

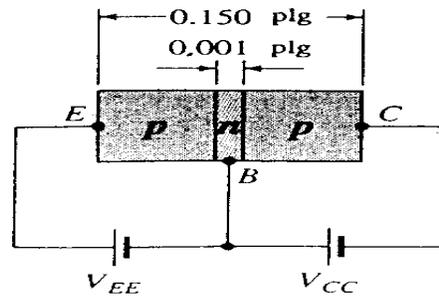
TRANSISTORES DE UNION BIPOLAR

CONSTRUCCION DEL TRANSISTOR

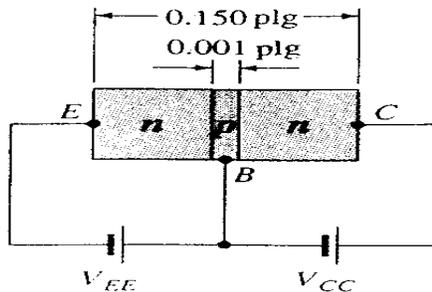
El transistor es un dispositivo semiconductor de tres capas, compuesto ya sea de dos capas de material tipo *n* y una de tipo *p* o dos capas de material tipo *p* y una de tipo *n*. El primero se denomina transistor *npn*, en tanto que el último recibe el nombre de transistor *pnp*.

Las capas exteriores del transistor son materiales semiconductores con altos niveles de dopado, y que tienen anchos mucho mayores que los correspondientes al material emparedado de tipo *p* o *n*. La relación entre el ancho total y el de la capa central es de $0.150/0.001 = 150:1$. El dopado de la capa emparedada es también considerablemente menor que el de las capas exteriores (por lo general de 10:1 o menos). Este menor nivel de dopado reduce la conductividad (incrementa la resistencia) de la base al limitar el número de portadores “libres”.

En la polarización que se muestra en la Figura 1, las terminales se han indicado mediante letras mayúsculas, E para el emisor, C para el colector y B para la base.



(a)



(b)

Figura 1 Tipos de transistores (a) *pnp* (b) *npn*.

OPERACIÓN DEL TRANSISTOR

La operación básica del transistor se describirá ahora empleando el transistor *pnp* de la Figura 1(a). La operación del transistor *npn* es exactamente igual si se intercambian los papeles que desempeñan los electrones y los huecos. En la Figura 2 se han redibujado el transistor *pnp* sin la polarización base a colector. Nótese las similitudes entre esta situación y la del diodo polarizado directamente. En ancho de la región de agotamiento se ha reducido debido a la polarización aplicada, lo que produce un denso flujo de portadores mayoritarios del material tipo *p* al tipo *n*.

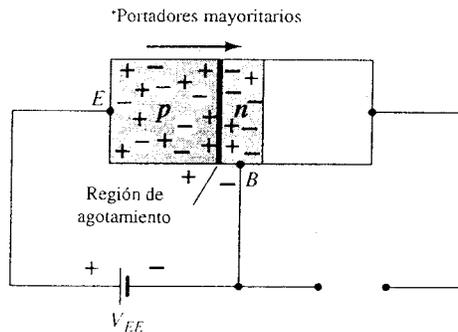


Figura 2. Unión polarizada directamente de un transistor *pnp*.

Eliminaremos ahora la polarización base a emisor del transistor *pnp* de la Figura 1 (a) como se indica en la Figura 3. Considérense las similitudes entre esta situación y la del diodo polarizado inversamente. Recuerdese que el flujo de portadores mayoritarios es cero, por lo que sólo se presenta un flujo de portadores minoritarios, como se muestra en la Figura 3. En resumen, por tanto:

Una unión *p-n* de un transistor está polarizado inversamente, en tanto que la otra presenta polarización directamente.

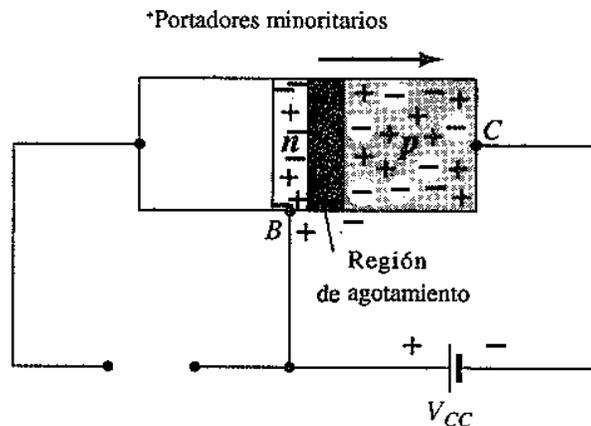


Figura 3. Unión polarizada inversamente de un transistor *pnp*.

En la Figura 4 ambos potenciales de polarización se han aplicado a un transistor *pnp*, con un flujo de portadores mayoritario y minoritario que se indica. Nótese los anchos de las regiones de agotamiento, que indican con toda claridad qué unión está polarizada directamente y cuál inversamente. Un gran número de portadores mayoritarios se difundirán a través de la unión *p-n* polarizada directamente dentro del material tipo *n*. La pregunta es entonces si estos portadores contribuirán en forma directa a la corriente de base I_B o pasarán directamente hacia el material tipo *p*. Puesto que el material tipo *n* emparedado es sumamente delgado y tiene una baja conductividad, un número muy pequeño de estos portadores seguirá la trayectoria de alta resistencia hacia la terminal de la base. La magnitud de la corriente de base es por lo general del orden de microamperes en comparación con los miliamperes de las corrientes del emisor y del colector. El mayor número de estos portadores mayoritarios se difundirá a través de la unión polarizada inversamente dentro del material tipo *p* conectado a la terminal del colector, como se indica en la Figura 4. La causa de la relativa facilidad con la que los portadores mayoritarios pueden cruzar la unión polarizada inversamente puede comprenderse si consideramos que para el diodo polarizado en forma inversa, los portadores mayoritarios inyectados aparecerán como portadores minoritarios en el material tipo *n*. En otras palabras, ha habido una inyección de portadores minoritarios al interior del material de la región base de tipo *n*. Combinando esto con el hecho de que todos los portadores minoritarios en la región de agotamiento cruzarán la unión polarizada inversamente, se explica el flujo que se indica en la Figura 4.

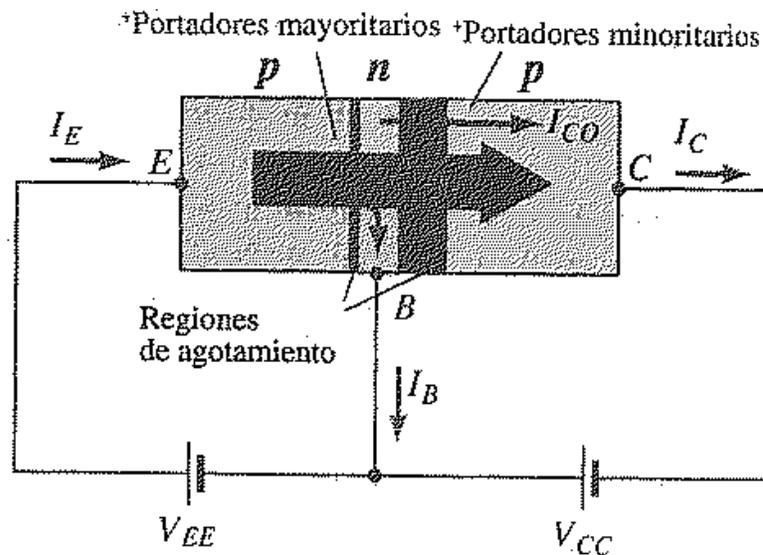


Figura 4 Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios de un transistor *pnp*.

Aplicando la ley de corriente de Kirchhoff al transistor de la Figura 4 como si fuera un solo nodo, obtenemos:

$$I_E = I_C + I_B$$

CONFIGURACION DE EMISOR COMUN

La configuración de transistores que se encuentra con mayor frecuencia se puede observar para los transistores *pnp* y *nnp*. Se denomina configuración de emisor común por que el emisor es común tanto a las terminales de entrada como a las de salida (en este caso, es también común a las terminales de la base y del colector). Se necesitan dos conjuntos de características para describir en forma completa el comportamiento de la configuración de emisor común: una para la entrada o circuito de la base y una para la salida o circuito del colector. Ambas se muestran en la Figura 5. Las corrientes del emisor, colector y base se muestran en su dirección de corriente convencional.

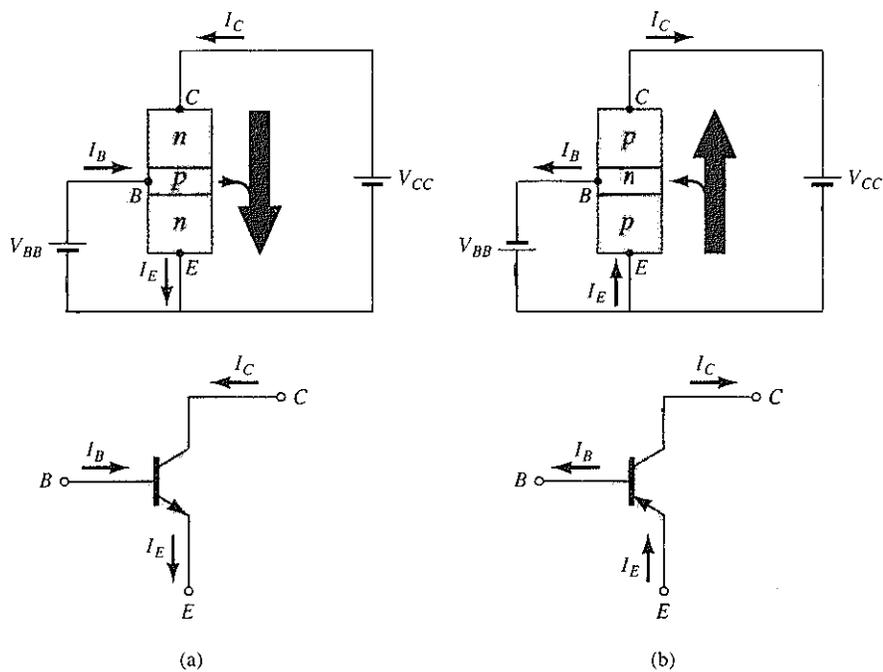


Figura 5 Configuración emisor común para transistores (a) npn (b) pnp.

En la configuración de emisor común las características de la salida serán una gráfica de la corriente de salida (I_C) versus el voltaje de salida (V_{CE}) para un rango de valores de la corriente de entrada (I_B). Las características de la entrada son una gráfica de la corriente de entrada (I_B) versus el voltaje de entrada (V_{BE}) para un rango de valores del voltaje de salida (V_{CE}).

Obsérvese que en las características de la Figura 6, la magnitud de I_B es del orden de microamperes comparada con los miliamperes de I_C . Nótese también que las curvas de I_B no son tan horizontales, lo que indica que el voltaje de colector a emisor afectará la magnitud de la corriente de colector.

La región activa en la configuración de emisor común es aquella parte del cuadrante superior derecho que tiene la linealidad mayor, esto es, la región en la que las curvas correspondientes a I_B son casi líneas rectas y se encuentran igualmente espaciadas. En la Figura 6 a esta región se localiza a la derecha de la línea sombreada vertical en V_{CEsat} y por

encima de la curva para I_B igual a cero. La región a la izquierda de V_{CEsat} se denomina región de saturación, y la región por debajo de $I_B = 0$ se le denomina región de corte.

En la región activa de un amplificador emisor común la unión colector-base está polarizada inversamente, en tanto que la unión base-emisor está polarizada directamente.

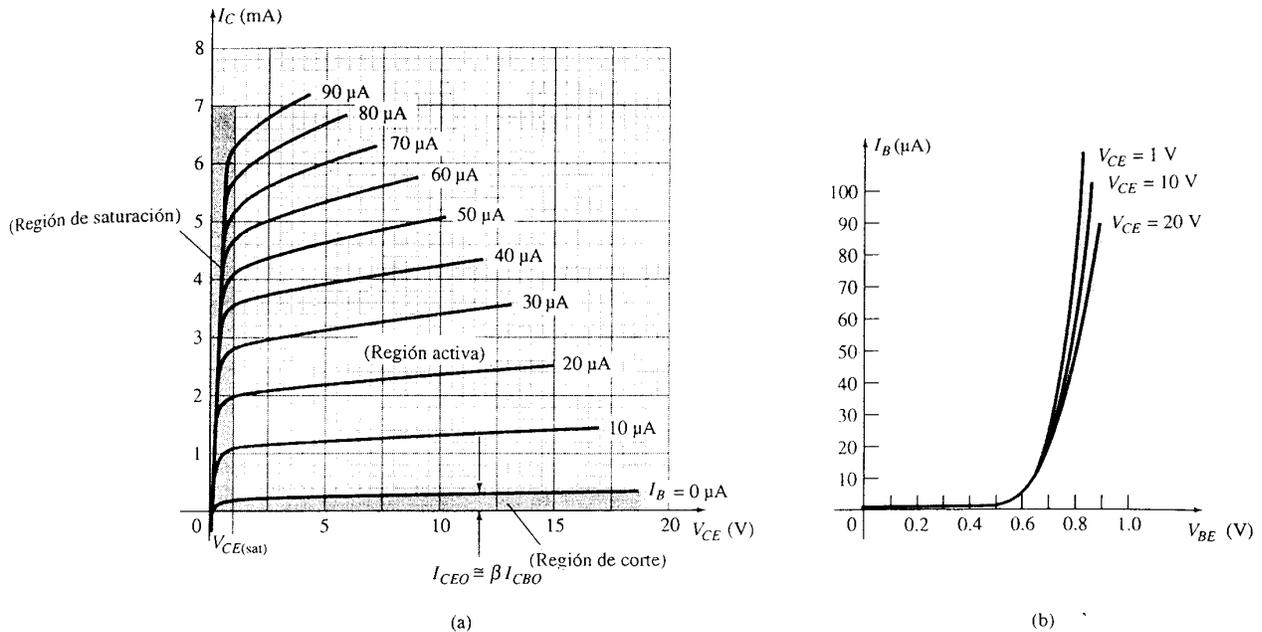


Figura 6 Características de un transistor de silicio en la configuración de emisor común (a) características de colector (b) características de base.

La región activa de la configuración de emisor común puede emplearse en la amplificación de voltaje, corriente o potencia. Cuando se emplea como interruptor en la circuitería lógica de una computadora, un transistor tendrá dos puntos de operación de interés: uno en la región de corte y el otro en la región de saturación.

BETA (β)

En el modo de cd los niveles de I_C e I_B se relacionan por una cantidad denominada beta y definida por la siguiente ecuación:

$$\beta_{cd} = \frac{I_C}{I_B}$$

Donde I_C e I_B se determinan por un punto de operación particular sobre las características. Para dispositivos prácticos el nivel de β fluctúa típicamente desde cerca de 50 hasta más de 400, con la mayor parte localizada en la mitad del intervalo. En las hojas de especificación β_{cd} se incluye por lo general como h_{FE} con la "h" derivada de un circuito equivalente híbrido.

Para situaciones de ca se ha definido una beta de ca como se muestra a continuación:

$$\beta_{ca} = \Delta I_C / \Delta I_B \quad \left| \quad V_{CE} = \text{constante} \right.$$

El nombre formal para β_{ca} es factor de amplificación de corriente directa de emisor común. Puesto que la corriente de colector es por lo general la corriente de salida para una configuración de emisor común y la corriente de base es la corriente de entrada, el término amplificación se incluye en la nomenclatura anterior. En la figura 7 tenemos la forma en que se marcan las curvas características para obtener los datos para calcular el valor de β_{ca} .

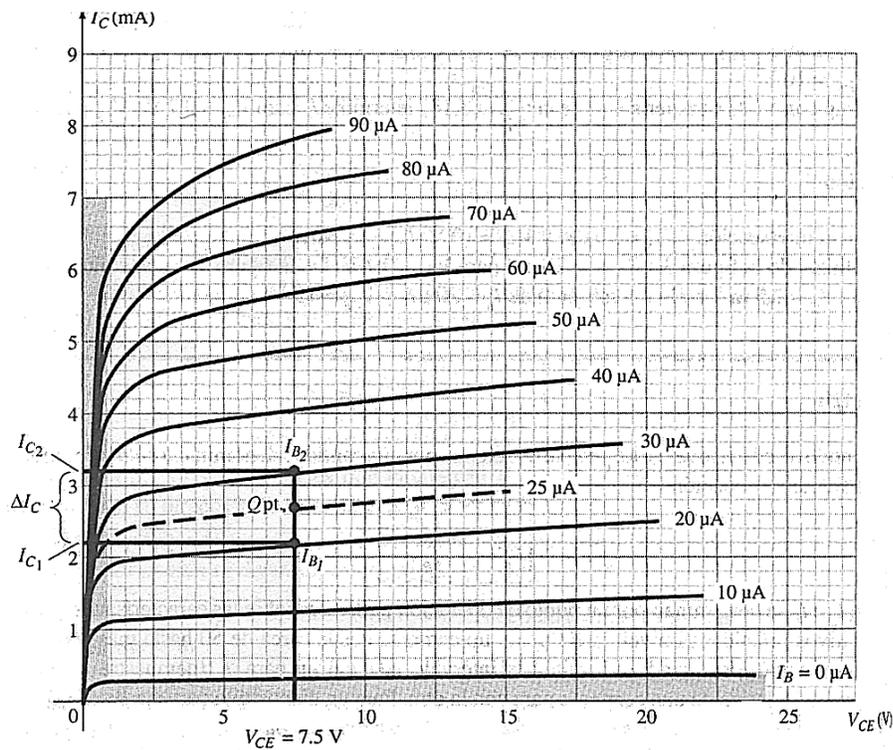


Figura 7 Cuevas características para obtener los datos para β_{ca} .

LIMITES DE OPERACION

Para cada transistor existe una región de operación sobre las características, la cual asegurara que los valores nominales máximos no sean excedidos y la señal de salida exhibe una distorsión mínima, en la figura 8 se muestran unas curvas donde se marcan los limites de operación.

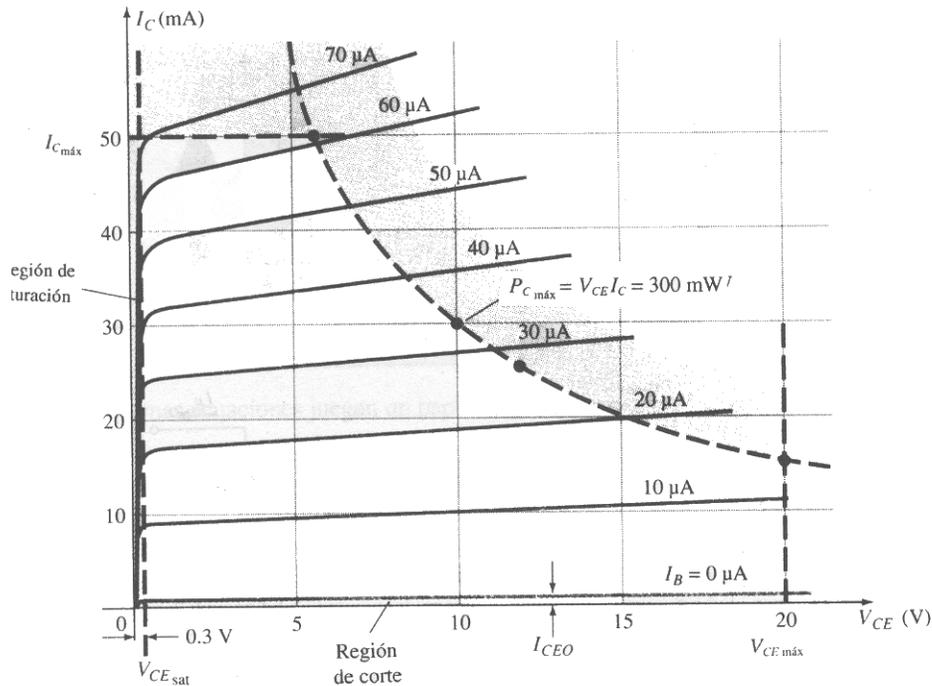


Figura 8 Límites de operación de un transistor común.

Algunos de los límites se explican por sí mismos, como la corriente máxima de colector y el voltaje máximo colector a emisor. La línea vertical de las características definida como V_{CEsat} Especifica el valor mínimo que puede aplicarse sin caer en la región no lineal denominada región de saturación.

El máximo nivel de disipación (potencia) se define por la siguiente ecuación:

$$P_c = V_{CE} I_c$$

POLARIZACION DE CD: BJT

INTRODUCCION

Debido a que los transistores tanto el *nnp* como el *pnp* no son capaces de manejar las dos polaridades de alimentación (el *nnp* regularmente trabaja con voltaje positivo y el *pnp* con negativo (se nota en las curvas características)), se requiere un método para salvar el problema, esto se logra con la llamada **polarización** la cual consta de sumar a la señal de entrada una componente constante para así lograr que la señal que entra al transistor tenga una sola polaridad (la adecuada según el tipo de transistor). Aunque se analizan diversas redes, existe una similitud fundamental en el análisis de cada configuración, debida al uso recurrente de las siguientes relaciones básicas importantes para un transistor:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \cong I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

PUNTO DE OPERACION

El término polarización es un vocablo que incluye todo lo referente a la aplicación de voltajes de cd para establecer un nivel fijo de corriente y voltaje. Para amplificadores de transistor, el voltaje y la corriente de cd resultantes establecen un punto de operación sobre las características, el cual define la región que se empleará para la amplificación de la señal aplicada. Ya que el punto de operación es un punto fijo sobre las características, se le conoce también como punto quiescente. Por definición, quiescente significa quieto, inmóvil, inactivo. La Figura 9 muestra una característica general de salida de un dispositivo con cuatro puntos de operación indicados. El circuito de polarización puede diseñarse para establecer la operación del dispositivo en cualquiera de estos puntos o en otros dentro de la región activa.

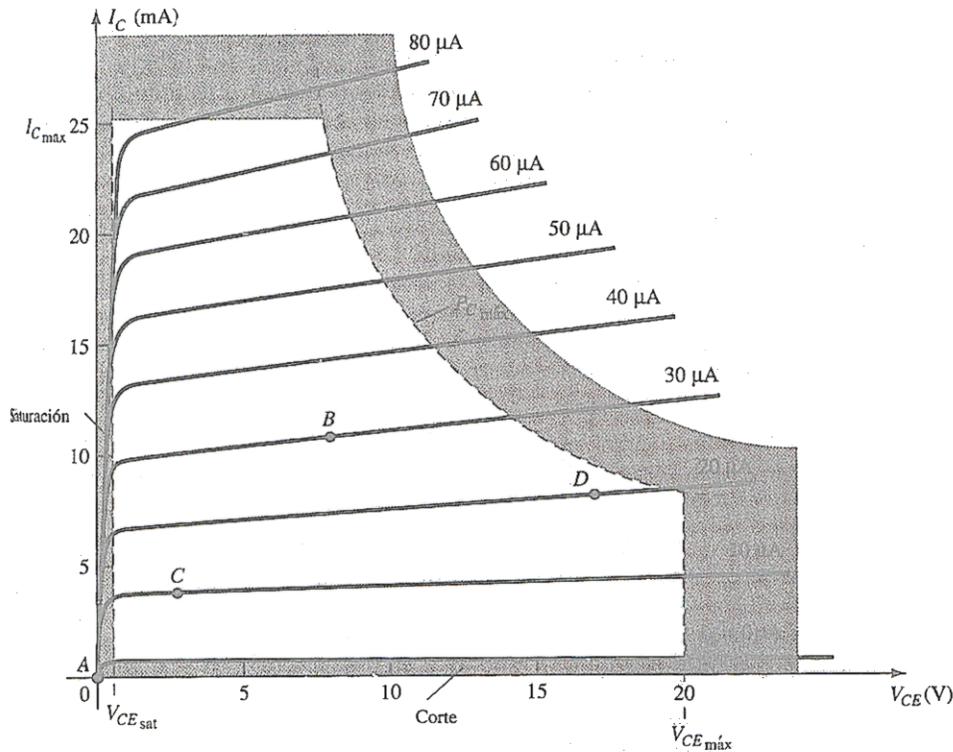


Figura 9 Diversos puntos de operación dentro de los límites de operación de un transistor.

Concentrándonos en la región activa es posible elegir muchos puntos de operación diferentes. El punto Q depende a menudo del uso que se dará al circuito. Si no se utilizara la polarización, el dispositivo estaría al principio totalmente cortado (desactivado), lo cual produciría la A, esto es, corriente cero a través del dispositivo (y voltaje cero a través del mismo). Es necesario polarizar el dispositivo de modo que pueda responder o cambiar sus

valores de corriente y voltaje en todo el intervalo de una señal de entrada. En tanto que el punto A no resultará apropiado, el punto B proporciona esta operación deseada. Si se aplica una señal al circuito, además del nivel de polarización, el dispositivo variará sus valores de corriente y voltaje a partir del punto de operación B, lo que permite que el dispositivo reaccione (y posiblemente amplifique) tanto la parte positiva como la parte negativa de la señal de entrada. Si, como podría suceder, la señal de entrada es pequeña, el voltaje y la corriente del dispositivo variarán, pero no lo suficiente para llevarlo al nivel de corte o saturación. El punto C permitiría cierta variación positiva y negativa de la señal de salida, pero el valor pico a pico sería limitado por la proximidad de $V_{CE} = 0 \text{ V} / I_C = 0 \text{ mA}$. La operación en el punto C también tiene algo que ver con las no linealidades introducidas por el hecho de que el espacio entre las curvas I_B cambia rápidamente en esta región. En general, es preferible operar donde la ganancia del dispositivo es más constante (o lineal), de tal modo que la cantidad de amplificación en toda la excursión de la señal de entrada es la misma. En punto B es una región de espaciado más lineal y, su operación tiene un mayor grado de linealidad.

Para el BJT que se polarizará en su región de operación lineal activa debe cumplirse:

1. La unión de base a emisor debe estar polarizada directamente (voltaje de la región p más positivo) con un voltaje resultante de polarización directa entre la base y el emisor de aproximadamente 0.6 a 0.7 V mínimo.
2. La unión de base a colector debe estar polarizada inversamente (región n más positiva), estando el voltaje de polarización inversa en cualquier valor dentro de los límites máximos del dispositivo.

La operación en las regiones de corte, de saturación y lineal de las características del BJT se obtienen de acuerdo con lo siguiente:

1. Operación en la región **activa**:
Unión base-emisor con polarización directa.
Unión base-colector con polarización inversa.
2. Operación en la región de **corte**:
Unión base-emisor con la polarización inversa.
3. Operación en la región de **saturación**:
Unión base-emisor con polarización directa.
Unión base-colector con polarización directa.

CIRCUITO DE POLARIZACION FIJA

El circuito de polarización fija como el mostrado en la figura 10, proporciona una introducción relativamente directa y simple al análisis de polarización de cd de transistor. Aun cuando la red emplea un transistor nnp , las ecuaciones y cálculos se aplican en forma correcta por igual a una configuración pnp con sólo cambiar todas las direcciones de corriente y polaridades de voltaje.

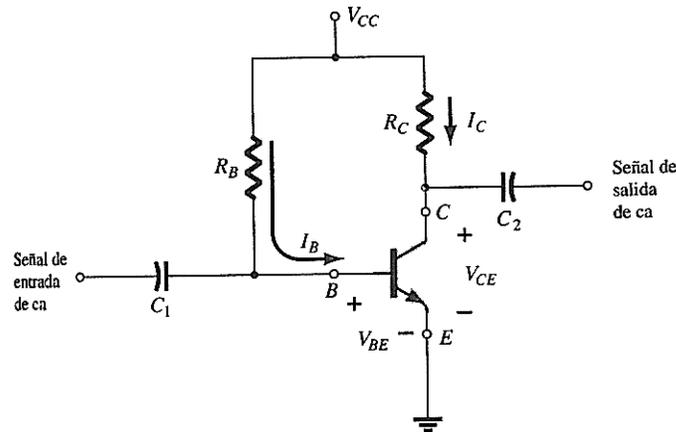


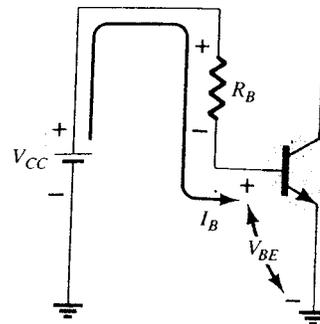
Figura 10 circuito de polarización fija para transistor común

Polarización directa de base-emisor

Considérese primero la malla circuito base-emisor que se muestra en el diagrama de circuito parcial de la Figura 11. Escribiendo la ecuación de voltaje de Kirchhoff obtenemos

$$+ V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Figura 11 Malla de base-emisor.



Nótese la polaridad de la caída de voltaje a través de R_B , como se establece por la dirección indicada de I_B . Resolviendo la ecuación para la corriente I_B se tendrá el siguiente resultado:

$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_B}$$

Malla de colector-emisor

La sección de colector-emisor de la red aparece en la Figura 12 con la dirección indicada de la corriente I_C y la polaridad resultante a través de R_C . La magnitud de la corriente de colector se relaciona directamente con I_B por medio de:

$$I_C = \beta I_B$$

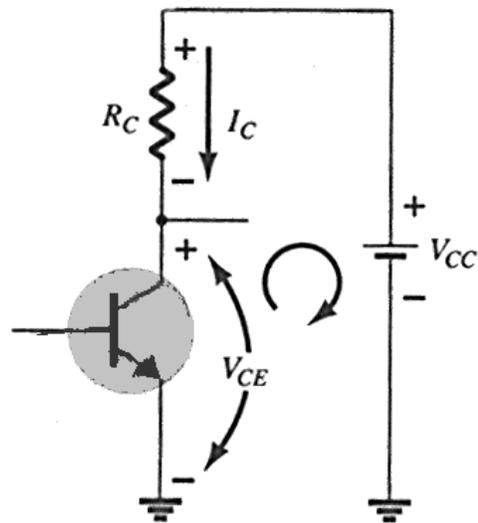


Figura 12 Malla de colector-emisor.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchoff en la dirección de las manecillas del reloj a lo largo de la malla indicada en la Figura 12, se obtendrá el resultado siguiente:

$$V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

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

Análisis por recta de carga

Hasta aquí, el análisis se ha realizado haciendo uso de un nivel de β correspondiente con el punto Q resultante. Ahora investigaremos cómo los parámetros de la red definen el posible rango de puntos Q y cómo se determina el punto Q real. La red de la Figura 13(a) establece una ecuación para la salida que relaciona las variables I_C y V_{CE} de la siguiente manera:

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

Las características de salida del transistor también relacionan las mismas dos variables I_C y V_{CE} , como se ilustra en la Figura 13(b).

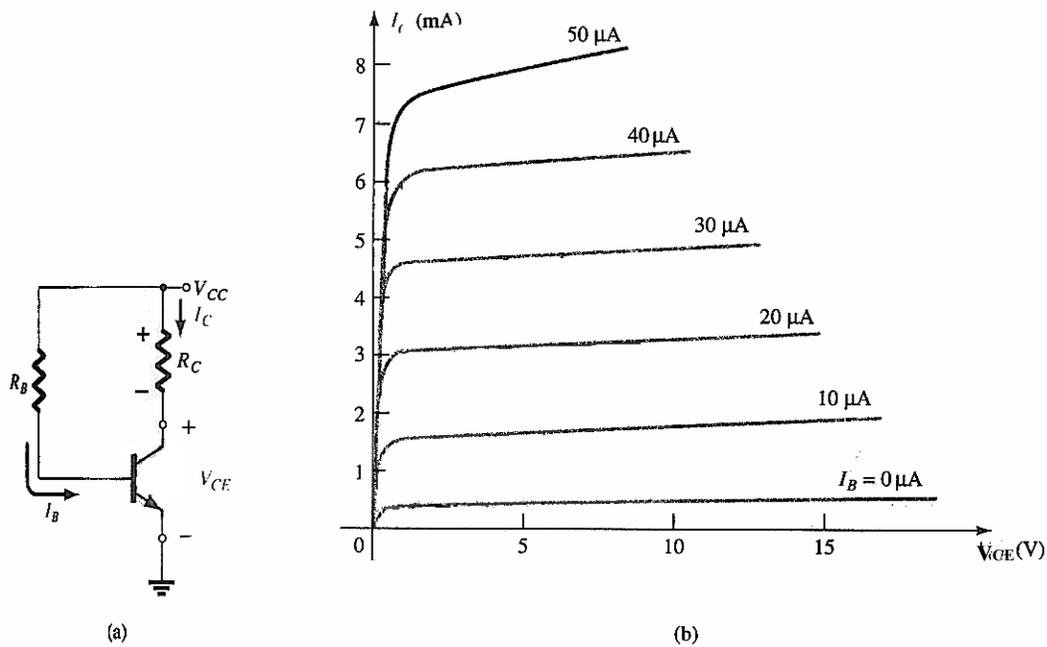


Figura 13 Análisis de recta de carga (a) la red (b) las características del dispositivo.

Las características del dispositivo de I_C contra V_{CE} se proporcionan en la Figura 13(b). Ahora debemos sobreponer la línea recta definida por la ecuación siguiente sobre las características. El método más directo para trazar la ecuación sobre las características de salida es empleando el hecho de que una recta está definida por dos puntos. Si elegimos I_C con un valor de 0 mA, estaremos especificando el eje horizontal como la línea sobre la cual se localizará un punto. Al sustituir $I_C = 0$ mA en la ecuación, encontraremos que:

$$V_{CE} = V_{CC} - (0) R_C$$

y

$$V_{CE} = V_{CC} \Big|_{I_C = 0}$$

Definiendo un punto para la línea recta.

Si ahora escogemos el valor de 0 V para V_{CE} :

$$0 = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \Big|_{V_{CE} = 0}$$

Al unir los dos puntos definidos por las ecuaciones puede dibujarse la línea recta establecida por la ecuación. La línea resultante sobre la gráfica de la Figura 14 se denomina recta de carga, el nivel resultante de I_B , el punto Q real se puede establecer como se ilustra en la Figura 14.

Si el nivel de I_B se modifica al variar el valor de R_B , el punto Q se mueve hacia arriba o hacia debajo de la recta de carga.

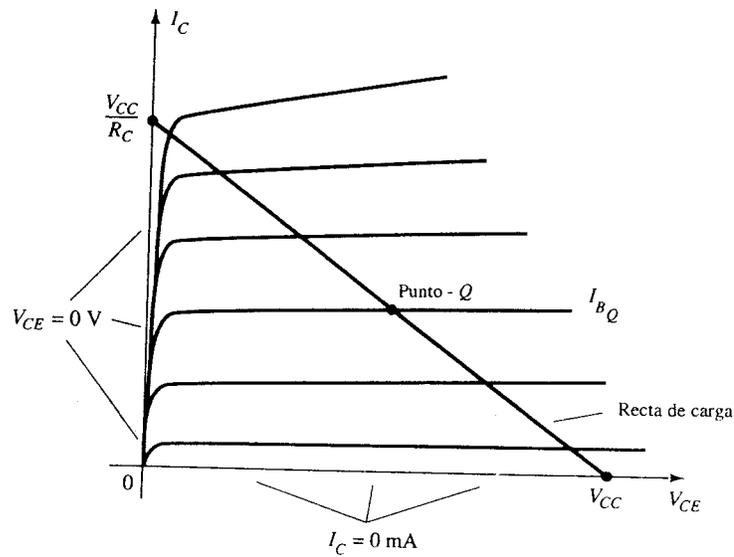
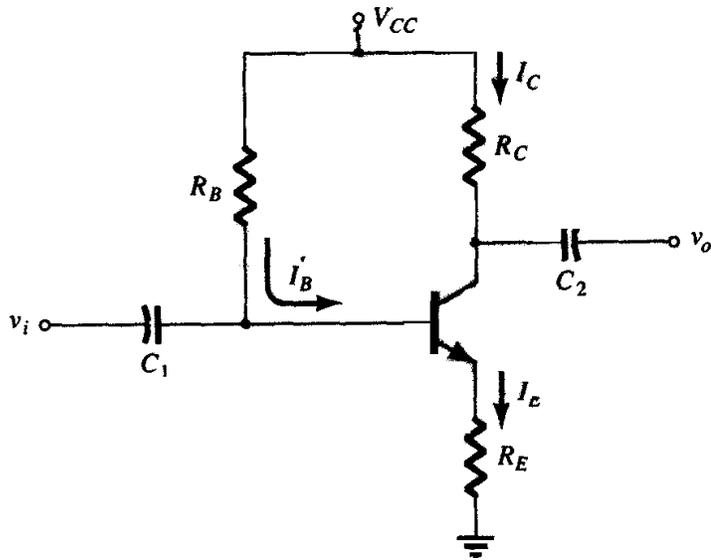


Figura 14. Recta de carga de polarización fija.

Al haber estudiado como se traza la recta de carga, ahora podemos hacer cálculos en circuitos. Regularmente lo que calculamos es el valor de las resistencias del circuito, para esto suponemos el valor de V_{CC} (de acuerdo a la fuente de voltaje que tenemos) y definimos la corriente de colector máxima deseada, también escogemos el punto Q que nos convenga (generalmente en el centro de la región activa, esto es para máximo swing simétrico). Ya echo lo anterior aplicamos las ecuaciones correspondientes y obtenemos el valor de las resistencias. Debemos notar que al tomar decisiones de valores para los cálculos podemos lograr un sin número de rectas de carga.

CIRCUITO DE POLARIZACION ESTABILIZADA POR EMISOR

La red de polarización de cd de la Figura 15 contiene un resistor en el emisor para mejorar el nivel de estabilidad sobre el de la configuración de polarización fija. El análisis se realizará examinando, en primer lugar, la malla de base a emisor y luego, con los resultados, se investigará la malla de colector a emisor.



**Figura 15 Circuito de polarización BJT con resistor de emisor.
Malla de base-emisor**

La malla de base a emisor de la red de la Figura 15 se puede volver a dibujar, como se ilustra en la Figura 16. Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla indicada en dirección de las manecillas del reloj, obtendremos como resultado la siguiente ecuación:

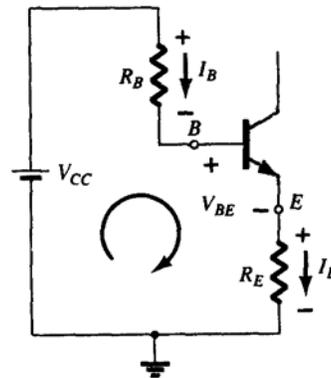
$$+ V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

y resolviendo I_B llegamos a:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)}$$

Figura 16 Malla de base-emisor.



Malla de colector-emisor

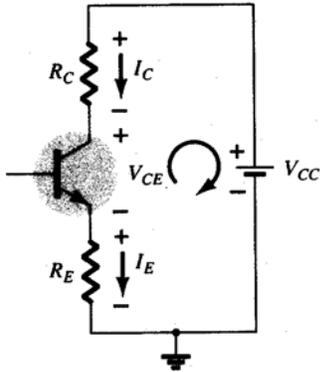


Figura 17 Malla de colector-emisor.

La malla de colector-emisor se vuelve a dibujar en la Figura 17. Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff para la malla indicada en dirección de las manecillas del reloj, resultará que:

$$+ I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

sustituyendo $I_E \cong I_C$ y agrupando términos, se obtiene:

$$V_{CE} - V_{CC} + I_C (R_C + R_E) = 0$$

y

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 0$$

El voltaje con subíndice sencillo V_E es el voltaje de emisor a tierra y se determina por:

$$V_E = I_E R_E$$

mientras que el voltaje de colector a tierra puede determinarse a partir de:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

y

$$V_C = V_{CE} + V_E$$

o

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

El voltaje en la base con respecto a tierra puede determinarse a partir de:

$$V_B = V_{CC} - I_B R_B$$

o

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

Estabilidad de polarización mejorada

La adición de la resistencia de emisor a la polarización de cd del BJT proporciona una mejor estabilidad; esto es, las corrientes y voltajes de polarización de cd se mantienen más cerca de los puntos donde fueron fijados por el circuito aun cuando cambien las condiciones externas como el voltaje de alimentación, la temperatura e incluso la beta del transistor.

Análisis de recta de carga

El análisis de recta de carga de la red de polarización de emisor es ligeramente diferente de la encontrada para la configuración de polarización fija. El nivel de I_B , define el nivel de I_B sobre las características de la Figura 18.

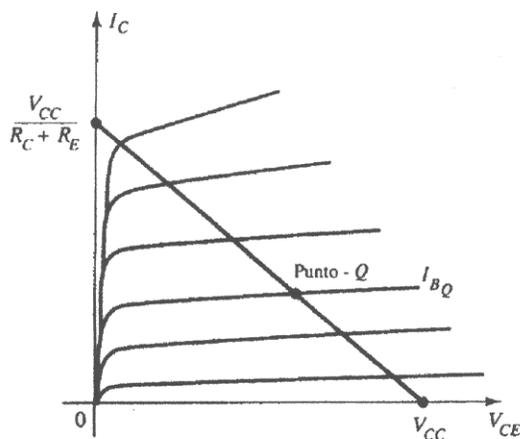


Figura 18 Recta de carga para la configuración polarizada de emisor.

La ecuación de la malla de colector-emisor que define la recta de carga es la siguiente:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Eligiendo $I_C = 0$ mA, se obtiene:

$$V_{CE} = V_{CC} \quad \left| \quad I_C = 0 \right.$$

Como se obtuvo para la configuración de polarización fija. Al seleccionar $V_{CE} = 0$ V da por resultado:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad \left| \quad V_{CE} = 0 \right.$$

Para el cálculo de las resistencias en este circuito utilizando la recta de carga, procederemos de acuerdo a lo establecido con el circuito de polarización fija, tan solo añadiremos que se recomienda que el valor de R_E sea de un valor alrededor de $1 \text{ K}\Omega$. Este circuito es mejor que el anterior porque al añadir R_E aumenta la impedancia de entrada, como se muestra en la figura 19.

Figura19 Efecto de R_E en la impedancia de entrada.

