

# Polarización del Transistor de Unión Bipolar (BJT)

J. I. Huircan  
Universidad de La Frontera

November 21, 2011

## Abstract

Se tienen tres formas básicas para la polarización de un BJT: Polarización fija, autopolarización y polarización universal. Esto establece el punto de trabajo o punto  $Q$  para el BJT, el cual puede estar en la zona activa, saturación o corte. Para el diseño de una red de polarización se requiere conocer el punto de operación ( $I_{CQ}$ ,  $V_{CEQ}$ ) y los parámetros del transistor ( $\beta$  y  $V_{BE(ON)}$ ). Cuando el circuito ya está diseñado, mediante técnicas de análisis de redes es posible obtener el punto de operación. El punto  $Q$  puede variar por diversos factores, sobre todo térmicos.

## 1 Introduction

¿Cuales son los valores más adecuados de corriente y voltaje para que el transistor trabaje correctamente en zona activa? Existe un único punto presente en las características de entrada y salida denominado punto  $Q$ , *punto de reposo* (Quiescent Point) o *punto de trabajo*, el cual corresponde al punto de operación del circuito electrónico. Para ubicarlo se debe tener en cuenta el comportamiento estático del transistor (sin la presencia de señales de entrada o excitaciones), de esta forma, si se conoce el punto  $Q$ , entonces se puede diseñar la red de polarización. Por otro lado, si se conoce el circuito, se puede determinar el punto  $Q$ . Dicho punto pudiera estar ubicado en la región de corte, saturación o región activa.

En los siguientes apartados se indican las diversas formas de polarizar un BJT, estableciendo los puntos de trabajo y condiciones de diseño.

## 2 Circuitos de polarización y punto de trabajo

### 2.1 Circuitos de Polarización fija para BJT

El circuito de la Fig. 1 se conoce como circuito de polarización fija. Planteando la LVK para la malla de entrada de acuerdo a la Fig.1b.

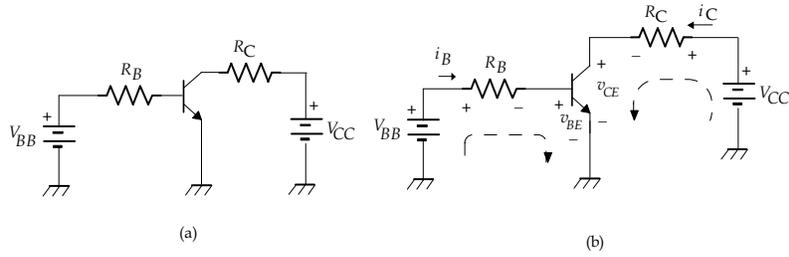


Figure 1: Circuito de polarización Fija.

$$V_{BB} = i_B R_B + v_{BE} \quad (1)$$

Despejando  $i_B$ , la ecuación dada en (2) se conoce como *recta de carga*, su intersección con la curva de entrada  $i_B - v_{BE}$  establece un punto de operación para la base como se indica en la Fig. 2a.

$$i_B = -\frac{v_{BE}}{R_B} + \frac{V_{BB}}{R_B} \quad (2)$$

Para la malla de salida se tiene

$$V_{CC} = i_C R_C + v_{CE} \quad (3)$$

Al despejar  $i_C$ , se obtiene la recta de carga (4). Su intersección con las curvas de salida  $i_C - v_{CE}$  determina un punto de operación, el cual se muestra en la Fig. 2b.

$$i_C = -\frac{v_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (4)$$

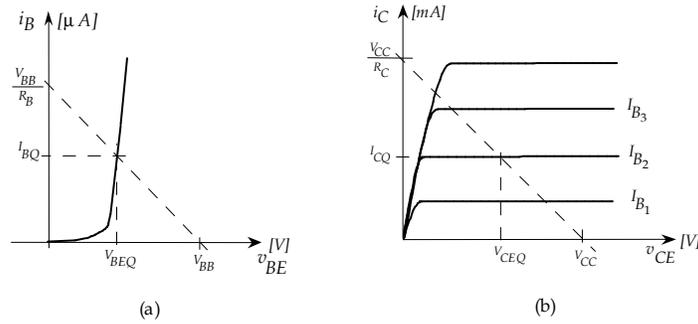


Figure 2: (a) Curva de entrada. (b) Curva de salida.

Considerando los valores de la red de polarización y las fuentes conocidas, es posible determinar el punto de operación. Así para un valor  $v_{BE} = V_{BEQ(ON)}$ , el cual permite la conducción del transistor, de acuerdo a (2) se determina  $i_B = I_{BQ}$ . Suponiendo que el transistor está en zona activa, se cumple que  $i_C = \beta i_B$ , se determina  $i_C = I_{CQ}$ , luego reemplazando en (4) se obtiene  $v_{CE} = V_{CEQ}$ .

Para el diseño de una red de polarización se fija un punto  $Q$ , un voltaje  $V_{CC}$  y  $V_{BB}$ , en conjunto con los parámetros del transistor se determinan los valores de  $R_B$  y  $R_C$ . La desventaja de la red es que mientras mayor  $V_{BB}$  entonces mayor  $I_{BQ}$ , luego el transistor entra en saturación.

## 2.2 Circuito de Autopolarización para BJT

Sea el circuito de la Fig. 3, planteando la LVK para la malla de entrada

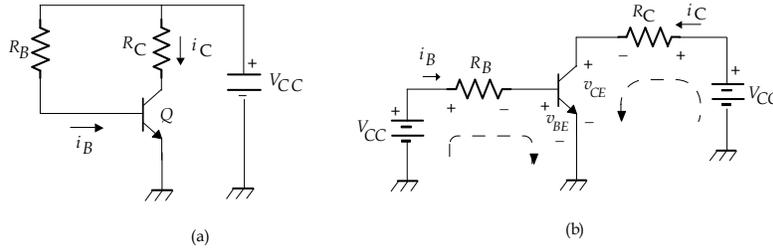


Figure 3: Circuito de autopolarización.

$$V_{CC} = i_B R_B + v_{BE} \quad (5)$$

Luego la recta de carga será

$$i_B = -\frac{v_{BE}}{R_B} + \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (6)$$

Para la malla de salida se tiene

$$V_{CC} = i_C R_C + v_{CE} \quad (7)$$

Así la recta de carga será

$$i_C = -\frac{v_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (8)$$

El punto de operación se determina de la misma forma que en el circuito de polarización fija, es decir para  $v_{BE}$  dado

$$\begin{aligned} I_{BQ} &= -\frac{V_{BE(ON)}}{R_B} + \frac{V_{CC}}{R_B} \\ V_{CEQ} &= V_{CC} - \beta I_{BQ} R_C \end{aligned}$$

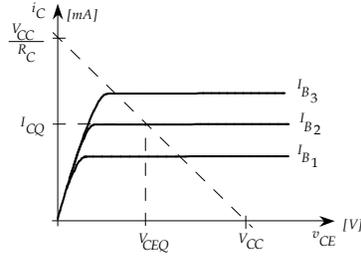


Figure 4: Punto de operación circuito de autopolarización

Si  $R_B \rightarrow \infty$ ,  $\frac{v_{BE}}{R_B} \rightarrow 0$ , así  $i_B \approx \frac{V_{CC}}{R_B}$ . Luego, para un punto  $Q$  dado,  $I_{CQ} = \beta \frac{V_{CC}}{R_B}$ , luego  $V_{CEQ} = V_{cc} - I_{CQ}R_C = V_{cc} \left(1 - \beta \frac{R_C}{R_B}\right)$ .

### 3 Análisis 1

Sea el circuito de la Fig. 5a, se analiza la red de polarización para distintos valores de  $R_B$ , de tal forma de observar como varía el punto de operación. Se considera  $\beta = 100$ ,  $V_{BE(ON)} = 0.65 [V]$ .

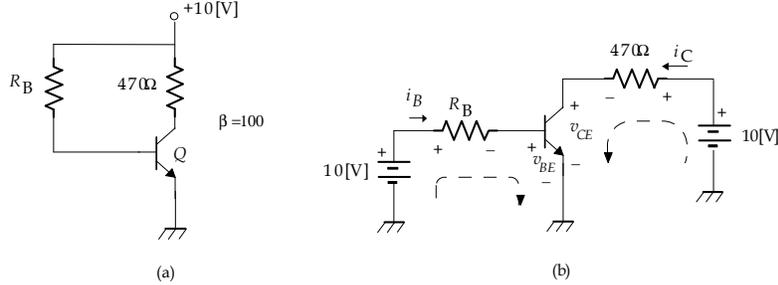


Figure 5: Modificando el punto de operación.

Planteando la malla de entrada y salida

$$\begin{aligned}
 10 [V] &= i_B R_B + V_{BE(ON)} \\
 10 [V] &= i_C 470 [\Omega] + v_{CE} \\
 i_C &= 100 i_B
 \end{aligned} \tag{9}$$

Despejando la corriente de base

$$i_B = \frac{10 [V] - 0.65 [V]}{R_B}$$

$$v_{CE} = 10 [V] - 470 [\Omega] i_C$$

Modificando  $R_B$ , se tiene

- $R_B = 100 [K\Omega]$ ,  $i_B = 93.5 [\mu A]$ ,  $i_C = 9.35 [mA] = I_{CQ}$ ,  $v_{CE} = 5.6 [V] = V_{CEQ}$ .
- $R_B = 820 [K\Omega]$ ,  $i_B = 11.4 [\mu A]$ ,  $i_C = 1.14 [mA] = I_{CQ}$ ,  $v_{CE} = 9.46 [V] = V_{CEQ}$ .
- $R_B = 39 [K\Omega]$ ,  $i_B = 239.7 [\mu A]$ ,  $i_C = 23.97 [mA]$ ,  $v_{CE} = -1.26 [V] = V_{CEQ}$ .

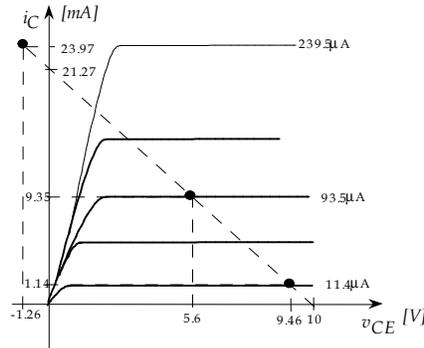


Figure 6: Variaciones del punto Q.

Se observa que para  $R_B = 820 [K\Omega]$ , el punto de operación está cercano a  $10 [V]$ , la corriente  $i_C$  es pequeño, está próximo al corte, eventualmente si disminuye  $V_{CC}$  o crece  $R_B$ , el transistor estaría en la zona de corte. Para  $R_B = 100 [K\Omega]$ , el punto de operación se encuentra en un punto intermedio  $0 < v_{CE} < V_{CC}$ . Finalmente, para  $R_B = 39 [K\Omega]$ , la corriente de base se incrementa haciendo que el transistor entre en saturación.

### 3.1 Circuito de polarización universal para BJT

En los circuitos Fig 1 y Fig. 3,  $R_B$  debe soportar toda la corriente, incluso mientras mayor es la polarización, mayor será la corriente pudiendo llegar a salirse de la zona activa. Para evitar esto, se propone el circuito de la Fig. 7a llamado circuito de polarización universal.

Como se indica en la figura, el circuito es modificado de tal forma de obtener una estructura similar a los analizados, para ello se separan las fuentes, se reagrupan los componentes y se llega al circuito de la Fig.7d, donde

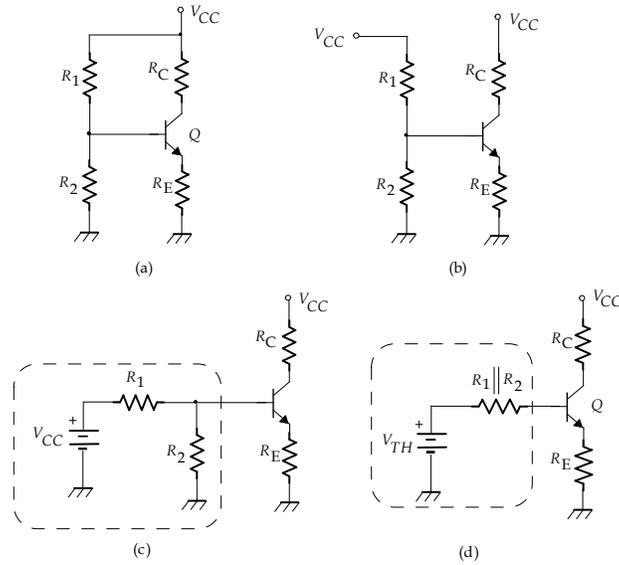


Figure 7: (a) Circuito de polarización universal. (b) Separando la fuente.(c) Agrupando componentes (d) Circuito equivalente.

$$V_{TH} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{CC} \frac{R_{TH}}{R_1} \quad (10)$$

$$R_{TH} = R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

Para plantear la malla de entrada, se usa la referencia de variables indicada en la Fig.8, así se tiene

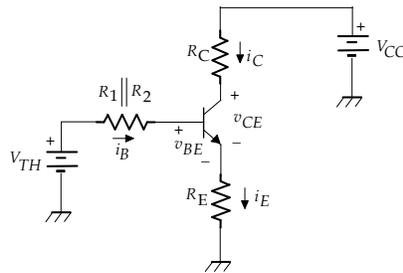


Figure 8: Referencia de las variables involucradas.

$$V_{TH} = i_B R_{TH} + v_{BE} + i_E R_E \quad (12)$$

Para la malla de salida

$$V_{CC} = v_{CE} + R_E i_E + R_C i_C \quad (13)$$

Como  $i_E = \frac{\beta+1}{\beta} i_C$ , reemplazando en (13), y despejando la corriente se obtiene la recta de carga

$$V_{CC} = v_{CE} + \left( \frac{(\beta+1)}{\beta} R_E + R_C \right) i_C \quad (14)$$

$$i_C = -\frac{v_{CE}}{R_C + \frac{(\beta+1)}{\beta} R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + \frac{(\beta+1)}{\beta} R_E} \quad (15)$$

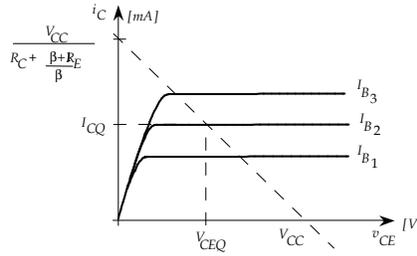


Figure 9: Recta de carga de salida.

Luego, para  $i_B = I_{BQ}$ ,  $i_C = I_{CQ}$  despejando  $V_{CEQ}$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - \left( R_C + R_E \frac{(\beta+1)}{\beta} \right) I_{CQ} \quad (16)$$

Si  $\beta \gg 1$ , entonces  $V_{CEQ} \approx V_{CC} - (R_C + R_E) I_{CQ}$ .

### 3.2 Polarización del transistor pnp

Para el transistor pnp el planteamiento de las ecuaciones se realiza en forma idéntica, sin embargo, para este caso se usa la nomenclatura inversa en las variables de voltaje.

Las ecuaciones de acuerdo a la Fig. 10c, serán

$$\begin{aligned} V_{TH} - i_B (R_1 || R_2) - v_{EB} - i_E R_E &= 0 \\ i_E R_E + v_{EC} + i_C R_C - V_{CC} &= 0 \end{aligned}$$

Para zona activa, al igual que el transistor npn se tiene  $i_C = \beta i_B$ ,  $i_E = \frac{\beta+1}{\beta} i_C$ , luego para un  $v_{EB} = V_{EB(ON)}$ , se obtiene el punto de operación  $I_{CQ}$  y  $V_{ECQ}$ .

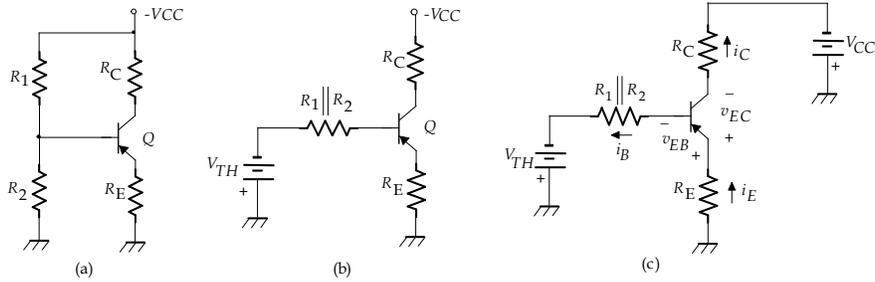


Figure 10: (a) Malla de polarización transistor PNP. (b) Equivalente. (c) Referencia de las variables.

## 4 Determinación del punto de trabajo para una red de polarización universal

Para el circuito de polarización universal de la Fig. 11a, determine el punto  $Q$ . Considere  $\beta = 100$ ,  $V_{BE(ON)} = 0.7 [V]$

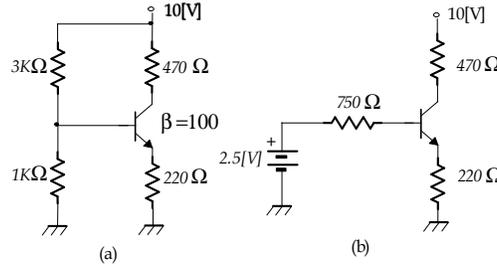


Figure 11: (a) Circuito Polarizado. (b) Equivalente.

El equivalente queda

$$V_{TH} = 10 [V] \frac{1 [K\Omega]}{1 [K\Omega] + 3 [K\Omega]} = 2.5 [V]$$

$$R_{TH} = 1 [K\Omega] || 3 [K\Omega] = 750 [\Omega]$$

Planteando la LVK en la malla de entrada en el circuito de la Fig. 11b.

$$2.5 [V] = i_B 750 [\Omega] + v_{BE} + i_E 220 [\Omega] \quad (17)$$

Para la malla de salida se tiene

$$10 [V] = i_C 470 [\Omega] + v_{CE} + i_E 220 [\Omega] \quad (18)$$

Como  $i_C = \beta i_B$ , e  $i_E = i_B + i_C$

$$2.5 [V] - 0.7[V] = i_C \left( \frac{750 [\Omega]}{100} + \frac{101}{100} 220 [\Omega] \right) \quad (19)$$

Así  $I_{CQ} = 7.84 [mA]$  y  $V_{CEQ} = 4.57 [V]$ . Dibujando la recta de carga se tiene

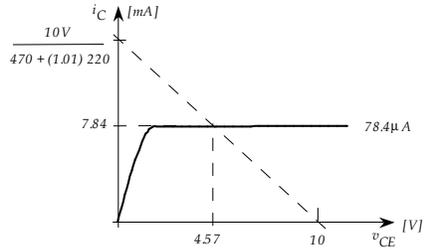


Figure 12: Recta de carga y punto de operación.

## 5 Conclusiones

El BJT tiene distintas estructuras de redes de polarización. Para determinar el punto  $Q$ , es necesario plantear la malla de salida y la malla de entrada en cada una de las configuraciones. Para diseñ de una red de polarización se debe establecer un punto de trabajo (diseño en corriente continua), se definen los valores de  $V_{CEQ}$  e  $I_{CQ}$  ( $I_{BQ}$ ), pero pueden requerirse datos adicionales, tales como los voltajes disponibles para polarización y/o valores para los  $R_{TH}$  o  $R_B$  de las configuraciones. La intersección de la recta de carga de salida con las curvas de salida establece el punto de operación

## References

- [1] Savant, C. Roden, M, Carpenter, G. 1992. *Diseño Electrónico*. Adisson-Wesley
- [2] Millman, J., Halkias, C. 1976. *Electrónica Integrada*. McGraw-Hill
- [3] Boylestad, R., Nashelsky, L. 1989. *Electrónica: Teoría de Circuitos*. Prentice-Hall.