

Ejercicios Resueltos de Dispositivos Electrónicos I  
Examen Final de Junio de 2000 - Ejercicio 3<sup>1</sup>

**Enunciado**

Hallar el punto de trabajo de los dos transistores. Asumir como despreciables las corrientes de base de ambos transistores, justificando este hecho.

D:  $V_D = 0,7 \text{ V}$

Dz:  $V_D = 0,7 \text{ V}$ ,  $V_Z = 10 \text{ V}$ ,  $I_{Z_{\min}} = 3 \text{ mA}$ ,  $I_{Z_{\max}} = 25 \text{ mA}$

T<sub>1</sub>:  $\beta_1 = 100$ ,  $V_{BE_{ON}} = V_{BE_{SAT}} = 0,7 \text{ V}$ ;  $V_{CE_{SAT}} = 0,2 \text{ V}$

T<sub>2</sub>:  $\beta_2 = 400^2$ ,  $V_{BE_{ON}} = V_{BE_{SAT}} = -0,7 \text{ V}$ ;  $V_{CE_{SAT}} = -0,3 \text{ V}$

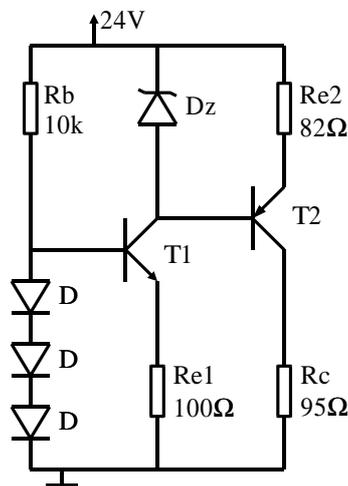


Figura 1: Circuito del Enunciado

**Solución:**

Aunque explícitamente solo se pide hallar el punto de trabajo de los transistores del circuito, definido por la corriente de colector ( $I_C$ ) y la tensión colector-emisor ( $V_{CE}$ ), implícitamente también es necesario hallar el punto de trabajo de los otros dispositivos semiconductores presentes en el circuito. Tomando como referencia los sentidos de tensiones y corrientes ilustrados en la Figura 2 para transistores y diodos, redibujamos el circuito del problema en la Figura 3, indicando los sentidos de tensiones y corrientes.

De lo representado en la Figura 3 se puede concluir que, al despreciar las corrientes de base de los transistores, tenemos tres ramas 'independientes'. La primera formada por  $R_b$  y los tres diodos; la segunda conformada por el diodo Zener, el transistor  $T_1$  y la resistencia  $R_{e1}$ ; y finalmente la formada por  $R_{e2}$ , el PNP  $T_2$  y la resistencia  $R_c$ .

Las corrientes de base de los transistores pueden ser consideradas despreciables si su valor es del orden de cien veces menor que la que circula por las ramas de donde 'sale' y donde 'entra'. Esto implica que tienen que cumplirse las siguientes inecuaciones:

$$I_{BT1} \ll I_{Rb}, I_D, I_{Dz}, I_{ET1} \quad (1)$$

<sup>1</sup>Resuelto por el Prof. Andrés A. Nogueiras Meléndez, aagusto@dte.uvigo.es, 2000

<sup>2</sup>En realidad no existen transistores bipolares con una beta tan elevada, no es un dato real, pero no rompe la coherencia matemática del ejercicio.

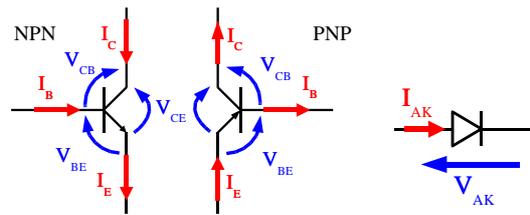


Figura 2: Sentidos de tensiones y corrientes en los dispositivos

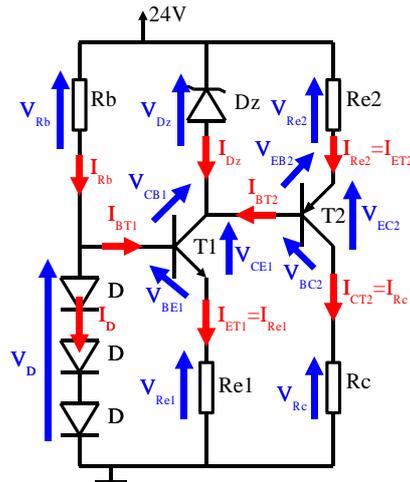


Figura 3: Sentidos de tensiones y corrientes en el circuito

$$I_{BT2} \ll I_{Re2}, I_{Rc}, I_{Dz}, I_{ET1} \quad (2)$$

Como en el enunciado se pide considerar despreciables las corrientes, se procederá a resolver el problema y justificar a posteriori.

De la rama formada por  $R_b$  y los tres diodos se puede concluir que estará polarizada directamente siempre, lo que implica:

$$V_D = 3 * V_\gamma = 3 * 0,7V = 2,1V \quad (3)$$

$$V_{Rb} = V_{CC} - V_D = 24V - 2,1V = 21,9V \quad (4)$$

$$I_{Rb} = \frac{V_{Rb}}{R_b} = \frac{21,9V}{10k\Omega} = 2,19mA \quad (5)$$

Estos valores se pueden ver modificados por una corriente  $I_{BT1}$  no despreciable, lo que en principio vamos a descartar por lo indicado anteriormente. Se insiste nuevamente en la posterior justificación de este hecho.

La siguiente rama obliga a realizar suposiciones sobre el estado del transistor  $T_1$  y el diodo Zener  $D_z$ . Estas suposiciones condicionarán el estado de la tercera rama, algo que también se debe tener en cuenta.

	Transistor	Diodo	Comentarios
1	Activa	Zener	La que se probará inicialmente, ya que las tensiones presentes en la primera rama pueden contribuir a que esto así sea
2	Activa	Corte	La siguiente a comprobar, provoca que la corriente de colector de $T_1$ sea igual a la de base de $T_2$ , no parececoherente con la idea de corrientes de base despreciables
3	Corte	Corte	La corriente de base debe ser cero, la tensión colector emisor será elevada y el transistor $T_2$ también estará en corte
4	Saturación	Zener	Otra posibilidad, al igual que la primera, pero implica otros valores de tensiones y corrientes
5	Saturación	Corte	Al igual que la anterior, implica valores de tensiones y corrientes que afectan a la tercera rama

Continuando los cálculos, tomando como guía la suposición 1:

$$V_D = V_{BE1(on)} + R_{e1} * I_{Re1} \quad (6)$$

despejando y operando:

$$I_{Re1} = \frac{V_D - V_{BE1(on)}}{R_{e1}} = \frac{2,1V - 0,7V}{100\Omega} = 14mA \quad (7)$$

como  $I_{BT1}$  es despreciable, esto implica que  $I_{Re1} = I_{ET1} = I_{CT1} = 14mA$  y si el diodo Dz está en zona zener, entonces  $I_{Dz} = 14mA$ , que está entre los márgenes de corriente de los datos del problema. Esto implica que la tensión  $V_{Dz} = 10V$ , por lo tanto:

$$V_{CET1} = V_{CC} - V_{Dz} - V_{Re1} = 24V - 10V - 14mA * 100\Omega = 12,6V \quad (8)$$

que al ser positiva y mayor que  $V_{CE(sat)}$  permite asegurar que el transistor T1 está en zona activa. Esto confirma la hipótesis formulada anteriormente para llevar a cabo los cálculos.

Por último queda comprobar que la corriente de base es despreciable. Partiendo de la corriente de emisor  $I_{Re1}$ , obtenemos:

$$I_{BT1} = \frac{I_{ET1}}{\beta_1 + 1} = \frac{14mA}{100 + 1} = 138,61\mu A \quad (9)$$

que cumple las condiciones para ser despreciada.

Para la tercera rama se pueden hacer tres suposiciones distintas, ya que sólo existe un transistor:

	Transistor	Comentario
1	Corte	Corrientes cero, poco probable ya que hay tensiones presentes en la segunda rama que pueden polarizar directamente la union base-emisor
2	Activa	La mas probable, debido a las razones de la suposición anterior
3	Saturación	Si la anterior da resultados incoherentes es necesario suponer este estado y comprobar los resultados

Aplicando la segunda suposición, obtenemos:

$$V_{Dz} = V_{Re2} + V_{EBT2(on)} = I_{Re2} * R_{e2} + V_{EBT2(on)} \quad (10)$$

despejando

$$I_{Re2} = \frac{V_{Dz} - V_{EBT2(on)}}{R_{e2}} = \frac{10V - 0,7V}{82\Omega} = 113,41mA \quad (11)$$

como la corriente de base es despreciable

$$I_{CT1} = I_{ET1} = 113,41mA \quad (12)$$

y tensión emisor colector es

$$V_{ECT2} = V_{CC} - V_{Re2} - V_{Rc} = V_{CC} - I_{Re2} \cdot R_{e2} - I_{Rc} \cdot R_c \quad (13)$$

$$24V - 113,41mA \cdot 82\Omega - 113,41mA \cdot 95\Omega = 3,93V \quad (14)$$

Al ser  $V_{ECT2} \geq |V_{CET2(sat)}|$  lo que se ha supuesto hasta ahora es coherente. Falta por comprobar si la corriente de base del transistor  $T_2$  es despreciable

$$I_{BT2} = \frac{I_{CT2}}{\beta_2} = \frac{113,41mA}{400} = 283,53\mu A \quad (15)$$

Resumiendo, los resultados son:

	Estado		
Diodos	Activo	$V_D = V_\gamma = 0,7V$	$I_D = 2,19mA$
Diodo Dz	Zener	$V_{Dz} = 10V$	$I_{Dz} = 14mA$
Transistor T1	Activa	$V_{CE} = 12,6V$	$I_C = 14mA$
Transistor T2	Activa	$V_{CE} = -3,93V$	$I_C = 113,41mA$

Y las corrientes de base son despreciables, pues:

$$I_{BT1} = 138,61\mu A \ll I_{Rb} = I_D = 2,19mA, I_{Dz} = I_{ET1} = 14mA \quad (16)$$

$$I_{BT2} = 283,53\mu A \ll I_{Re2} = I_{Rc} = 113,41mA, I_{Dz} = I_{ET1} = 14mA \quad (17)$$

## Comprobaciones

Para quienes que hayan elegido comprobar otros estados del circuito (transistores en corte o saturación, diodos en corte) esta sección puede ser de ayuda. Todas las suposiciones que se hacen pueden parecer correctas o incorrectas, pero los resultados numéricos que se obtienen contradicen las suposiciones y son los que validan las mismas.

Comenzaremos por la primera rama. Un razonamiento equivocado nos puede llevar a pensar que los diodos pueden estar en corte. Si esto fuese así la corriente que circula por  $R_b$  sería la misma que por la base del transistor. Luego la ecuación que relaciona la primera y la segunda rama son:

$$V_{CC} = R_b * I_{Rb} + V_{BET1(on)} + R_{e1} * I_{Re1} = (R_b + R_{e1}(\beta_1 + 1))I_{Rb} + V_{BET1(on)}$$

despejando y calculado  $I_{Rb} = 1,16mA$ ,  $I_{Re1} = 117,16mA$  y  $V_{Re1} = 11,72V$ . Cerrando la malla de los diodos, la unión base emisor del transistor y la resistencia  $R_{e1}$ , la tensión en los diodos ( $V_D$ ) tiene un valor de 12,04V, lo que implica que los diodos están conduciendo. Esto es incongruente con lo que habíamos supuesto inicialmente.

Para la segunda rama, una vez obtenido el estado correcto de la primera, podemos suponer que el diodo Dz está en zona Zener y el transistor en saturación. Analizando la malla que se cierra con la fuente de alimentación y la rama:

$$V_{CC} = V_{Dz} + V_{CET1(sat)} + V_{Re1}$$

despejando  $V_{Re1} = 24V - 10V - 0,2V = 13,8V$ , consecuentemente  $I_{Re1} = I_{ET1} = 138mA$ . En la parte superior de la rama se encuentra un diodo que soporta corriente entre 3 y 25 mA, que a tenor del valor de corriente obtenido se destruiría por sobrepotencia. Esto, aunque no está indicado en ninguna parte del ejercicio, no concuerda con el sentido común, por eso debemos desechar esta suposición como incorrecta.

Finalmente, para la tercera rama, sabiendo el estado correcto de las dos ramas anteriores, podemos comprobar si está en saturación el transistor T2. Esto implica:

$$V_{CC} = R_{e2} * I_{Re2} + V_{EC(sat)} + R_c * I_{Rc} \simeq (R_{e2} + R_c) * I_{Re2} + V_{EC(sat)}$$

resolviendo  $I_{Re2} = 134,46mA$ ,  $V_{Re2} = 11,03V$  y cerrando la malla con el diodo Zener:

$$V_{Dz} = V_{Re2} + V_{EBT2(sat)} \\ 10V \neq 11,03V + 07V$$

lo que conduce nuevamente a un resultado numérico incongruente.

## Segunda Solución

Suponiendo *no despreciables* las corrientes de base de los transistores, vamos a proceder a calcular los valores de tensiones y corrientes del circuito. En este caso sólo constan las explicaciones necesarias para los nuevos cálculos. El estado de los componentes lo sabemos de la primera solución. La corriente de base del transistor  $T_1$  viene a través de la corriente que circula por la resistencia  $R_{b1}$ , pero no influye en la caída de tensión de los tres diodos, luego el valor de la corriente de emisor  $I_{ET1} = 14mA$  no cambia. A partir de el se calcula la corriente de base

$$I_{BT1} = \frac{I_{ET1}}{\beta_1 + 1} = \frac{14mA}{100 + 1} = 138,62\mu A$$

y la corriente de colector

$$I_{CT1} = \beta_1 I_{BT1} = 100 \cdot 138,62\mu A = 13,86mA$$

La corriente que circula por los diodos es la diferencia entre la corriente que circula por el resistor  $R_b$  menos la corriente de base del transistor  $T_1$

$$I_D = I_{Rb} - I_{BT1} = 2,19mA - 138,62\mu A = 2,051mA$$

La tensión entre colector y emisor del transistor  $T_1$  la obtenemos de

$$\begin{aligned} V_{CET1} &= V_{BET1(on)} + V_{CBT1} \\ &= V_{BET1(on)} + V_{Rb} - V_{Dz} \\ &= 0,7V + 21,9V - 10V \\ &= 12,6V \end{aligned}$$

La corriente de emisor del transistor  $T_2$  sigue siendo válida y nos es de utilidad para calcular la corriente de base  $I_{BT2}$

$$I_{BT2} = \frac{I_{ET2}}{\beta_2 + 1} = \frac{113,41mA}{400 + 1} = 282,82\mu A$$

Lo que nos permite ahora calcular el valor de la corriente por el diodo Zener

$$I_{Dz} = I_{CT1} + I_{BT2} = 13,86mA + 282,82\mu A = 14,143mA$$

y la corriente de colector del transistor  $T_2$

$$I_{CT2} = \beta_2 I_{BT2} = 400 \cdot 282,82\mu A = 113,128mA$$

Finalmente la tensión entre emisor y colector del transistor  $T_2$

$$\begin{aligned} V_{ECT2} &= V_{CC} - R_{e2} \cdot I_{e2} - R_c \cdot I_c \\ &= 24 - 82\Omega \cdot 113,41mA - 95\Omega \cdot 113,128mA \\ &= 3,95V \end{aligned}$$

Como conclusión, a la vista de los resultados obtenidos al no despreciar las corrientes de base, el comportamiento del circuito es similar, variando ligeramente el punto de trabajo de los dispositivos.