

CLASE PRÁCTICA 2 RESUELTA. PLAN D

PROBLEMAS DE POLARIZACIÓN DEL TRANSISTOR BIPOLAR (BJT)

Sumario:

1. Introducción.
2. Solución de problemas.
3. Conclusiones.

Bibliografía:

1. Rashid M. H. "Circuitos Microelectrónicos. Análisis y diseño", pag. 186-188 y 192-196.

Objetivos:

- Que los estudiantes ejerciten el cálculo del punto de operación y la potencia disipada empleando diferentes métodos de solución, y la obtención de la línea de carga estática del BJT.
- Profundizar en el principio de operación del regulador de voltaje serie y realizar los cálculos de sus principales variables.

Problemas:

1. En el circuito mostrado en la figura 1, calcule:
 - a) El punto de operación del transistor. Represente el punto de operación y la línea de carga estática en la característica de salida.
 - b) La potencia que se disipa en el colector del transistor en reposo y la potencia que entrega la batería V_{CC} .
 - c) El valor máximo de R_C con el cual el transistor permanece trabajando en la región activa.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 150$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}} = 0,8 \text{ V}$;
 $V_{CE \text{ sat}} = 0,1 \text{ V}$ e $I_{CO} = 0$.

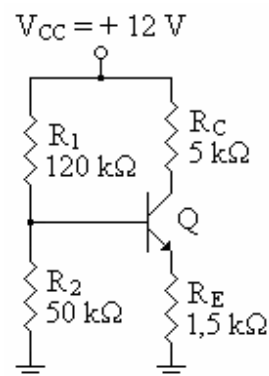
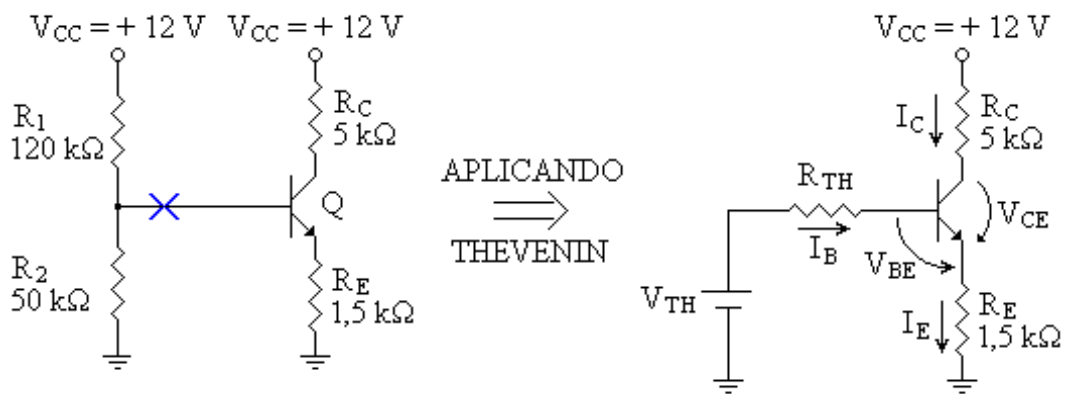


Fig. 1: Problema 1.

Respuesta:

- a) El punto de operación del transistor bipolar se caracteriza por la I_{BQ} , I_{CQ} y el V_{CEQ} . Este es un circuito autopolarizado. Para calcular el punto de operación se abre el circuito como se muestra y se sustituye por una fuente referida a tierra en serie con una resistencia equivalente aplicando el Teorema de Thevenin.

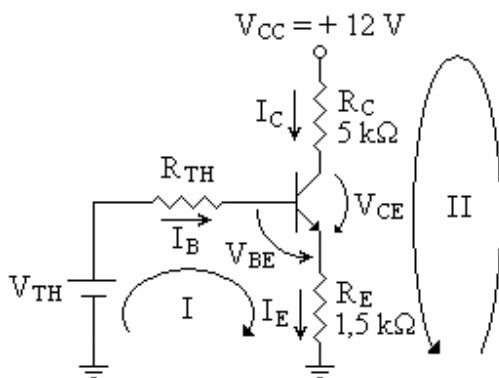


$$V_{TH} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12 \cdot \frac{50}{120 + 50} = 3,53 \text{ V}$$

$$R_{TH} = R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{120 \cdot 50}{120 + 50} = 35,29 \text{ k}\Omega$$

EL VOLTAJE DE THEVENIN SIEMPRE ESTÁ REFERIDO A TIERRA

El transistor bipolar puede trabajar en activa, saturación o corte. Se supondrá que el transistor está operando en la zona de activa:



Aplicando LKV en I (malla en a base del transistor):

$$-V_{TH} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E = 0 \quad (1)$$

pero $I_E = I_B + I_C$ e $I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CO}$

luego $I_E = (1 + \beta_F) \cdot I_B \quad (2)$

Sustituyendo (2) en (1) nos queda que:

$$-V_{TH} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + (1 + \beta_F) \cdot I_B \cdot R_E = 0$$

Despejando la corriente de I_B :

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta_F) \cdot R_E} = \frac{3,53 - 0,7}{35,29 + (1 + 150) \cdot 1,5}$$

De donde: $I_{BQ} = 0,010 \text{ mA} = 10 \mu\text{A}$

$$I_{CQ} = \beta_F \cdot I_{BQ} = 150 \cdot 0,01 = 1,5 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en II (malla de salida) para calcular el valor de V_{CEQ} :

$$-V_{CC} + I_{CQ} \cdot R_C + V_{CEQ} + I_{EQ} \cdot R_E = 0$$

Como $\beta_F = 150 \gg 1 \Rightarrow I_E \approx I_C$ de donde:

$$-V_{CC} + V_{CEQ} + I_{CQ} \cdot (R_C + R_E) = 0$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot (R_C + R_E) = 12 - 1,5 \cdot (5 + 1,5) = 2,25 \text{ V} > V_{CE\text{sat}} = 0,1 \text{ V} \therefore \text{Activa}$$

$$R / \boxed{\text{Punto de Operación: } Q(I_{BQ} = 10 \mu\text{A}; I_{CQ} = 1,5 \text{ mA}; V_{CEQ} = 2,25 \text{ V})}$$

Para representar el punto de operación y la línea de carga estática en la característica de salida del BJT, a partir de la LKV obtenida en la malla II, despejamos la I_C en función del V_{CE} :

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

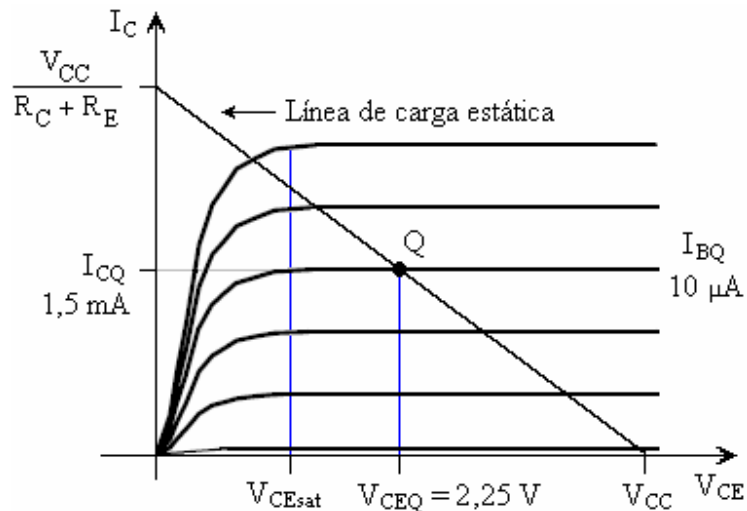
Como $\beta_F = 150 \gg 1 \Rightarrow I_E \approx I_C$, de donde: $-V_{CC} + V_{CE} + I_C \cdot (R_C + R_E) = 0$

y al despejar I_C nos queda que:

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

Si $I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$

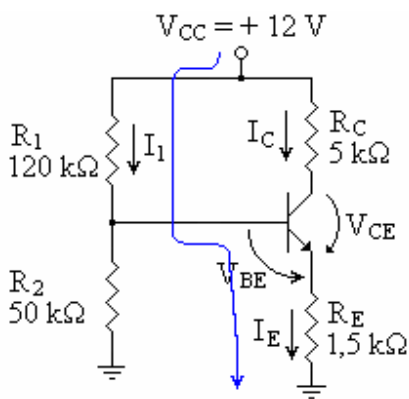
Si $V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$



b) Potencia que se disipa en el colector del transistor bipolar:

$$R / \boxed{P_{C\text{max}} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} = 1,5 \cdot 2,25 = 3,375 \text{ mW}}$$

Potencia que entrega la batería: $P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{CC} = V_{CC} \cdot (I_{CQ} + I_1)$ (ya que $I_{CC} = I_{CQ} + I_1$)



Aplicando una LKV como se muestra en la figura de la izquierda se podrá calcular el valor de I_1 :

$$-V_{CC} + I_1 \cdot R_1 + V_{BE} + I_E \cdot R_E = 0$$

pero al ser $\beta_F = 150 \gg 1 \Rightarrow I_E \approx I_C$

$$-V_{CC} + I_1 \cdot R_1 + V_{BE} + I_C \cdot R_E = 0$$

y al despejar I_1 nos queda que:

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_C \cdot R_E}{R_1} = \frac{12 - 0,7 - 1,5 \cdot 1,5}{120} = 75 \mu\text{A}$$

Luego:

$$R / P_{CC} = V_{CC} \cdot (I_{CQ} + I_1) = 12 \cdot (1,5 + 0,075) = 18,9 \text{ mW}$$

c) A partir de la línea de carga estática representada en la característica de salida, se puede observar que si se aumenta el resistor R_C disminuye el V_{CE} corriéndose el punto de operación hacia la zona de saturación sin variar el valor de I_{CQ} . El valor máximo de R_C ($R_{C\text{max}}$) se calcula cuando el transistor alcanza el límite de la región de saturación, al hacerse $V_{CE} = V_{CE\text{sat}}$.

De la malla de salida nos queda que:

$$-V_{CC} + I_C \cdot R_{C\text{max}} + V_{CE\text{sat}} + I_{CQ} \cdot R_E = 0 \quad (\text{Al ser } \beta_F = 150 \gg 1 \Rightarrow I_{EQ} \approx I_{CQ})$$

y al despejar nos queda que:

$$R_{C\text{max}} = \frac{V_{CC} - V_{CE\text{sat}} - I_{CQ} \cdot R_E}{I_{CQ}} = \frac{12 - 0,2 - 1,5 \cdot 1,6}{1,5} = 6,36 \text{ k}\Omega$$

$$R / R_{C\text{max}} = 6,36 \text{ k}\Omega$$

2. En el circuito mostrado en la figura 2, calcule R_1 para que $I_E = 2 \text{ mA}$.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 50$; $V_{BE} = 0,7\text{V}$;
 $V_{BE\text{sat}} = 0,8\text{V}$; $V_{CE\text{sat}} = 0,2\text{V}$; $I_{CO} = 0$.

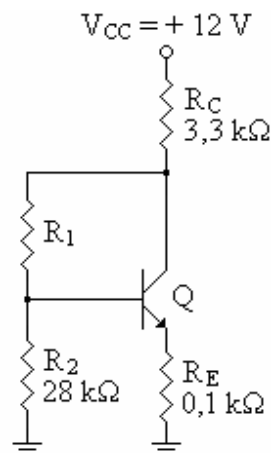
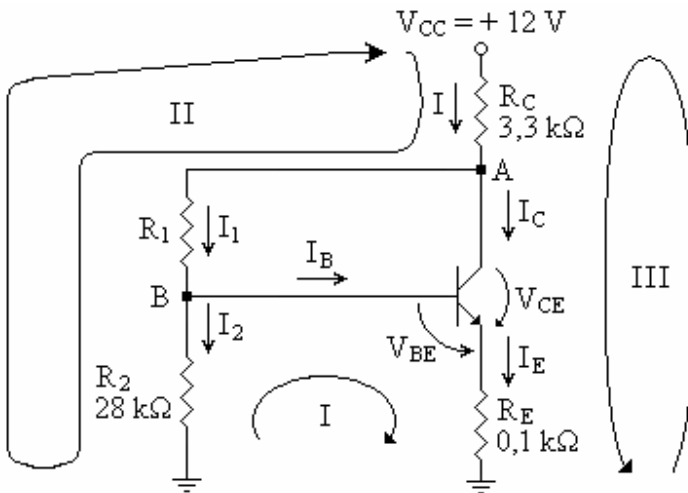


Fig. 2: Problema 2.

Respuesta:

Suponiendo que el transistor está trabajando en la zona de activa:



Aplicando LKC en el nodo B:

$$-I_1 + I_2 + I_B = 0$$

despejando I_1 : $I_1 = I_2 + I_B$ (1)

pero al ser $I_E = I_B + I_C$

donde $I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CO}$

luego $I_E = I_B + I_C = I_B + \beta_F \cdot I_B$

y al despejar I_B nos queda que:

$$I_B = \frac{I_E}{\beta_F + 1} = \frac{2}{50 + 1} = 0,039 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en la malla I podremos calcular el valor de I_2 :

$$-I_2 \cdot R_2 + V_{BE} + I_E \cdot R_E = 0 \quad (2)$$

despejando I_2 :
$$I_2 = \frac{V_{BE} + I_E \cdot R_E}{R_2} = \frac{0,7 + 2 \cdot 0,1}{28} = 0,032 \text{ mA} = 32 \mu\text{A}$$

luego al sustituir los valores de I_B e I_2 en (1) obtenemos que:

$$I_1 = 0,039 + 0,032 = 0,071 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en la malla II podremos calcular R_1 :

$$-V_{CC} + I \cdot R_C + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = 0 \quad (3)$$

Pero nos hace falta el valor de la corriente que circula por R_C . la cual se puede calcular aplicando una LKC en el nodo: $-I + I_1 + I_C = 0$

despejando I_1 nos queda que: $I = I_1 + I_C$ (4)

pero
$$I_C = I_E - I_B = 2 - 0,039 = 1,96 \text{ mA}$$

luego al sustituir I_C e I_1 en (4) obtenemos que: $I = I_1 + I_C = 0,071 + 1,96 = 2,03 \text{ mA}$

y al despejar R_1 en (3) nos queda que:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - I \cdot R_C - I_2 \cdot R_2}{I_1} = \frac{12 - 2,03 \cdot 3,3 - 0,032 \cdot 28}{0,071} = 62,04 \text{ k}\Omega$$

Aplicando LKV en la malla III para comprobar que el transistor está en activa:

$$-V_{CC} + I \cdot R_C + V_{CE} + I_E \cdot R_E = 0$$

y al despejar V_{CE} nos queda que: $V_{CE} = V_{CC} - I \cdot R_C - I_E \cdot R_E$

$$V_{CE} = 12 - 2,03 \cdot 3,3 - 2 \cdot 0,1 = 5,1 \text{ V} > V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V} \therefore \text{Esta en activa}$$

$$R / \boxed{R_1 = 62 \text{ k}\Omega}$$

3. En el regulador de voltaje serie de la figura 3:

- Explique su principio de operación y compárelo con el regulador paralelo.
- Calcule el punto de operación del transistor.
- Calcule las potencias disipadas en el Zener y en el colector del transistor.
- Calcule la potencia P_{CD} entregada por la batería.
- Para el caso que $V_{CC} = V_{NR} = 12\text{V} \pm 1\text{V}$, calcule el valor máximo de R_S para que el Zener se mantenga dentro de la región de regulación.

Datos: Q: $\beta_F = h_{FE} = 100$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}} = 0,8 \text{ V}$;
 $V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V}$; $I_{CO} = 0$.

DZ: $V_{ZO} = 5,7\text{V}$; $I_{ZK} = 2 \text{ mA}$; $R_Z = 0$.

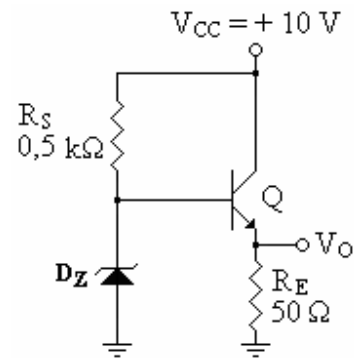
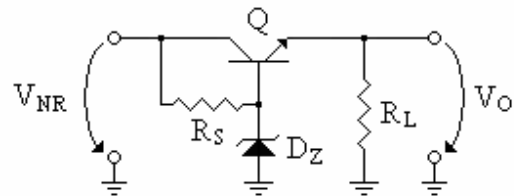


Fig. 3: Problema 3.

a) El regulador de voltaje paralelo ya estudiado es el circuito de este tipo más sencillo; presenta como deficiencia la de ser baja la corriente y la potencia que puede entregar en su salida, limitado por la capacidad del Zener empleado.

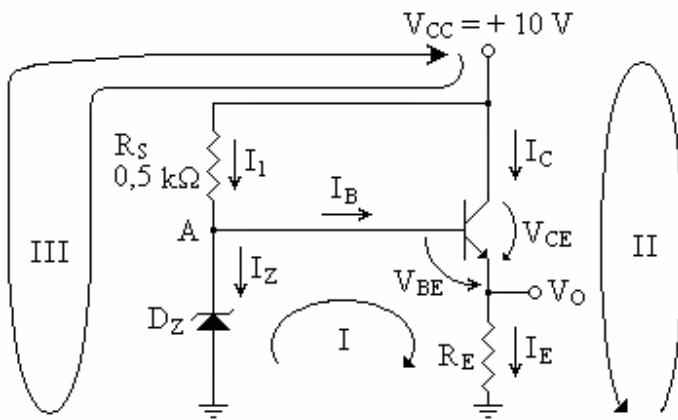
El regulador de voltaje serie con diodo Zener mostrado a continuación mejora esta deficiencia, pues el transistor que está conectado en serie con la carga R_L es el encargado de entregar la corriente de salida I_L .



Si se abre la carga se hace $I_L = 0$, pero la corriente por el Zener no crece bruscamente como ocurre con el regulador paralelo. Esto se debe a que el transistor opera en la región activa, por lo que su $I_B = I_L / \beta_F$. Como $\beta_F \gg 1$, aún para caso peor en que se esté entregando la máxima corriente a la carga, la I_B será relativamente baja. Desde el punto de vista del diseño, esto provoca que la disipación de potencia máxima en el Zener sea baja y no sea una limitante como lo es para el caso del regulador paralelo.

El principio de operación de este regulador serie se basa en la utilización de un Zener como referencia interna, con un voltaje V_Z que es independiente de las variaciones de V_{NR} y de I_L . Si se analizan estas dos variaciones en forma independiente, para el caso en que R_L sea constante y se varía V_{NR} : se observa de las expresiones anteriores, que I_{CQ} e I_{BQ} se mantienen casi constantes, pero al crecer V_{NR} aumentan I_{RS} e I_Z . La línea de carga se desplaza hacia la derecha con la misma pendiente, por lo que V_{CEQ} crece y contrarresta la posible variación de V_{NR} manteniendo a V_O casi constante. En el caso en que V_{NR} se mantenga constante y se varíe a R_L : si R_L decrece, I_{CQ} e I_{BQ} aumentan pero I_Z disminuye. En la característica de salida del transistor, la línea de carga incrementa su pendiente pero mantiene el intercepto en V_{NR} que no cambia. El valor de V_{CEQ} se mantiene casi constante pues V_O apenas varía.

b) Suponiendo que el diodo Zener está en ruptura, $V_{ZO} = 5,7 \text{ V}$ y la I_Z debe ser mayor que I_{ZK} . Como $R_Z = 0$ y suponiendo que el transistor está en activa, al aplicar unas LKV en I (la base del transistor) se obtiene que:



$$-V_{ZO} + V_{BE} + I_E \cdot R_E = 0$$

despejando la corriente I_E :

$$I_E = \frac{V_{ZO} - V_{BE}}{R_E} = \frac{5,7 - 0,7}{0,05} = 100 \text{ mA}$$

pero $I_E = I_B + I_C$ y al ser $\beta_F \gg 1$

$$I_C \approx I_E$$

luego $I_{CQ} = 100 \text{ mA}$

$$I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CQ} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta_F} = \frac{100}{100} = 1 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en la malla II calcularemos el V_{CEQ} : $-V_{CC} + V_{CEQ} + I_E \cdot R_E = 0$

y al despejar V_{CE} nos queda que:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_E \cdot R_E = 10 - 100 \cdot 0,05 = 5 \text{ V} > V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V} \therefore Q \text{ está en Activa}$$

$$R/ \text{ Punto de Operación: } Q(I_{BQ} = 1 \text{ mA}; I_{CQ} = 100 \text{ mA}; V_{CEQ} = 5 \text{ V})$$

c) $P_{Z \text{ max}} = I_Z \cdot V_{ZO}$ ya que $R_Z = 0 \Omega$

Aplicando LKC en A podremos calcular el valor de I_Z :

$$-I_1 + I_Z + I_B = 0 \Rightarrow I_Z = I_1 - I_B \quad (1)$$

Cálculo de I_1 : Aplicando LKV en la malla III podremos calcular I_1 :

$$-V_{CC} + I_1 \cdot R_S + V_{ZO} = 0 \Rightarrow I_1 = \frac{V_{CC} - V_{ZO}}{R_S} = \frac{10 - 5,7}{0,5} = 8,6 \text{ mA}$$

Luego sustituyendo en (1) obtenemos que:

$$I_Z = 8,6 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = 7,6 \text{ mA} > I_{ZK} = 2 \text{ mA} \therefore \text{El Zener regula}$$

$$R/ \begin{cases} P_{Z \text{ max}} = I_Z \cdot V_{ZO} = 7,6 \cdot 5,7 = 43,3 \text{ mW} \\ P_C = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ W} \end{cases}$$

$$d) R/ P_{CC} = V_{CC} \cdot (I_1 + I_{CQ}) = 10 \cdot (8,6 + 100) = 1,086 \text{ W}$$

e) Si $V_{CC} = V_{NR} = 12V \pm 1V$, el valor máximo de R_S para que el Zener se mantenga dentro de la región de regulación se calcula para la peor condición que es cuando $V_{NR} = V_{\min \text{ inst}} = 11 V$, $I_{Z \text{ min inst}} = I_{ZK}$ y la corriente de la carga es máxima (en este caso I_E / β_F).

$$R_{S \text{ max}} = \frac{V_{\min \text{ inst}} - V_{ZO}}{I_{ZK} + \frac{I_E}{\beta_F}} = \frac{11 - 5,7}{2 + \frac{100}{100}} = 1,767 \text{ k}\Omega \quad (R_Z = 0)$$

$$R / \boxed{R_{S \text{ max}} = 1,767 \text{ k}\Omega}$$

4. En el circuito de la figura 4, calcule el punto de operación y la potencia disipada en colector del transistor en reposo.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 100$; $V_{BE} = 0,7V$; $V_{CEsat} = 0,1V$
y $I_{CO} = 0$.

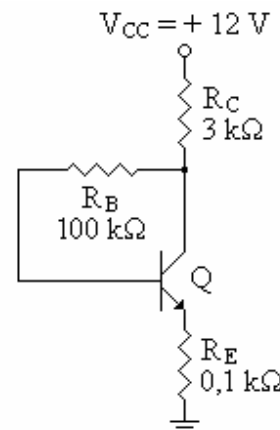
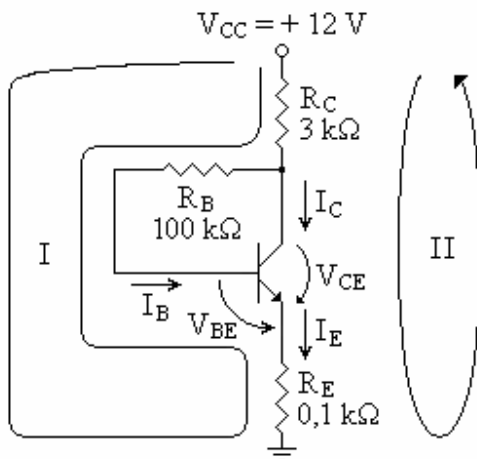


Fig. 4: Problema 4.

Respuesta:



Este circuito tiene la característica de que el transistor nunca estará en saturación ya que el colector es más positivo que la base del transistor. Suponiendo que el transistor está en activa:

Aplicando LKV en la malla I obtenemos que:

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

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

$$\text{Al ser } I_E = I_B + I_C \text{ e } I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CO} \quad \text{0}$$

luego
$$I_E = I_B + I_C = (\beta_F + 1) \cdot I_B$$

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

$$-V_{CC} + [R_B + (\beta_F + 1) \cdot (R_C + R_E)] \cdot I_B + V_{BE} = 0$$

Despejando la I_B :
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1) \cdot (R_C + R_E)} = \frac{12 - 0,7}{100 + (101) \cdot (3 + 0,1)} = 27,35 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta_F \cdot I_{BQ} = 100 \cdot 0,2735 = 2,735 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en la malla II calcularemos el V_{CEQ} :

$$-V_{CC} + (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R_C + V_{CEQ} + (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R_E = 0$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R_C - (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R_E$$

$$V_{CEQ} = 12 - (2,735 + 0,02735) \cdot 3 - (2,735 + 0,02735) \cdot 0,1 = 3,44 \text{ V} > 0,2 \text{ V} \therefore Q \text{ está en Activa}$$

R/ Punto de Operación: $Q(I_{BQ} = 27,35 \mu A; I_{CQ} = 2,735 \text{ mA}; V_{CEQ} = 3,44 \text{ V})$

R/ $P_C = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} = 2,735 \cdot 3,44 = 9,44 \text{ mW}$

5. En el circuito de la figura 5, calcule el punto de operación y la potencia disipada en colector del transistor en reposo.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 200$; $V_{EB} = 0,6 \text{ V}$; $V_{EC \text{ sat}} = 0,1 \text{ V}$
e $I_{CO} = 0$.

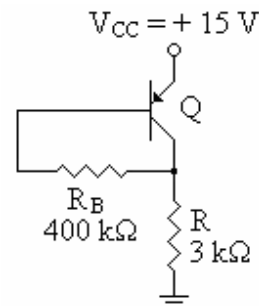
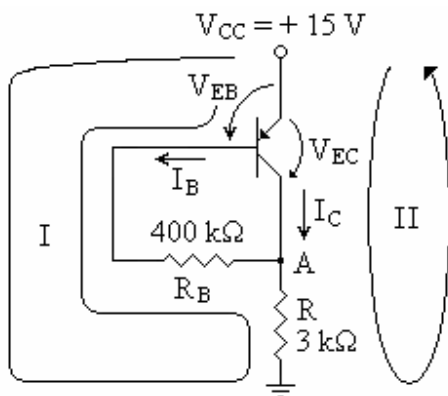


Fig. 5: Problema 5.

Respuesta:



Suponiendo el transistor en activa y aplicando LKV en la malla I calcularemos la I_{BQ} :

$$-V_{CC} + V_{EB} + I_{BQ} \cdot R_B + (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R = 0 \quad (1)$$

pero
$$I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CO} \quad (2)$$

luego al sustituir (2) en (1) nos queda que:

$$-V_{CC} + V_{EB} + I_{BQ} \cdot R_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{BQ} \cdot R = 0$$

despejando I_{BQ} obtenemos que:
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B + (\beta_F + 1) \cdot R} = 14,36 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta_F \cdot I_{BQ} = 200 \cdot 0,01436 = 2,87 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en la malla II calcularemos el V_{ECQ} :

$$-V_{CC} + V_{ECQ} + (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R = 0$$

$$V_{ECQ} = V_{CC} - (I_{CQ} + I_{BQ}) \cdot R = 15 - (2,87 + 0,01436) \cdot 3 = 6,34 \text{ V} > 0,1 \text{ V} \therefore Q \text{ está en Activa}$$

$$R/ \boxed{\text{Punto de Operación: } Q(I_{BQ} = 14,36 \mu\text{A}; I_{CQ} = 2,87 \text{ mA}; V_{ECQ} = 6,34 \text{ V})}$$

$$P_C = I_{CQ} \cdot V_{ECQ} = 2,87 \cdot 6,34 = 18,21 \text{ mW}$$

$$R/ \boxed{P_C = 18,21 \text{ mW}}$$

6. En los circuitos de la figura 6a) y 6b), calcule el punto de operación y la potencia disipada en colector del transistor en reposo.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 260$; $V_{BE} = 0,6 \text{ V}$; $V_{CE \text{ sat}} = 0,1 \text{ V}$ y $I_{CO} = 0$.

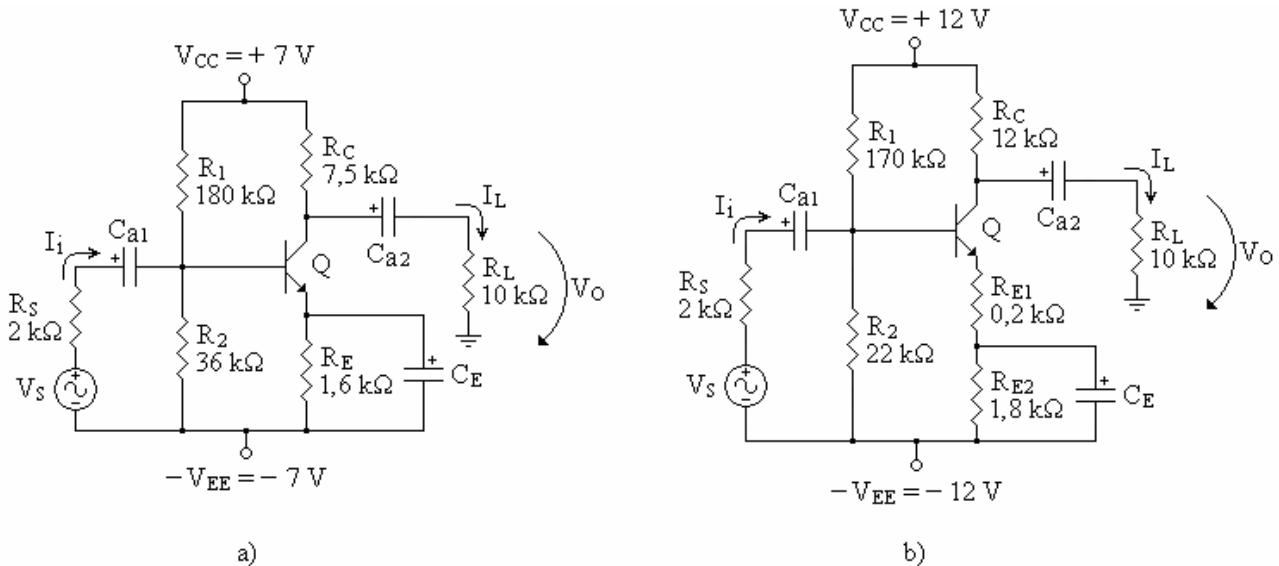
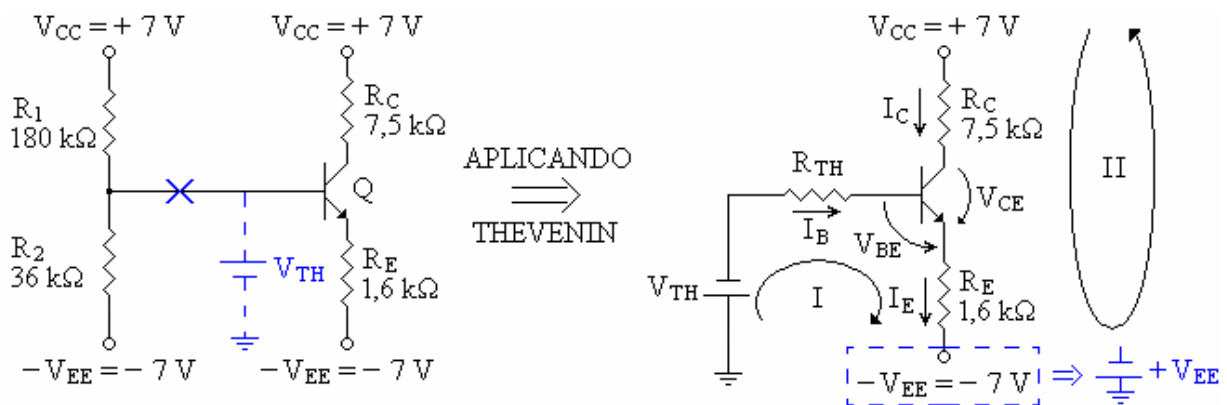


Fig. 6: Problema 6.

Respuesta del circuito de la figura 6 a):

En alterna los condensadores se tienen en cuenta para el análisis dinámico, cuando se hace el análisis estático (directa) para calcular el punto de operación, estos se abren. Suponiendo el transistor en activa:



¡¡LA FUENTE DE THEVENIN SIEMPRE ESTÁ REFERIDA A TIERRA!!

Primera forma de calcular el V_{TH} : $V_{TH} = V_{R_2} - V_{EE}$ y $V_{R_2} = (V_{CC} + V_{EE}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

$$V_{TH} = (V_{CC} + V_{EE}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{EE} = 14 \cdot \frac{36}{180 + 36} - 7 = -4,67 \text{ V}$$

Segunda forma de calcular el V_{TH} : (Aplicando superposición)

$$V_{TH} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{EE} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 7 \cdot \frac{36}{180 + 36} - 7 \cdot \frac{180}{180 + 36} = -4,67 \text{ V}$$

$$R_{TH} = R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{180 \cdot 36}{180 + 36} = 30 \text{ k}\Omega$$

Aplicando LKV en I (malla en a base del transistor):

$$V_{TH} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E - V_{EE} = 0 \quad (1)$$

pero $I_E = I_B + I_C$ e $I_C = \beta_F \cdot I_B + (\beta_F + 1) \cdot I_{CO}^0$, luego $I_E = (1 + \beta_F) \cdot I_B$ (2)

Sustituyendo (2) en (1) nos queda que: $V_{TH} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + (1 + \beta_F) \cdot I_B \cdot R_E - V_{EE} = 0$

Despejando la corriente de I_B :

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{TH} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta_F) \cdot R_E} = \frac{7 - 4,64 - 0,6}{30 + (1 + 260) \cdot 1,6} = 3,87 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta_F \cdot I_{BQ} = 260 \cdot 0,00387 = 1 \text{ mA}$$

Aplicando LKV en II (malla de salida) para calcular el V_{CEQ} :

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

pero al ser $\beta_F = 260 \gg 1 \Rightarrow I_E \approx I_C$ luego: $-V_{CC} + V_{CEQ} + I_{CQ} \cdot (R_C + R_E) - V_{EE} = 0$

y al despejar V_{CEQ} nos queda que: $V_{CEQ} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ} \cdot (R_C + R_E)$

$$V_{CEQ} = 7 + 7 - 1 \cdot (7,5 + 1,6) = 4,9 \text{ V} > V_{CE \text{ sat}} = 0,1 \text{ V} \therefore \text{Activa}$$

$$\text{R/ } \boxed{\text{Punto de Operación: } Q(I_{BQ} = 3,87 \mu\text{A}; I_{CQ} = 1 \text{ mA}; V_{CEQ} = 4,9 \text{ V})}$$

$$\text{R/ } \boxed{P_C = I_{CQ} \cdot V_{ECQ} = 1 \cdot 4,9 = 4,9 \text{ mW}}$$

Respuesta del circuito de la figura 6 b):

$$\text{R/ } \boxed{\text{Punto de Operación: } Q(I_{BQ} = 3,97 \mu\text{A}; I_{CQ} = 1 \text{ mA}; V_{CEQ} = 10 \text{ V})} \text{ y } \text{R/ } \boxed{P_C = 10 \text{ mW}}$$

7. a) Se desea diseñar un circuito de polarización de transistor como el que se ilustra en la figura 1. Use un transistor 2N2222, para el cual se tiene que: $\beta_{\text{mínimo}} = 100$; $\beta_{\text{nominal}} = 173$; $I_S = 3,3 \cdot 10^{-14}$ A y $V_A = 100$ V. La corriente de operación del colector se tiene que ajustar a $I_{CQ} = 1$ mA. La fuente de alimentación de CD es $V_{CC} = 9$ V. Supóngase $V_{BE} = 0,7$ V en la región activa y que $\beta_F = \beta_r$.
- b) Calcule los parámetros de señal pequeña r_π , g_m y r_o del transistor.

Respuesta:

a) Diseño del circuito de polarización empleando un autopolarizado:

1^{er} Paso: Cálculo de α_F , I_E e I_B :
$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} = \frac{100}{1 + 100} = 0,99$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha_F} = \frac{1}{0,99} = 1,01 \text{ mA} \approx 1 \text{ mA} \quad \text{e} \quad I_B = \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ mA} \quad (I_{CO} = 0)$$

2^{do} Paso: Cálculo de V_E , R_E y la disipación de potencia de R_E :

$$V_E = \frac{V_{CC}}{3} = \frac{9}{3} = 3 \text{ V} \Rightarrow R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{3}{1,01} = 2,97 \text{ k}\Omega \approx 3 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_E} = I_E^2 \cdot R_E = (1,01)^2 \cdot 3 = 3,06 \text{ mW}$$

3^{er} Paso: Cálculo de V_{CE} :
$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{3} = \frac{9}{3} = 3 \text{ V}$$

4^{to} Paso: Cálculo de R_C y su disipación de potencia:

$$I_C \cdot R_C = V_{CC} - V_{CE} - V_E = 9 - 3 - 3 = 3 \text{ V} \Rightarrow R_C = \frac{3}{I_C} = \frac{3}{1} = 3 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_C} = I_C^2 \cdot R_C = (1)^2 \cdot 3 = 3 \text{ mW}$$

5^{to} Paso: Cálculo de R_{TH} y V_{TH} :
$$R_{TH} = \frac{(1 + \beta_F) \cdot R_E}{10} = \frac{(1 + 100) \cdot 3}{10} = 30,3 \text{ k}\Omega$$

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + V_E = 3 + 0,7 + 0,01 \cdot 30,3 = 4 \text{ V}$$

6^{to} Paso: Cálculo de R_1 y su disipación de potencia:

$$R_1 = \frac{R_{TH} \cdot V_{CC}}{V_{TH}} = \frac{30,3 \cdot 9}{4} = 68,175 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_1} = \frac{(V_{CC} - V_{TH})^2}{R_1} = \frac{(9 - 4)^2}{68,175} = 0,37 \text{ mW}$$

7^{to} Paso: Cálculo de R_2 y su disipación de potencia:

$$R_2 = \frac{R_{TH} \cdot V_{CC}}{V_{CC} - V_{TH}} = \frac{30,3 \cdot 9}{9 - 4} = 54,54 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_2} = \frac{V_{TH}^2}{R_2} = \frac{(9)^2}{54,54} = 1,49 \text{ mW}$$

b) Cálculo de los parámetros de señal pequeña r_π , g_m y r_o del transistor:

$$r_\pi = \frac{\beta_F \cdot V_T}{I_{CQ}} = \frac{100 \cdot 25,8}{1} = 25,8 \text{ k}\Omega, \quad g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{1}{25,8} = 38,76 \text{ mS}, \quad r_o = \frac{V_A}{I_{CQ}} = \frac{100}{1} = 100 \text{ k}\Omega$$

8. En el circuito mostrado en la figura 8, calcule:

- El punto de operación del transistor y la potencia que disipa el transistor en reposo.
- El valor máximo de R_C con el cual el transistor permanece trabajando en la región activa.
- Represente el punto de operación y la línea de carga estática en la característica de salida del transistor.

Datos: $\beta_F = h_{FE} = 100$; $V_{BE} = 0,6 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}} = 0,8 \text{ V}$; $V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V}$ e $I_{CO} = 0$.

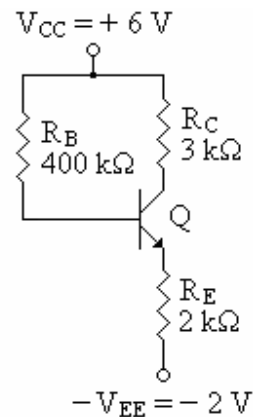


Fig. 8: Problema 8.

Respuesta:

a) Punto de Operación: $Q(I_{BQ} = 12,3 \mu\text{A}; I_{CQ} = 1,23 \text{ mA}; V_{CEQ} = 1,85 \text{ V})$ y $P_C = 2,28 \text{ mW}$

b) $R_{C \text{ max}} = 4,34 \text{ k}\Omega$

9. En el circuito mostrado en la figura 9, se conoce que $I_{CQ} = 2 \text{ mA}$; $V_{RE} = 6 \text{ V}$ y $\beta_F = h_{FE} = 100$. Determine:
- El punto de operación del transistor y la región de trabajo del mismo.
 - El valor de R_E y R_B .
 - Represente el punto de operación y la línea de carga estática en la característica de salida del transistor.

Datos: $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}} = 0,8 \text{ V}$; $V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V}$
e $I_{CO} = 0$.

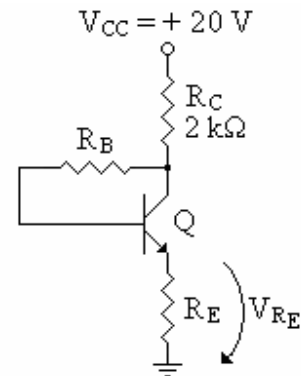


Fig. 9: Problema 9.

Respuesta:

a) Punto de Operación: $Q(I_{BQ} = 20 \mu\text{A}; I_{CQ} = 2 \text{ mA}; V_{CEQ} = 9,96 \text{ V})$ Activa

b) $R_E = 2,97 \text{ k}\Omega$ y $R_B = 463 \text{ k}\Omega$

10. En el regulador de voltaje serie de la figura 10:

- El valor máximo de R_S para que el diodo zener regule adecuadamente si $I_{ZK} = 5 \text{ mA}$ y $R_E = 5 \text{ k}\Omega$.
- Las resistencias R_C y R_E para fijar una corriente de colector de $I_C = 1 \text{ mA}$ y $V_{CE} = 5 \text{ V}$.

Datos: Q: $\beta_F = h_{FE} = 100$; $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}} = 0,8 \text{ V}$;
 $V_{CE \text{ sat}} = 0,2 \text{ V}$; $I_{CO} = 0$.
DZ: $V_{ZO} = 8,7 \text{ V}$; $I_{ZK} = 5 \text{ mA}$ y $R_Z = 0$.

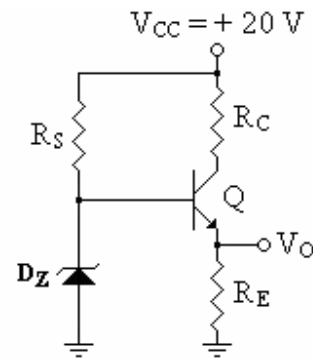


Fig. 10: Problema 10.

Respuesta:

a) $R_{B \text{ max}} = 2,253 \text{ k}\Omega$

b) $R_E = 2,921 \text{ k}\Omega$ y $R_C = 7 \text{ k}\Omega$

11. En el circuito de la figura 11 se muestra dos transistores trabajando en la región de activa con $\beta_{F1} = h_{FE1} = 100$ y $\beta_{F2} = h_{FE2} = 50$. Determine el punto de operación de cada transistor.

Datos: $V_{BE1} = V_{BE2} = 0,7 \text{ V}$; $V_{BE \text{ sat}1} = V_{BE \text{ sat}2} = 0,8 \text{ V}$;
 $V_{CE \text{ sat}1} = V_{CE \text{ sat}2} = 0,2 \text{ V}$; $I_{CO1} = I_{CO2} = 0$.

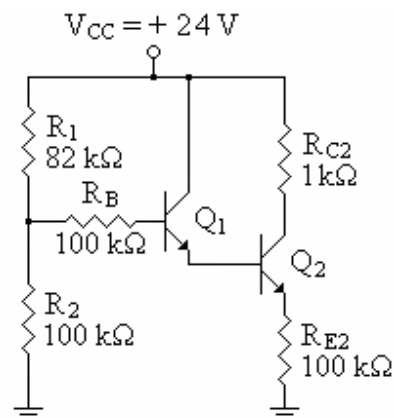


Fig. 11: Problema 11.

Respuesta: Punto de Operación: $Q_1 \left(I_{BQ_1} = 28,88 \text{ nA}; I_{CQ_1} = 2,888 \text{ } \mu\text{A}; V_{CEQ_1} = 8,428 \text{ V} \right)$
 $Q_2 \left(I_{BQ_2} = 2,916 \text{ } \mu\text{A}; I_{CQ_2} = 145,8 \text{ } \mu\text{A}; V_{CEQ_2} = 8,982 \text{ V} \right)$

12. En el circuito de la figura 12, el transistor Q_1 siempre está en activa.

- a) Halle el punto de operación del transistor Q_2 .
- b) Determine a partir de qué valor de R_{E1} el transistor Q_2 está saturado.

Datos: $V_{EB1} = V_{BE2} = 0,7 \text{ V}; V_{EB1 \text{ sat}} = V_{BE2 \text{ sat}} = 0,8 \text{ V};$
 $V_{EC1 \text{ sat}} = V_{CE2 \text{ sat}} = 0,2 \text{ V}; I_{CO1} = I_{CO2} = 0;$
 $\beta_{F1} = h_{FE1} = \beta_{F2} = h_{FE2} = 50; V_{ZO} = 5,7 \text{ V y}$
 $R_Z = 0$

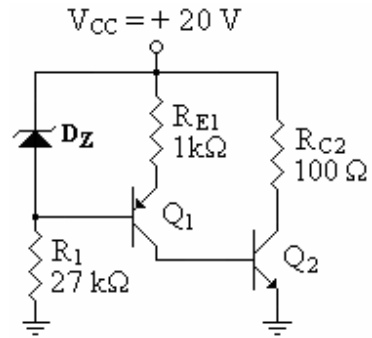


Fig. 12: Problema 12.

Respuesta:

- a) Punto de Operación: $Q_2 \left(I_{BQ_2} = 4,9 \text{ mA}; I_{CQ_2} = 98 \text{ mA}; V_{CEQ_2} = 10,2 \text{ V} \right)$
- b) $R_{E1} \leq 495,15 \text{ } \Omega$