

## El transistor de unión bipolar BJT

El transistor bipolar consiste en tres regiones dopadas que forman capas. En la Fig. 1 (a) se muestra un ejemplo que comprende una capa de p intercalada entre dos regiones n y se llama un transistor "NPN". Las tres terminales se denominan: "base", "emisor", y "colector". El emisor "emite" portadores de carga y el colector "recoge" mientras la base controla el número de portadores que participan en el proceso. El símbolo eléctrico del transistor npn se muestra en la Fig. 1 (b). Se indican las tensiones en los terminales  $V_E$ ,  $V_B$ , y  $V_C$ , y las diferencias de voltaje por  $V_{BE}$ ,  $V_{CB}$ , y  $V_{CE}$ . El transistor se etiquetó con el nombre  $Q_1$ .

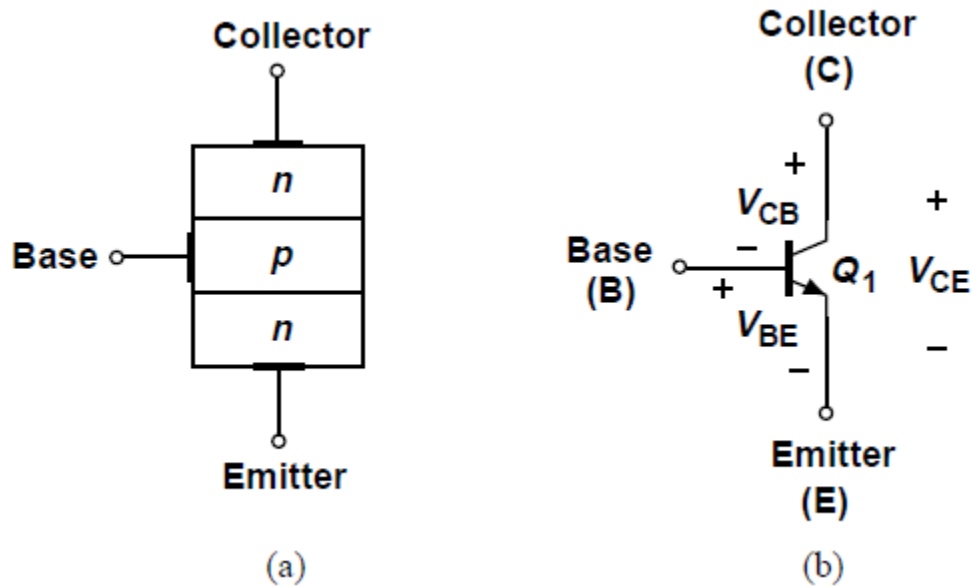


Figura 1. (a) Estructura y (b) símbolo eléctrico del transistor bipolar.

Se observa a partir de la Fig. 1 (a) que el dispositivo contiene dos diodos de unión pn: uno entre la base y el emisor y el otro entre la base y el colector. Por ejemplo, si la base es más positiva que el emisor,  $V_{BE} > 0$ , entonces esta unión es de polarización directa. Aunque este diagrama simple puede sugerir que el dispositivo es simétrico con respecto al emisor y el colector, en la realidad, las dimensiones y los niveles de dopaje de estas dos regiones son muy diferentes. En otras palabras, E y C no pueden ser intercambiados. También vamos a ver que el funcionamiento correcto requiere una región fina base, por ejemplo, aproximadamente  $100 \text{ \AA}$  en transistores bipolares integrados modernos.

Para el dispositivo de la Fig. 1 (a),  $V_{BE}$ ,  $V_{BC}$ , y  $V_{CE}$  se puede asumir valores positivos o negativos, lo que lleva a 23 posibilidades para los voltajes terminales del transistor. Afortunadamente, sólo uno de estos ocho combinaciones encuentra valor práctico.

Considere la unión polarizada inversamente de la Fig. 2. En la región de agotamiento se produce un campo eléctrico debido a la ionización. Supongamos ahora que un electrón es de alguna manera "inyectado" desde el exterior en esa región. Sirviendo como un portador minoritario en el lado p, el electrón experimenta el campo eléctrico y es barrido rápidamente desde la zona de agotamiento hacia el lado n. La capacidad de una unión pn polarizada inversamente para "recoger" eficientemente electrones inyectados externamente resulta imprescindible para el funcionamiento del transistor bipolar.

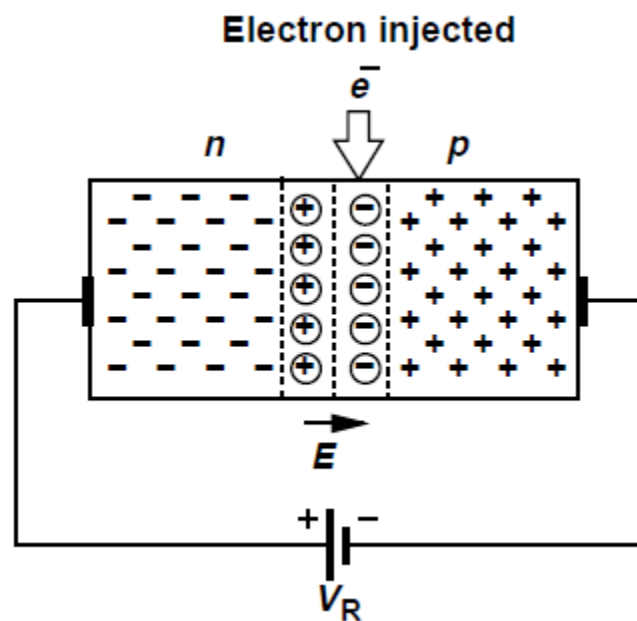


Figura 2. Inyección de electrones en la región de agotamiento.

## Operación de Transistor Bipolar en Modo Activo

En determinadas condiciones el BJT actúa como una fuente de corriente controlada por voltaje. Se puede demostrar que (a) el flujo de corriente desde el emisor al colector puede ser visto como una fuente de corriente atada entre estos dos terminales, y (b) esta corriente es controlada por la diferencia de voltaje entre la base y el emisor  $V_{BE}$ .

Para trabajar en modo activo, la unión base-emisor se polariza directamente ( $V_{BE} > 0$ ) y la unión base-colector es polarización inversa ( $V_{BC} < 0$ ). Por ejemplo, con el emisor conectado a tierra, la tensión de base se establece en alrededor de 0,8 V y la tensión de colector de un valor más alto, por ejemplo, 1 V [Fig. 3 (a)]. Por tanto, la unión base-colector experimenta una polarización inversa de 0,2 V.

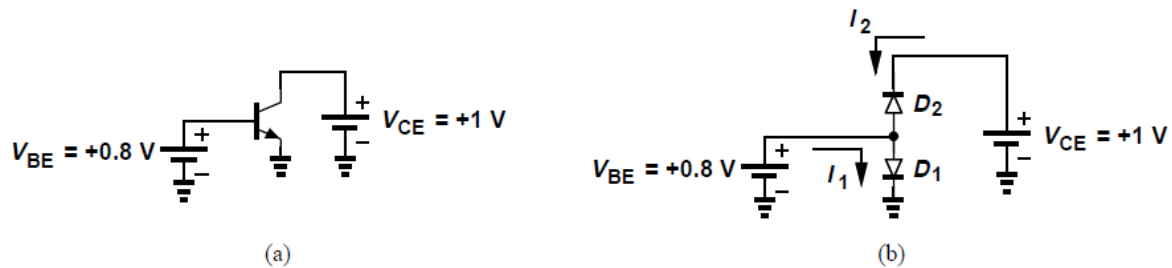


Figura 3. (a) transistor bipolar con tensiones de polarización de base y de colector, (b) visión simplista del transistor bipolar.

Consideremos ahora el funcionamiento del transistor en el modo activo. Podemos tener la tentación de simplificar el ejemplo de la Fig. 3 (a) para el circuito equivalente se muestra en la Fig. 3 (b). Después de todo, parece que el transistor bipolar simplemente consiste en dos diodos que comparten sus ánodos en la terminal de la base. Este punto de vista implica que D1 lleva una corriente y D2 no lo hace; si esto fuera cierto, el transistor no funcionaría como una fuente de corriente controlada por voltaje y resultaría de poco valor.

Para entender por qué el transistor no puede ser modelado como simplemente dos diodos espalda con espalda, debemos examinar el flujo de carga en el interior del dispositivo, teniendo en cuenta que la zona tipo p es muy delgada. Como la unión base-emisor está polarizada directamente, los electrones fluyen desde el emisor a la base y los agujeros de la base al emisor. El nivel de dopaje de emisor es mucho mayor que el de la base, por lo tanto, denotamos la región de emisor con n +, donde el superíndice hace indica mayor nivel de dopaje. La Fig 4 (a) se resumen estas observaciones, lo que indica que el emisor inyecta un gran número de electrones en la base, mientras que la base inyecta un pequeño número de huecos en el emisor.

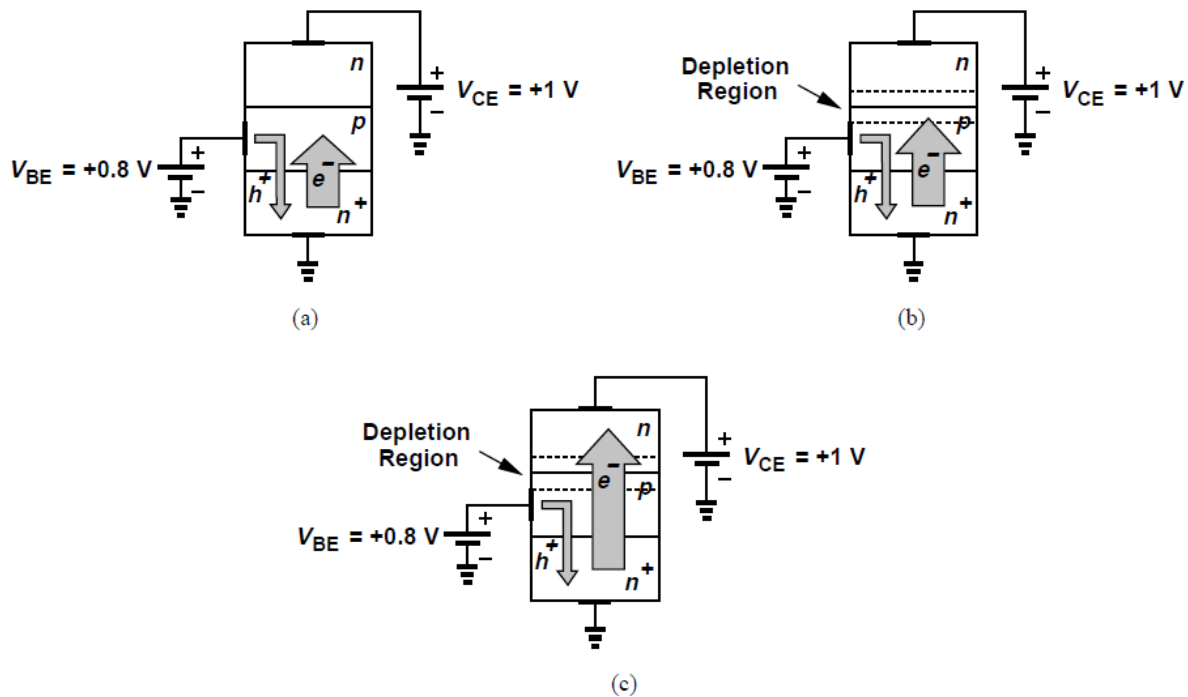


Figura 4. (a) flujo de electrones y agujeros a través de la unión base-emisor, (b) los electrones se acercan a la unión de base-colector, (c) los electrones pasan a través de unión de base-colector.

Como la región de base es muy delgada, la mayoría de los electrones alcanzan el borde de la región de agotamiento colector-base, comenzando a experimentar la fuerza del campo eléctrico de esa región (Fig. 4 (b)). Como consecuencia, los electrones son barridos hacia la región del colector (Fig. 4.5 (c)) y absorbidos por el terminal positivo de la batería. Por lo tanto, observamos que la unión colector-base con polarización inversa lleva una corriente porque los portadores minoritarios ( $e^-$  acumulados en la región  $p$  de la base) se "inyectan" en la región de agotamiento.

### Corriente de Colector vs $V_{BE}$

En analogía con la ecuación de corriente del diodo, tenemos

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \quad (1)$$

Donde

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_B W_B} \quad (2)$$

$A_E$ : área de la unión base-emisor,  $q$ : carga del portador,  $D_n$ : Coeficiente de difusión de los portadores del emisor,  $N_B$ : Dopado de la base,  $W_B$ : espesor del semiconductor de la base y  $V_T$  es el voltaje térmico.

La ecuación (1) implica que el transistor bipolar funciona como una fuente de corriente controlada por voltaje, lo que demuestra un buen candidato para la amplificación. Podemos decir, alternativamente, el transistor realiza conversión "tensión-a-corriente".

### **Corrientes de base-emisor**

Puesto que el transistor bipolar debe satisfacer la ley de Kirchoff, del cálculo de la corriente de base se obtiene fácilmente la corriente de emisor también.

En el transistor npn de la Fig. 5. (a), la corriente de base,  $I_B$ , es el resultado del flujo de huecos desde la terminal. Las corrientes de huecos y electrones en una unión pn de polarización tienen una relación constante determinada principalmente por los niveles de dopaje. Por lo tanto, el número de huecos que entran desde la base al emisor es una fracción constante de la cantidad de electrones que viajan desde el emisor a la base. A modo de ejemplo, por cada 200 electrones inyectados por el emisor, un hueco es suministrado por la base.

En la práctica, la corriente de base contiene un componente adicional de huecos. Como los electrones inyectados por el emisor de los viajes a través de la base, algunos pueden recombinar con los huecos que se inyectan a la base [Fig. 5. (b)]; en esencia, algunos electrones y agujeros se pierden como resultado de la recombinación. Por ejemplo, en promedio, de cada 200 electrones inyectados por el emisor, uno se recombina con un agujero.

En resumen, la corriente de base debe proporcionar huecos tanto para inyección inversa en el emisor como para la recombinación con los electrones viajan hacia el colector. Por tanto, podemos ver  $I_B$  como una fracción constante de  $I_E$  o una fracción constante del  $I_C$ . La corriente de colector se puede describir como

$$I_C = \beta I_B \quad (3)$$

donde  $\beta$  es la ganancia de corriente del transistor, ya que muestra la cantidad de la corriente de base es amplificada para lograr una corriente de colector. En transistores NPN, la ganancia de corriente  $\beta$  oscila entre 50-200.

Aplicando KCL, podemos calcular la corriente del emisor con las direcciones de las corrientes representadas en la Fig. 5. (a) como

$$I_E = I_C + I_B \quad (4)$$

$$I_C = \alpha I_E \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (6)$$

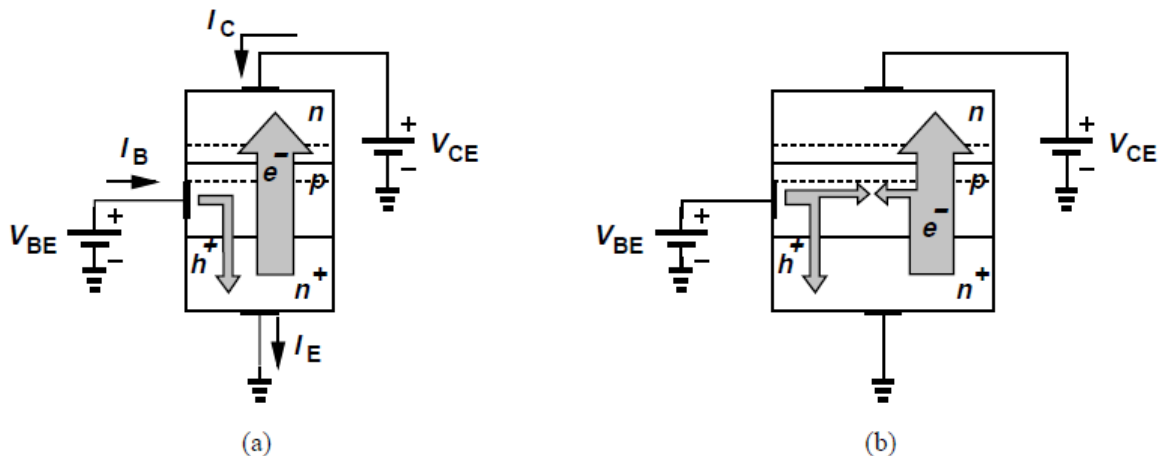


Figura 5. Corriente de base resultante de huecos (a) cruzando el emisor y (b) recombinándose con los electrones.

### Regiones de operación del transistor:

A diferencia del transistor MOSFET, las conexiones del transistor BJT están muy bien definidas por las características constructivas, por lo que no se pueden intercambiar el emisor y el colector. Por esta razón, las posibles combinaciones de tensión en las terminales del BJT permiten diferencias cuatro regiones de operación, tal como los indica la figura 6.

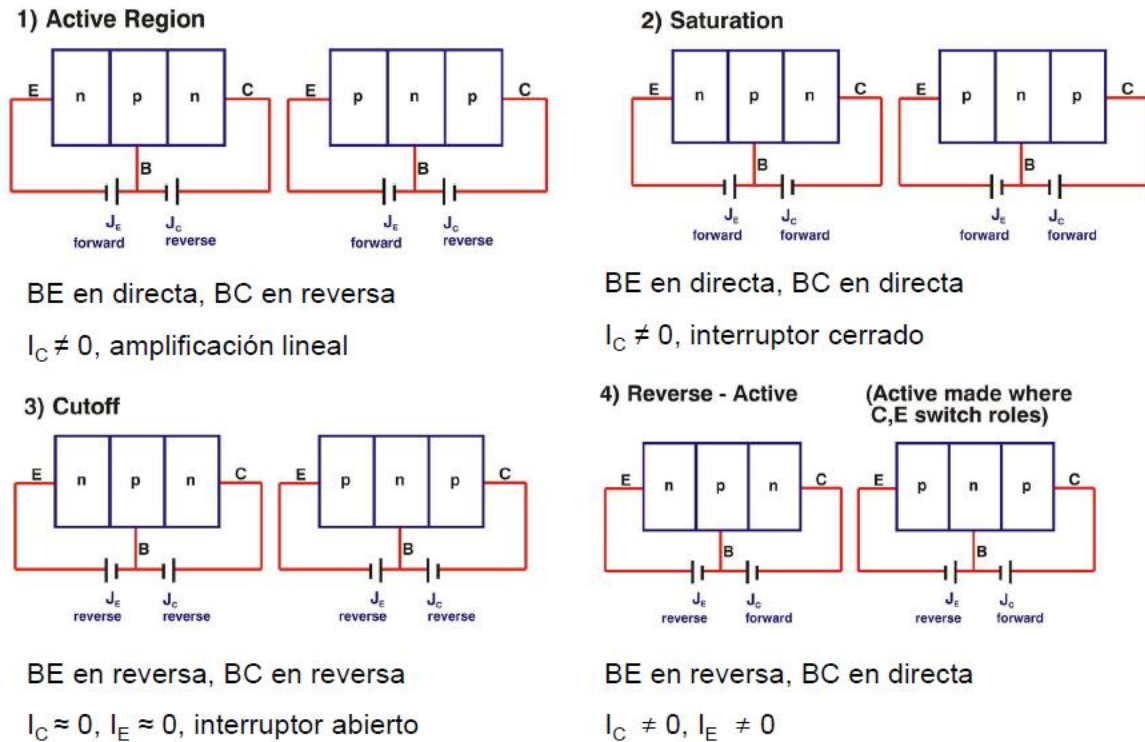


Figura 6. Regiones de operación del BJT (1) región activa, (2) región de saturación, (3) región de corte, (4) región de reversa activa

En la región activa el diodo formado por la base y el emisor está polarizado en directa y el diodo formado por la base y el colector está polarizado en inversa, o expresado en términos de tensión: para un NPN  $V_{BE} > 0$  y  $V_{CE} \geq V_{BE}$ , para un PNP  $V_{EB} > 0$  y  $V_{EC} \geq V_{EB}$ .

En la región de saturación el diodo formado por la base y el emisor está polarizado en directa y el diodo formado por la base y el colector está polarizado también en directa, o expresado en términos de tensión: para un NPN  $V_{BE} > 0$  y  $V_{CE} < V_{BE}$ , para un PNP  $V_{EB} > 0$  y  $V_{EC} < V_{EB}$ .

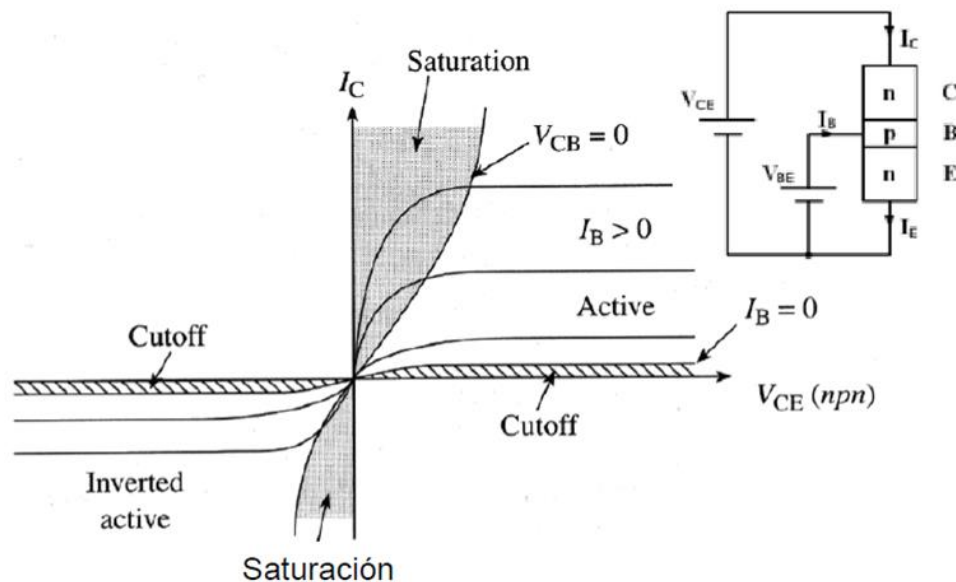
En la región de corte tanto el diodo formado por la base y el emisor como el diodo formado por la base y el colector están polarizados en inversa, o expresado en términos de tensión: para un NPN  $V_{BE} \leq 0$  y  $V_{CE} \geq V_{BE}$ , para un PNP  $V_{EB} \leq 0$  y  $V_{EC} \geq V_{EB}$ .

En la región de reversa activa el diodo formado por la base y el emisor está polarizado en inversa y el diodo formado por la base y el colector está

polarizado en directa, o expresado en términos de tensión: para un NPN  $V_{BE} \leq 0$  y  $V_{CE} < V_{BE}$ , para un PNP  $V_{EB} \leq 0$ ,  $V_{EB} > 0$  y  $V_{EC} < V_{EB}$ .

Nótese que en la región de reversa activa se intercambia la función del emisor y el colector, por lo que el funcionamiento del transistor no es óptimo, aún cuando se tiene una corriente entre el colector y el emisor.

Las curvas características de las regiones de operación del BJT se detallan en la figura 7.



$V_{CB}=0$  implica que  $V_{CE}=V_{BE}$

Figura 7. Curvas características de las regiones de operación del BJT

Cuando se polariza el transistor BJT de manera correcta, se puede definir una curva de transferencia y una curva característica de salida (figura 8).



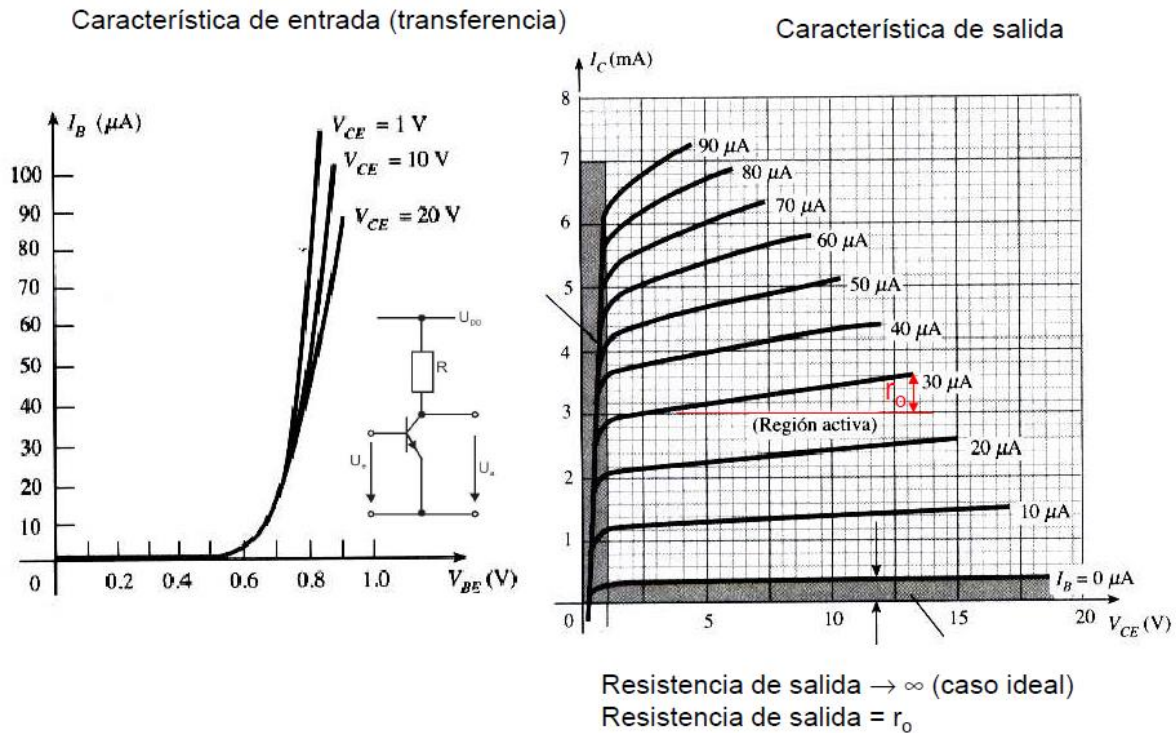


Figura 8. Curva de transferencia y curva característica del BJT

### Efecto Early en el transistor BJT:

Para comprender este efecto, volvemos a analizar la operación interna del transistor. Considere la región de agotamiento en las áreas colector y la base. Inicialmente el exceso de carga de electrones inyectados desde el emisor se ubica en la superficie de la unión entre la base y el colector, donde el campo eléctrico generado por el voltaje en el colector con respecto a la base  $V_{CB}$  (polarización inversa del diodo base colector) dispara los electrones desde la base hasta el colector, generando la corriente de colector.

Si el voltaje  $V_{CB}$  aumenta, entonces se aumenta el tamaño de la región de agotamiento, que se traslapa con la región del semiconductor de la base y de esta forma se reduce el ancho de la base, lo que disminuye la resistencia entre el colector y el emisor. Por lo tanto, al aumentar el voltaje  $V_{CE}$  se aumenta la corriente del colector  $I_C$  por efecto Early.