

## Transistor bipolar de unión: Polarización.

### 4- Polarización del transistor bipolar

#### 4.1- Elección del punto de operación Q

El término polarización se refiere a la aplicación de tensiones continuas que permiten establecer un nivel determinado de tensión y corriente sobre el dispositivo. Se determina así un punto de operación fijo sobre las características tensión- corriente del dispositivo denominado punto de reposo Q (*Quiescent point*). El punto de reposo define una región que podrá utilizarse para la amplificación de una señal, por lo cual su ubicación sobre las características no podrá ser cualquiera. Además, el funcionamiento del dispositivo deberá encontrarse dentro de la región activa y no deberá superar los regímenes máximos:  $I_{Cm\acute{a}x}$  (máxima corriente de colector),  $V_{CEm\acute{a}x}$  (máxima tensión colector-emisor) y  $P_{Cm\acute{a}x}$  (máxima potencia), como se muestra en la Figura 19.

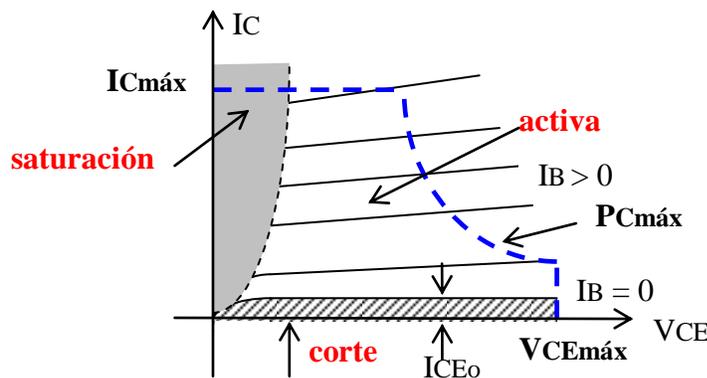


Figura 19

#### 4.1.1- Punto de operación estático Q sobre la región activa

Cuando el punto de trabajo queda determinado sobre la región activa la elección de la ubicación del punto Q sobre la característica tensión-corriente no puede ser cualquiera. En la Figura 20 se vuelve a dibujar la característica de salida en EC donde se han marcado varios posibles puntos de trabajo.

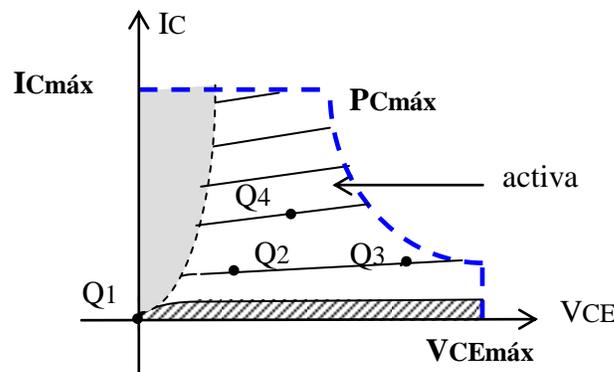


Figura 20

Q1: La polarización en este punto daría por resultado corriente y tensión continua nula.

Q2: En este punto, al aplicar una señal alterna para ser amplificada, el valor de pico de la señal de salida estará limitada por la proximidad de la zona de saturación donde las características del dispositivo se vuelven muy alineales afectando la reproducción de la señal a amplificar.

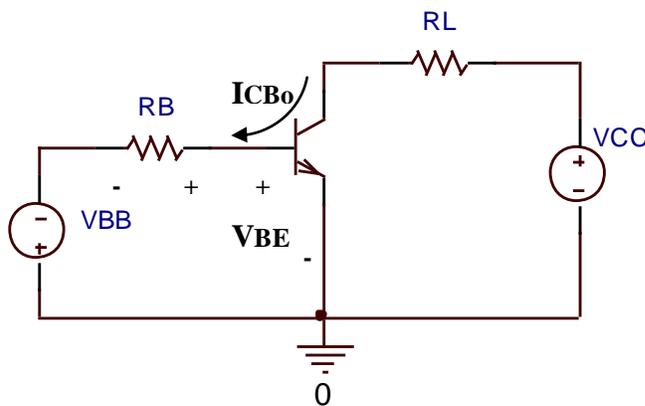
Q3: Este punto se encuentra muy próximo a los límites del dispositivo.

Q4: La polarización en este punto, permitiría una suficiente excursión de la señal de salida limitada por las zonas de corte y saturación. En general, para el caso de un amplificador, conviene operar en una región donde la ganancia del dispositivo sea constante o lineal para asegurar una excursión completa sin distorsión de la señal. Por lo tanto, un punto como Q4 parecería el más adecuado para cumplir con los requerimientos de ganancia lineal y máxima excursión de tensión y corriente, que es una condición deseada para amplificadores de pequeña señal.

#### 4.1.2- Puntos de operación de corte y de saturación

La zona de corte corresponde a la polarización inversa de las dos junturas JEB y JCB.

En la configuración de emisor común, el corte puede asegurarse polarizando la juntura base-emisor de modo que  $I_E = 0$ , resultando  $I_C = I_{CB0}$ . Debido a que la corriente inversa  $I_{CB0}$  es fuertemente dependiente de la temperatura (aproximadamente, se duplica cada  $10^\circ\text{C}$  de aumento de la temperatura) deben elegirse adecuadamente los parámetros del circuito para asegurar el corte en un amplio rango. Por ejemplo, en el circuito de la Figura 21, la corriente  $I_{CB0}$  circula en un sentido tal que la tensión sobre  $R_B$  tiende a sacar del corte al transistor. Por ello, debe calcularse el valor de  $R_B$  de modo que a la mayor temperatura de trabajo el dispositivo aún permanezca cortado. Suponiendo para silicio el corte con  $V_{BE} \leq 0\text{ V}$ , resulta:



$$V_{BE} = -V_{BB} + I_{CB0} R_B \leq 0$$

$$R_B \leq \frac{V_{BB}}{I_{CB0}}$$

Figura 21

La zona de saturación corresponde a las junturas emisor-base y colector-base ambas polarizadas en directa. En el punto de operación de saturación la tensión colector-emisor es muy pequeña, del orden de décimas de voltios, y la corriente de colector es elevada. En este punto de funcionamiento la corriente de colector está prácticamente limitada por el circuito externo y no depende de la corriente de base.

En la configuración de emisor común, el punto de saturación puede reconocerse por las siguientes condiciones:

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

$$I_B > I_C/\beta$$

Para saber si un transistor está polarizado en la zona de saturación se supone que lo está ( $V_{CE} = V_{CEsat} \cong 0.2V$  para silicio) y se calculan en forma independiente las corrientes de colector y de base. Si se cumple que  $I_B > I_C/\beta$ , el transistor estará saturado.

#### 4.1.3- Cómo reconocer el punto de operación

No existe un método único para saber en qué zona: corte, activa o saturación, está polarizado un transistor en un circuito. Un método usado es la reducción al absurdo. Este método consiste en suponer que el dispositivo funciona es una determinada zona, por ejemplo activa, y calcular los valores de tensiones o corrientes. Si la suposición no es la correcta se llega a un resultado contradictorio. Por ejemplo, se quiere saber en qué zona está funcionando el circuito de la Figura 22 y cuál será el valor de la tensión  $V_{CE}$ :

Por ejemplo, se quiere saber en qué zona está funcionando el circuito de la Figura 22 y cuál será el valor de la tensión  $V_{CE}$ :

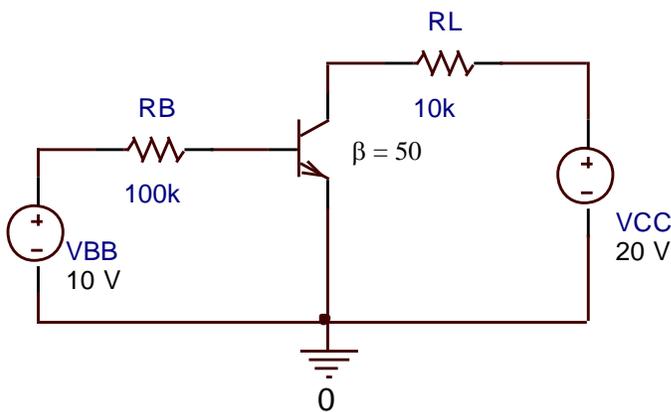


Figura 22



Para el transistor en zona activa se considera  $V_{BE} = 0.7V$ .

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10V - 0.7V}{100K} \cong \frac{10V}{100K} = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 (0.1 \text{ mA}) = 5 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L = 20V - 5\text{mA} \cdot 10K = -30V$$

Este valor de tensión no es válido porque superaría el valor de la fuente de alimentación y además para un transistor NPN la tensión colector-emisor no puede ser negativa. Por lo tanto, la suposición inicial no fue correcta y el transistor no está funcionando en zona activa.

Como tampoco está funcionando en corte porque la juntura base-emisor está polarizada en directa, el transistor estará saturado. Para comprobarlo supongamos  $V_{CEsat} \cong 0$  y calculemos las

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_L} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{20V}{10K} = 2 \text{ mA}$$

$$I_B \cong \frac{10V}{100K} = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_B > \frac{I_{Csat}}{\beta}, \quad 0.1 \text{ mA} > \frac{2 \text{ mA}}{50} = 0.04 \text{ mA}$$

corrientes de base y de colector en forma independiente. Si se cumple  $I_B > I_C/\beta$ , el transistor estará saturado y  $V_{CE} = V_{CE sat}$ .

Por lo tanto, se verifica que el transistor está saturado.

## 4.2- Circuitos de polarización

### 4.2.1- El circuito de polarización fija en Base

El circuito de polarización más simple es el denominado de polarización fija, Figura 23.

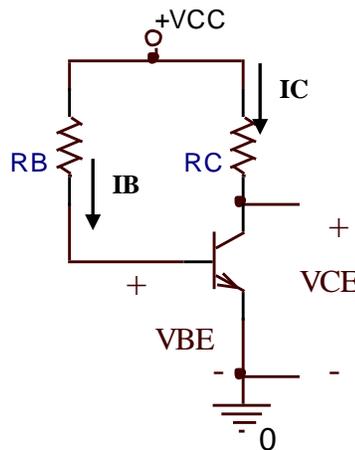


Figura 23

El punto de operación Q queda definido a partir de la corriente de base  $I_B$ , que a su vez queda determinada por el valor de  $R_B$ . A partir de la malla de entrada:

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

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

La tensión  $V_{BE}$  para un transistor de silicio está en el orden de 0.6 V- 0.7 V, por lo cual si  $V_{CC} \gg V_{BE}$  (como criterio  $V_{CC} \geq 10 V_{BE}$ ), resulta:

$$I_B \cong \frac{V_{CC}}{R_B}$$

Por lo tanto, la corriente  $I_B$  es constante dando la denominación al circuito como polarización fija. La corriente de colector  $I_C$  queda determinada por la relación del transistor:

$$I_C = \beta I_B$$

Aplicando ley de Kirchhoff a la malla de salida se obtiene el valor de  $V_{CE}$ :

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

#### 4.2.1.2- La recta de carga estática. Análisis

Los parámetros del circuito definen un rango de posibles puntos de reposo  $Q$ . Estos puntos pueden analizarse desde un punto de vista gráfico. Por un lado, se tienen las características de salida corriente-tensión para el dispositivo y por el otro, una ecuación que relaciona las dos variables  $I_C$  y  $V_{CE}$ :

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

La solución de este sistema se produce donde se satisfacen ambos en forma simultánea. La ecuación anterior define sobre la característica  $I_C$ - $V_{CE}$  una recta, denominada recta de carga estática, Figura 24.

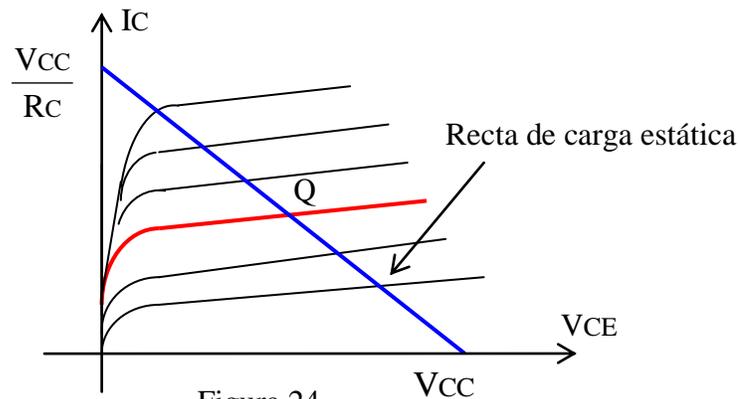


Figura 24

Para trazar la recta de carga estática se necesitan dos puntos particulares. Para  $I_C = 0$  resulta:

$$V_{CE} = V_{CC}$$

Para  $V_{CE} = 0$  resulta:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

La pendiente de la recta de carga queda definida por el valor de  $R_C$ .

Al elegir una corriente de base  $I_B$  adecuada queda determinado el punto de reposo  $Q$ , tal como indica la Figura 25. Si cambia el valor de  $I_B$  (por ejemplo cambiando el valor de  $R_B$ ) el punto  $Q$  se desplaza sobre la recta de carga hacia arriba o hacia abajo dependiendo del valor de  $I_B$  (puntos  $Q_A$  y  $Q_B$  en la Figura 25). Si  $I_B$  y  $V_{CC}$  se mantienen fijos y se cambia el valor de la carga  $R_C$ , el punto  $Q$  se mueve sobre la característica de  $I_B$  constante (puntos  $Q_{C1}$  y  $Q_{C2}$  en la Figura 25).

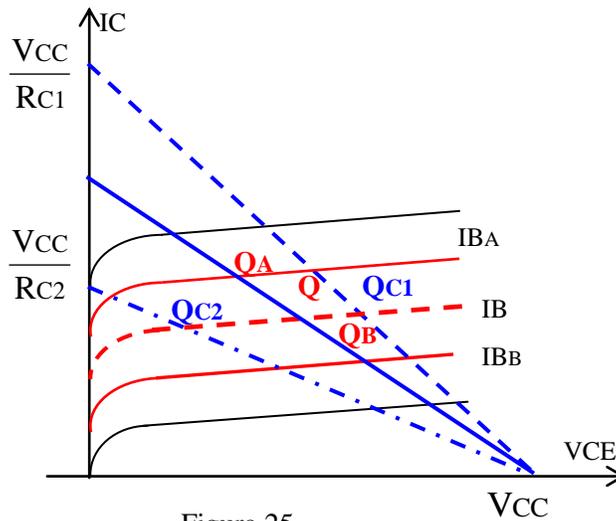
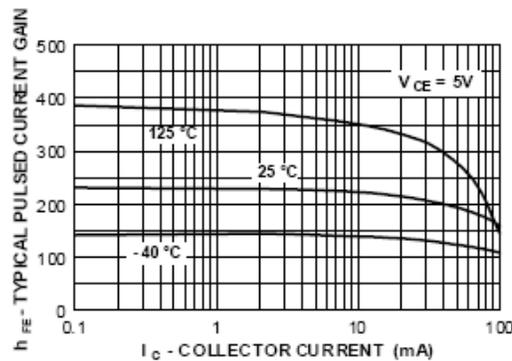
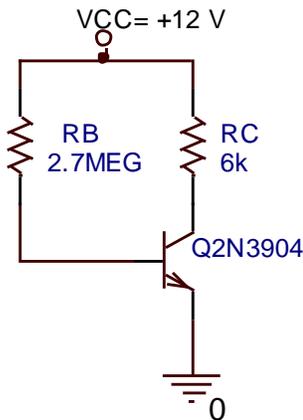


Figura 25

#### 4.2.2- El circuito de polarización de emisor

Como ventaja la polarización por corriente de base fija es simple, sin embargo presenta como desventaja una fuerte influencia de la temperatura con la correspondiente variación de la ganancia de corriente  $\beta$  o  $h_{FE}$  del transistor bipolar, que puede cambiar la zona de funcionamiento del dispositivo.

Para realizar este análisis supongamos la siguiente etapa:



A partir de los datos del transistor, resolviendo el circuito para las temperaturas  $T = 25\text{ °C}$  y  $T = 125\text{ °C}$  resulta la siguiente tabla.

Del análisis de los resultados puede observarse que el efecto de las variaciones de  $h_{FE}$  resulta en una fuerte modificación del punto de operación, acercándose a la zona de saturación.

	<b>hFE</b>	<b>IB</b>	<b>IC</b>	<b>VCE</b>
T = 25 °C	240	4.185 μA	1 mA	6 V
T = 125°C	370	4.185 μA	1.548 mA	2.97 V

El circuito de polarización de emisor se muestra en la Figura 26. La diferencia con el circuito de polarización fija radica en la colocación de un resistor  $R_E$  en serie con el emisor del transistor, de modo que quedan vinculadas las mallas de entrada y de salida. Este circuito presenta como ventaja una mayor estabilidad del punto de reposo Q frente a variaciones de parámetros, como la temperatura o la ganancia  $\beta$  del dispositivo.

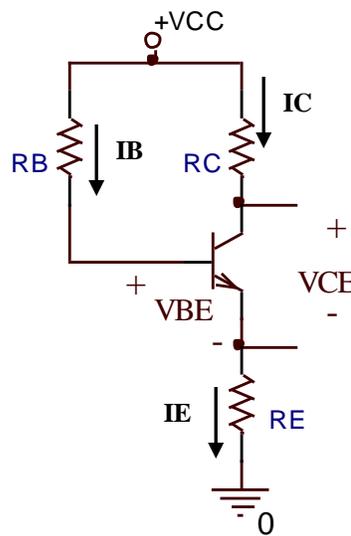


Figura 26

Aplicando ley de Kirchhoff a la malla de entrada se tiene:

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

Como además:

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

Resulta como expresión de  $I_B$ :

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

Una vez calculada  $I_B$  queda determinada  $I_C = \beta I_B$ . Resolviendo la malla de salida:

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

De este modo, queda determinado el punto de polarización Q.

La recta de carga, Figura 27, queda determinada por el circuito de salida:

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

Para  $I_C=0$  se obtiene:

$$V_{CE} = V_{CC}$$

Para  $V_{CE}=0$  se obtiene

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

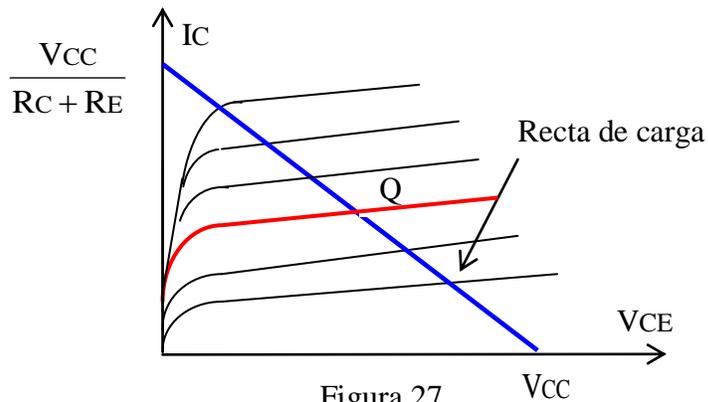


Figura 27

### 4.2.3- Polarización por divisor de tensión en base

El circuito de polarización por divisor de tensión en base se muestra en la Figura 28. Es el circuito más usado porque presenta mayor estabilidad frente a las variaciones de la ganancia  $\beta$  del transistor y de la temperatura.

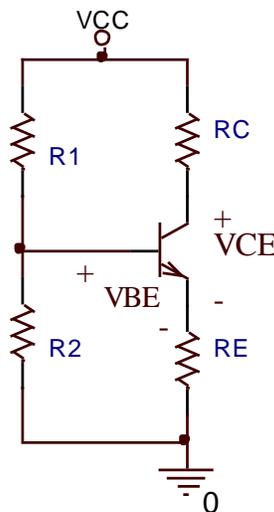
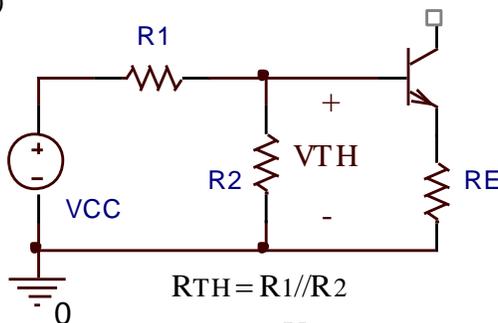


Figura 28

Para realizar el análisis del circuito conviene encontrar el circuito equivalente de Thevenin para la red formada por  $V_{CC}$ ,  $R_1$  y  $R_2$ , Figura 29 a). La Figura 29 b) muestra el circuito equivalente ( $V_{TH}$ ,  $R_{TH}$ )



$$R_{TH} = R_1 // R_2$$

$$V_{TH} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2$$

Figura 29 a)

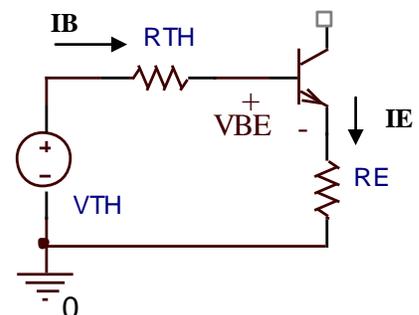


Figura 29 b)

La corriente de base estará dada por:

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

De la malla de salida se obtiene la tensión colector-emisor:

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

El circuito anterior puede resolverse por un método aproximado, sin calcular el equivalente de Thevenin, muy útil para realizar cálculos rápidos del punto de reposo. Para el análisis aproximado nos valemos del circuito del divisor en base que por comodidad repetimos en la Figura 30.

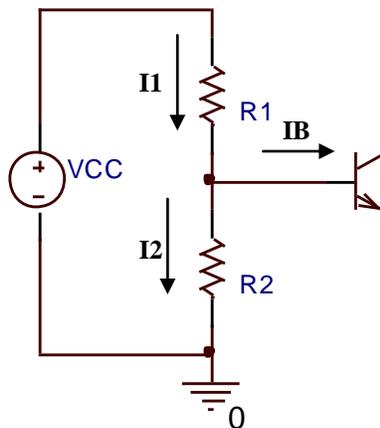


Figura 30

Si suponemos que la corriente de base  $I_B$  es mucho menor que la corriente  $I_2$ , resultará  $I_1 \cong I_2$ . La tensión de la base respecto de tierra puede calcularse a partir del divisor de tensión:

$$V_B = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2$$

La tensión de emisor respecto de tierra será:

$$V_E = V_B - V_{BE} = I_E R_E$$

de donde:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

Si la ganancia de corriente  $\beta$  es muy grande se puede hacer la siguiente aproximación:

$$I_C \cong I_E$$

Por último, debe comprobarse que la suposición inicial es válida:  $I_B \ll I_2$ . En general, suele adoptarse como criterio que

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \leq \frac{I_2}{10} = 0.1 \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

**Ejemplo**

Para el circuito de la Figura 34 con  $\beta = 120$   
 y  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ , calcular:

- IC,
- VCE,
- IB,
- VE y
- VB,

Utilizar:

- a) el método exacto y
- b) el método aproximado
- c) comparar los resultados

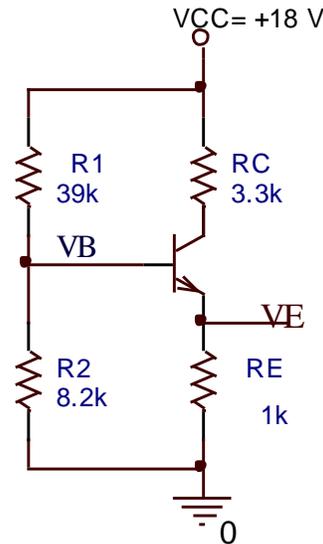


Figura 31

a) Por el método exacto, calculamos el equivalente de Thevenin en la base:

$$R_{TH} = \frac{39 \text{ K} \cdot 8.2 \text{ K}}{39 \text{ K} + 8.2 \text{ K}} \cong 6.8 \text{ K} , \quad V_{TH} = \frac{18 \text{ V} \cdot 8.2 \text{ K}}{39 \text{ K} + 8.2 \text{ K}} = 3.13 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (1 + \beta) R_E} = \frac{3.13 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{6.8 \text{ K} + (121) 1 \text{ K}} = 18.8 \mu \text{ A}$$

$$I_C = \beta I_B = 120 (18.8) \mu \text{ A} = 2.25 \text{ mA}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 121 (18.8) \mu \text{ A} = 2.27 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 18 \text{ V} - 2.25 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ K} - 2.27 \text{ mA} \cdot 1 \text{ K} = 8.28 \text{ V}$$

$$V_B = V_{TH} - I_B R_{TH} = 3.13 \text{ V} - 18.8 \times 10^{-3} \text{ mA} \cdot 6.8 \text{ K} \cong 3 \text{ V}$$

$$V_E = I_E R_E = 2.27 \text{ mA} \cdot 1 \text{ K} = 2.27 \text{ V}$$

b) Por el método aproximado:

$$V_B = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2} = \frac{18 \text{ V} \cdot 8.2 \text{ K}}{39 \text{ K} + 8.2 \text{ K}} = 3.13 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.13 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 2.43 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{2.43V}{1K} = 2.43 \text{ mA}, \quad I_C \cong I_E = 2.43 \text{ mA}, \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = 20.25 \mu\text{A}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 18V - 2.43 \text{ mA} (3.3K + 1K) = 7.55V$$

Se verifica la validez del método aproximado:

$$I_B \ll \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = 381.3 \mu\text{A}$$

La siguiente tabla compara los resultados obtenidos:

	$I_C$ [mA]	$I_B$ [ $\mu$ A]	$V_{CE}$ [V]	$V_E$ [V]	$V_B$ [V]
Análisis exacto	2.25	18.8	8.28	2.27	3
Análisis aproximado	2.43	20.25	7.55	2.43	3.13

Se verifica que el error cometido utilizando el método aproximado se encuentra dentro del 10%, por lo que puede considerarse aceptable.