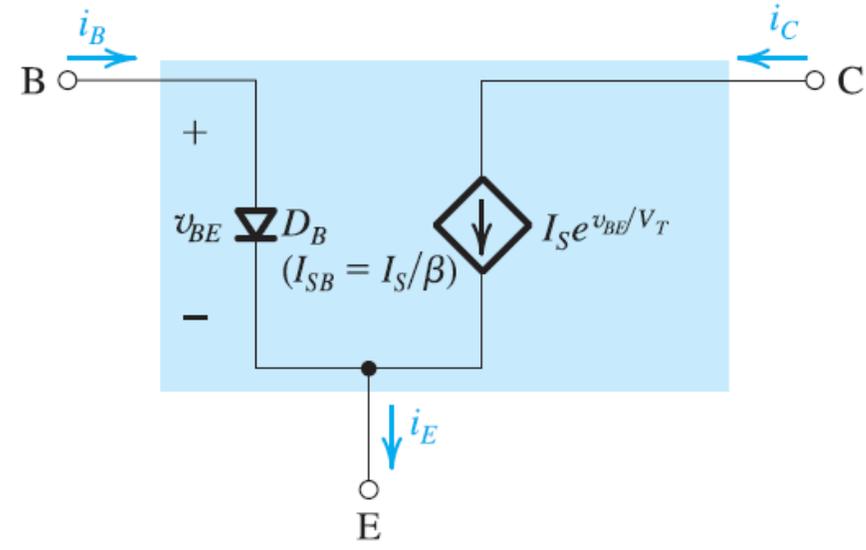
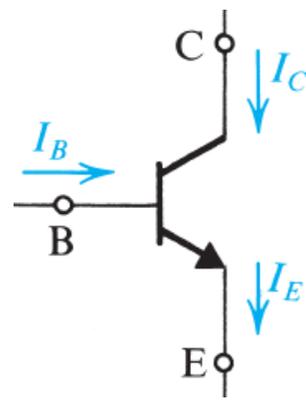
$$i_C = I_S e^{\frac{v_{EB}}{V_T}}$$

$$i_C = \beta i_B$$

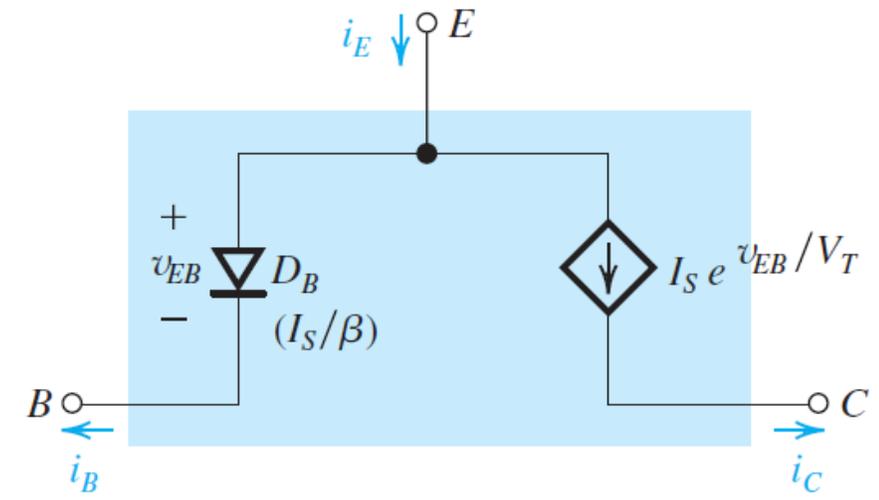
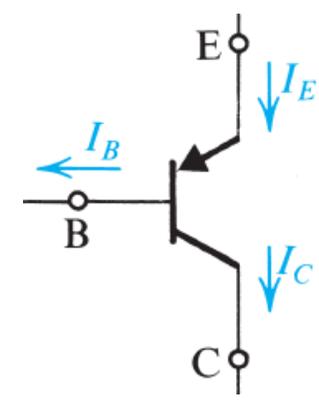
$$i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$$

$$\beta \gg 1$$

NPN

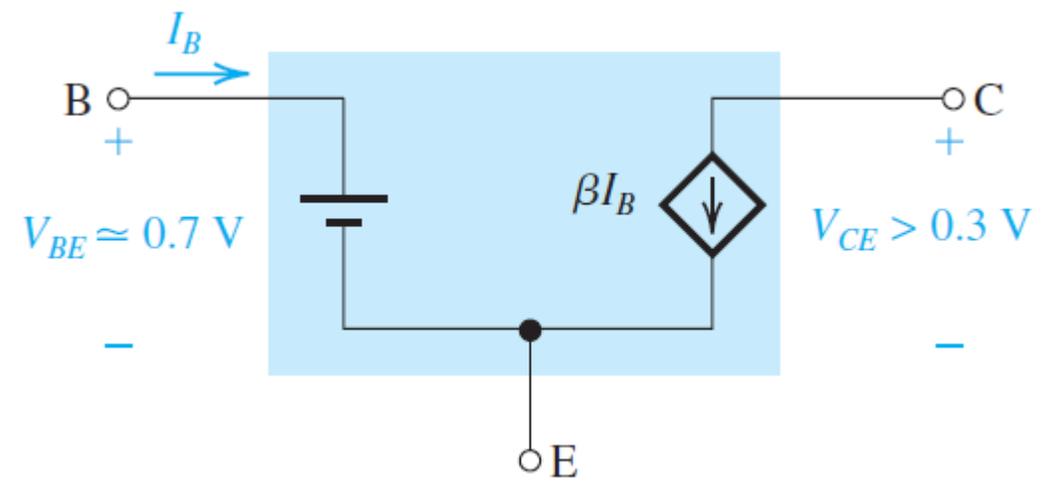
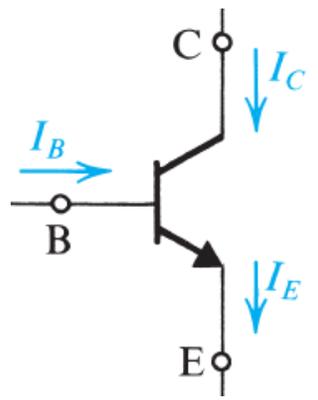


PNP

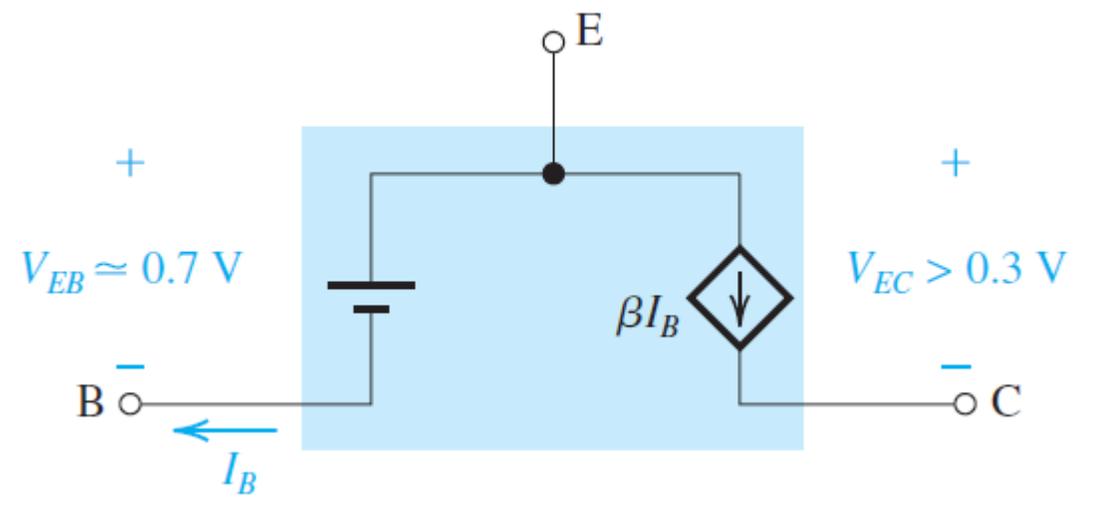
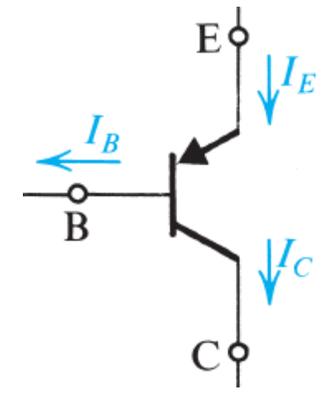


Símbolo del BJT y Modelo en Zona Activa

NPN

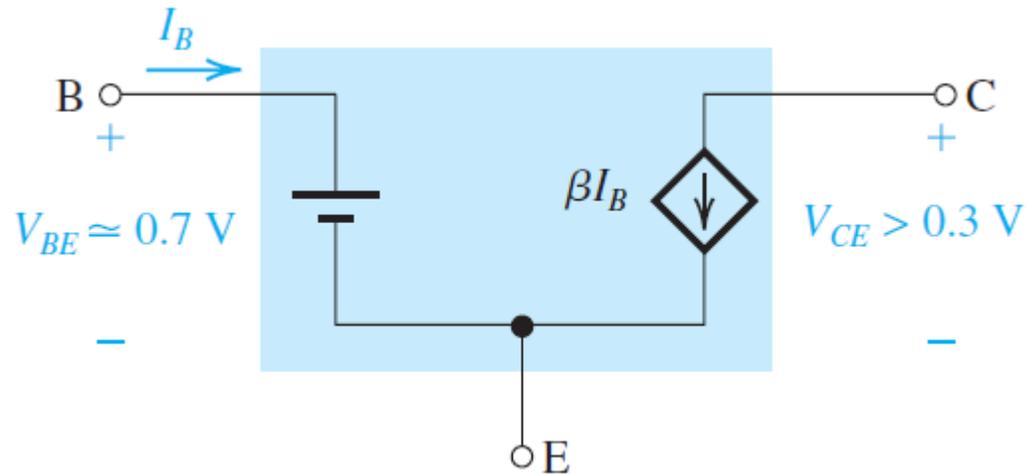
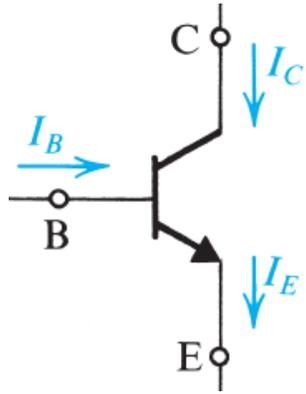


PNP



Modelo DC Simplificado (Zona Activa)

NPN



Juntura BE en directa:

- $i_C > 0: \Rightarrow V_{BE} \approx 0.6 \dots 0.7V$

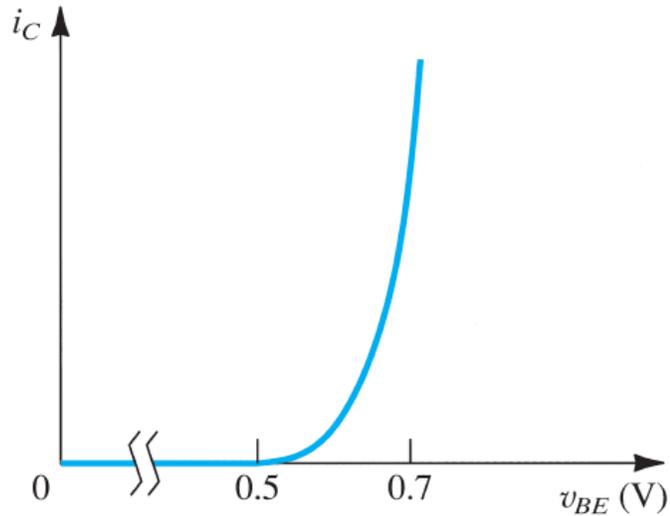
Juntura BC en inversa:

- Idealmente:
 $V_{BC} < 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{BE} - V_{BC} > 0.6 \dots 0.7V$
- En realidad la J.BC no conduce francamente hasta $V_{BC} < 0.4 V$ aproximadamente.
 $\Rightarrow V_{CE} > 0.2 \dots 0.3V (V_{CEsat})$

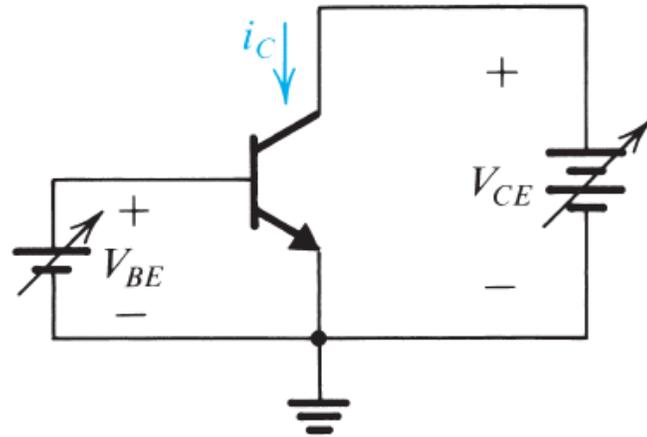
PNP es igual pero invirtiendo los subíndices:

- $i_C > 0: \Rightarrow V_{EB} \approx 0.6 \dots 0.7V$
- $V_{EC} > 0.2 \dots 0.3V (V_{ECsat})$

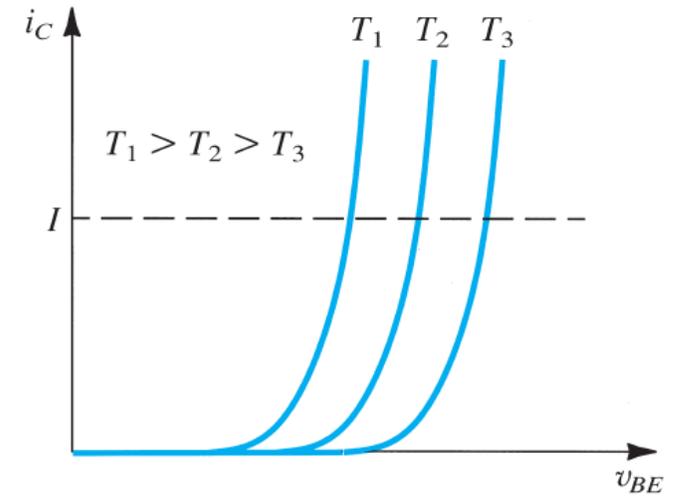
Límites de la Zona Activa



Exponencial como en los diodos.
 Puedo modelar $i_C > 0$ con un $V_{BE} \approx 0.6 \dots 0.7V$ constante.



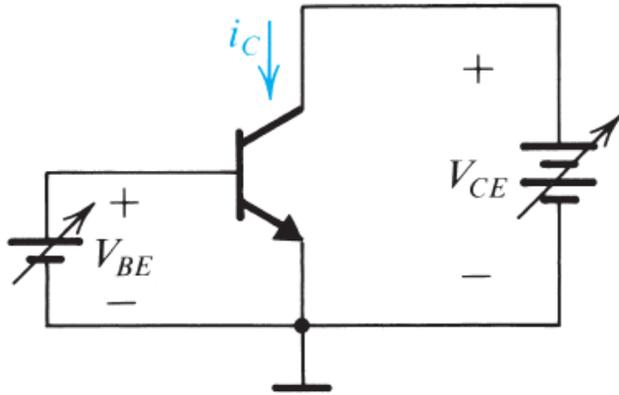
Barro V_{BE} y deajo fijo $V_{CE} > V_{CEsat}$



Varía con la Temperatura.

$$\frac{\Delta v_{BE}}{\Delta T} \approx -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

Características Gráficas: $i_C - v_{BE}$



Características Gráficas: $i_C - v_{CE}$

Hay dependencia con v_{CE} : Efecto EARLY

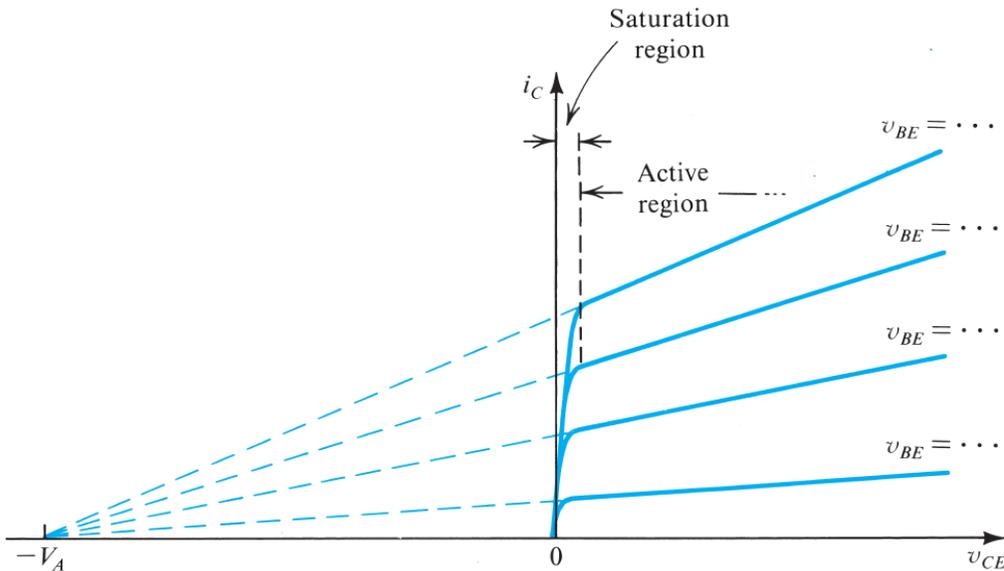
¿Porqué?

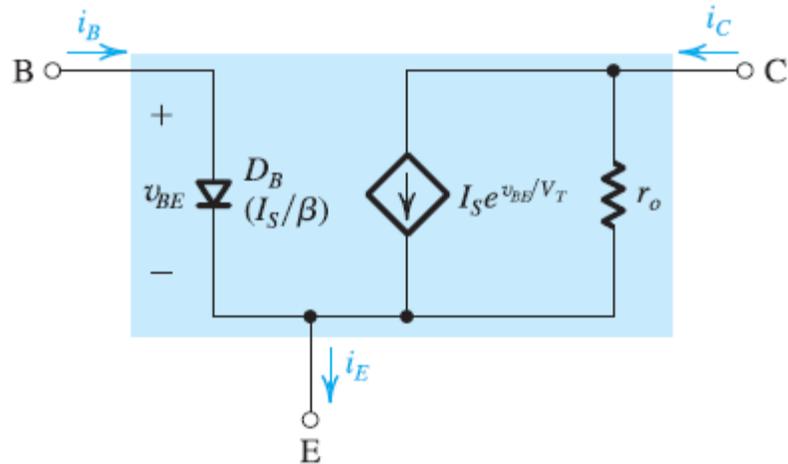
- Si cambia v_{CE} , aumenta el ancho de la zona de deplexión de la Junt. BC. Por lo tanto disminuye W (ancho efectivo de la base).
- Como $I_S \propto \frac{1}{W}$: Si $v_{CE} \uparrow \Rightarrow W \downarrow \Rightarrow I_S \uparrow \Rightarrow i_C \uparrow$

¿Cuánto vale V_A ?

- Típicamente entre 10V y 100V. Suele ser mayor que en MOS.

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





Características Gráficas: $i_C - v_{CE}$

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

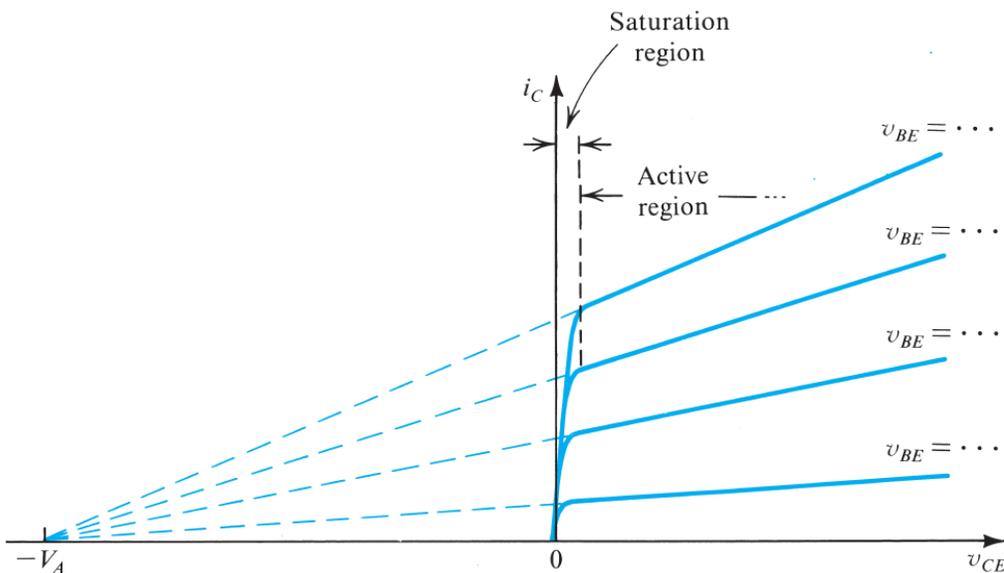
Dependencia con v_{CE} es equivalente a una resistencia de salida:

$$r_o = \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right]_{v_{BE}=cte}^{-1} = \frac{V_A}{I_C}$$

- Donde $I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$ (i.e. despreciando el efecto Early).

V_A no se suele tener en cuenta para el análisis DC.

- Se incorpora r_o para el análisis en señal.
- Puede ser determinante en la ganancia de un amplificador.



El transistor como amplificador

En DC ($v_{be} = 0$):

- $I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$

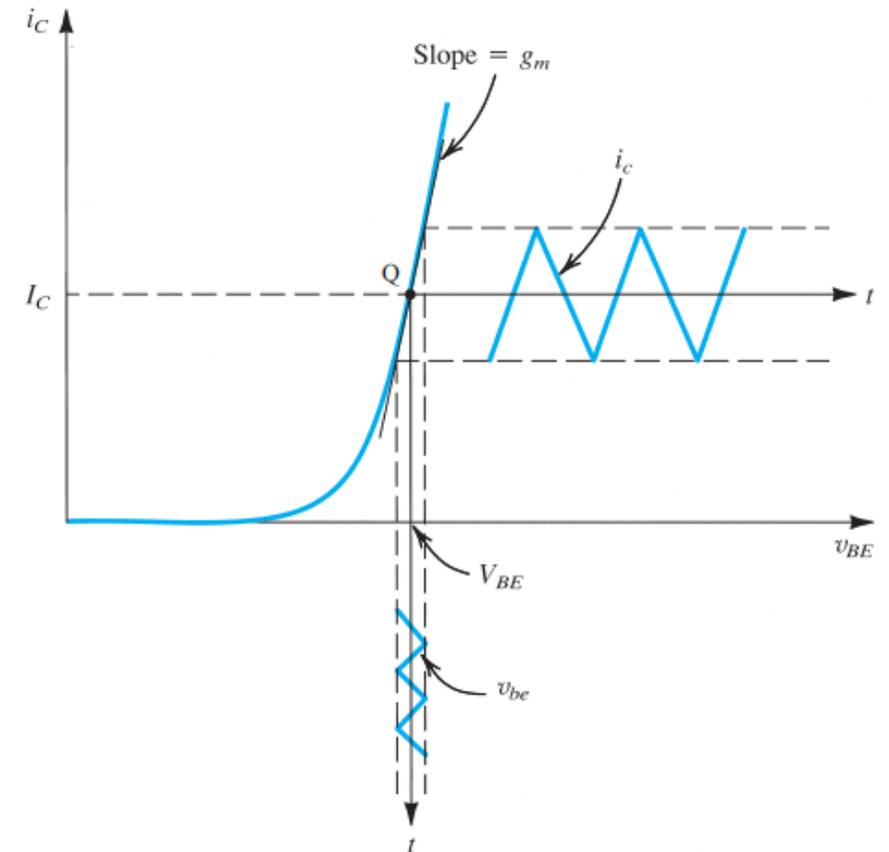
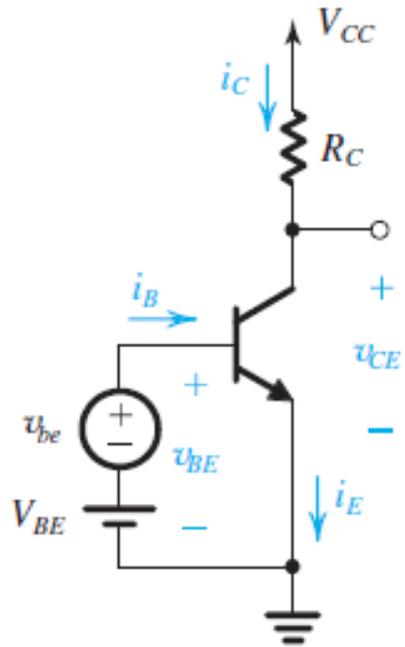
Si sumamos señal:

- $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$, $i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$

Desarrollo de Taylor de $i_C|_{v_{BE}=V_{BE}}$:

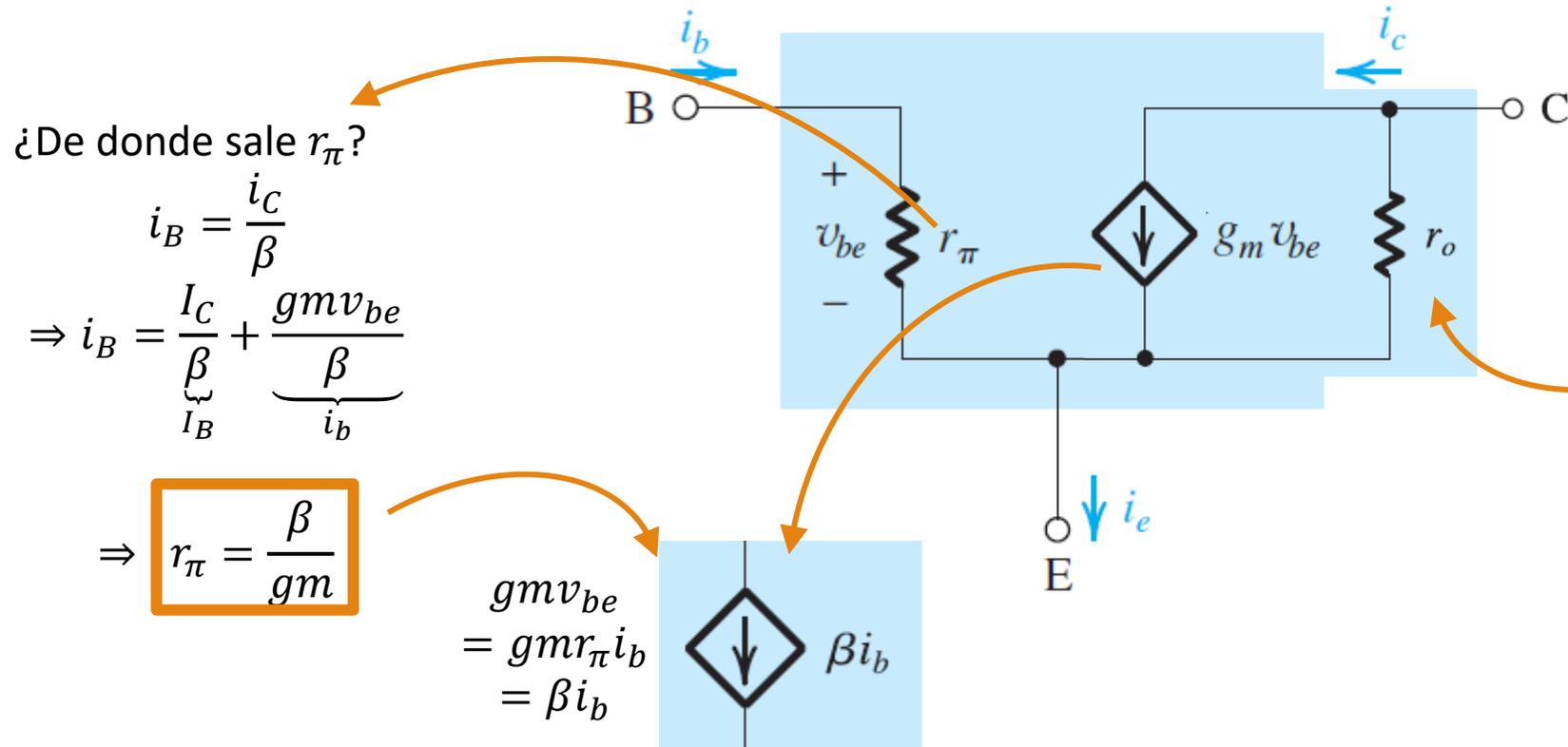
- $i_C = \underbrace{I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}_{=I_C} + \underbrace{\frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \Big|_{v_{BE}=V_{BE}}}_{=\frac{I_C}{V_T}} \underbrace{(v_{BE} - V_{BE})}_{v_{be}} + \dots$

- $\Rightarrow i_C = I_C + gm v_{be}$ tal que $gm = \frac{I_C}{V_T}$



Modelo de Pequeña Señal y Baja Frecuencia

NPN y PNP: **Mismo Modelo**
No hay que dar vuelta nada.



¿De donde sale r_π ?

$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$\Rightarrow i_B = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{I_B} + \underbrace{\frac{gm v_{be}}{\beta}}_{i_b}$$

$$\Rightarrow r_\pi = \frac{\beta}{gm}$$

$$gm v_{be} = gm r_\pi i_b = \beta i_b$$

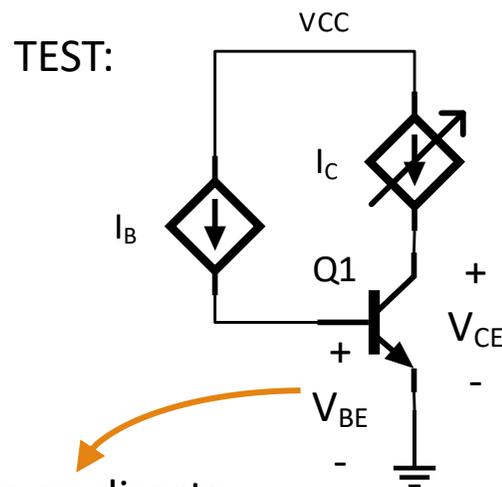
Si consideramos efecto Early

Transistor en Saturación

Juntura BC pasa de Inversa a Directa

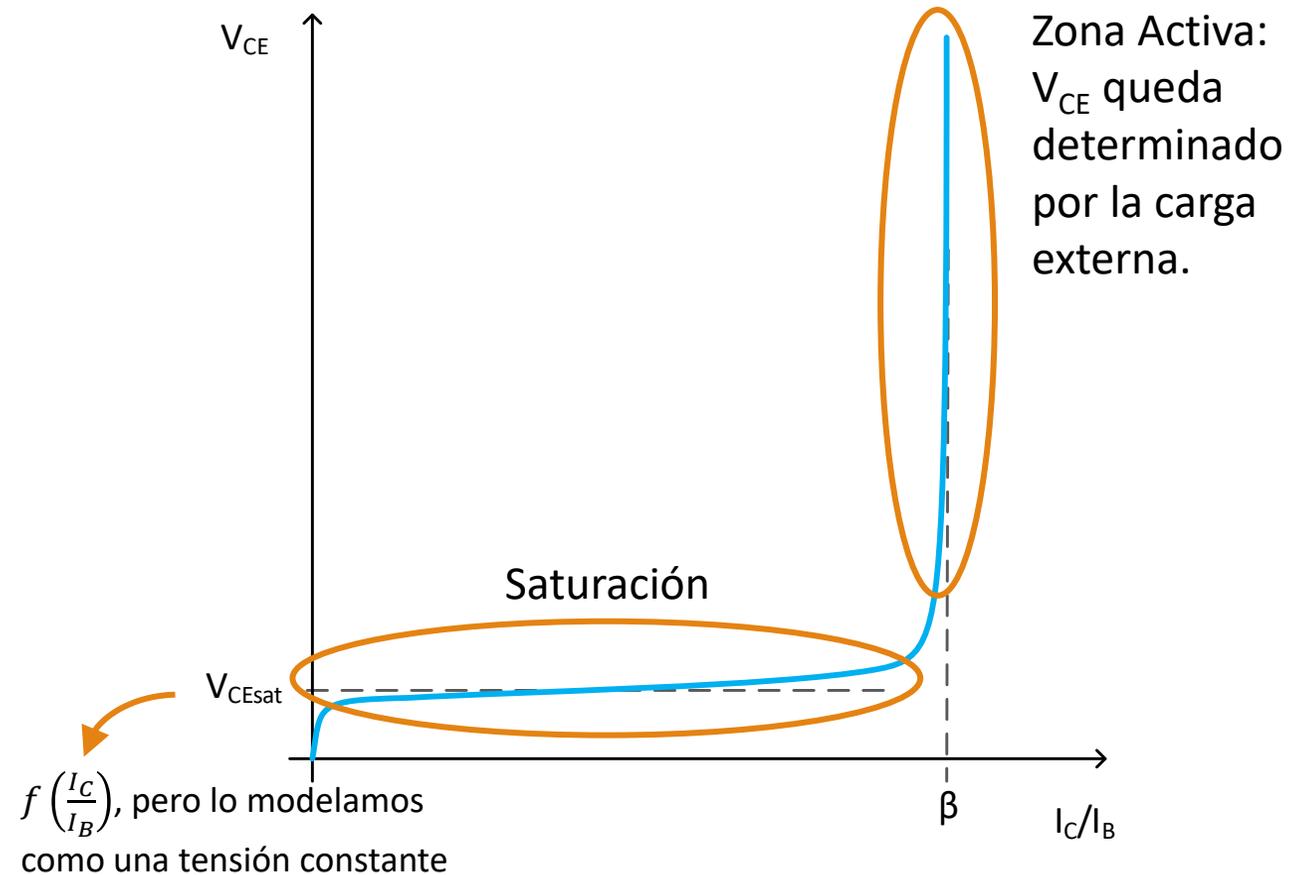
- En los hechos, se deja de cumplir $I_C = \beta I_B$

¿Qué pasa con V_{CE} ?

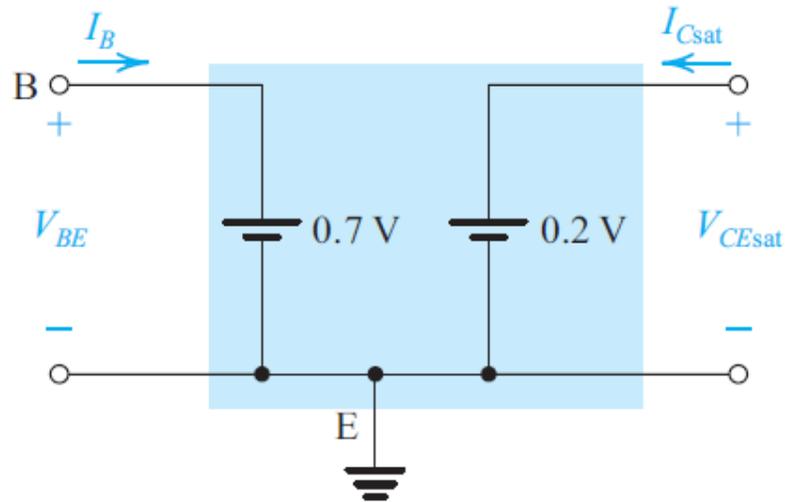


JBE sigue en directa:

$$V_{BE} \approx 0.6 \dots 0.7V$$



Modelo del Transistor en Saturación

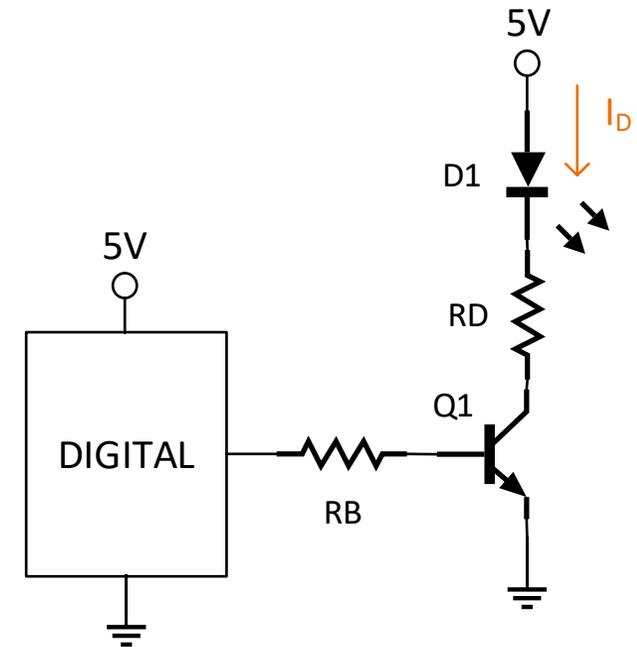


Condiciones a verificar:

- $I_C > 0$
- $I_B > \frac{I_C}{\beta}$

Ejemplo: Encender un LED

- Lo resolvemos en clase



Zona	Modelo	Condición
Corte	$I_E = I_B = I_C = 0$	$V_{BE} \leq 0$
Saturación	$V_{BE} = V_{BEon}$ $V_{CE} = V_{CEsat}$	$I_C > 0$ $I_B > \frac{I_C}{\beta}$
Activa	$V_{BE} = V_{BEon}$ $I_C = \beta I_B$	$I_C > 0$ $V_{CE} > V_{CEsat}$

Resumen de Modelos y Zonas de Operación

Comparación MOS - BJT

	BIPOLAR	MOS
V_{BE}, V_{GS}	V_{BE} constante	V_{GS} variable
I_B, I_G	$I_B \neq 0$	$I_G = 0$
Fuente de Corriente	Z. Activa: I vs V exponencial	Saturación: I vs V cuadrática
Llave Cerrada	Saturación: $V_{CE} \approx cte$	Z. Lineal: $V_{DS} \propto I_D$ (resistencia)
Amplificador EC / SC	$gm \propto I_C$	$gm \propto \sqrt{I_D}$

$$\frac{gm}{I_C} = \frac{1}{V_T} \approx 40V^{-1}$$

$$\frac{gm}{I_D} = \frac{2}{V_{GS} - V_t} \approx 1 \dots 10V^{-1}$$

($V_{GS} > V_t + 200mV$)

El BJT es un AMP
mucho + **EFICIENTE**