

## 2.1

**Introducción**

Los transistores de unión bipolar o transistores bipolares (*Bipolar Junction Transistor, BJT*) son unos dispositivos activos de tres terminales que constituyen el elemento fundamental en multitud de aplicaciones que van desde la amplificación de señales, al diseño de circuitos lógicos digitales y memorias.

El principio básico de funcionamiento de un transistor bipolar es el uso de la tensión existente entre dos de sus terminales para controlar la corriente que circula a través del tercero de ellos. De esta forma, un transistor bipolar podría utilizarse como una fuente dependiente que, como hemos establecido en el Capítulo anterior, es el elemento fundamental del modelo de un amplificador de señal. Además, la tensión de control aplicada puede provocar que la corriente en el tercer terminal del transistor bipolar cambie de cero a un valor elevado, permitiendo que el dispositivo activo pueda utilizarse como un conmutador con dos estados lógicos, que es el elemento básico en el diseño de circuitos digitales.

## 2.2

**El transistor bipolar en continua**

El transistor bipolar está formado por dos uniones p-n conectadas en oposición y dentro de la misma red cristalina, por lo que, a diferencia de dos diodos conectados de la misma forma, pueden interactuar entre ellas. El término bipolar refleja el hecho de que la corriente en el dispositivo se establece en base a los dos tipos de portadores, es decir, se debe tanto a los electrones como a los huecos. A diferencia de los transistores de unión bipolar, que serán el objeto de estudio en este Capítulo, en los transistores unipolares o transistores de efecto de campo (*Field Effect Transistor, FET*), la corriente se establece en base a un único tipo de portador. Ambos tipos de transistores son igualmente importantes, aunque debido a sus diferentes características, se utilizan en diferentes áreas de aplicación. En la Figura 2.1 se representa la estructura simplificada de un transistor bipolar.

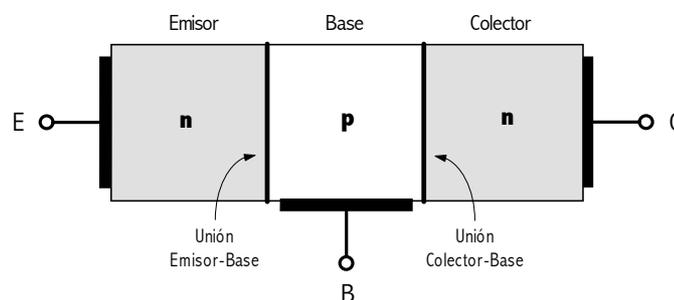


Figura 2.1

Así, un transistor bipolar está constituido por tres regiones semiconductoras: la región de emisor E (tipo n), la región de base B (tipo p) y la región de colector C (tipo n), a

las que se conecta un terminal. Este tipo de transistor se denomina transistor bipolar npn. Existe otro tipo de transistor bipolar, dual al npn, y cuya estructura se representa en la Figura 2.2, que está constituido por un emisor tipo p, una base tipo n y un colector tipo p, denominado genéricamente transistor bipolar pnp.

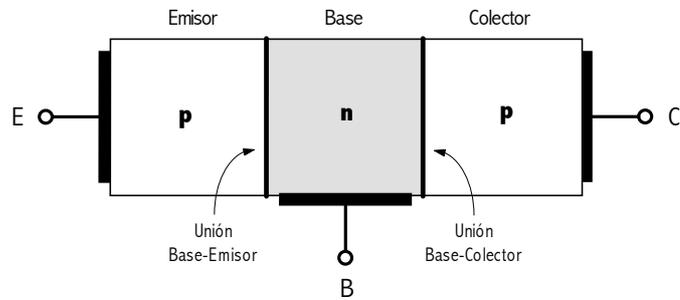


Figura 2.2

El transistor bipolar presenta dos uniones p-n, la unión emisor-base (EBJ) y la unión colector-base (CBJ). En la Figura 2.3 se representan las regiones de deplexión de estas uniones p-n con sus iones asociados y el diagrama del potencial de los electrones para el caso en que no se aplicase una tensión externa en los terminales del dispositivo activo.

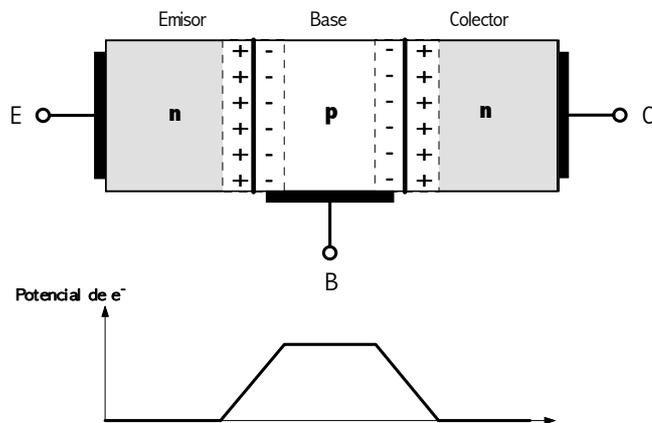


Figura 2.3

En esta situación, a los electrones del emisor y del colector les cuesta trabajo difundirse hacia la base en contra del campo eléctrico establecido por los iones de la red cristalina, mientras que un potencial de barrera similar controla el movimiento de los huecos fuera de la región de base. Por consiguiente, estas barreras permiten pasar únicamente aquellos portadores de carga con energía cinética superior al potencial de barrera.

Las aplicaciones de amplificación requieren el uso de tensiones continuas que polaricen las uniones p-n del transistor bipolar de forma adecuada. Una de las configuraciones más utilizadas es la representada en la Figura 2.4, denominada configuración en emisor común por el hecho de que sea el emisor el terminal común a

las fuentes de polarización. En esta configuración, una fuente de tensión continua  $V_{BB}$  hace que la tensión en la base tipo p del transistor bipolar sea superior a la del emisor tipo n, polarizando en directa la unión emisor-base, mientras que, por otro lado, una fuente de tensión continua  $V_{CC}$  de mayor valor hace que la tensión en el colector tipo n sea superior a la de la base tipo p, por lo que la unión colector-base del transistor bipolar quedará polarizada en inversa. En esta situación decimos que el transistor bipolar funciona en modo activo.

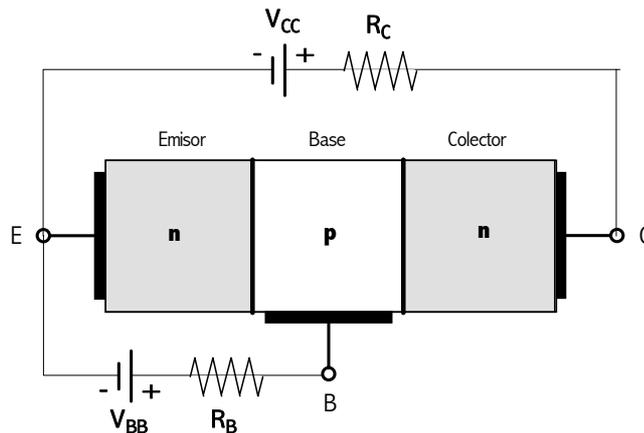


Figura 2.4

Para que un transistor bipolar pueda trabajar como amplificador es necesario que esté en modo activo, por lo que prestaremos especial atención al funcionamiento del dispositivo en esta situación.

### 2.2.1 Funcionamiento del transistor bipolar npn en modo activo

La polarización directa de la unión emisor-base establecida por la fuente externa  $V_{BB}$  hace que se establezca un flujo de corriente a través de ella, puesto que, como se observa en la Figura 2.5, en estas condiciones de polarización se reduce el ancho de la región de deplexión, y con ello el potencial de barrera de la unión emisor-base, con lo que los electrones son continuamente inyectados desde el emisor del transistor bipolar hacia la base tipo p, donde se convierten en portadores minoritarios.

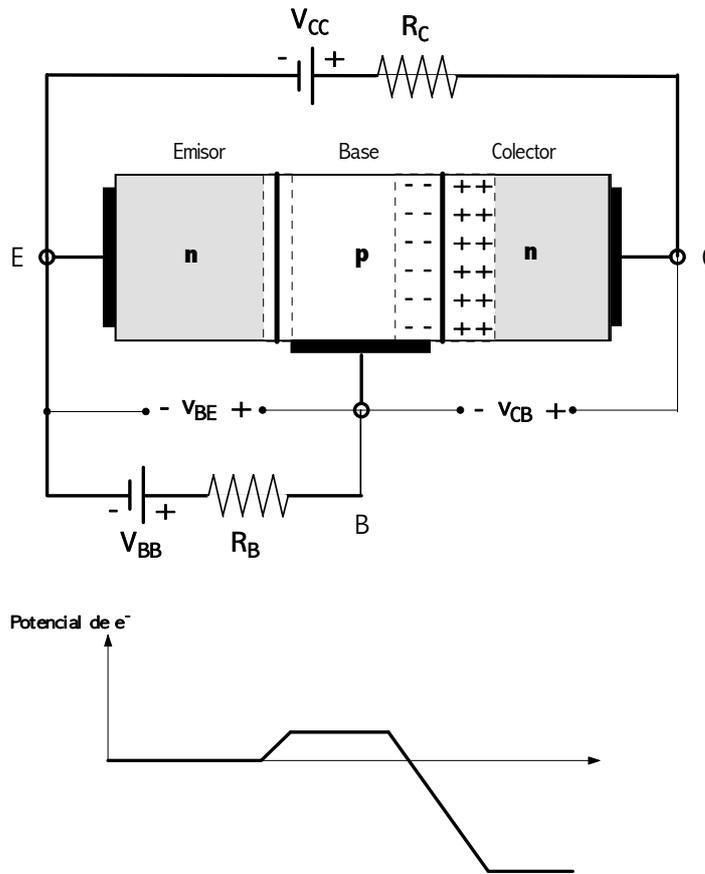


Figura 2.5

La mayoría de estos electrones minoritarios inyectados desde el emisor se difunden a través de la base del transistor bipolar alcanzando el límite de la región de deplexión de la unión colector-base. Como la fuente de polarización  $V_{CC}$  utilizada hace que la tensión en el colector sea  $v_{CB}$  voltios más positiva que la tensión en la base, estos electrones caerán hacia el colector atravesando la región de deplexión de la unión colector-base debido a la gran variación de potencial establecida, siendo recolectados en él y constituyendo, junto con la pequeña corriente inversa de saturación de la unión colector-base inversamente polarizada  $I_{CB0}$ , la corriente de colector del transistor bipolar  $i_C$ . Por tanto, la caída de tensión en la unión base-emisor polarizada en directa  $v_{BE}$  hace que a través del terminal del colector circule una corriente  $i_C$  relacionada exponencialmente con ella, de forma que

$$I_C = I_S \cdot e^{v_{BE}/V_T} + I_{CB0} ,$$

donde  $V_T$  es la tensión térmica, cuyo valor es aproximadamente de 25mV a temperatura ambiente, mientras que el término  $I_S$  es proporcional a la corriente de saturación inversa de la unión emisor-base, cuyo valor es inversamente proporcional al ancho de la región de base y directamente proporcional al área de la unión emisor-base, por lo que, los transistores bipolares de mayor área serán capaces de

proporcionar corrientes de colector superiores para una misma tensión  $v_{BE}$  en la unión base-emisor, siendo este hecho muy empleado en el diseño de circuitos integrados. Por lo general, y dependiendo del tamaño del dispositivo, el valor de  $I_S$  está comprendido entre  $10^{-12}$  A y  $10^{-15}$  A, siendo muy sensible a las variaciones de temperatura

Un hecho importante que se deduce a partir de la expresión de la corriente de colector es que, idealmente, el valor de  $i_C$  en un transistor bipolar funcionando en modo activo no depende de lo inversamente que se polarice la unión colector-base, y por consiguiente del valor de la tensión  $v_{CE}$  establecida por la fuente externa  $V_{CC}$  entre el emisor y el colector del dispositivo, por lo que siempre que permanezca polarizada en inversa, los electrones que alcancen el límite de la región de deplexión de esta unión caerán hacia el colector, formando parte de la corriente  $i_C$ .

**En consecuencia, cuando el transistor bipolar está funcionando en modo activo se comporta como una fuente ideal de corriente constante, en la que el valor de la corriente continua de colector  $i_C$  está determinada por la caída de tensión en la unión base-emisor polarizada en directa  $v_{BE}$ .**

En el proceso de difusión de los electrones desde el emisor a través de la región de base, algunos de ellos se recombinan con huecos, que son portadores mayoritarios en la base, y por tanto no alcanzan el colector, de forma que

$$i_C = \alpha i_E ,$$

donde la constante  $\alpha$  es un parámetro característico de cada transistor bipolar que describe el porcentaje de electrones inyectados desde el emisor que alcanzan la región de colector del dispositivo, contribuyendo así a la corriente de colector  $i_C$ , y cuyo valor es inferior pero muy cercano a la unidad. Por lo general, el valor de  $\alpha$  en transistores bipolares utilizados para aplicaciones analógicas de procesamiento de señal está comprendido entre 0.99 y 0.998.

Para minimizar esta recombinación y hacer  $\alpha$  tan cercano a la unidad como sea posible, la región de base en el transistor bipolar se hace muy estrecha, como se observa esquemáticamente en la geometría física de un dispositivo real representada en la Figura 2.6, de forma que el porcentaje de electrones perdidos a través del proceso de recombinación con los huecos de la región de base sea prácticamente despreciable.

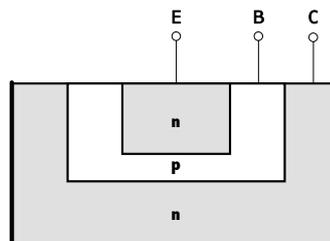


Figura 2.6

El reducido potencial de barrera de la unión emisor-base establecido por las fuentes externas de polarización hace que en esta unión, además de los electrones inyectados desde el emisor del transistor bipolar hacia la base, se establezca simultáneamente un flujo de huecos desde la base hacia el emisor. Sin embargo, esta corriente de huecos es indeseable en el transistor bipolar, puesto que se suma a las corrientes de base y emisor sin contribuir a la comunicación entre uniones. Por tanto, para que los electrones sean mayoritarios en los portadores inyectados a través de la unión emisor-base, el dispositivo se fabrica haciendo que el emisor esté fuertemente dopado con respecto a la base, es decir, haciendo que la densidad de electrones en el emisor del transistor bipolar sea muy elevada y la densidad de huecos en la región de base sea muy pequeña. De esta forma, como el número de electrones inyectados desde el emisor hacia la base del transistor es mucho mayor que el de huecos inyectados desde la base hacia el emisor, podremos considerar que la corriente de emisor  $i_E$  está determinada únicamente por la corriente de electrones difundidos a través de la unión emisor-base.

Por convenio, el sentido de las corrientes en el transistor bipolar será contrario al flujo de electrones en el proceso de conducción, de forma que la corriente de colector  $i_C$  entrará a través del terminal de colector, al igual que la corriente de base  $i_B$ , que entrará a través del terminal de base, mientras que el sentido de la corriente de emisor  $i_E$  será hacia fuera del terminal de emisor, como se observa en la Figura 2.7, en la que se representa el flujo interno de portadores en un transistor bipolar polarizado para su funcionamiento en modo activo y su relación con las corrientes externas.

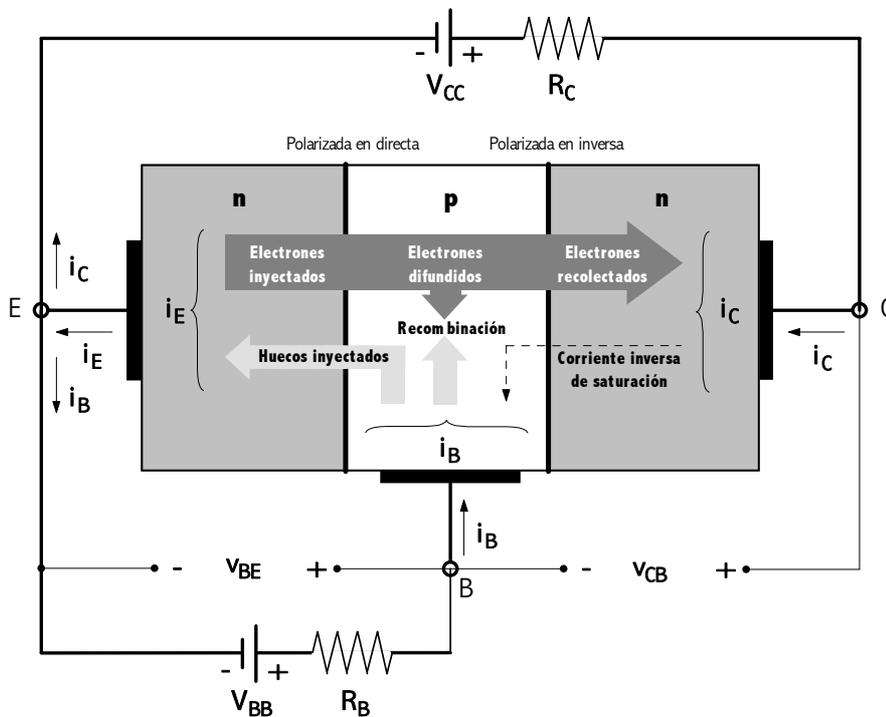


Figura 2.7

La fuente de tensión externa  $V_{BB}$ , además de polarizar en directa la unión emisor-base, proporciona continuamente nuevos huecos a la región de base con el fin de reemplazar aquellos que se pierden en el proceso de recombinación con los electrones inyectados desde el emisor, mientras que la fuente de tensión  $V_{CC}$  elimina electrones de la región de colector con el fin de hacer sitio a los que ha recolectado. Además, ambas fuentes de polarización proporcionan continuamente electrones al emisor del transistor bipolar con el fin de reemplazar aquellos que son difundidos hacia el colector del dispositivo a través de la base.

Así, en la estructura de un transistor bipolar funcionando en modo activo la unión emisor-base actúa como un diodo polarizado en directa con una corriente  $i_C + i_B$ , mientras que la unión colector-base está polarizada en inversa y presenta una pequeña corriente de saturación inversa  $I_{CB0}$ , y una corriente  $\alpha i_E$  debida a la interacción entre las uniones p-n que constituyen el dispositivo.

Por tanto, a partir de la Figura 2.7 se deduce que la corriente de emisor  $i_E$  en un transistor bipolar será igual en todo momento a la suma de la corriente de colector  $i_C$  y la corriente de base  $i_B$ , de forma que

$$i_E = i_C + i_B ,$$

donde, como  $i_C \approx \alpha i_E$ , puesto que generalmente la corriente inversa de saturación  $I_{CB0}$  es despreciable, tendremos que

$$\frac{i_C}{\alpha} = i_C + i_B ,$$

deduciéndose que la corriente de colector  $i_C$  puede expresarse en función de la corriente de base  $i_B$ , de forma que

$$i_C = i_B \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)$$

$$i_C = i_B \beta$$

En consecuencia, cuando el transistor bipolar está funcionando en modo activo se comporta como una fuente ideal de corriente constante en la que controlando la corriente de base  $i_B$  podemos determinar la corriente de colector  $i_C$ , siendo la constante  $\beta$  un parámetro particular de cada transistor bipolar, denominado ganancia de corriente en emisor común y cuyo valor, en contraste con el de  $\alpha$ , que es cercano a la unidad y difícil de medir, está comprendido típicamente en un rango que va de 100 a 600, aunque puede ser tan elevado como 1000 en determinados dispositivos activos muy específicos. Además, pequeños cambios en el valor de  $\alpha$  se corresponden con grandes variaciones en el valor de  $\beta$ . Por todo ello, el parámetro  $\beta$  es el más utilizado en el análisis y diseño de circuitos basados en transistores bipolares.

De esta forma, el valor de la corriente de emisor  $i_E$  en un transistor bipolar funcionando en modo activo puede expresarse como

$$i_E = i_B (\beta + 1) ,$$

donde, generalmente  $i_B$  es mucho menor que  $i_C$ , puesto que  $\beta \gg 1$ , por lo que podemos considerar que  $i_E \approx i_C$ .

En la Figura 2.8 se representa el símbolo del transistor bipolar npn, en el que el emisor se distingue del resto de los terminales mediante una flecha. Esta distinción es importante, puesto que los transistores bipolares reales no son dispositivos simétricos, es decir, si intercambiamos los terminales de emisor y colector, el funcionamiento del dispositivo es completamente diferente, obteniéndose un valor de  $\alpha$  mucho menor.

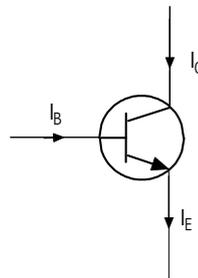


Figura 2.8

El sentido de la flecha en el emisor indica la polaridad del dispositivo –npn o pnp-, apuntando siempre en el sentido normal del flujo de corriente a través del emisor, que también es la dirección de la polarización directa de la unión emisor-base.

### 2.2.2 Curvas características del transistor bipolar en emisor común

---

En la Figura 2.9 se representa el circuito correspondiente a un transistor bipolar npn en configuración emisor común polarizado para su funcionamiento en modo activo.

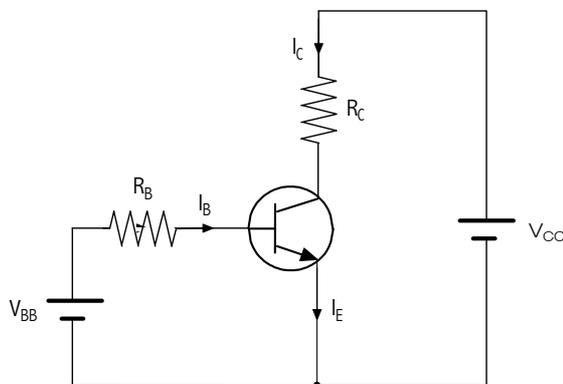


Figura 2.9

Como se observa en la Figura 2.9, en esta configuración del transistor bipolar puede establecerse como entrada el circuito de base, y como salida el circuito de colector, de forma que cualquier cambio en la corriente de entrada  $i_B$  lleva consigo un cambio en la corriente de salida  $i_C$ . Así, el funcionamiento del transistor bipolar puede describirse mediante curvas paramétricas en las que se represente gráficamente la relación entre las corrientes y tensiones de sus circuitos de entrada y de salida.

### 2.2.2.1 Curva característica de entrada

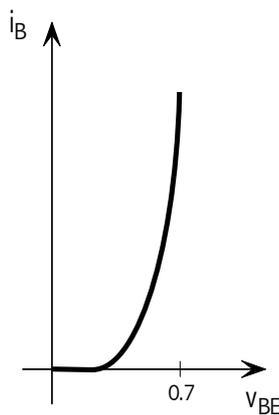


Figura 2.10

La característica de entrada del transistor bipolar en emisor común puede describirse mediante la curva mostrada en la Figura 2.10, en la que se representa la relación entre la corriente de base  $i_B$  y la tensión  $v_{BE}$  entre la base y el emisor del dispositivo, determinada por la expresión

$$i_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot e^{v_{BE}/V_T}$$

Obviamente, la curva característica  $i_B$ - $v_{BE}$  en un transistor bipolar es similar a la de un diodo rectificador normal, puesto que en modo activo la unión emisor-base del dispositivo actúa como un diodo polarizado en directa.

Para tensiones entre la base y el emisor del transistor bipolar de Silicio inferiores a 0.5V, la corriente que circula a través de la unión emisor-base es prácticamente despreciable, mientras que para la mayoría de los valores de corriente utilizados en la práctica, el valor de  $v_{BE}$  suele estar comprendido entre 0.6V y 0.8V. En el análisis de circuitos de polarización en continua consideraremos generalmente que en los transistores bipolares de Silicio  $V_{BE} \approx 0.7V$ , mientras que en los dispositivos de Germanio  $V_{BE} \approx 0.2V$ .

### 2.2.2.2 Curva característica de salida

La característica de salida del transistor bipolar en emisor común puede describirse mediante la curva mostrada en la Figura 2.11, en la que se representa la relación entre la corriente de colector  $i_C$  y la tensión  $v_{CE}$  entre el colector y el emisor del dispositivo, manteniendo constante el valor de la corriente de base  $i_B$ .

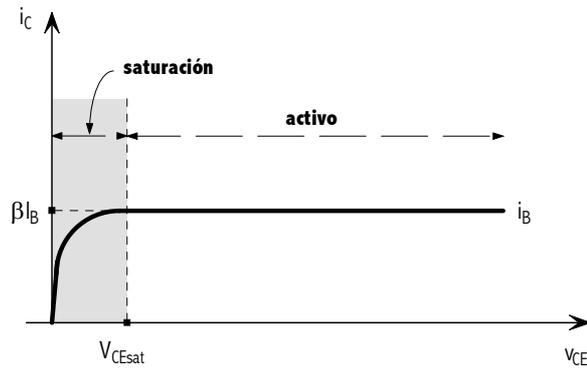


Figura 2.11

Como se observa en la Figura 2.11, la curva característica  $i_C$ - $v_{CE}$  de un transistor bipolar funcionando en modo activo es prácticamente horizontal, poniendo de manifiesto el hecho de que la corriente de colector  $i_C$  es prácticamente independiente de la tensión entre el colector y el emisor  $v_{CE}$  siempre que la unión colector-base permanezca polarizada en inversa, comportándose como una fuente ideal de corriente constante, en la que el valor de la corriente continua de colector  $i_C$  es directamente proporcional a la corriente de base  $i_B$ , de forma que

$$i_C = \beta i_B ,$$

por lo que el funcionamiento del transistor bipolar en modo activo puede representarse mediante el modelo equivalente mostrado en la Figura 2.12, en el que la fuente de tensión situada entre la base y el emisor representa la caída de tensión en la unión base-emisor del transistor polarizada en directa, que hemos considerado que generalmente será de  $0.7V$ , mientras que la fuente de corriente controlada representa la relación de la corriente de colector  $i_C$  con la corriente de base  $i_B$  en modo activo.

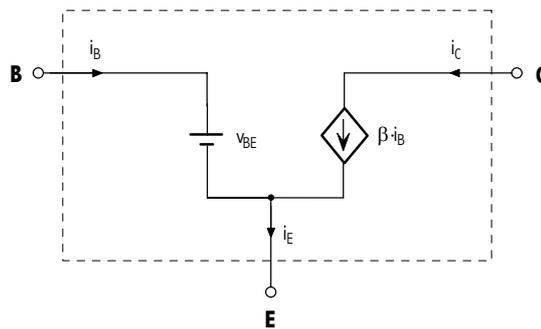


Figura 2.12

Sin embargo, para pequeños valores de  $v_{CE}$ , la tensión en el colector del dispositivo puede llegar a ser inferior a la tensión de base lo suficiente como para que la unión colector-base deje de estar polarizada en inversa. En esta situación el transistor bipolar deja de funcionar en modo activo, entrando en saturación, en la que la corriente de colector  $i_C$  alcanza su máximo valor dejando de ser proporcional a la

corriente de base, puesto que  $i_C \leq \beta i_B$ . Por tanto, el dispositivo dejará de comportarse como una fuente de corriente y no tendrá utilidad en la amplificación de señales.

Por lo general, la caída de tensión en la unión colector-base de un transistor bipolar polarizada en directa  $v_{CB}$  es aproximadamente  $0.2V$  inferior a la caída de tensión en la unión base-emisor  $v_{BE}$  en saturación, por lo que, teniendo en cuenta que en un transistor bipolar se verifica siempre que

$$v_{CE} = v_{CB} + v_{BE} ,$$

el valor de la tensión colector-emisor de un transistor bipolar en saturación  $V_{CEsat}$  es constante y aproximadamente igual a  $0.2V$ .

De esta forma, el funcionamiento del transistor bipolar en saturación, puede representarse mediante el modelo equivalente mostrado en la Figura 2.13, en el que, al igual que en el modelo del transistor en modo activo, la fuente de tensión situada entre la base y el emisor representa la caída de tensión en la unión base-emisor del transistor polarizada en directa, mientras que la fuente de tensión  $V_{CEsat}$  representa la tensión constante que existe entre el colector y el emisor del transistor bipolar en saturación.

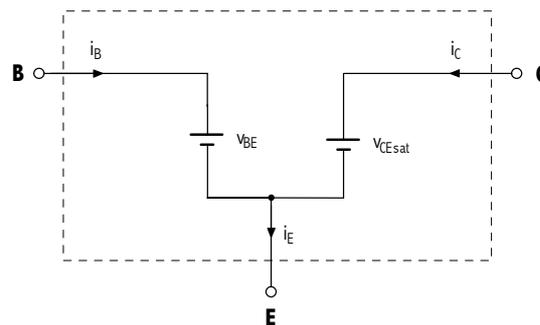


Figura 2.13

En la Tabla 2.1 se muestran algunos de los parámetros característicos del funcionamiento de los transistores bipolares npn de las familias BC546, BC547 y BC548 en modo **activo directo** ( $h_{FE}$ ,  $V_{BE(on)}$ ) y en **saturación** ( $V_{BE(sat)}$ ,  $V_{CE(sat)}$ ), obtenidos a partir de la hoja de características proporcionada por el fabricante.

**Amplifier Transistors**  
NPN Silicon



**BC546**  
**BC546B**  
**BC547A**  
**BC547B**  
**BC547C**  
**BC548B**  
**BC548C**

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>ON CHARACTERISTICS</b>					
DC Current Gain ( $I_C = 10 \mu A, V_{CE} = 5.0 V$ )	BC547A	—	90	—	—
	BC546B/547B/548B	—	150	—	—
	BC548C	—	270	—	—
( $I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V$ )	BC546	110	—	450	—
	BC547	110	—	800	—
	BC548	110	—	800	—
	BC547A	110	180	220	—
	BC546B/547B/548B	200	290	450	—
	BC547C/BC548C	420	520	800	—
( $I_C = 100 mA, V_{CE} = 5.0 V$ )	BC547A/548A	—	120	—	—
	BC546B/547B/548B	—	180	—	—
	BC548C	—	300	—	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA$ ) ( $I_C = 100 mA, I_B = 5.0 mA$ ) ( $I_C = 10 mA, I_B = \text{See Note 1}$ )	$V_{CE(sat)}$	—	0.09 0.2 0.3	0.25 0.6 0.6	V
Base–Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA$ )	$V_{BE(sat)}$	—	0.7	—	V
Base–Emitter On Voltage ( $I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V$ ) ( $I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V$ )	$V_{BE(on)}$	0.55 —	— —	0.7 0.77	V

Tabla 2.1

Por otro lado, variando el valor de la corriente de base  $i_B$  se obtiene la familia de curvas características de salida  $i_C$ - $V_{CE}$  representada en la Figura 2.14.

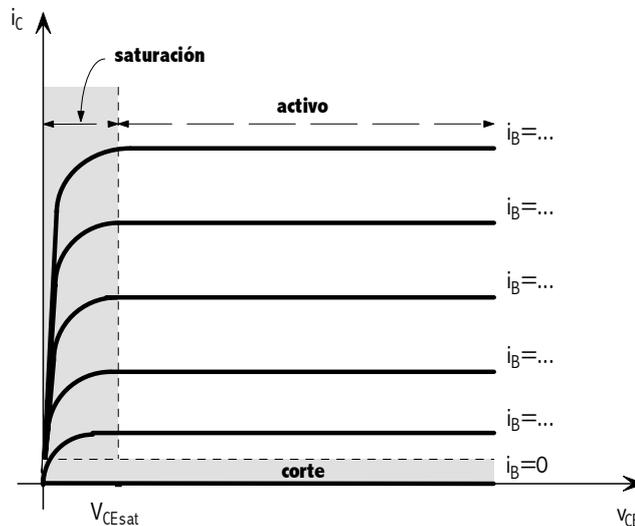


Figura 2.14

Cuando la corriente de base  $i_B$  es nula, el transistor deja de funcionar en modo activo, puesto que la unión emisor-base deja de estar polarizada en directa y, al igual que la unión colector-base queda polarizada en inversa, de forma que

$$i_B = i_C = i_E = 0$$

En esta situación se dice que el transistor está en corte, circulando a través de él únicamente la pequeña corriente de saturación inversa de la unión colector-base  $I_{CB0}$ , cuyo valor es prácticamente despreciable, por lo que el funcionamiento del transistor bipolar en esta situación puede representarse mediante el modelo equivalente mostrado en la Figura 2.15.

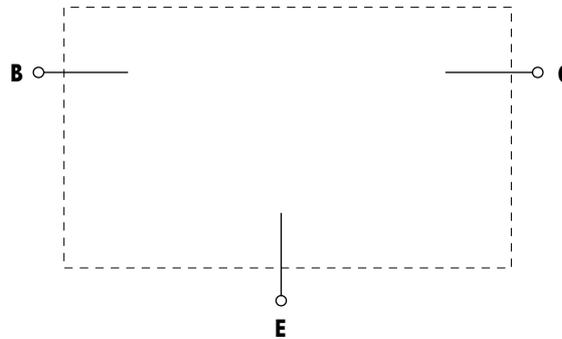


Figura 2.15

En la Tabla 2.2 se muestran algunos de los parámetros característicos del funcionamiento de los transistores bipolares npn de las familias BC546, BC547 y BC548 en **corte**, obtenidos a partir de la hoja de características proporcionada por el fabricante.

**Amplifier Transistors**  
NPN Silicon

ON Semiconductor™

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector–Emitter Breakdown Voltage ( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $I_B = 0$ )	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CEO}$	65 45 30	— — —	V
Collector–Base Breakdown Voltage ( $I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$ )	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CBO}$	80 50 30	— — —	V
Emitter–Base Breakdown Voltage ( $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$ , $I_C = 0$ )	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)EBO}$	6.0 6.0 6.0	— — —	V
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 70\text{ V}$ , $V_{BE} = 0$ ) ( $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $V_{BE} = 0$ ) ( $V_{CE} = 35\text{ V}$ , $V_{BE} = 0$ ) ( $V_{CE} = 30\text{ V}$ , $T_A = 125^\circ\text{C}$ )	BC546 BC547 BC548 BC546/547/548	$I_{CES}$	— — — —	0.2 0.2 0.2 —	nA   $\mu\text{A}$

**BC546**  
**BC546B**  
**BC547A**  
**BC547B**  
**BC547C**  
**BC548B**  
**BC548C**

Tabla 2.2

Por consiguiente, a partir de las curvas características de salida del transistor bipolar representadas en la Figura 2.14 se deduce que los límites de funcionamiento del dispositivo en modo activo están determinados por la región de saturación, en la que la corriente de colector  $i_C$  alcanza su máximo valor, y por la región de corte, en la que la corriente de colector  $i_C$  es nula.

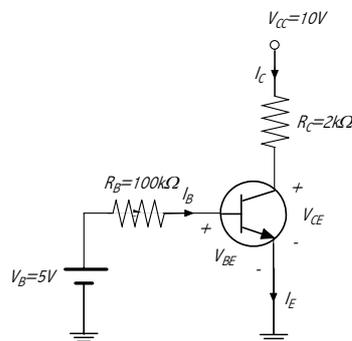
### Transistor Bipolar

	Corte	Activo	Saturación
$i_C$	0	$\beta \cdot i_B$	$< \beta \cdot i_B$
$V_{BE}$	$< 0.7V$	$> 0.7V$	$> 0.7V$
$V_{BC}$	$< 0.5V$	$< 0.5V$	$> 0.5V$
$V_{CE}$	$> 0.2V (V_{Cesat})$	$> 0.2V (V_{Cesat})$	$0.2V (V_{Cesat})$

Tabla 2.3

Para poder utilizar los modelos equivalentes presentados en el análisis en continua de circuitos basados en transistores bipolares, será necesario conocer previamente el modo de funcionamiento del dispositivo. ¿Cómo podemos determinar a priori el modo de funcionamiento del transistor?. Simplemente, no podemos, por lo que el método que utilizaremos consistirá en suponer que el dispositivo se encuentra en una determinada región de funcionamiento y a continuación verificaremos nuestra suposición inicial mediante el análisis de las condiciones de polarización del transistor.

**Ejemplo:** Se desea analizar el circuito de la figura con el fin de determinar las corrientes y tensiones del transistor sabiendo que sus parámetros característicos son  $V_{BE}=0.7V$  y  $\beta=100$ .



A partir del circuito se deduce que la unión base-emisor está presumiblemente polarizada en directa, ya que en la base del transistor bipolar hay aplicada una tensión positiva, mientras que el emisor está conectado a masa. Así, a partir del circuito de base se obtiene que

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100} = 0.043mA$$

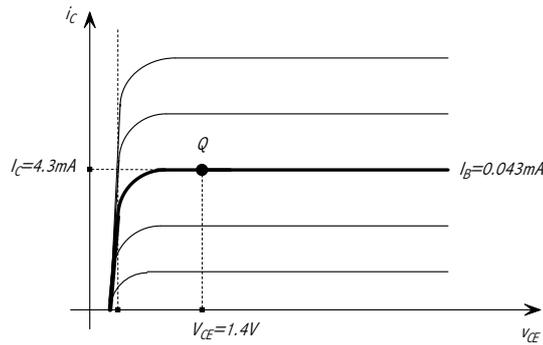
Por tanto, supondremos que el transistor bipolar está funcionando en modo activo, con lo que el valor de la corriente de colector  $I_C$  será

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 0.043 = 4.3mA ,$$

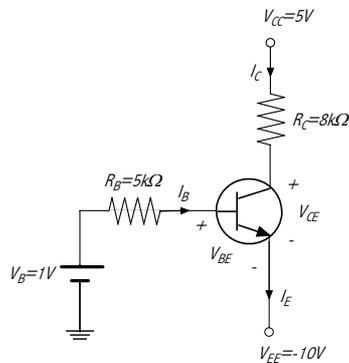
y la tensión  $V_C$  en el colector del transistor

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 10 - 4.3 \cdot 2 = 1.4V ,$$

con lo que, en esta situación  $V_{CE} = V_C - V_E = 1.4V$ , confirmando que efectivamente el transistor está en activo, tal como habíamos supuesto. En la siguiente figura se representa gráficamente el punto de trabajo  $Q$  del transistor sobre la curva característica  $i_C - v_{CE}$ .



**Ejemplo:** En el circuito de la figura se desea hallar el valor de las corrientes y tensiones del transistor sabiendo que sus parámetros característicos son  $V_{BE}=0.7V$  y  $\beta=10$ .



Como existe una tensión positiva en serie con la base del transistor bipolar y una tensión negativa aplicada al emisor, podemos suponer que el transistor está funcionando en modo activo, suposición que debemos verificar mediante el análisis del circuito.

Así, a partir del circuito de base se obtiene que

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE} - V_{EE}}{R_B} = \frac{1 - 0.7 - (-10)}{5} = 2.06mA$$

con lo que, como hemos considerado que el transistor está en modo activo, el valor de la corriente de colector  $I_C$  será

$$I_C = \beta I_B = 10 \cdot 2.06 = 20.6mA ,$$

y la tensión  $V_C$  en el colector del transistor

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 5 - 20.6 \cdot 8 = -159.8V ,$$

con lo que, en esta situación

$$V_{CE} = V_C - V_E = -159.8V - (-10) = -149.8V ,$$

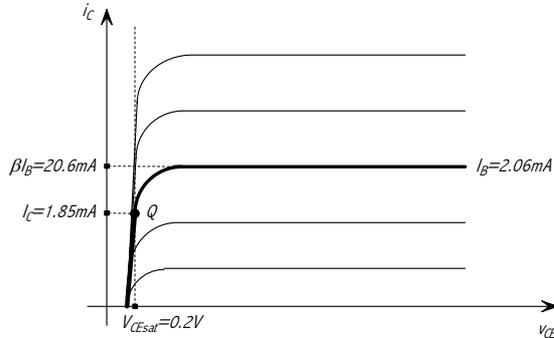
de donde se deduce que este resultado es incompatible con el funcionamiento activo del transistor bipolar, por lo que nuestra suposición inicial es incorrecta. Por tanto, supondremos que el transistor está en saturación estableciendo que la tensión colector-emisor del dispositivo es  $V_{CEsat}=0.2V$ , con lo que la corriente de colector  $I_C$  será

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat} - V_{EE}}{R_C} = \frac{5 - 0.2 - (-10)}{8} = 1.85mA ,$$

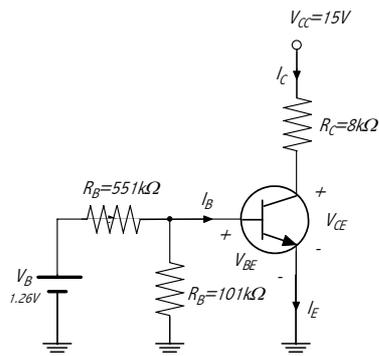
verificándose que en esta situación

$$\beta I_B = 20.6mA > 1.85mA = I_C ,$$

confirmando que el transistor está saturado, tal como habíamos supuesto. En la siguiente figura se representa gráficamente el punto de trabajo  $Q$  del transistor sobre la curva característica  $i_C$ - $v_{CE}$ .



**Ejemplo:** Determinar las corrientes y tensiones del transistor en el circuito de la figura sabiendo que los parámetros característicos del dispositivo son  $V_{BE}=0.6V$  y  $\beta=100$ .



Debido a la tensión positiva en el circuito de base, suponemos que el transistor está funcionando en saturación. Así, sustituyendo el divisor de tensión del circuito de base por su circuito equivalente de Thévenin obtenemos que

$$V_{BB} = V_B \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 0.196V$$

$$R_{BB} = R_{B1} // R_{B2} = 9.82k\Omega ,$$

de donde se obtiene que

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} = \frac{0.196 - 0.6}{9.82} = -0.041mA$$

resultado que contradice nuestra suposición inicial de que el transistor se encontraba en saturación. Por tanto, supondremos que el dispositivo está en corte, con lo que

$$I_B = I_C = I_E = 0 ,$$

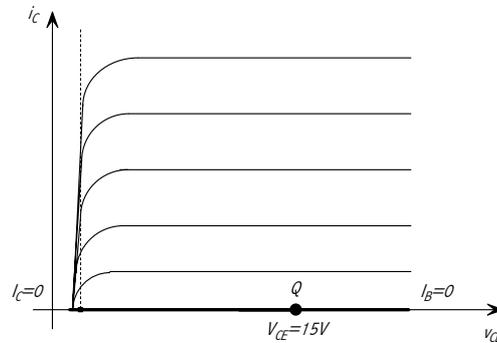
obteniéndose en esta situación que

$$V_{BE} = V_B - V_E = V_{BB} = 0.196V ,$$

mientras que, por otro lado

$$V_{BC} = V_B - V_C = V_{BB} - V_{CC} = -14.804V ,$$

confirmando que el transistor está cortado, tal como habíamos supuesto, ya que tanto la unión emisor-base como la unión colector-base del dispositivo se encuentran polarizadas inversamente. En la siguiente figura se representa gráficamente el punto de trabajo  $Q$  del transistor sobre la curva característica  $i_C$ - $V_{CE}$ .



### 2.2.3 Análisis gráfico. Recta de carga estática

La recta de carga es una herramienta gráfica muy útil en base a la que podemos obtener las corrientes y tensiones de un transistor bipolar descrito por sus curvas características, además de proporcionar un método de análisis gráfico del funcionamiento del dispositivo.

Consideremos el problema de obtener las corrientes y tensiones del transistor bipolar npn en el circuito en emisor común representado en la Figura 2.16.

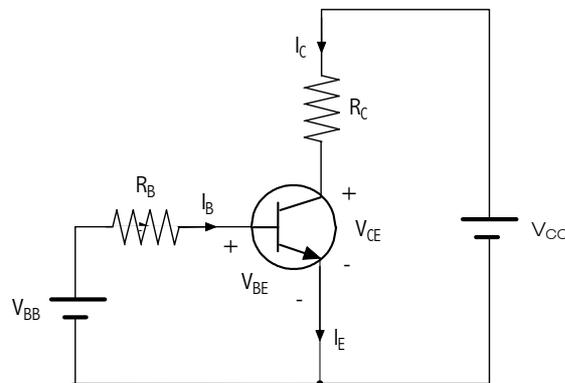


Figura 2.16

El valor de la corriente de base  $I_B$  y la tensión base-emisor  $V_{BE}$  del dispositivo, como coordenadas de un punto en la característica de entrada del transistor bipolar, deben estar situados sobre la curva  $i_B$ - $V_{BE}$ . Sin embargo deben cumplir también la condición lineal impuesta por el circuito de base, a partir del cual se establece que

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} ,$$

de donde se obtiene que

$$I_B = -\frac{1}{R_B}(V_{BE} - V_{BB}) ,$$

y que representa una relación entre el valor de la corriente de base  $I_B$  y la tensión base-emisor del dispositivo en continua. Esta relación puede representarse gráficamente sobre la característica de entrada del transistor mediante una línea recta de pendiente  $-1/R_B$ , cuyos puntos de corte con los ejes de la característica  $i_B$ - $v_{BE}$  del transistor son

$$I_B = 0 \rightarrow v_{BE} = V_{BB}$$

$$V_{BE} = 0 \rightarrow I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} ,$$

como se muestra en la Figura 2.17.

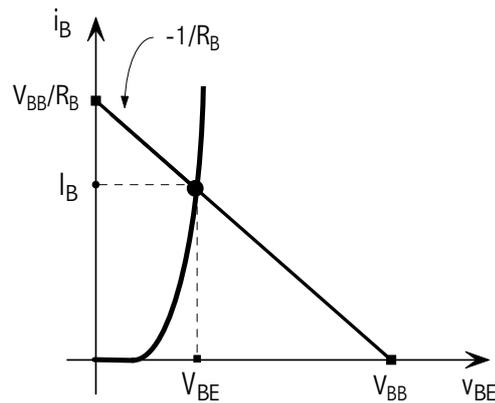


Figura 2.17

De esta forma, la intersección de la curva característica de entrada  $i_B$ - $v_{BE}$  del transistor bipolar y la condición lineal impuesta por el circuito de base determinan la corriente de base  $I_B$  y la tensión base-emisor  $V_{BE}$  del dispositivo en el circuito.

Por otro lado, una vez que hemos determinado el valor de la corriente de base  $I_B$ , sabemos que el punto de trabajo del transistor Q, determinado por la corriente de colector  $I_C$  y la tensión colector-emisor  $V_{CE}$  del transistor en ausencia de señal, estará situado sobre la curva característica de salida  $i_C$ - $v_{CE}$  correspondiente al valor de  $I_B$ , indicada en la Figura 2.18.

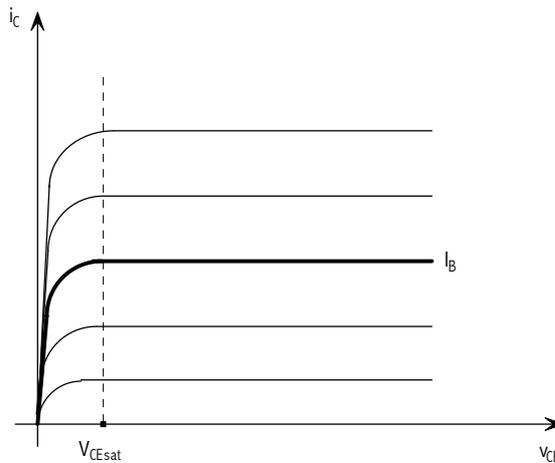


Figura 2.18

Sin embargo, su localización exacta sobre la curva característica del transistor está determinada por el circuito de colector, en base al que se establece la condición

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C ,$$

que puede reescribirse como

$$I_C = -\frac{1}{R_C}(V_{CE} - V_{CC}) ,$$

y que expresa una relación entre el valor de la corriente de colector  $I_C$  y la tensión colector-emisor  $V_{CE}$  en ausencia de señal. Esta relación puede representarse gráficamente sobre la característica de salida del transistor mediante una línea recta, de pendiente  $-1/R_C$ , como se muestra en la Figura 2.19, denominada recta de carga estática.

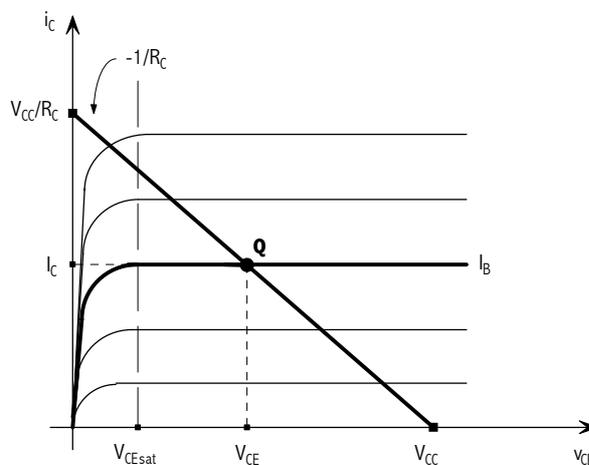
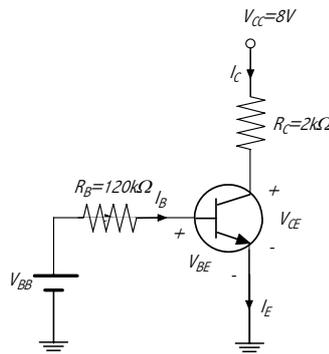


Figura 2.19

De esta forma, el punto de trabajo Q del transistor en ausencia de señal estará situado en la intersección de la recta de carga estática impuesta por el circuito de polarización y la curva característica  $i_C$ - $v_{CE}$  del transistor correspondiente a la corriente de base  $I_B$ . En consecuencia, la recta de carga estática representa todos los posibles puntos de funcionamiento del transistor en continua.

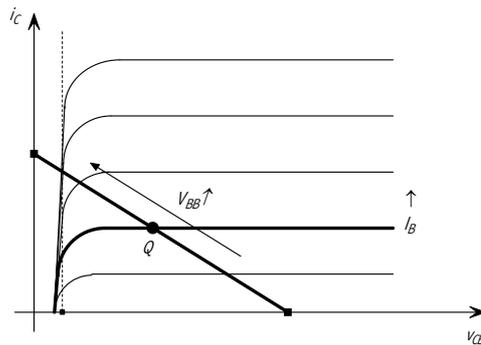
**Ejemplo:** En el circuito de la figura, determinar el valor de la tensión  $V_B$  a partir de la cual el transistor bipolar se satura, sabiendo que los parámetros característicos del dispositivo son  $V_{BE}=0.7V$  y  $\beta=100$ .



A partir del circuito de base se obtiene que

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{V_{BB} - 0.7}{120} ,$$

por lo que a medida que aumenta el valor de  $V_B$ , la corriente de base  $I_B$  va aumentando su valor, y por tanto, el punto de trabajo Q se irá desplazando hacia arriba sobre la recta de carga dentro de la región de funcionamiento en modo activo del transistor, como se representa en la figura.



Así, el transistor bipolar entrará en saturación cuando el valor de la tensión entre el colector y el emisor del transistor sea

$$V_{CE} = V_{CEsat} ,$$

situación en la que la corriente de colector alcanzará su valor máximo  $I_{Csat}$ ,

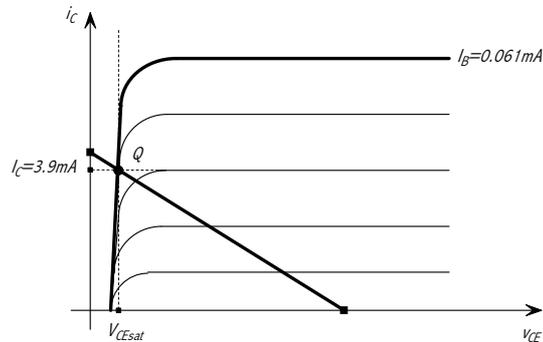
$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} = \frac{8 - 0.2}{2} = 3.9mA ,$$

y que corresponde a un valor de la tensión de entrada  $V_{BB}$  tal que

$$V_B = I_B \cdot R_B + V_{BE} = 0.039 \cdot 120 + 0.7 = 5.38V ,$$

En este punto, ambos circuitos equivalentes, activo y saturación, son equivalentes, de forma que  $i_C = \beta i_B$  y  $v_{CE} = V_{CEsat}$ . Sin embargo, para incrementos posteriores de  $V_{BB}$ , la corriente de base continuará aumentando, mientras que la corriente de colector

permanecerá constante a su valor límite de saturación, como se muestra en la figura para el caso particular en que  $V_{BB}=8V$ .



#### 2.2.4 El transistor bipolar pnp

El funcionamiento del transistor bipolar pnp es similar al descrito para el transistor bipolar npn. En la Figura 2.20 se representa la configuración de un transistor bipolar pnp en emisor común para su funcionamiento en modo activo.

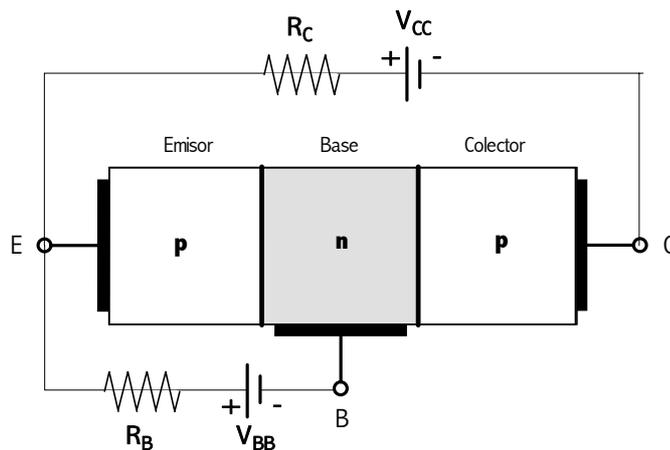


Figura 2.20

En esta configuración, la fuente de tensión continua  $V_{BB}$  hace que la tensión en el emisor tipo p del transistor bipolar sea superior a la de la base tipo n, polarizando en directa la unión base-emisor, mientras que, por otro lado, la unión colector-base está polarizada en inversa mediante la fuente de tensión continua  $V_{CC}$ , de mayor valor, que mantiene en todo momento la tensión en el colector tipo p por debajo del valor de la tensión en la de la base tipo n.

A diferencia del npn, en el transistor bipolar pnp la corriente se establece en base a los huecos difundidos desde el emisor a través de la base como resultado de la polarización directa de la unión base-emisor. Como la componente de la corriente de emisor  $i_E$  debida a los electrones inyectados desde la base del transistor bipolar hacia el emisor que se establece como consecuencia del reducido potencial de barrera de la

unión base-emisor se mantiene pequeña, puesto que el emisor está fuertemente dopado con respecto a la base, podemos considerar que en el transistor bipolar pnp la corriente de emisor  $i_E$  está determinada únicamente por la corriente de huecos difundidos a través de la unión base-emisor.

Por otro lado, algunos de los huecos difundidos desde el emisor a través de la región de base se recombinan con los electrones que son portadores mayoritarios en la base, y por tanto no alcanzan el colector. La fuente de tensión externa  $V_{BB}$  proporciona continuamente nuevos electrones a la región de base con el fin de reemplazar aquellos que se pierden en el proceso de recombinación.

Sin embargo, la mayoría de los huecos inyectados desde el emisor alcanzan el límite de la región de deplexión de la unión colector-base, donde serán atraídos por la tensión negativa establecida en el colector, cayendo hacia él, donde son recolectados, y constituyendo la corriente de colector del transistor bipolar  $i_C$ .

De esta forma, como el sentido de las corrientes en el transistor bipolar es el mismo que el del flujo de huecos en el proceso de conducción, a diferencia del npn, en el transistor bipolar pnp la corriente de colector  $i_C$  saldrá por el terminal de colector, al igual que la corriente de base  $i_B$ , que saldrá a través del terminal de base, mientras que el sentido de la corriente de emisor  $i_E$  será hacia dentro del terminal de emisor, como se observa en la Figura 2.21, en la que se representa el flujo interno de portadores en un transistor bipolar polarizado para su funcionamiento en modo activo y su relación con las corrientes externas.

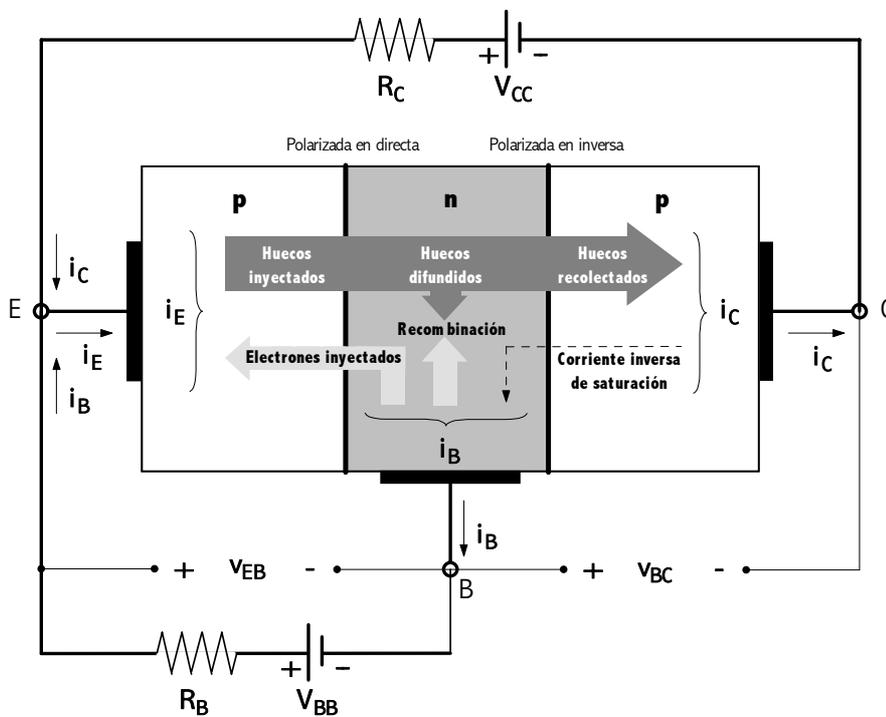


Figura 2.21

En la Figura 2.22 se representa el símbolo del transistor bipolar pnp, en el que el sentido de la flecha en el emisor indica el sentido normal del flujo de corriente a través de él, que también es la dirección de la polarización directa de la unión base-emisor.

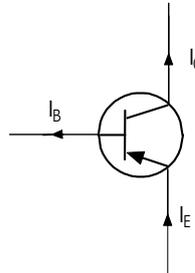


Figura 2.22

A partir de la descripción del funcionamiento del transistor bipolar pnp se deduce que sus curvas características serán idénticas a las del transistor bipolar npn excepto por el sentido de las corrientes y tensiones, como se observa en las Figuras 2.23a) y 2.23b), en las que se representan la características de entrada y de salida del transistor pnp en emisor común, respectivamente.

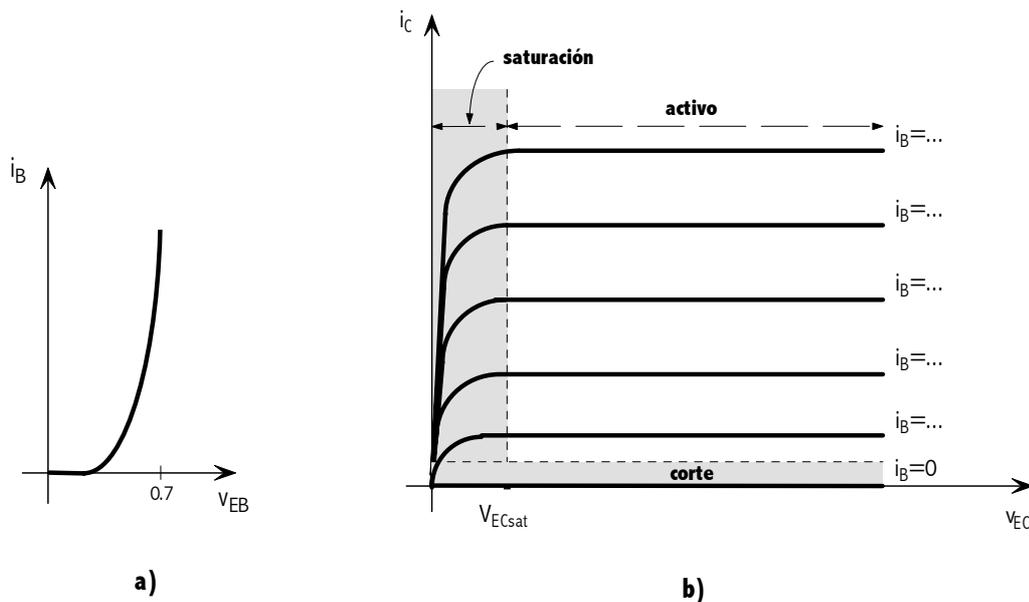


Figura 2.23

Además, al igual que en el transistor bipolar npn, el funcionamiento del transistor pnp cuando se aplican únicamente tensiones continuas puede representarse mediante el uso de modelos equivalentes. En la Figura 2.24 se muestran los modelos equivalentes del funcionamiento del transistor bipolar pnp en modo activo, en saturación y en corte, donde se observa que los equivalentes en corte para los transistores npn y pnp son idénticos, mientras que los modelos en modo activo y en saturación se diferencian únicamente en el sentido de las corrientes y tensiones.

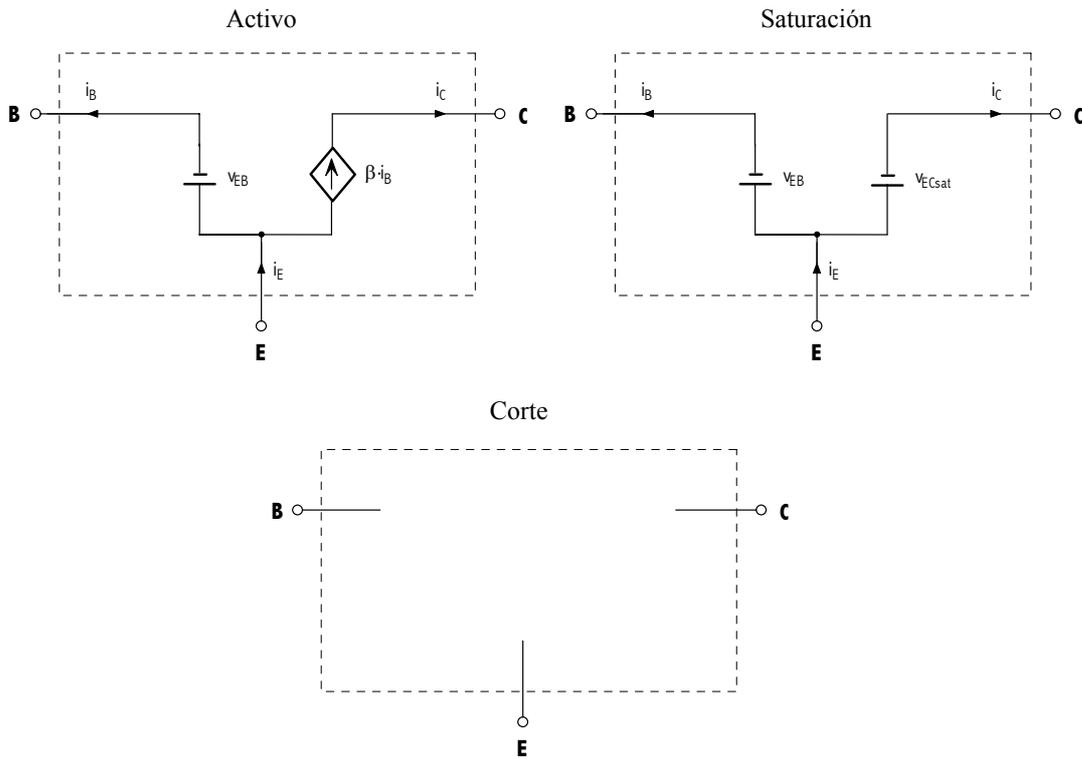
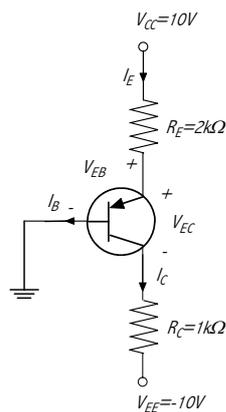


Figura 2.24

**Ejemplo:** Se desea analizar el circuito de la figura con el fin de determinar las corrientes y tensiones del transistor bipolar pnp sabiendo que sus parámetros característicos son  $V_{EB}=0.7V$  y  $\beta=100$ .



Como la base del transistor bipolar pnp está conectada a masa y en el emisor se aplica una tensión positiva, la unión base-emisor está claramente polarizada en directa, de forma que  $V_{EB}=0.7V$ , con lo que

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_E} = \frac{10 - 0.7}{2} = 4.65mA$$

con lo que, como el colector está conectado a una fuente de tensión negativa, podemos suponer que el transistor está en modo activo, de forma que

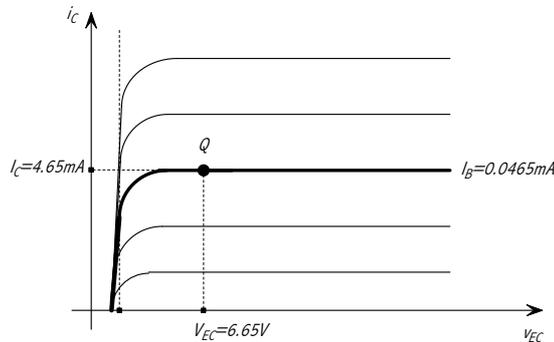
$$I_C \approx I_E = 4.65mA ,$$

y la tensión  $V_C$  en el colector del transistor será

$$V_C = I_C R_C - V_{EE} = 4.65 \cdot 1 - 10 = -5.35V ,$$

Confirmando que la unión colector-base se encuentra polarizada en inversa y que el transistor está funcionando en modo activo tal como habíamos supuesto. En la siguiente

figura se representa gráficamente el punto de trabajo  $Q$  del transistor sobre la curva característica  $i_C$ - $v_{CE}$ .



## 2.3

### El transistor bipolar como amplificador

Para que un transistor bipolar pueda trabajar como amplificador es necesario limitar su funcionamiento a la región activa, en la que se comporta como una fuente de corriente dependiente, siendo su característica de transferencia  $i_C$ - $v_{CE}$  prácticamente lineal.

En consecuencia, el punto de trabajo  $Q$  del transistor debe elegirse de forma que el transistor se mantenga en todo momento polarizado en modo activo, por lo que será necesario establecer una corriente continua adecuada en el colector del dispositivo en ausencia de señal.

El problema de la polarización del transistor bipolar consiste en establecer una corriente continua adecuada en el colector del dispositivo. Esta corriente debería ser además insensible a las variaciones de temperatura y de los parámetros característicos del transistor bipolar, así como a las derivas de los componentes. Aunque la polarización del transistor bipolar la analizaremos con detalle en el siguiente Capítulo, en esta sección demostraremos la necesidad de polarizar el transistor con una corriente de colector estable, puesto que el funcionamiento de un transistor como amplificador estará determinado por la polarización del dispositivo.

Para comprender el funcionamiento de un transistor bipolar como amplificador, consideremos el circuito básico representado en la Figura 2.25, en el que la señal de entrada que se desea amplificar se representa mediante una fuente de tensión  $v_{be}(t)$  cuyo valor varía con el tiempo.