

## 4.6 POLARIZACIÓN DE DC POR RETROALIMENTACIÓN DE VOLTAJE

Un nivel mejorado de estabilidad también se obtiene mediante la introducción de una trayectoria de retroalimentación desde el colector a la base, como se muestra en la figura 4.34. Aunque el punto  $Q$  no es totalmente independiente de  $\beta$  (aun bajo condiciones aproximadas), la sensibilidad a los cambios en  $\beta$  o a las variaciones en temperatura son normalmente menores que las encontradas en la configuración de polarización fija o de polarización en emisor. De nuevo, el análisis se hará examinando en primer lugar la malla emisor-base y aplicando los resultados a la malla colector-emisor.

### Malla base-emisor

La figura 4.35 muestra la malla base-emisor para la configuración de retroalimentación de voltaje. La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla en el sentido de las manecillas del reloj dará por resultado

$$V_{CC} - I'_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

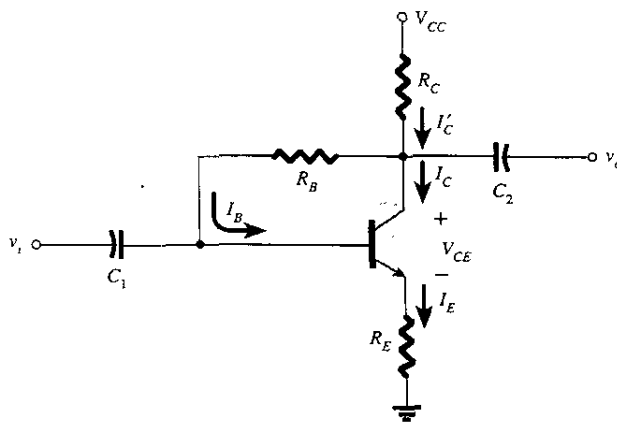


Figura 4.34 Circuito de polarización de dc con retroalimentación de voltaje.

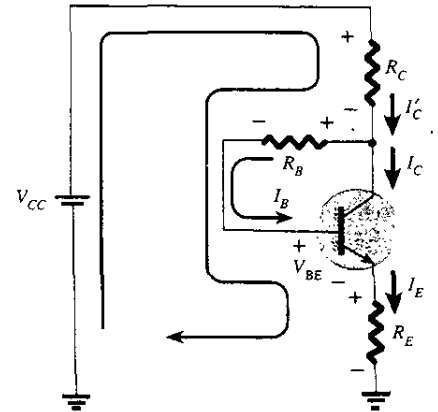


Figura 4.35 Malla base-emisor para la red de la figura 4.34.

Es importante observar que la corriente a través de  $R_C$  no es  $I_C$  sino  $I'_C$  (donde  $I'_C = I_C + I_B$ ). Sin embargo, el nivel de  $I_C$  e  $I'_C$  supera por mucho el nivel normal de  $I_B$  y la aproximación  $I'_C \cong I_C$  por lo general se utiliza. Sustituyendo  $I'_C \cong I_C = \beta I_B$  e  $I_E \cong I_C$  resultará

$$V_{CC} - \beta I_B R_C - I_B R_B - V_{BE} - \beta I_B R_E = 0$$

Si se arreglan los términos, se tiene

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

y resolviendo para  $I_B$  dará

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} \quad (4.41)$$

El resultado es muy interesante en cuanto a que el formato es muy similar a las ecuaciones para  $I_B$  obtenidas para configuraciones anteriores. El numerador es de nuevo la diferencia entre los niveles disponibles de voltaje, mientras que el denominador es la resistencia de la base más los resistores del colector y del emisor reflejados por  $\beta$ . Por tanto, la trayectoria de retroalimentación da por resultado un reflejo de la resistencia  $R_C$  de regreso al circuito de entrada, muy similar al reflejo de  $R_E$ .

En general, la ecuación para  $I_B$  ha tenido el siguiente formato:

$$I_B = \frac{V'}{R_B + \beta R'}$$

con la ausencia de  $R'$  para la configuración de polarización fija,  $R' = R_E$  para la configuración de polarización en emisor (con  $(\beta + 1) \cong \beta$ ), y  $R' = R_C + R_E$  para la configuración de retroalimentación del colector. El voltaje  $V'$  es la diferencia entre los dos niveles de voltaje.

Ya que  $I_C = \beta I_B$ ,

$$I_{C_Q} = \frac{\beta V'}{R_B + \beta R'}$$

En general, mientras más grande sea  $\beta R'$  comparado con  $R_B$ , menor será la sensibilidad de  $I_{C_Q}$  a las variaciones en beta. Obviamente, si  $\beta R' \gg R_B$  y  $R_B + \beta R' \cong \beta R'$ , entonces

$$I_{C_Q} = \frac{\beta V'}{R_B + \beta R'} \cong \frac{\beta V'}{\beta R'} = \frac{V'}{R'}$$

e  $I_{C_Q}$  es independiente al valor de beta. Debido a que  $R'$  normalmente es mayor para la configuración de retroalimentación de voltaje que para la configuración de polarización en emisor, la sensibilidad a las variaciones en beta será menor. Desde luego,  $R'$  es cero ohms para la configuración de polarización fija y por tanto bastante sensible a las variaciones en beta.

### Malla colector-emisor

La malla colector-emisor para la red de la figura 4.34 se presenta en la figura 4.36. La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff para la malla indicada en la dirección de las manecillas del reloj dará por resultado

$$I_E R_E + V_{CE} + I'_C R_C - V_{CC} = 0$$

Debido a que  $I'_C \cong I_C$  y que  $I_E \cong I_C$ , se tiene

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

y

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad (4.42)$$

la cual es exactamente la obtenida para las configuraciones de polarización en emisor y de polarización por divisor de voltaje.

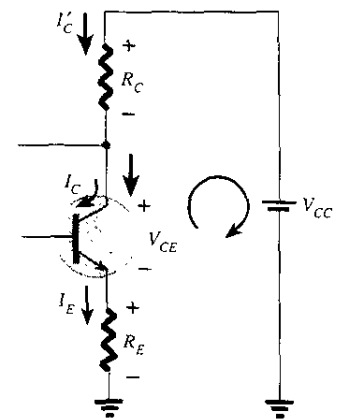


Figura 4.36 Malla colector-emisor para la red de la figura 4.34.

Determinar los niveles de reposo de  $I_{C_Q}$  y de  $V_{CE_Q}$  para la red de la figura 4.37.

### EJEMPLO 4.11

#### Solución

Ecuación (4.41): 
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)}$$

$$= \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{250 \text{ k}\Omega + (90)(4.7 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega)}$$

$$= \frac{9.3 \text{ V}}{250 \text{ k}\Omega + 531 \text{ k}\Omega} = \frac{9.3 \text{ V}}{781 \text{ k}\Omega}$$

$$= 11.91 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{C_Q} = \beta I_B = (90)(11.91 \text{ }\mu\text{A})$$

$$= 1.07 \text{ mA}$$

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

$$= 10 \text{ V} - (1.07 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega)$$

$$= 10 \text{ V} - 6.31 \text{ V}$$

$$= 3.69 \text{ V}$$

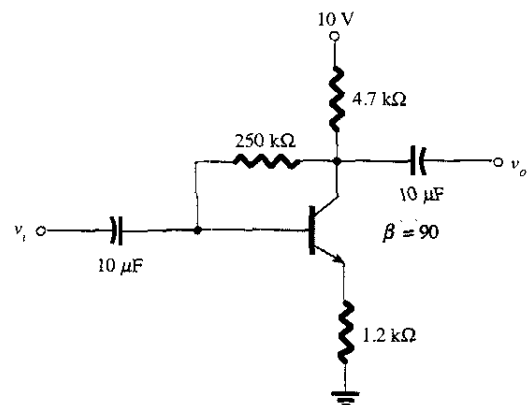


Figura 4.37 Red para el ejemplo 4.11.

**EJEMPLO 4.12**

Repetir el ejemplo 4.11 utilizando una beta de 135 (50% más que en el ejemplo 4.11).

**Solución**

Es importante observar en la solución para  $I_B$  en el ejemplo 4.11, que el segundo término en el denominador de la ecuación es mayor que el primero. Recuerde que en uno de los análisis anteriores, mientras mayor es este segundo término comparado con el primero, menor será la sensibilidad a los cambios en beta. En este ejemplo, el nivel de beta se incrementa en 50%, lo cual hará que aumente la magnitud de este segundo término aún más comparado con el primero. Sin embargo, es más importante observar en estos ejemplos que una vez que el segundo término es relativamente más grande comparado con el primero, la sensibilidad a los cambios en beta resulta ser significativamente menor.

Resolviendo para  $I_B$  da

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{250 \text{ k}\Omega + (135)(4.7 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega)}$$

$$= \frac{9.3 \text{ V}}{250 \text{ k}\Omega + 796.5 \text{ k}\Omega} = \frac{9.3 \text{ V}}{1046.5 \text{ k}\Omega}$$

$$= 8.89 \text{ }\mu\text{A}$$

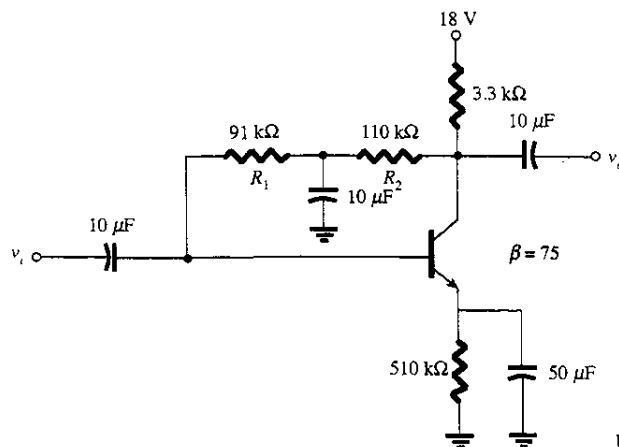
$$\begin{aligned} e \quad I_{CQ} &= \beta I_B \\ &= (135)(8.89 \text{ }\mu\text{A}) \\ &= \mathbf{1.2 \text{ mA}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{con } V_{CEQ} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \\ &= 10 \text{ V} - (1.2 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega) \\ &= 10 \text{ V} - 7.08 \text{ V} \\ &= \mathbf{2.92 \text{ V}} \end{aligned}$$

Aunque el nivel de  $\beta$  se incrementó 50%, el nivel de  $I_{CQ}$  únicamente se elevó al 12.1%, mientras que el nivel de  $V_{CEQ}$  decayó aproximadamente 20.9%. Si la red fuera un diseño de polarización fija, un incremento del 50% en  $\beta$  hubiera causado un aumento del 50% en  $I_{CQ}$ , y un cambio drástico en la localización del punto  $Q$ .

**EJEMPLO 4.13**

Determine el nivel de  $I_B$  y de  $V_C$  para la red de la figura 4.38.



**Figura 4.38** Red para el ejemplo 4.13.

### Solución

En este caso la resistencia de la base para el análisis en dc está compuesto de dos resistores con un capacitor conectado a partir de la unión con tierra. Para el modo de dc, el capacitor es equivalente a un circuito abierto y  $R_B = R_1 + R_2$ .

Resolviendo para  $I_B$  se obtiene

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} \\ &= \frac{18 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{(91 \text{ k}\Omega + 110 \text{ k}\Omega) + (75)(3.3 \text{ k}\Omega + 0.51 \text{ k}\Omega)} \\ &= \frac{17.3 \text{ V}}{201 \text{ k}\Omega + 285.75 \text{ k}\Omega} = \frac{17.3 \text{ V}}{486.75 \text{ k}\Omega} \\ &= 35.5 \text{ }\mu\text{A} \\ I_C &= \beta I_B \\ &= (75)(35.5 \text{ }\mu\text{A}) \\ &= 2.66 \text{ mA} \\ V_C &= V_{CC} - I'_C R_C \cong V_{CC} - I_C R_C \\ &= 18 \text{ V} - (2.66 \text{ mA})(3.3 \text{ k}\Omega) \\ &= 18 \text{ V} - 8.78 \text{ V} \\ &= 9.22 \text{ V} \end{aligned}$$

---

### Condiciones de saturación

Utilice la aproximación de  $I'_C = I_C$  que es una ecuación para la corriente de saturación, y resulta ser la misma que se obtuvo para las configuraciones del divisor de voltaje y de polarización en emisor. Esto es

$$I_{C_{\text{sat}}} = I_{C_{\text{máx}}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (4.43)$$

### Análisis por recta de carga

Proseguimos con la aproximación  $I'_C = I_C$  y da por resultado la misma recta de carga definida para las configuraciones del divisor de voltaje y de polarización en emisor. El nivel de  $I_{B_Q}$  será definido por la configuración de polarización elegida.

## 4.7 DIVERSAS CONFIGURACIONES DE POLARIZACIÓN

Existen ciertas configuraciones de polarización para BJT que no se asemejan al molde básico de las analizadas en las secciones previas. De hecho, existen variaciones en el diseño que hubieran requerido más páginas de las que son posibles de ofrecer en un libro de este tipo. Sin embargo, el principal propósito en esta edición es el de hacer énfasis en las características del dispositivo que permiten un análisis en dc de la configuración, para establecer un procedimiento general hacia la solución deseada. Para cada configuración que hasta ahora se ha analizado, el primer paso es la derivación de una expresión para la corriente de la base. Una vez que se conoce la corriente de la base, la corriente del colector y los niveles de voltaje del

circuito de salida pueden elegirse prácticamente en forma directa. Pero esto no implica que todas las soluciones tomarán la misma trayectoria, pero sí sugiere una ruta a seguir si se encuentra una nueva configuración.

El primer ejemplo explica cómo el resistor de emisor se elimina de la configuración de retroalimentación de voltaje de la figura 4.34. El análisis es muy similar, pero requiere de la eliminación de  $R_E$  de la ecuación aplicada.

#### EJEMPLO 4.14

Para la red de la figura 4.39:

- Determinar  $I_{CQ}$  y  $V_{CEQ}$ .
- Encontrar  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_E$  y  $V_{BC}$ .

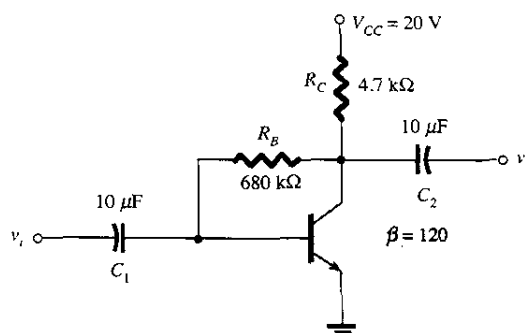


Figura 4.39 Retroalimentación en colector con  $R_E = 0 \Omega$ .

#### Solución

- La ausencia de  $R_E$  reduce la reflexión de los niveles resistivos sólo al de  $R_C$  y la ecuación para  $I_B$  se reduce a

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

$$= \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{680 \text{ k}\Omega + (120)(4.7 \text{ k}\Omega)} = \frac{19.3 \text{ V}}{1.244 \text{ M}\Omega}$$

$$= 15.51 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = (120)(15.51 \mu\text{A})$$

$$= 1.86 \text{ mA}$$

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

$$= 20 \text{ V} - (1.86 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega)$$

$$= 11.26 \text{ V}$$

- 

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

$$V_C = V_{CE} = 11.26 \text{ V}$$

$$V_E = 0 \text{ V}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = 0.7 \text{ V} - 11.26 \text{ V}$$

$$= -10.56 \text{ V}$$

En el siguiente ejemplo el voltaje aplicado está conectado a la terminal del emisor y  $R_C$  está directamente conectada a la tierra. Al principio, parece ser algo no ortodoxo y muy diferente a los que se encontraron hasta ahora, pero una aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito base dará por resultado la corriente de base deseada.

Determinar  $V_C$  y  $V_B$  para la red de la figura 4.40.

#### EJEMPLO 4.15

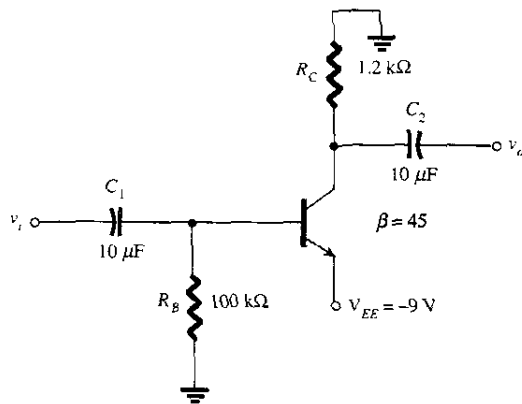


Figura 4.40 Ejemplo 4.15.

#### Solución

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj para la malla base-emisor dará por resultado

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

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

y

La sustitución genera

$$I_B = \frac{9 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega}$$

$$= \frac{8.3 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega}$$

$$= 83 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$= (45)(83 \text{ }\mu\text{A})$$

$$= 3.735 \text{ mA}$$

$$V_C = -I_C R_C$$

$$= -(3.735 \text{ mA})(1.2 \text{ k}\Omega)$$

$$= -4.48 \text{ V}$$

$$V_B = -I_B R_B$$

$$= -(83 \text{ }\mu\text{A})(100 \text{ k}\Omega)$$

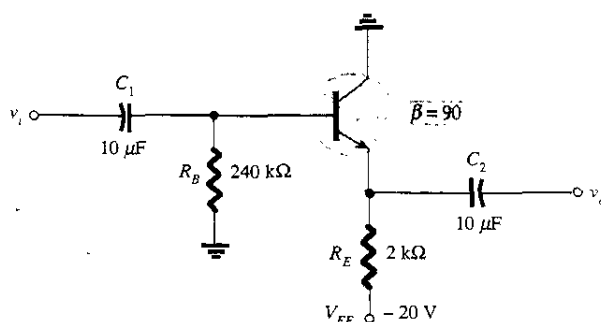
$$= -8.3 \text{ V}$$

El siguiente ejemplo utiliza una red denominada configuración *emisor-seguidor*. Cuando la misma red se analiza en ac, se encontrará que tanto las señales de salida como la de entrada están en fase (una siguiendo a la otra) y que el voltaje de salida es ligeramente menor que la señal aplicada. Para el análisis en dc el colector se conecta a tierra y el voltaje se aplica en la terminal del emisor.

#### 4.7 Diversas configuraciones de polarización

**EJEMPLO 4.16**

Determinar  $V_{CEQ}$  e  $I_E$  para la red de la figura 4.41.



**Figura 4.41** Configuración de colector común (emisor-seguir).

**Solución**

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de entrada dará por resultado

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

pero

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

y

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

con

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

Sustituyendo los valores queda

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{240 \text{ k}\Omega + (91)(2 \text{ k}\Omega)} \\ &= \frac{19.3 \text{ V}}{240 \text{ k}\Omega + 182 \text{ k}\Omega} = \frac{19.3 \text{ V}}{422 \text{ k}\Omega} \\ &= 45.73 \text{ }\mu\text{A} \\ I_C &= \beta I_B \\ &= (90)(45.73 \text{ }\mu\text{A}) \\ &= 4.12 \text{ mA} \end{aligned}$$

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de salida resultará

$$-V_{EE} + I_E R_E + V_{CE} = 0$$

pero

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

y

$$\begin{aligned} V_{CEQ} &= V_{EE} - (\beta + 1)I_B R_E \\ &= 20 \text{ V} - (91)(45.73 \text{ }\mu\text{A})(2 \text{ k}\Omega) \\ &= 11.68 \text{ V} \\ I_E &= 4.16 \text{ mA} \end{aligned}$$



Hasta ahora todos los ejemplos usan una configuración de emisor común o de colector común. En el siguiente ejemplo se investiga la configuración de base común. En dicha situación el circuito de entrada se utilizará para determinar  $I_E$  en lugar de  $I_B$ . Después la corriente del colector queda disponible para realizar un análisis del circuito de salida.

Determine el voltaje  $V_{CB}$  y la corriente  $I_B$  para la configuración de base común de la figura 4.42.

#### EJEMPLO 4.17

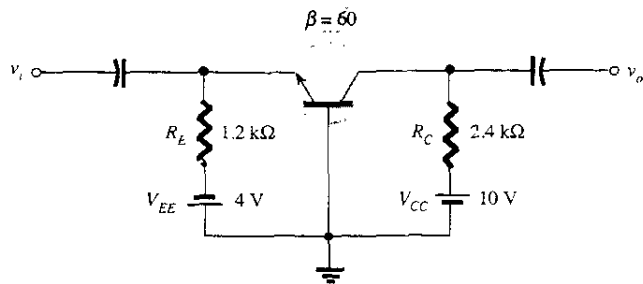


Figura 4.42 Configuración de base común.

#### Solución

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de entrada da

$$-V_{EE} + I_E R_E + V_{BE} = 0$$

$$y \quad I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

Sustituyendo los valores, se obtiene

$$I_E = \frac{4 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.2 \text{ k}\Omega} = 2.75 \text{ mA}$$

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de salida da

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

$$y \quad V_{CB} = V_{CC} - I_C R_C \text{ con } I_C \cong I_E$$

$$= 10 \text{ V} - (2.75 \text{ mA})(2.4 \text{ k}\Omega)$$

$$= 3.4 \text{ V}$$

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

$$= \frac{2.75 \text{ mA}}{60}$$

$$= 45.8 \text{ }\mu\text{A}$$

El ejemplo 4.18 utiliza una fuente doble y requiere de la aplicación del teorema de Thévenin para determinar las incógnitas deseadas.



### EJEMPLO 4.18

Especifique  $V_C$  y  $V_B$  para la red de la figura 4.43.

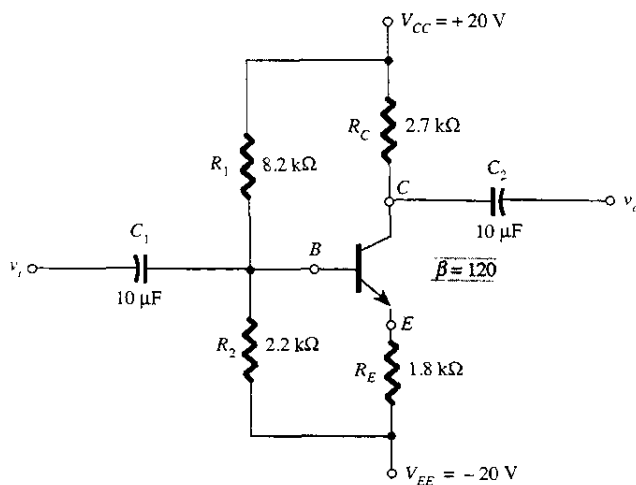


Figura 4.43 Ejemplo 4.18.

### Solución

La resistencia y voltaje Thévenin se calculan para la red a la izquierda de la terminal de la base, como se muestra en las figuras 4.44 y 4.45.

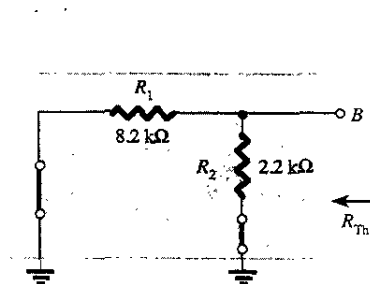


Figura 4.44 Determinación de  $R_{Th}$ .

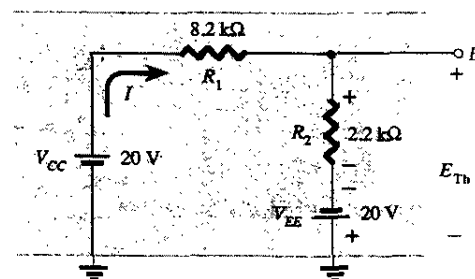


Figura 4.45 Determinación de  $E_{Th}$ .

$R_{Th}$ :

$$R_{Th} = 8.2 \text{ k}\Omega \parallel 2.2 \text{ k}\Omega = 1.73 \text{ k}\Omega$$

$E_{Th}$ :

$$I = \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R_1 + R_2} = \frac{20 \text{ V} + 20 \text{ V}}{8.2 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} = \frac{40 \text{ V}}{10.4 \text{ k}\Omega}$$

$$= 3.85 \text{ mA}$$

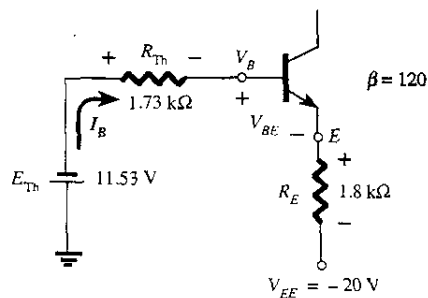
$$E_{Th} = IR_2 - V_{EE}$$

$$= (3.85 \text{ mA})(2.2 \text{ k}\Omega) - 20 \text{ V}$$

$$= -11.53 \text{ V}$$

Luego la red puede ser redibujada según se muestra en la figura 4.46, donde la aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff da por resultado

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



**Figura 4.46** Sustitución del circuito equivalente de Thévenin.

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

$$V_{EE} - E_{Th} - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_E - I_B R_{Th} = 0$$

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{V_{EE} - E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} \\ &= \frac{20 \text{ V} - 11.53 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.73 \text{ k}\Omega + (121)(1.8 \text{ k}\Omega)} \\ &= \frac{7.77 \text{ V}}{219.53 \text{ k}\Omega} \\ &= 35.39 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B \\ &= (120)(35.39 \mu\text{A}) \\ &= 4.25 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 20 \text{ V} - (4.25 \text{ mA})(2.7 \text{ k}\Omega) \\ &= 8.53 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_B &= -E_{Th} - I_B R_{Th} \\ &= -(11.53 \text{ V}) - (35.39 \mu\text{A})(1.73 \text{ k}\Omega) \\ &= -11.59 \text{ V} \end{aligned}$$

## 4.8 OPERACIONES DE DISEÑO

Hasta ahora los análisis se enfocan al estudio de las redes existentes. Todos los elementos están en su lugar, y sólo es cuestión de resolver para determinar los niveles de corriente y de voltaje de la configuración. El proceso de diseño es donde se especifican la corriente y/o el voltaje, y deben determinarse los elementos requeridos para fijar los niveles del diseño. Este proceso de síntesis requiere de una muy clara comprensión de las características del dispositivo, las ecuaciones básicas para la red y un gran conocimiento de las leyes básicas del análisis de circuitos, como la ley de Ohm, la ley de voltaje de Kirchhoff, y así sucesivamente. En la mayoría de las situaciones se reta al proceso de pensamiento en un grado alto durante el proceso de diseño, mucho más que durante la secuencia de análisis. La trayectoria hacia la solución está menos definida, y puede requerir de cierta cantidad de suposiciones básicas que no se tienen que hacer cuando simplemente se analiza una red.