

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 8: Transistores Bipolares (2)

Patricio Parada
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

27 de Agosto de 2009

Contenidos

Transistores BJT Operación

Relaciones de Corriente en el *npn* en Modo Activo

$$i_E = i_C + i_B$$

$$i_C = \beta_F i_B$$

$$i_E = (1 + \beta_F) i_B = \frac{(1 + \beta_F)}{\beta_F} i_C.$$

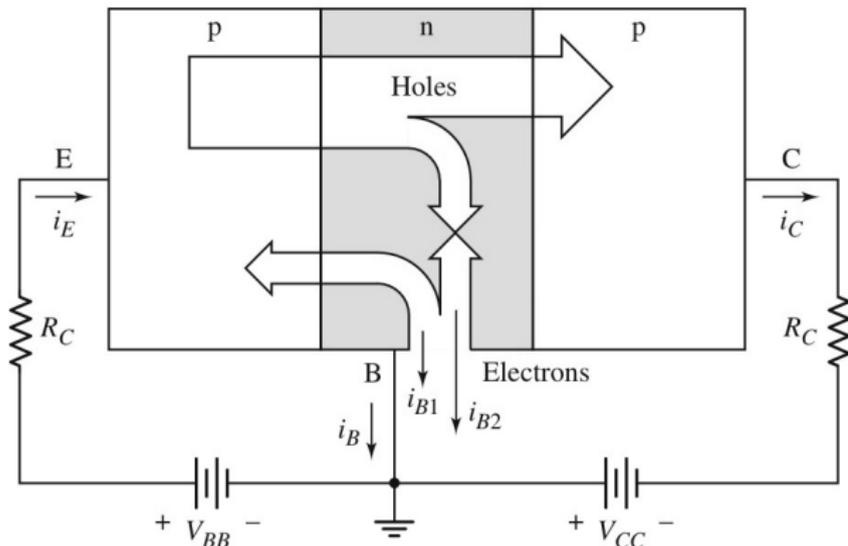
$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F}$$

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

$$i_E = I_s e^{v_{BE}/V_T}$$

Operación del transistor *pnp*

- ▶ Es muy similar a la del transistor *npn* en lo que respecta a sus expresiones algebraicas.



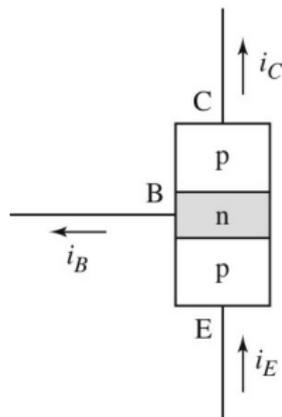
- ▶ En el caso del modo activo tenemos

$$i_E = I_S e^{v_{EB}/V_T}$$

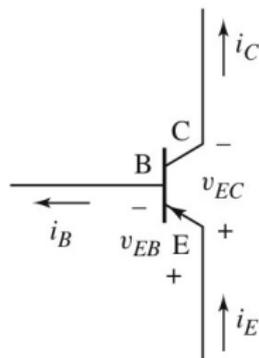
$$i_C = \alpha_F i_E = \alpha_F I_S e^{v_{EB}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta_F} = \frac{\alpha_F}{\beta_F} I_S e^{v_{EB}/V_T}.$$

Convenciones Circuitales y Símbolos I

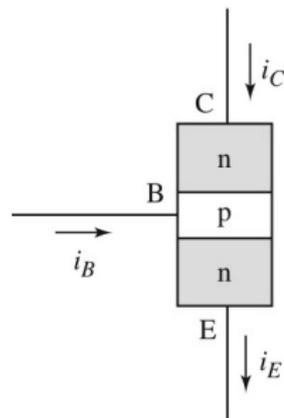


(a)

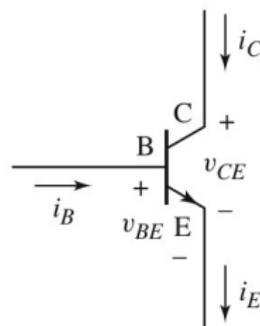


(b)

Convenciones Circuitales y Símbolos II



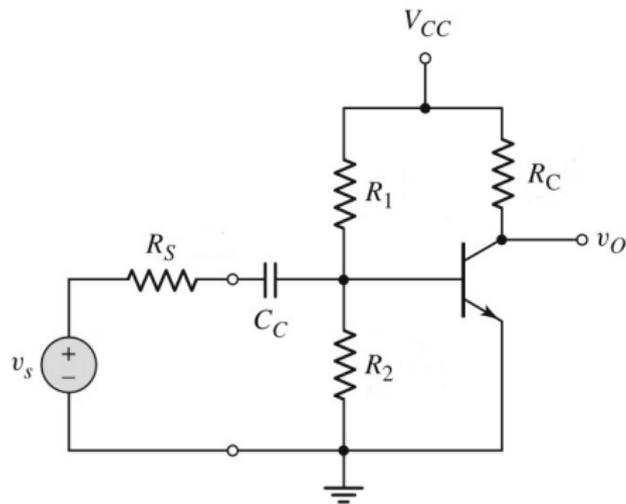
(a)



(b)

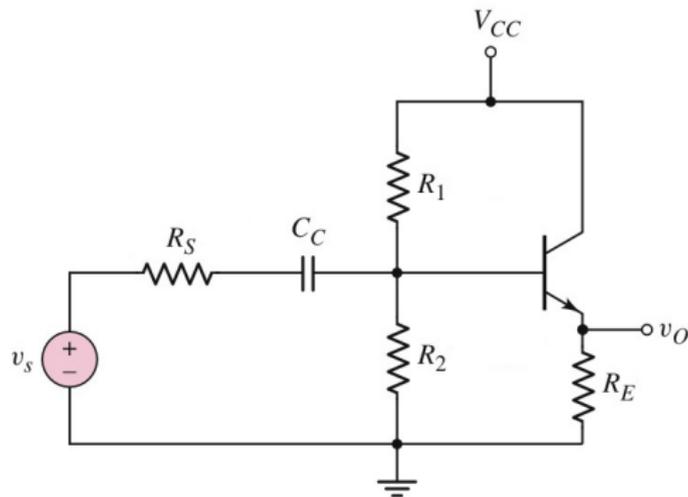
Configuraciones Típicas de un BJT I

- Existen tres configuraciones de conexión:
emisor común



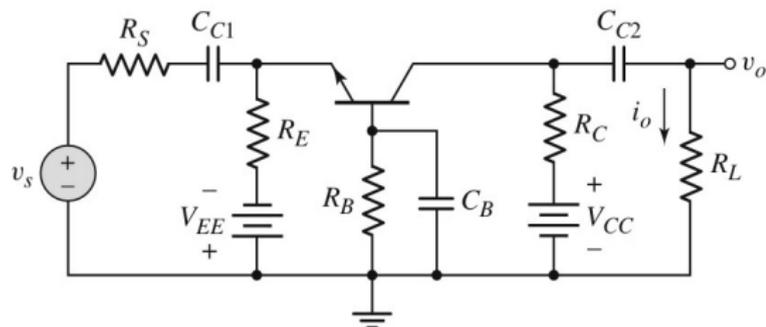
Configuraciones Típicas de un BJT II

- **colector común** (también llamada seguidor de emisor)



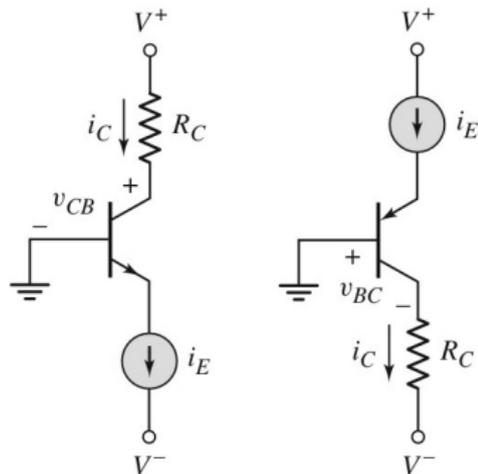
Configuraciones Típicas de un BJT III

► base común



Característica Corriente Voltaje I

- ▶ En el caso del transistor BJT, existen dos curvas que entregan información relevante acerca del comportamiento del dispositivo.
- ▶ El primero corresponde a la curva i_C vs. v_{CB} y se pueden construir utilizando una configuración de base común.



- ▶ Este arreglo nos permite determinar la relación entre i_C y v_{CB} para distintos valores de i_E .

Característica Corriente Voltaje II

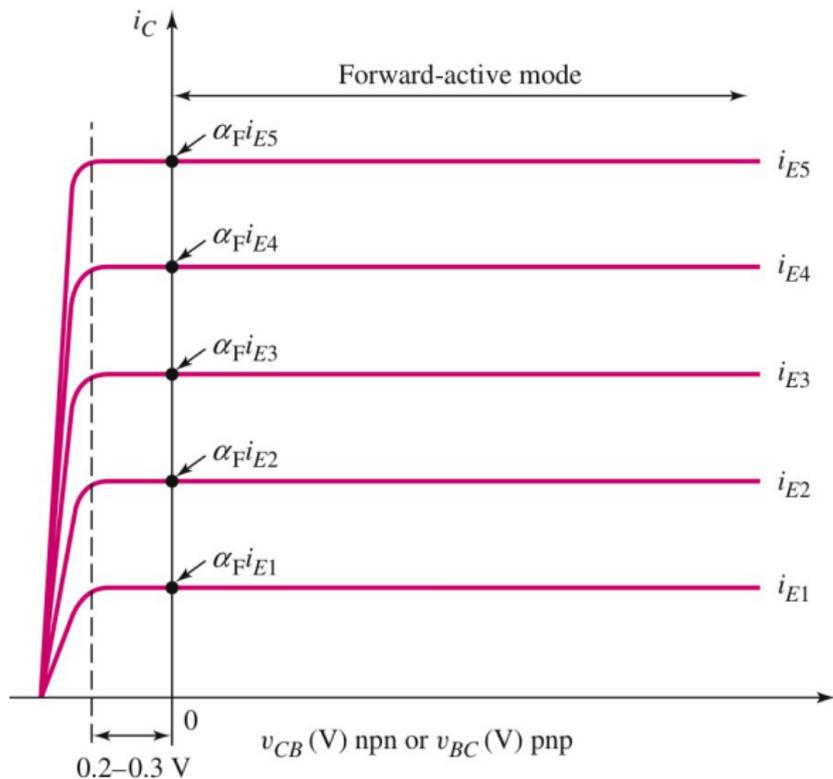
- ▶ Notemos que cuando la juntura BC está polarizada en forma inversa, la corriente i_C es casi independiente del voltaje en la juntura.
- ▶ Cuando la juntura BC está polarizada en forma directa, la relación

$$i_C = \alpha_F i_E$$

deja de ser válida. La corriente i_C permanece relativamente constante en el rango $0,2 - 0,3$ V, para luego caer rápidamente a 0.

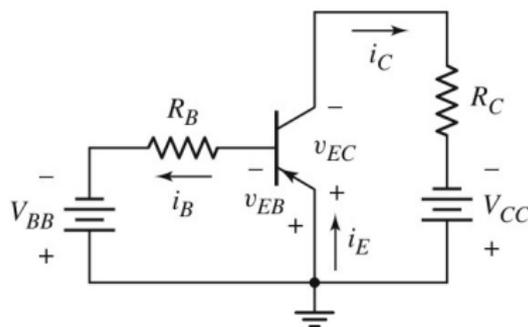
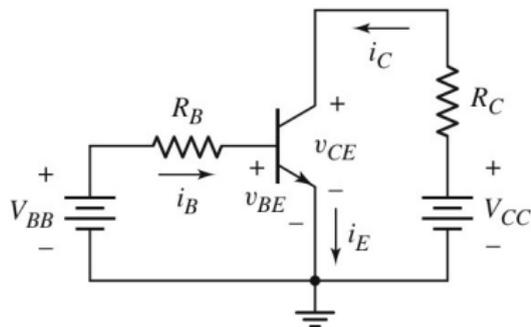
- ▶ La figura muestra esta relación para varios valores de corriente de emisor.

Característica Corriente Voltaje III



Característica Corriente Voltaje IV

- ▶ La segunda curva corresponde a i_C vs. v_{CE} para distintos valores de la corriente en la base.
- ▶ Se obtiene utilizando una conexión de emisor común variando el voltaje de polarización V_{CC} .



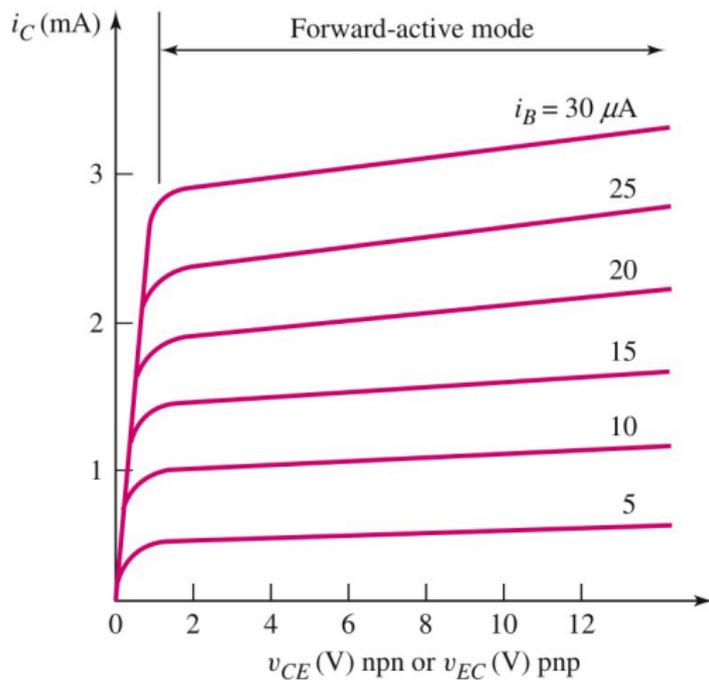
- ▶ Transistor *npn*: modo activo requiere $V_{BC} \leq 0$, y por lo tanto

$$V_{CE} \geq V_{BE(\text{on})} \quad (1)$$

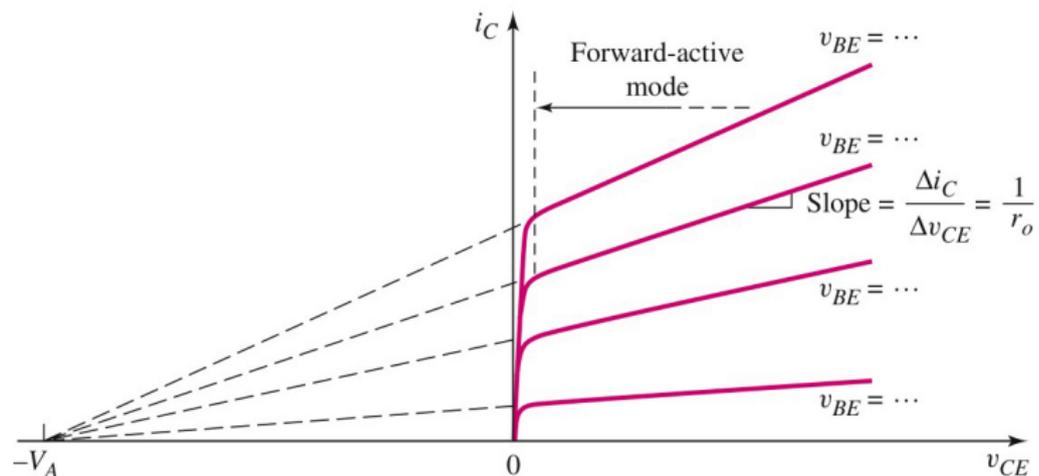
en el modo activo.

- ▶ La corriente es relativamente constante, aunque uno puede observar una pequeña dependencia lineal entre i_C y V_{CE} en el modo activo.
- ▶ Si $V_{CE} < V_{BE(\text{on})}$, la juntura BC queda polarizada en forma directa, lo que hace caer rápidamente la corriente i_C a 0. Esta región de operación recibe el nombre de **modo de saturación**.

Característica Corriente Voltaje VI



Característica Corriente Voltaje VII



- ▶ Las curvas se intersectan en un punto de valor $v_{CE} = -V_A$, llamado **voltaje Early**, en honor a J.M. Early quien fue el primero en predecir esta característica.

Característica Corriente Voltaje VII

- ▶ Rango típico: $50 < V_A < 300 \text{ V}$.
- ▶ La dependencia lineal entre i_C y v_{CE} en el modo activo queda modelada por

$$i_C = \alpha_F I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right). \quad (2)$$

- ▶ Esta pendiente también puede interpretarse como una resistencia de salida r_o , cuando calculamos la impedancia desde la salida del circuito mirando hacia el colector.

$$\frac{1}{r_o} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{v_{BE}=\text{constante}} \approx \frac{I_C}{V_A}. \quad (3)$$

- ▶ Existen dos efectos que no hemos considerado en nuestro análisis: corrientes de fuga (*leakage*) y los efectos de ruptura.
- ▶ Corriente de fuga:
 - ▶ Fijemos $i_E = 0$ en un circuito de base común $\Rightarrow i_C = 0$. Sin embargo, las juntura BC puede permanecer polarizada en forma inversa e inducir la aparición de una corriente de fuga en la juntura.
 - ▶ Si el terminal de base queda abierto, ello puede inducir una corriente de fuga entre emisor y colector.

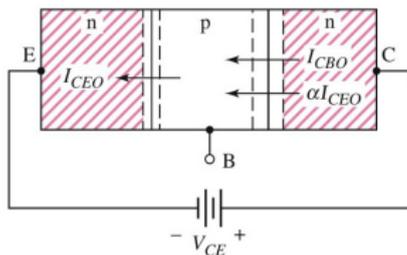
Efectos Secundarios en la Operación de un BJT II

- ▶ Se induce

$$I_{CEO} = \alpha I_{CEO} + I_{CBO}$$

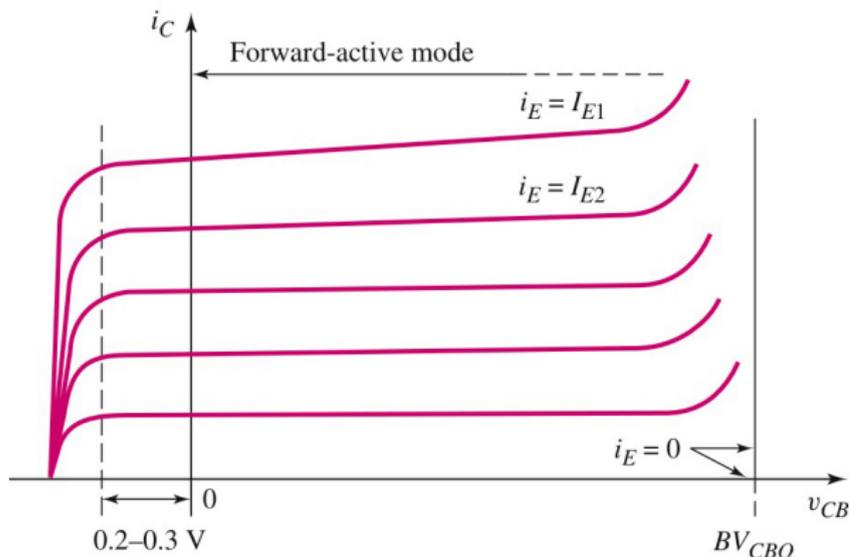
o

$$I_{CEO} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{CBO} \approx \beta I_{CBO}$$



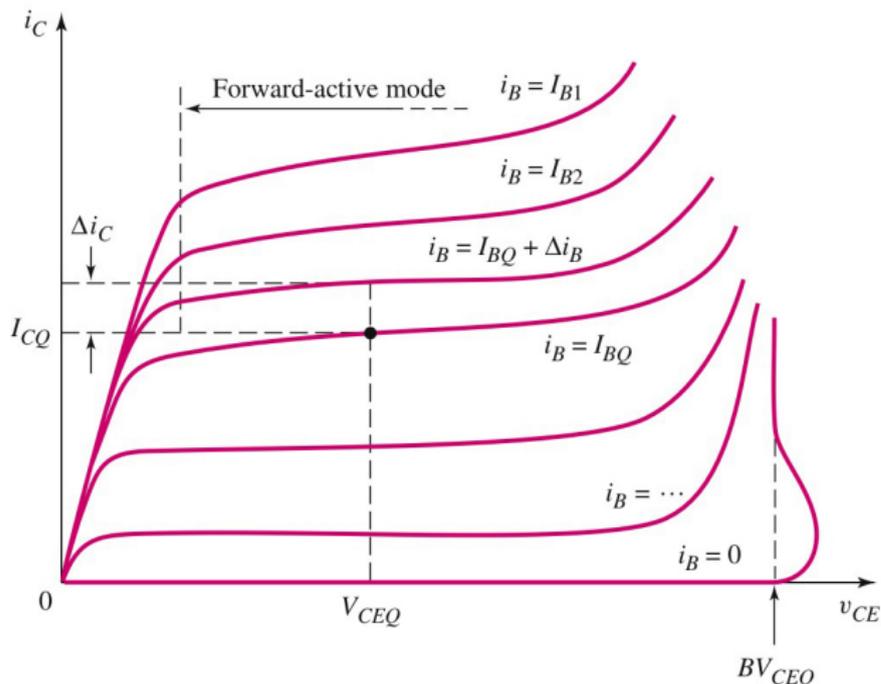
Efectos Secundarios en la Operación de un BJT III

- Voltaje de Ruptura: En el modo de base común, y para una corriente de emisor i_E constante, la curva i_C vs. v_{CB} comienza a crecer luego de superar el voltaje de ruptura BV_{CBO} .



Efectos Secundarios en la Operación de un BJT IV

- ▶ En el modo emisor común, también puede existir ruptura por $v_{CE} = BV_{CEO}$.



Efectos Secundarios en la Operación de un BJT V

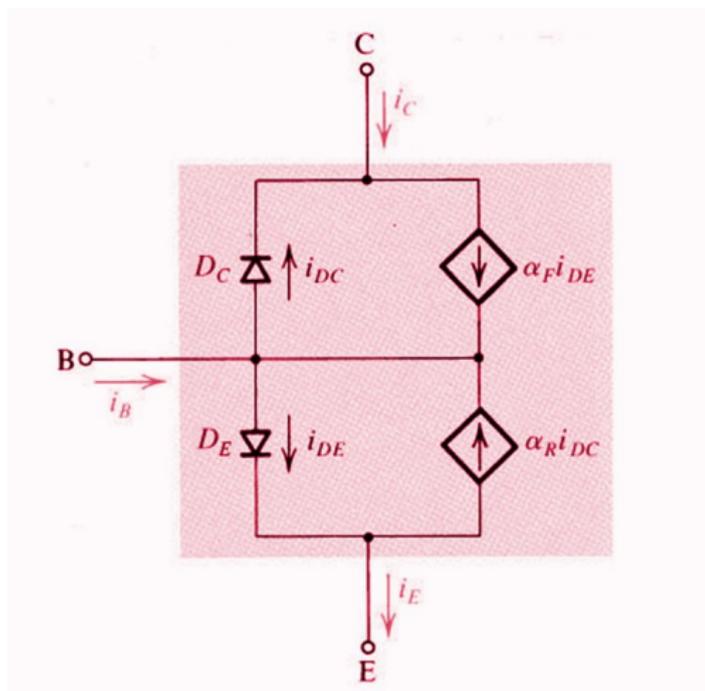
- ▶ Usualmente, $BV_{CEO} < BV_{CBO}$ porque el primero incluye el efecto del modo activo del transistor y el segundo no.
- ▶ Ambos voltajes de ruptura se relacionan por

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[n]{\beta}} \quad (4)$$

donde n es una constante empírica cuyo valor está en el rango 3 a 6.

Análisis de Señal Grande o Análisis DC I

- ▶ La operación del transistor de juntura bipolar queda bien representando por el siguiente modelo circuital:



- ▶ Este modelo nos permite escribir las siguientes relaciones que incluyen tanto la operación en polarización directa como inversa de las junturas CB y CE

$$i_E = i_{DE} - \alpha_R \cdot i_{DC}$$

$$i_C = \alpha_F \cdot i_{DE} - i_{DC}$$

$$\begin{aligned} i_B &= i_{DC} + i_{DE} - (\alpha_F \cdot i_{DE} + \alpha_R \cdot i_{DC}) \\ &= (1 - \alpha_R)i_{DC} + (1 - \alpha_F)i_{DE} \end{aligned}$$

- ▶ Recibe el nombre de Modelo de Ebers-Moll (EM).

- ▶ Se puede usar la ecuación del diodo para expresar i_{DE} e i_{DC} en términos del voltaje aplicado a cada juntura.

$$i_{DE} = I_{SE}(e^{v_{BE}/v_T} - 1)$$

$$i_{DC} = I_{SC}(e^{v_{BC}/v_T} - 1)$$

$$\Rightarrow i_E = \left(\frac{I_S}{\alpha_F}\right)(e^{v_{BE}/V_T} - 1) - I_S(e^{v_{BC}/V_T} - 1)$$

$$i_C = I_S(e^{v_{BE}/V_T} - 1) - \left(\frac{I_S}{\alpha_R}\right)(e^{v_{BC}/V_T} - 1)$$

$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta_F}\right)(e^{v_{BE}/V_T} - 1) + \left(\frac{I_S}{\beta_R}\right)(e^{v_{BC}/v_T} - 1)$$

- Donde

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}, \quad \beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

y

$$\alpha_F \cdot I_{SE} = \alpha_R \cdot I_{SC} = I_S$$

β corresponde a la ganancia de corriente de la base e I_S es la corriente de escalamiento.

- Se pueden recuperar las versiones simplificadas de las corrientes en el transistor que vimos en la clase anterior:

$$i_E = \frac{1 + \beta_F}{\beta_F} I_S e^{v_{BE}/v_T} = \frac{1 + \beta_F}{\beta_F} i_C$$

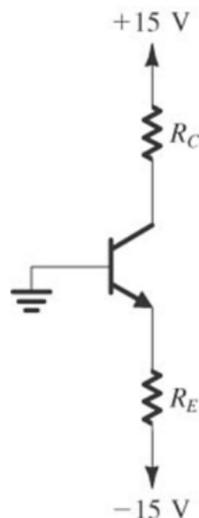
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/v_T}$$

$$i_B = \frac{1}{\beta_F} I_S e^{v_{BE}/v_T} = \frac{1}{\beta_F} i_C$$

Ejemplo

El transistor de la figura tiene un factor de ganancia $\beta = 100$, y cuando $v_{BE} = 0,7[V]$, $i_C = 2[mA]$.

Diseñe un circuito de forma que $i_C = 2[mA]$ y $v_C = 5[V]$ (el voltaje colector-tierra).



Solución

► Dato: $I_C = 2$ [mA]

► Luego,

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2}{100} = 0,02 \text{ [mA]} \quad (5)$$

y

$$I_E = I_B + I_C = 2,02 \text{ [mA]}. \quad (6)$$

► Por otro lado, $v_C = 5$ [V], y $R_C \cdot I_C = V_{cc} - V_C = 15 - 5 = 10$ [V]

$$\Rightarrow R_C = \frac{10}{2} \text{ [k}\Omega\text{]} = 5 \text{ [k}\Omega\text{]}. \quad (7)$$

Solución II

Solución (cont.)

- Necesitamos el valor de V_E para determinar R_E :

$$\begin{aligned} I_E \cdot R_E &= V_E - V_{EF} \\ \Rightarrow R_E &= \frac{V_E - (+5)}{2,02 \text{ [mA]}} \end{aligned} \quad (8)$$

- Por otro lado $V_E = -V_{BE}$. Sabemos que $I_C = 1 \text{ [mA]}$ cuando $V_{BE} = 0,7 \text{ [V]}$
- Si $I_C = 2 \text{ [mA]}$, $V_{BE} = ?$
De la característica del transistor:

$$\begin{aligned} i_C &= I_S e^{v_{BE}/v_T} \\ \Rightarrow \frac{1}{2} &= \frac{I_S e^{0,7/v_T}}{I_S e^{v_{BE}/v_T}} \end{aligned}$$

Solución (cont.)

$$\frac{1}{2} = e^{(0,7 - v_{BE})/v_T} \Rightarrow 0,7 - v_T \cdot \ln(1/2) = v_{BE}$$

- Como $v_T = 25$ [mV] a temperatura ambiente

$$\Rightarrow V_E = -V_{BE} = -0,717$$
 [V]

Por lo tanto:

$$R_E = \frac{-0,717 + 15 \text{ [V]}}{2,02 \text{ [mA]}} = 7,07 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (9)$$