



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo Práctico 2: **CONTROL POR ÁNGULO DE CONDUCCIÓN CON SCR**

ELECTRÓNICA DE POTENCIA

ACHA, LAUTARO

53888

lauta.acha@gmail.com

GUEVARA, C. EMILIANO

53977

emi_chiro@gmail.com

MARTINEZ, DENIS F.

54547

denisfmartinez@gmail.com

5R2 – Mayo 2013

1. Introducción

1.1. El Tiristor o SCR

El tiristor o SCR “silicon controlled rectifier” es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez, el tiristor es un componente idóneo en electrónica de potencia. Fué obtenido por primera vez por General Electric en 1957.

El tiristor, concebido en un principio como equivalente de estado sólido para reemplazar al tiratrón a gas, se ha impuesto rápidamente en toda una serie de dominios de los que los más importantes son, aparte de la conmutación simple, la variación de la velocidad de motores y graduación de luz.

En efecto, el tiristor permanece normalmente bloqueado hasta el momento en que se le hace conducir actuando sobre su electrodo de disparo. Puesto que ese momento se puede fijar con toda precisión, es posible gobernar a voluntad el paso de intensidades de corriente en su valor medio.

*El término “tiristor” designa a toda una familia de elementos semiconductores cuyas características son similares, en principio, a las de las antiguas válvulas “tiratrones”. El nombre de tiristor proviene justamente de la contracción de **tiratrón** y **transistor**.*

Como son elementos unidireccionales, con tres terminales (ánodo, cátodo y puerta), bloqueados en el tercer cuadrante se le suele llamar “tiristores triodos de bloqueo inverso”.

1.1.1. Estructura y símbolo

El tiristor es un semiconductor sólido de silicio formado por cuatro capas P y N alternativamente, dispuestas como se ve en la figura 1, donde también se representa su símbolo.

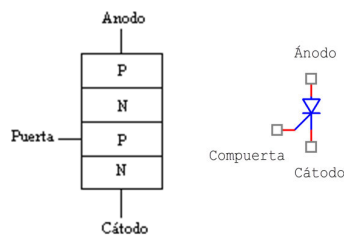


Figura 1: Estructura y símbolo del tiristor.

Los dos terminales principales son el ánodo y el cátodo, y la circulación entre ellos de corriente directa está controlada por un electrodo de mando llamado “puerta”. (“gate” del inglés).

El tiristor es un elemento unidireccional. Una vez aplicada la señal de corriente a la puerta, el dispositivo deja pasar una corriente en ánodo que sólo puede tener un único sentido. Por ello a veces se designa rectificador controlado.

El dispositivo cumple varias misiones que podemos clasificar un poco arbitrariamente como sigue:

Rectificador: *consiste en usar la propiedad de funcionamiento unidireccional del dispositivo, el cual realiza entonces la función de diodo controlado.*

Interrupción de corriente: usado como interruptor, el tiristor puede reemplazar a los interruptores mecánicos.

Regulación: la posibilidad de ajustar el momento preciso de cebado (el ángulo de conducción) permite emplear al tiristor para gobernar la potencia o la corriente media de salida.

Amplificación: puesto que la corriente de mando puede ser muy débil en comparación con la corriente principal, se produce un fenómeno de amplificación en corriente o en potencia. En ciertas aplicaciones esta ganancia puede ser de utilidad.

1.1.2. Polarización del Tiristor

Viendo la **figura 2** podemos comparar al tiristor a tres diodos conectados en oposición.

- Si el ánodo es positivo, el elemento está polarizado directamente, pero el diodo $P_1 N_2$ bloquea la tensión aplicada;
- Si, por el contrario, el ánodo es negativo, los diodos $P_2 N_2$ y $P_1 N_1$ tienen polarización inversa. Por ser débil la tensión de avalancha de $P_1 N_1$, su papel es despreciable y es $P_2 N_2$ el que va a limitar la corriente inversa de fuga.

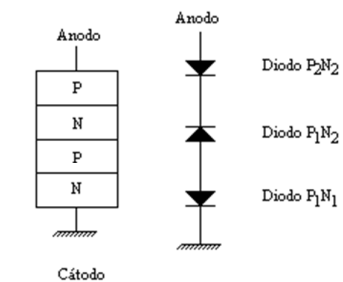


Figura 2: Las tres uniones del tiristor pueden representarse mediante tres diodos equivalentes.

La tensión máxima viene limitada, prácticamente, por la tensión de avalancha de los diodos $P_2 N_2$ y $P_1 N_2$.

1.1.3. Polarización directa del Tiristor

Se comprenderá mejor el funcionamiento del tiristor si nos referimos al montaje con dos transistores, PNP y NPN, de la **figura 3**, que resulta equivalente. Estos dos transistores están conectados de forma que se obtenga una realimentación positiva.

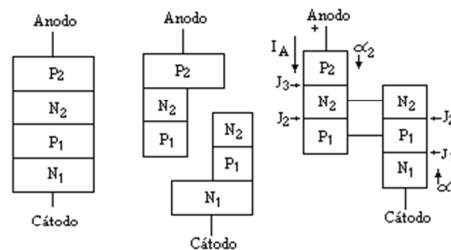


Figura 3: El tiristor es equivalente a una combinación de dos transistores, uno PNP y otro NPN

Supongamos que sea positiva la región P_2 con relación a la N_1 . Las uniones J_3 y J_1 emiten portadores, positivos y negativos respectivamente, hacia las regiones N_2 y P_1 . Estos portadores, tras su difusión en las bases de los transistores, llegan a la unión J_2 , donde la carga espacial crea un intenso campo eléctrico.

Siendo α_2 la ganancia de corriente que da la fracción de la corriente de huecos inyectadas en el emisor y que llega al colector del PNP, y siendo por otro lado α_1 la ganancia de corriente que da la fracción de corriente de electrones inyectada en el emisor que llega al colector del NPN, podemos escribir:

TP2: Control por Ángulo de Conducción con SCR

$$I_{C2} = \alpha_2 \cdot I_A$$

$$I_{C1} = \alpha_1 \cdot I_A$$

La corriente total de ánodo I_A es evidentemente la suma de I_{C1} e I_{C2} , a la que hay que sumar la corriente de fuga residual que pasa por la unión central J_2 y la llamaremos I_{CX} . Se tiene entonces:

$$I_A = \alpha_1 \cdot I_A + \alpha_2 \cdot I_A + I_{CX}$$

Lo que nos da:

$$I_A = \frac{I_{CX}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Ahora bien, en muchos transistores de silicio la ganancia α es baja para valores reducidos de corriente, aumentando cuando crece la corriente. Luego, si I_{CX} es reducida, el denominador de la fracción anterior se aproxima a 1 (para corrientes débiles) y la corriente I_A es apenas mayor que la corriente de fuga.

- Aunque polarizada directamente, la estructura PNPN permanece bloqueada presentando una elevada impedancia.

Cuando aumenta, por cualquier motivo, la corriente de fuga I_{CX} , aumenta la corriente y la ganancia. La suma $\alpha_1 + \alpha_2$ tiende entonces a uno y la corriente I_A tiende a infinito. En realidad esta corriente toma un valor muy alto, limitado solo por el circuito externo.

- El tiristor está entonces en un estado conductor (también se dice que está desbloqueado o disparado).

Hay que observar que este tipo de cebado por aumento de la corriente de fuga -esto es en general por aumento de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo del elemento- "es desaconsejable" en la mayoría de los casos.

1.1.4. Principio de cebado por puerta.

El cebado por puerta es el método más usual de disparo de tiristores. El razonamiento siguiente será mucho más claro. Ver **Fig 4**

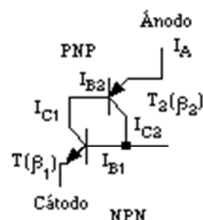


Figura 4: Montaje equivalente de un tiristor que explica el fenómeno del cebado.

Una vez polarizado directamente el tiristor, se inyecta un impulso de corriente en su puerta de mando (se denomina I_G). El transistor NPN designado T_1 recibe una corriente de base I_G , pasando a ser su corriente de colector de $I_G \beta_1$, donde I_G es la ganancia de

corriente del transistor (montaje emisor común). Esta corriente se inyecta a su vez en la base del transistor T (PNP) que entrega entonces una corriente de $I_G \cdot \beta_1 \cdot \beta_2$ (siendo β_2 la ganancia de corriente de T_2). Esta corriente, que aparece en el colector de T_2 , vuelve a aplicarse a la base de T_1 .

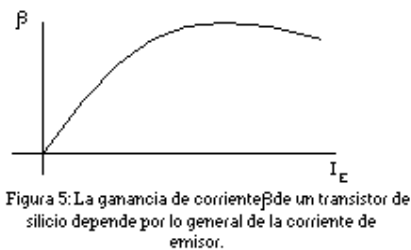
Hay que considerar entonces dos casos:

1º El producto $\beta_1 \cdot \beta_2$ es inferior a 1, en cuyo caso el elemento no se ceba.

2º El producto $\beta_1 \cdot \beta_2$ tiende a la unidad, por lo que se realiza el proceso de amplificación y el elemento cambia a su estado conductor.

Estas dos condiciones ($\beta_1 \cdot \beta_2 < 1$ y $\beta_1 \cdot \beta_2 \rightarrow 1$) caracterizan el estado del tiristor en función de la corriente (figura 5). Así pues:

- Si la corriente de puerta es débil, el producto $\beta_1 \cdot \beta_2$ es inferior a la unidad y no se ceba el elemento.



- Si el impulso de mando es suficiente, las corrientes de emisor son bastante elevadas para que el producto $\beta_1 \cdot \beta_2$ tienda a 1.

En cuanto se produce el cebado, la realimentación hace que los dos transistores conduzcan a saturación (por cuanto la corriente de colector de uno se inyecta sistemáticamente en la base del otro). Una vez en conducción, los transistores se mantienen ya en ese estado, incluso aunque desaparezca el impulso inicial de puerta, hasta que el circuito exterior deje de mantener la corriente I_A .

1.1.5. Técnicas de conmutación del tiristor

Un tiristor se activa mediante una señal en compuerta. Cuando el tiristor está saturado, su caída de tensión puede ser entre 0,25 a 2V. Una vez activado el tiristor y satisfechos los requisitos de carga, por lo general es necesario desactivarlo; esto significa que hay que lograr que la corriente del ánodo del tiristor, pase por valores menores que el valor de la corriente de mantenimiento, I_H sin reaplicación de corriente de compuerta. El proceso de desactivación del tiristor, por lo general, causa la transferencia de la corriente que estaba conduciendo por él, a otras partes del circuito.

Existen dos métodos para conmutar los tiristores:

Conmutación natural y Conmutación forzada.

1.1.5.1. Conmutación natural

Si la tensión de la alimentación (o de la entrada) es de CA, la corriente de ánodo del tiristor normalmente pasará a través del cero natural, apareciendo una tensión inversa, por lo

que la corriente de ánodo será en algún instante menor que el valor de mantenimiento I_H . El dispositivo queda, entonces, desactivado en forma automática.

Este tipo de conmutación se conoce como conmutación natural o de línea.

En la práctica, el tiristor se dispara en forma síncrona con el cruce por cero del voltaje positivo de entrada en cada ciclo, a fin de suministrar un flujo continuo de potencia. Este tipo de conmutación se aplica a controladores de tensión de CA, rectificadores controlados por fase y a cicloconvertidores. En la fig. siguiente se muestra un circuito en donde se muestra una disposición típica correspondiente a la conmutación natural.

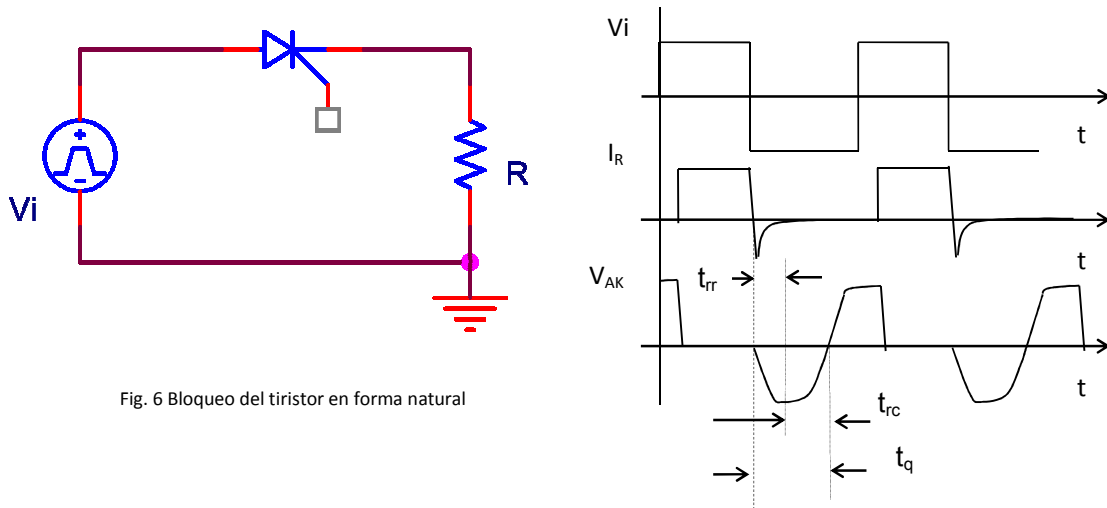


Fig. 6 Bloqueo del tiristor en forma natural

Un tiristor que está en estado de conducción se bloquea cuando la corriente ánodo-cátodo I_A desciende por el valor de la corriente de mantenimiento, I_H

Debido a las dos uniones J_1 y J_2 , las características de bloqueo deberían ser similares a las de un diodo, con la exhibición de un tiempo de recuperación inverso t_{rr} y una corriente de recuperación de pico inverso I_{rr} . Pero, la unión J_2 requerirá de un tiempo conocido como tiempo de recombinación t_{rc} para combinar los portadores en exceso (una tensión inversa negativa reduciría el tiempo de recombinación).

El tiempo de desactivación se define como el valor mínimo de intervalo de tiempo entre el instante en que la corriente I_H se ha reducido a cero hasta el instante en que el tiristor es capaz de soportar una tensión directa sin activarse o saturarse. t_q depende del valor pico de la corriente de saturación y la tensión instantánea antes de bloquearse.

El tiempo de desactivación $t_q = t_{rr} + t_{rc}$ es la suma del tiempo de recuperación en inversa y el tiempo de recombinación.

1.1.5.2. Conmutación forzada

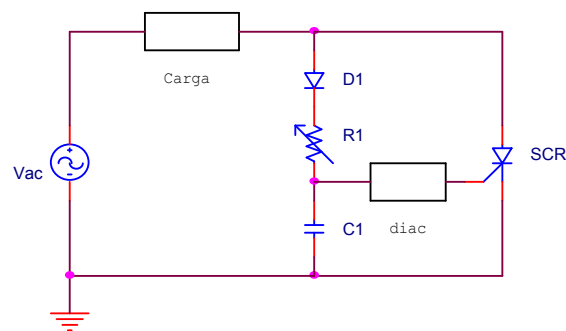
En casos en que la tensión de alimentación de CC, para desactivar el tiristor, se deberá obligar a pasar la corriente de ánodo en sentido directo, por valores debajo de la corriente de mantenimiento I_H . Para esto, se deberá utilizar circuitos adicionales. Esta técnica se conoce como conmutación forzada, y por lo general se aplica en fuentes conmutadas, o troceadores de CC a CC, y en inversores, o convertidores de CC a CA.

La conmutación forzada de un tiristor se puede lograr de maneras diferentes, que se pueden clasificar como:

- *Autoconmutación*
- *Fuente inversa de tensión*
- *Fuente inversa de corriente*

1.2.6. Circuitos básicos para el control del ángulo de conducción

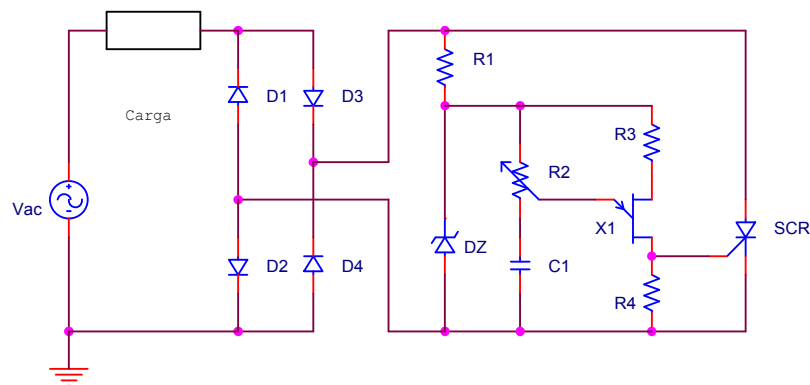
1.2.6.1. Control de media onda



Control de ángulo de conducción de media onda

El dispositivo de disparo del tiristor es un diac, que genera un impulso de corriente al tiristor cuando la tensión en sus bornes alcanza la tensión de disparo.

1.2.6.2. Control de onda completa



Control de ángulo de conducción de onda completa con disparo por unijuntura

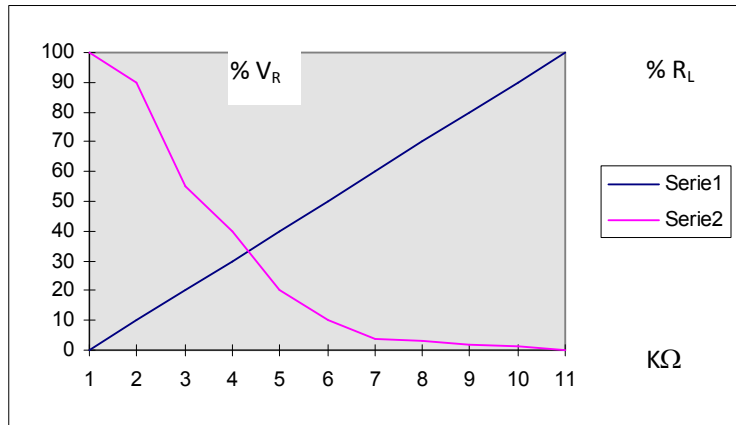
R1 limita la corriente que circulará por el diodo Zener.

C1 se carga en cada semiperíodo a través de R2.

Cuando V_{C1} llega a la tensión V_p de disparo del unijuntura, éste se dispara y genera un impulso de corriente que, a su vez produce el disparo del SCR.

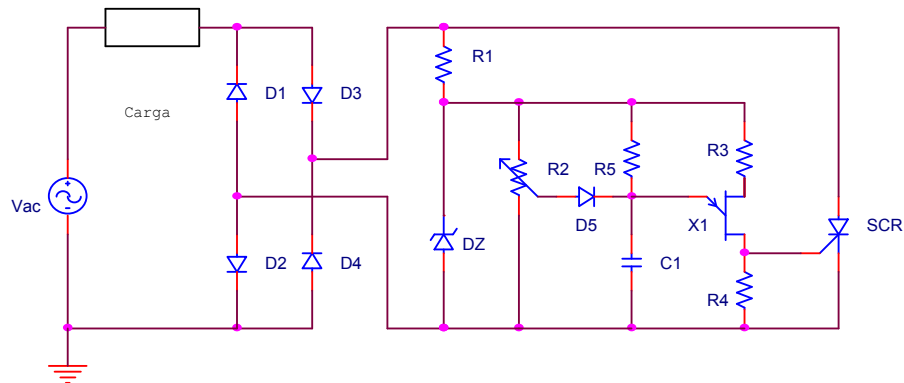
D1 a D4 tienen que soportar la potencia de la carga, ya que forman parte del circuito de conmutación principal.

La relación de transferencia de potencia del potenciómetro en función de la tensión total aplicada a la carga es:



Como puede observarse, la relación no es lineal.

Para lograr una relación más lineal, se recurre a una señal llamada **Rampa-escalón**.



Circuito Rampa lineal-escalón

Donde, en el comienzo del ciclo, el capacitor $C1$ se carga con un “escalón” inicial, cuyo valor dependerá del valor del potenciómetro. El tiempo de carga inicial tiene que ser muy corto. Por lo que, la constante de tiempo $R2 C1$ tiene que ser mucho menor que la constante de tiempo de carga del capacitor por $R5$, lo que equivale decir:

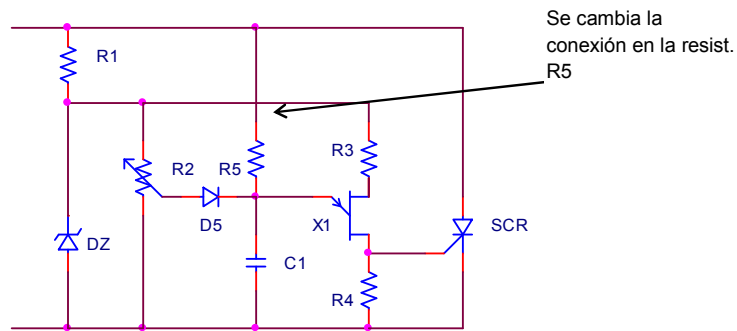
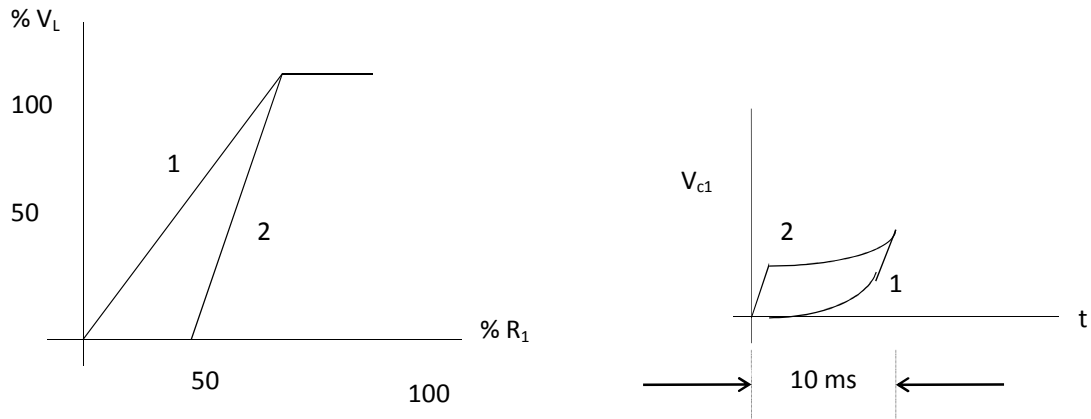
$$R2 C1 \ll R5 C1$$

TP2: Control por Ángulo de Conducción con SCR

Una vez cargado el capacitor con el escalón inicial, ahora se cargará con la rampa generada por R5-C1.

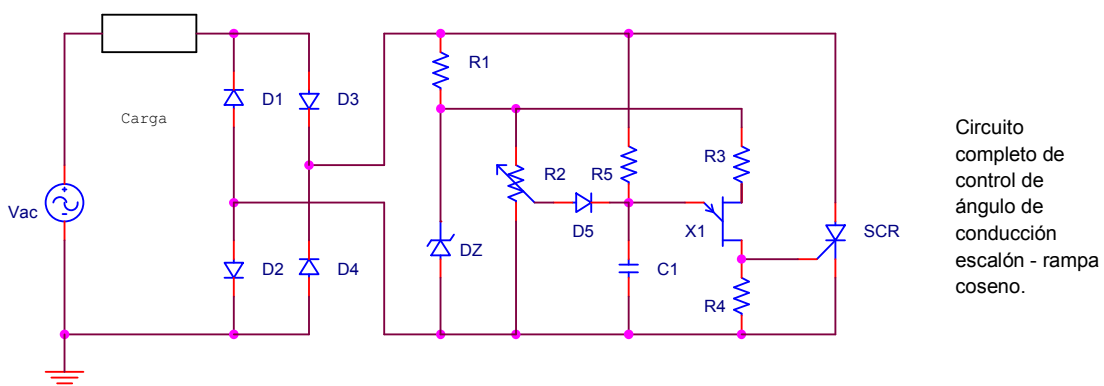
La relación de transferencia Tensión “pico” en punto medio potenciómetro Vs tensión aplicada a la carga es, ahora mucho más lineal.

Pero, para obtener una tensión realmente lineal, es necesario hacer una corrección de la forma de onda de la rampa, modificando la rampa lineal por una rampa “coseno”. Esta modificación da como resultado una relación de transferencia Tensión de referencia (tensión instantánea en el capacitor) Vs tensión aplicada en la carga, prácticamente lineal.



Método rampa coseno - escalón

El circuito completo queda:

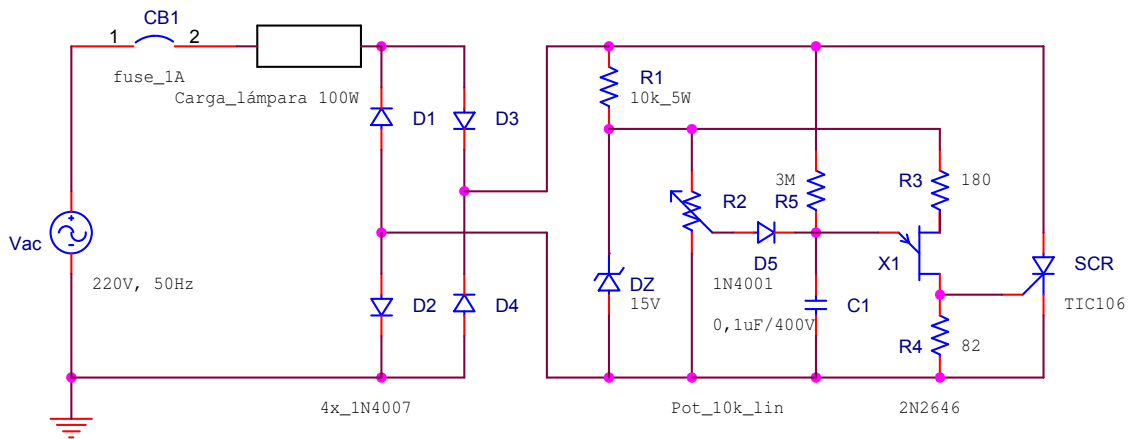


Circuito completo de control de ángulo de conducción escalón - rampa coseno.

2. Desarrollo

El objetivo de este práctico es el diseñar y construir un circuito empleando un SCR, midiendo sobre la carga utilizada, que es una lámpara de 220V de 75W, el ángulo de conducción. El TIC 116 es el elegido para este práctico. El ángulo de conducción, y por lo tanto la potencia media disipada en la carga, es controlado por una tensión variable entre 0 y 11 Voltios. Se buscará establecer una variación lineal entre el ángulo de conducción y dicha tensión.

El circuito a implementar es el indicado en la figura. Para el control del disparo se utilizará un transistor unijuntura, el 2N2646.



Como primer paso para el posterior cálculo se deben obtener los siguientes valores de las hojas de datos de los elementos semiconductores, estos son:

Para el TIC 106 $I_{GT} = 200 \mu A$, $V = 1,2V$

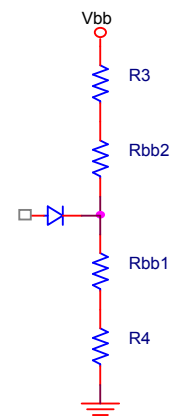
Para el 2N2646 $\eta = 0,75$, $R_{bboff} = 7k\Omega$ y $R_{bbon} = 600\Omega$

Calculamos el valor de los dos resistores, R_3 y R_4 , juntamente con la tensión V_{BB} requerida para lo que nos valdremos del circuito equivalente del unijuntura indicado en la **figura 6**. Primeramente calcularemos los valores de R_{bb1} y R_{bb2} , teniendo en cuenta que:

$$\eta = \frac{R_{bb1}}{R_{bb1} + R_{bb2}}$$

Como $R_{bb1} + R_{bb2} = 7k\Omega$, entonces $R_{bb1} = 5250\Omega$ y $R_{bb2} = 1750\Omega$

Como queremos que el unijuntura se dispare cuando V_p sea igual a 10V, entonces en el estado de bloqueo deberá haber en el cátodo del diodo de la figura 6 una tensión igual a $10 - 0,5 = 9,5V$, si se considera como caída de tensión directa en el diodo de 0,5V, lo que es bastante exacto para este unijuntura.



La otra consideración que debemos hacer es que cuando el unijuntura esté disparado deberá circular una corriente tal por el circuito que permita el disparo del SCR. Esta característica puede ser obtenida si se considera una corriente I_1 mucho mayor que la necesaria para el disparo del mencionado SCR. Decidimos hacer la corriente I_1 15 veces mayor que la corriente I_G deseada. Para asegurar el disparo le enviaremos al "gate" una corriente $I_G = 5 \cdot I_{GT} = 1 \text{ mA}$, lo que implique que $I_1 = 15 \text{ mA}$.

Entonces R_4 es igual a:

$$(I_1 - I_G) \cdot R_4 = 1,2 \text{ V} \Rightarrow R_4 = 82 \Omega$$

Cuando el unijuntura no está disparado circulará una corriente por R_{bb1} y R_4 de:

$$I_{REP} = (V_P - V_D) / (R_{bb1} + R_4) = 1,781 \text{ mA}$$

La tensión en la base 2 será de :

$$V_{b2} = I_{REP} \cdot (R_{bb} + R_4) = 12,61 \text{ V}$$

En el estado no disparado debe cumplirse que:

$$V_{BB} - V_{b2} = R_3 \cdot I_{REP}$$

Y en el estado de disparo debe cumplirse que:

$$V_{BB} = I_1 \cdot (R_3 + R_{bbon} + R_4)$$

Que forman un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, V_{BB} (que es la tensión del zener, D5) y R_3 . Resolviéndolas obtenemos:

$$R_3 = 180 \Omega \quad \text{y} \quad V_{BB} = 13 \text{ V}$$

Calculamos ahora el valor de R_2 según la expresión:

$$R_2 = \frac{(V_{AC} - V_{BB})}{I_1 + I_Z} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R2} = \frac{(V_{AC} - V_{BB})^2}{R_2} = 4,3 \text{ W} \approx 5 \text{ W}$$

Considerando la tensión de entrada como 220V, y en el caso más desfavorable, (lámpara apagada) y con una corriente de mantenimiento de 5 mA. La potencia del diodo zener deberá ser:

$$P_z = V_z \cdot I_{zmax} = 13 \text{ V} \cdot 20 \text{ mA} = 0,25 \text{ W}$$

Cálculo de R_5 , C y R_1

Para calcular R_5 debemos tener en cuenta que el objetivo de la resistencia es limitar la corriente de carga inicial del capacitor que se encuentra descargado al inicio del ciclo, por lo que la constante de tiempo debe de ser mucho menor que el período de la onda rectificada (10 ms). Eligiendo su constante de tiempo 20 veces menor y fijando el valor de C, se tiene:

$$R_1 \cdot C = 10 \text{ ms} / 20 = 0,5 \text{ ms}; \text{ Elegimos } C = 0,1 \mu\text{F} \text{ y } R = 5 \text{ k}\Omega \cong 4,7 \text{ k}\Omega$$

Para calcular R_l tendremos en cuenta que en el caso del capacitor se encuentre descargado al inicio del ciclo (porque apliquemos una V_{REF} de cero voltios), deberá cargarse al valor de $10V$ en un tiempo de $10mS$. Simplificando el cálculo, suponiendo una señal cuadrada en lugar de una senoidal, la amplitud de $V_{ACpico} = 311V$ aplicada a la resistencia R_l , deberá cumplirse:

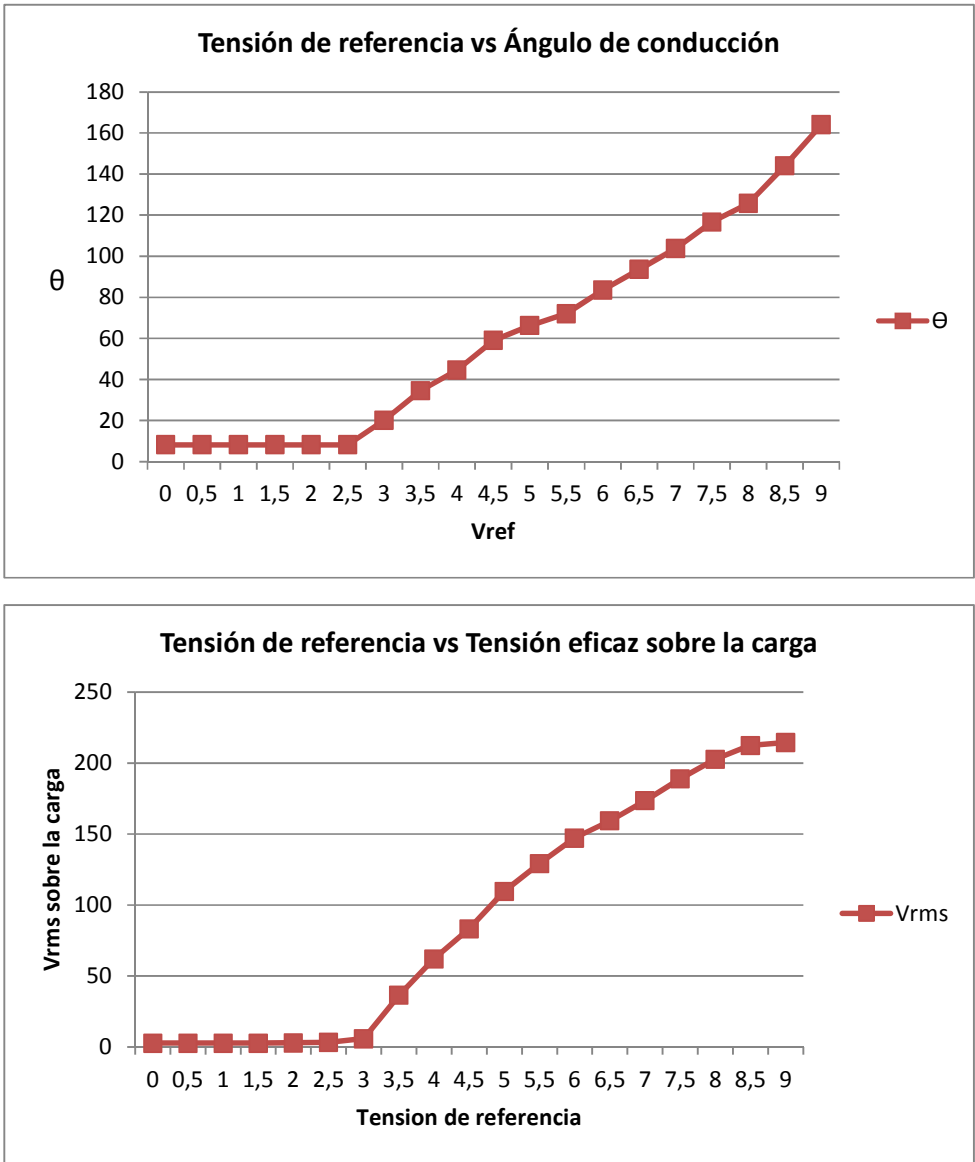
$$R_l \cdot C = (V_{ACpico} / V_{Cmax}) \cdot 10 \text{ mS} \Rightarrow R_l = 3,1 \text{ M}\Omega$$

Análisis y Medición

Luego de la implementación del circuito y comprobar el correcto funcionamiento se procedió a completar la tabla midiendo la tensión de referencia, observan el ángulo de conducción en el osciloscopio y con el voltímetro de verdadero valor eficaz se midió la tensión en la lámpara.

| Vref | Θ | Vrms |
|------|----------|-------|
| 0 | 8,28 | 2,7 |
| 0,5 | 8,28 | 2,7 |
| 1 | 8,28 | 2,7 |
| 1,5 | 8,28 | 2,7 |
| 2 | 8,28 | 2,9 |
| 2,5 | 8,28 | 3,2 |
| 3 | 20,16 | 5,9 |
| 3,5 | 34,56 | 36,5 |
| 4 | 44,64 | 62 |
| 4,5 | 59,04 | 83,2 |
| 5 | 66,26 | 109,7 |
| 5,5 | 72 | 129,1 |
| 6 | 83,52 | 147,1 |
| 6,5 | 93,6 | 159,3 |
| 7 | 103,68 | 173,5 |
| 7,5 | 116,64 | 188,9 |
| 8 | 125,64 | 202,6 |
| 8,5 | 144 | 212,4 |
| 9 | 164 | 214,4 |

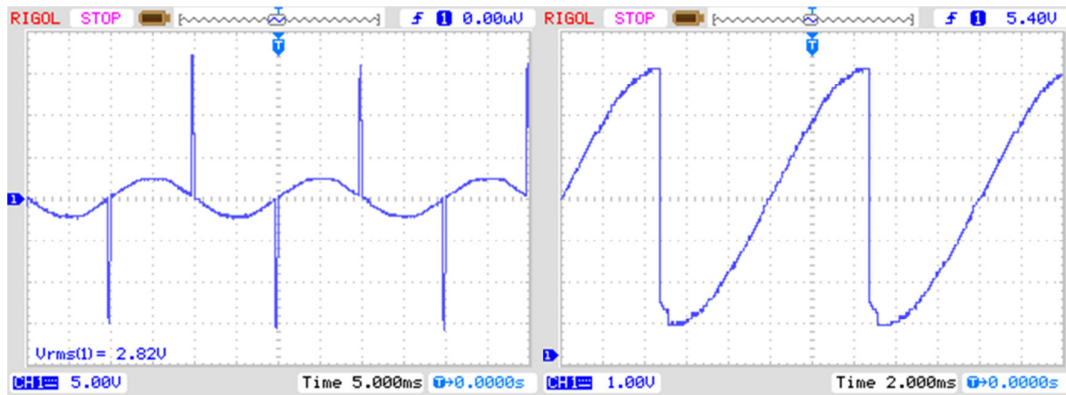
A partir de la tabla, se generan dos gráficos para la mejor visualización de los datos. La tensión de referencia versus el ángulo de conducción y versus el valor de tensión rms en la carga.



En este último grafico se aprecia la linealidad de funcionamiento.

Por otra parte se tomaron capturas de la medición de tensión en el capacitor C_1 y en la carga. La medición se realizó con osciloscopio digital Rigol®.

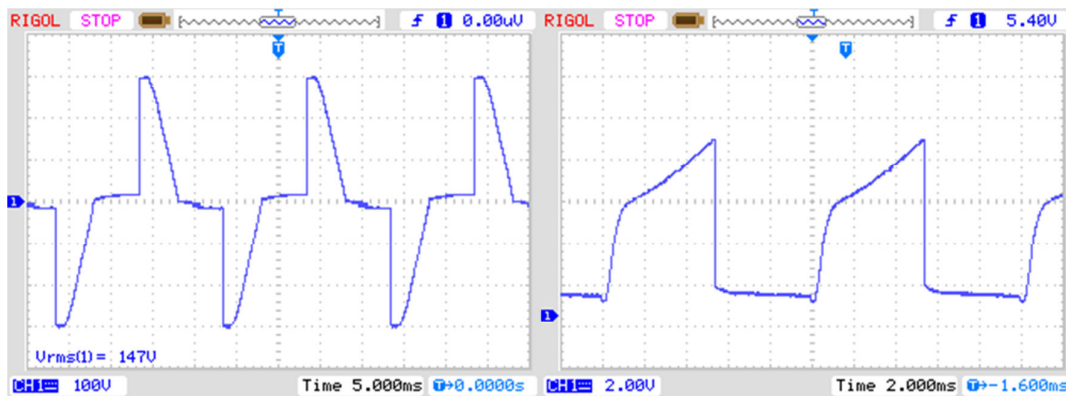
$V_{ref}=0[V]$; $\theta=8,28[^\circ]$



Tensión en la Carga

Tensión en la Capacitor

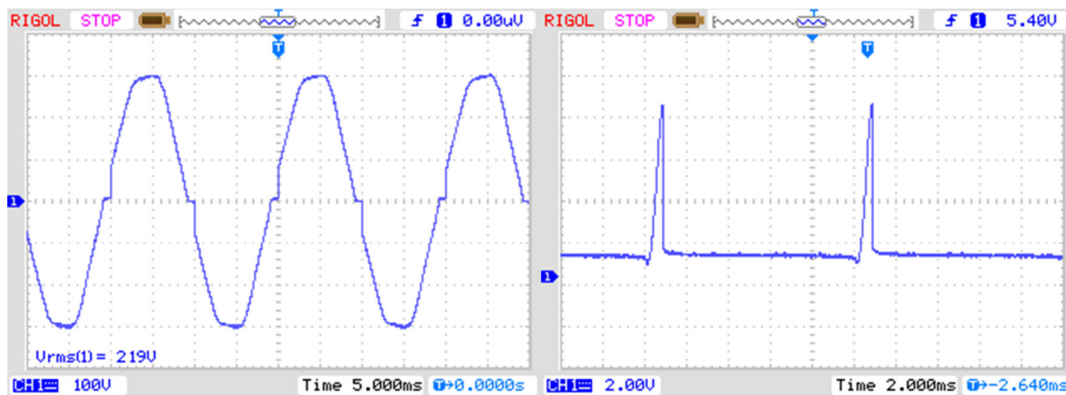
$V_{ref}=6[V]$; $\theta=83,52[^\circ]$



Tensión en la Carga

Tensión en la Capacitor

$V_{ref}=9[V]$; $\theta=164[^\circ]$



Tensión en la Carga

Tensión en la Capacitor

3. Conclusión

El diseño de este circuito se puede emplear para un control preciso de la intensidad lumínica de una lámpara, la temperatura de un soldador, entre otros.

En el circuito diseñado es fundamental una respuesta lineal entre el giro del potenciómetro y la tensión eficaz de salida en la carga.

Para ello se empleó un divisor resistivo entre la tensión del diodo zener (13V) y masa (0V), el cual alimentaba la señal del emisor de tuji; disparándolo. Si bien este circuito es apto, se deben realizar algunos ajustes para conseguir una mayor linealidad.

En la parte superior de la respuesta, se necesitan 10V máximo. Por lo cual se colocó una resistencia extra en serie entre el potenciómetro y la tensión de zener. De acuerdo con los cálculos ésta resistencia es de $2,2k\Omega$.

En la parte inferior, encontramos que alteran la linealidad dos fenómenos. La caída de tensión en conducción del diodo D_5 (0,7V) y la del unijuntura (0,5V). Más allá de éste análisis, si se analiza la curva de respuesta de encendido de la lámpara, veremos que la mayor alinealidad se presenta en ella. Lo cual se manifiesta en la parte plana de los gráficos.