

# **ELECTRÓNICA**



## **EL TRANSISTOR BIPOLAR:**

**Construcción y operación de un transistor bipolar**

**Modos de operación**

**Parámetros de funcionamiento como amplificador**

**Configuración base común**

**Configuración emisor común**

**Configuración colector común**

**Límites de operación**



**J**ohn Bardeen nació en Madison (EE.UU) el 23 de mayo del año 1908. Fue galardonado en dos ocasiones con el Premio Nobel de Física, en 1956 y 1972, el suyo constituye un caso excepcional en el mundo de la ciencia moderna. Compartió su primer premio con William B. Shockley y Walter H. Brattain, por la invención del transistor, y el segundo, con Leon N. Cooper y John R. Schrieffer, por el desarrollo de la llamada "Teoría BCS" de la superconductividad.

John Bardeen se licenció en ingeniería eléctrica en la Universidad de Wisconsin (Madison) y obtuvo el doctorado en física matemática en la Universidad de Princeton. Desarrolló su labor científica en primer lugar en el laboratorio del departamento de Ordenanza Naval de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial.

Al término de la contienda pasó a dirigir los laboratorios de la Bell Telephone Inc., donde investigó las propiedades electrónicas de los materiales semiconductores, trabajos que culminaron con el invento del transistor, elemento que abrió toda una amplísima gama de nuevas perspectivas en el campo de la microelectrónica y la computación.

Desde 1951 hasta 1975 ejerció como profesor en la Universidad de Illinois. Durante este período Bardeen desarrolló, en colaboración con Cooper y Schrieffer, la labor teórica en la cual se cimentaron todas las investigaciones posteriores en el terreno de la superconductividad, denominada "Teoría BCS" por las iniciales de los apellidos de sus creadores.

John Bardeen falleció el 30 de enero de 1991, en Boston (EE.UU).

## 1. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN TRANSISTOR BIPOLAR

El transistor es el dispositivo activo de estado sólido más importante que ha creado la electrónica moderna. Su desarrollo comenzó hace algo más de 60 años con los trabajos de John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain. Su estructura es realmente muy simple; está formado por dos junturas ubicadas muy cerca entre sí. Ambas junturas son fabricadas sobre un mismo monocristal (tipo n o tipo p).

La figura 1 muestra el símbolo, terminales y estructura interna de un transistor PNP y NPN. Como se observa en esta figura, las tres zonas que lo componen se llaman emisor, base y colector. El emisor es una región muy contaminada, por lo que se designa  $p^+$  o  $n^+$ . La base es de contaminación muy débil, mientras que el dopaje del colector no es crítico y su contaminación depende muchas veces del proceso de fabricación utilizado. El parámetro geométrico más importante es el ancho de la base, que debe ser el menor posible.

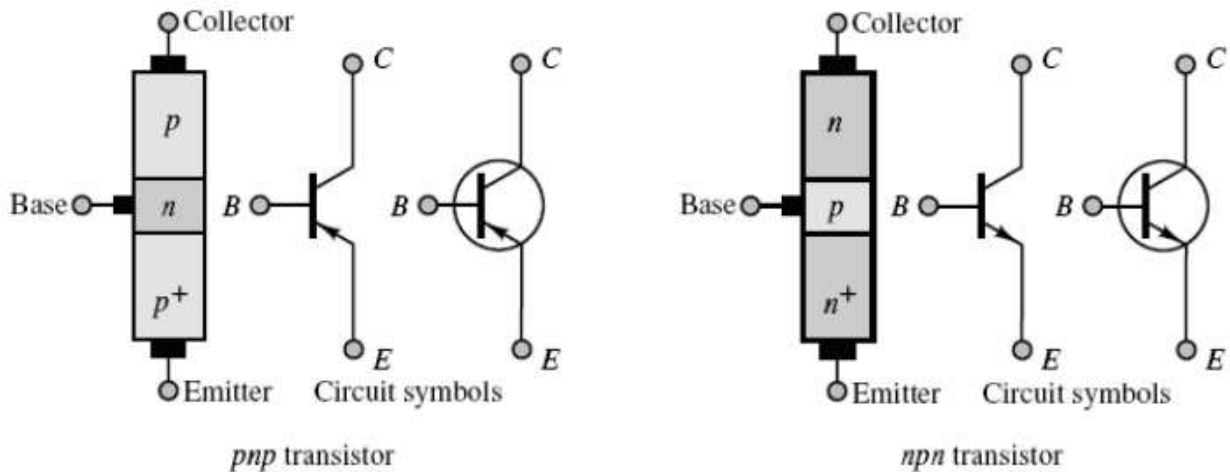


Figura 1.- Transistor pnp (izquierda) y npn (derecha). Estructura, símbolo y terminales.

Para entender el funcionamiento del transistor comenzaremos analizando el circuito de la figura 2, conformado por un transistor pnp. La operación de un transistor npn es exactamente la misma, con los roles de los huecos y electrones intercambiados.

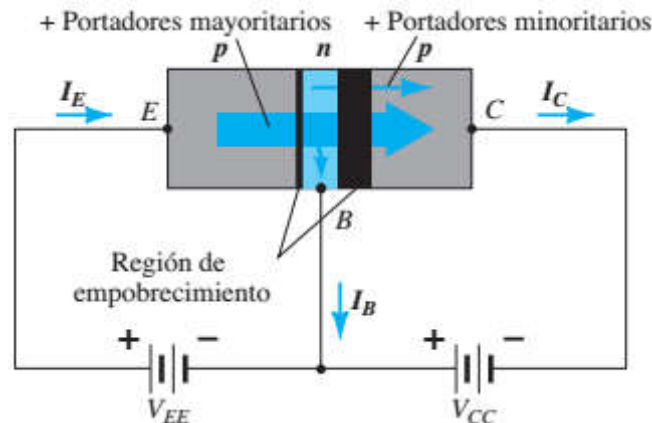


Figura 2.- Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios en un transistor pnp.

La juntura emisor-base se encuentra polarizada en forma directa ( $+V_{EB}$ ) y la juntura colector-base en forma inversa ( $-V_{CB}$ ). La corriente de la juntura emisor-base responde a la ecuación de un diodo, quedando planteada de la siguiente forma:

$$I_E = I_{ES}(e^{V_{EB}/\eta V_T} - 1)$$

La corriente  $I_{ES}$  es la corriente de saturación de dicha juntura con el colector en cortocircuito. Por ser la juntura muy asimétrica, es decir  $p^+$  mucho mayor que  $n$ , la corriente  $I_E$  estará formada únicamente por los huecos de la zona  $p^+$  que van hacia la zona  $n$  como se indica en la figura 2 (portadores mayoritarios).

Considerando que el ancho de la base es muy pequeño en comparación con las demás dimensiones del transistor y recordando que la zona de la base es neutra, los huecos atraviesan la juntura emisor-base, llegando hasta la juntura colector-base donde el campo eléctrico de la misma los capta e inyecta hacia el colector. Algunos huecos se recombinan en la base, pues ésta es tipo  $n$ . El número de huecos que se recombinan en la base es, en proporción a la corriente total, muy pequeño debido a que la base está muy poco contaminada y la distancia que deben recorrer los huecos hasta llegar al colector es muy pequeña. De esta manera puede considerarse que:

$$I_E \cong I_C \text{ y que } I_B \ll I_C$$

Debe considerarse que la existencia de  $I_C$ , en la práctica, no está supeditada a la existencia de tensión negativa en el colector. El valor de  $I_C$  depende casi exclusivamente del valor de la  $I_E$  y ésta de la  $V_{EB}$ . La  $I_C$  es casi independiente de la  $V_{CB}$  siempre que ésta no sea positiva, pues en caso de serlo también el colector inyectaría huecos a la base, alterando su funcionamiento. El campo eléctrico de la juntura colectora inyecta hacia el colector todos los huecos que a través de la base llegan a él; si el campo eléctrico es mayor o menor el número de huecos que desplaza no varía, porque es la base y la difusión a través de ella la que limita ese número. Si  $V_{CB} = 0$  el campo eléctrico de la juntura será más que suficiente para mantener esa corriente.

Es interesante analizar cuál es la ley física que determina la existencia de corriente en cada zona del transistor. En la zona de emisor la corriente circula obedeciendo la ley de Ohm; es una zona muy contaminada y su comportamiento es metálico. En la juntura emisor-base el proceso es mucho más complejo; allí el campo eléctrico tiene un sentido que repele a los huecos, sin embargo éstos logran vencerlo, gracias a la energía que adquieren debido a la agitación térmica.

En la región de base los huecos son portadores minoritarios. Se trata de una zona neutra por lo que en ella no existe campo eléctrico y los huecos ingresan por el mecanismo de difusión. La difusión es un fenómeno que determina que las partículas agitadas térmicamente se desplacen de las zonas de alta concentración hacia las zonas de baja concentración. En el otro extremo de la base, cercano a la juntura colector-base, la densidad de huecos será prácticamente nula, porque el campo eléctrico presente en la juntura extrae la casi totalidad de huecos que llegan a él.

En la juntura colector-base la corriente existe debido a un gran campo eléctrico favorable; pero no es la ley de Ohm la que se aplica, ya que no existe una proporción directa entre la corriente y el campo. Más bien aquí la corriente que atraviesa la juntura es independiente del campo eléctrico.

La intensidad de la base,  $I_B$ , está compuesta en realidad por dos componentes principales:  $I_{BB}$  e  $I_{BE}$ . La  $I_{BB}$  es la intensidad de corriente de la base provocada por la recombinación de los huecos que atraviesan la base, con los electrones de la base. El contacto de base debe reponer los electrones que se pierden por recombinación, determinando así la circulación de una corriente. La otra componente,  $I_{BE}$ , está determinada por lo electrones de la base que son inyectados hacia el emisor. Es parte de la corriente de juntura, que siempre está formada por dos componentes, electrones y huecos, que cruzan la zona de juntura en sentido inverso. Al ser muy contaminada la zona de emisor, en comparación con la base, esta componente es muy débil, pero no nula. La suma de estas dos corrientes,  $I_{BB}$  e  $I_{BE}$ , determina la  $I_B$  que sale por el contacto de base.

La  $I_B$  es muy pequeña frente a la  $I_C$ , en el orden del uno por ciento, o aún menos; pero lo más importante es que  $I_B$  es una determinada proporción de  $I_C$ , de esta manera se puede controlar  $I_C$  provocando la variación de la  $I_B$ . La corriente  $I_B$  se convierte así en un parámetro de control; variando  $I_B$  se varía  $I_C$ , y como  $I_C$  es muchas veces mayor que  $I_B$ , una pequeña variación de  $I_B$  ha de provocar una gran variación de  $I_C$ , determinando así la existencia de ganancia de corriente.

Por otra parte, aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff al circuito de la figura 2, tenemos que:

$$I_E = I_C + I_B$$

La corriente de colector, al igual que la corriente de base, se encuentra formada por dos componentes, una de portadores mayoritarios y la otra de portadores minoritarios. La corriente de portadores mayoritarios está

dada por los huecos que atraviesan la región de base y son captados por el colector. La corriente de portadores minoritarios se debe a los huecos y electrones presentes en la base y colector respectivamente, que han sido generados térmicamente y que atraviesan la juntura base-colector en sentidos contrarios. Si la base está mucho más dopada que el colector, la corriente minoritaria estará dada fundamentalmente por los electrones que parten desde el colector, ingresando a la base. Esta corriente se denomina  $I_{CO}$  y se conoce como corriente de fuga. Para transistores de uso general,  $I_C$  se encuentra en el orden de  $10^{-3}$ , mientras que  $I_{CO}$  se encuentra en el orden de  $10^{-12}$  a  $10^{-18}$ . Al igual que un diodo polarizado en forma inversa, la  $I_{CO}$  depende de la temperatura, a tal punto que casi duplica su valor por cada  $5^{\circ}\text{C}$  de aumento de la temperatura, por lo que debe ser tenida en cuenta en aquellos circuitos que operen en un amplio rango de temperaturas.

Quizás, el efecto más importante del transistor es la capacidad para inyectar en el colector una corriente elevada procedente del emisor a través de la base, a pesar de que la juntura base-colector está polarizada en inversa. Esto sólo se consigue si la base es suficientemente estrecha de forma que la corriente inyectada procedente del emisor alcance el colector. Si el emisor estuviese distanciado del colector la corriente de emisor se recombinaría en la base y el dispositivo sería equivalente a una simple unión de dos diodos conectados en oposición. El efecto anterior es además el que da lugar a la terminología "emisor" y "colector", para nombrar a la región que realmente emite y recoge, respectivamente, la corriente principal en el transistor.

## 2. MODOS DE OPERACIÓN

En condiciones típicas de operación la juntura emisor-base (JEB) se polariza en directa y la juntura colector-base (JCB) en inversa. Es el llamado modo de operación activo directo, y se utiliza para aplicaciones de amplificación. La acción o efecto transistor también se verifica si se intercambian los terminales de colector y emisor. Sin embargo, el comportamiento que resulta no es el mismo ya que el dispositivo no es simétrico: el emisor está más contaminado que el colector. Esta asimetría hace que este modo de operación, llamado activo inverso, tenga limitadas aplicaciones. Cuando ambas junturas del transistor se polarizan en sentido directo este modo de operación se denomina saturación. En cambio, cuando ambas junturas se polarizan en forma inversa se tiene un cuarto modo, llamado corte. Estos dos últimos modos: saturación y corte son los utilizados cuando se hace operar al transistor como llave, tal es el caso de los circuitos digitales. La figura 3 muestra las regiones de operación para un transistor bipolar como función de la polarización aplicada.

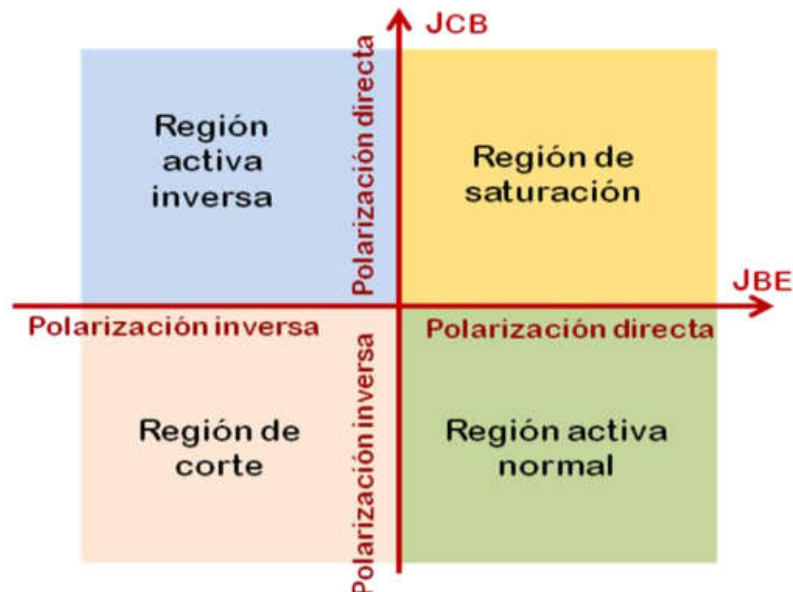


Figura 3.- Modos de operación de un transistor bipolar.

La tabla 1 resume los modos de operación de un transistor bipolar:

Modo	JEB	JCB
Corte	Inverso	Inverso
Activo	Directo	Inverso
Activo Inverso	Inverso	Directo
Saturación	Directo	Directo

**Tabla 1.-** Modos de operación de un transistor bipolar.

En la región activa directa el transistor se comporta como una fuente controlada en la cual la corriente de entrada determina la corriente de salida. Los cambios en el nivel de polarización de la juntura E-B ajustan el valor de la corriente de emisor y en correspondencia el valor de la corriente de colector.

En la región de corte, como ambas junturas están polarizadas en inversa tanto la corriente de emisor como la corriente de colector son del orden de las corrientes de saturación de las junturas correspondientes. En el caso ideal puede asemejarse a un circuito abierto.

En la región de saturación, como las junturas se polarizan directamente la corriente de colector será apreciable pero la tensión en la unión de colector será pequeña en correspondencia a su polarización directa. El funcionamiento se asemeja a una llave cerrada.

En la región activa inversa, se comporta como una fuente controlada pero de menor ganancia comparada con la región activa directa, debido a la asimetría en el dopaje de cada región.

### 3. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO COMO AMPLIFICADOR

Los niveles de  $I_C$  e  $I_E$  originados por los portadores mayoritarios están relacionados por una cantidad llamada *alfa*, definida por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Este parámetro se conoce como *factor de transporte de base*. En el caso ideal, de que no existiese recombinación de huecos y electrones en la región de base, *alfa* es igual a uno. En los dispositivos reales *alfa* varía entre 0,9 y 0,998, valores muy cercanos a la unidad, debido a lo estrecho de la región de base.

En corriente continua (CC) los niveles de  $I_C$  e  $I_B$  están relacionados por una cantidad llamada *beta* y definida por la siguiente ecuación:

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

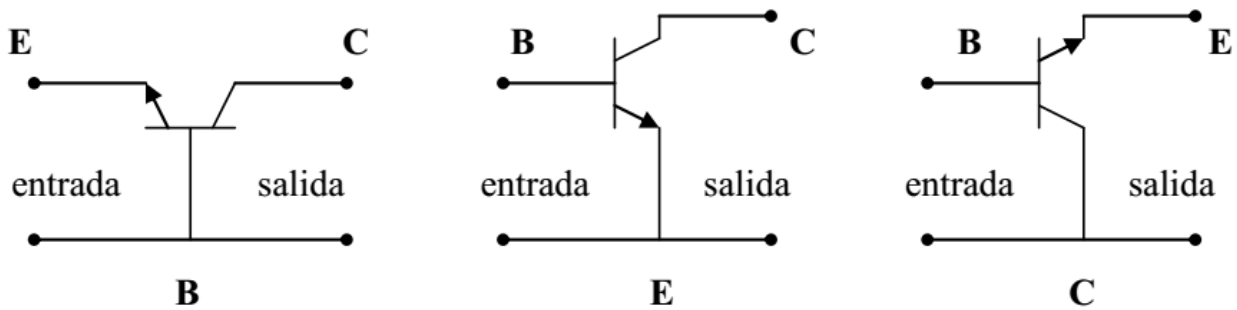
En las especificaciones de un transistor *beta* aparece como  $h_{FE}$ , donde la letra “h” hace referencia a un circuito equivalente en parámetros híbridos y el subíndice “FE” proviene de *ganancia de corriente en directa* (forward) en la configuración emisor común. Generalmente el valor de beta en CC oscila entre 30 y 400.

Para encontrar la relación entre alfa y beta se procede de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{I_C/I_E}{1 - (I_C/I_E)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

La ecuación anterior revela un importante hecho; los cambios pequeños en alfa corresponden a cambios muy grandes en beta. Esta observación matemática se manifiesta físicamente, y el resultado es que los transistores del mismo tipo pueden tener valores de beta muy diferentes.

Debido a que el transistor es un dispositivo de tres terminales, su utilización en circuitos amplificadores de señales alternas exige que uno de los terminales sea común a los circuitos de entrada y salida de señal. De esta manera obtenemos tres configuraciones posibles: base común, emisor común y colector común (o seguidor de emisor).



**Figura 4.-** Circuitos posibles con un transistor (de izquierda a derecha): base común, emisor común y colector común.

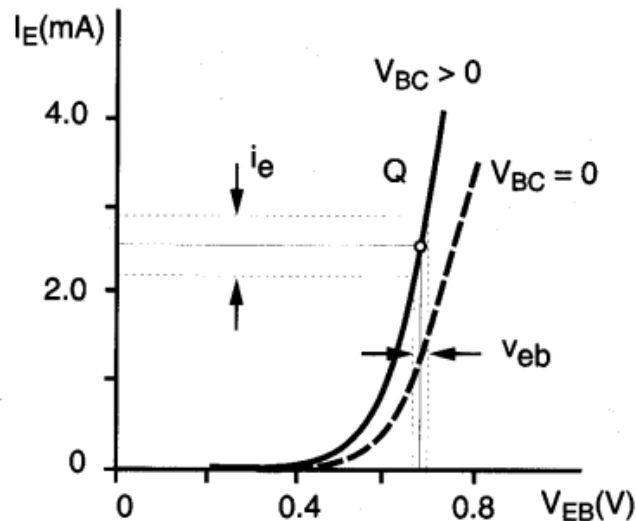
En este apunte las direcciones de la corriente se referirán a un flujo convencional (de huecos) y no de electrones. Por otra parte, las flechas en todos los símbolos electrónicos apuntan en la dirección definida de acuerdo a esta convención.

En una configuración emisor común la señal de entrada se aplica a la base del transistor y la señal de salida se obtiene en el colector. En esta configuración existe ganancia tanto de tensión como de corriente, por lo que se trata de la configuración más utilizada. La configuración base común solo tiene ganancia de tensión y la señal de entrada se aplica al emisor del transistor, mientras que la señal de salida se obtiene en el colector. Tiene una baja impedancia de entrada y una alta impedancia de salida. La configuración colector común o seguidor de emisor tiene ganancia de corriente y la señal de entrada se aplica a la base, mientras que la señal de salida se obtiene en el emisor. Posee una baja impedancia de entrada y una alta impedancia de salida. A continuación se tratarán con más detalle cada una de estas configuraciones.

## 4. CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

Con el objeto de tener una idea clara del comportamiento del transistor cuando se lo utiliza como amplificador, es conveniente hacer una representación gráfica de la variación de las corrientes en el dispositivo frente a las tensiones aplicadas. Se requieren dos conjuntos de características, uno para los parámetros de entrada y otro para los de salida.

El conjunto de entrada para el amplificador base común (con un transistor PNP) relaciona la corriente de entrada ( $I_E$ ) con el voltaje de entrada ( $V_{EB}$ ), para varios niveles de voltaje de salida ( $V_{BC}$ ).



**Figura 5.-** Característica de entrada de un transistor PNP en configuración base común.



Las curvas que se observan en la figura 5 ilustran la variación típica de la corriente de emisor,  $I_E$ , en función de la tensión de polarización en la juntura de emisor,  $V_{EB}$ , usando como parámetro diferentes valores de la tensión entre base y colector,  $V_{BC}$ . Es evidente que cuando  $V_{EB} > 0$  el comportamiento del transistor, visto desde los terminales de emisor y base se asemeja al de una unión  $p^+n$  polarizada en forma directa. Mientras la unión de colector se encuentre polarizada en forma inversa ( $V_{BC} > 0$ ), la corriente de emisor tendrá una variación cuasi-exponencial con  $V_{EB}$ , siendo prácticamente independiente del valor  $V_{BC}$ . En circuitos prácticos, la tensión  $V_{BE}$  suele ser pequeña, alrededor de 0,6 – 0,7V para transistores de silicio, es decir, próxima a la tensión umbral de la unión p-n, ya que a partir de esta tensión la corriente  $I_E$  toma valores elevados. Hay que notar en la figura 5 que para  $V_{BC} = 0$  la corriente  $I_E$  disminuye ligeramente sobre el valor correspondiente al caso anterior, ya que desaparece el efecto de drenaje del colector para los huecos que proceden del emisor, cuando la unión de colector se polariza en inversa.

En el circuito de salida de la configuración base común la curva característica V-I del transistor representa la variación de la corriente de colector,  $I_C$ , frente a la tensión aplicada en los terminales base-colector,  $V_{BC}$ . Como parámetro se podría tomar la tensión entre emisor y base,  $V_{EB}$ , del circuito de entrada. Hay que considerar, sin embargo, que en la región activa la intensidad de colector tiene una dependencia lineal con la corriente de emisor,  $I_E$ , por lo que es preferible utilizar esta corriente como parámetro.

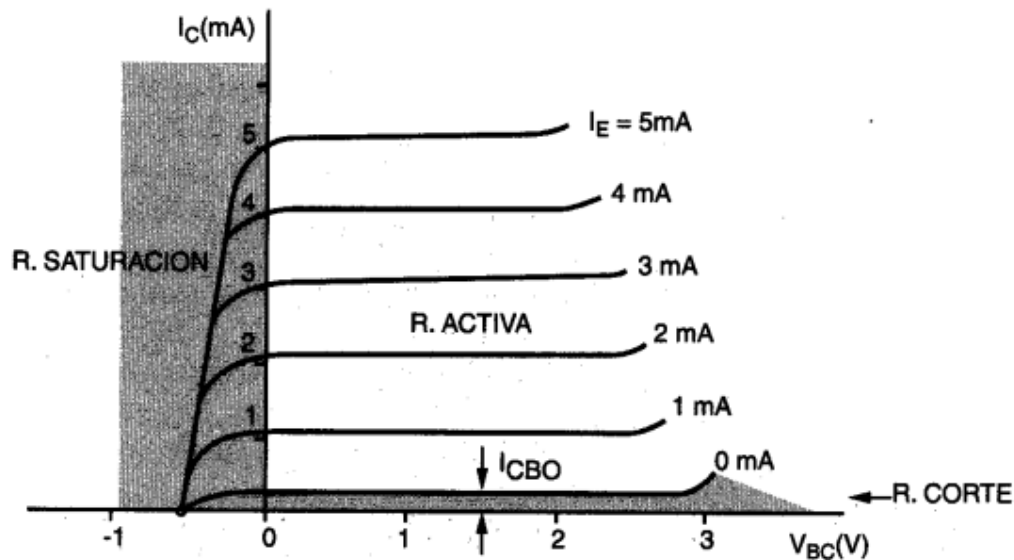


Figura 6.- Característica de salida de un transistor PNP en configuración base común.

En la figura 6 se da una familia de curvas que representa la variación de  $I_C$  para diferentes valores de  $V_{BC}$  tomando  $I_E$  como parámetro para un transistor del tipo PNP. Se aprecia en estas curvas que en la región activa ( $V_{BC} > 0$ ) la corriente de colector,  $I_C$ , coincide aproximadamente con el valor de la corriente de emisor y además es prácticamente independiente de la tensión base-colector dentro de un amplio rango de voltajes. Existe sin embargo una pequeña corriente, incluso cuando la corriente de emisor es cero (emisor en circuito abierto) que corresponde a la corriente de portadores minoritarios, o corrientes de fuga ( $I_{CBO}$ ), en la unión de colector polarizada en inversa. Para reducir completamente a cero esta corriente de colector sería necesario polarizar también la unión de emisor con una pequeña tensión inversa. El transistor funciona entonces en la denominada región de corte en la que prácticamente no circula ninguna corriente a través de él. En esta situación el circuito equivalente del transistor se reduce prácticamente a dos diodos conectados en oposición y polarizados en inversa cada uno de ellos.

Por el contrario, en la región de saturación, es decir, para  $V_{BC} < 0$ , las dos uniones que forman el transistor están polarizadas en forma directa por lo que desde el emisor y colector se inyectan sendas corrientes en sentido opuesto hacia la base. En estas circunstancias, la corriente que nace en el colector se opone a la corriente principal de huecos procedentes del emisor produciendo una disminución global de la corriente  $I_C$ , tal como se observa en la figura 6. Si la polarización  $V_{BC}$  se hace negativa en unas décimas de voltios, es decir, con un valor similar a la polarización de la unión de emisor, la corriente  $I_C$  se reduce completamente a cero. Las curvas de  $I_C$  convergen entonces en un punto situado en la región negativa del eje de las abscisas.



## 5. CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

La curva de tensión-corriente para la entrada de un circuito en configuración emisor común corresponde a la variación de  $I_B$  con  $V_{EB}$ , tomando como parámetro la tensión  $V_{EC}$ , del circuito de salida.

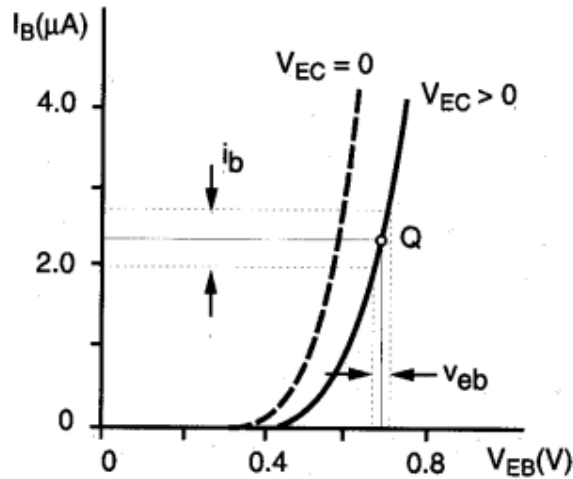


Figura 7.- Característica de entrada de un transistor PNP en configuración emisor común.

En la figura 7 se ha representado la variación típica de la corriente  $I_B$  en función de  $V_{EB}$  para los casos de  $V_{EC} > 0$  y  $V_{EC} = 0$  (colector en corto con emisor). Cuando el transistor opera en la región activa ( $V_{EC} > 0$ ), la corriente de base es prácticamente independiente de la tensión  $V_{EC}$ , por lo que la variación de  $I_B$  frente a  $V_{EB}$  puede representarse por una única curva. Obsérvese que la variación de  $I_B$  en este caso es muy similar a la de un diodo polarizado en forma directa, ya que el comportamiento de la unión de emisor es similar al de una unión p<sup>+</sup>-n. La analogía con las curvas de la figura 5 (configuración base común) es evidente, aunque al ser  $I_B \ll I_E$  el diodo opera en una región mucho más próxima al origen, y por lo tanto con una resistencia dinámica mayor. En circuitos prácticos, el transistor suele estar polarizado con una tensión  $V_{EB}$  pequeña (entre 0,6 y 0,7V para el Si), es decir ligeramente superior a la tensión umbral del diodo.

Para la curva  $V_{EC} = 0$  (línea punteada) la corriente de base toma un valor negativo pequeño. Efectivamente, para  $V_{EB} = 0$  no puede existir flujo de corriente a través de los terminales de emisor y base ( $I_E = 0$ ). Sin embargo, puede existir una pequeña corriente negativa en el terminal de base, ya que éste se encuentra polarizado positivamente respecto del colector lo cual implica una pequeña corriente en inversa (negativa) que entra por el terminal de base y se dirige hacia el colector.

En el circuito de salida las características V-I representan la variación de la corriente de colector,  $I_C$ , en función de la tensión aplicada entre los terminales de emisor y colector,  $V_{EC}$  (figura 8). En este caso, se toma como parámetro la corriente de base,  $I_B$ , perteneciente al circuito de entrada, ya que en la región activa existe una dependencia directa entre la corriente de colector y la corriente de base, según se ha señalado anteriormente. Las curvas se trazan de forma que el cambio de  $I_B$  de una curva a otra sea constante (40μA en el caso de la figura 8).

En la región activa, la corriente de colector  $I_C$  es, aproximadamente, independiente de  $V_{EC}$  para un valor fijo de  $I_B$ . Para explicar este hecho hay que considerar que  $V_{EC}$  se puede descomponer en dos términos, esto es,  $V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$ . En esta suma, el primer término,  $V_{EB}$ , se mantiene constante, ya que esta magnitud está determinada por el valor impuesto para la corriente  $I_B$ . Por tanto las variaciones de la tensión de polarización  $V_{EC}$  se reflejan únicamente en el segundo término, es decir, en la tensión de base/colector,  $V_{BC}$ . Según hemos visto para la configuración de base común, la tensión  $V_{BC}$  no influye en el valor de la corriente  $I_C$  cuando el transistor opera en la región activa.

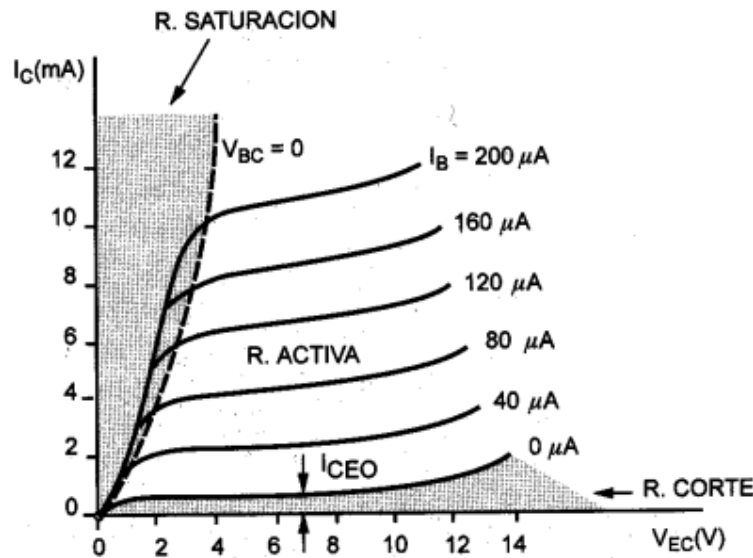


Figura 8.- Característica de salida de un transistor PNP en configuración emisor común.

En la región activa o zona lineal de operación la corriente de colector es relativamente alta y en general mucho mayor que  $I_B$ , ya que el factor de ganancia  $\beta_{dc}$  suele tener un valor elevado. Para  $I_B = 0$  (base en circuito abierto) la corriente de colector,  $I_C$ , toma un valor relativamente pequeño, dado por  $I_{CEO}$ . Esta corriente corresponde fundamentalmente a la corriente de huecos en el colector inyectados desde el emisor a través de la base, ya que para un valor dado de  $V_{EC}$  la unión de emisor se encuentra siempre con una ligera polarización directa. Para llevar completamente a cero la corriente de colector sería necesario polarizar la unión base-emisor en inversa con una tensión pequeña. En ese caso el transistor ingresa en la región de corte, caracterizada por una resistencia entre los terminales de emisor y colector elevada, ya que ambas uniones están polarizadas de forma inversa. En circuitos digitales, cuando el transistor se encuentra operando en esta zona se dice que está en *estado apagado o bajo*.

La región de saturación se corresponde con la polarización en directa de la unión base-colector ( $V_{BC} < 0$ ), con lo que ambas uniones quedan polarizadas de forma directa. Existe entonces una corriente de huecos procedentes del colector que se inyecta hacia la base produciendo una disminución de la corriente neta de colector. En esta situación el transistor opera con una resistencia muy baja entre los terminales de emisor y colector, ya que la corriente  $I_C$  puede ser elevada incluso con tensiones de colector-emisor bajas. En circuitos digitales la operación en esta región se denomina, análogamente, *estado encendido o alto*.

Es importante mencionar que, en la región de saturación, la tensión  $V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$  es menor que  $V_{EB}$  ya que  $V_{BC} < 0$ . De esta manera, el terminal de colector se encuentra a un potencial mayor que el terminal de base, quedando así la unión de colector polarizada en forma directa.

Cuando el transistor se utiliza en circuitos amplificadores de tipo analógico para señales alternas normalmente funciona con polarización en un punto de las curvas características situado en la región activa. Por el contrario, en los circuitos digitales, el transistor se polariza de forma que trabaje alternativamente en la región de corte o saturación. El paso de un estado a otro se realiza modificando la corriente de base. Esta corriente se ve modificada con pequeñas variaciones de  $V_{EB}$ , lo que da lugar a importantes cambios en el estado de funcionamiento del transistor.

## 6. CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR

Esta configuración se caracteriza por una ganancia de tensión ligeramente menor que la unidad, una elevada impedancia de entrada, y una baja impedancia de salida. Generalmente se la utiliza como etapa separadora o adaptadora de impedancias.

Cuando se la sitúa en el circuito de entrada, su elevada impedancia de entrada reduce la carga aplicada a la fuente de señal. Cuando se sitúa en el circuito de salida sirve para aislar de la carga la etapa precedente del amplificador y, además, da una baja impedancia de salida.

Esta configuración también se conoce como seguidor de emisor ya que la tensión de salida "sigue" muy de cerca a la señal de entrada. Recordemos que en esta configuración la salida se toma sobre el emisor.

Debido a que por el colector y emisor circula, aproximadamente, la misma corriente, a los fines prácticos se pueden adoptar las curvas características de la configuración emisor común. Es decir que las características de salida están dadas por la corriente  $I_E$  en función de  $V_{EC}$ , para un rango de valores de  $I_B$ , mientras que para la entrada se utilizan los mismos parámetros que la configuración emisor común.

## 7. LIMITES DE OPERACIÓN

Para cada transistor existe una región de operación segura, dentro de la cual no se superan los valores nominales máximos y la señal de salida tendrá una distorsión mínima. Dicha región es la zona que se observa en blanco en la figura 9. Todos los límites de operación se definen en la correspondiente hoja de datos del transistor. Sin duda que los parámetros más importantes son la  $I_C$  máxima y el voltaje  $V_{CE}$  máximo. Para el transistor de la figura 9,  $I_{Cmáx}$  es de 25mA y  $V_{CEmáx}$  es de 20V. La línea vertical punteada, definida como  $V_{CEsat}$  especifica la  $V_{CE}$  mínima que se puede aplicar sin caer en la región no lineal, llamada región de saturación. El nivel de  $V_{CEsat}$  se encuentra normalmente entre 0,1V y 0,3V en los transistores de pequeña señal. El nivel máximo de disipación lo define la siguiente ecuación:

$$P_{Cmáx.} = V_{CE} \cdot I_C$$

Para el transistor de la figura 9, podemos suponer una potencia de colector máxima de 160mW, es decir que:

$$P_{Cmáx.} = V_{CE} \cdot I_C = 160mW$$

Esto significa que para cualquier punto sobre la curva de máxima disipación de potencia, el producto de  $V_{CE}$  por  $I_C$  debe ser igual a 160mW. Si decidimos que  $I_C$  tome el valor máximo, es decir 25mA, utilizando la relación anterior obtenemos el valor de  $V_{CE}$ :

$$V_{CE} = \frac{P_{Cmáx.}}{I_{Cmáx.}} = \frac{160mW}{25mA} = 6,4V$$

Si ahora decidimos que  $V_{CE}$  tome su valor máximo, es decir 20V, el valor de  $I_C$  será el siguiente:

$$I_C = \frac{P_{Cmáx.}}{V_{CEmáx.}} = \frac{160mW}{20V} = 8mA$$

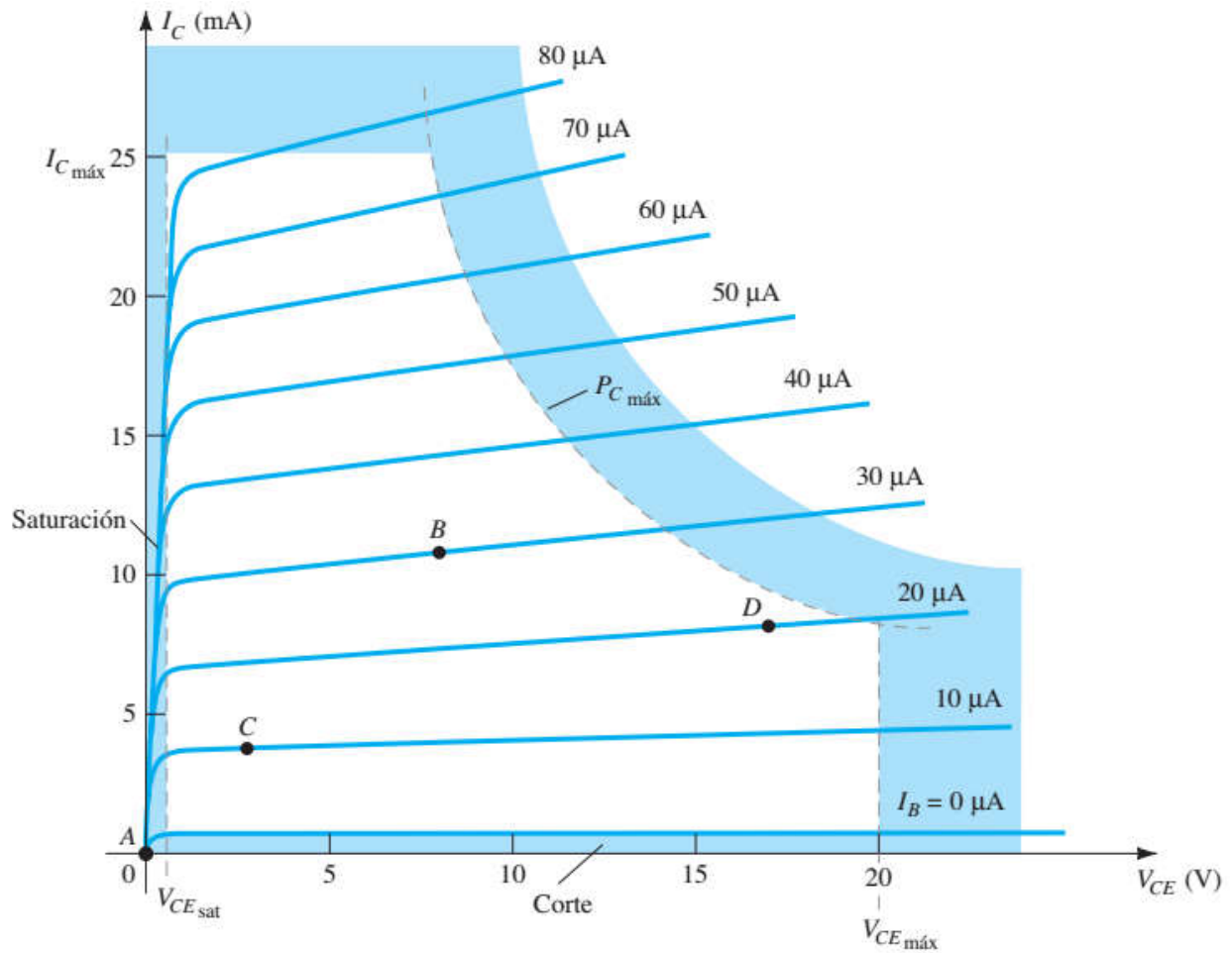
La región de corte se define como aquella que está debajo de  $I_C = I_{CEO}$ , y la cual también hay que evitar para que la señal de salida tenga una distorsión mínima. En algunas hojas de datos sólo se da  $I_{CBO}$ . Entonces hay que utilizar la ecuación  $I_{CEO} = \beta \cdot I_{CBO}$  para tener una aproximación del nivel de corte, si no se dispone de las curvas características.

Si las curvas características no están disponibles o no aparecen en la hoja de datos (como suele suceder), basta con asegurarse de que  $I_C$ ,  $V_{CE}$  y su producto queden comprendidos en el intervalo siguiente:

$$I_{CEO} \leq I_C \leq I_{Cmáx.}$$

$$V_{CEsat} \leq V_{CE} \leq V_{CEmáx.}$$

$$V_{CE} \cdot I_C \leq P_{Cmáx.}$$



**Figura 9.-** Definición de la región de operación lineal (sin distorsión).

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Robert L. Boylestad y Louis Nashelsky. "Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos". Décima edición. Pearson Educación. México 2009.
2. Angel D. Tremosa. "Electrónica del Estado Sólido". Segunda Edición. Ediciones Marymar. Buenos Aires 1980.