

CAPÍTULO

10

ELEMENTOS DE CUATRO CAPAS



10.1. EL TIRISTOR

Es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez, el tiristor es un componente idóneo en electrónica de potencia. El Triac por su parte no es si no la variante bidireccional.

10.1.1. LA FAMILIA DE LOS TIRISTORES

El termino "tiristor" designa a toda una familia de elementos semiconductores cuyas características son similares. Dentro de esta gran familia cabe distinguir:

- Los tiristores propiamente dichos que son los elementos mas conocidos y se denominan: SCR" (silicon controlled rectifier).
- Los "TRIACs" que se derivan de los anteriores con la diferencia de ser bidireccionales.
- Los Fototiristores o Tiristores Fotosensibles.
- Los Tiristores Bloqueables "GCO".
- El Conmutador Unilateral de Silicio "SUS" (silicon unilateral switch).
- El Conmutador Bilateral de Silicio "SBS".
- El Tiristor Tetraodo de dos elementos de mando o "SCS".
- El diodo SHOCKLEY o diodo Tiristor.

10.2. EL TIRISTOR "SCR".

10.2.1. ESTRUCTURA Y SÍMBOLO.

El tiristor es un elemento semiconductor sólido de silicio formado por cuatro capas P y N alternadamente dispuesta como se ve en la figura 10.1.

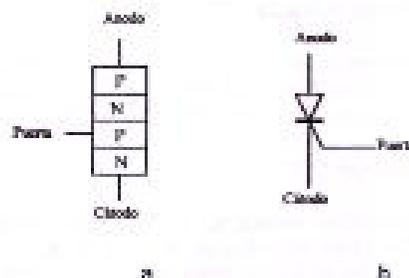


Figura 10.1 a) Estructura del SCR; b) Símbolo del SCR.

Los dos terminales principales son el ánodo y cátodo y la circulación entre ellos de corriente directa está controlada por un electrodo de mando llamado puerta.

El SCR es un elemento unidireccional, una vez aplicada la señal de mando a la puerta el dispositivo deja pasar una corriente la cual tiene un sentido único. Este Tiristor se lo conoce como SCR por sus siglas en inglés (silicon controlled rectifier). Este dispositivo cumple con varias misiones:

- **Rectificación:** consiste en usar la propiedad de funcionamiento unidireccional que realiza la función de un diodo.
- **Interrupción de Corriente:** usado como interruptor el SCR puede reemplazar a los contactos metálicos.
- **Regulación:** la posibilidad de ajustar el momento preciso de conducción del SCR permite gobernar la potencia o la corriente media a la salida.
- **Amplificación:** puesto que la corriente de mando puede ser muy débil en comparación con la corriente principal I_{AK} se produce el fenómeno de amplificación de corriente.

10.2.2. EL SCR BAJO TENSION (en estado de bloqueo).

Para simplificar el análisis consideremos que el cátodo del tiristor está puesto a tierra y la puerta no está conectada. En estas condiciones se puede considerar al tiristor como se representa en la figura 10.2.

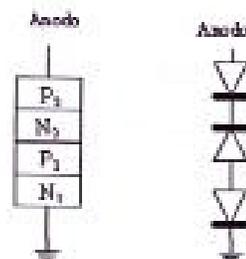


Figura 10.2. El SCR bajo tensión.

- Cuando el ánodo es positivo el elemento está polarizado directamente pero el diodo D_2 bloquea la tensión aplicada.
- Si la tensión es negativa los diodos D_2 y D_3 se encuentran en polarización inversa. Por ser débil la tensión de avalancha de $P1N1$ su papel es despreciable y es P_2N_2 el que a de limitar la corriente inversa de fuga.

10.2.3. EL SCR BAJO TENSION DIRECTA

Se comprenderá mejor el funcionamiento del SCR si nos referiremos al montaje de dos transistores PNP y NPN, como se indica en la figura 10.3.

Estos dos transistores están conectados de modo que nos dan realimentación positiva. Suponemos que en el ánodo es positivo (+) y el cátodo es negativo (-). En este caso las uniones J_2 y J_1 están en polarización directa por lo tanto emiten portadores positivos y negativos respectivamente.

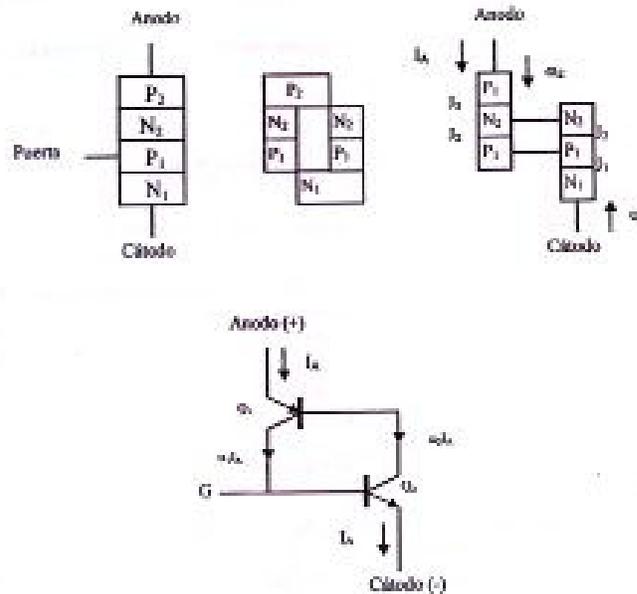


Figura 10.3. El SCR como representación de dos transistores.

Estos portadores tras su difusión en las bases de los transistores llegan a J_2 donde la carga espacial crea un intenso campo eléctrico haciendo que J_2 esté en polarización inversa.

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A \quad \text{(Ecuación 10.1)}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_A \quad \text{(Ecuación 10.2)}$$

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO}$$

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_A + I_{CO}$$

$$I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad \text{(Ecuación 10.3)}$$

- En muchos transistores de silicio la ganancia α es baja para valores reducidos de corriente aumentando cuando crece la corriente. Luego si I_{CO} es pequeña el

denominador de la fracción se acerca a 1 (para corrientes débiles) y la corriente I_A es similar a I_{CO} .

V_{AK} pequeño: $\alpha \rightarrow 0$

$$I_A \approx I_{CO} \quad (\text{Ecuación 10.4})$$

- Cuando aumenta por cualquier motivo la I_{CO} aumentan la I_A y la ganancia.

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (\text{Ecuación 10.5})$$

$$\alpha_1 = 0.5 \rightarrow \beta = 2 \quad (\text{Ecuación 10.6})$$

$$I_A \rightarrow \infty$$

Si V_{AK} aumenta y si la I_{CO} aumenta, la corriente I y consecuentemente α también aumentan dándonos como resultado la siguiente expresión:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \rightarrow I_A = \frac{I_{CO}}{0}$$

$$I_A \rightarrow \infty$$

En este caso el tiristor está entonces en estado de conducción.

Este tipo de cebado por aumento de I_{CO} es en general por aumento de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo, así:

a) V_{AK} pequeño:

$$\alpha \text{ pequeño} \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 0$$

$$I_A = I_{CO}$$

el tiristor presenta alta impedancia.

b) V_{AK} aumenta:

La I_{CO} también aumenta con lo cual aumentan también la I y α obteniendo la siguiente expresión:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

$$I_A = \frac{I_{CO}}{0} \Rightarrow \infty$$

el tiristor presenta baja impedancia.

10.2.4. COMO SE ACTIVA UN TIRISTOR

El tiristor puede adoptar uno de estos estados:

- a) De bloque, cuando esté polarizado en sentido inverso.
- b) De bloqueo o de conducción, cuando la polarización es directa, según esté activado o no.

Con respecto a este segundo caso (caso b) se puede activar al tiristor por medio de los siguientes medios:

- La tensión: cuando aumenta la tensión A-K el tiristor llega a un momento en que la corriente de fuga es suficiente para producir un brusco aumento de la I_a .
- La Temperatura: la corriente inversa de fuga de un transistor de silicio aumenta al doble por cada 14 °C de incremento de la temperatura, cuando la corriente alcanza un valor suficiente se produce el disparo del tiristor.
- El efecto transistor: en la base del transistor (puerta) equivalente se inyectan portadores que provocan el fenómeno de activación. Como se ilustra en la figura 10.4
- Efecto Fotoeléctrico: por efectos de la luz se produce la activación del tiristor en el caso de un fototiristor.

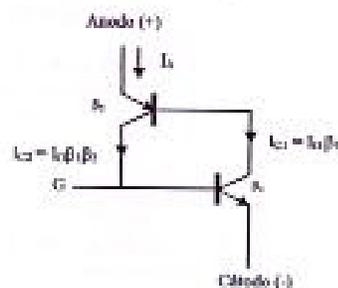


Figura 10.4. Efecto transistor

10.2.5. CURVA CARACTERÍSTICA DEL SCR. (I_{AK} vs. V_{AK}).

Cuando es nula la tensión V_{AK} lo es también la I_a . Al crecer la tensión V en sentido directo (V_F) se alcanza un valor mínimo V_d que provoca el cebado o conducción del tiristor.

El tiristor se hace entonces conductor y cae la tensión ánodo-cátodo mientras aumenta la corriente I_a , por lo mismo a esta corriente directa la llamaremos I_F (F de forward). Esto se detalla en la figura 10.5

Si se polariza inversamente al tiristor aplicándole una tensión V_R en sentido reverso aparece una corriente inversa de fuga I_R hasta que alcanza un punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del elemento.

- El tiristor es conductor en el primer cuadrante, el disparo ha sido provocado por el incremento de tensión A-K.

- La aplicación de una corriente de mando en la puerta desplaza como veremos hacia la izquierda al punto de disparo D_p , así:

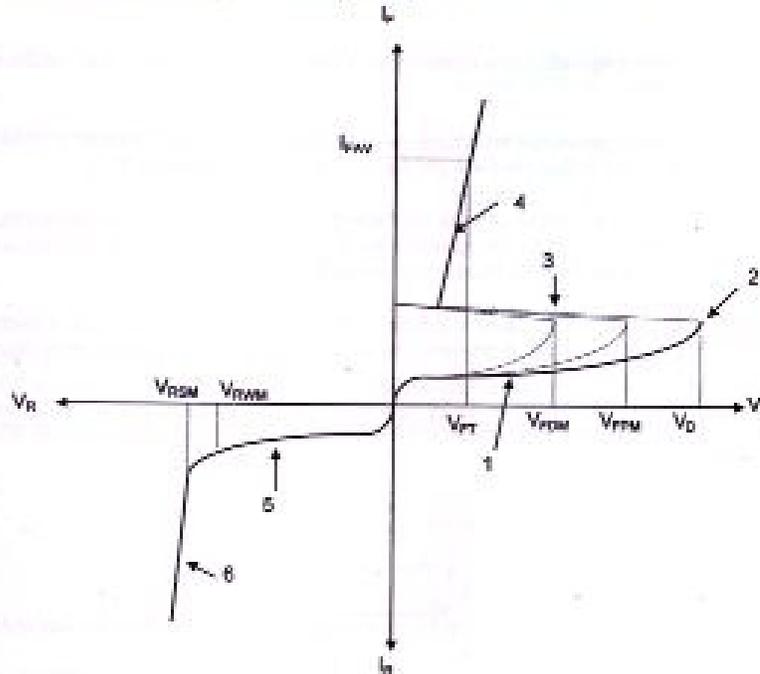


Figura 10.5. Curva característica del SCR

Si se aplica una señal de mando a la puerta del triac se modifica la tensión del cebado (de activación o conducción) de éste, tal como muestra las siguientes curvas que se indican en la figura 10.6.

Cuando la I_C sea igual a cero el triac no se dispara hasta que alcanza el voltaje de disparo entre ánodo y cátodo. A medida que aumenta la I_C disminuye el valor de la tensión de disparo. Para prevenir posibles disparos esporádicos del triac se puede conectar una resistencia en paralelo entre la compuerta y el cátodo como se indica en la figura 10.7.

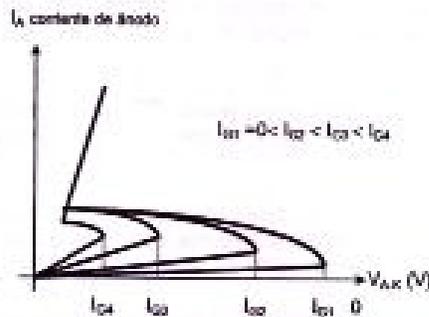


Figura 10.6. Curva característica para diferentes valores de I_C .

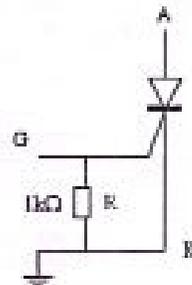


Figura 10.7. Circuito para evitar un posible disparo prematuro del SCR.

Las corrientes de fuga en el SCR imponen algunas de las limitaciones inherentes a este dispositivo. Estas corrientes de fuga son:

- I_{FD} : corriente directa de fuga
- I_{R} : corriente inversa de fuga.

10.2.6. DEFINICIÓN DE SÍMBOLOS.

La curva característica del tiristor (SCR) puede dividirse en 6 regiones de las que 4 están situadas en el primer cuadrante. Debido a la que la mayor parte de la bibliografía existente sobre tiristores procede de EE.UU. se ha conservado las designaciones simbólicas en inglés como se muestra en la tabla 10.2.1.

SÍMBOLO	PALABRA INGLESA	SIGNIFICADO
AV	Average	Media
D	Direct	Continua
F	Forward	Sentido Directo
G	Gate	Puerta
H	Hold	Mantenimiento
L	Latching	Enganche
M	Maximum	Máxima
N	Negative	Negativa
P	Peak	Pico o cresta
R (1 ^{er} lugar)	Reverse	Inversa
R (2 ^{er} lugar)	Recurrent	Recurrente
S	Surge	Accidental
W	Working	De servicio

Tabla 10.1. Tabla de Definición de Símbolos

- **Corriente Directa Media:** es el valor medio de los valores instantáneos de corriente directa ánodo-cátodo en el tiristor para un intervalo dado de tiempo. Su símbolo es I_{AV} .

$$I_{FAV} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i dt \quad (\text{Ecuación 10.7})$$

- **Corriente Accidental de Pico:** es el valor que puede alcanzar una punta de corriente ánodo-cátodo en forma accidental, esto es transitoriamente y no de modo recurrente, su símbolo es I_{PAM} .
- **Corriente Máxima de Puerta:** la corriente máxima de puerta se simboliza con I_{GR2} y es el valor máximo instantáneo que puede alcanzar una punta de corriente en el electrodo de mando del transistor.
- **Tensión Directa de Disparo:** la tensión directa de disparo V_d (o también V_{BO}) es la tensión directa por encima de la cual se deba (activa) el transistor por disparo directo.
- **Tensión Inversa de Ruptura:** es la tensión inversa que produce la ruptura del elemento y se designa como V_{RM} .
- **Tensión Inversa Recurrente:** la tensión inversa recurrente se designa con V_{RSM} y se define así al valor máximo que puede tomar la amplitud de la tensión inversa periódica aplicada entre el ánodo y el cátodo del transistor.
- **Tensión Inversa Recurrente de Pico:** es V_{RSM} y es el valor máximo que puede alcanzar las puntas recurrentes de tensión inversa.
- **Tensión Inversa Transitoria o Accidental:** es V_{TSM} este valor limita la tensión inversa cátodo-ánodo a la que puede someterse el transistor durante un intervalo dado de tiempo.
- **Tensión Directa de Pico en Bloqueo:** es V_{DPM} (o V_{DPM}) y su valor fija un límite a la tensión máxima aplicable entre ánodo-cátodo del transistor con puerta flotante, sin riesgo de disparo.
- **Potencia Total Disipada:** la potencia total disipada en el transistor es P_{TOT} . En ella se consideran todas las corrientes: directas media e inversa (I_{RAM} e I_{RM}), de fuga directa e inversa (I_{RD} e I_{R}), de mando (I_G), corriente capacitiva, etc.; su valor permite calcular el disipador (radiador).
- **Potencia Media Disipable de Puerta:** es P_{GMV} y es el valor de la potencia disipada en la unión puerta-cátodo.
- **Potencia Pico de Puerta:** es P_{GR2} y corresponde a la potencia máxima disipada en la unión puerta-cátodo en el caso de aplicarse una señal de disparo no continua.
- **Tiempo de Integración:** es el tiempo en el que se calcula el valor medio o eficaz de la potencia disipada y se designa por t_{int} . Para el caso de transistores se suele fijar en 20ms.
- **Corriente de Enganche:** se abrevia con I_L y es la I_L mínima que hace vascular al transistor del estado de bloqueo al de conducción. Su valor es por lo general de dos a tres veces la corriente de mantenimiento.

- **Corriente de Mantenimiento:** para conservar su estado de conducción el tiristor debe suministrar una corriente de ánodo I_A mínima que recibe el nombre de corriente de mantenimiento I_H .
- **Tensión de Enganche:** a la corriente I_L de enganche le corresponde una tensión de enganche V_L .
- **Tensión de Mantenimiento:** V_H es la tensión que aplicada al ánodo permitirá el paso de la corriente I_H de mantenimiento.
- **Corriente de Puerta:** se representa por I_{GT} y en una serie dada de tiristores, el valor máximo necesario para asegurar el cebado de cualquier elemento se designa por I_{GT} .
- **Tensión de Cebado:** a la corriente I_{GT} le corresponde una tensión de cebado V_{GT} ($V_{GT} \approx 1V$ en los dispositivos de uso corriente).

10.2.7. EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE I. Y V. SOBRE EL SCR.

10.2.7.1. LA DERIVADA DE LA TENSIÓN:

Se sabe que una unión PN presenta una cierta capacidad; así pues, si se hace crecer bruscamente la tensión ánodo-cátodo V_{AK} , esta capacidad se carga con una corriente:

$$i = C \frac{dV_{AK}}{dt} \quad (\text{Ecuación 10.8})$$

y si esta corriente es suficientemente elevada provocará el cebado del tiristor. La derivada de la tensión con respecto al tiempo es la velocidad de crecimiento de la tensión ánodo-cátodo.

Efectos: se distinguen dos tipos de condiciones en cuanto a la variación de la tensión:

- a) $\frac{\partial V}{\partial t}$ aplicado sin conducción previa
- b) $\frac{\partial V}{\partial t}$ aplicada tras conducción (o en conmutación).

a) $\frac{\partial V}{\partial t}$ aplicación sin conducción previa: cuando se aplica una rampa de tensión en polarización directa a partir de un nivel cero, la zona desierta se establece en la capa de puerta sólo cuando se han evacuado las cargas móviles por la corriente;

$$I = C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 10.9})$$

Para valores suficientemente elevados de $\frac{\partial V}{\partial t}$ el tiristor puede vascular al estado de conducción directa. La solución de este problema reside en el empleo de la técnica de cortocircuitos de emisor.

b) $\frac{\partial V}{\partial t}$ en conmutación: consideremos un triac en estado conductor, por ejemplo, cuando conduce el tiristor N1P1N2P2.

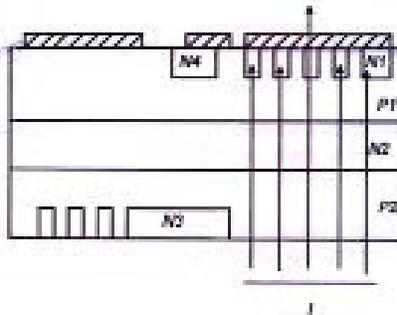


Figura 10.8. $\frac{\partial V}{\partial t}$ en conmutación

En efecto la aplicación de la tensión inversa a N1P1N2P2 se hace a una cierta velocidad ($\frac{\partial V}{\partial t}$), donde el subíndice *i* indica que se trata de la inversa, pero esta tensión se aplica en sentido directo al tiristor N3P2N2P1; si se considera este tiristor, vemos que las cargas inyectadas en las bases se deben a:

- la corriente capacitiva debida a ($\frac{\partial V}{\partial t}$);
- la conducción previa del tiristor N1P1N2P2.

La $\frac{\partial V}{\partial t}$ en conmutación se asemeja más al fenómeno de rebloqueo de los tiristores. El circuito de protección contra este efecto se presenta en la figura 10.9.

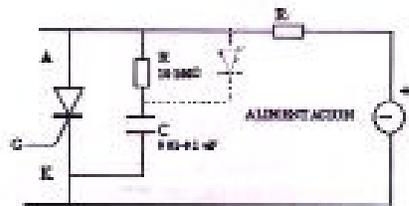


Figura 10.9. Circuito de protección contra el $\frac{\partial V}{\partial t}$

10.2.7.2. LA DERIVADA DE LA CORRIENTE

En los triacs encontramos de nuevo todos los aspectos relativos a la $\frac{\partial i}{\partial t}$ como son el riesgo de cebado local asociados a la aparición de puntos calientes, etc.

No obstante, el triac puede presentar, en régimen de $\frac{\partial i}{\partial t}$ algunos fenómenos propios y característicos. En efecto, su estructura geométrica, comparada con la del tiristor, es relativamente más compleja, y esto sobre todo en la región de puerta. La creación de puntos calientes en sus alrededores puede modificar considerablemente las características de las uniones en la zona de mando. El circuito de protección contra el $\frac{\partial i}{\partial t}$ se indica en la figura 10.10.

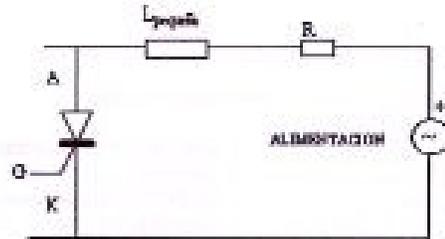


Figura 10.10. Circuito de protección contra el $\frac{\partial i}{\partial t}$

10.2.8. FORMAS DE APAGADO DEL SCR.

10.2.8.1. INTERRUPCIÓN DE LA CORRIENTE DE ÁNODO

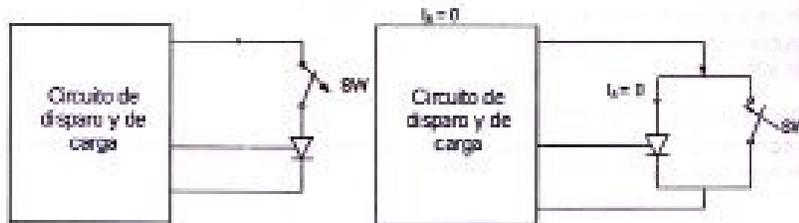


Figura 10.11. Interruptor Abierto

Figura 10.12. Interruptor Cerrado

Para el caso de la figura 10.11 la corriente $I_a = 0$ cuando el interruptor está abierto (interrupción en serie). En cambio para la figura 10.12. la $I_a = 0$ cuando el interruptor está cerrado (Interruptor en derivación).

10.2.8.2. LA TÉCNICA DE CONMUTACIÓN FORZADA:

Que consiste en invertir la polarización del ánodo cátodo, como se indica en la figura 10.13.

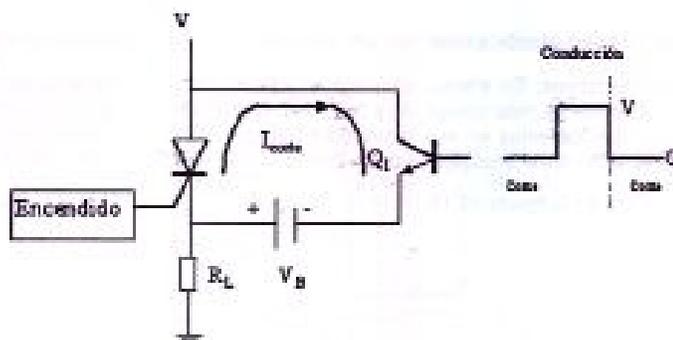


Figura 10.13. Conmutación forzada

Durante la conducción del SCR el Q1 está en corte, en otras palabras está en circuito abierto ya que por la base está circulando una corriente igual a cero, esto evitará que el circuito de apagado afecte a la conducción del SCR. Para condiciones de apagado se aplica un pulso positivo a la base de Q1 poniéndolo en conducción con lo que se produce una baja impedancia entre emisor y colector y el potencial de la batería V_B aparecerá entonces directamente en el SCR forzando la corriente a través de él en la dirección inversa para el apagado. Por lo general los tiempos de apagado de los SCR son del orden de los 5 a 30 μs .

10.2.9. APLICACIONES DEL SCR.

- Un interruptor estático
- Un sistema de control de fase
- Un cargador de baterías
- Un controlador de temperatura
- Un sistema de luces de emergencia.

10.2.9.1 INTERRUPTOR ESTÁTICO:

Se lo conoce como interruptor estático serie de media onda y su circuito respectivo se lo indica en la figura 10.14.

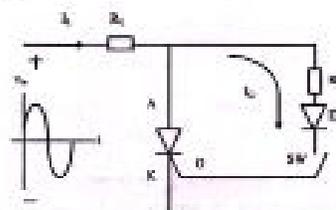


Figura 10.14. Interruptor estático

Si el switch se cierra circulará una I_G durante la parte positiva de la señal de entrada disparando el SCR; la I_G es limitada por la R_1 . Cuando el SCR se dispare el V_{AK} (V_T) disminuirá el valor de conducción produciendo una I_G bastante reducida.

En el semiciclo negativo el SCR se apagará por que el ánodo es negativo con respecto al cátodo, además con D1 evitamos una inversión de la I_G .

10.3. EL TRIAC.

10.3.1. DEFINICIÓN.

El triac es un elemento semiconductor de tres electrodos uno de los cuales es el mando (puerta) y los otros dos son los terminales principales de conducción. El elemento puede pasar de un estado de bloqueo a un régimen conductor en los dos sentidos de polarización (I y III cuadrantes) y volver al estado de bloqueo por inversión de la tensión o por disminución de la corriente por debajo del valor I_H . En la figura 10.15 se describe la curva característica y su símbolo.

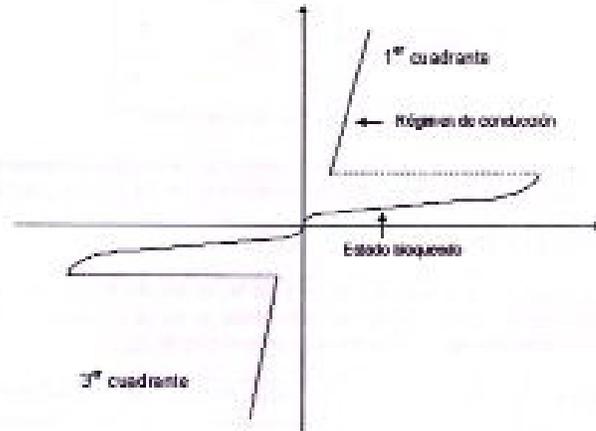


Figura 10.15. Curva Característica

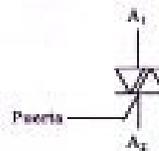


Figura 10.16. Símbolo.

El triac es la versión unidireccional del SCR y se puede comparar a la asociación de antiparalelo de dos tiristores tal como se indica en la figura 10.17

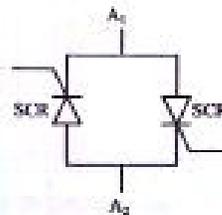


Figura 10.17. Circuito Equivalente

Pueden definirse cuatro cuadrantes de polarización para caracterizar el funcionamiento del triac tal como se detalla en la figura 10.18.

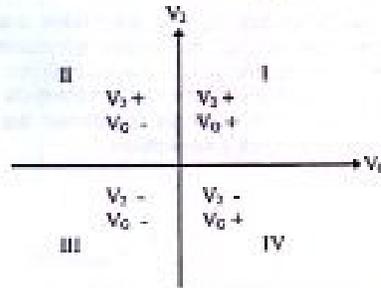


Figura 10.18. Cuadrantes de polarización.

El dispositivo puede pasar al estado conductor independientemente de las polaridades de puerta o de ánodo. El disparo se efectúa en los cuatro cuadrantes.

10.3.2. ACTIVADO DEL TRIAC.

Si se aplica la tensión V_1 al ánodo A_1 , la tensión V_2 al ánodo A_2 y la tensión V_0 a la puerta y si tomamos V_1 como punto de referencia a tierra podemos definir cuatro cuadrantes de polarización, los cuales se indican en la tabla 10.2.

CUADRANTE	V_2	V_0	NOTACIÓN	SENSIBILIDAD
I	> 0	> 0	++	muy buena
II	> 0	< 0	+-	buena
III	< 0	< 0	--	muy buena
IV	< 0	> 0	-+	regular

Tabla 10.2 Características de los Cuadrantes de Polarización

a) **Disparo en el primer cuadrante (++):** el triac se dispara como un tistor normal. La zona P_1 es la puerta y la unión N_1P_1 inyecta portadores produciéndose el disparo del tistor entre P_2 y N_1 (ver figura 10.19). La corriente I_0 mínimo de disparo es función de la repartición de los cortocircuitos entre N_1 y P_1 , es decir del valor de la resistencia R colocada entre $G-A_1$.

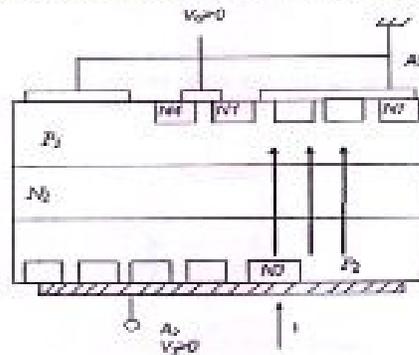


Figura 10.19. Disparo en el Primer Cuadrante

b) Activado en el segundo cuadrante (+ -): la corriente de disparo circula de P_1 a N_4 y se activa el tiristor $N_4P_1N_2P_2$. Debido a la geometría del elemento la corriente principal de $N_4P_1N_2P_2$ polariza las bases P_1N_2 y el tiristor $N_4P_1N_2P_2$ bascula a su vez. Este último normalmente de menor impedancia provoca la apertura de $N_4P_1N_2P_2$ (por I_g) a menos que se mantenga la corriente de puerta. La corriente principal circula entre P_2N_1 , como se indica en la figura 10.20.

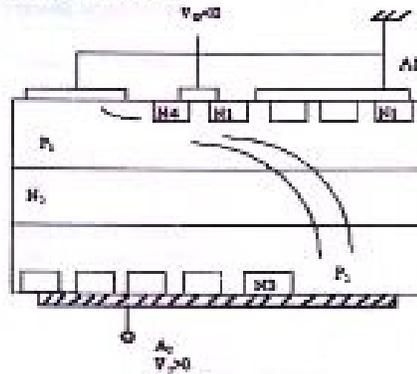


Figura 10.20. Activado en el Segundo Cuadrante

c) Activado en el tercer cuadrante (- -): la situación aquí es un poco más compleja, el potencial de P_1 es superior al de N_4 por ello la unión P_1N_4 tiene polarización directa e inyecta portadores. El tiristor que queremos activar es el formado por las capas $N_3P_2N_2P_1$, como se detalla en la figura 10.21.

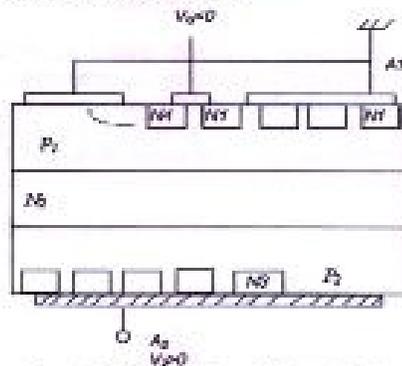


Figura 10.21. Activado en el Tercer Cuadrante

d) Disparo en el cuarto cuadrante (- +): el proceso de disparo es idéntico que al tercer cuadrante siendo ahora la capa N_1 la que juega el papel que anteriormente desempeñaba N_2 .

10.4. TIPOS DE DISPARO DE TIRISTORES Y TRIACs.

Se distinguen tres modalidades de disparo, según la forma de la señal aplicada a la puerta, así:

- a) Corriente continua

- b) Corriente alterna
- c) Impulsos o trenes de onda.

10.4.1. DISPARO EN CORRIENTE CONTINUA (CC):

Las condiciones de disparo en corriente continua vienen precisadas por un gráfico tipo como el de la figura 10.22. (para la familia C35 de General Electric es decir 2N681).

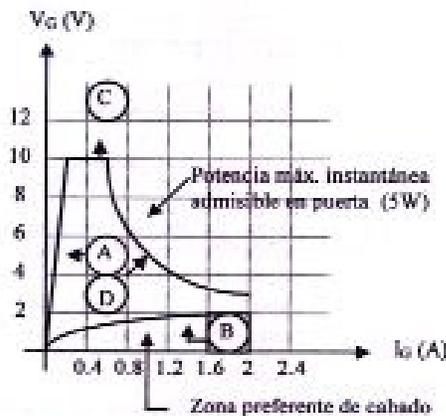


Figura 10.22. Curva para la Familia C35

C representa la tensión directa de pico máxima admisible V_{GT} mientras que D indica la potencia de pico máxima.

El circuito de la figura 10.23. representa un circuito clásico de disparo. Si tomamos la recta de carga del circuito de disparo debe cortar la característica de puerta en la región marcada como "zona preferente de cebado" lo más cerca posible a la curva D.

En las figuras 10.24. y 10.25. describimos con más detalle el circuito de activado en corriente continua, donde además se detalla la curva de V_G vs I_G respectivamente para poder resolver este circuito:

$$V_{G(max)} = R_{G(max)} I_G + V_G \tag{Ecuación 10.10}$$

$$V_{G(max)} = (27 + 2.7) 0.075 + 2 = 4.2 \text{ V} \tag{Ecuación 10.11}$$

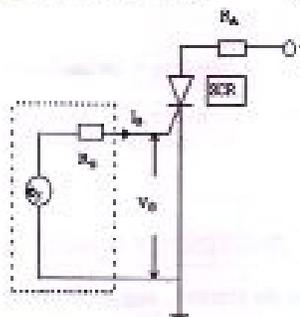


Figura 10.23. Circuito Clásico de Disparo.

$V_{S(min)}$ corresponde a $P_{(GV)} = 0.5 \text{ W}$ gráficamente corresponde a $R_{G(max)} = 32\Omega$.

La potencia máxima disipada en la puerta si $R_{G(max)} \geq R_{G(min)}$

$$P_{GFS(max)} = \left(\frac{V_{S(max)}}{R_{S(min)} + R_{G(max)}} \right)^2 R_{G(max)} \quad \text{(Ecuación 10.12)}$$

$$V_{S(max)} = [R_{S(min)} + R_{G(max)}] \sqrt{\frac{P_{GAV(max)}}{R_{G(max)}}} \approx 7 \text{ V} \quad \text{(Ecuación 10.13)}$$

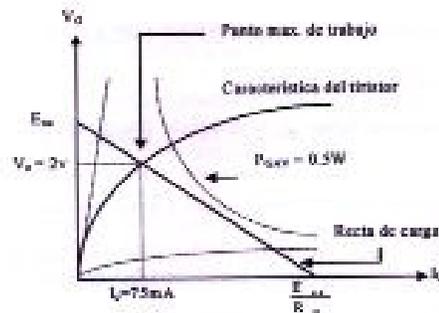


Figura 10.24 Curva Característica;

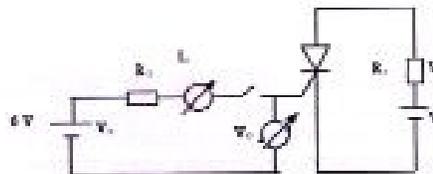


Figura 10.25. Circuito de Activado en CC.

La fuente de 6V ofrece todas las garantías para el funcionamiento.

10.4.2. DISPARO EN CORRIENTE ALTERNA (CA):

El circuito básico es el que se detalla en la figura 10.26.

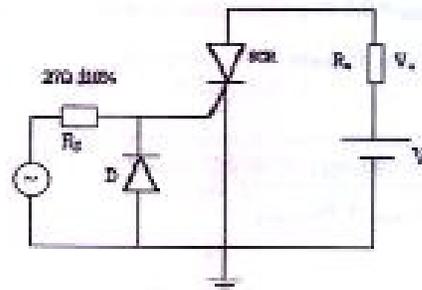


Figura 10.26. Disparo en Corriente Alterna.

El voltaje inverso de puerta debe permanecer inferior al valor máximo admisible, lo que implica el empleo del diodo de protección D.

10.4.3. DISPARO POR IMPULSOS O TRENES DE ONDAS.

10.4.3.1. DISPARO POR IMPULSO ÚNICO:

En la práctica es conveniente tener en cuenta los siguientes principios para obtener resultados óptimos:

- 1.- El circuito de puerta atácase preferentemente con un generador de corriente.
- 2.- La corriente de mando debe ser mayor que la especificada como mínimo, $I_{GT} = I_{mande} =$ valor máximo necesario para asegurar el activado de cualquier elemento.
- 3.- El tiempo de subida debe ser lo más corto posible de 0.1 a 1 μ s.
- 4.- La duración del impulso debe ser tal que la corriente de mando permanezca por encima de la I_{GT} .

a) Caso del Tiristor:

En el caso del tiristor el impulso debe ser positivo con relación al cátodo. Cuando se usa alimentación CA el impulso debe intervenir al menos una vez en cada período puesto que el tiristor se desactiva al término de cada semionda positiva de la corriente de carga. Si se dispone de impulsos negativos y puede tolerarse la caída de tensión suplementaria de un diodo en serie es posible controlar a un tiristor con un circuito como el siguiente que se indica en la figura

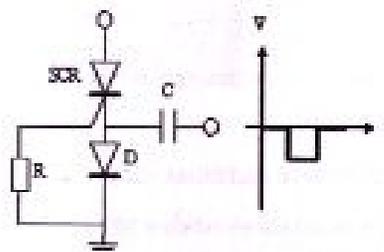


Figura 10.27 Disparo del Tiristor por Impulsos Negativos

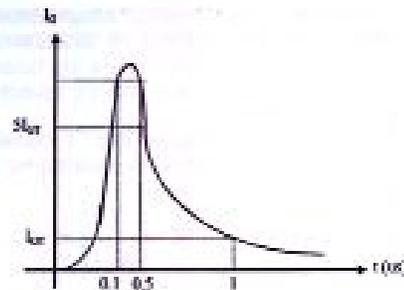


Figura 10.28. Forma de impulsos de Corriente de Puerta

b) Caso del Triac:

Para el triac el impulso de disparo debe presentarse en cada semiperíodo, pudiendo ser indistintamente de polaridad positiva o negativa

b.1.) disparo por impulsos siempre positivos: se producen en el primero y cuarto cuadrantes, el inconveniente reside en la menor sensibilidad que presenta el elemento en el cuarto cuadrante. Esta forma de disparo es muy cómoda cuando se dispone de una fuente de mando suficientemente potente.

b.2.) disparo por impulsos siempre negativos: hablamos del 2º y 3º cuadrante, donde el inconveniente es la corriente de enganche I_L cuyo valor es el más elevado en el 2º cuadrante. No es muy aconsejable este tipo de control cuando la carga es inductiva.

b.3.) disparo por impulsos alternados positivos y negativos: es recomendable en este caso el uso de impulsos positivos durante los semiciclos positivos y de impulsos negativos durante los semiciclos negativos de la tensión de alimentación. Dispara en las condiciones más favorables (1º y 3º cuadrante).

10.5. CIRCUITOS DE DISPARO DE TIRISTORES Y TRIACs.

10.5.1. CIRCUITO DE DISPARO RC.

El circuito típico utilizado se presenta en la figura 10.29

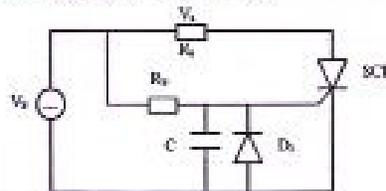


Figura 10.29. Principio de Mando Retardado, debido a la Carga de C.

El condensador se carga a través de la resistencia R_s retardando el momento en el que se alcanza la tensión de disparo.

La forma de onda de la señal de salida es entonces solo una fracción de la semionda positiva reduciendo así el valor medio de la corriente de carga (ver figura 10.29).

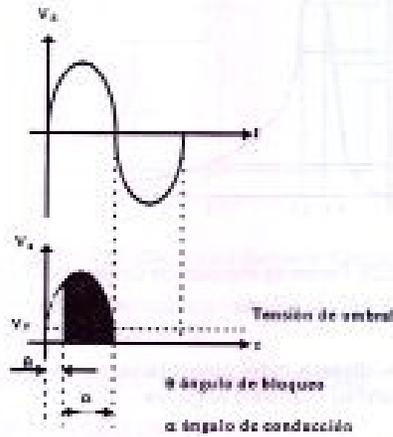


Figura 10.30. Forma de Onda de la Señal de Salida.

La temporización depende de:

- La constante de tiempo R_2C
- La pendiente de tensión de ánodo.

En este circuito el diodo 1 descarga el condensador durante el semiperiodo negativo. Actuando sobre R_2 se puede variar el ángulo de conducción con lo cual puede ser un potenciómetro y tendremos una variación entre

$$0^\circ < \alpha < 180^\circ$$

10.5.2. DISPARO POR UJT.

El transistor UJT se utiliza muy frecuentemente en el disparo de tiristores, pues permite realizar un excelente relajador con muy pocos componentes. El circuito básico utilizado para el disparo de tiristores es como el de la figura 10.31.

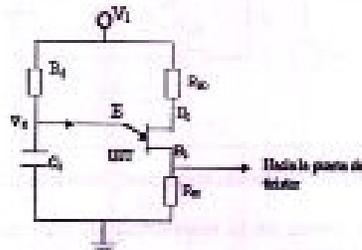


Figura 10.31. Circuito Básico para Disparo de Tiristores.

En este circuito el condensador C_1 se carga a través de R_1 hasta que la tensión de emisor alcanza el nivel de V_p , en ese momento el UJT bascula y C_1 se descarga por R_{B1} . Cuando la tensión de emisor cae a unos 2V el emisor deja de conducir, el transistor unión se bloquea y vuelve a empezar el ciclo.

El periodo de oscilación T , que es prácticamente independiente de la tensión de alimentación y de la temperatura viene dado por:

$$T = \frac{1}{f} = R_1 C_1 \ln \left(\frac{1}{1-\eta} \right) = 2.3 R_1 C_1 \log \left(\frac{1}{1-\eta} \right) \quad (\text{Ecuación 10.14})$$

para un valor nominal aproximado de la relación intrínseca $\eta = 0.63$, tenemos que el periodo será:

$$T = R_1 C_1$$

Generalmente se limita a R_{B1} a un valor de 100Ω aunque para ciertas aplicaciones puede tomar valores de $2k\Omega$ a $3k\Omega$. R_1 tiene un valor entre $3k\Omega$ a $3M\Omega$.

El límite superior de R_1 está determinado de forma que la corriente de pico de emisor permanezca superior a I_p a fin de que pueda bascular el UJT. La tensión de alimentación debe situarse en una gama comprendida entre 10 y 35V; esta gama determinada por abajo por el mínimo valor aceptable de la señal de disparo obtenido y por arriba por la potencia máxima admisible por el UJT.

Si se aplica el impulso de salida V_{B1} del circuito de la figura 10.31. directamente o por medio de resistores en serie a las puertas de los tiristores, el valor de R_{B1} ha de ser lo bastante pequeña para evitar que la tensión continua producida por la corriente de interbase tome un valor superior a la tensión máxima de puerta V_{GT} que no activa el tiristor.

10.5.2.1. DETERMINACIÓN PRÁCTICA DEL CIRCUITO:

Se lo realiza partiendo de familias de curvas relativas del UJT tipo 2N2647, los cuales indican la tensión de alimentación V_s , el C_1 y la R_{B1} .

TIRISTOR	CURVA	R_{B1} (ohm)	V_{1max} (V)
C80	A	$27 \pm 10\%$	20
C60(2N2023) C55-C56	B	$27 \pm 10\%$	35
C52(2N1792-78) C50(2N1009-16)	C	$47 \pm 10\%$	20

Tabla 10.3 Característica de las Curvas para el UJT

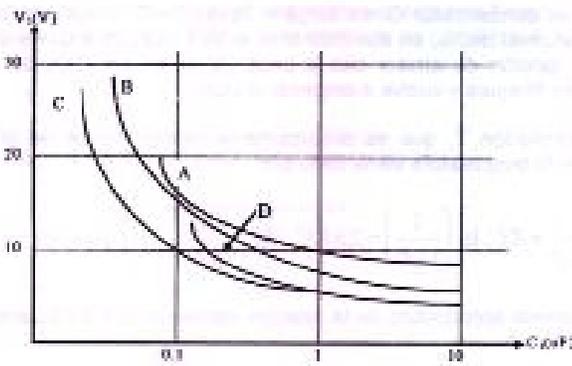


Figura 10.32 Familia de Curvas para el UJT

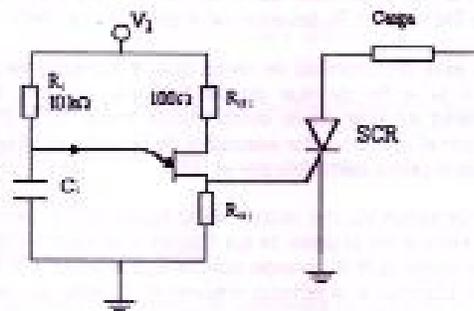


Figura 10.33. Circuito de Disparo

10.5.2.2. SINCRONIZACIÓN DEL UJT.

Se puede sincronizar un UJT mediante un impulso que reduzca la tensión interbase a la alimentación y esto en cualquier momento del ciclo tal como se indica en las figuras 10.34 y 10.35.

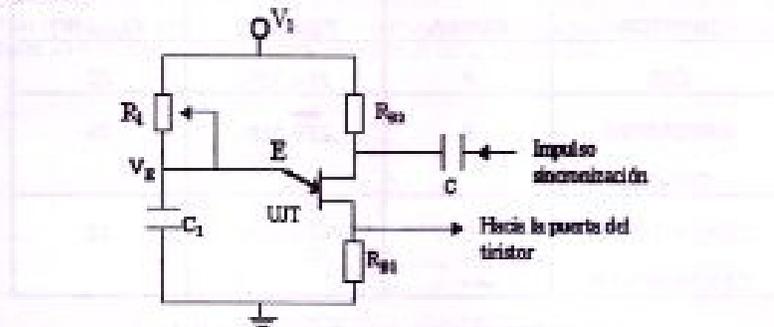


Figura 10.34 Circuito Práctico

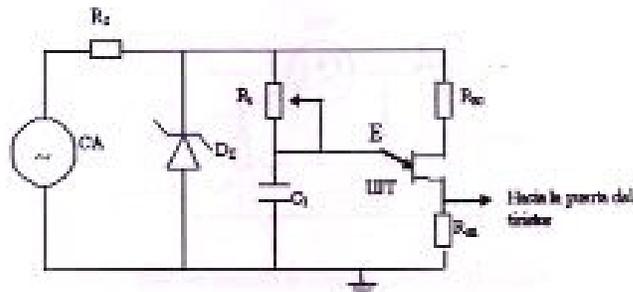


Figura 10.35. Circuito de Aplicación

10.5.3. DISPARO MEDIANTE SUS Y SBS.

El SUS conmutador unilateral se usa para disparo de triodos según el esquema de la figura 10.36. El SUS proporciona impulsos de salida de amplitud superior a 3.5V capaces de disparar cualquier tipo de triodo. Además puede asegurarse la sincronización aplicando una señal positiva a la puerta.

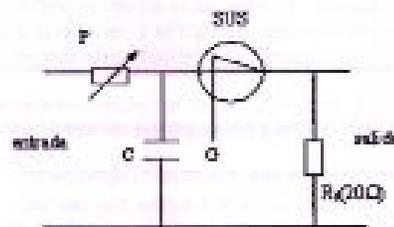


Figura 10.36 Circuito de Disparo con SUS

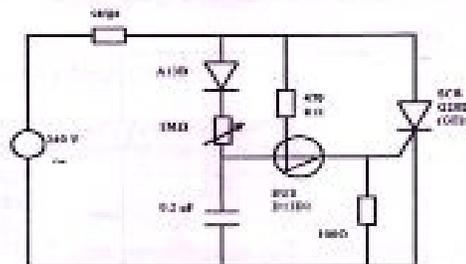


Figura 10.37. Circuito completo con triac y SUS.

El disparo por conmutador bilateral SBS que no es más que la asociación en antiparalelo de dos SUS se basa en los mismos principios como por ejemplo la figura 10.38.

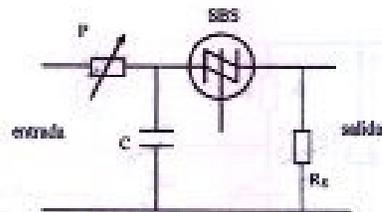


Figura 10.38 Principio para el disparo del SBS

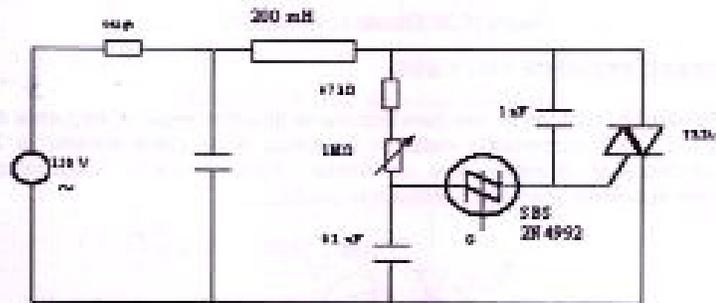


Figura 10.39 Esquema práctico para la utilización del SBS.

La Puerta (G) queda disponible para una eventual sincronización.

10.5.4. DISPARO POR DIAC.

El disparo por DIAC se basa en los mismos principios de lo que hemos venido analizando anteriormente y su empleo resulta muy simple por lo que veremos cierto esquema de aplicación el cual está representado en la figura 10.40.

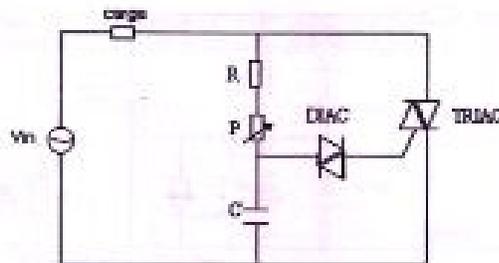


Figura 10.40 Esquema de Aplicación

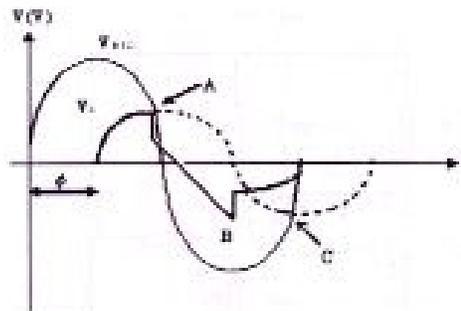


Figura 10.41 Forma de Onda del V_{ano} y V_c .

El DIAC gobierna a un triac que alimenta en CA a la carga. La potencia que esta recibe varía efectivamente con el ángulo de conducción impuesto por el potenciómetro.

En cuanto se conecta la tensión es decir en cuanto se presenta el primer semiperiodo el condensador C empieza a cargarse a través del potenciómetro P y el resistor en serie R. Cuando alcanza en su carga la tensión de disparo del DIAC (alrededor de 30V) este último se hace conductor y el condensador se descarga sobre el circuito de puerta del triac que se dispara alimentando a la carga.

Cuanto más baja sea la resistencia en serie con el C ($R+P$) más rápidamente se alcanzará la tensión de 30V y antes se disparará el triac. Inversamente sucede cuando aumenta la R en serie con el C.

Para la figura 10.41, el desfase que existe entre V_{ano} y V_c es debido a la constante de la RC. Si RC es elevado el disparo del triac se produce al final del semiperiodo en el punto A. La descarga brusca del condensador permite que el siguiente semiperiodo negativo de carga empiece a partir de otro nivel diferente o sea el punto B. Si se hubiera seguido la curva de disparo, el disparo se habría producido en C. La diferencia entre los puntos de disparo B y C constituye el fenómeno llamado de Histéresis.

10.6. PROBLEMAS RESUELTOS.

10.6.1. Para el circuito de la figura, determinar:

- Se disparará prematuramente el SCR si
 - $R_{an} = 6K\Omega$
 - $I_{GT} = 0.1mA$
 - $V_{GT} = 0.5V$
- Calcular R, C para que exista un retardo de 10ms, si además:
 - $\eta = 0.7$
 - $V_D = 0.5V$
 - $I_p = 5\mu A$
 - $I_v = 3mA$
 - $V_v = 2V$

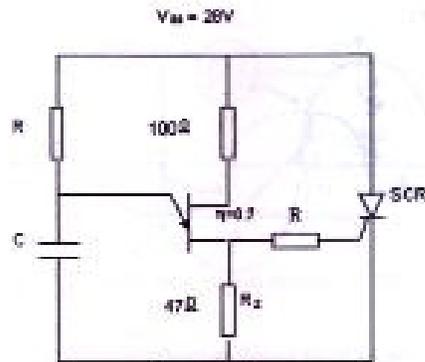


Figura 10.42

Calculando $V_p = V_D + \eta V_{BB}$

$$V_p = 0.5V + 0.7 \cdot 28V$$

$$V_p = 20.1V$$

además:

$$\frac{V_{BB} - V_s}{I_s} < R < \frac{V_{BB} - V_E}{I_p}$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$3.66K\Omega < R < 1.6M\Omega$$

Como el tiempo de descarga t_{off} es mucho menor que el de carga t_{on} , se puede suponer sin cometer un error considerable que:

$$T = t_{on}$$

Sea $R = 100K\Omega$

$$t_{off} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V - V_D}{V - V_p}\right)$$

$$10m = 100K \cdot C \cdot \ln\left(\frac{28 - 2}{28 - 20.1}\right)$$

$$C = 0.08\mu F$$

10.6.2. En el circuito de la figura determinar R, C para que el SCR se dispare 50ms después de cerrarse s.

$I_v = 100mA$

$I_p = 1mA$

$$\eta = \frac{20}{20 + 20} = \frac{1}{2}$$

$$V_p = \eta \cdot V_{BB} + 0.7$$

$$V_p = 0.5 \cdot 40 + 0.7$$

$$V_p = 20.7V$$

$$\frac{V_{AN} - V_P}{I_s} < R < \frac{V_{AN} - V_P}{I_P}$$

$$\frac{40}{100\text{mA}} < R < \frac{40 - 20.7}{1\text{mA}}$$

$$400\Omega < R < 19.3\text{K}\Omega$$

$$t_1 = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{AN}}{V_{AN} - V_P}\right)$$

$$50\text{ms} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{40}{40 - 20.7}\right)$$

$$R \cdot C = 68.61\text{ms}$$

Sean $R = 6.8\text{K}\Omega$

$C = 10\mu\text{F}$

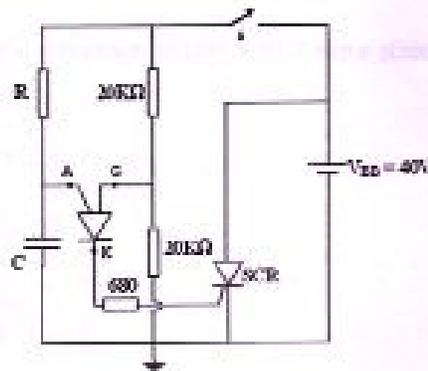


Figura 10.43

10.6.3. El circuito de la figura 10.45 sustituye un interruptor activado por sonido. Determinar:

- El valor del voltaje V_1 para el cual se dispara el SCR.
- La resistencia R , sabiendo que el SCR se dispara con un voltaje de compuerta $V_{GK} = 1\text{V}$ y con una corriente $I_G = 1\text{mA}$. Para el diodo, $V_{AK} = 0.7\text{V}$
- Justifique la utilización del diodo y del pulsante P .

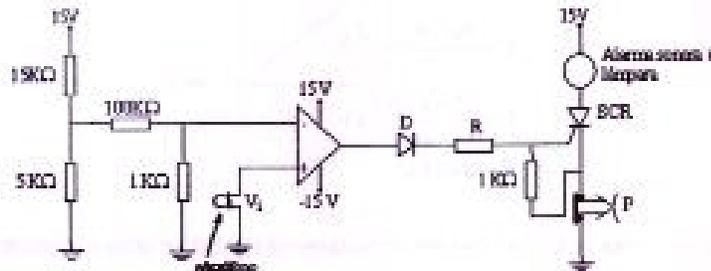


Figura 10.44

a)

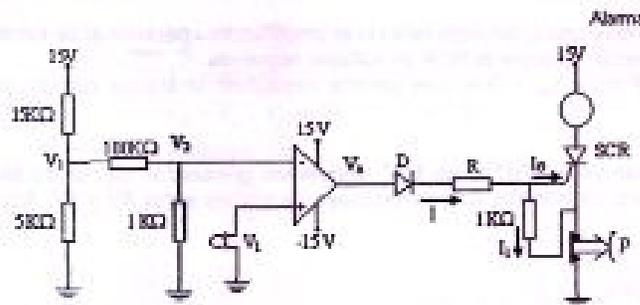


Figura 10.45

Debido a que $100K + 1K\Omega$ es mucho mayor que $5K\Omega$

$$V_1 \approx \frac{5}{15+5} \cdot 15V$$

$$V_1 \approx 3.75V$$

$$V_2 = \frac{1}{100+1} \cdot V_1$$

$$V_2 = \frac{3.75}{101} V$$

$$V_2 = 37.12mV$$

Por lo que V_1 tiene que ser mayor que $37.12mV$.

Para valores mayores que $37.12mV$, el A.O. se satura en alto, lo que provoca que el diodo conduzca momento en el cual se dispara el SCR.

b) Para un A.O. ideal:

$$V_o = V_o + (I_1 + I_C) \cdot R + V_{CE}$$

$$I_1 = \frac{V_{CE}}{1K\Omega} = 1mA$$

$$R = \frac{V_o - V_{CE} - V_o}{I_C + I_1}$$

$$R = \frac{15 - 1 - 0.7}{2mA} \Omega$$

$$R = 6.65K\Omega$$

Para que al saturarse el A.O. se dispare correctamente el SCR se debe cumplir que:

$$R \leq 6.65K\Omega$$

c) El diodo D conduce solamente cuando el amplificador operacional se satura en alto, por lo que permite proteger al SCR de voltajes negativos.

El pulsante P hace $I_{AK} = 0$ lo que permite desactivar la alarma cuando ya ha sido encendida.

10.6.4. Utilizando un PUT o un UJT diseña un generador diente de sierra para una frecuencia de 400 Hz. con variaciones de voltaje entre 8V y 2V. Asumir I_p , I_v , V_{σ} , etc.

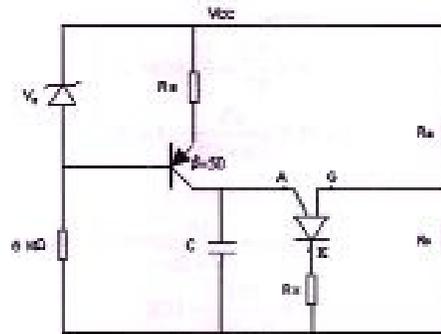


Figura 10.46

Datos del PUT:

$$V_v = 1.5 \text{ V}$$

$$I_v = 5 \text{ mA}$$

$$I_b = 0.1 \mu\text{A}$$

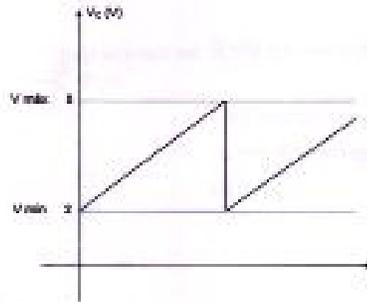


Figura 10.47

$$V_{\text{max}} = 2\text{V} = V_v + I_v R_2$$

$$\text{de donde: } R_2 = \frac{2 - 1.5}{5 \text{ mA}} = 100 \Omega$$

Suponemos $\eta = 0.5$

$$V_g = V_v + V_D$$

$$V_g = \eta \cdot V_{cc}$$

$$V_D = V_g - V_v = 8\text{V} - 0.7\text{V} = 7.3\text{V}$$

entonces

$$V_{cc} = \frac{7.3}{0.5} \text{V} = 14.6\text{V}$$

Sea $V_{cc} = 15\text{V}$

luego :

$$\eta = \frac{7.3}{15} = 0.4866$$

$$\eta = \frac{R_b}{R_a + R_b}$$

Sea $R_b = 10K\Omega$

$$0.4866 = \frac{10}{10 + R_a}$$

$$R_a = \frac{10K}{0.4866} - 10K$$

$$R_a = 10.62K\Omega$$

Sea $R_a = 11K\Omega$

$f = 400 \text{ Hz}$

$T = 2.5 \text{ ms}$

$t_{on} = T$

Debido a que la carga del capacitor es lineal, se cumple que:

$$I_c = C \cdot \frac{V_{max} - V_{min}}{t_{on}}$$

Sea $C = 1\mu F$

$$I_c = 1\mu \cdot \frac{8 - 2}{2.5 \text{ ms}} = 2.4 \text{ mA}$$

cumpléndose:

$$t_p < t_c < t_d$$

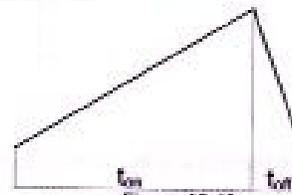


Figura 10.48

$$t_{off} = (R_c + r_c) \cdot C \cdot \ln \left(\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right)$$

$$t_{off} = 100 \cdot 1\mu \cdot \ln \left(\frac{0 - V_p}{0 - (V_s + I_c \cdot R_c)} \right)$$

$$t_{off} = 100 \cdot 1\mu \cdot \ln \left(\frac{8}{2} \right)$$

$$t_{off} = 0.138 \text{ ms}$$

Por lo que

$$t_{on} = T - t_{off}$$

$$t_{on} = 2.5 \text{ ms} - 0.138 \text{ ms} = 2.36 \text{ ms}$$

Recalculando I_C :

$$I_C = C \cdot \frac{\Delta V}{t_{on}}$$

$$I_C = 1\mu \cdot \frac{6}{2.36m} = 2.54mA$$

Que aún cumple:

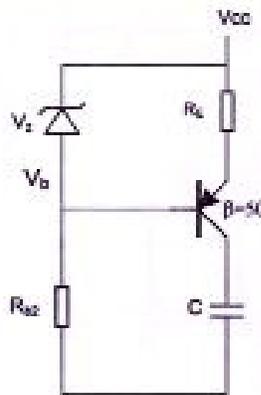
$$I_p < I_C < I_s$$

Para la fuente de corriente constante:

$$I_C = I_Z$$

Sea $V_Z = 5.1V$

Además que para polarizar correctamente al zener se necesita una $I_Z = 10mA$



$$V_Z = I_Z R_C = 0.7$$

$$R_C = \frac{5.1 - 0.7}{2.54m} \Omega$$

$$R_C = 1.73K\Omega$$

Sea $R_C = 1.8K\Omega$

Otra opción consiste en utilizar un potenciómetro en serie con una resistencia de $1.5K\Omega$.

Figura 10.48

$$V_b = V_{cc} - V_Z$$

$$V_b = 15V - 5.1V = 9.9V$$

Ya que la corriente de base es despreciable respecto a la I_Z :

$$R_{12} = \frac{9.9V}{10mA}$$

$$R_{12} = 990\Omega$$

Sea $R_{12} = 1K\Omega$

10.6.5. Considere el circuito de la figura 10.51; en el cual V_{in} tiene un amplitud pico de $180V$, el diodo zener un $V_Z = 10V$, por tanto, puede suponerse que el voltaje aplicado al circuito UJT es esencialmente $10V$, para la duración del semiciclo positivo de V_{in} .

Se conoce además que $\eta = 0.7$.
 Determine el ángulo de disparo del SCR.
 Dibuje las formas de onda de V_{CAT} , su valor medio y eficaz.

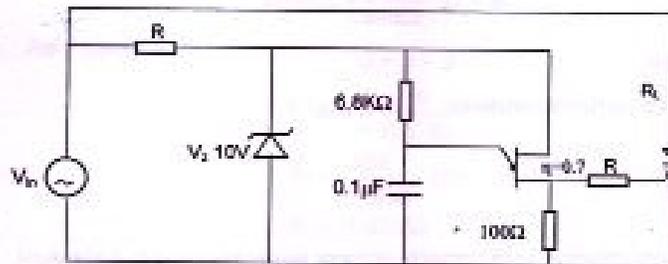


Figura 10.50

$$V_m = 160 \sin(377t)$$

$$V_p = \eta \cdot V_m + V_D$$

$$V_p = 0.7 \cdot 10 + 0.5$$

$$V_p = 7.5V$$

$$t_1 = T$$

$$T = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

$$T = 6.8K \cdot 0.1\mu \cdot \ln\left(\frac{1}{1-0.7}\right)$$

$$T = 0.818ms$$

por lo que $t_1 = 0.818ms$

$$\theta_1 = \omega t_1$$

$$\theta_1 = 377(0.818m) \text{ Rad}$$

$$\theta_1 = 0.3084 \text{ Rad}$$

$$\theta_1 = 17.67^\circ$$

Que constituye el ángulo de disparo del SCR.

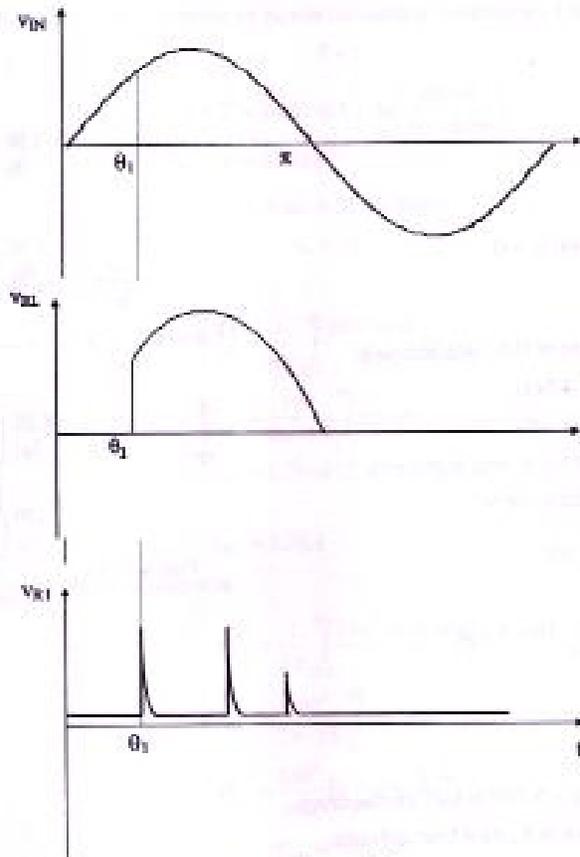


Figura 10.51

10.6.6. En el circuito de la figura graficar detalladamente las formas de onda de los voltajes en los puntos A, B, C, D.
 Además determinar la corriente media por la carga R_L .
 Y la potencia promedio disipada en la misma. Suponer que todos los elementos son ideales y que el zener cuando conduce se halla trabajando en la región zener.

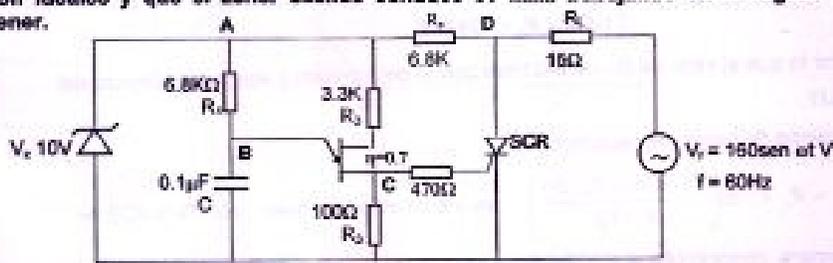


Figura 10.62

Para el UJT: $\eta = 0.7$

$$\begin{aligned} R_{BB} &= 9K\Omega \\ I_p &= 10\mu A \\ V_v &= 2V \\ I_v &= 3mA \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{BB}} \quad \text{Cuando } I_C = 0$$

$$R_{B1} = 0.7(9K\Omega)$$

$R_{B1} = 6.3K\Omega$ cuando el UJT está apagado

Por lo que $R_{B2} = 2.7K\Omega$

Debido a que $V_{Zmax} \gg 10V$

consideramos que el zener regula durante todo el semiciclo positivo de V_1 .

$$V_z = \frac{R_2 + R_{B2}}{R_{B2} + R_2 + R_z} \cdot 10V$$

$$V_z = \frac{100 + 6.3K}{9K + 3.3K + 100} \cdot 10 = 5.16V$$

$$V_P = V_z + V_D$$

$$V_P = 5.16V + 0.5V$$

$$V_P = 5.66V$$

Por lo que cuando $V_e > 5.66V$ el UJT se disparará.

Además comprobamos si R_1 está bien definido:

$$\frac{V_z - V_v - R_2 \cdot I_v}{I_v} < R_1 < \frac{V_z - V_P}{I_p}$$

$$R_2 I_v \approx 0$$

$$\text{por lo que } \frac{10 - 2}{3mA} < R_1 < \frac{10 - 5.66}{10\mu A}$$

$$2.6K\Omega < R_1 < 434K\Omega$$

Por lo que el valor de $R_1 = 6.8K\Omega$ cae dentro del intervalo y asegura el disparo del UJT.

Tiempo de carga del capacitor:

$$t_1 = R_1 \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_z - (V_v + R_2 \cdot I_v)}{V - V_P}\right) \quad \text{para el circuito propuesto cuando el SCR se}$$

dispara, cortocircuita el circuito de disparo por lo que el capacitor se descarga totalmente.

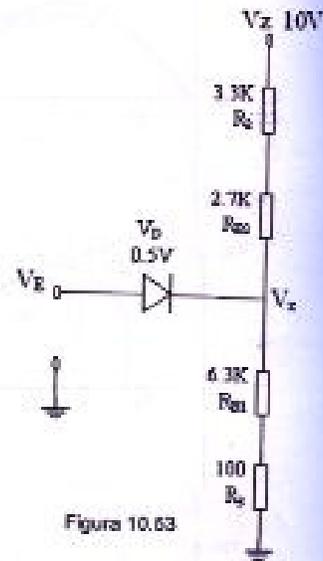


Figura 10.63

Como la descarga del capacitor se puede considerar instantánea:

$$T \approx t_1$$

$$t_1 = T = 6.8K \cdot 0.1\mu \cdot \ln\left(\frac{10-0}{10-5.66}\right)$$

$$t_1 = T = 0.568ms$$

$$\theta_1 = \omega t_1 = 377 \cdot 0.568m$$

$$\theta_1 = 12.3^\circ$$

Cálculo de la corriente:

$$I_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_{12.3}^{180} \frac{160 \cdot \text{sen}x}{15} dx$$

$$I_{DC} = \frac{160}{2\pi \cdot 15} \int_{12.3}^{180} \text{sen}x dx$$

$$I_{DC} = 1.7[\cos 12.3 - \cos 180]A$$

$$I_{DC} = 3.36A$$

Calculo de la potencia disipada:

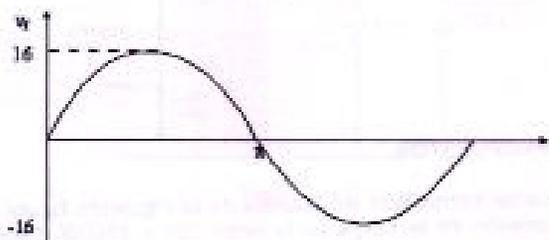
$$P_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_{12.3}^{180} \frac{160^2 \cdot \text{sen}^2 x}{15} dx$$

$$P_{DC} = \frac{160^2}{2\pi \cdot 15} \int_{12.3}^{180} \text{sen}^2 x dx$$

$$P_{DC} = \frac{160^2}{60\pi} (x - \text{sen}x) \Big|_{12.3}^{180}$$

$$P_{DC} = 425.83W$$

Los gráficos son los siguientes:



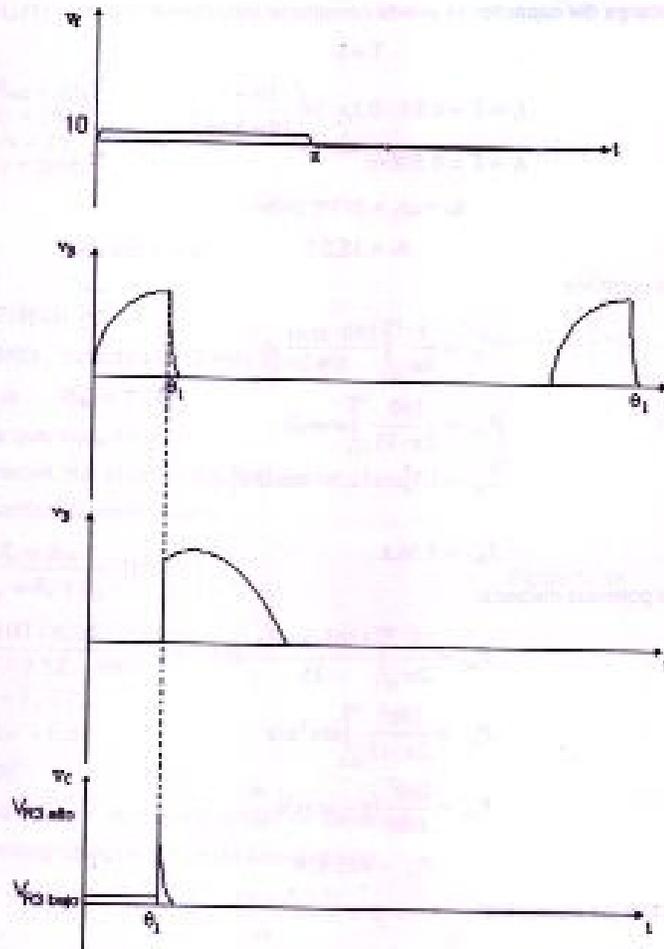


Figura 10.54

10.7. PROBLEMAS PROPUESTOS.

10.7.1. En el rectificador controlado de 1/2 onda de la siguiente figura se quiere que la potencia promedio en la carga varíe entre 750 y 1100W. Determinar el rango de variación que se debe dar al ángulo de disparo para lograr la variación de potencia indicada.

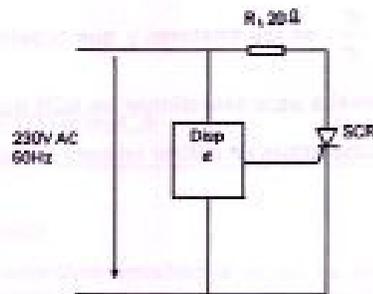


Figura 10.55

10.7.2. En el circuito de la figura encontrar el tiempo en el que se apaga el triac, el cual es disparado por con un pulso al tiempo $t=0$.
 $I_H = 10\text{mA}$, por lo demás el triac es ideal.

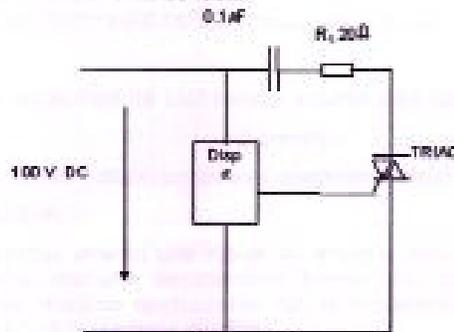


Figura 10.56

10.7.3. En el circuito de la figura encontrar los valores, medio y eficaz del voltaje en la carga y en los SCRs. Sabiendo que el disparo a los SCRs es simétrico y de 80° eléctrico, medidos al inicio del semiciclo en el cual están polarizados directamente.

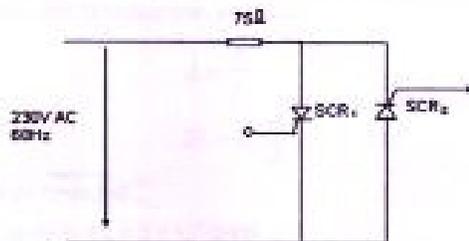


Figura 10.57

10.7.4. Contestar brevemente lo siguiente:
 a) Enumere cinco tiristores unidireccionales.

- b) Que son el $\frac{dV}{dt}$ y el $\frac{dI}{dt}$ en los tiristores y que ocasiona al sobrepasarse estos valores.
- c) Qué información se necesita para seleccionar un SCR que se utilizará en un circuito.
- d) Que ventajas y desventajas existe en utilizar un opto acoplador en lugar de un transformador.

