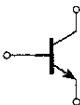


## CAPÍTULO

# 4 Polarización en dc-BJT



## 4.1 INTRODUCCIÓN

El análisis o diseño de un amplificador a transistor requiere de un conocimiento tanto para la respuesta en dc como para la respuesta en ac del sistema. Muy a menudo se asume que un transistor es un dispositivo mágico que puede elevar el nivel de una señal de entrada de ac, sin la asistencia de una fuente externa de energía. En realidad, el nivel de potencia de salida de ac mejorado es el resultado de una transferencia de energía desde las fuentes de dc aplicadas. Por tanto, el análisis o diseño de cualquier amplificador electrónico tiene dos componentes: la porción de dc y la porción de ac. Por fortuna, el teorema de la superposición puede aplicarse y la investigación de las condiciones de dc puede separarse por completo de la respuesta de ac. Sin embargo, se debe tener en cuenta que durante el estado de diseño o síntesis, la elección de los parámetros para los niveles requeridos de dc afectarán la respuesta en ac, y viceversa.

El nivel de dc de un transistor en operación es controlado por diversos factores, incluyendo el rango de puntos de operación posibles sobre las características del dispositivo. En la sección 4.2 se especifica el rango para el amplificador a BJT. Una vez definidos los niveles de voltaje y de corriente de dc, se debe construir una red que establecerá el punto de operación deseado; en este capítulo se analizan varias de estas redes. Cada diseño también determinará la estabilidad del sistema, es decir, qué tan sensible es el sistema a las variaciones de temperatura. Este aspecto también se investigará en una sección posterior del presente capítulo.

Aunque en este capítulo se analiza cierta cantidad de redes, existe una similitud fundamental entre el análisis de cada configuración debido al uso recurrente de las siguientes relaciones básicas, que son importantes para un transistor:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \approx I_C \quad (4.2)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (4.3)$$

Una vez que estén analizadas las primeras redes, la solución de las siguientes se tornará más clara. En la mayoría de los casos la corriente base  $I_B$  es la primera cantidad que debe determinarse. Una vez que  $I_B$  se conoce, las relaciones de las ecuaciones (4.1) a (4.3) pueden aplicarse para encontrar las cantidades de interés restantes. Las similitudes en el análisis serán inmediatamente obvias según vaya avanzando en este capítulo. Las ecuaciones para  $I_B$  son tan familiares para una cantidad de configuraciones que una ecuación puede derivarse de otra sólo

con eliminar o añadir uno o dos términos. La principal función de este capítulo es desarrollar un nivel de familiaridad con el transistor BJT, el cual podría permitir un análisis en dc de cualquier sistema que pueda utilizar el amplificador a BJT.

## 4.2 PUNTO DE OPERACIÓN

El término *polarización* que aparece en el título de este capítulo es un término que comprende todo lo relacionado para la aplicación de voltajes de dc, que ayudan a establecer un nivel fijo de corriente y voltaje. Para los amplificadores a transistores el voltaje y corriente de dc resultantes establecen un *punto de operación* sobre las características que definen una región que se utilizará para la amplificación de la señal aplicada. Debido a que el punto de operación es un punto fijo sobre las características, también se le llama *punto de reposo* (abreviado punto *Q*, por la sigla en inglés de, *quiescent point*). La figura 4.1 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 de otros dentro de la *región activa*. Los valores máximos están indicados en las características de la figura 4.1 mediante una línea horizontal para la corriente máxima del colector  $I_{C\max}$ , y una línea vertical cuando sea el voltaje máximo del colector-emisor  $V_{CE\max}$ . La restricción de máxima potencia se define por la curva  $P_{C\max}$  en la misma figura. En el extremo inferior de las escalas se encuentra la *región de corte*, definida por  $I_B \leq 0 \mu A$ , y la *región de saturación*, definida por  $V_{CE} \leq V_{CE\text{sat}}$ .

El dispositivo BJT puede estar en polarización para operar fuera de estos límites máximos, pero el resultado de tal operación podría ser un recorte considerable de la vida del dispositivo, o bien la destrucción del dispositivo. Cuando se confina la *región activa* pueden seleccionarse muchas áreas o puntos de operación diferentes. El punto *Q* que se elige a menudo depende del empleo del circuito. De cualquier manera, se pueden considerar algunas diferen-

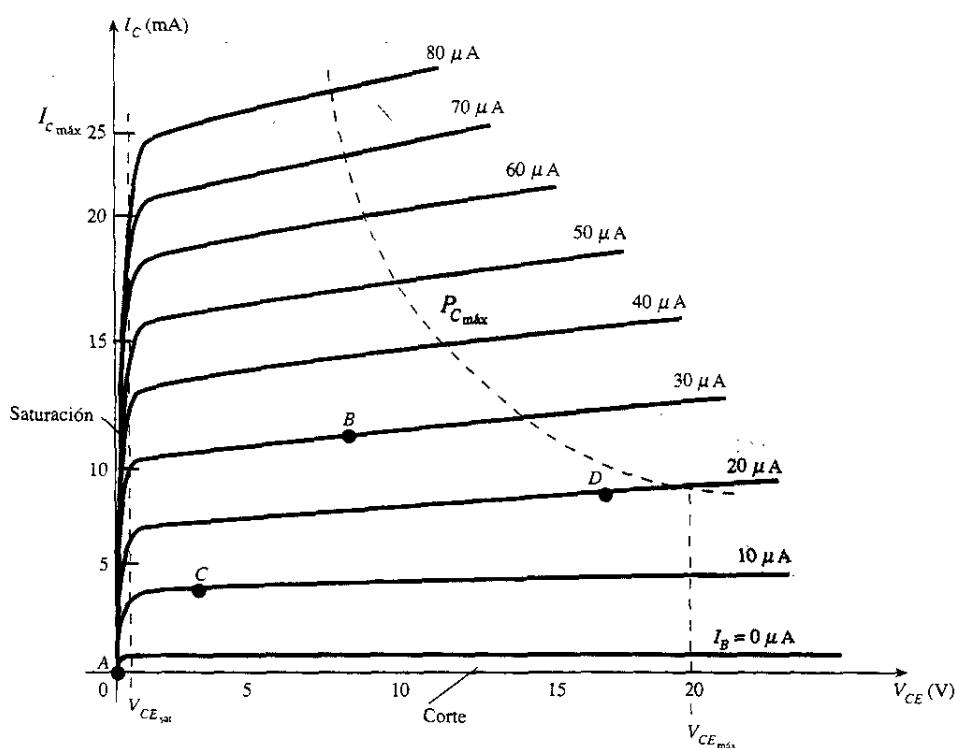


Figura 4.1 Varios puntos de operación dentro de los límites de operación de un transistor.

cias entre los diversos puntos mostrados en la figura 4.1 para presentar algunas ideas básicas acerca del punto de operación y, por tanto, del circuito de polarización.

Si no se utilizara la polarización, el dispositivo estaría al principio completamente apagado, dando por resultado un punto *Q* en *A*, es decir, cero corriente a través del dispositivo (y cero voltaje a través de él). Debido a que es necesario polarizar un dispositivo de forma que pueda responder al rango completo de la señal de entrada, el punto *A* no sería precisamente el adecuado. Para el punto *B*, si la señal se aplica al circuito, el dispositivo tendrá una variación en corriente y voltaje desde el punto de operación, permitiendo al dispositivo reaccionar (y posiblemente amplificar) tanto ante las excursiones positivas como negativas de la señal de entrada. Si la señal de entrada se elige correctamente, el voltaje y la corriente del dispositivo tendrán variación, pero no la suficiente como para llevar al dispositivo hacia el *corte* o a la *saturación*. El punto *C* permitiría cierta variación positiva y negativa de la señal de salida, pero el valor pico a pico estaría limitado por la proximidad de  $V_{CE} = 0 \text{ V}/I_C = 0 \text{ mA}$ . La operación en el punto *C* también acarrea inquietud acerca de las no linealidades presentadas por el hecho de que hay un cambio rápido en las curvas de  $I_B$  en esta región. En general, es preferible operar donde la ganancia del dispositivo es muy constante (o lineal) para asegurar que la amplificación a través de la excusión completa de la señal de entrada es la misma. El punto *B* es una región de espaciamiento más lineal y, por tanto, de operación más lineal, según se muestra en la figura 4.1. El punto *D* establece el sitio de operación del dispositivo cerca del nivel de voltaje y potencia máxima. La excusión del voltaje de salida en la dirección positiva se encuentra entonces limitada para no exceder el voltaje máximo. Por tanto, el punto *B* parece ser el mejor punto de operación en términos de ganancia lineal y la excusión más grande posible de voltaje y corriente. Ésta es por lo general la condición deseada para los amplificadores de pequeña señal (capítulo 8), pero no necesariamente es el caso para los amplificadores de potencia, los cuales serán considerados en el capítulo 16. En este análisis, nos concentraremos básicamente en la polarización del transistor para la operación de amplificación en *pequeña señal*.

Existe otro factor para la polarización muy importante que todavía debemos considerar. Una vez que seleccionamos y polarizamos el BJT en un punto de operación, también debe tomarse en cuenta el efecto de la temperatura. Este factor ocasiona que cambien los parámetros, como la ganancia en corriente del transistor ( $\beta_{ac}$ ) y la corriente de fuga del transistor ( $I_{CEO}$ ). Las mayores temperaturas dan como resultado mayores corrientes de fuga en el dispositivo, causando un cambio en la condición de operación establecida por la red de polarización. El resultado es que el diseño de la red debe ofrecer también un grado de *estabilidad en temperatura*, de tal forma que dichos cambios ocasionen la menor cantidad de modificaciones en el punto de operación. La estabilidad del punto de operación puede especificarse mediante un *factor de estabilidad S*, el cual indica el grado de cambio en el punto de operación debido a una variación en la temperatura. Es mejor un circuito de gran estabilidad; comparada con la estabilidad de varios circuitos polarizados.

Para que el BJT esté polarizado en su región lineal o de operación activa, los siguientes puntos deben resultar exactos:

1. La unión base-emisor *debe* tener una polarización directa (voltaje de la región *p* más positivo) con un voltaje de polarización directa resultante de aproximadamente 0.6 a 0.7 V.
2. La unión base-colector *debe* tener una polarización inversa (voltaje de la región *n* más positivo) con un voltaje de polarización inversa resultante de cualquier valor dentro de los límites máximos del dispositivo.

[Obsérvese que para la polarización directa el voltaje a través de la unión *p-n* es *p*-positiva, mientras que para la polarización inversa es opuesto (inverso) con *n*-positiva. Este énfasis sobre la letra inicial debe ofrecer un medio para ayudar a memorizar la polaridad necesaria de voltaje.]

La operación en las regiones de corte, saturación y lineal de las características del BJT se ofrecen de la siguiente manera:

1. *Operación en la región lineal:*  
Unión base-emisor con polarización directa  
Unión base-colector con polarización inversa

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

### 4.3 CIRCUITO DE POLARIZACIÓN FIJA

El circuito de polarización fija de la figura 4.2 ofrece una introducción relativamente directa y simple al análisis de la polarización en dc de transistores. Aunque la red utilice un transistor *npn*, las ecuaciones y los cálculos se pueden aplicar con facilidad a la configuración con transistor *pnp*, con el solo hecho de cambiar todas las direcciones de corriente y los voltajes de polarización. Las direcciones de corriente de la figura 4.2 son las reales, y los voltajes están definidos por la notación estándar de doble subíndice. Para el análisis en dc, la red debe aislarse de los niveles de ac, reemplazando los capacitores por un equivalente de circuito abierto. Más adelante, la fuente  $V_{CC}$  de dc puede separarse en dos fuentes (para propósitos de análisis solamente), como se muestra en la figura 4.3, para permitir una separación de los circuitos de entrada y de salida. También reduce la unión de las dos corrientes que fluyen hacia la base  $I_B$ . Como se observa, la separación es válida, como lo muestra la figura 4.3, donde  $V_{CC}$  está conectada directamente a  $R_B$  y  $R_C$ , justo como en la figura 4.2.

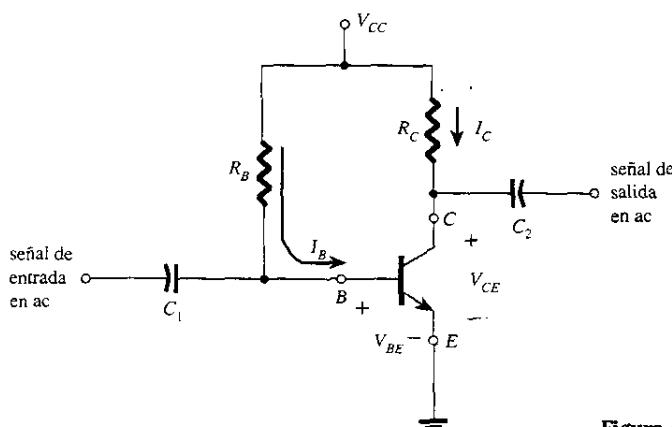


Figura 4.2 Circuito de polarización fija.

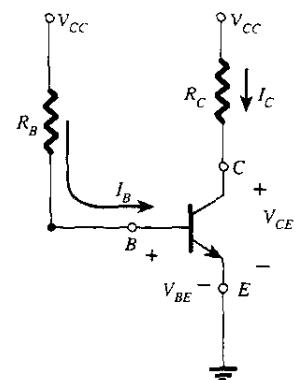


Figura 4.3 Equivalente de dc de la figura 4.2.

#### Polarización directa base-emisor

Considere primero la malla del circuito base-emisor de la figura 4.4. Cuando escribe la ecuación de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj, se obtendrá

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

Nótese la polaridad de la caída de voltaje a través de  $R_B$  establecida por la dirección indicada de  $I_B$ . Cuando se resuelve la ecuación para la corriente  $I_B$  da por resultado lo siguiente:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (4.4)$$

Es verdad que la ecuación (4.4) no es difícil de recordar si se toma en cuenta que la corriente de base es la corriente a través de  $R_B$ , y de acuerdo con la ley de Ohm dicha corriente es el voltaje a través de  $R_B$  dividido entre la resistencia  $R_B$ . El voltaje a través de  $R_B$  es el voltaje  $V_{CC}$  aplicado en un extremo menos la caída a través de la unión base-emisor ( $V_{BE}$ ). Debido a

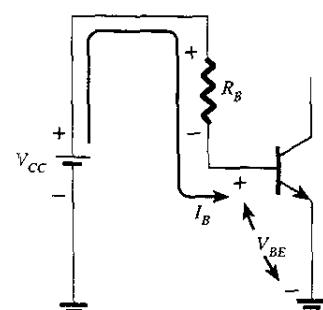


Figura 4.4 Malla base-emisor.

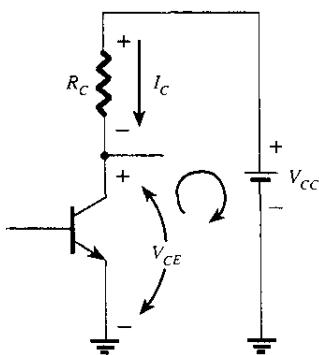


Figura 4.5 Malla colector-emisor.

que el voltaje  $V_{CC}$  y el voltaje base-emisor son constantes  $R_B$ , fija el nivel de la corriente de base para el punto de operación.

### Malla colector-emisor

La sección colector-emisor de la red aparece en la figura 4.5 con la dirección de la corriente  $I_C$  indicada y la polaridad resultante a través de  $R_C$ . La magnitud de la corriente del colector está directamente relacionada a  $I_B$  mediante

$$I_C = \beta I_B \quad (4.5)$$

Es interesante observar que debido a que la corriente de base está controlada por el nivel de  $R_B$  y que  $I_C$  está relacionada a  $I_B$  por la constante  $\beta$ , la magnitud de  $I_C$  no es una función de la resistencia  $R_C$ . El cambio de  $R_C$  hacia cualquier nivel no afectará el nivel de  $I_B$  o de  $I_C$  mientras se permanezca en la región activa del dispositivo. Sin embargo, como se verá más adelante, el nivel de  $R_C$  determinará la magnitud de  $V_{CE}$ , el cual es un parámetro importante.

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff en la dirección del sentido de las manecillas del reloj alrededor de la malla cerrada indicada en la figura 4.5 dará por resultado lo siguiente:

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

$$\text{y} \quad V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (4.6)$$

la cual establece que el voltaje a través de la región colector-emisor de un transistor en la configuración de polarización fija es el voltaje de alimentación menos la caída a través de  $R_C$ .

Como un breve repaso de la notación de subíndice sencillo y doble, recuerde que

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (4.7)$$

donde  $V_{CE}$  es el voltaje colector-emisor y  $V_C$  y  $V_E$  son los voltajes del colector y del emisor a tierra, respectivamente. Pero *en este caso*, debido a que  $V_E = 0$  V, se tiene que

$$V_{CE} = V_C \quad (4.8)$$

Además, ya que

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (4.9)$$

y que  $V_E = 0$  V, entonces

$$V_{BE} = V_B \quad (4.10)$$

Tenga presente que los niveles de voltaje como  $V_{CE}$  son determinados mediante la colocación de la punta de prueba roja (positiva) del voltímetro en la terminal del colector y la punta de prueba negra (negativa), a la terminal del emisor según se muestra en la figura 4.6.  $V_C$  es el voltaje del colector a la tierra y se mide según la misma figura. En este caso las dos lecturas son idénticas, pero en las redes que siguen las dos pueden ser muy diferentes. Comprender la diferencia entre ambas medidas puede ser muy importante para la localización de fallas en las redes de transistores.

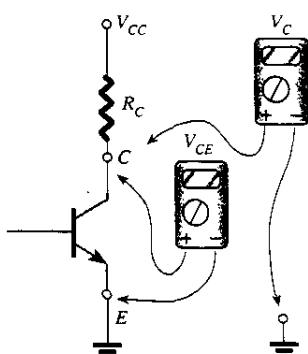


Figura 4.6 Medición de  $V_{CE}$  y  $V_C$ .

### EJEMPLO 4.1

Determinar lo siguiente para la configuración de polarización fija de la figura 4.7.

- a)  $I_{BQ}$  e  $I_{CQ}$ .
- b)  $V_{CEQ}$ .
- c)  $V_B$  y  $V_C$ .
- d)  $V_{BC}$ .

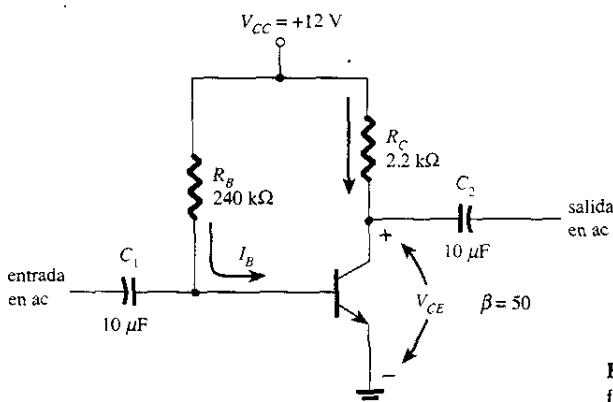


Figura 4.7 Circuito dc de polarización fija para el ejemplo 4.1.

### Solución

a) Ecuación (4.4):  $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{240 \text{ k}\Omega} = 47.08 \mu\text{A}$

Ecuación (4.5):  $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = (50)(47.08 \mu\text{A}) = 2.35 \text{ mA}$

b) Ecuación (4.6):  $V_{CEQ} = V_{CC} - I_C R_C$   
 $= 12 \text{ V} - (2.35 \text{ mA})(2.2 \text{ k}\Omega)$   
 $= 6.83 \text{ V}$

c)  $V_B = V_{BE} = 0.7 \text{ V}$

$V_C = V_{CE} = 6.83 \text{ V}$

d) La utilización de la notación del subíndice doble da por resultado

$$V_{BC} = V_B - V_C = 0.7 \text{ V} - 6.83 \text{ V} \\ = -6.13 \text{ V}$$

y el signo negativo revela que la unión tiene polarización inversa, como debe ser para la amplificación lineal.

### Saturación del transistor

El término *saturación* se aplica a cualquier sistema donde los niveles han alcanzado sus máximos valores. Una esponja saturada es aquella que no puede contener otra gota de líquido. Para un transistor que opera en la región de saturación la corriente es un valor máximo *para el diseño en particular*. El cambio en el diseño puede ocasionar que el nivel de saturación correspondiente pueda llegar a incrementarse o descender. Desde luego, el nivel más alto de saturación está definido por la corriente máxima del colector, y se proporciona en la hoja de especificaciones.

Las condiciones de saturación se evitan normalmente porque la unión base-colector ya no se encuentra con polarización inversa y la señal de salida amplificada se distorsionará. Un punto de operación en la región de saturación se describe en la figura 4.8a. Nótese que se trata de una región donde las curvas características se juntan y el voltaje colector-emisor se encuentra en o por debajo de  $V_{CE,sat}$ . Además, la corriente del colector es relativamente alta en las características.

Si se aproximan las curvas de la figura 4.8a a las que aparecen en la figura 4.8b, el método directo para determinar el nivel de saturación se torna apparente. En la figura 4.8b la corriente es más o menos alta y el voltaje  $V_{CE}$  se asume de 0 volts. Al aplicar la ley de Ohm, puede calcularse la resistencia entre las terminales del colector y las del emisor de la siguiente manera:

$$R_{CE} = \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{0 \text{ V}}{I_{C,sat}} = 0 \Omega$$

### 4.3 Circuito de polarización fija

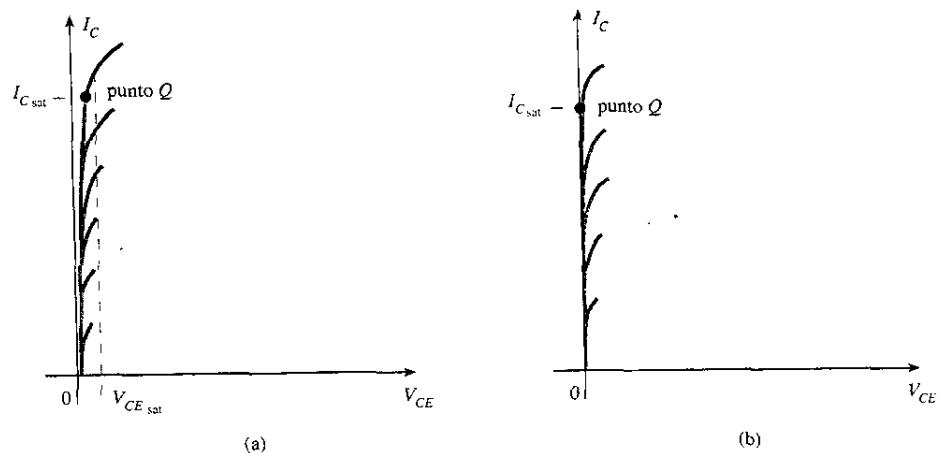


Figura 4.8 Región de saturación a) real b) aproximada.

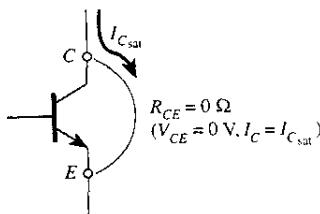


Figura 4.9 Determinación de  $I_{C_{\text{sat}}}$ .

La aplicación de los resultados al esquema de la red resultaría en la configuración de la figura 4.9.

Por tanto, y para el futuro, si existiera una necesidad inmediata de conocer la corriente máxima del colector (nivel de saturación) para un diseño en particular, sólo se inserta un equivalente de corto circuito entre el colector y el emisor del transistor y se calcula la corriente resultante del colector. En resumen, sólo haga  $V_{CE} = 0 \text{ V}$ . Para la configuración de polarización fija de la figura 4.10 el corto circuito se aplicó, causando que el voltaje a través de  $R_C$  se convierta en el voltaje aplicado  $V_{CC}$ . La corriente de saturación resultante para la configuración de polarización fija es

$$I_{C_{\text{sat}}} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (4.11)$$

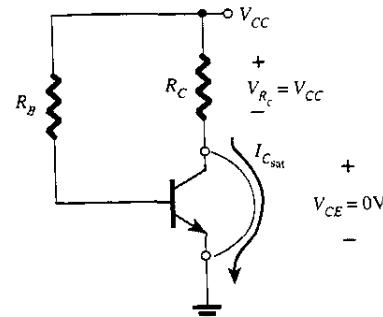


Figura 4.10 Determinación de  $I_{C_{\text{sat}}}$  para la configuración de polarización fija.

Una vez que  $I_{C_{\text{sat}}}$  se conoce puede tenerse idea de la corriente máxima posible del colector para el diseño escogido, y el nivel bajo el cual debe permanecer si se espera una amplificación lineal.

### EJEMPLO 4.2

Determine el nivel de saturación para la red de la figura 4.7.

#### Solución

$$I_{C_{\text{sat}}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} = 5.45 \text{ mA}$$

El diseño del ejemplo 4.1 dio por resultado  $I_{C_0} = 2.35 \text{ mA}$ , el cual se localiza lejos del punto de saturación y aproximadamente a la mitad del valor máximo del diseño.

## Análisis de recta de carga

El análisis hasta el momento se hizo utilizando el nivel de  $\beta$  correspondiente con el punto  $Q$  resultante. Ahora, se investigará la forma en que los parámetros de la red definen el rango posible de puntos  $Q$  y la manera en que se determina el punto  $Q$  real. La red de la figura 4.11a establece una ecuación de salida que relaciona las variables  $I_C$  y  $V_{CE}$  de la siguiente manera:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (4.12)$$

Las características de salida del transistor también relacionan las dos variables  $I_C$  y  $V_{CE}$  como se muestra en la figura 4.11b.

En esencia, se tiene una ecuación de redes y un conjunto de características que utilizan las mismas variables. La solución común de las dos sucede donde se satisfacen las restricciones establecidas por cada una de manera simultánea. Esto es similar a encontrar la solución para dos ecuaciones simultáneas: una establecida por la red y la otra por las características del dispositivo.

Las características del dispositivo de  $I_C$  en función de  $V_{CE}$  se ofrecen en la figura 4.11b. Ahora, se debe superponer la línea recta definida por la ecuación (4.12) sobre las características. El método más directo para graficar la ecuación (4.12) sobre las características de salida es mediante el hecho de que una línea recta se encuentra definida por dos puntos. Si se elige que  $I_C$  sea 0 mA, entonces se especifica el eje horizontal como la línea sobre la cual está localizado un punto. Al sustituir  $I_C = 0 \text{ mA}$  en la ecuación (4.12), se encuentra que

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

$$V_{CE} = V_{CC} \quad |_{I_C = 0 \text{ mA}} \quad (4.13)$$

definiendo un punto para la línea recta de acuerdo con la figura 4.12.

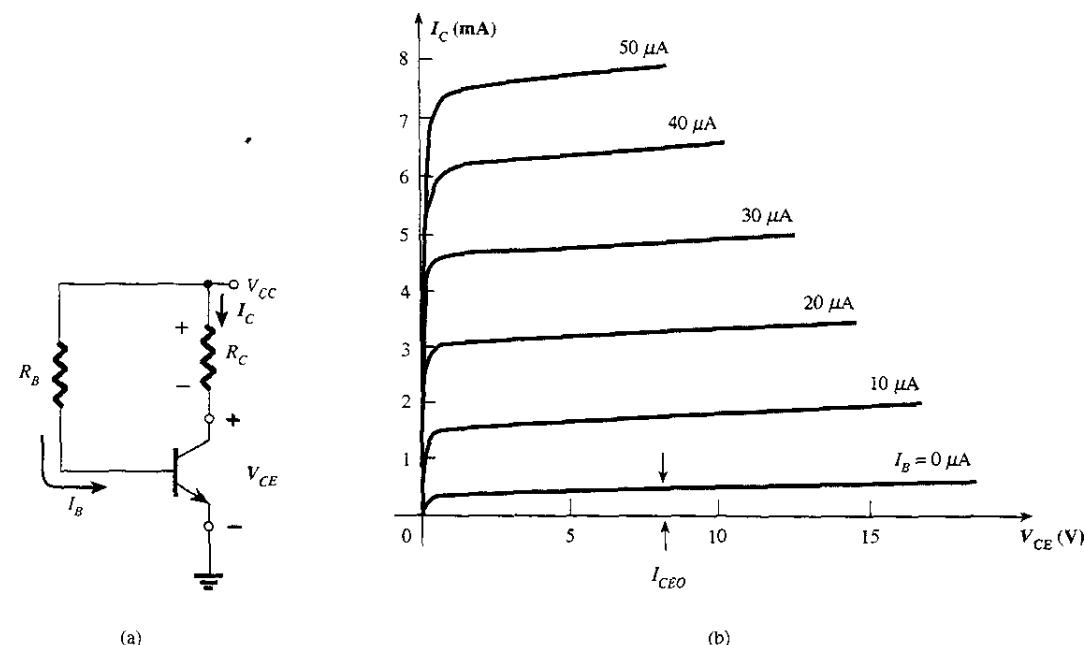


Figura 4.11 Análisis de la recta de carga a) la red b) las características del dispositivo.

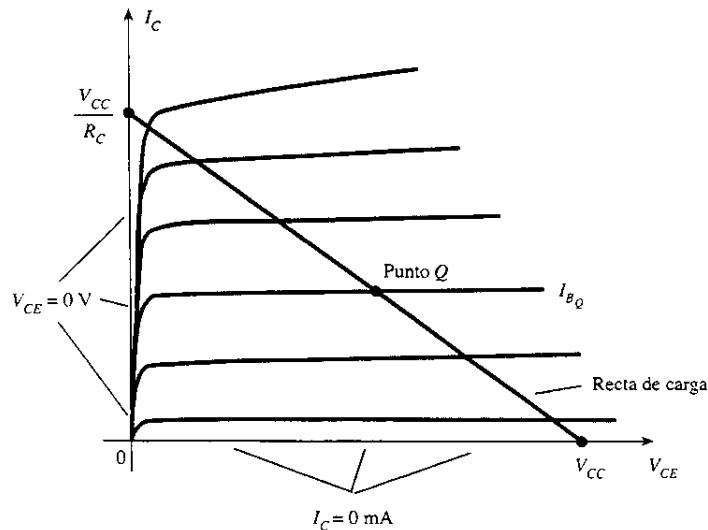


Figura 4.12 Recta de carga para polarización fija.

Ahora, si se elige que  $V_{CE}$  sea 0 V, lo que establece al eje vertical como la línea sobre la cual estará definido el segundo punto, se tiene que  $I_C$  está determinado por la siguiente ecuación:

$$0 = V_{CC} - I_C R_C \quad \text{e} \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \Big|_{V_{CE}=0 \text{ V}} \quad (4.14)$$

según aparece en la figura 4.12.

Al unir los dos puntos definidos por las ecuaciones (4.13) y (4.14), se puede dibujar la línea recta establecida por la ecuación (4.12). A la línea resultante sobre la gráfica de la figura 4.12 se le llama *recta de carga* debido a que es definida por el resistor de carga  $R_C$ . Mediante la solución para el nivel resultante de  $I_B$  puede establecerse el punto  $Q$  real que se muestra en la figura 4.12.

Si el nivel de  $I_B$  cambia al variar el valor de  $R_B$ , el punto  $Q$  se desplaza hacia arriba o hacia abajo sobre la recta de carga como se indica en la figura 4.13. Si  $V_{CC}$  se conserva fijo y se cambia  $R_C$ , la recta de carga se moverá de acuerdo con la figura 4.14. Si  $I_B$  se mantiene fijo, el punto  $Q$  se desplaza como se indica en la misma figura. Si  $R_C$  se mantiene fijo y  $V_{CC}$  varía, la recta de carga se mueve igual que en la figura 4.15.

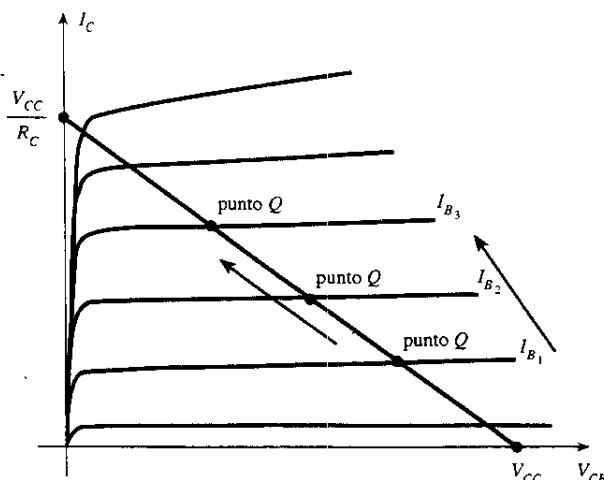


Figura 4.13 Movimiento del punto  $Q$  con niveles crecientes de  $I_B$ .

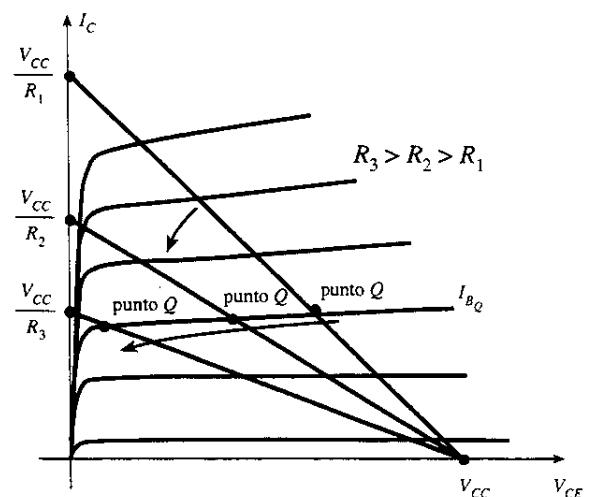
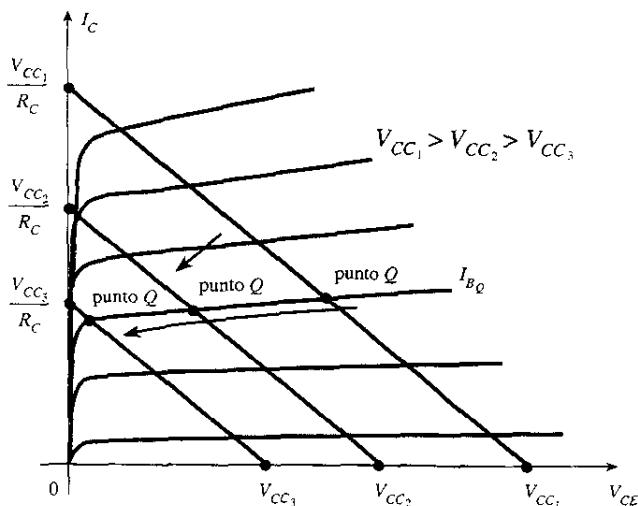


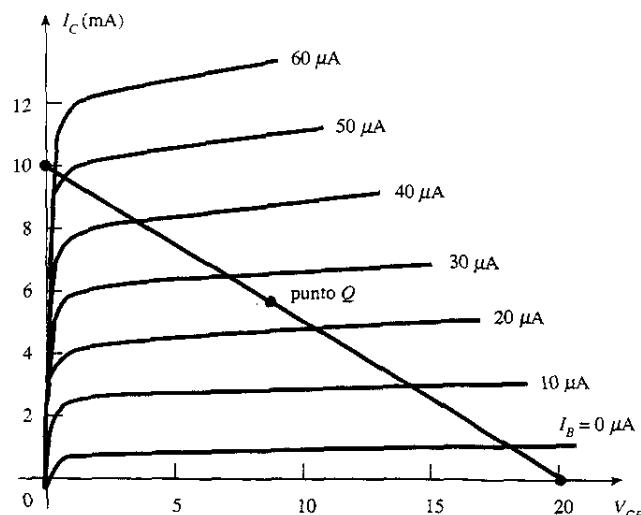
Figura 4.14 Efecto de los niveles crecientes de  $R_C$  sobre la recta de carga y el punto  $Q$ .



**Figura 4.15** Efecto de valores pequeños de  $V_{CC}$  sobre la recta de carga y el punto  $Q$ .

Dada la recta de carga de la figura 4.16 y el punto  $Q$  definido, calcule los valores requeridos de  $V_{CC}$ ,  $R_C$  y  $R_B$  para la configuración de polarización fija.

### EJEMPLO 4.3



**Figura 4.16** Ejemplo 4.3.

#### Solución

A partir de la figura 4.16

$$V_{CE} = V_{CC} = 20 \text{ V} \text{ e } I_C = 0 \text{ mA}$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \text{ y } V_{CE} = 0 \text{ V}$$

$$\text{y } R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega$$

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

$$\text{y } R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{25 \mu\text{A}} = 772 \text{ k}\Omega$$

## 4.4 CIRCUITO DE POLARIZACIÓN ESTABILIZADO EN EMISOR

La red de polarización de dc de la figura 4.17 contiene un resistor en el emisor para mejorar el nivel de estabilidad respecto al de la configuración de polarización fija. La mejor estabilidad se demostrará a través de un ejemplo numérico que veremos posteriormente en esta sección. El análisis se llevará a cabo cuando examinemos en primer lugar la malla base-emisor, y posteriormente utilizando los resultados para investigar la malla colector-emisor.

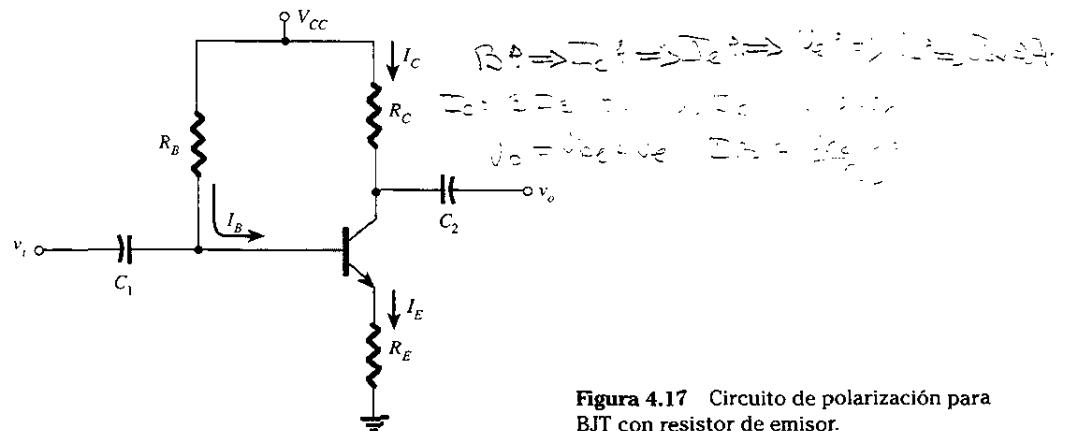


Figura 4.17 Circuito de polarización para BJT con resistor de emisor.

### Malla emisor-base

La malla emisor-base de la red de la figura 4.17 puede dibujarse de nuevo igual como se indica en la figura 4.18. La ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla indicada en el sentido de las manecillas del reloj dará por resultado la siguiente ecuación:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0 \quad (4.15)$$

Recuerde del capítulo 3 que

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad (4.16)$$

Sustituyendo por  $I_E$  en la ecuación (4.15) resultará

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_E = 0$$

La agrupación de los términos ofrecerá lo siguiente:

$$-I_B(R_B + (\beta + 1)R_E) + V_{CC} - V_{BE} = 0$$

Multiplicando por  $(-1)$  se tiene

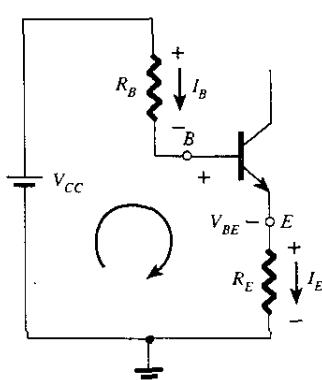
$$I_B(R_B + (\beta + 1)R_E) - V_{CC} + V_{BE} = 0$$

con

$$I_B(R_B + (\beta + 1)R_E) = V_{CC} - V_{BE}$$

y resolviendo para  $I_B$  da

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (4.17)$$



Nótese que la única diferencia entre esta ecuación para  $I_B$  y la que se obtuvo para la configuración de polarización fija es el término  $(\beta + 1)R_E$ .

Existe un resultado interesante que puede derivarse a partir de la ecuación (4.17), si la ecuación se utiliza para dibujar una red en serie que pudiera resultar en la misma ecuación, que

Figura 4.18 Malla base-emisor.

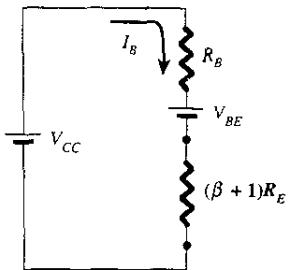


Figura 4.19 Red derivada de la ecuación (4.17).

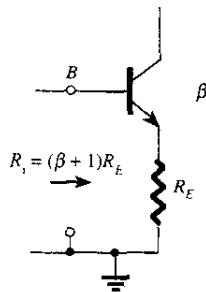


Figura 4.20 Nivel reflejado de impedancia de  $R_E$ .

es el caso de la red de la figura 4.19. La solución para la corriente  $I_B$  dará por resultado la misma ecuación obtenida. Obsérvese que además del voltaje de la base al emisor  $V_{BE}$ , el resistor  $R_E$  se refleja de regreso al circuito de entrada de la base por un factor  $(\beta + 1)$ . En otras palabras, el resistor del emisor, que forma parte de la malla colector-emisor, “aparece como”  $(\beta + 1)R_E$  en la malla de la base al emisor. Debido a que  $\beta$  es normalmente 50 o más, el resistor del emisor aparece ser mucho mayor en el circuito de la base. Por tanto, para la configuración de la figura 4.20,

$$R_i = (\beta + 1)R_E \quad (4.18)$$

La ecuación 4.18 puede ser de utilidad en el análisis que seguirá a continuación. Ofrece una forma relativamente sencilla para recordar la ecuación (4.17). Utilizando la ley de Ohm, se sabe que la corriente a través de un sistema es el voltaje dividido entre la resistencia del circuito. Para el circuito de la base al emisor, el voltaje neto es  $V_{CC} - V_{BE}$ . Los niveles de resistencia son  $R_B$  más  $R_E$  reflejado por  $(\beta + 1)$ . El resultado es la ecuación (4.17).

### Malla colector-emisor

La malla colector-emisor está dibujada de nuevo en la figura 4.21. La ley de voltaje de Kirchhoff para la malla indicada en la dirección de las manecillas del reloj dará por resultado

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

Sustituyendo  $I_E \equiv I_C$  y agrupando términos da

$$\begin{aligned} V_{CE} - V_{CC} + I_C(R_C + R_E) &= 0 \\ V_{CE} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \end{aligned} \quad (4.19)$$

El voltaje de un único subíndice  $V_E$  es el voltaje del emisor a la tierra y se determina por

$$V_E = I_E R_E \quad (4.20)$$

mientras que el voltaje del colector a la tierra puede determinarse

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

y

$$V_C = V_{CE} + V_E \quad (4.21)$$

o

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (4.22)$$

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

$$V_B = V_{CC} - I_B R_B \quad (4.23)$$

o

$$V_B = V_{BE} + V_E \quad (4.24)$$

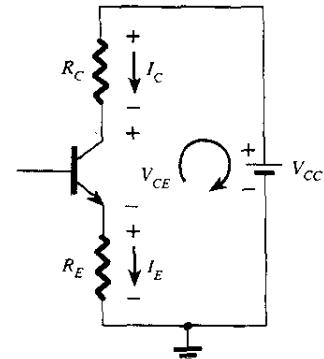


Figura 4.21 Malla colector-emisor.

### EJEMPLO 4.4

Para la red de polarización en emisor de la figura 4.22, calcule:

- a)  $I_B$ .
- b)  $I_C$ .
- c)  $V_{CE}$ .
- d)  $V_C$ .
- e)  $V_E$ .
- f)  $V_B$ .
- g)  $V_{BC}$ .

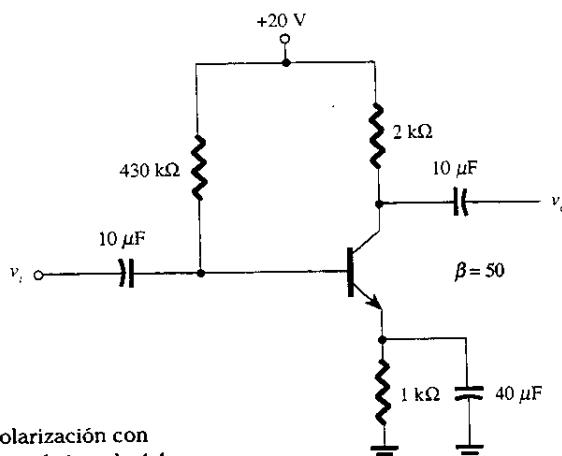


Figura 4.22 Circuito de polarización con estabilización en emisor para el ejemplo 4.4.

### Solución

a) Ecuación (4.17):

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{430 \text{ k}\Omega + (51)(1 \text{ k}\Omega)}$$

$$= \frac{19.3 \text{ V}}{481 \text{ k}\Omega} = 40.1 \mu\text{A}$$

b)  $I_C = \beta I_B$   
 $= (50)(40.1 \mu\text{A})$   
 $\approx 2.01 \text{ mA}$

c) Ecuación (4.19):  $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$   
 $= 20 \text{ V} - (2.01 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V} - 6.03 \text{ V}$   
 $= 13.97 \text{ V}$

d)  $V_C = V_{CC} - I_C R_C$   
 $= 20 \text{ V} - (2.01 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V} - 4.02 \text{ V}$   
 $= 15.98 \text{ V}$

e)  $V_E = V_C - V_{CE}$   
 $= 15.98 \text{ V} - 13.97 \text{ V}$   
 $= 2.01 \text{ V}$

o)  $V_E = I_E R_E \equiv I_C R_E$   
 $= (2.01 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega)$   
 $= 2.01 \text{ V}$

f)  $V_B = V_{BE} + V_E$   
 $= 0.7 \text{ V} + 2.01 \text{ V}$   
 $= 2.71 \text{ V}$

g)  $V_{BC} = V_B - V_C$   
 $= 2.71 \text{ V} - 15.98 \text{ V}$   
 $= -13.27 \text{ V}$  (con polarización inversa como se requiere)

## Estabilidad de la polarización mejorada

La adición del resistor del emisor a la polarización en dc del BJT ofrece una mejor estabilidad; esto es, los voltajes y corrientes de polarización de dc permanecen más cerca de donde los fijó el circuito cuando cambian las condiciones externas, como la temperatura y la beta del transistor. Mientras que un análisis matemático se ofrece en la sección 4.12, puede obtenerse una comparación de la mejoría como lo demuestra el ejemplo 4.5.

Prepare una tabla y compare las corrientes y voltajes de polarización de los circuitos de la figura 4.7 y la figura 4.22, para el valor dado de  $\beta = 50$  y para un nuevo valor de  $\beta = 100$ . Compare también los cambios en  $I_C$  y  $V_{CE}$  para el mismo incremento en  $\beta$ .

### EJEMPLO 4.5

#### Solución

Si se utilizan los resultados calculados en el ejemplo 4.1 y se repiten para un valor de  $\beta = 100$ , se genera lo siguiente:

$\beta$	$I_B$ ( $\mu A$ )	$I_C$ ( $mA$ )	$V_{CE}$ (V)
50	47.08	2.35	6.83
100	47.08	4.71	1.64

Se aprecia un cambio del 100% en la corriente del colector de BJT debido al cambio del 100% en el valor de  $\beta$ .  $I_B$  es el mismo y  $V_{CE}$  disminuye 76%.

Utilizando los resultados del ejemplo 4.4 y después repitiéndolos para un valor de  $\beta = 100$ , da lo siguiente:

$\beta$	$I_B$ ( $\mu A$ )	$I_C$ ( $mA$ )	$V_{CE}$ (V)
50	40.1	2.01	13.97
100	36.3	3.63	9.11

Ahora, la corriente del colector del BJT se incrementa aproximadamente 81% debido al 100% de incremento en  $\beta$ . Nótese cómo  $I_B$  disminuye, y ayuda a mantener el valor de  $I_C$ , o por lo menos reduce el cambio total en  $I_C$  debido al cambio en  $\beta$ . El cambio en  $V_{CE}$  ha caído cerca del 35%. La red de la figura 4.22 es, por tanto, más estable que la de la figura 4.7 para el mismo cambio en  $\beta$ .

## Nivel de saturación

El nivel de saturación del colector o la corriente máxima del colector para un diseño de polarización en emisor puede determinarse si se utiliza el mismo método aplicado para la configuración de polarización fija: se aplica un corto circuito entre las terminales del colector-emisor como se muestra en la figura 4.23, y luego se calcula la corriente del colector resultante. Para la figura 4.23:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (4.25)$$

La adición del resistor de emisor reduce el nivel de saturación del colector, abajo del que se obtuvo con una configuración de polarización fija utilizando el mismo resistor del colector.

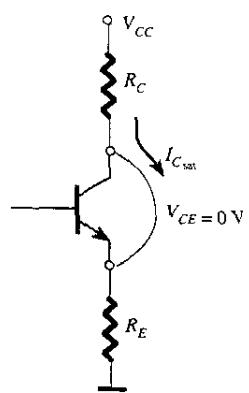


Figura 4.23 Determinación de  $I_{C_{sat}}$  para el circuito de polarización con estabilidad en emisor.

### EJEMPLO 4.6

Determine la corriente de saturación para la red del ejemplo 4.4.

Solución

$$\begin{aligned} I_{C_{\text{sat}}} &= \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \\ &= \frac{20 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = \frac{20 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} \\ &= 6.67 \text{ mA} \end{aligned}$$

que es más o menos el doble del nivel de  $I_{C_Q}$  para el ejemplo 4.4.

### Análisis por recta de carga

El análisis por recta de carga para la red de polarización en emisor es poco diferente de la que se encontró para la configuración de polarización fija. El nivel de  $I_B$  como lo determinó la ecuación (4.17) define el nivel de  $I_B$  sobre las características de la figura 4.24 (denotado  $I_{B_Q}$ ).

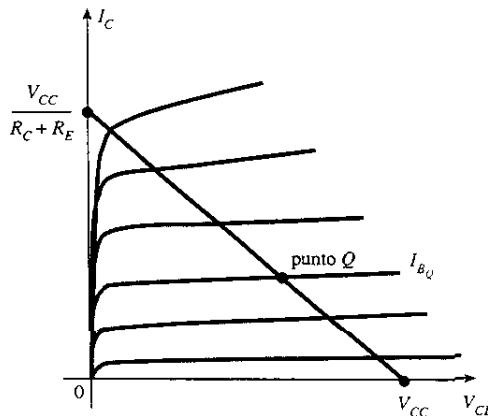


Figura 4.24 Recta de carga para la configuración de polarización en emisor.

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

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

La selección de  $I_C = 0 \text{ mA}$  da

$$V_{CE} = V_{CC} \Big|_{I_C=0 \text{ mA}} \quad (4.26)$$

según se obtiene para la configuración de polarización fija. La elección de  $V_{CE} = 0 \text{ V}$  da

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \Big|_{V_{CE}=0 \text{ V}} \quad (4.27)$$

como se muestra en la figura 4.24. Los diferentes niveles de  $I_{B_Q}$  desplazarán, desde luego, el punto  $Q$  hacia arriba o hacia abajo de la recta de carga.

## 4.5 POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE VOLTAJE

En las configuraciones de polarización previas a la corriente de polarización  $I_{C_Q}$  y el voltaje  $V_{CE_Q}$  de polarización eran una función de la ganancia en corriente ( $\beta$ ) del transistor. Sin embargo, debido a que  $\beta$  es sensible a la temperatura, especialmente para los transistores de silicio, y de que el valor real de beta por lo general, no está bien definido, lo mejor sería desarrollar un

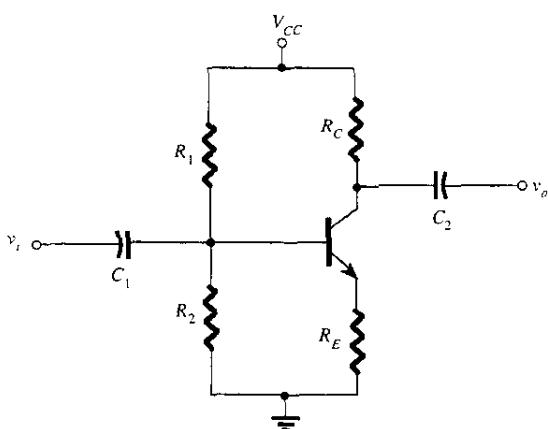


Figura 4.25 Configuración de polarización por divisor de voltaje.

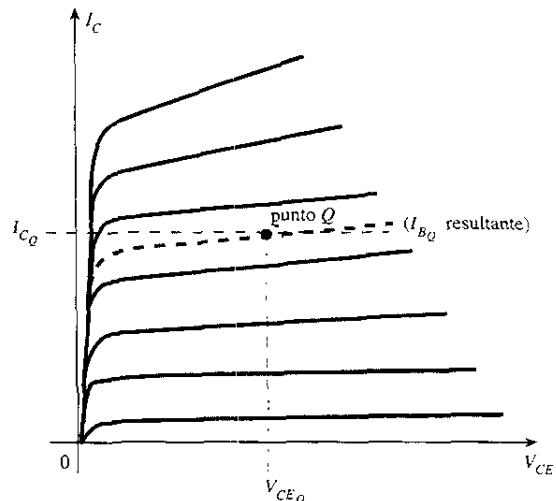


Figura 4.26 Definición del punto  $Q$  para la configuración de polarización por divisor de voltaje.

circuito que fuera menos dependiente o, de hecho, independiente de la beta del transistor. La red a la que nos referimos es configuración de polarización por divisor de voltaje de la figura 4.25. Si se analiza sobre una base exacta la sensibilidad a los cambios en beta, resulta ser muy pequeña. Si los parámetros del circuito se eligen adecuadamente, los niveles resultantes de  $I_{CQ}$  y de  $V_{CEQ}$  pueden ser casi totalmente independientes de beta. Recuerde que en análisis anteriores el punto  $Q$  estaba definido por un nivel fijo de  $I_{CQ}$  y de  $V_{CEQ}$ , como se muestra en la figura 4.26. El nivel de  $I_{BQ}$  cambiará con el cambio en beta, pero el punto de operación definido sobre las características por  $I_{CQ}$  y  $V_{CEQ}$  puede permanecer fijo si se utilizan los parámetros adecuados del circuito.

Como antes se observó, existen dos métodos que pueden aplicarse para analizar la configuración del divisor de voltaje. El motivo principal para elegir los nombres en esta configuración será más obvio en el análisis que sigue. El primero que vamos a demostrar es el *método exacto* que puede aplicarse en *cualquier* configuración de divisor de voltaje. Al segundo se le llama *método aproximado* y puede introducirse sólo si son satisfechas las condiciones específicas. El método aproximado permite un análisis más directo con un mayor ahorro en tiempo y en energía. También es más útil en el modo de diseño que será descrito en una sección posterior. En conjunto, el método aproximado puede aplicarse a la mayoría de las situaciones y, por tanto, debe ser examinado con el mismo interés que el método exacto.

### Análisis exacto

El lado de entrada de la red de la figura 4.25 puede volver a dibujarse según se muestra en la figura 4.27 para el análisis en dc. La red equivalente Thévenin a la izquierda de la terminal de la base puede encontrarse de la siguiente manera:

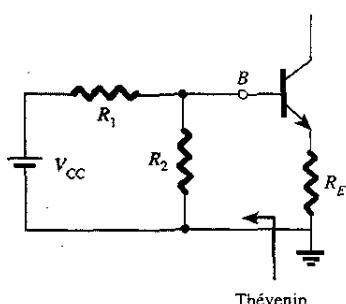


Figura 4.27 Redibujo de la malla de entrada de la red de la figura 4.25.

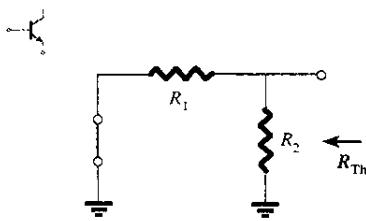


Figura 4.28 Determinación de  $R_{Th}$ .

**$R_{Th}$ :** La fuente de voltaje se reemplaza por un corto circuito equivalente como se indica en la figura 4.28.

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 \quad (4.28)$$

**$E_{Th}$ :** La fuente de voltaje  $V_{CC}$  regresa al circuito y el voltaje de circuito abierto Thévenin de la figura 4.29 se calcula de la siguiente manera:

La aplicación de la regla del divisor de voltaje:

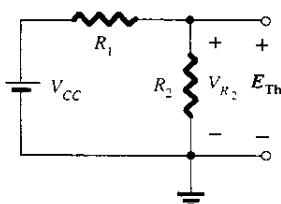


Figura 4.29 Determinación de  $E_{Th}$ .

Después se vuelve a dibujar la red Thévenin como se muestra en la figura 4.30 e  $I_{BQ}$  puede calcularse al aplicar primero la ley de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj para la malla que se indica:

$$E_{Th} - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Sustituyendo  $I_E = (\beta + 1)I_B$  y resolviendo para  $I_B$

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} \quad (4.30)$$

Aunque la ecuación (4.30) aparece al principio diferente de las que se desarrollaron antes, obsérvese que el numerador es, una vez más, una diferencia de dos niveles de voltaje y que el denominador es la resistencia de la base más el resistor de emisor reflejado por  $(\beta + 1)$ , ciertamente muy similar a la ecuación (4.17).

Una vez que  $I_B$  se conoce, las cantidades restantes de la red pueden establecerse de la misma manera como fueron desarrolladas para la configuración de polarización en emisor. Esto es,

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad (4.31)$$

Figura 4.30 Inserción del circuito equivalente de Thévenin.

que es exactamente la misma que la ecuación (4.19). Las ecuaciones restantes para  $V_E$ ,  $V_C$  y  $V_B$  son las mismas que se obtuvieron para la configuración de polarización en emisor.

### EJEMPLO 4.7

Determine el voltaje de polarización de dc  $V_{CE}$  y la corriente  $I_C$  para la siguiente configuración de divisor de voltaje de la figura 4.31.

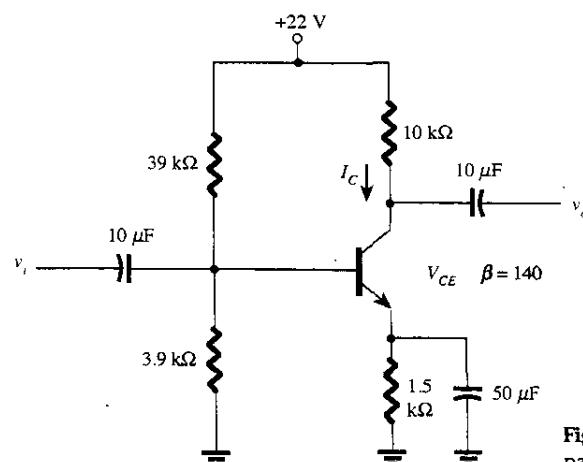


Figura 4.31 Circuito para beta estabilizada para el ejemplo 4.7.

## Solución

La ecuación (4.28):  $R_{Th} = R_1 || R_2$

$$= \frac{(39 \text{ k}\Omega)(3.9 \text{ k}\Omega)}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 3.55 \text{ k}\Omega$$

La ecuación (4.29):  $E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$

$$= \frac{(3.9 \text{ k}\Omega)(22 \text{ V})}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$

La ecuación (4.30):  $I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$

$$= \frac{2 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{3.55 \text{ k}\Omega + (141)(1.5 \text{ k}\Omega)} = \frac{1.3 \text{ V}}{3.55 \text{ k}\Omega + 211.5 \text{ k}\Omega}$$

$$= 6.05 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$= (140)(6.05 \mu\text{A})$$

$$= 0.85 \text{ mA}$$

La ecuación (4.31):  $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$

$$= 22 \text{ V} - (0.85 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega + 1.5 \text{ k}\Omega)$$

$$= 22 \text{ V} - 9.78 \text{ V}$$

$$= 12.22 \text{ V}$$

## Análisis aproximado

La sección de entrada de la configuración del divisor de voltaje se representa por la red de la figura 4.32. La resistencia  $R_i$  es la resistencia equivalente entre la base y tierra para el transistor con un resistor de emisor  $R_E$ . Recuerde que, como se vio en la sección 4.4 [ecuación (4.18)], la resistencia reflejada entre la base y el emisor está definida por  $R_i = (\beta + 1)R_E$ . Si  $R_i$  es mucho mayor que la resistencia  $R_2$ , la corriente  $I_B$  será mucho menor que  $I_2$  (la corriente siempre busca la trayectoria de menor resistencia), e  $I_2$  será aproximadamente igual a  $I_1$ . Si se acepta la aproximación de que  $I_B$  es esencialmente cero comparada con  $I_1$  o  $I_2$ , entonces  $I_1 = I_2$  y  $R_1$  y  $R_2$  pueden considerarse elementos en serie. El voltaje a través de  $R_2$ , que en realidad es el voltaje

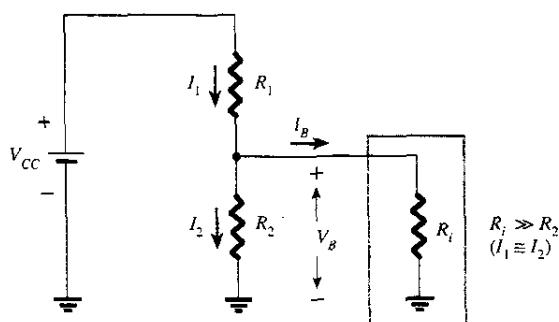


Figura 4.32 Circuito de polarización parcial para calcular el voltaje de base aproximado  $V_B$ .