

DISEÑO DIDÁCTICO DE UN RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO

Victor H. Compeán J., Claudio A. Lara R., Gregorio Moctezuma J., Gabriel G. Luna M. y Daniel U. Campos D.

Facultad de Ciencias (UASLP), Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., Méx.

RESUMEN- En este artículo se presenta un diseño didáctico de un rectificador controlado trifásico (convertidor CA/CD). La objetivo principal de este circuito es que el estudiante de ingeniería pueda implementarlo y analizarlo con conocimientos básicos de electrónica, tales como configuraciones de amplificadores operacionales, JFET's, circuitos RC y principios básicos de tiristores, en este caso SCR's ó Rectificadores Controlados de Silicio. Por lo tanto, este circuito es adecuado para realizar prácticas a nivel licenciatura. El circuito completo puede dividirse en 3 etapas: control, aislamiento y potencia. Así, el circuito presenta un aislamiento completo entre la línea trifásica y la etapa de control.

INTRODUCCIÓN:

La electrónica de potencia ha evolucionado dramáticamente en los últimos 20 años. El desarrollo en los elementos semiconductores ha propiciado que se puedan ya realizar conversiones de energía de manera eficiente y a nivel altos de potencia. Todo esto ha ayudado a satisfacer las necesidades crecientes de las aplicaciones industriales. Por todo esto, la electrónica de potencia ya es una materia básica en las carreras con enfoque en la electrónica. Donde los diferentes tipos de conversión de energía CA/CD, CD/CD, CA/CA, CD/CA son analizadas y estudiadas [1], [2].

En el presente artículo se presenta el diseño de un rectificador trifásico controlado por fase (convertidor CA/CD). El circuito consta de tres partes principales: la etapa de control, la etapa de potencia y el acoplamiento entre etapas. Este tipo de convertidores trifásicos son utilizados en la industria para operar en dos cuadrantes, generalmente para el control de motores CD. La motivación para el desarrollo del circuito mostrado fue presentar un diseño que fuera de utilidad didáctica para estudiantes de licenciatura. La partes que integran este circuito son basadas en conocimientos básicos de electrónica. Ahora, el trabajo presentado es el resultado de una extensión de un diseño de un convertidor controlado CA/CD *monofásico*, aplicado como actuador de potencia en un variador de velocidad de un motor CD [4].

El orden de los puntos a tratar en este artículo se detallan. Primero se introducen las características generales del circuito, posteriormente se explicarán a grandes rasgos las partes que conforman la etapa de control, la etapa de potencia, el acoplamiento entre etapas. Después, datos y

gráficas referentes al circuito se presentan en una sección de implementación y resultados; finalmente el artículo se concluye con algunos comentarios finales.

CIRCUITO.

El circuito de potencia de CA/CD consta de 6 rectificadores controlados de silicio (SCR) los cuales tienen que ser activados individualmente con un ángulo de disparo α . Entre los SCR's existe un desfase de $\pi/3$ radianes o 60° (proporcionados por la etapa de control) debido a las características de la alimentación trifásica, como se ve en la Fig. 1.

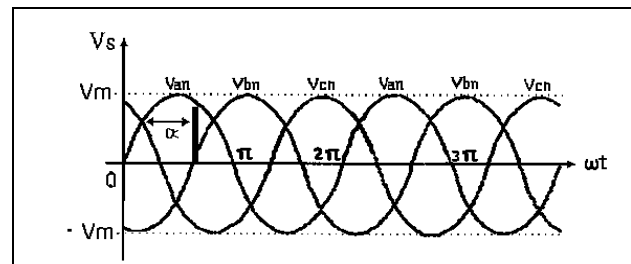


Fig. 1. Ángulo de disparo α encargado de la activación de los SCR's.

Para simplificar la descripción del circuito convertidor CA/CD, este se divide en tres partes generales que serán detalladas a continuación:

- Etapa de control,
- Etapa de acoplamiento,
- Etapa de potencia,
- Red Snubber

A. Etapa de control

En el puente controlado, debido a las propiedades de los elemento de potencia, al variar el ángulo de disparo α de los SCR's, el voltaje promedio de salida V_{cd} también cambiará. Para una carga altamente inductiva, el voltaje promedio de salida esta dado por (1), y para una carga puramente resistiva por (2) [1],[2].

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (1)$$

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos \alpha) \quad (2)$$

donde V_m es el voltaje máximo entre línea y neutro. Es importante recalcar, que para poder disparar de manera correcta los SCR's del puente controlado, la etapa de control debe estar coordinada con los voltajes de línea [2]. Ahora, la parte de control se puede subdividir en:

- I.- Comparador 1.
- II.- Integrador.
- III.- Comparador 2.
- IV.- Generador del pulso de disparo .

Cada una de ellas serán expuestas a continuación.

I.- Comparador 1

Esta etapa pretende ubicar el cruce por cero entre las fases por medio de comparaciones. Para ello se utilizaron tres transformadores de aislamiento, encargados de reducir el voltaje de línea de $120V_{RMS}$ con respecto al neutro, hasta $4.5V_{RMS}$. Así, se pretende hacer una comparación entre dichas señales y generar el pulso de activación correspondiente a cada una de las compuertas de los 6 tiristores como es mostrado en la Fig. 2. Se busca obtener información del estado de los 6 pares de voltajes de línea (V_{ac} , V_{ca} , V_{ab} , V_{ba} , V_{cb} , V_{bc}) y determinar cuando se encuentran en el semiciclo positivo y negativo, ya que esto indica cuando alguno de los tiristores puede ser activado.

II.- Integrador.

La salida de cada uno de los 6 comparadores, la cual es un pulso cuadrado, controla la generación de un voltaje de rampa que son obtenidos a partir de un circuito integrador [3]. La señal de los comparadores actúa como reset del circuito integrador. De manera que cuando un voltaje entre línea y línea es positivo, el voltaje de rampa se activa. El circuito fue implementado con amplificadores operacionales y JFET's, tal y como se muestra en la Fig. 3. Al circuito integrador entra un señal constante de $-5V$ y la constante de integración $1/RC$ fue escogida de manera que durante medio ciclo del voltaje de línea ($8.33ms$) se obtuviera una rampa de voltaje máximo $5V$. Por lo que la salida de este circuito varía entre 0 y $5V$.

III.- Comparador 2

Para lograr activar las compuertas de los SCR's con el ángulo de disparo deseado, se compara la señal de rampa con un voltaje de referencia. La cual esta implementada por un potenciómetro que hará una variación de $0V$ hasta $5V$, ver Fig. 4. Por lo que, la señal de referencia especifica el ángulo de disparo α a través de la relación: $0V \rightarrow 0^\circ$ y $5V \rightarrow 180^\circ$.

IV.- Generación del pulso de disparo.

Finalmente, debe generarse un pulso de disparo para cada SCR, el cual debe tener la amplitud necesaria para una correcta activación. De acuerdo con la Fig. 4, cuando el

nivel de rampa es mayor que el de referencia se genera un pulso negativo que pone en saturación a un JFET de canal n. Esta señal se hace pasar una red RC y así se producirá el pulso de disparo regulado mediante el diodo Zener mostrado en la Fig. 5.

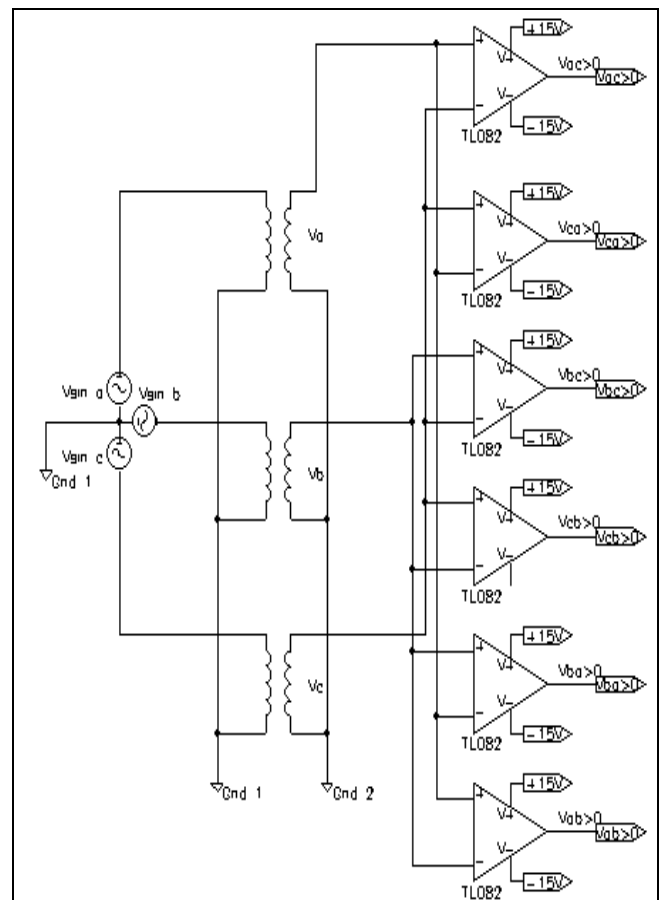
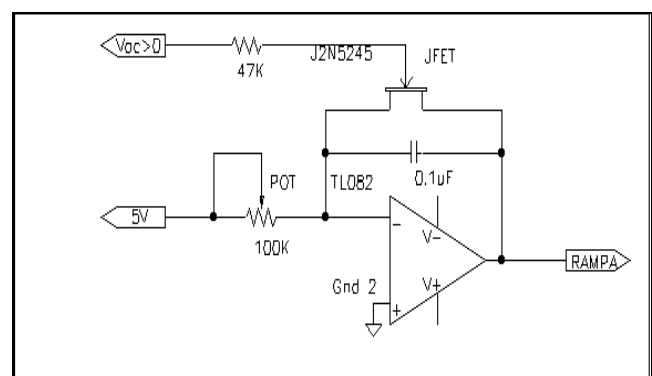


Fig. 2. Comparación entre las señales de alimentación mediante amplificadores operacionales.



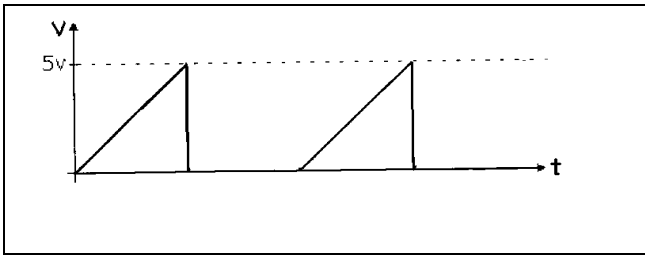


Fig. 3. Circuito generador de rampas.

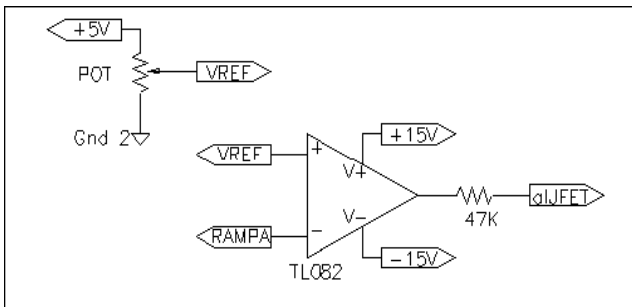


Fig. 4. Variación del ángulo de disparo α mediante un voltaje de referencia.

Esta señal, puesto que es muy débil en corriente, requiere de una etapa de reforzamiento antes de pasar por los optoacopladores. Esto se logra mediante amplificadores operacionales en configuración seguidor de voltaje, ver Fig. 6, el cual nos dará el pulso de activación de las compuertas de los SCR's esperado.

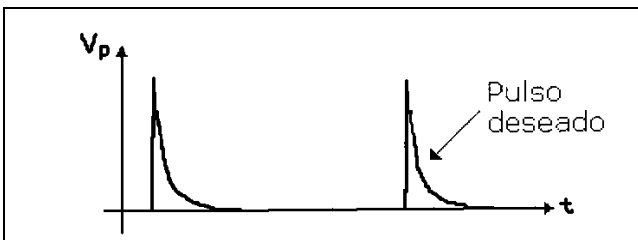
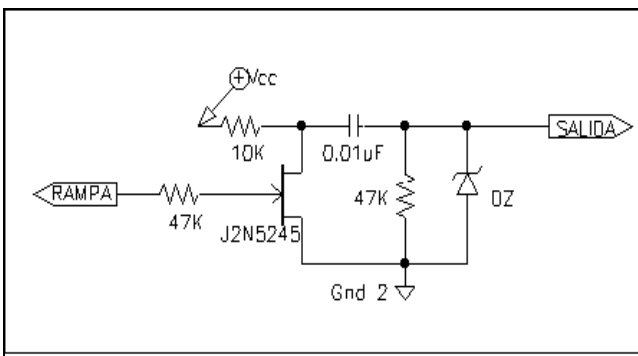


Fig. 5. Señal proveniente del JFET de canal n.

B. Acoplamiento entre etapas.

El acoplamiento entre la etapa de control y la etapa de potencia se realizó mediante el opto-acoplador MOC3011, ver Fig. 7. Esto es para aislar la etapa de control, la cual

trabaja con niveles bajos de voltaje, de la etapa de potencia y así evitar posibles daños en el circuito debido a fallas eléctricas.

C. Etapa de potencia.

La etapa de potencia la conforman 6 SCR's. Cada SCR tiene una red Snubber y un circuito de acoplamiento para la activación de las compuertas, como se muestra en la Fig. 8.

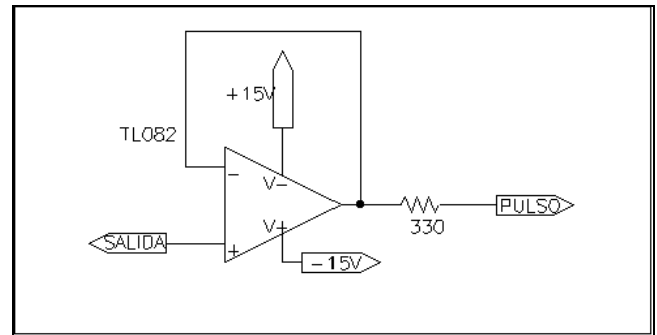


Fig. 6. Etapa de reforzamiento de la señal de salida para lograr activar los SCR's.

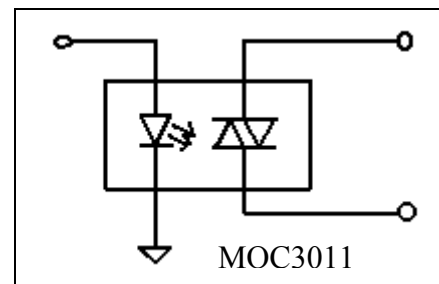


Fig. 7. MOC3011 utilizado para acoplar la etapa de control con la etapa de potencia.

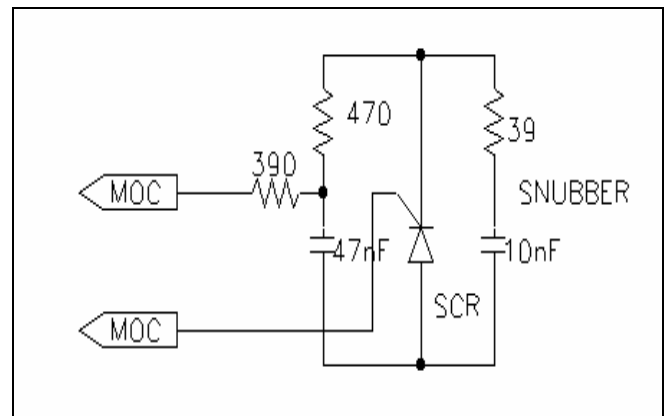
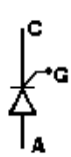


Fig. 8. Red Snubber y circuito de activación de las compuertas.

En éste trabajo, el SCR utilizado fue el S4025L, cuyas características están dadas en la Tabla 1.

TABLA1
Características del SCR S4025L.



It RMS	Vdrn & VRRM	Itsm	Igt	Ih	Vtm	dv dt
A	V	A	mA	mA	V	V/ μ s
MAX	MIN	60Hz	MAX	MAX	MAX	TYP
2	00	350	35	50	1.6	450

S4025L

D. Red Snubber.

La red Snubber es encargada de controlar la tensión en el interruptor durante la activación y desactivación. La red Snubber amortigua las posibles resonancias parásitas y controla la pendiente de la tensión en el semiconductor. Otro punto importante a cuidar es el dv/dt característico de los SCR's. En este caso, para el SCR S4025L, el dv/dt es de $100V/\mu s$. El diseño del arreglo RC de dicha red, se basa en la ecuación (3). A partir de (3), se obtuvieron los valores de 39 ohms y el capacitor de 10 nanofaradios.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.63V_{\text{máximo}}}{RC} \quad (3)$$

En donde $V_{\text{máximo}}$ se refiere al voltaje pico máximo que recibirá el SCR entre cátodo y ánodo que será de 311 volts pico a pico (Vpp) dado por (4).

$$V_{\text{máximo}} = 220\sqrt{2}V_{pp} = 311V_{pp} \quad (4)$$

IMPLEMENTACION Y RESULTADOS.

Ya terminado el circuito se puso a prueba primero en simulación, utilizando Pspice© y enseguida de manera experimental. En esta última etapa, se realizaron prácticas de medición, los resultados se muestran a continuación. Se utilizó una carga puramente resistiva con un valor de 47 ohms. Es importante recalcar que debido al diseño propuesto, el ángulo de disparo α de los SCR's se varía simplemente a través de un potenciómetro con la equivalencia $0V \rightarrow 0^\circ$ y $5V \rightarrow 180^\circ$. La versatilidad del diseño presentado permite, si se desea, controlar el convertidor CA/CD mediante una señal externa de referencia de 0 a 5 V, la cual puede ser generada por un microcontrolador o incluso una tarjeta de adquisición y control en una PC.

En las siguientes tres gráficas (Fig. 9-11), se muestran la señal correspondiente al voltaje de salida en la carga y uno de los 6 pulsos de activación de compuerta de los SCR's. Cabe mencionar que al momento de aumentar el ángulo de disparo (voltaje de referencia), el voltaje promedio en la salida disminuirá y viceversa.

En la Fig. 9 se muestra el voltaje promedio de salida en la carga correspondiente de 101 volts con la resistencia de carga de 47 ohms. La potencia en la carga es de 217 Watts.

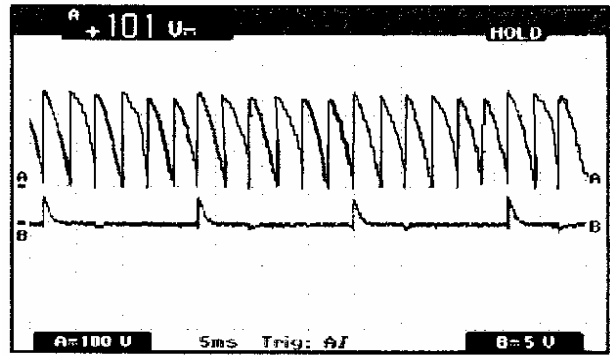


Fig. 9. Señal de salida con una resistencia de carga de 47Ω . ($P_o = 217$ W)

Si se disminuye el ángulo de disparo α , el voltaje promedio aumentará, entonces si el ángulo de disparo α es 0° , el voltaje promedio en la carga será máximo, en este caso 305V, ver Fig. 10.

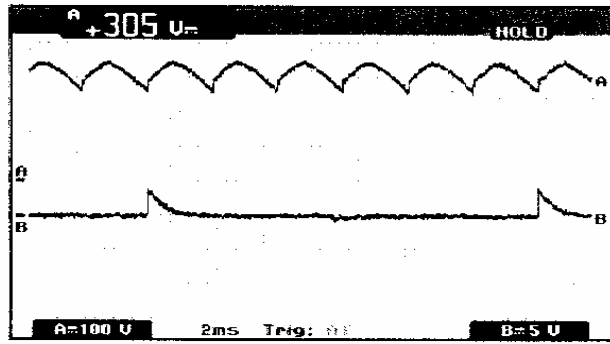


Fig. 10. Voltaje de salida con $\alpha=0^\circ$ ($P_o=1.979kW$).

Cabe recalcar, que el circuito completo, con la carga resistiva de 47 ohms y un voltaje promedio máximo $V_{CD_{\text{max}}}$ de 305 volts, presentó una potencia $P_{O_{\text{max}}}$ en la salida dada por (5):

$$P_{O_{\text{max}}} = \frac{V^2}{R} = \frac{(305V)^2}{47\Omega} = 1.979kW \quad (5)$$

Guiándonos por los pulsos de disparo que se ven en la Fig. 10, y puesto que el periodo de voltaje de alimentación es de 16.67ms (1/60 Hz), en ese periodo deben de formarse 6 pulsos en el voltaje de salida, de ahí proviene el nombre común de rectificador de 6 pulsos.

En la Fig. 11 se muestra la gráfica del voltaje de salida, se observa que el ángulo α es aproximadamente 135° , y su correspondiente voltaje promedio de 25V. Para concluir la sección, se muestra en la Fig. 12 el circuito final de la etapa de potencia. El acoplamiento entre las etapas de control y potencia se muestra en la Fig. 13 y el diseño completo de la etapa de control en la Fig. 14.

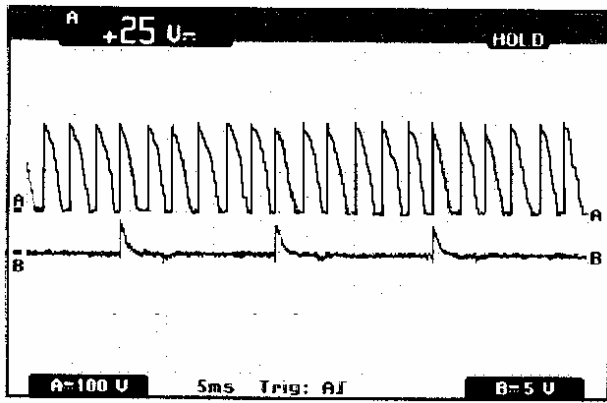


Fig. 11. Muestra de la señal de salida con $\alpha=135^\circ$ ($P_o=13.3W$)

CONCLUSIONES

En este artículo se mostró el diseño de un convertidor controlado trifásico CA/CD. Este diseño se encuentra al alcance de estudiantes de licenciaturas en electrónica pues se basa en conocimiento básicos de configuraciones de amplificadores operacionales, JFET's, circuitos RC y principios básicos de tiristores, Por lo que es apto para realizar prácticas de laboratorio a nivel licenciatura. Este circuito fue implementado de manera práctica y las formas de onda resultantes se mostraron de manera gráfica. Debido a su configuración de control, el voltaje promedio de salida puede ser ajustado de manera manual a través de un potenciómetro o inclusive por medio de una señal de referencia externa. Una de las desventajas de este circuito

puede ser el gran numero de componentes que necesita para su implementación, sin embargo posee la característica de que el disparo de cada SRC's es independiente. Otro método a explorar a futuro, puede explotar la propiedad de que los disparos entre los SCR están desfasados 60° . Así, solo se genera el disparo del primer tiristor y los subsiguientes se obtienen por repetición del mismo, manteniendo 60° de desfaseamiento.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este proyecto se llevo a cabo gracias al apoyo brindado por PROMEP (Proyecto para la generación y aplicación del conocimiento Abril '02-Abril '03).

REFERENCIAS

- [1] H. Rashid, Muhammad. "Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones", 2ª ed., 1995, Prentice Hall.. pp. 37-187.
- [2] J.M. Benavent García, A. Abellán G., E. Figueres A. "Electrónica de Potencia, teoría y aplicaciones", 1ª ed. 2000, Alfaomega.
- [3] R.F. Coughlin, F.F. Driscoll, "Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales", 4ª ed., 1993, Prentice Hall.
- [4] G. Gallegos Garrido. "Diseño de un Convertidor CA/CD para el control de velocidad de un motor CD", Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UASLP, Septiembre 2002.

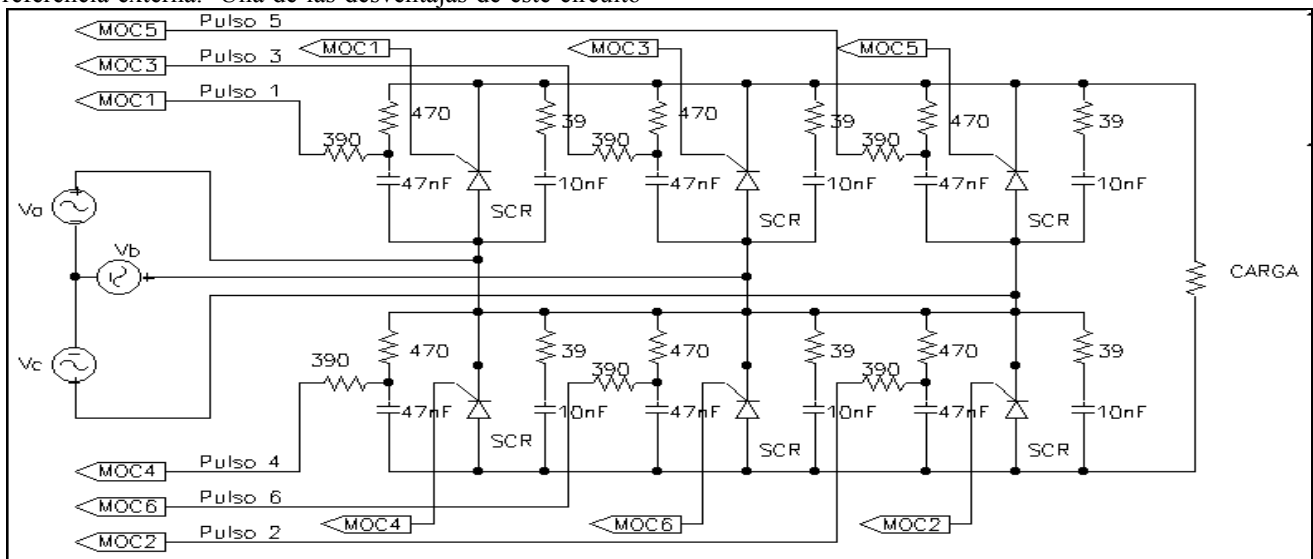


Fig. 12. Etapa de potencia.

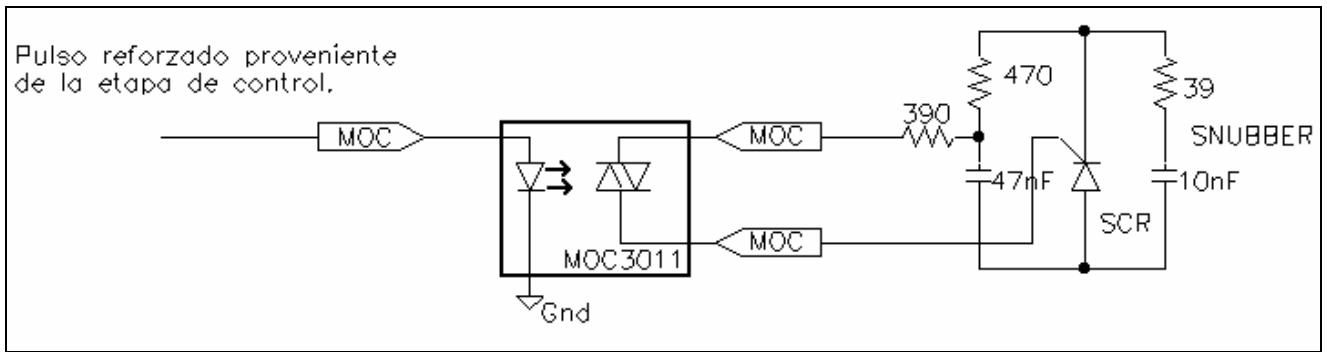


Fig. 13. Arreglo encargado de acoplar la etapa de potencia con la etapa de control.

