

## **Práctica nº 1: RECTIFICADOR SEMICONTROLADO**

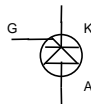
### **OBJETIVO DE LA PRÁCTICA**

Se trata de montar un rectificador semicontrolado de onda completa y observar su comportamiento con diferentes tipos de cargas a distintos ángulos de control.

### **INTRODUCCIÓN TEÓRICA**

#### **El tiristor**

Se denominan tiristores a todos aquellos semiconductores con dos estados estables cuyo funcionamiento se basa en la realimentación positiva de una estructura PNP. De entre todos ellos, lo más utilizados son los SCR o *rectificadores controlados de silicio*, por lo que habitualmente se les denomina tiristores, aunque realmente sean una subclase de los mismos. Su símbolo es el siguiente:



**Figura 1**

Los tiristores tienen dos terminales principales denominados *ánodo* (A) y *cátodo* (K), y uno auxiliar de disparo denominado *puerta* (G). Con la puerta al aire o cortocircuitada con el cátodo, el tiristor es capaz de bloquear tensión directa o inversa hasta un cierto valor máximo. Con tensión positiva entre ánodo y cátodo, el tiristor entra en conducción si se aplica un impulso positivo de características adecuadas entre la puerta y el cátodo. El tiristor permanece en este estado aunque desaparezca la excitación de la puerta gracias a un proceso interno de regeneración de portadores. Para volver al estado de bloqueo es necesario reducir la corriente ánodo-cátodo por debajo de un cierto valor y durante un cierto tiempo como mínimo. Polarizado inversamente, el tiristor no entra en conducción aunque se le aplique un impulso a su puerta.

Es decir, el tiristor se comporta como un diodo rectificador en el que se puede controlar el momento de entrada en conducción por medio de la puerta. La tensión ánodo-cátodo viene dada por la fórmula:

$$u_{AK} = 1,3V + r \cdot i_{AK}$$

Donde  $i_{AK}$  es la corriente ánodo-cátodo y  $r$  es la resistencia dinámica del tiristor.

Se trata de un componente robusto y muy fiable con aplicaciones en el control de potencia de cargas resistivas e inductivas como hornos, motores, etc.

#### ***Disparo del tiristor***

Los tres mecanismos habituales por los que un tiristor entra en conducción son los siguientes:

1. Disparo por tensión ánodo-cátodo excesiva.
2. Disparo por derivada de tensión ánodo-cátodo excesiva.
3. Disparo por impulso de puerta.

En el primer caso, los portadores minoritarios generados térmicamente son acelerados por la elevada diferencia de potencial que existe en las uniones de bloqueo, que están polarizadas inversamente, hasta producir nuevos portadores al chocar con la estructura cristalina del semiconductor. Estos nuevos portadores son a su vez acelerados y pueden generar nuevos portadores de manera que, finalmente, se alcanza una corriente suficiente como para iniciar el proceso regenerativo de la conducción. Normalmente, esta forma de entrada en conducción es un accidente provocado por tensiones anormalmente elevadas en el circuito.

En el caso de una variación brusca de la tensión ánodo-cátodo los portadores, que no tienen tiempo de adquirir una nueva distribución de equilibrio, son atraídos hacia el exterior de las uniones de bloqueo, aumentando la zona de transición. El efecto es una elevada diferencia de potencial en la unión que puede provocar la entrada en conducción por un proceso semejante al descrito en el caso de una sobretensión ánodo-cátodo. En los circuitos en los que habitualmente se emplean tiristores es frecuente la existencia de derivadas de tensión elevadas, lo que a veces obliga a emplear protecciones que eviten el disparo fortuito del componente.

La forma correcta de disparar un tiristor es aplicar un impulso positivo de corriente a su puerta cuando el dispositivo se encuentra polarizado directamente. La unión puerta-cátodo equivale a un diodo, pero sus características varían fuertemente de un dispositivo a otro incluso del mismo modelo. Por ello el fabricante suele suministrar dos curvas límites y cuatro valores que comprenden a todos los dispositivos de un mismo modelo:

- $U_{GK \text{ mín CD}}$ : tensión puerta-cátodo mínima con disparo de todos los tiristores.
- $U_{GK \text{ máx SD}}$ : tensión puerta-cátodo máxima sin disparo de ningún tiristor.
- $I_{G \text{ mín CD}}$ : corriente de puerta mínima con disparo de todos los tiristores.
- $I_{G \text{ máx SD}}$ : corriente de puerta máxima sin disparo de ningún tiristor.

Estos valores definen tres zonas de disparo dentro de las curvas límite: disparo seguro, disparo incierto y no disparo seguro. Las rectas de carga del circuito de control deben ser tales que se mantengan en la primera o la tercera zona, dependiendo de si se desea disparar o no el tiristor.

También existen límites máximos para la tensión puerta-cátodo, la corriente de puerta y la potencia aplicada a la puerta (este último límite aumenta conforme disminuye el factor de trabajo del impulso de puerta) que deben ser respetados.

### ***Bloqueo***

Si la intensidad ánodo-cátodo disminuye por debajo una dada, denominada *intensidad de mantenimiento*, el proceso regenerativo que mantiene al tiristor en conducción no puede sostenerse y el dispositivo se bloquea. La puerta no tiene en este proceso influencia apreciable, por lo que debe ser el circuito exterior de potencia el que fuerce la reducción de la corriente ánodo-cátodo. Si la reducción de corriente es lenta, de manera que las concentraciones de portadores en las uniones tienen tiempo de alcanzar el equilibrio, el dispositivo queda efectivamente bloqueado y puede bloquear una tensión inversa inmediatamente; a este tipo de bloqueo se le denomina *estático*. Si, por el contrario, la reducción es muy brusca, los portadores no tienen tiempo de equilibrarse y las uniones permanecen llenas de portadores, por lo que al aplicar una tensión inversa el dispositivo no puede bloquearla y conduce en sentido inverso a expensas de estos portadores hasta que se agotan; a este tipo de bloqueo se le denomina *dinámico*. También en este último caso, si se

vuelve a aplicar tensión directa antes de que las uniones queden vacías de portadores el tiristor volvería a entrar en conducción.

## Rectificadores controlados

Se trata de rectificadores en los que parte o la totalidad de los diodos se sustituyen por tiristores. De esta manera es posible controlar el momento en que entran en conducción los dispositivos rectificadores, y, en consecuencia, el valor medio de la tensión aplicada sobre la carga.

Los rectificadores controlados permiten obtener una tensión continua variable. Su elemento base es el tiristor y el control se efectúa retardando su disparo un tiempo  $\alpha/\omega$ . Al ángulo  $\alpha$  se le denomina *ángulo de control* o *ángulo de retardo*.

El bloqueo de los tiristores se produce de manera natural.

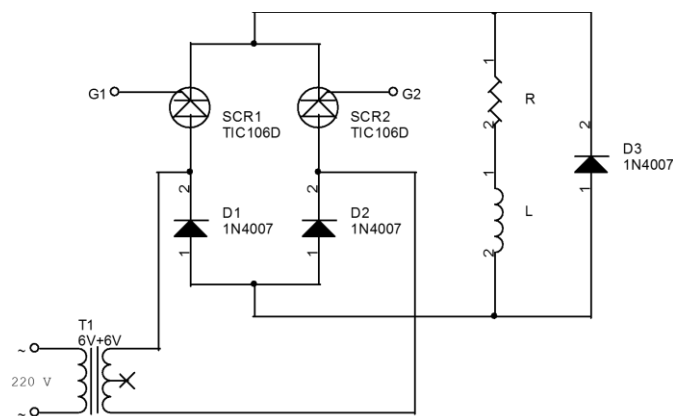
Se pueden distinguir dos tipos:

- *Rectificadores semicontrolados*, formados por diodos y tiristores.
- *Rectificadores totalmente controlados*: formados exclusivamente por tiristores.

Los rectificadores totalmente controlados pueden trabajar también como *inversores*, devolviendo energía a la entrada de CA. Cuando funcionan de esta manera se les denomina *inversores no autónomos*.

Al igual que el caso de los rectificadores no controlados los rectificadores controlados también pueden clasificarse atendiendo a si rectifican sólo una semionda de la tensión de entrada, *rectificadores de media onda*, o si rectifican las dos, *rectificadores de onda completa*.

En esta práctica se montará un rectificador semicontrolado bifásico de onda completa como el de la figura 2:

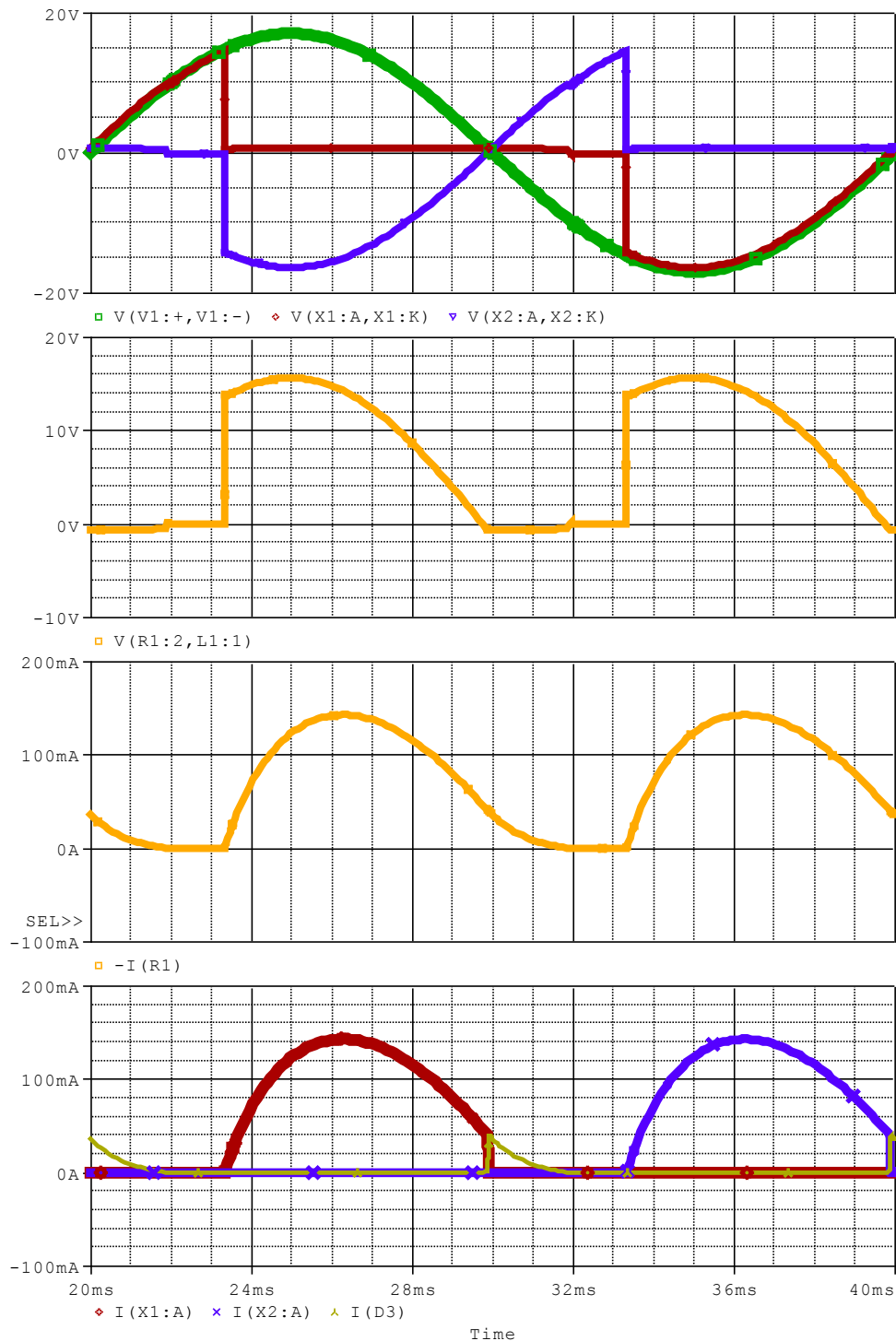


**Figura 2**

En la figura 3 se pueden ver las formas de onda para un ángulo de retardo de  $60^\circ$ , obtenidas por simulación con PSpice. Se trata de cuatro gráficas que, respectivamente, representan:

1. Tensión sobre el secundario del transformador y tensiones sobre los dos tiristores.
2. Tensión rectificada sobre la carga.
3. Intensidad a través de la carga.

4. Intensidad a través de cada uno de los tiristores y a través del diodo de libre circulación.



**Figura 3**

Cuando SCR1 se halla polarizado en sentido directo se le aplica un impulso de disparo con un cierto retraso. Hasta ese momento SCR1 bloqueaba toda la tensión del secundario, y la tensión sobre la carga era nula, pero después la tensión ánodo-cátodo cae hasta unos 2 V y prácticamente toda la tensión en el secundario aparece sobre la carga, comenzando a circular corriente a través de SCR1, D2 y la propia carga. La carga tendrá en la mayoría de los casos

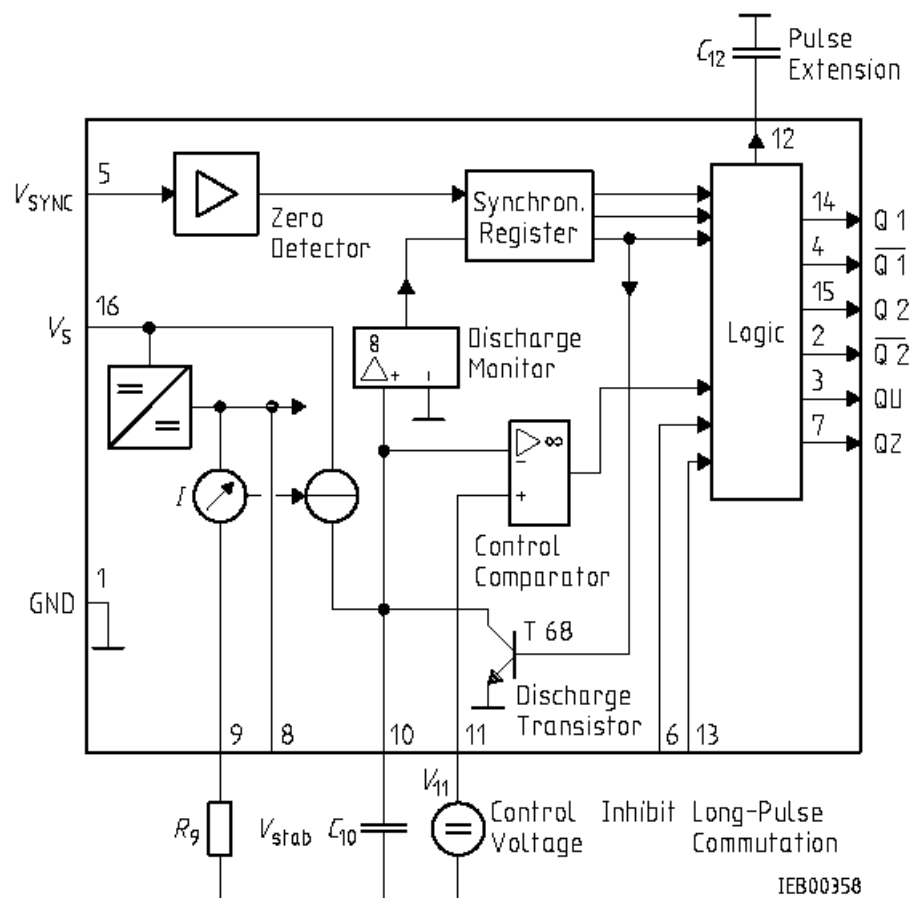
un fuerte carácter inductivo, por lo que la intensidad irá retrasada con respecto a la tensión, como puede apreciarse en la gráfica. Este retraso hace que cuando la tensión en el secundario pasa por cero la corriente por la carga aún no se haya anulado. En esas condiciones el tiristor se vería obligado a seguir en conducción forzado por la inductancia de la carga. En este caso no aparecería una tensión negativa sobre la misma ya que D1 entraría en conducción, pero si el siguiente impulso de disparo llegase cuando el tiristor estuviese conduciendo todavía, éste resultaría inútil. El diodo de libre circulación D3 ofrece un camino de circulación preferente a la corriente a través de la carga, permitiendo el apagado del tiristor. En el semiciclo negativo la secuencia de acontecimientos es semejante, salvo que en este caso conducen SCR2 y D1.

La tensión media sobre la carga será igual a:

$$U_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\theta) \cdot d\theta = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} u(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\max} \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{U_{\max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

### Circuito de control: el TCA 785

Para generar los impulsos de disparo se emplea el integrado TCA 785 de Siemens. Este circuito integrado de control de fase está pensado para controlar tiristores, triacs y transistores. El impulso de disparo puede retrasarse entre 0° y 180°. Las aplicaciones típicas incluyen convertidores, controladores de CA y controladores trifásicos. La figura 4 muestra el diagrama de bloques del TCA 785.



**Figura 4**

### Descripción funcional

La señal de sincronización se obtiene a través de una resistencia de valor elevado desde la tensión de red (tensión  $V_5$ ). Un detector de paso por cero evalúa los pasos por cero y los transfiere a un registro de sincronización.

Este registro de sincronización controla un generador de rampas, cuyo condensador  $C_{10}$  se carga por medio de una corriente constante (determinada por  $R_9$ ). Si la tensión  $V_{10}$  de la rampa supera la tensión de control  $V_{11}$  (ángulo de disparo  $\phi$ ), se envía una señal a la lógica de control. Dependiendo de la magnitud de la tensión de control  $V_{11}$ , el ángulo de disparo  $\phi$  puede retrasarse entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

En cada semionda, un pulso positivo de aproximadamente  $30 \mu s$  de duración aparece en las salidas Q1 y Q2. La duración del pulso puede prolongarse hasta  $180^\circ$  por medio del condensador  $C_{12}$ . Si se conecta la patilla 12 a masa se obtienen pulsos desde  $\phi$  hasta  $180^\circ$ .

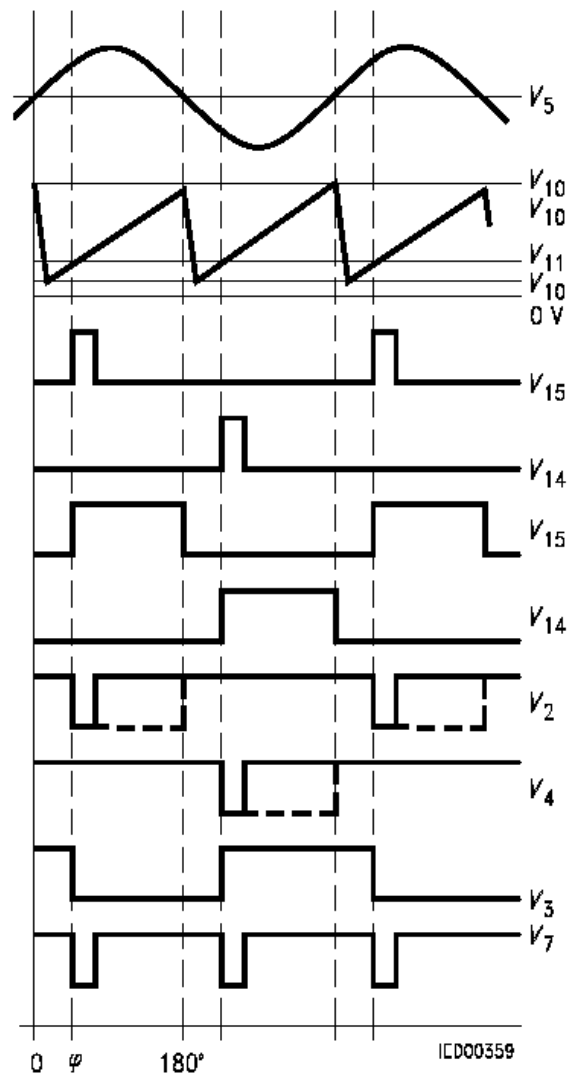


Figura 5

Las salidas  $\overline{Q1}$  y  $\overline{Q2}$  proporcionan las señales Q1 y Q2 invertidas.

La patilla 3 proporciona una señal de  $\phi + 180^\circ$  que puede ser útil para controlar lógica externa.

En la salida QZ (patilla 7) está disponible una señal que corresponde a la combinación NOR de las salidas Q1 y Q2.

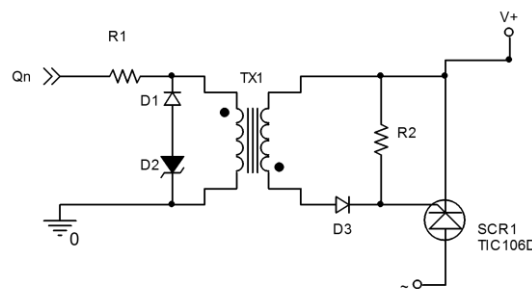
La entrada *inhibit* puede utilizarse para desactivar las salidas Q1, Q2 y  $\overline{Q1}$ ,  $\overline{Q2}$ .

La patilla 13 puede utilizarse para extender las salidas  $\overline{Q1}$  y  $\overline{Q2}$  hasta la longitud de un pulso completo ( $180^\circ - \phi$ ).

### El disparo de los tiristores

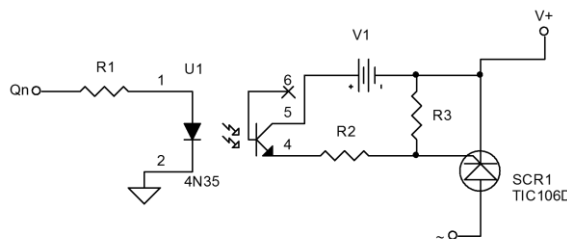
Para disparar los tiristores es necesario aplicar un impulso entre su puerta y su cátodo de tensión e intensidad adecuadas. En el montaje empleado, los cátodos de los dos tiristores se hallan unidos, con lo que el circuito de disparo se simplifica al tener ambos una referencia común. Aun así, el circuito de control proporciona impulsos referenciados a su masa, no al terminal positivo de la carga (punto de unión de los cátodos), que además no está a una tensión fija conocida. El resultado es que no se pueden unir simplemente Q1 y Q2 a las puertas de los tiristores y esperar que estos se disparen adecuadamente, ya que la señal de disparo y los cátodos se hayan referenciados a tensiones distintas.

Para solventar este problema se puede recurrir a transformadores de impulsos, como en el circuito de la figura 6:



**Figura 6**

O a optoacopladores junto con una fuente aislada, como en el circuito de la figura 7:

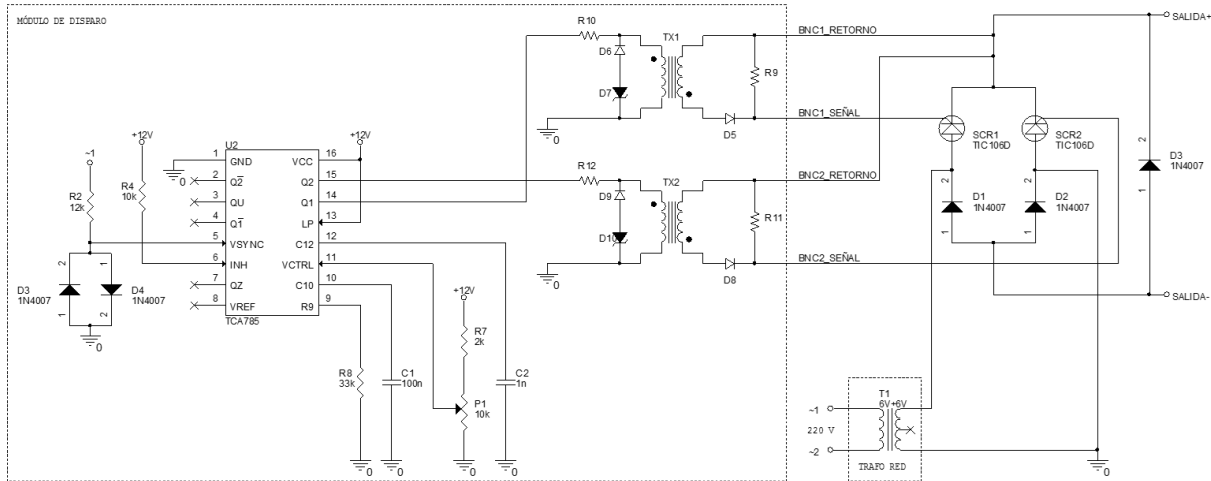


**Figura 7**

Ambos permiten aplicar un impulso de amplitud conocida entre la puerta y el cátodo de los tiristores referenciado al cátodo del tiristor y, por tanto, independiente de la tensión sobre la carga.

## REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

El circuito que se va a montar es el de la figura 8:



**Figura 8**

Dado que el circuito de control es relativamente complicado y el tiempo disponible para la práctica limitado, usaremos una versión ya montada y metida en una caja a la que denominaremos *módulo de disparo*. El aspecto de este módulo puede verse en la figura 9.



**Figura 9: módulo de disparo.**

En la parte frontal pueden verse los conectores para las señales de disparo y el mando del potenciómetro que controla el ángulo de disparo. En la parte de atrás se adivina el conector de red que permite al módulo alimentarse y sincronizarse con la red. El terminal central de los conectores de las señales de disparo (señal) es el que debe conectarse a las puertas de los tiristores y la carcasa metálica (retorno) a los cátodos.

Por seguridad, no trabajaremos directamente con los 220 V de la red sino con los 12 V que obtendremos de un transformador. Este transformador se haya dentro de una caja como la que se ve en la figura 10.

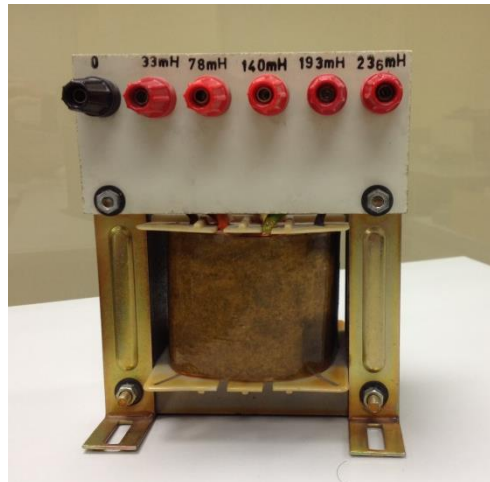




**Figura 10: Transformador de 12V.**

En esta práctica se realizarán ensayos con el rectificador y dos tipos de carga:

- Resistiva: resistencia de  $100\ \Omega$  de 4W.
- Resistiva-inductiva: resistencia de  $100\ \Omega$  de 4W + bobina de 193 mH (ver figura 11).



**Figura 11: inductancia de carga**

Emplearemos el multímetro para medir la tensión media y el osciloscopio para visualizar las formas de onda de la tensión y la corriente a través de la carga.

**¡ATENCIÓN!**: la resistencia de potencia llega a alcanzar una temperatura elevada. Dejar enfriar antes de manipular.

**¡ATENCIÓN!**: NUNCA desconectar una bobina de un circuito bajo tensión. Podrían generarse tensiones peligrosas para los equipos y/o las personas. Desconectar primero la alimentación.

Se procederá de la siguiente manera:

1. Encender los multímetros y el osciloscopio.
2. Ajustar el osciloscopio inicialmente de la siguiente manera:
  - Amplificadores verticales: 5 V/div.
  - Acoplamiento de señal: en continua.
  - Base de tiempos: 5 ms/div.

- Fuente de sincronización: la red.
  - Flanco de disparo: subida.
3. Ajustar el multímetro para medir tensiones continuas.
  4. Comprobar que el módulo de disparo y el transformador NO estén enchufados.
  5. Montar el circuito del rectificador.
  6. Ensayar la carga resistiva:
    - 6.1. Conectar la resistencia de potencia a la salida del rectificador.
    - 6.2. Conectar el multímetro a la salida del rectificador (tener en cuenta su polaridad).
    - 6.3. Conectar una de las sondas del osciloscopio a los terminales de la resistencia con la masa conectada a la salida negativa del rectificador.
    - 6.4. Avisar al profesor para que revise el montaje.
    - 6.5. Conectar el transformador a la red.
    - 6.6. Conectar el módulo de disparo.
    - 6.7. Verificar que la forma de onda de la tensión sobre la carga es la esperada. Dado que el transformador y el módulo de disparo se enchufan por separado, cabe la posibilidad de que queden conectados en contrafase con lo que los impulsos de disparo llegarían en el semiciclo “equivocado”. Esta es la causa más probable cuando no aparece ninguna forma de onda en el osciloscopio. Se soluciona simplemente invirtiendo bien el enchufe del módulo de disparo, bien el del transformador.
    - 6.8. Medir la tensión media sobre la carga con ayuda de un polímetro y dibujar las formas de onda de la tensión sobre la carga con sus valores más significativos para un  $\alpha$  de  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $150^\circ$ .
    - 6.9. Desenchufar el módulo de disparo y el transformador.
  7. Ensayar la carga inductiva-resistiva:
    - 7.1. Desconectar la resistencia de la salida positiva del rectificador.
    - 7.2. Insertar la inductancia de 193 mH entre la salida positiva del rectificador y la resistencia de  $100\ \Omega$ , de forma que queden conectadas en serie.
    - 7.3. Conectar la segunda sonda del osciloscopio al extremo de la bobina que no está conectado a la resistencia. De esta forma la primera sonda mostrará la forma de onda de la corriente (a través de la caída de tensión sobre la resistencia) y la segunda, la tensión sobre la carga. No conectar la masa de esta sonda.
    - 7.4. Avisar al profesor para que revise el montaje.
    - 7.5. Conectar el transformador a la red.
    - 7.6. Conectar el módulo de disparo.
    - 7.7. Verificar que la forma de onda de la tensión sobre la carga es la esperada.
    - 7.8. Dibujar las formas de onda de la tensión sobre la carga y la intensidad que la atraviesa para un  $\alpha$  de  $90^\circ$ . Dibujar también la corriente que atraviesa el diodo de libre circulación.

- 7.9. Hallar el ángulo  $\alpha$  para el que la corriente por la carga no llega a anularse nunca.
- 7.10. Desenchufar el módulo de disparo y el transformador.
8. Desmontar el circuito y guardar los componentes y los cables en su lugar original.

## RESULTADOS

CARGA RESISTIVA		
	VALOR TEÓRICO	VALOR EXPERIMENTAL
$U_{med}(30^\circ)$		
$U_{med}(90^\circ)$		
$U_{med}(150^\circ)$		
CARGA INDUCTIVA		
	VALOR TEÓRICO	VALOR EXPERIMENTAL
$U_{med}(90^\circ)$		
$\alpha$		

CÁLCULOS, GRÁFICAS, COMENTARIOS Y ACLARACIONES