

TEMA

11

SISTEMAS ELECTRONICOS

Desarrollo de los temas

Análisis de circuitos electrónicos para el control de potencia. Dispositivos y elementos utilizados. Clasificación, función, tipología y características. Criterios y procedimientos utilizados para el diseño de estos circuitos.

CEDE

elaborado por
EL EQUIPO DE PROFESORES
DEL CENTRO DOCUMENTACIÓN

GUIÓN - ÍNDICE

- 1. LA FAMILIA DE LOS TIRISTORES**
- 2. TEORÍA DEL TIRISTOR**
 - 2.1. Estructura y símbolo
 - 2.2. Curva característica del tiristor
 - 2.2.1. La corriente de mantenimiento
 - 2.2.2. La corriente de enganche
 - 2.3. Condiciones de cebado de un tiristor
 - 2.4. Importancia de la velocidad de crecimiento de la corriente
 - 2.5. Características de puerta de un tiristor
 - 2.5.1. El bloqueo
 - 2.5.2. Límites de frecuencia
 - 2.6. Potencia disipada
 - 2.7. Modos de descebado
 - 2.8. Protección de los tiristores
 - 2.8.1. Protección contra di/dt
 - 2.8.2. Protección contra dv/dt
 - 2.9. Bloqueo con carga inductiva
- 3. TRIACS**
- 4. EL DIAC**
- 5. EL INTERRUPTOR DE ESTADO SÓLIDO (GTO)**
 - 5.1. Descebado de los GTO
 - 5.1.1. Apertura por condensador
- 6. TRANSISTORES MOSFET**
- 7. IGBT**

8. TIPOS DE DISPARO PARA LA FAMILIA DE TIRISTORES

- 8.1. Disparo por un impulso
- 8.2. Disparo por trenes de ondas

9. ELEMENTOS PARA EL DISPARO

- 9.1. El transistor UJT
- 9.2. El transistor PUT
 - 9.2.1. Oscilador de relajación con UJT

BIBLIOGRAFÍA

- MAZDA, F.F. **Electrónica de Potencia.** Ed. Paraninfo, 1995.
- HONORAT **Dispositivos Electrónicos de Potencia. Tiristores, TRIACs y GTO.** Ed. Paraninfo, 1996.
- LILEN, H. **Tiristores y triacs.** Ed. Marcombo, 1992.

COMENTARIO BIBLIOGRÁFICO

El primero de los tres libros describe el diseño de los circuitos de potencia que se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, las características de los componentes semiconductores de potencia, y cómo se utilizan.

El libro de Honorat es una magnífica obra donde se trata en profundidad el funcionamiento de los tiristores y toda su familia, así como de sus aplicaciones.

Tiristores y Triacs es un libro clásico dentro de la electrónica de potencia del que nos interesa sobre todo el estudio de los componentes utilizados en el campo de la electrónica de potencia. Los circuitos de aplicación están algo desfasados al ser un libro que tiene varios años de existencia.

1. LA FAMILIA DE LOS TIRISTORES

El término tiristor, contracción de TIRatrón y de transISTOR, designa a una familia de semiconductores de potencia cuyas características originales eran similares a las de los tubos tiratrones.

Entre la amplia familia de los tiristores, distinguiremos:

- Los tiristores propiamente dichos, conocidos con el nombre de SCR (Silicon Controlled Rectifiers), son elementos unidireccionales con tres salidas (ánodo, cátodo y puerta) bloqueados en el tercer cuadrante. Pertenecen igualmente a esta familia los *tiristores asimétricos* o ASCR (Asymmetrical Silicon Controlled Rectifiers) y los tiristores RCT (Reverse Controlled Thyristors), que incluyen en su silicio o su cápsula un diodo en antiparalelo.
- Los triacs, elementos bidireccionales que derivan de los tiristores. Su nombre proviene de la contracción TRIode AC switch.
- Los GTO (Gate Turn-Off Thyristor) o tiristores de conmutación por puerta.
- Los IGBT.
- Los tiristores fotosensibles o fototiristores. El término inglés utilizado para ellos es LASCR (Light Activated Silicon Controlled Rectifiers).

2. TEORÍA DEL TIRISTOR

2.1. ESTRUCTURA Y SÍMBOLO

El tiristor es un semiconductor de cuatro capas alternativamente PN y PN. Su símbolo viene indicado en la misma figura 11.1 b), en la que además pueden reconocerse:

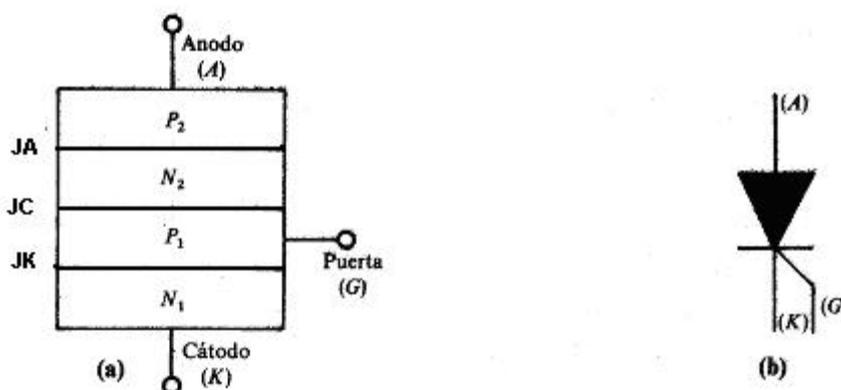


Figura 11.1

- La capa del ánodo (P2) cerca del electrodo A, de espesor medio cifrado en algunos cientos de micras y con dopado medio.
- La capa de bloqueo (N), separada de la primera por la **unión de ánodo JA**. Esta capa es gruesa y está poco dopada para permitir al tiristor soportar altas tensiones y no tener más que una débil corriente de fuga cuando el componente se bloquea al ser sometido a tensión directa.
- La capa de control ligada a la puerta G es de tipo P. Delgada y con dopado medio, está separada de la capa de bloqueo por la **unión de control Jc**.
- La capa del cátodo (dopado N) es una capa de varias micras de espesor, muy dopada. Durante la habilitación de la puerta, inyecta una gran cantidad de electrones a través de la **unión de cátodo JK** en la capa de control vecina.

Para el ánodo y el cátodo se llevan a cabo dos conexiones principales. La conducción, en sentido directo (electrones que van del cátodo al ánodo, o corriente que va del ánodo al cátodo), es regida por un electrodo denominado puerta (gate , en su expresión en inglés).

El tiristor es un dispositivo unidireccional; deja pasar corriente en un solo sentido después de que se haya aplicado una señal de control a su puerta.

El tiristor puede hacer varias funciones:

- Función de rectificación controlada: consiste en utilizar la propiedad de funcionamiento unidireccional del dispositivo, que se comporta así de modo análogo a un diodo.
- Función de interruptor: permite la sustitución de contactos mecánicos.
- Función de regulación: la posibilidad de ajustar de forma precisa el instante de cebado del tiristor permite controlar la potencia o la corriente media de salida.
- Función de amplificación: la corriente de la señal de control puede ser muy débil si se compara con la corriente principal; existe, pues, un fenómeno de amplificación en corriente o en potencia. Esta ganancia puede utilizarse en ciertas aplicaciones.

2.2. CURVA CARACTERÍSTICA DEL TIRISTOR

La curva típica del tiristor, elemento unidireccional, que se ilustra en la figura 11.2 representa el aspecto de la corriente I_A en función de la tensión ánodo-cátodo.

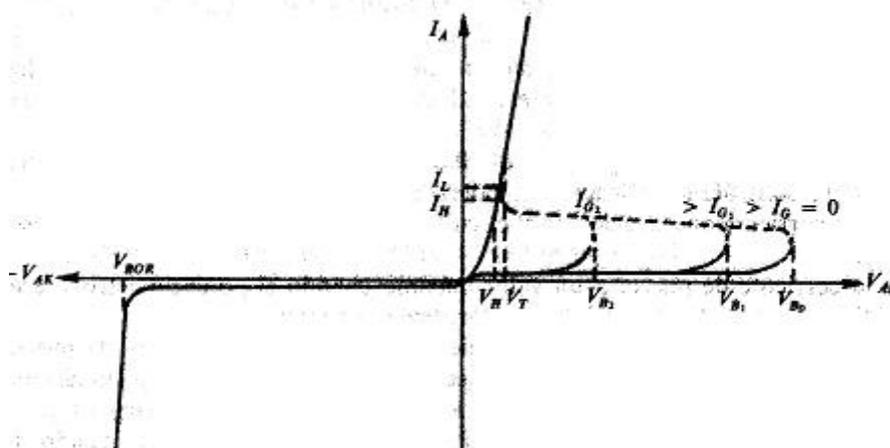


Figura 11.2

Cuando la tensión V_{AK} es nula, I_A es nula. Al aumentar la tensión V_{AK} en sentido directo (los ingleses la denominan V_F donde F proviene de la palabra inglesa *forward*, o directo), es preciso esperar a un valor mínimo (V_{B0}) para activar el tiristor; en este momento, el tiristor se hace conductor y la tensión en sus bornes se desploma, mientras que la corriente I_A crece.

Si se polariza el tiristor en inverso aplicándole una tensión $-V_{AK}$ (o V_R siendo R un símbolo de la palabra inglesa *reverse*, o inverso), se observará la aparición de una débil corriente inversa de fuga (denotaremos la corriente inversa como I_R), hasta alcanzar una tensión máxima inversa que, si se aplica, puede provocar la destrucción del elemento (V_{BOR}).

El tiristor es, pues, conductor en el primer cuadrante. Ha de advertirse que, en este caso, la activación ha sido provocada por aumento de la tensión directa.

Si se aplica una corriente de control en la puerta, se desplazará a la izquierda el punto de disparo V_B , como veremos de inmediato.

2.2.1. La corriente de mantenimiento

Para mantener un tiristor en estado conductor es necesario que exista una corriente mínima que mantenga la conducción del tiristor (o del triac); en caso contrario, basculará al estado bloqueado. Esta corriente, I_H , es la corriente hipostática o corriente de mantenimiento. Para una aplicación dada, será pues necesario elegir un tiristor (o un triac) cuya corriente de mantenimiento sea inferior al valor mínimo de la corriente alcanzada en el circuito, ya corregida de las posibles variaciones debidas a la temperatura.

La corriente de mantenimiento varía con:

- La **sensibilidad de los semiconductores**. Para tiristores y triacs de baja potencia ($I_c < 60 \text{ A}$), la corriente hipostática I_H está relacionada con la variación del valor de la corriente de cebado I_{GT} . En el caso del triac, es importante hacer notar que la corriente I_H es muy inferior a la corriente I_{GT} .
- La temperatura de la unión. El valor de la corriente I_H está físicamente relacionado con el de la corriente de cebado I_{GT} .
- *El valor de la resistencia exterior puerta-cátodo.*

El usuario puede ser inducido a colocar entre la puerta y el cátodo una resistencia para mejorar su mantenimiento de tensión en caliente (derivación de las corrientes de fuga) o bien para que forme parte de la corriente de cebado.

Esta resistencia influye sobre la corriente de mantenimiento en proporciones diferentes según su valor en ohmios y la sensibilidad del semiconductor.

Por el contrario, el tiempo de subida y la tensión aplicada en inverso a los bornes del tiristor después de su bloqueo no tienen ninguna influencia sobre el valor de la corriente de mantenimiento.

2.2.2. La corriente de enganche

La corriente de enganche de un tiristor I_L es el valor mínimo de la corriente principal (corriente que circula entre el ánodo y el cátodo) que permite a este semiconductor permanecer en estado conductor después de la desaparición de la corriente de control.

Al igual que la corriente hipostática, la corriente de enganche varía en función de un cierto número de factores, que son:

- *La sensibilidad del semiconductor y el sentido de conducción.* Para tiristores y triacs de baja potencia, la corriente de enganche está relacionada con el valor de la corriente de cebado I_{GT} .
- *El valor de la corriente de mantenimiento.* El valor de esta corriente está relacionado con el valor de la corriente de enganche I_L siempre superior al valor de la corriente de mantenimiento I_H . La relación I_L/I_H variará según la sensibilidad del semiconductor.
- *La temperatura de unión.* El valor de la corriente de enganche I_L está relacionado físicamente con el de la corriente de puerta I_{GT} . Estos dos parámetros varían, pues, con la temperatura de unión según una ley analógica (figura 11-13).

– *La resistencia exterior puerta-cátodo.* En el caso en que se utilicen tiristores sensibles, el usuario podrá verse inducido a poner una resistencia destinada a mejorar su mantenimiento de tensión en caliente por derivación de las corrientes de fuga. Esta resistencia influye en el valor de la corriente de enganche en virtud de la sensibilidad del semiconductor. En el caso de tiristores sensibles, esta resistencia tiene una influencia importante. En ciertas aplicaciones, el diseñador estará interesado en definir un circuito de control de alta impedancia (1000 ohmios). En el caso de tiristores y triacs estándar, el valor de esta resistencia no posee una influencia importante, con la condición no obstante de que su valor no sea demasiado bajo ($R_{GC} > 20$ ohmios).

2.3. CONDICIONES DE CEBADO DE UN TIRISTOR

Los tiristores se ceban:

- Por tensión. La corriente de puerta tiene una intensidad I_G nula. Si la tensión V_{AK} sobrepasa un valor V_{B0} (siempre alto) se produce el cebado y la conducción del tiristor.
- Por elevación de la temperatura. Cuando $I_A = 0$, para un valor elevado de V_{KA} , pero inferior a V_{B0} , se produce una brusca elevación de la temperatura que puede provocar el cebado.
- Por variación rápida de la tensión, es decir, por un valor dv/dt elevado en el instante $I_G = 0$. El orden de magnitud de este valor de dv/dt debe estar comprendido entre 100 y 300 voltios por microsegundo. Un crecimiento demasiado rápido de la tensión V_{AK} , o sea un dV_{AK}/dt positivo, ceba el tiristor.

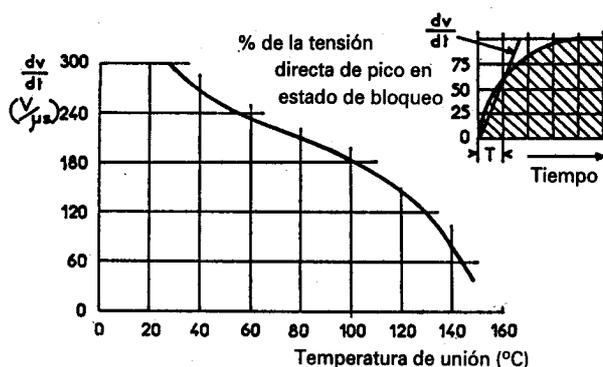


Figura 11.3

La explicación de este fenómeno es que la unión de control en estado bloqueado se comporta como un condensador, de donde se explica el nacimiento de una corriente $I_A = C dV_{AK}/dt$ que se hace superior a I_L lo que provoca el cebado.

- *Por efecto transistor.* Es la forma clásica de habilitar un tiristor: se inyectan portadores suplementarios en la base del transistor equivalente, es decir, en la puerta del tiristor.
- *Por efecto fotoeléctrico.* Al provocar la creación de pares electrón-hueco, la luz, otra forma de energía, puede disparar un tiristor. En este caso, se utiliza un fototiristor, tiristor en el cual la región de puerta está provista de una ventana, esto es, de una lente transparente a los rayos luminosos.
- *Por la puerta.* El cebado del tiristor por la puerta es el modo de cebado más comúnmente utilizado. El razonamiento que proponemos será más claro si nos remitimos a la figura.

Para cebar correctamente un tiristor por corriente de puerta, el método más comúnmente empleado, basta con enviar un impulso positivo entre la puerta y el cátodo, de tal manera que se tenga $I_G > I_{G0}$ durante el tiempo t_{ceb} necesario para que la intensidad de la corriente de carga sobrepase claramente el valor de la corriente de enganche.

$t_{ceb} > t_{ON}$ depende de la naturaleza de la carga del tiristor. Para $I = 10$ A, donde $I_L = 10$ mA, $t_{ceb} = 30$ a 40 μ s en una carga muy inductiva. En efecto, una inductancia retarda la subida de la corriente e impone una duración de cebado mayor que para una carga resistiva o capacitiva.

2.4. IMPORTANCIA DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA CORRIENTE

Durante el proceso de cebado, la zona de conducción se reduce a una parte del emisor próxima al electrodo de control. Si, durante esta fase, el circuito exterior impone un rápido crecimiento de la intensidad, la densidad de corriente que atraviesa la superficie activada podrá alcanzar un valor importante.

Paralelamente, el descenso de tensión en los bornes del dispositivo durante el paso desde el estado de bloqueo al de conducción no se efectúa instantáneamente. En consecuencia, podrá producirse la presencia simultánea de valores elevados de corriente y de tensión.

Función de estos dos parámetros, la potencia instantánea puede alcanzar valores importantes. La energía disipada en un pequeño volumen dará lugar entonces aun calentamiento considerable que, cuando se alcance el límite térmico crítico, destruirá por fusión del silicio el dominio conductor: es lo que se llama destrucción por di/dt .

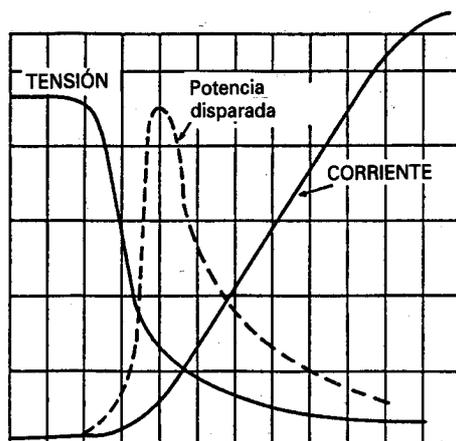


Figura 11.4

2.5. CARACTERÍSTICAS DE PUERTA DE UN TIRISTOR

Las características típicas de puerta llevan a obtener la familia de curvas que ilustra la figura 11.5.

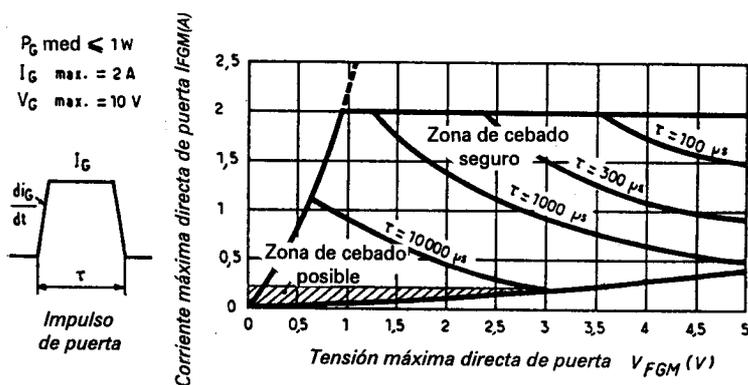


Figura 11.5

Estas curvas permiten definir las condiciones extremas de disparo, cuyas limitaciones son de dos tipos:

- Dispersión de las características debida al proceso de fabricación (por lo cual se define un zona que engloba las características a una temperatura dada).
- Según la gama de temperaturas admisible durante el funcionamiento (por ejemplo: -40 a 125°C).

Para altas temperaturas, el valor V_G decrece (para un valor I_G dado) y la sensibilidad aumenta (I_G de cebado menor).

Para bajas temperaturas, sucede lo contrario.

Dado que la corriente y la tensión de puerta que provocan el cebado varían con la temperatura y las técnicas de fabricación, es posible definir una superficie S en el plano de la corriente con la tensión de puerta (I_G V_G) donde se pueda garantizar el cebado del tipo de tiristor de que se trate.

En la práctica, hay que recordar que la corriente y la tensión de cebado disminuyen cuando aumenta la temperatura. La figura especifica, además, la limitación de potencia disipada en la puerta.

2.5.1. El bloqueo

El bloqueo de un tiristor se lleva a cabo de dos maneras:

- Bloqueo por tensión: $V_{AK} < 0$.
- Bloqueo por corriente: $I = 0$.

En la práctica solamente se utiliza el bloqueo por tensión, aplicando una tensión en la puerta negativa durante un tiempo superior al de evacuación de los portadores almacenados.

Para estudiar el descebado de los semiconductores bloqueables, es decir, su vuelta al estado de bloqueo después de un paso de mayor o menor duración por el de conducción, usaremos las curvas de la figura que ilustran las propiedades de bloqueo de los tiristores, los triacs y los GTO.

Si se invierte la tensión en los bornes del dispositivo y se pone éste en polarización inversa, la corriente directa se anula para alcanzar un pequeño valor inverso i . Las cargas acumuladas por el tiristor en conducción son entonces parcialmente eliminadas, lo que permite definir el tiempo de recuperación inversa t_{rr} (de t_1 a t_3).

La otra parte de estas cargas se recombina por difusión y, cuando dichas cargas son suficientemente escasas, la puerta recupera su poder de habilitación: puede entonces volverse a aplicar la tensión directa sin riesgo de recebado. Este tiempo de recuperación inversa se denota por t_{gr} .

La duración total del bloqueo t_{off} se obtiene, pues, como la suma: $t_{off} = t_{rr} + t_{gr}$.

Este tiempo de descebado depende de numerosos parámetros, y aumenta con:

- La temperatura de unión.
- El valor de la corriente directa (zona A).
- La pendiente negativa de la corriente directa (zona B).
- La impedancia externa de la puerta.
- El valor de la polarización positiva de la puerta.

Dicho tiempo disminuye cuando lo hacen la tensión inversa (zona C) y la corriente de pico.

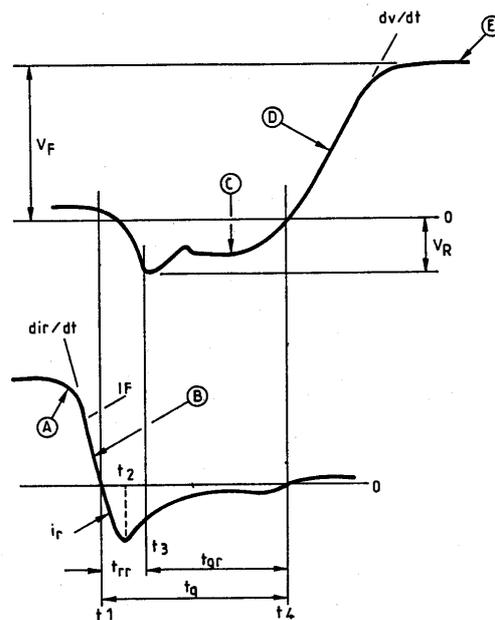


Figura 11.6

Cuando el tiristor se desceba, la tensión directa sólo puede aplicársele de nuevo de forma progresiva.

2.5.2. Límites de frecuencia

Es importante no perder de vista que, en la familia de los tiristores, existe una clasificación en función del tiempo de apertura. En general, considera:

- Dispositivos con tiempo de apertura breve: *son los tiristores rápidos y muy rápidos.*
- Dispositivos estándar para los cuales las condiciones de utilización (por ejemplo, la red a 50 Hz) no exigen prestaciones especiales en la apertura. En este caso, el tiempo de apertura puede ser superior al $100\mu\text{s}$.

Incluso con los tiristores rápidos o muy rápidos, la frecuencia de trabajo no puede sobrepasar ciertos valores; el límite es imputable a la duración de la apertura del dispositivo en las condiciones de utilización. Así, la frecuencia rara vez sobrepasa los 10.000 Hz.

El hecho de trabajar a frecuencias importantes impone, en efecto, al tiristor restricciones de di/dt ; no obstante, el dispositivo podría decirse que guarda en memoria el calentamiento consiguiente a este valor de di/dt , ya que no tiene tiempo de disipar el exceso de calorías producidas.

2.6. POTENCIA DISIPADA

La potencia disipada en la unión del tiristor depende de las cinco causas siguientes:

1. Las pérdidas por conducción directa.
2. Las pérdidas por conmutación durante el cebado.
3. Las pérdidas por conmutación durante el descebado.
4. Las pérdidas durante el bloqueo.
5. Las pérdidas en el circuito de puerta.

Los fabricantes indican generalmente la potencia media disipada por un tiristor dado en función del ángulo de conducción (cuyo significado se verá ulteriormente), cuando se trabaja en régimen sinusoidal (por ejemplo, con frecuencia hasta 400 Hz).

En la figura 11.7 se ofrece un ejemplo semejante de serie de curvas.

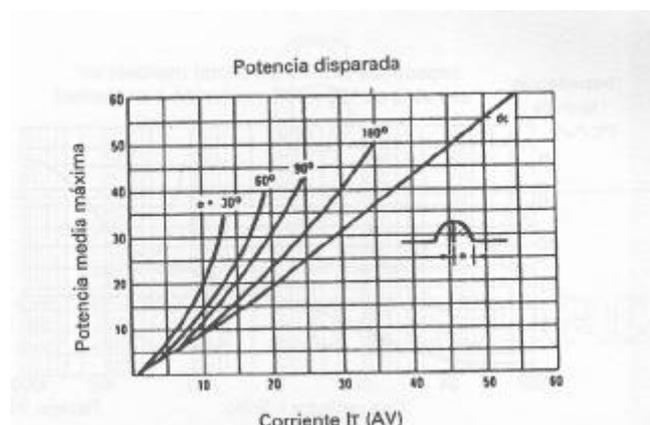


Figura 11.7

2.7. MODOS DE DESCEBADO

1) Cuando el tiristor funciona en corriente alterna, la tensión que se invierte en sus bornes en cada semiciclo provoca el descebado.

2) Cuando el tiristor funciona en corriente continua, el descebado puede ser provocado por:

- Un contacto mecánico.
- Conmutación forzada.

Una interrupción pura y simple del circuito provoca el descebado del tiristor. Su cortocircuito produce el mismo efecto.

Esta interrupción puede ser producida por un interruptor mecánico, o por un tiristor o transistor auxiliar. Se llega entonces al montaje clásico de la figura 11.8. Supongamos que el tiristor $Th1$ está en estado conductor, mientras que $Th2$ está bloqueado: el condensador C se carga con el valor E con las polaridades indicadas. Si se aplica a continuación una señal de control a la puerta de $Th2$, este tiristor se ceba y el condensador se encuentra en paralelo con $Th1$ y polaridad inversa, lo que provoca su descebado.

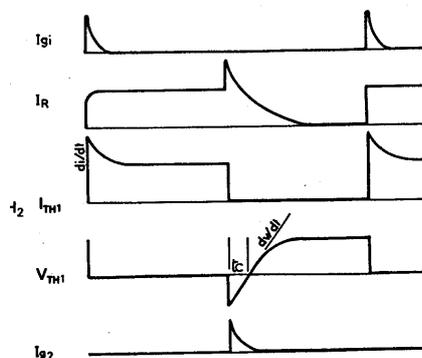
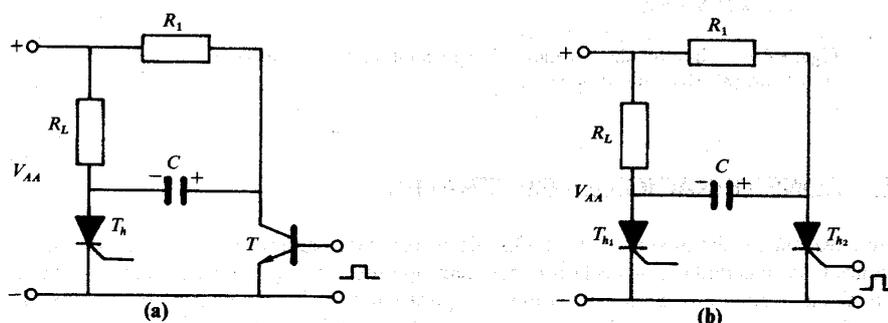


Figura 11.8

2.8. PROTECCIÓN DE LOS TIRISTORES

Las primeras protecciones incluidas en los semiconductores bloqueables fueron las precauciones térmicas, los radiadores y las protecciones eléctricas y los fusibles. A menudo, es indispensable, y en todos los casos deseable, completar estos dispositivos con circuitos electrónicos encargados de limitar los efectos de las dv/dt y las sobrecargas de intensidad.

2.8.1. Protección contra di/dt

Cuando la carga posee un componente capacitivo, es posible establecer bruscamente una corriente aun valor elevado desde el instante en que el tiristor comienza a cebarse. El gradiente de intensidad di/dt impuesto al tiristor puede ser perjudicial para éste, como ya hemos visto.

En el caso en que pueda temerse la aparición de valores importantes de di/dt , es necesario asegurar que la corriente de puerta que provoca el cebado se establezca con mucha rapidez a un valor suficientemente elevado.

Si el valor de di/dt amenaza con sobrepasar el valor límite indicado por el constructor, es preciso proteger el tiristor añadiéndole una pequeña inductancia en serie.

Los mejores resultados son los que se obtienen por medio de una inductancia saturable. Mientras la inductancia no se sature, la corriente que la atraviesa será relativamente baja; cuando la inductancia se satura, se comporta como un cortocircuito; su acción viene a retardar el establecimiento de la corriente.

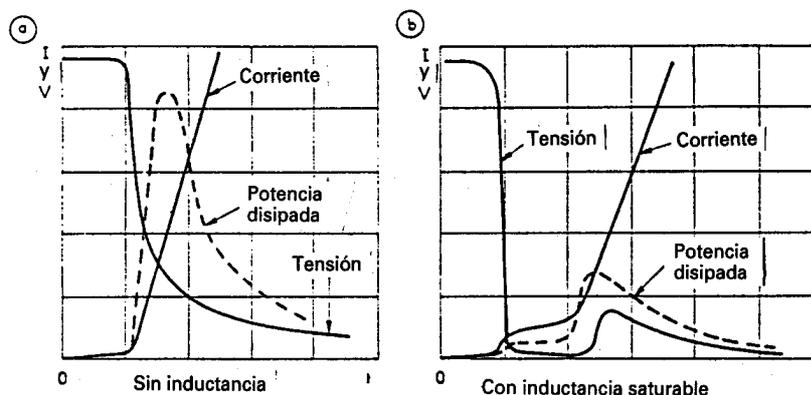


Figura 11.9

Después de este retardo, el tiristor disipa una potencia menor, ya que la superficie conductora es mayor y la energía que puede aceptar aumenta al hacerlo la superficie.

2.8.2. Protección contra dv/dt

La conexión brusca a la alimentación de circuitos próximos que contengan una carga inductiva o variaciones exageradas en la fuerza contraelectromotriz de la carga (por ejemplo, si está constituida por el rotor de un motor de colector) pueden provocar variaciones bruscas de la tensión de alimentación mientras el tiristor se encuentre en estado de bloqueo.

Hemos visto que las dv/dt correspondientes amenazan con recibir de forma intempestiva el tiristor (o triac, o GTO).

El procedimiento más corriente para reducir la velocidad de subida de la tensión consiste en colocar un condensador en los bornes del tiristor (o el triac). Pero la sobrecarga de intensidad y la di/dt , que introduciría la descarga brusca de esta capacidad en los momentos de cebado, podrían ser perjudiciales para el tiristor.

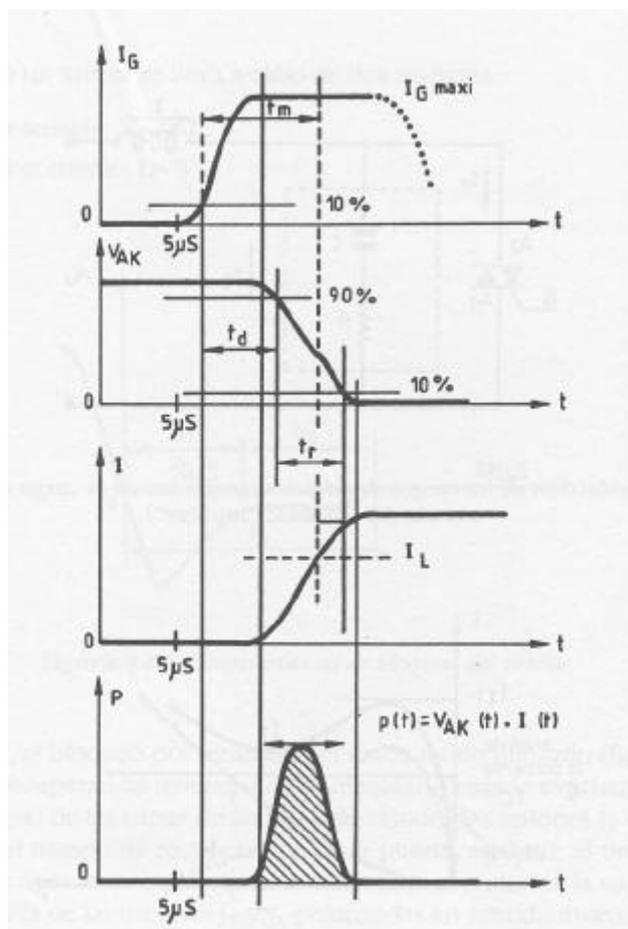


Figura 11.10

En la mayoría de las aplicaciones en carga inductiva de los tiristores o de los triacs, el usuario se ve impulsado a montar entre ánodo y cátodo una red RC destinada a eliminar los riesgos de cebados intempestivos por parásitos o de recebados espontáneos por dv/dt (figura 11.11). La capacidad C y la impedancia de la carga atenúan los frentes de tensión transmitidos por la red o reaplicados en conmutación en la carga inductiva.

Esta red RC posee también una segunda ventaja. La energía acumulada en el condensador C en el momento del descebado se reinyecta seguidamente en el tiristor en el cebado. La velocidad de crecimiento de la corriente en el tiristor durante la descarga del condensador no está entonces limitada más que por la tensión de pico de carga del condensador y la inductancia de conexión del circuito snubber al tiristor. La amplitud de la corriente es el cociente entre la tensión de pico de carga del condensador y la resistencia en serie R . Este circuito permite, así, superar muy rápidamente la corriente de enganche I_L .

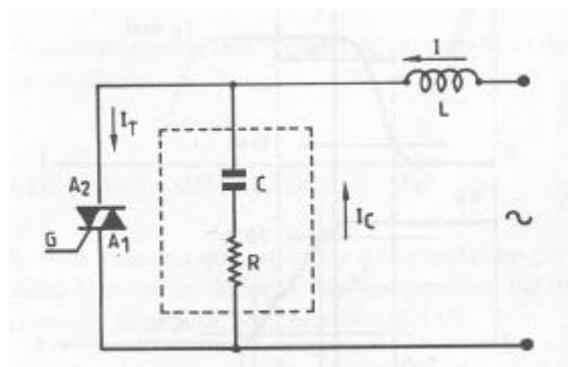


Figura 11.11

En la utilización del circuito RC es, sin embargo, recomendable no trabajar con una resistencia en serie R demasiado pequeña. En la práctica, el efecto conjugado en el momento del cebado de la corriente I_{T1} (igual al cociente entre la tensión de carga del condensador y la resistencia R) y de la pérdida de corriente dI_T/dt (igual al cociente entre la tensión de carga del condensador y la inductancia de las conexiones triac-circuito RC) puede resultar peligroso para el semiconductor. Se aconseja un valor de R superior a 10 ohmios.

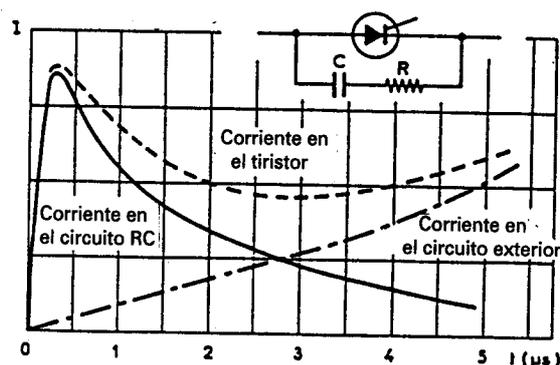


Figura 11.12

Se hace, por tanto, necesario limitar la corriente de descarga por medio de una resistencia R (de 20 a 100 ohmios) dispuesta en serie con el condensador. Este circuito RC debe situarse en los bornes del tiristor, lo más cerca posible de dichos bornes.

La figura 11.10. muestra el modo en que esta red facilita de forma accesoria el cebado del tiristor en la carga inductiva, estableciendo de inmediato una corriente superior a la corriente de enganche mínima I_L requerida para que el tiristor permanezca cebado, incluso después de la desaparición del impulso de puerta.

2.9. BLOQUEO CON CARGA INDUCTIVA

Supongamos que disponemos de un triac, con ataque en corriente alterna, provisto de una carga inductiva que desfasa la tensión con respecto a la corriente en 90° . Las curvas de la figura 11.13 representan la tensión y la corriente de red, y la forma de la tensión aplicada en los bornes del triac. Puede verse que, cuando la corriente pasa por el valor cero (punto A), toda la tensión de red aparece en sus bornes con un valor elevado de dv/dt (punto B), capaz de disparar de nuevo el dispositivo.

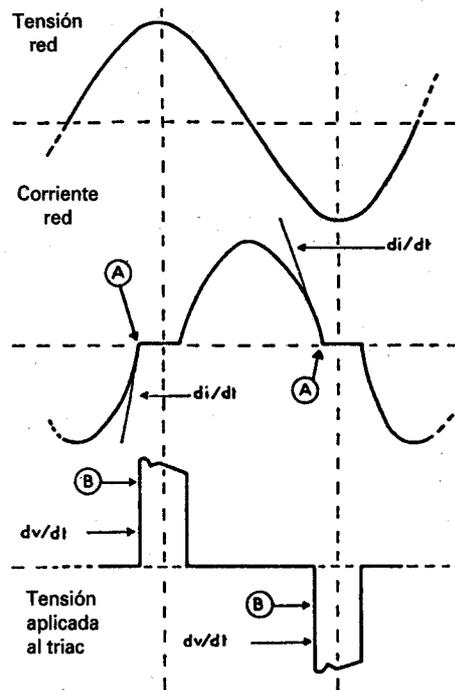


Figura 11.13

En tal caso, es necesario establecer una red de protección contra los valores excesivos de las dv/dt y las sobrecargas de tensión, como se ha indicado con anterioridad. Se puede observar, por otra parte, que el valor de dv/dt aumenta con la frecuencia (figura 11.14), lo que parecía evidente.

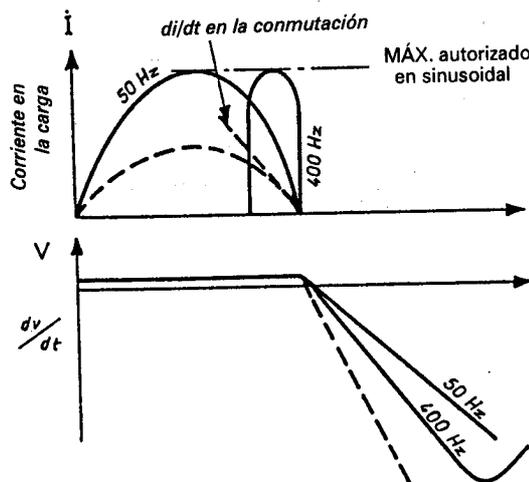


Figura 11.14

Diagramas de cálculo de la red RC

Un modo de cálculo de la red RC de protección es el propuesto por RCA.

Los valores de R y de C se elaboran en función de la corriente I en la carga (en amperios eficaces) y del valor de dv/dt admisible.

Estos valores han sido establecidos para el peor de los casos posibles: una carga puramente inductiva, es decir, con un $\cos \varphi = 0$. Para valores mejores del $\cos \varphi$, el valor de la tensión de pico debe reducirse en la misma proporción; por ejemplo, sean 200 V de pico correspondientes a $\cos \varphi = 0$; si $\cos \varphi$ pasa a ser 0,7, la tensión de pico se hará igual a: $200 \times 0,7 = 140$ V.

Para utilizar estos gráficos, debemos situarnos en el diagrama correspondiente a la tensión deseada y proceder del modo siguiente:

- Trazar una vertical a partir de la corriente nominal prevista.
- El corte de esta vertical con la recta oblicua dv/dt admisible, marcada con trazo continuo, tiene como ordenada, en la escala de la izquierda, el valor de C en microfaradios.
- Su corte con la recta oblicua dv/dt , marcada en línea de puntos, proporciona el valor de R en ohmios en la escala de la derecha.

El gráfico mostrado en la figura 11.15 es para una tensión de red de 220 V.

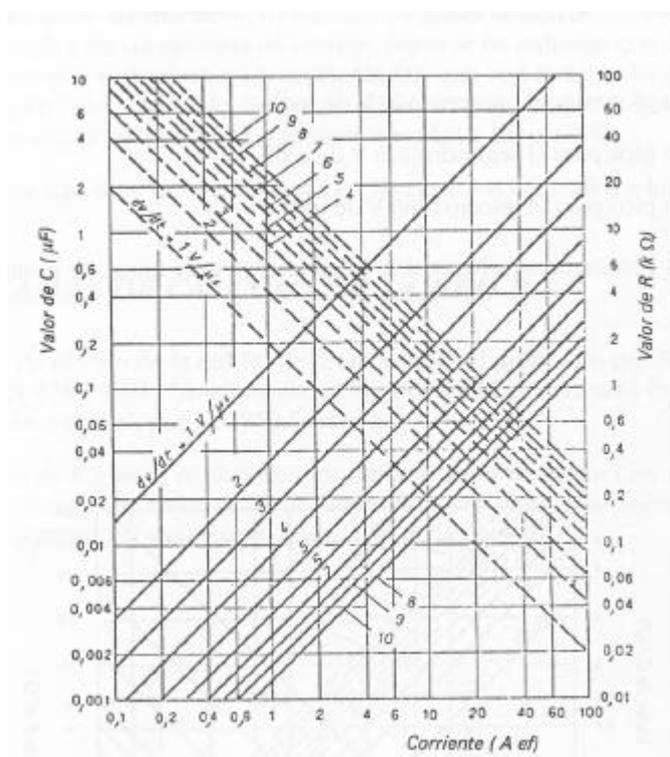


Figura 11.15

3. TRIACS

El triac (triodo de corriente alterna) es un componente con tres terminales y derivado del tiristor, que puede considerarse eléctricamente como dos tiristores en antiparalelo. Presenta, sin embargo, dos ventajas fundamentales sobre este circuito equivalente:

- El circuito de control resulta mucho más sencillo al no existir más que un electrodo de mando.
- Puede bascular al estado conductor independientemente de la polaridad de la tensión aplicada al terminal de control.

Al igual que ocurría en el tiristor, el paso del estado de bloqueo al estado conductor sólo se realiza por aplicación de un impulso de corriente en el electrodo de mando; y el paso del estado conductor al estado de bloqueo se produce por aplicación de una tensión de polaridad inversa, o por la disminución de la corriente por debajo del valor de mantenimiento I_H , siendo este último el caso más utilizado.

En la Figura 11.16 se representa su estructura interna, formada por seis capas de semiconductor, y su símbolo más usual. Los electrodos a los que se aplica la tensión principal a controlar se les denomina ánodo 2 (A2) o terminal 2, y ánodo 1 (A1 o terminal 1; al electrodo de control se le denomina puerta (G). El paso de la corriente principal se efectuará entre A2 y A1, siendo el circuito de control el formado por G y A1.

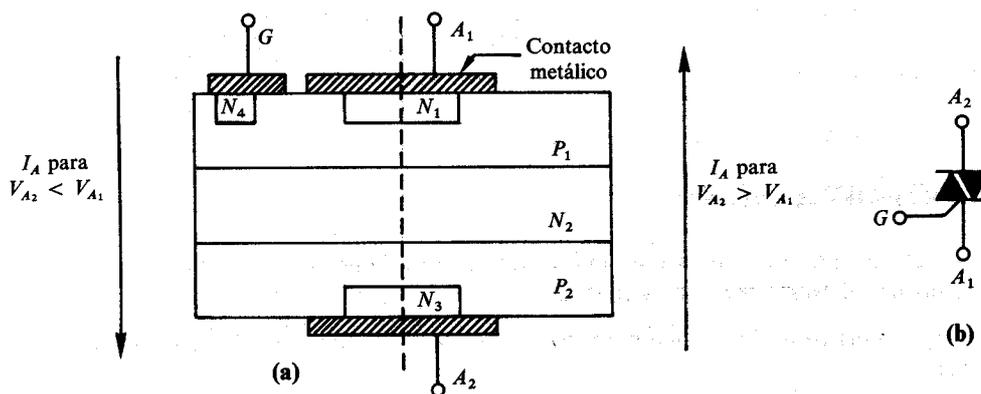


Figura 11.16

Si dividimos la estructura interna del triac según un eje vertical, obtendremos los dos tiristores que lo forman:

- P2-N2-P1-N1, para tensiones de A2 positivas respecto de A1.
- P1-N2-P2-N3, para tensiones de A2 negativas respecto de A1.

N 4 y P 1 forman la puerta para las distintas polaridades de este terminal. En la Figura 11.16 a) se puede ver esta división, así como el sentido de circulación de la corriente (representado por una flecha) para ambas mitades del elemento.

Si se polariza al triac con una tensión positiva en A2 respecto de A1 con el terminal G al aire, y aumentamos el valor de esta polarización, se obtendrá una curva característica idéntica a la del tiristor en polarización directa, pero al contrario que éste, si se invierte el sentido de esta polarización se observa una curva simétrica de la anterior respecto de origen, tal como se muestra.

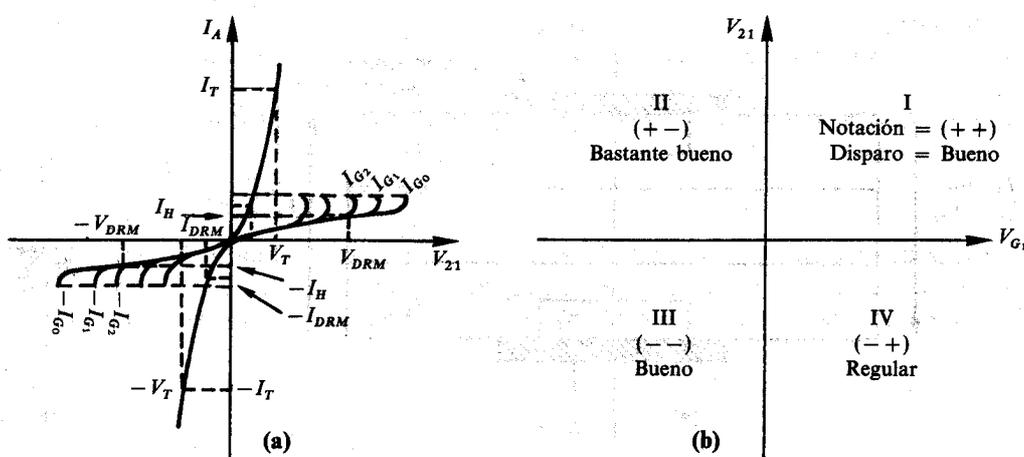


Figura 11.17

Al igual que ocurría con el tiristor, si el terminal G se conecta a una fuente de tensión respecto de A1, vemos que el momento del cebado del triac se adelanta respecto a anterior. Lo excepcional del triac es que este cebado se produce independientemente del sentido de la tensión aplicada a la puerta.

Tomando como referencia el terminal A1 y en función del sentido de las polarizaciones de los circuitos principales y de arranque, cabe hablar de los cuatro cuadrantes de disparo del triac, tal como se ve en la Gráfica.

Del análisis de las figuras 11.17 a) y b) se deduce que hay tres posibles modos de aplicar el impulso de disparo de un triac:

- Disparo por impulsos siempre positivos (cuadrantes I y IV). Es la forma más cómoda si se dispone de una fuente de señal de disparo suficientemente potente, ya que presenta el inconveniente de la menor sensibilidad al cebado del elemento en el cuadrante IV.

- Disparo por impulsos siempre negativos (cuadrantes II y III). Presenta el inconveniente de la mayor intensidad de cebado requerida en el cuadrante II.
- Disparo por impulsos alternativamente positivos y negativos (cuadrantes I y III). Es el caso más favorable, sobre todo si la polaridad de los impulsos coincide con la polaridad de la tensión del circuito principal.

Por lo visto anteriormente, se trabaja preferentemente con la misma polaridad para la tensión A1-A2 (VII) que para la tensión G-A1 (VG₁), o bien, si sólo es posible disponer de impulsos de control de una única polaridad, con impulsos siempre negativos.

4. EL DIAC

Si a la estructura de la figura 11.16 se le quita la capa N4 y el terminal de puerta, obtenemos un nuevo elemento compuesto por dos tiristores en antiparalelo. Dicho elemento está preparado para conducir en los dos sentidos de sus terminales, y se le conoce como diac, diodo de corriente alterna. En la figura 11.18 a) se representa la estructura resultante, y su símbolo, en la b), siendo el nombre de sus terminales los de A1 y A2.

Al igual que en el triac, si dividimos la estructura según un eje vertical, se observan los dos tiristores que lo componen:

- P2-N2-P1-N1 para $V_{A2} > 0$.
- P1-N2-P2-N3 para $V_{A2} < 0$.

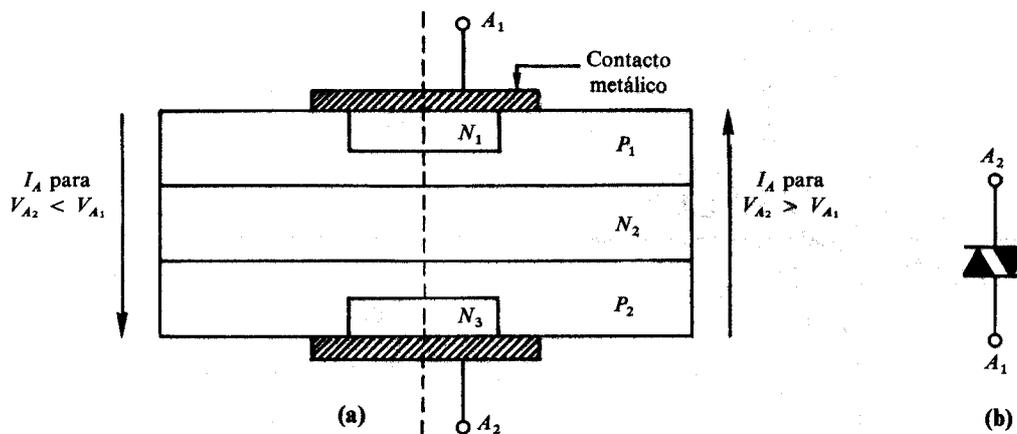


Figura 11.18

La curva característica del diac es igualmente simétrica respecto del origen, pero sólo cuenta con una curva, ya que no dispone de terminal de puerta. Otra diferencia respecto del triac es que la tensión a la que se produce el cebado es considerablemente menor y suele estar alrededor de los 30 voltios. Esta curva se representa en la figura 11.19.

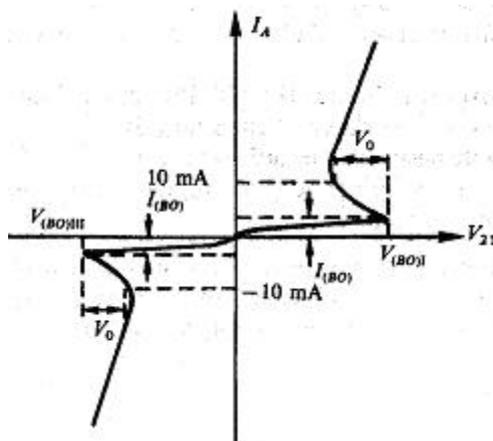


Figura 11.19

Debido a su comportamiento bidireccional ya su bajo valor de tensión de cebado, se suele emplear como elemento de disparo de un tiristor o un triac.

5. EL INTERRUPTOR DE ESTADO SÓLIDO (GTO)

El interruptor de estado sólido (Gate turn-off switch) (GTO) es de construcción similar a la de un tiristor, tiene cuatro capas y tres terminales, ánodo, cátodo y puerta. Se conecta por flujo de corriente en el terminal de puerta, como en el tiristor convencional, pero puede desconectarse eliminando la corriente de la puerta, es decir, con corriente de puerta negativa. El funcionamiento del GTO puede explicarse con referencia a la analogía de los dos transistores. Aquí la corriente de puerta I_G se muestra fluyendo en el terminal G_2 , pero suponiendo que los dos transistores están en conducción, si la corriente de puerta se elimina de este terminal, se desviarán toda la corriente de base del transistor n-p-n, desconectándolo.

El símbolo del GTO se muestra en la figura, siendo similar al del tiristor excepto por la puerta, que indica la doble dirección del flujo de corriente. Las curvas estáticas para el GTO, mostradas en la figura 11.20, también son similares a las del tiristor, una vez que se ha conectado por suficiente corriente de puerta.

A bajos niveles de corriente de puerta, funciona en la región del transistor, con una familia de curvas de ataques de puerta en aumento.

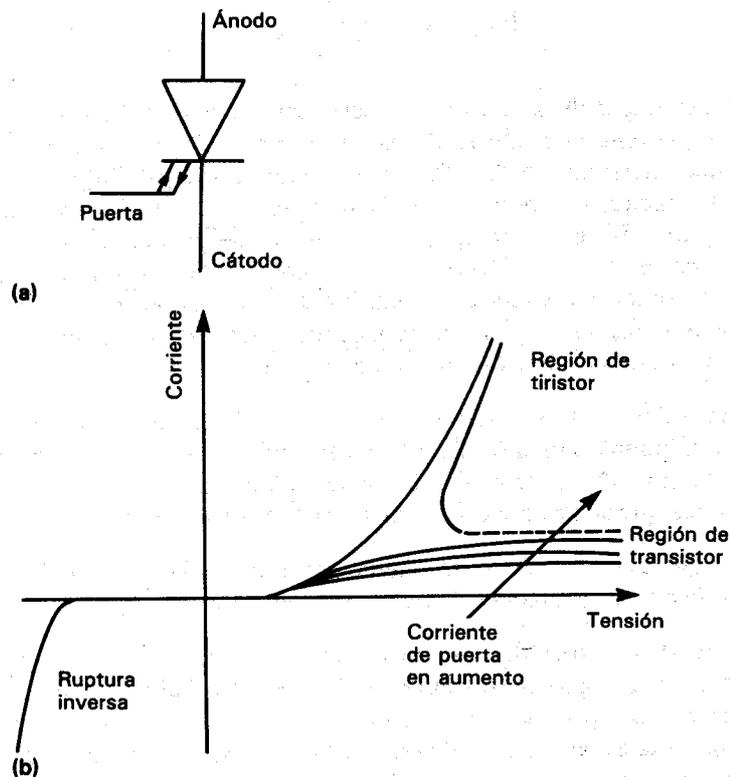


Figura 11.20

La mayoría de las especificaciones y características de un GTO son las mismas que las de un tiristor, excepto en lo siguiente. El GTO tiene un alto rango de tensión de bloqueo directo, comparable al que se puede conseguir en un tiristor, pero su rango de tensión inversa es baja, entre 10 y 20V, y en este aspecto es similar al transistor. El GTO también tiene una mayor caída de tensión y una mayor corriente de enclavamiento que el tiristor. Este último parámetro significa que en la conexión, el ataque de puerta tiene que mantenerse durante un período mayor, para asegurar que se ha alcanzado la corriente de enclavamiento.

Como se espera, es en el proceso de desconexión donde el GTO difiere más del tiristor. Antes de desconectarse, todas las regiones están fuertemente saturadas, y tiene que eliminarse el exceso de carga antes que realizarse la desconexión, dando lugar aun tiempo de carga y de caída. El exceso de carga primero se elimina de la región P1 en las inmediaciones del terminal de puerta, y esta región recuperada se amplía entonces sobre toda la unión. La corriente continua fluyendo al pasar por las partes de la unión que todavía no se han desconectado, aunque eventualmente toda la región se recupera y el período de carga finaliza. Por lo tanto, el efecto de desconectarlo es similar a la conexión de un tiristor, donde la corriente se pasa inicialmente por la pequeña región de conexión más cercana a la puerta. En las hojas de datos se marcan dos parámetros en los GTO, que no se dan para los tiristores, la tensión de desconexión de puerta (V_{GQ}) y la corriente de desconexión de puerta (I_{GQ}). Con el incremento

de la temperatura se degrada el tiempo de desconexión, el tiempo de conexión y la ganancia de desconexión.

5.1. DESCEBADO DE LOS GTO

En los GTO, el bloqueo se efectúa aplicando un impulso negativo a la puerta.

La utilización, para hacerlo, de una fuente de corriente provocaría una disipación de potencia importante, por lo que se recurre a una fuente de tensión.

El valor de la tensión negativa impuesta al electrodo de control debe estar comprendido entre 6 y 8 V y, en ningún caso, sobrepasar los 10 V; la duración de aplicación de la polarización negativa debe ser de 20 a 30 μs , aproximadamente, para permitir al dispositivo recuperar sus propiedades de bloqueo.

Por ejemplo, una fuente de tensión negativa destinada, por mediación de un tiristor de GTO, a interrumpir una corriente continua de 5 A con una reaplicación de tensión de 500 V, puede escogerse igual a -8 V para una duración de aplicación de esta tensión de 30 μs . La alimentación se constituye de tal forma que, durante 3 μs , transmita una corriente de 1,5 A sin que la tensión correspondiente decrezca más del 20%.

5.1.1. Apertura por condensador

Directamente deducido del circuito anterior, el montaje de extinción por condensador ofrece un cierto número de ventajas. El principio utilizado consiste en descargar un condensador que presenta, en los primeros microsegundos, las características de una alimentación con tensión constante (figura 11.21). Puede suministrar, por otra parte, una corriente importante durante el tiempo necesario para el rebloqueo, y conservar una carga suficiente que permita la reaplicación de la tensión en el ánodo del tiristor bloqueable.

La corriente de cebado del dispositivo viene suministrada por la carga del condensador C a través de la resistencia R; es preciso, además, que C esté cargado al final del tiempo de conducción.

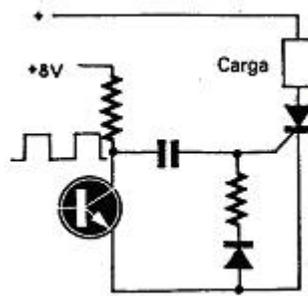


Figura 11.21

6. TRANSISTORES MOSFET

Son transistores basados en un único portador, más simples y sencillos de fabricar que los bipolares. Son estructuras con un canal y un electrodo denominado puerta (gate). Pueden ser de acumulación o de depleción. Su símbolo y curvas características de salida se muestran en la figura 11.22 y 11.23 respectivamente.

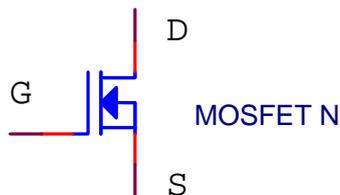


Figura 11.22

Se gobiernan por tensión. Constan de tres terminales: el drenador (D), el surtidor (S) y la puerta (G). Básicamente el MOSFET se controla aplicando una tensión entre la puerta y el surtidor V_{DS} . A partir de un determinado valor (V_T), el transistor entra en conducción, originándose un flujo de corriente entre drenador y surtidor (I_{DS}).

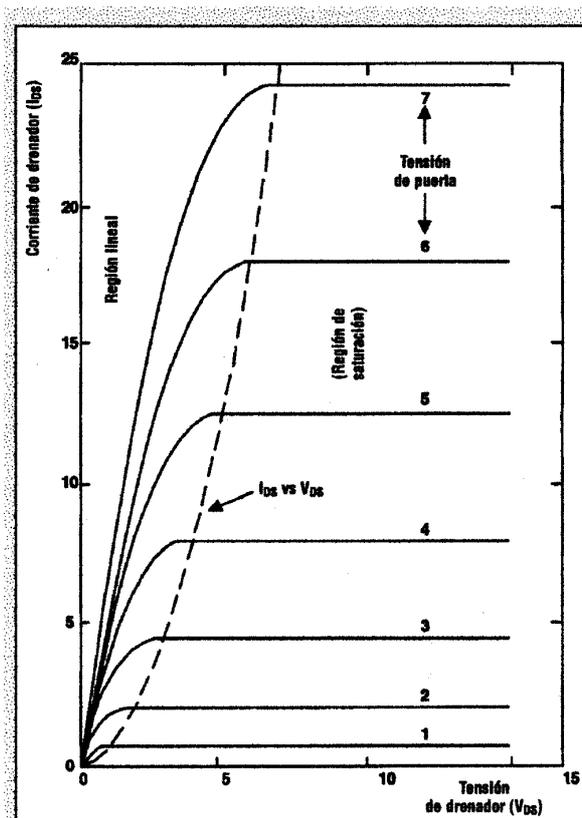


Figura 11.23

La característica interna de mayor relevancia es la resistencia directa del canal en conducción ($r_{DS(on)}$) puesto que determina el nivel que alcanzará la corriente I_{DS} . Los dispositivos actuales tienen una r_{DS} de tan solo unos miliohmios.

Otra de las ventajas que tienen los MOSFET sobre los bipolares es su velocidad de conmutación. La velocidad de conmutación está determinada por el tiempo requerido para establecer cambios de tensión a lo largo de las capacidades parásitas del dispositivo.

Cuando actúa como un conmutador, la técnica de control consiste en variar la tensión V_{GS} para poder hacer que fluya corriente I_{DS} . En el bloqueo la resistencia r_{DS} tiene un valor muy elevado que desciende bruscamente hasta el mínimo cuando entra en conducción. Para llevar al circuito al bloqueo de nuevo, no es necesario aplicar tensiones negativas, basta con dejar de aplicar la tensión positiva, lo que simplifica mucho el control.

7. IGBT

Son transistores bipolares de puerta aislada que combina las ventajas de los BJT y los MOSFET. Los IGBT también se controlan por tensión pero su manejo es más

sencillo que en un MOSFET. El nivel de pérdidas de los IGBT en conducción es mucho más bajo que los MOSFET pero son más lentos.

Los terminales de los IGBT son iguales que en los MOSFET, siendo su símbolo el de la figura 11.24.

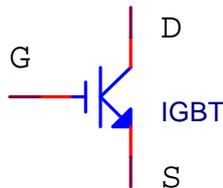


Figura 11.24

La caída de tensión V_{DS} es mucho menor que en los MOSFET, del orden de 1,2 V para tensiones de trabajo de 600 V.

Trabajan con tensiones muy elevadas (6.500 V) y pueden soportar corrientes del orden de los 600 A.

La curva característica de un IGBT se muestra en la figura 11.25.

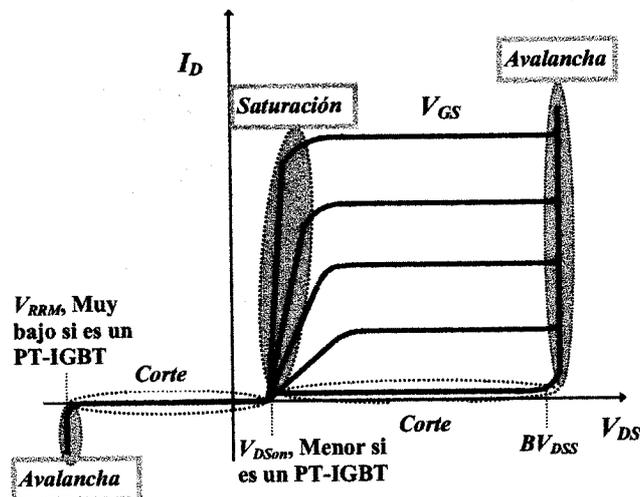


Figura 11.25

En la actualidad es el dispositivo más utilizado para potencias entre varios KW y un par de MW, trabajando a frecuencias desde 5KHz hasta 40KHz.

8. TIPOS DE DISPARO PARA LA FAMILIA DE TIRISTORES

Los tipos de disparo de tiristores, triacs y GTO s son los siguientes:

- Disparo en c.c.
- Disparo en c.a.
- Por impulsos.
- Por trenes de ondas.

Para precisar las condiciones de disparo se usa la gráfica:

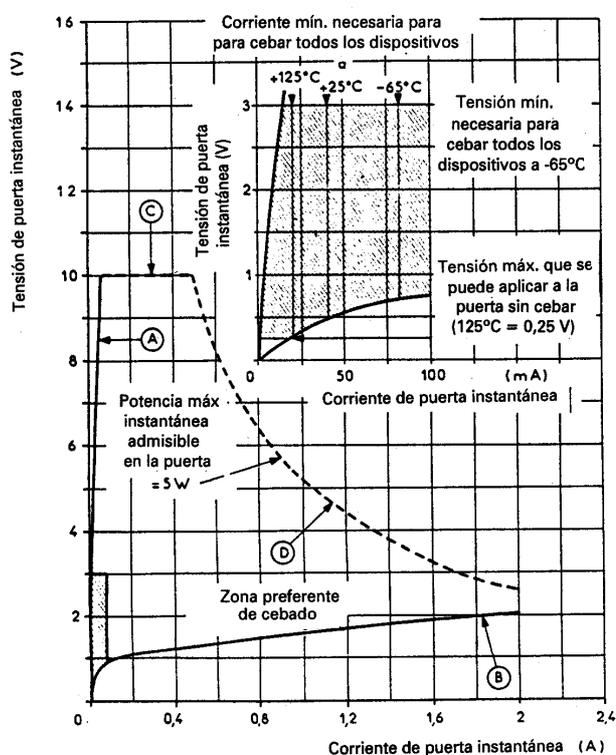


Figura 11.26

Cuando el disparo se realiza en alterna la excursión máxima de la tensión de puerta debe permanecer por debajo del valor máximo admisible.

8.1. DISPARO POR UN IMPULSO

Se considera que impulsos de una duración de una o varias decenas de microsegundos, según el tiristor, hacen que el disparo coincida con el obtenido en corriente continua.

El cebado por impulsos permite obtener una potencia de pico superior a la potencia media de puerta admisible, y pueden aplicarse tolerancias mayores al circuito de cebado. Además, puede reducirse aun valor mínimo el retardo entre la señal de puerta y la subida de la corriente anódica, lo que hace posible una sincronización muy precisa.

Por último, se limita la disipación debida al aumento de la corriente residual hasta cerca del nivel de cebado.

Estas tres razones explican la preferencia que se otorga, siempre que sea posible, a este modo de disparo que procura al mismo tiempo una disipación menor y un aumento en la precisión.

Este tiempo de retardo disminuye cuando se aumenta la amplitud del impulso de control, y tiende hacia 0,2 y 0,5 μs para impulsos de 500 mA o más.

En la práctica, conviene tener en cuenta los principios siguientes para la obtención de los mejores resultados (en los casos más generales):

- El circuito de puerta debe recibir con preferencia la señal de ataque de un generador de corriente.
- La corriente de control debe ser bastante superior al valor mínimo I_{GT} especificado y, por ejemplo, de 3 a 5 I_{GT} .

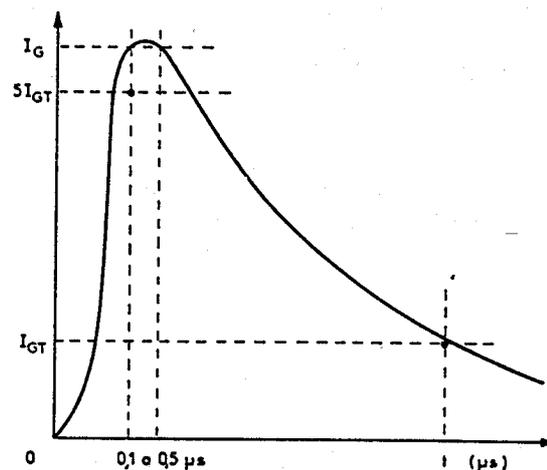


Figura 11.27

- El tiempo de subida ha de ser lo más breve posible, desde 0,1 a 1 μs , sobre todo si el tiristor tiene que soportar una fuerte rampa de corriente después del cebado.

- La duración del impulso debe ser tal que la corriente de control permanezca por encima de I_{GT} mientras no se alcance la corriente de enganche de ánodo. Conviene además reservarse un margen de seguridad, que es obligatoriamente importante en el caso de circuitos con carga inductiva donde los fenómenos son más complejos.

8.2. DISPARO POR TRENES DE ONDAS

En funcionamiento en corriente alterna sobre carga inductiva con un triac (o dos tiristores en montaje en antiparalelo), la corriente en el elemento inductivo se prolonga más allá de la duración del primer semiciclo de tensión en que ha tenido lugar el cebado (este desfase se corresponde a grandes rasgos con el ángulo φ del $\cos \varphi$ de la carga).

Puede entonces suceder que esta corriente no se haya anulado todavía cuando se transmita el siguiente impulso de disparo; en consecuencia, el triac (o uno de los tiristores) permanecerá cebado durante el paso de este impulso y sólo se bloqueará tras su paso, sin posibilidad de que se vuelva a cebar antes del semiciclo siguiente, que es de la misma polaridad que el primero: de ello se sigue un efecto de rectificación que puede ser perjudicial para los circuitos.

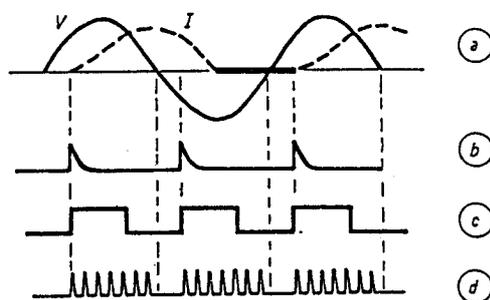


Figura 11.28

Para evitar este fenómeno, es preciso adoptar una de las dos decisiones siguientes:

- Prolongar la duración de cada impulso (c).
- Enviar trenes de impulsos que se repitan hasta el fin de cada semiciclo (d).

9. ELEMENTOS PARA EL DISPARO

9.1. EL TRANSISTOR UJT

El nombre UJT proviene de las siglas inglesas de Unijunction Transistor (transistor uniunión), con las que se designa un elemento compuesto de una barra de silicio tipo N de cu-

Los extremos se obtienen los terminales base 2 (B2) y base 1 (B1). Esta barra de silicio consta de un grado de dopado característico que le proporciona una resistencia llamada resistencia interbases (R_{BB}).

En un punto determinado de la barra, más próximo a B2 que a B1, se incrusta un material tipo P para formar una unión P-N respecto a la barra original, dando lugar al terminal de emisor (E). Considerando el lugar de inserción del material tipo P, se obtiene un divisor de tensión sobre la resistencia R_{BB} original: el formado por las partes correspondientes de la barra N comprendidas entre B2 y E y entre E y B1. A estas resistencias así obtenidas se las denomina R_{B1} y R_{B2} respectivamente. La relación existente entre ellas es de suma importancia, de manera que se define el parámetro η como:

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{B2}} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

El cual depende del proceso de fabricación, del grado de dopado, de la geometría de elemento, etc. El fabricante suele proporcionar este dato entre sus hojas de especificaciones.

La figura 11.29 a) muestra la estructura interna de un UJT, siendo su circuito equivalente el de la figura 11.29 b). El símbolo usual para este transistor se representa en la figura 11.29 c), en el que se observa que la punta de la flecha apunta hacia el terminal B₁.

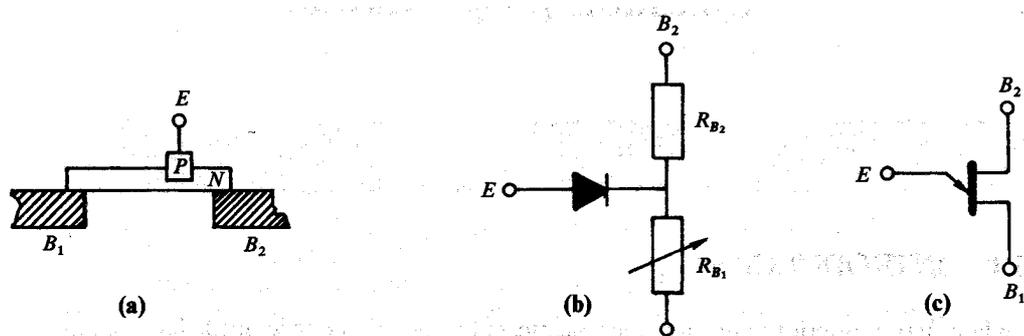


Figura 11.29

En la figura 11.30 observamos la curva característica del UJT.

A la tensión V_{EB} , correspondiente al cebado se la conoce como *tensión de pico* (V_p) y tiene como valor:

$$V_p = \eta \cdot V_{BB} + 0,7$$

De la expresión anterior se deduce que la tensión de cebado del UJT depende de la tensión de alimentación (V_{BB}) con lo que variando ésta conseguiremos igualmente variar la tensión de pico. Con línea de trazos se indica la zona de resistencia negativa que indica el cebado del elemento.

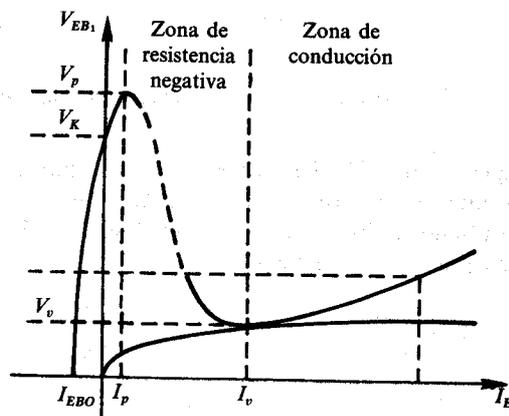


Figura 11.30

Una vez cebado el UJT, si se disminuye la corriente I_E , la tensión V_{EB} se mantiene prácticamente constante, hasta llegar aun punto tal, que la corriente I_E pasa por debajo del valor I_v , llamado de valle, momento en el que se produce un paso del UJT al estado de bloqueo, aumentando V_{EB} , y disminuyendo I_E hasta el valor de la corriente de fuga del diodo.

9.2. EL TRANSISTOR PUT

Con las siglas PUT de Programmable Unijunction Transistor (transistor uniunión programable) se designa aun elemento cuyo comportamiento es similar al UJT, con la respecto a éste de que la relación η puede *programarse* mediante un divisor de tensión exterior.

A pesar de llamarse transistor, su estructura es la de un tiristor en el que el terminal de puerta G se toma del lado del ánodo en lugar del de cátodo. En la figura 11.31a) representa la estructura interna del elemento y en la b) su símbolo.

Al terminal de puerta, para diferenciarle de los tiristores, se le suele denominar *puerta anódica*.

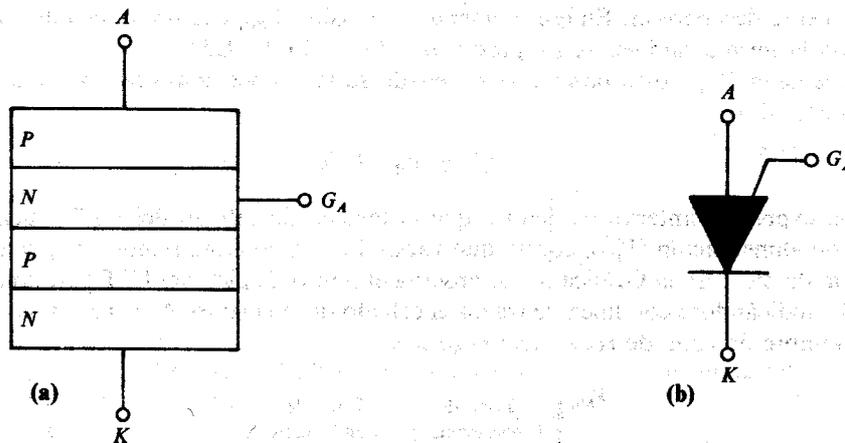


Figura 11.31

La forma típica de polarizar al PUT se muestra en la figura 11.32, en la que se observa el divisor de tensión de puerta formado por R1 y P. Aplicando el teorema de Thévenin a terminal de puerta, se obtiene el circuito equivalente (Fig. 11.32 b), en el que el valor de Vs y RG vienen determinados por las expresiones:

$$V_S = \frac{P}{P + R_1} \cdot V_{GG} \quad \text{y} \quad R_G = \frac{R_1 \cdot P}{R_1 + P}$$

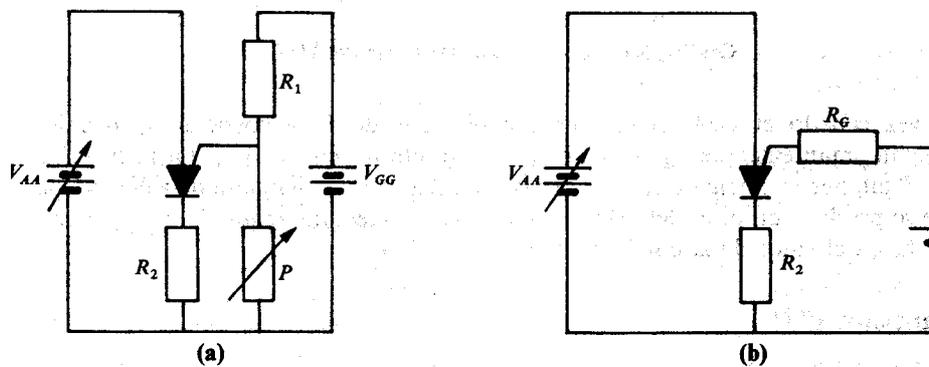


Figura 11.32

Para una Vs determinada y mientras VAA permanezca inferior a aquélla, la corriente de ánodo (IA) es prácticamente despreciable, estando el PUT en estado de bloqueo. Si la tensión VAA supera en cierta cantidad (llamada tensión de offset: Voffset) a Vs se produce una inyección de portadores en el diodo formado por A y GA dando lugar a un efecto de avalancha que provoca el cebado del PUT. Al valor VAK necesario para provocar este cebado se le llama tensión de pico (Vp), por analogía con el UJT.

Una vez cebado el PUT, si se reduce la tensión V_{AA} de manera que la corriente de ánodo pase por debajo de un valor llamado de valle (I_v), se produce el paso al estado de bloqueo, al igual que ocurría en el UJT.

En la figura 11.33 se representa la curva característica del PUT, en la que I_{GA0} representa la corriente inversa de la unión ánodo-puerta, estando el terminal de cátodo abierto.

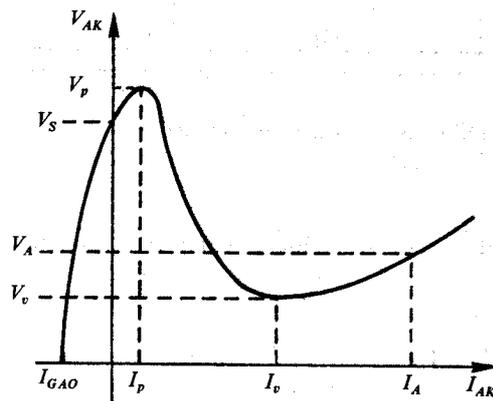


Figura 11.33

Una vez visto el comportamiento básico de ambos elementos pasaremos a estudiar su principal aplicación: la de generador de relajación.

9.2.1. Oscilador de relajación con UJT

En la figura 11.34 a) se representa un circuito típico de oscilador de relajación con UJT y en el que la resistencia R_2 cumple la función de estabilizar térmicamente al transistor. La figura 11.34 b) muestra las formas de onda de salida de este circuito.

Al conectar la alimentación, el condensador C se empieza a cargar a través de $R_1 + P$ con una velocidad determinada por la constante de tiempo de estos elementos según la expresión

$$V_C = V_{BB} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Transcurrido un tiempo determinado t_s la tensión V_C será igual al valor de pico del UJT, con lo que éste se cebará, dando lugar a una corriente de emisor y provocando la descarga de C a través de R_3 en la salida V_{O2} aparece un pulso de tensión.

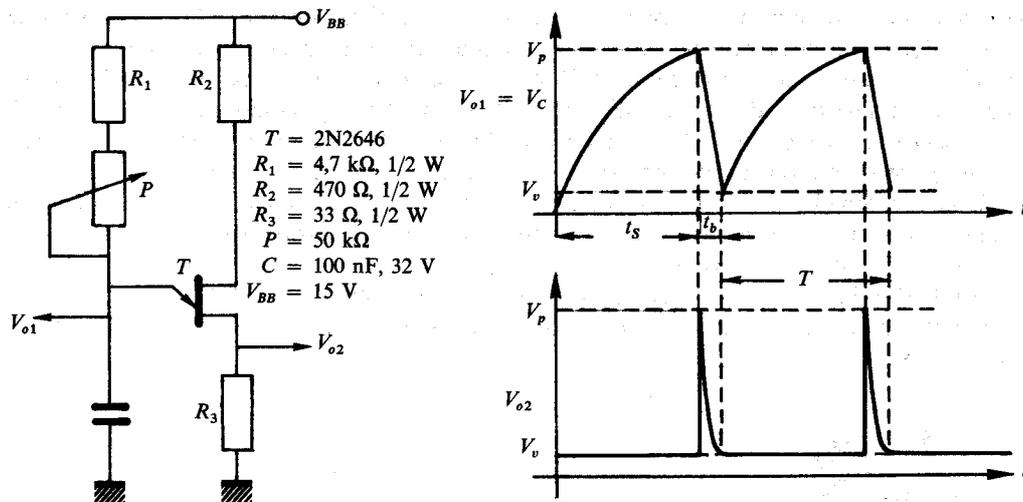


Figura 11.34

RESUMEN

Entre la amplia familia de los tiristores, distinguiremos:

- Los tiristores propiamente dichos, conocidos con el nombre de SCR.
- Los triacs.
- Los GTO.
- Los IGBT.
- Los tiristores fotosensibles o fototiristores.

El tiristor es un dispositivo unidireccional; deja pasar corriente en un solo sentido después de que se haya aplicado una señal de control a su puerta.

Para mantener un tiristor en estado conductor es necesario que exista una corriente mínima que mantenga la conducción del tiristor (o del triac); en caso contrario, basculará al estado bloqueado, Esta corriente, I_H , es la corriente hipostática o corriente de mantenimiento.

Los tiristores se ceban:

- Por tensión.
- Por elevación de la temperatura.
- Por variación rápida de la tensión.

El triac es un componente con tres terminales derivado del tiristor. Presenta, sin embargo, dos ventajas fundamentales sobre este circuito equivalente:

- El circuito de control resulta mucho más sencillo al no existir más que un electrodo de mando.
- Puede bascular al estado conductor independientemente de la polaridad de la tensión aplicada al terminal de control.

El interruptor de estado sólido (GTO) es de construcción similar a la de un tiristor, tiene cuatro capas y tres terminales, ánodo, cátodo y puerta. Se conecta por flujo de corriente en el terminal de puerta, como en el tiristor convencional, pero puede desconectarse eliminando la corriente de la puerta.

Los transistores MOSFET son transistores basados en un único portador, más simples y sencillos de fabricar que los bipolares. Son estructuras con un canal y un electrodo denominado puerta (gate). Pueden ser de acumulación o de deplexión.

Los IGBT son transistores bipolares de puerta aislada que combina las ventajas de los BJT y los MOSFET. Los IGBT también se controlan por tensión pero su manejo es más sencillo que en un MOSFET. El nivel de pérdidas de los IGBT en conducción es mucho más bajo que los MOSFET pero son más lentos.

Los tipos de disparo de tiristores, triacs y GTO s son los siguientes:

- Disparo en c.c.
- Disparo en c.a.
- Por impulsos.
- Por trenes de ondas.

Como elementos de disparo se utilizan el transistor uniunión (UJT) y el PUT.

EDITA Y DISTRIBUYE: