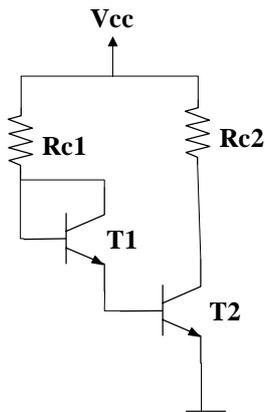


## JUNIO 1999 – EJERCICIO 3

En el circuito de la figura



DATOS:  $V_{cc} = 20 \text{ V}$ .  $R_{c1} = 100 \text{ K}$   $R_{c2} = 2 \text{ K}$

Transistor T1:  $V_{BEon} = 0,7 \text{ V}$ .  $V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$ .  $\beta = 100$

Transistor T2:  $V_{BEon} = 0,7 \text{ V}$ .  $V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$ .  $\beta = 140$

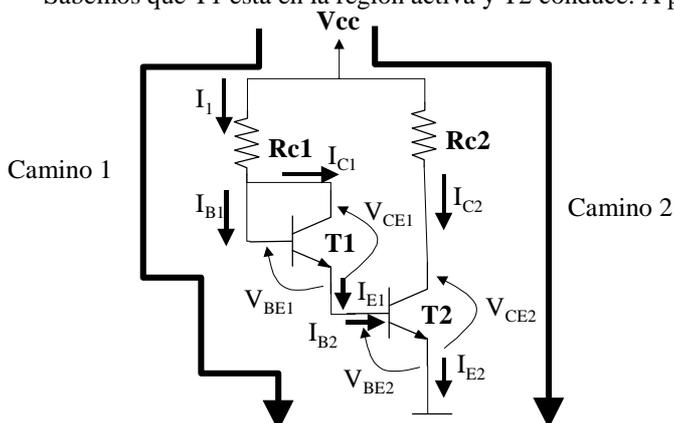
a) Calcular el estado de los transistores y las corrientes en cada una de sus patillas, así como la tensión entre colector y emisor (indicar en la figura el sentido de las corrientes halladas). Poner los resultados en la tabla.

	T1	T2
<b>Estado</b>	ACTIVA	SATURADO
<b>I<sub>C</sub></b>	0,184 mA	9,9 mA
<b>I<sub>B</sub></b>	1,84 mA	0,186 mA
<b>I<sub>E</sub></b>	0,186 mA	10,086 mA
<b>V<sub>CE</sub></b>	0,7 V	0,2 V

Los transistores T1 y T2 tienen sus uniones de base-emisor polarizadas en directa gracias a la tensión de polarización  $V_{cc}$ , por lo que ambos transistores conducirán. Si supusiéramos que los transistores están en corte esto implicaría que todas las corrientes serían nulas, no cayendo ninguna tensión en  $R_{c1}$  y teniendo así en la base de T1 directamente la tensión de polarización  $V_{cc}$ . Así la tensión en la base de T1 es mayor que la suma de las tensiones umbrales ( $V_{\gamma}$  aproximadamente 0,5V) de las uniones base-emisor de T1 y T2 y esto sería un resultado incongruente ya que los transistores no pueden estar en corte y tener en sus bases una tensión superior a la tensión umbral necesaria para polarizar directamente las uniones base-emisor.

Los transistores T1 y T2 pueden estar en activa o saturados. Si se observa atentamente el circuito se puede ver que el colector y la base del transistor T1 están cortocircuitados, por lo que la tensión entre colector y base es siempre cero, lo que implica que la unión base-colector no puede estar nunca polarizada en directa ya que para ello  $V_{BC1} > 0,5\text{V}$  y esto nunca se cumple porque  $V_{BC1} = 0\text{V}$ . Para que se sature un transistor es necesario que las uniones emisor-base y base-colector estén ambas polarizadas en directa, cosa que nunca va a pasar en el transistor T1. A partir del razonamiento anterior se deduce directamente que T1 estará trabajando en la región activa: unión emisor-base polarizada en directa (se cumple como se ha comentado en el primer párrafo), y unión base-colector polarizada en inversa (se cumple ya que  $V_{BC1} = 0\text{V} < V_{\gamma} \approx 0,5\text{V}$ ).

Sabemos que T1 está en la región activa y T2 conduce. A partir de aquí se pueden realizar los siguientes cálculos:



Analizando el trayecto de circuito marcado como camino 1 en la figura, se tiene que

$$V_{CC} = I_1 \cdot R_{C1} + V_{BE1} + V_{BE2}$$

Como se sabe que T1 y T2 conducen entonces  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BEon} = 0,7V$ . La tensión  $V_{BEon}$  es la tensión entre base y emisor cuando el transistor está conduciendo (on), es decir, tanto en activa como en saturación (se supone que no existe diferencia entre estos dos estados). De la anterior ecuación se puede despejar el valor de la corriente  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{C1}} = \frac{20V - 0,7V - 0,7V}{100K} = \frac{18,6V}{100K} = 0,186mA$$

La corriente  $I_1$  se divide en otras dos corrientes:  $I_{C1}$  e  $I_{B1}$  (ver figura). Por lo tanto  $I_1 = I_{C1} + I_{B1}$ . Como T1 está en activa se cumple que  $I_C = \beta \cdot I_B$ . Sustituyendo en la anterior ecuación se obtiene:

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} = \beta_1 \cdot I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1} \Rightarrow I_{B1} = \frac{I_1}{\beta_1 + 1}$$

Sustituyendo valores se obtiene  $I_{B1}$ :

$$I_{B1} = \frac{I_1}{\beta_1 + 1} = \frac{0,186mA}{100 + 1} = 1,84\mu A$$

Conociendo la corriente de base de T1, y como T1 está en activa, se puede saber cual es la corriente de colector de T1:

$$I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1} = 100 \cdot 1,84\mu A = 0,184mA$$

Como en un transistor siempre se cumple que la suma de corrientes entrantes tiene que ser igual a la suma de corrientes salientes, en el transistor T1 se cumple que  $I_{E1} = I_{C1} + I_{B1}$ . Por lo tanto la corriente de emisor (saliente) de T1 se calcula directamente como la suma de las corrientes de colector y base (entrantes), siendo esta corriente igual a  $I_1$ :

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} = I_1 = 0,186mA$$

Como se puede ver en la figura toda la corriente de emisor del transistor T1 entra en la base del transistor T2, siendo entonces ambas corrientes idénticas:

$$I_{B2} = I_{E1} = 0,186mA$$

Como ya se ha dicho, al estar cortocircuitadas la base y el colector de T1, se tiene que la tensión entre colector y emisor de T1 es igual a la tensión entre base y emisor. Como T1 está conduciendo (activa), la tensión entre base y emisor se da como dato en el enunciado del problema, conociendo así directamente el valor de la tensión entre colector y emisor:

$$V_{CE1} = V_{BE1} = V_{BEon} = 0,7V$$

Falta por calcular los valores de las corrientes y tensiones para T2. Este transistor puede estar saturado o en activa. Para saber el estado de este transistor lo que se hace es calcular cual sería su corriente de colector en el caso de que estuviera saturado. Si se analiza el circuito de salida de T2 (camino 2), se obtiene la siguiente ecuación suponiendo que T2 está saturado:

$$V_{CC} = I_{C2SAT} \cdot R_{C2} + V_{CE2SAT} \Rightarrow I_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{R_{C2}}$$

Como la tensión entre colector y emisor en saturación se da como dato y el resto de valores también se conocen, se halla directamente la corriente de colector en saturación de la anterior ecuación:

$$I_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{R_{C2}} = \frac{20V - 0,2V}{2K} = 9,9mA$$

A partir de este valor se halla la corriente de base mínima necesaria para saturar el transistor T2, es decir, para alcanzar ese valor de la corriente de colector en saturación. Hasta que se satura el transistor éste está en activa y se cumple que  $I_C = \beta \cdot I_B$ . A medida que aumenta la corriente de base, aumenta también la corriente de colector de acuerdo con la anterior relación. Esto se cumple hasta que se satura el transistor (en ese momento  $I_C = 9,9$  mA). A partir de ese momento si la corriente de base sigue aumentando, el transistor ya no puede ofrecer una corriente de colector mayor y se deja de cumplir que  $I_C = \beta \cdot I_B$  y el transistor se satura. Por lo tanto la corriente de base mínima que se necesita para saturar el transistor es la que permite alcanzar al transistor en activa una corriente de colector igual a la de saturación (máxima corriente de colector que puede existir). Esta corriente se calcula de la siguiente forma:

$$I_{B2minSAT} = \frac{I_{C2SAT}}{\beta_2} = \frac{9,9mA}{140} = 70,7\mu A$$

Una vez calculada la corriente de base mínima necesaria para saturar el transistor, si la corriente de base que existe en la realidad es menor que ese valor entonces el transistor está en activa (no hay suficiente corriente de base como para alcanzar una corriente de colector suficiente para saturar el transistor), en cambio si la corriente de base existente es mayor que ese valor mínimo necesario para alcanzar la saturación entonces el transistor está saturado.

En este caso se tiene que  $I_{B2} = 186\mu A$  (calculado anteriormente) y como  $186\mu A > 70,7\mu A$  de lo dicho anteriormente se deduce que el transistor T2 está saturado.

Esto quiere decir que la corriente de colector es la que se calculó antes suponiendo el transistor en saturación:

$$I_{C2} = I_{C2SAT} = 9,9mA$$

Sólo falta por calcular la corriente de emisor (saliente) que será igual a la suma de las corrientes de colector y base (entrantes):

$$I_{E2} = I_{C2} + I_{B2} = 9,9mA + 0,186mA = 10,086mA$$

Como el transistor T2 está saturado entonces la tensión entre colector y emisor será directamente igual al valor de dicha tensión en saturación que se da como dato del problema:

$$V_{CE2} = V_{CESAT} = 0,2V$$

Y con esto ya se han calculado todos los datos que se pedían y queda resuelto este apartado del problema.

**b) Calcular el valor mínimo del resistor Rc2 que satura al transistor T2**

La corriente de base de T2 se ha calculado en el apartado anterior y es igual a 0,186 mA. Por lo tanto si T2 estuviera en activa la corriente de colector sería:

$$I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2} = 140 \cdot 0,186mA = 26,04mA$$

En este caso y analizando el circuito de salida de T2 (camino 2), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = I_{C2} \cdot R_{C2} + V_{CE2} \Rightarrow R_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{CE2}}{I_{C2}}$$

Mientras el transistor está en activa la tensión entre colector y emisor  $V_{CE}$  es mayor que su valor de saturación (0,2 V). Cuando el transistor se satura el valor de esta tensión es igual a 0,2 V (dato del problema). En la ecuación anterior se puede ver que cuanto mayor sea la resistencia  $R_{C2}$  menor tiene que ser el valor de  $V_{CE}$  ( $V_{CC}$ ,  $I_{C2}$  son valores fijos, no varían). Por lo tanto si se aumenta constantemente el valor de la resistencia, va a llegar un momento en que se alcance un valor de tensión  $V_{CE} = 0,2$  V y entonces a partir de ese instante el transistor T2 estaría saturado. Ese valor de resistencia se puede calcular a partir de la ecuación anterior aplicándola para dicho instante en el que el T2 entra en saturación ( $V_{CE2} = 0,2$  V):

$$R_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{I_{C2}} = \frac{20V - 0,2V}{26,04mA} = 0,760K = 760\Omega$$

Por lo tanto para que T2 esté saturado hay que seleccionar un valor de resistencia para  $R_{C2}$  mayor que 760  $\Omega$ .

$$R_{C2sat} > 760 \Omega$$

**c) Calcular el valor mínimo que tendría que tener Rc1 para saturar el transistor T1**

Como se ha dicho en el apartado a), al estar cortocircuitados el colector y la base del transistor T1, la tensión entre base y colector es siempre cero lo que implica que la unión base-colector no puede estar nunca polarizada en directa ya que para ello  $V_{BC1} > 0,5V$  y esto nunca se cumple porque  $V_{BC1} = 0V$ . Para que se sature un transistor es necesario que las uniones emisor-base y base-colector estén ambas polarizadas en directa, por lo que el transistor T1 no se puede saturar nunca.

Otra forma de verlo es que al estar cortocircuitadas la base y el colector de T1, esto implica que siempre se cumple que  $V_{CE1} = V_{BE1} = V_{BEon} = 0,7V$ , por lo que nunca se alcanzará el valor de tensión entre colector y emisor que satura al transistor  $V_{CESAT} = 0,2V$ . Esto implica que el transistor T1 nunca se puede saturar.

T1 siempre en activa

**d)** Si sustituimos el transistor T1 por un transistor pnp, ¿cuál sería el estado de los transistores con esta nueva situación?

Al ser  $V_{CC} = +20V$ , al sustituir T1 por un transistor PNP esta tensión positiva polarizaría a la unión de emisor de dicho transistor en inversa, ya que se aplicaría una tensión más positiva en la base (tipo N) que en el emisor (tipo P), lo que supondría que T1 estaría en corte.

Al estar T1 en corte, todas sus corrientes son nulas y por lo tanto  $I_{B2} = I_{E1} = 0$ , por lo que las corrientes en T2 también serían todas nulas y este transistor también estaría en corte (al estar en corte T1 la tensión  $V_{CC}$  no llegaría a la base de T2 y no existiría una tensión que polarice en directa la unión de emisor de T2).

T1 en corte T2 en corte
----------------------------