

Calcular los parámetros de circuitos de activación de transistores de potencia.

Luis Angel Torres Pinto

29 de octubre de 2019



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA**

## 1. Transistor de Potencia

El funcionamiento y utilización de los transistores de potencia es idéntico al de los transistores normales, teniendo como características especiales las altas tensiones e intensidades que tienen que soportar y, por tanto, las altas potencias a disipar.

Existen tres tipos de transistores de potencia:

1. Bipolar
2. Unipolar o FET (Transistor de Efecto de Campo).
3. IGBT.

Parámetros	MOS	Bipolar
Impedancia de entrada	Alta (1010 ohmios)	Media (104 ohmios)
Ganancia en corriente	Alta (107)	Media (10-100)
Resistencia ON (saturación)	Media / alta	Baja
Resistencia OFF (corte)	Alta	Alta
Voltaje aplicable	Alto (1000 V)	Alto (1200 V)
Máxima temperatura de operación	Alta (200°C)	Media (150°C)
Frecuencia de trabajo	Alta (100-500 Khz)	Baja (10-80 Khz)
Coste	Alto	Medio

El IGBT ofrece a los usuarios las ventajas de entrada MOS, más la capacidad de carga en corriente de los transistores bipolares:

1. Trabaja con tensión.
2. Tiempos de conmutación bajos.
3. Disipación mucho mayor (como los bipolares).

Nos interesa que el transistor se parezca, lo más posible, a un elemento ideal:

1. Pequeñas fugas.
2. Alta potencia.
3. Bajos tiempos de respuesta (ton, toff), para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento.
4. Alta concentración de intensidad por unidad de superficie del semiconductor.
5. Que el efecto avalanche se produzca a un valor elevado (VCE máxima elevada).
6. Que no se produzcan puntos calientes (grandes di/dt).

Una limitación importante de todos los dispositivos de potencia y concretamente de los transistores bipolares, es que el paso de bloqueo a conducción y viceversa no se hace instantáneamente, sino que siempre hay un retardo (ton, toff). Las causas fundamentales de estos retardos son las capacidades asociadas a las uniones colector - base y base - emisor y los tiempos de difusión y recombinación de los portadores.

## 2. Principios básicos de funcionamiento

La diferencia entre un transistor bipolar y un transistor unipolar o FET es el modo de actuación sobre el terminal de control. En el transistor bipolar hay que inyectar una corriente de base para regular la corriente de colector, mientras que en el FET el control se hace mediante la aplicación de una tensión entre puerta y fuente. Esta diferencia viene determinada por la estructura interna de ambos dispositivos, que son substancialmente distintas.

Es una característica común, sin embargo, el hecho de que la potencia que consume el terminal de control (base o puerta) es siempre más pequeña que la potencia manejada en los otros dos terminales.

En resumen, destacamos tres cosas fundamentales:

1. En un transistor bipolar IB controla la magnitud de IC.
2. En un FET, la tensión VGS controla la corriente ID.
3. En ambos casos, con una potencia pequeña puede controlarse otra bastante mayor.

### 3. Tiempos de conmutación

Cuando el transistor está en saturación o en corte las pérdidas son despreciables. Pero si tenemos en cuenta los efectos de retardo de conmutación, al cambiar de un estado a otro se produce un pico de potencia disipada, ya que en esos instantes el producto  $I_C \times V_{CE}$  va a tener un valor apreciable, por lo que la potencia media de pérdidas en el transistor va a ser mayor. Estas pérdidas aumentan con la frecuencia de trabajo, debido a que al aumentar ésta, también lo hace el número de veces que se produce el paso de un estado a otro.

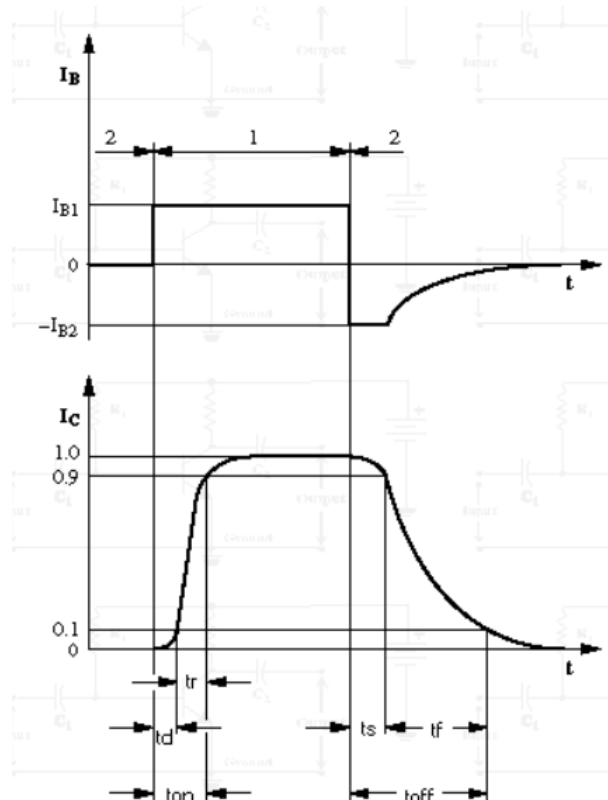
Podremos distinguir entre tiempo de excitación o encendido ( $t_{on}$ ) y tiempo de apagado ( $t_{off}$ ). A su vez, cada uno de estos tiempos se puede dividir en otros dos.

Tiempo de retardo (Delay Time,  $t_d$ ): Es el tiempo que transcurre desde el instante en que se aplica la señal de entrada en el dispositivo conmutador, hasta que la señal de salida alcanza el 10 % de su valor final.

Tiempo de subida (Rise time,  $t_r$ ): Tiempo que emplea la señal de salida en evolucionar entre el 10 % y el 90 % de su valor final.

Tiempo de almacenamiento (Storage time,  $t_s$ ): Tiempo que transcurre desde que se quita la excitación de entrada y el instante en que la señal de salida baja al 90 % de su valor final.

Tiempo de caída (Fall time,  $t_f$ ): Tiempo que emplea la señal de salida en evolucionar entre el 90 % y el 10 % de su valor final.



Es de hacer notar el hecho de que el tiempo de apagado ( $t_{off}$ ) será siempre mayor que el tiempo de encendido ( $t_{on}$ ). Los tiempos de encendido ( $t_{on}$ ) y apagado ( $t_{off}$ ) limitan la frecuencia máxima a la cual puede conmutar el transistor:

### 4. Otros parámetros importantes

Corriente media: es el valor medio de la corriente que puede circular por un terminal (ej.  $I_{CAV}$ , corriente media por el colector).

Corriente máxima: es la máxima corriente admisible de colector ( $I_{CM}$ ) o de drenador ( $I_{DM}$ ). Con este valor se determina la máxima disipación de potencia del dispositivo.

VCBO: tensión entre los terminales colector y base cuando el emisor está en circuito abierto.

VEBO: tensión entre los terminales emisor y base con el colector en circuito abierto.

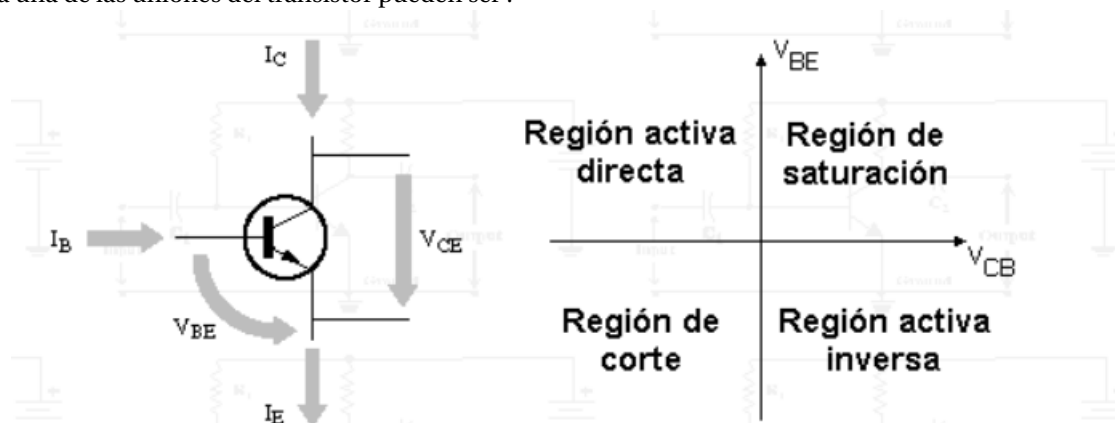
Tensión máxima: es la máxima tensión aplicable entre dos terminales del dispositivo (colector y emisor con la base abierta en los bipolares, drenador y fuente en los FET).

Estado de saturación: queda determinado por una caída de tensión prácticamente constante.  $V_{CEsat}$  entre colector y emisor en el bipolar y resistencia de conducción  $R_{DSon}$  en el FET. Este valor, junto con el de corriente máxima, determina la potencia máxima de disipación en saturación.

Relación corriente de salida - control de entrada:  $h_{FE}$  para el transistor bipolar (ganancia estática de corriente) y  $g_{ds}$  para el FET (transconductancia en directa).

## 5. Modos de trabajo

Existen cuatro condiciones de polarización posibles. Dependiendo del sentido o signo de los voltajes de polarización en cada una de las uniones del transistor pueden ser :



Región activa directa: Corresponde a una polarización directa de la unión emisor - base y a una polarización inversa de la unión colector - base. Esta es la región de operación normal del transistor para amplificación.

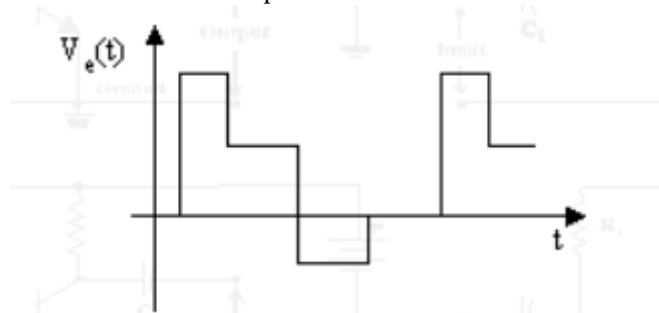
Región activa inversa: Corresponde a una polarización inversa de la unión emisor - base y a una polarización directa de la unión colector - base. Esta región es usada raramente.

Región de corte: Corresponde a una polarización inversa de ambas uniones. La operación en ésta región corresponde a aplicaciones de conmutación en el modo apagado, pues el transistor actúa como un interruptor abierto ( $I_C \approx 0$ ).

Región de saturación: Corresponde a una polarización directa de ambas uniones. La operación en esta región corresponde a aplicaciones de conmutación en el modo encendido, pues el transistor actúa como un interruptor cerrado ( $V_{CE} \approx 0$ ).

## 6. Ataque y protección del transistor de potencia

Como hemos visto anteriormente, los tiempos de conmutación limitan el funcionamiento del transistor, por lo que nos interesaría reducir su efecto en la medida de lo posible.

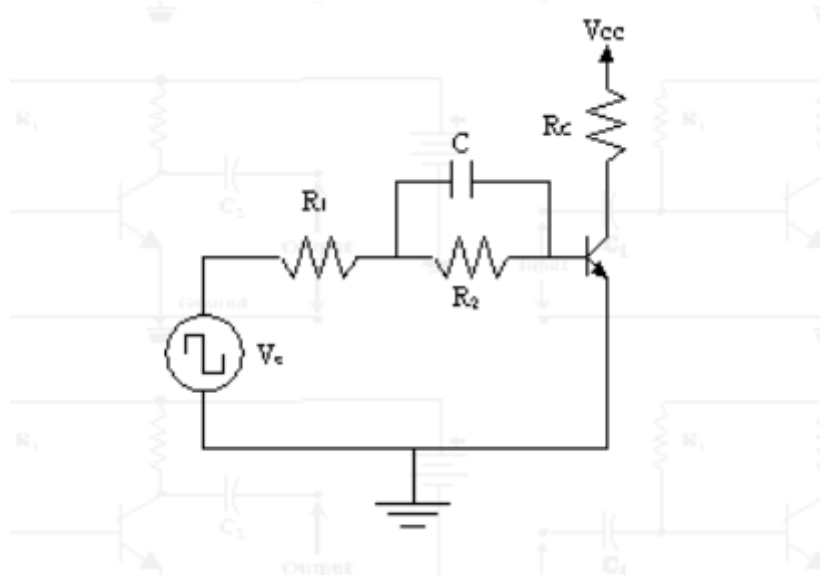


Los tiempos de conmutación pueden ser reducidos mediante una modificación en la señal de base, tal y como se muestra en la figura anterior.

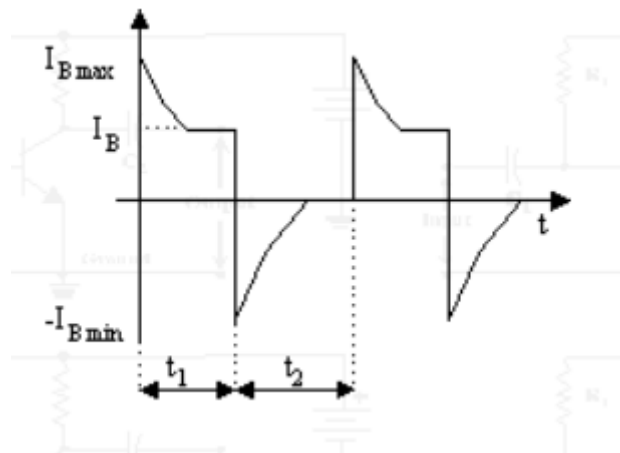
Puede verse como el semiciclo positivo está formado por un tramo de mayor amplitud que ayude al transistor a pasar a saturación (y por tanto reduce el  $t_{on}$ ) y uno de amplitud suficiente para mantener saturado el transistor (de este modo la potencia disipada no será excesiva y el tiempo de almacenamiento no aumentará). El otro semiciclo

comienza con un valor negativo que disminuye el toff, y una vez que el transistor está en corte, se hace cero para evitar pérdidas de potencia.

En consecuencia, si queremos que un transistor que actúa en conmutación lo haga lo más rápidamente posible y con menores pérdidas, lo ideal sería atacar la base del dispositivo con una señal como el de la figura anterior. Para esto se puede emplear el circuito de la figura siguiente.



En estas condiciones, la intensidad de base aplicada tendrá la forma indicada a continuación:



Durante el semiperiodo  $t_1$ , la tensión de entrada ( $V_e$ ) se mantiene a un valor  $V_e$  (máx). En estas condiciones la  $V_{BE}$  es de unos 0.7 v y el condensador C se carga a una tensión  $V_C$  de valor:

$$V_C = R_2 \times \frac{V_{e(max)} - 0.7}{R_1 + R_2}$$

debido a que las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  actúan como un divisor de tensión.

La cte. de tiempo con que se cargará el condensador será aproximadamente de:

$$\tau_1 = C \times \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Con el condensador ya cargado a  $V_C$ , la intensidad de base se estabiliza a un valor  $I_B$  que vale:

$$I_B = \frac{V_{e(max)} - 0.7}{R_1 + R_2}$$

En el instante en que la tensión de entrada pasa a valer  $-V_e(\min)$ , tenemos el condensador cargado a  $V_C$ , y la  $V_{BE}=0.7$  v. Ambos valores se suman a la tensión de entrada, lo que produce el pico negativo de intensidad  $I_B$  (mín):

$$I_{B(min)} = \frac{V_{e(min)} + V_C + 0.7}{R + R}$$

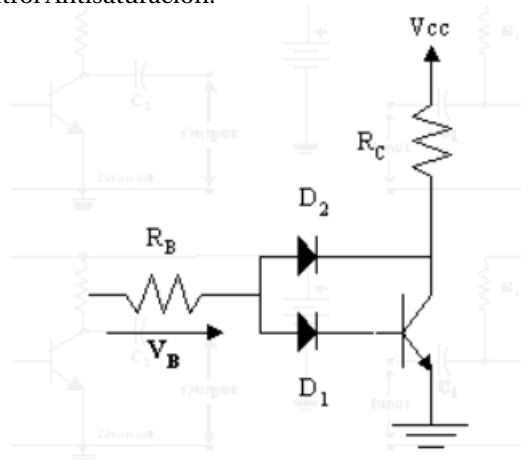
A partir de ese instante el condensador se descarga a través de R2 con una constante de tiempo de valor R2C. Para que todo lo anterior sea realmente efectivo, debe cumplirse que:

$$\begin{aligned} 5 \times \tau_1 &\leq t_1 \\ 5 \times \tau_2 &\leq t_2 \end{aligned}$$

con esto nos aseguramos que el condensador está cargado cuando apliquemos la señal negativa. Así, obtendremos finalmente una frecuencia máxima de funcionamiento :

$$f_{max} = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{5 \times \tau_1 + 5 \times \tau_2} = \frac{0.2}{t_1 + t_2}$$

Un circuito más serio es el de Control Antisaturación:



El tiempo de saturación (tS) será proporcional a la intensidad de base, y mediante una suave saturación lograremos reducir tS :

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

Inicialmente tenemos que:

$$I_B = \frac{V_B - V_{D1} - V_{BE}}{R_B}$$

En estas condiciones conduce D2, con lo que la intensidad de colector pasa a tener un valor:

$$I_L = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{d1} + V_{d2}}{R_C}$$

Si imponemos como condición que la tensión de codo del diodo D1 sea mayor que la del diodo D2, obtendremos que IC sea mayor que IL:

$$\begin{aligned} I_C &= \beta \times I_B \\ \beta \times I_B \times R_C &> V_{CE} - V_{BE} - V_{d1} + V_{d2} \end{aligned}$$

## 7. Referencias

El Transistor en Circuitos de Potencia. Autor: Ing. Alberto C. Galiano  
Circuitos de Potencia de Estado Sólido. Manual para proyectistas / SP-52 / RCA. Editorial Arbo.  
<http://www.profesormolina.com.ar/electronica/componentes/transist/pot.htm>