

# Transistores

## *Notas para su utilización en aplicaciones de conmutación*

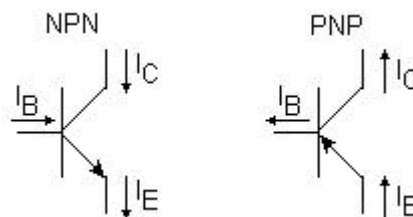
El transistor es un dispositivo semiconductor, que presenta dos modos de funcionamiento: lineal y no lineal. El interés en las aplicaciones de conmutación se centra en la parte no lineal, que permite utilizar dos estados claramente diferenciados (corte y saturación; “1” lógico y “0” lógico).

Las ecuaciones que describen el modelo lineal se pueden utilizar para calcular el comportamiento hasta que el dispositivo entra en la zona no lineal, siendo que una vez en ésta, dichas ecuaciones dejan de tener validez.

Existen diversos tipos de transistores, entre ellos los TBJ ó BJT (Transistor Bipolar de Juntura), los TECJ ó JFET (Transistor de Efecto de Campo de Juntura), MOS-FET ó TEC-MOS y otros. Los más habituales son los TBJ y en ellos se centrará esta referencia.

Estos transistores se modelan a través de dos mallas: la malla de entrada y la de salida. La de entrada está dada por la base  $B$  y el emisor  $E$  mientras que la de salida por el colector  $C$  y el emisor  $E$ . Resulta evidente que el  $E$  resulta común a ambas.

A su vez, existen dos tipos de TBJ y su diferencia radica en el sentido de circulación de las corrientes:



Nota: En lo que sigue, se utilizará como ejemplo el tipo NPN dado que es el más común, aunque para el PNP sigue siendo todo válido (con la precaución de que los sentidos de referencia han cambiado).

Las ecuaciones que relacionan las distintas corrientes quedan dadas por:

$$I_C = \mathbf{b} \cdot I_B$$

$$I_E = I_B + I_C = I_B \cdot (1 + \mathbf{b}) = I_C \cdot \left( \frac{\mathbf{b} + 1}{\mathbf{b}} \right)$$

donde  $\mathbf{b}$  es la denominada *ganancia de corriente* y es una característica de cada transistor. En la práctica se observa que el valor de  $\mathbf{b}$  es bastante mayor a la unidad ( $\approx 100$  a  $800$ ) y se suele aproximar:

$$I_E = I_C \cdot \left( \frac{\mathbf{b} + 1}{\mathbf{b}} \right) \cong I_C$$

Además,  $\mathbf{b}$  es muy variable de un transistor a otro, incluso del mismo modelo (por ejemplo en el TBJ NPN 2N3904, su valor varía entre 100 y 300), por lo que se vuelve necesario diseñar circuitos cuyo comportamiento sea poco dependiente de su valor.

Otro aspecto importante es que entre los terminales de entrada  $B$  y  $E$  se observa el comportamiento de un diodo, de modo que existirá una diferencia de potencial  $V_{BE}$  que rondará los 0,7 V. Si dicha tensión cae por debajo de este valor, la corriente  $I_B$  será prácticamente nula (dando lugar al corte del transistor) y consecuentemente también lo será  $I_C$ .

Además, existe una limitación en la malla de salida, siendo que hay una mínima tensión entre el  $C$  y el  $E$ . Dicha tensión (que da lugar al estado de saturación) se denomina tensión  $V_{CE}$  de saturación ( $V_{CEsat}$ ) que es del orden de 0,3 a 0,7 V.

Las razones por la que se utilizan estos dos estados en este tipo de aplicaciones pueden resumirse en dos:

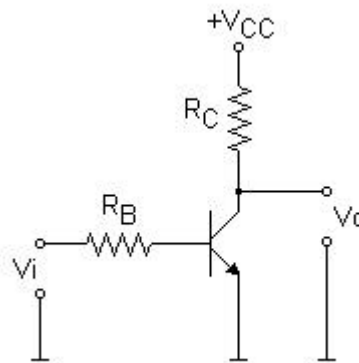
- ✓ Estabilidad: Se observa que estos dos estados constituyen valores extremos (o límites) por lo que variaciones (o ruido) en la entrada no tendrá gran incidencia en la salida.
- ✓ Potencia: La potencia que consume el transistor está dada por:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C$$

En cualquiera de los dos estados, ese producto es mínimo; no lo sería si se buscaran puntos intermedios.

Nota: Además de la máxima potencia disipada, existen otros límites que especifica el fabricante dentro de los cuales es seguro operar el dispositivo, por ejemplo  $I_C$  máxima,  $V_{BE}$  máxima,  $V_{CE}$  máxima, etc. que también constituyen condicionamientos de trabajo.

En la práctica, se busca alcanzar alguno de estos dos estados (corte y saturación) según cierta salida lógica (de una compuerta, un microcontrolador, etc.). Un circuito muy sencillo que suele utilizarse con bastante frecuencia es el siguiente:



Las resistencias que aparecen pueden ser reales o el equivalente de algún dispositivo que se conectará en su lugar; ej.: un *buzzer* que requiere de 5 V / 20 mA para accionarse puede modelarse como una resistencia de 250  $\Omega$ .

Siguiendo un análisis formal, se pueden extraer expresiones que permitan calcular los distintos parámetros de diseño que se presentan en un caso real:

Para que este circuito funcione correctamente ante un “1” lógico, debe cumplirse que  $V_{BE} = 0,7$  V, por lo tanto se puede escribir la ecuación de la malla de entrada como:

$$V_i = I_B \cdot R_B + V_{BE} = I_B \cdot R_B + 0,7V$$

Ahora, la malla de salida queda descrita por:

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_o$$

$$V_o = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

Dado que el terminal  $E$  se encuentra conectado a masa ( $V_E = 0$  V), resultará que la tensión de salida  $V_o = V_C = V_{CE}$  se puede obtener a partir combinando ambas expresiones, por lo que:

$$V_o = V_{CC} - (\mathbf{b} \cdot I_B) \cdot R_C = V_{CC} - \mathbf{b} \cdot \left( \frac{V_i - 0,7V}{R_B} \right) \cdot R_C$$

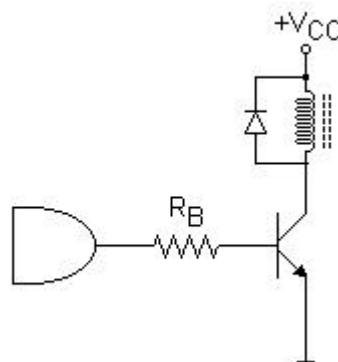
Debe recordarse que  $V_o = V_C = V_{CE}$  no debe ser inferior a  $V_{CEsat}$ , por lo que una vez excedido este límite,  $V_o = V_{CEsat}$  independientemente de cuanto se incremente  $V_i$ .

Para el caso en que la entrada al circuito es un “0” lógico, se desea que el diodo esté cortado, es decir  $I_B < I_{Bmin}$ . Esto, en general no resulta difícil de cumplir.

A continuación se ilustrará el procedimiento de diseño con un ejemplo: Supóngase que se desea conectar a la salida de una compuerta a un *relay* con las especificaciones:

Compuerta NAND (74S00)			Relay		
$V_{OH}$	2,7	V	$V_L$	12	V
$V_{OL}$	0,5		$V_{Smax}$	350	
$I_{OH}$	-1	mA	$I_L$	50	mA
$I_{OL}$	20		$I_{Smax}$	2	

El circuito resultante será:



En este caso, por los datos del problema,  $V_{CC} = 12$  V,  $R_C = 240 \Omega$  y  $V_i = 0,5$  V ó 2,7 V. Adicionalmente, debe seleccionarse un transistor con la suficiente ganancia de corriente, capaz de manejar la corriente requerida y soportar las tensiones que se emplean en el circuito ( $\mathbf{b}$  mínimo  $> 100$ ,  $I_C$  máxima  $> 100$  mA y  $V_{CE}$  máxima  $> 12$  V).

Además, debe considerarse que el costo de los TBJ (para aplicaciones afines) suele estar asociado a su capacidad tanto de manejar corriente así como también de disipar potencia. De todo esto, se encuentra que el modelo 2N3904 resulta adecuado, ya que cumple con los requisitos anteriores y a su vez no resulta sobredimensionado.

Sus características son:

TBJ NPN 2N3904		
$P_D$ máxima	625	mW
$V_{BE\ on}$	0,7	V
$V_{CE}$ máxima	40	
$V_{CE}$ saturac.	0,3	
$I_C$ máxima	200	mA
$I_B$ mínima	0,05	
$\mathbf{b}$ mínimo	100	-

Si la salida de la compuerta es un “0”, habrá 0V en la entrada del circuito (que es menor que los 0,7 V requeridos), resultando:

$$I_B \approx 0 \Rightarrow I_C \approx 0 \Rightarrow V_o = V_{CC}$$

por lo que no circulará corriente por la bobina del *relay*. Para verificar la potencia requerida, se tiene:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C = V_{CC} \cdot 0 = 0$$

Cuando la salida sea un “1”, habrá 2,7 V en la entrada del circuito y se desea que esa condición sature al transistor (se busca una corriente levemente superior a la que produce que  $V_{CE} = V_{CEsat}$ ). Además, el peor caso es el que  $\mathbf{b}$  es mínimo, por lo que:

$$V_o = V_{CEsat} = V_{CC} - \mathbf{b} \left( \frac{V_i - 0,7V}{R_B} \right) R_C$$

$$0,3V = 12V - 100 \cdot \left( \frac{2,7V - 0,7V}{R_B} \right) \cdot 240\Omega$$

Despejando  $R_B$  se obtiene el máximo valor con el que se alcanza saturación dada una entrada “1”:

$$R_B = \frac{\mathbf{b}_{min} \cdot R_C}{V_{CC} - V_{CEsat}} \cdot (V_i - 0,7V)$$

$$R_B = \frac{100 \cdot 240\Omega}{11,7V} \cdot 2V = 4,1k\Omega$$

El mayor valor comercial inferior al calculado corresponde a 3,9 k $\Omega$ , que será la mejor opción para este circuito. Con este valor, se debe verificar que la corriente que demanda puede ser suministrada por la compuerta:

$$I_B = \frac{V_i - 0,7V}{R_B} = \frac{2V}{3,9k\Omega}$$

$$I_B = 512\mathbf{mA} < I_{OH}$$

Solo resta verificar que la potencia que se disipará en esta condición tampoco excede el límite:

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C \cong V_{CEsat} \cdot I_C = 0,3V \cdot 50mA$$
$$P_D = 15mW$$

Un componente adicional que figura en el circuito y aun no se ha mencionado es el diodo en paralelo con la bobina. El mismo se utiliza cuando se conectan cargas con importantes componentes inductivas y es para que absorba los sobrepicos que se puedan producir debido a los transitorios. La característica principal a la hora de elegir este diodo será la tensión inversa que es capaz de soportar.