

Convertidor semi controlado CA-CD

F. Candia^{1*}, J. Contreras², C. Robles², J.L. Arizpe³, M. de Gante⁴

¹Facultad de Ingeniería BUAP, Blvd. Valsequillo s/n, edif. ING-4. Col. San Manuel, C.P. 72570. Puebla, Pue.

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 21 sur 1103 Barrio Santiago C.P. 72410, Puebla Méx.

³Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Av. Universidad s/n. C.P. 66451. San Nicolás de los Garza, N.L.

⁴Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP, Blvd. Valsequillo s/n, edif. ING-4. Col. San Manuel, C.P. 72570. Puebla, Pue.

*filinc@hotmail.com

Área de participación: Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Resumen

La asignatura de electrónica de potencia representa un ambiente interactivo de enseñanza-aprendizaje, que permite a los estudiantes estar presentes en una zona de desarrollo próximo (ZDP) y dispuestos a la asimilación de nuevos conocimientos. Como una ZDP requiere que se establezcan estrategias didácticas que promuevan: el aprendizaje situado realizando prácticas de laboratorio; las comunidades de aprendizaje, fomentando el aprendizaje autónomo y colaborativo; el aprendizaje por imitación mediante el manejo de la instrumentación y la adquisición del conocimiento teórico mediante sesiones presenciales. Es de alto interés por los autores que en este trabajo a través del desarrollo de una fuente de CA-CC semicontrolada, se organice el conocimiento y la documentación necesaria para generar una ZDP, y que mediante la estrategia de la práctica de laboratorio sea posible reproducirla a nivel de licenciatura. Para ello se explica la experiencia por medio de la descripción del proceso de transferencia del conocimiento teórico al pragmático, de manera que sea posible conceptualizar por medio de un control de cruce por cero la manipulación de un motor de CD utilizando un convertidor CA-CD, experimentación que involucra elementos, funcionamiento y aplicación de la electrónica de potencia que ambienta una ZDP transferible al grado de licenciatura, a favor del proceso enseñanza-aprendizaje de la tecnología eléctrica-electrónica en las instituciones de educación superior.

Palabras clave: SCR, Cruce por cero, Control, Motor.

Abstract

The subject of power electronics represents an interactive teaching-learning environment, allows students to be in a zone of proximal development (ZDP) and willing to assimilate new knowledge. ZDP requires the establishment of teaching strategies that promote: the type of laboratory that performs laboratory practices; the learning communities autonomous and collaborative learning; learning by imitation by managing the instrumentation and the acquisition of theoretical knowledge through face-to-face sessions. It is of high interest for the authors that in this work through the development of a semicontrolled CA-CC source, Organize the knowledge and documentation necessary to generate a ZPD, and that through the strategy of the laboratory practice it is possible to reprocess it at the level of the undergraduate students. To this end, the experience is made explicit through the description of the process of transfer from theoretical to pragmatic knowledge, so that it is possible to conceptualize by means of a zero crossing control the manipulation of a CD motor using a CA-CD converter, experimentation that involves elements operation and application of the power electronics that sets a ZDP transferable to a undergraduate students, in favor of the teaching-learning process of electrical-electronic technology in higher education institutions.

Key words: SCR, Zero, Control, Motor.

Introducción

Benavente comenta que actualmente, la Electrónica de Potencia (EP) dedicada al estudio de los conversores electrónicos, es una de las especialidades electrónicas de mayor auge y dinamismo. Constantemente están desarrollándose nuevas topologías y métodos de control para los conversores electrónicos mejorando sus

prestaciones [1]. Este documento aporta elementos didácticos que permiten reducir la problemática que representa el aprendizaje de las fuentes de potencia no controladas, semi-controlados y controladas en las Instituciones de Educación Superior de nivel licenciatura, que cuentan con la infraestructura mínima requerida (osciloscopios, multímetros, fuentes de voltaje, microcontroladores, motores de CC y CA, entre otros) para llevar a cabo la experimentación sobre el tema de convertidores CA-CC / CC-CC / CC-CA. Se coincide con autores como García, et al (1996) y Susin, et al (1999) consideran que la enseñanza de la Electrónica de Potencia se ve mejorada con las prácticas de laboratorio, es por esto que se debe impulsar el desarrollo y la implementación de equipamiento para estas prácticas, por parte de las universidades, debido al alto costo de equipos comerciales), citado en [2].

Al iniciar el estudio de los convertidores CA-CC semicontrolados, se ha identificado en los trabajos de Acosta y Espinoza [3] que se requieren tres características para diseñar un convertidor CA-CD de calidad:

1. Que produzca a su salida una tensión continua con un contenido mínimo de armónicos, para contar con una operación y funcionamiento digital.
2. Que no distorsione las corrientes de entrada (debe mantenerlas tan sinusoidales como sea posible para no afectar a otros dispositivos conectados a la red) y así mantener estable el disparo de los SCR en función del tiempo y del cruce por cero.
3. Que no desfase tensión y corriente de entrada, es decir, que su factor de potencia sea cercano a la unidad, de esa manera el ángulo de disparo será preciso de acuerdo con lo calculado.

Lo anterior se debe a que, en estos convertidores el instante en el cual un tiristor empieza a o deja de conducir depende de las formas de ondas de voltaje CA de línea de frecuencia y las entradas de control. Además, la transferencia o conmutación de corriente de un dispositivo al siguiente ocurre en forma natural debido a la presencia de estos voltajes de CA como se muestra en la figura 1 [4].

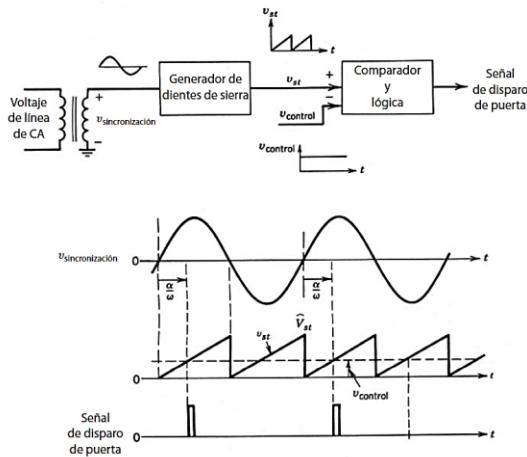


Figura 1.- Circuito de control de disparo de puerta, tomado de [4].

El objetivo de este desarrollo tecnológico es implementar un sistema de control para una fuente semi controlada que permita manipular la intensidad de la corriente directa -consumida por una carga- a partir de un circuito de cruce por cero. El aporte principal de este trabajo es la documentación a detalle de la experimentación y programación del circuito de control y de potencia, para en un trabajo futuro desarrollar un manual de prácticas que permita incorporar la electrónica de potencia en los programas de estudio de ingeniería a nivel licenciatura. El trabajo describe los elementos involucrados en el proceso de la experimentación desde el concepto teórico, el proceso de la simulación y la construcción del circuito. Asimismo, los retos que representa el transitar de un conocimiento teórico a un conocimiento pragmático. Se adelanta a la conclusión la necesidad de implementar una mayor dedicación y profundidad en el tema desde el nivel educativo de licenciatura por ser una aplicación vanguardista de elevadas prestaciones en control de potencia [1] para los desarrollos de generación, transmisión y distribución y uso de la energía eléctrica.

En el desarrollo del trabajo realizado se describen los elementos involucrados en la simulación-experimentación del control de un motor de CD utilizando un convertidor CA-CD semi controlado. Asimismo, es importante el uso del software PSIM, el cual es un desarrollo informático de alto nivel de marca registrada, que permite la simulación de dispositivos y circuitos electrónicos. Su principal ventaja radica en la intuición con la cual se desarrollan los

circuitos electrónicos y su interface gráfica que facilita el análisis conceptual de las variables involucradas mediante sus avanzados componentes virtuales de medición [5].

Para realizar la simulación-experimentación se requiere de la selección de la fuente de alimentación, la cual depende de la carga (motor de 1 HP de 110 VCD). Las alternativas son fuente monofásica o fuente trifásica regulable. Siendo la mejor opción para este trabajo la fuente de CA monofásica, que permite simplificar el circuito de control.

Tabla 1. Parámetros fuente la monofásica.

Amplitud	120 VCA
Frecuencia	60 Hz
Ángulo de fase	0°

La resistencia y la inductancia en serie representan la impedancia de la fuente. Cuando son iguales a cero y entonces la fuente se considera ideal. La ecuación (1) define el voltaje de una fuente sinusoidal. Una fuente sinusoidal ideal es definida como la mostrada en la figura 2.

$$V_o = V_m * \sin\left(\frac{2\pi ft + \theta}{180}\right) + V_{offset} \quad (1)$$

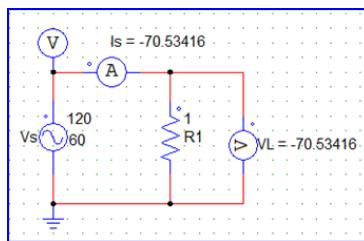


Figura 2.- Valores de una fuente monofásica de CA, para un tiempo igual a 0.01.

Circuito detector de cruce por cero

La transmisión de señales digitales en la corriente alterna, no es posible sin la asistencia de un detector de cruce por cero. Éstos, son circuitos eléctricos (ver figura 3) que detectan cuando la corriente alcanza el punto de cruce por cero de la onda. En una gráfica de ondas, el cruce por cero es la línea recta que bisecta la onda (ver figura 16). En electrónica, el cruce por cero identifica donde la función de onda cambia de positivo a negativo o viceversa.

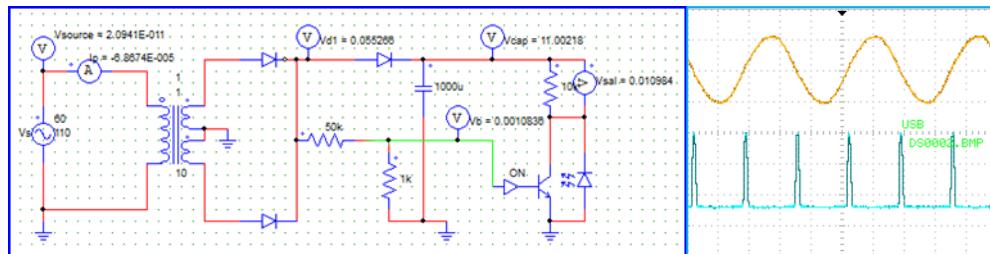


Figura 3.- Circuito detector de cruce por cero con transistor.

Los amplificadores operacionales (ver figura 4) son ampliamente usados para realizar la detección de cruce por cero mediante circuitos análogos. Los chips dedicados exclusivamente como detectores de cruce por cero como el H11AA1 proporcionan una mejor facilidad de uso para los circuitos digitales.

Cruce por cero con amplificador operacional

La mayoría de los circuitos electrónicos de CA operan con doble polaridad, por lo tanto, el detector de cruce por cero mide cuando se produce el cambio de polaridad. El detector de cruce por cero es parte del circuito de detección por nivel para determinar si se ha recibido un uno o un cero. En ocasiones un amplificador operacional [6] puede ser utilizado para determinar cuál de dos señales en sus entradas es mayor (figura 4). Basta con que una de estas señales sea ligeramente mayor para que cause que la salida del amplificador operacional sea

máxima, ya sea positiva ($+V_{sat}$) o negativa ($-V_{sat}$). Esto se debe a que el operacional se utiliza en lazo abierto (tiene ganancia máxima). La ganancia real de un amplificador operacional es de 200,000 o más y la fórmula de la señal de salida está dada por la ecuación 3.

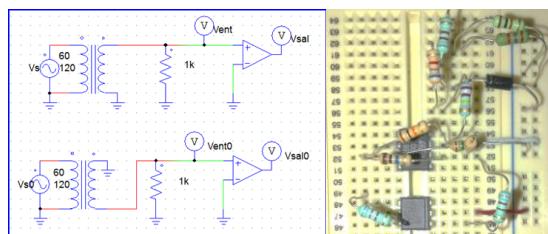


Figura 4.- Circuito detector de cruce por cero con OPAM no inversor.

$$V_{out} = A_{ol} (V_1 - V_2) \quad (3)$$

Dónde:

V_{out} = tensión de salida

A_{ol} = ganancia de amplificador operacional en lazo abierto (200,000 o más)

V_1 y V_2 = tensiones de entrada (las que se comparan).

Cruce por cero con H11AA1

El circuito integrado H11AA1 [7], [8] es un optoacoplador bidireccional, compuesto por dos LED de GaAr junto con un fototransistor NPN en un único integrado DIP de 6 pines. Cuando cualquiera de los dos LED emite luz, el fototransistor está en conducción, únicamente estará en corte cuando ambos LED estén apagados. Por tanto, el optoacoplador H11AA1 permite conectar una corriente alterna en el circuito primario y el circuito secundario se comportará como un interruptor cerrado excepto cuando la tensión en el primario inferior a una tensión próxima a 0V, que se comportará como interruptor abierto. Combinado con el H11AA1 con una resistencia Pull-Up se puede generar un pulso cuando la tensión del primario sea cercana a 0V lo que permite, entre otras cosas, detectar cuando una tensión alterna pasa del semiperíodo negativo al positivo. El esquema de montaje es muy sencillo. Por un lado, se conecta la señal en la que se quieren detectar los pasos de cruce por cero a las terminales de A/C, que controlan el encendido de los LED del optoacoplador. Se debe añadir en serie resistencias que limiten la corriente que atraviesa por los LED. Asimismo, se debe ajustar el valor de estas resistencias a la tensión empleada, para una tensión de 110 VCA se puede usar una resistencia entre 22K-47K ohms (figura 5).

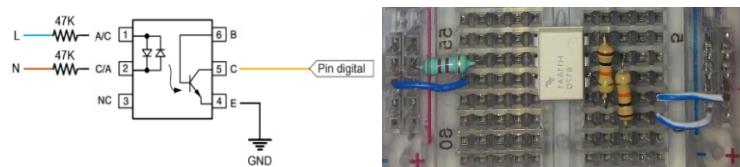


Figura 5.- Conexión del H11AA1, hacia el Arduino.

La figura 6, muestra el resultado de la implementación de cruce por cero por ambas alternativas Opam y Optoacoplador H11AA1. Mostrando gran diferencia entre las señales a tratar por el Arduino, dejando claro que es necesario que el código de programación sea diferente, para lograr las adecuadas señales de disparo hacia los SCR's.

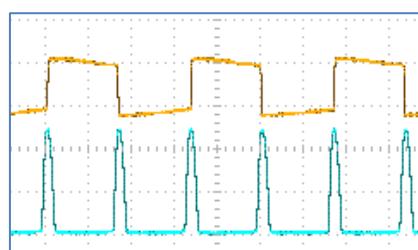


Figura 6.- Gráficas de cruce por cero; a) Opam (amarilla) y b) H11AA1 (azul).

Disparo de un SCR

Un tiristor SCR es un dispositivo semiconductor con cuatro capas de estructura pnpn con tres uniones pn [1], [4]. Al igual que los diodos, los tiristores tienen terminales ánodo y cátodo, sin embargo, estos últimos integran una tercera terminal, denominada compuerta, la cual es utilizada para controlar la operación del dispositivo (figura 7).

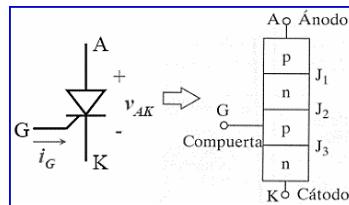


Figura 7.- Símbolo del SCR.

Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, las uniones J1 y J3 tienen polarización directa o positiva. La unión J2 tiene polarización inversa, y solo fluirá una pequeña corriente de fuga del ánodo al cátodo. Se dice entonces que el tiristor está en condición de bloqueo directo o en estado apagado y la corriente de fuga se llama corriente en estado apagado. La resistencia dinámica en estado de bloqueo es de $100\text{k}\Omega$ o más. El principal inconveniente al trabajar con ellos es que una vez que el SCR es activado, se comporta como un diodo en conducción y no hay control sobre el dispositivo hasta el apagado.

Activación y apagado del tiristor

Un SCR se puede encender aumentando el voltaje VAK en sentido directo a más de VBO, pero esta forma de encendido podría ser destructivo. En la práctica, el método más común para disparar un tiristor es la aplicación de una corriente de compuerta aplicando un voltaje positivo entre las terminales de la compuerta y el cátodo como se muestra en la figura 8. Este circuito aprovecha el control de cruce por cero y el ángulo de desfase de la onda senoidal de referencia.

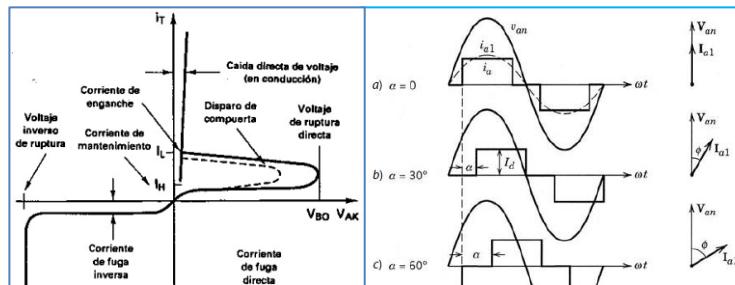


Figura 8.- Gráficas de activación y disparo de un SCR, tomada de [4].

Aplicaciones de los tiristores SCR

Los tiristores SCR suelen funcionar a la frecuencia de línea (60 Hz para México). El voltaje en estado de encendido varía normalmente desde unos 1.15 Volts para aplicaciones a 600 Volts hasta 2.5 Volts para dispositivos de 4000 Volts. En años recientes han sido diseñados tiristores SCR para controlar potencias tan altas de hasta 10 MWatts y con valores individuales tan altos como de 5500 amperes a 1200 Volts [9].

Desarrollo

Una de las aplicaciones más importantes de los convertidores CA-CC se encuentra en la variación de la velocidad de los motores de CD. Por este motivo, es necesario regular el voltaje en CD, el cual puede ser controlado por medio de un cruce por cero y un programa en Arduino, para esto es necesaria la implementación de los rectificadores semicontrolados descritos anteriormente. Los rectificadores semicontrolados, al tener un sólo cuadrante activo, tienen una misma polaridad de voltaje y corriente de salida, emplean en sus configuraciones ramas rectificadoras, cada una de ellas con un diodo y un tiristor. Dichos convertidores no necesitarán, por lo tanto, un doble encendido en los tiristores, como ocurre en los rectificadores controlados.

¿Cómo usar un optoacoplador con Arduino?

En esta sección se trabajó con los optoacopladores con fototransistor (normal, o Darlington) y fotodiodo más transistor. En este tipo de optoacopladores el secundario se comporta de forma similar a un interruptor, controlado por el circuito primario. Se quiere transmitir una señal optoacoplada, es decir, que Arduino forme parte del circuito primario, la conexión es sencilla. Por lo tanto, el valor de la resistencia variará en función de la corriente nominal (forward current) del diodo del optoacoplador, de su caída de tensión y de la tensión de alimentación, pero es razonable un rango de 220-500 Ohm. El secundario se comporta como un interruptor. Si únicamente queremos accionar una carga, simplemente contemos una de las fases para que el optoacoplador controle la carga. Si queremos una salida digital (LOW o HIGH), deberemos usar una resistencia de Pull-Up o Pull-Down, respectivamente.

Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing [10]. Si lo que se quiere es que Arduino reciba una señal optoacoplada emitida desde otro dispositivo, simplemente se tiene que realizar la lectura del secundario como si fuera un pulsador. Al emplear las resistencias de Pull-Up internas de Arduino, no es necesario añadir ningún componente adicional. Si alimentas desde Arduino y, dado que la tensión de ruptura en muchos optoacopladores es de 6VCD, en general, no será necesario este diodo porque el optoacoplador está protegido incluso aunque accidentalmente se pongan los cables invertidos.

Simulación del control de un motor de CD

Para comprobar la utilización de los convertidores semicontrolados en la manipulación de un motor de CD se realizó la simulación en el software PSIM. Se implementó el sistema de gobierno de los tiristores adecuado para realizar el control manual por medio del ángulo de disparo α . A la salida del circuito se agregó un encoder para la medición de las RPM, así como una carga, aplicada directamente al motor, el cual tiene las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 3 y figura 9.

Tabla 3. Valores nominales del motor.

Parámetro	Valor
R _a (armadura)	0.5 Ω
L _a (armadura)	0.01 H
R _f (field)	75 Ω
L _f (field)	0.02 H
Momento de inercia	0.3

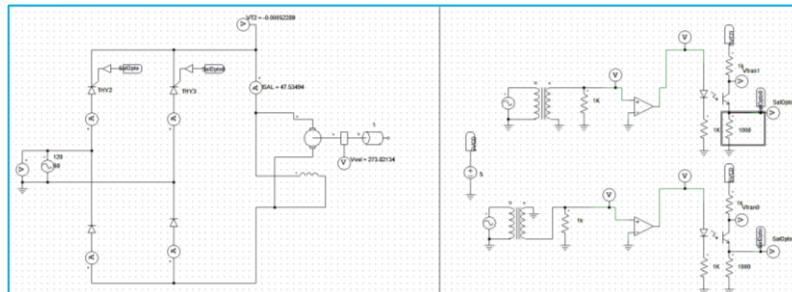


Figura 9.- simulación en PSIM del control del motor de CC.

En la primera prueba que se realizó no se agregó ningún tipo de carga, cabe mencionar que el ángulo de disparo afecta directamente al número de RPM y las pruebas realizadas fueron con un $\alpha=60^\circ$.

Resultados y discusión

La información revisada para la implementación del circuito de convertidor CA-CD semicontrolado ha sido utilizada para desarrollar un circuito de prueba. Por tanto, se ha implementado un convertidor semi controlado de dos SCR y dos diodos para una carga resistiva (foco incandescente de 100 watts). El primer problema identificado fue que el Duty Cycle, no alcanza la variación del 100%, quedando en un aproximado 20%, variación mostrada en la figura 10.



Figura 10. Cruce por cero con OPAM's, que solo alcanza un aproximado 20% de variación.



Figura 11. Montaje de las ondas de salida de la señal de disparo y de la salida de los SCR's.

Un segundo problema fue que, aunque existe una señal de cruce por cero, al conectar la carga esta se queda estacionaria (sin regulación de encendido-apagado) puesto que solo actúa un disparo (figura 11). Lo que ocasiona que un pulso se mantenga en alto siempre. Considerando que los disparos dependen de la señal generada por los OPAMs y son la señal de entrada del Arduino y posteriormente, este alimenta de nuevo al optoacoplador 4N25, se identificó la ausencia de este disparo en condiciones de carga. Esta situación influyó lo suficiente para utilizar el optoacoplador H11AA1, debido a que su conexión física es más simple que la conexión del OPAM (ver figuras 5 y 6). Para la superposición de las ondas de disparo y salida de la potencia se utilizaron puntas diferenciales, que permiten la medición en paralelo de ambas señales. A través de estas fue posible observar que solo existía un disparo, llegando a la conclusión que ambas señales tienen el mismo ángulo de disparo. Relación que se puede observar en la figura 11. Al utilizar el optoacoplador H11AA1, se mejoró considerablemente el cruce por cero mostrado en las figuras 12, 13 y 14. Donde se muestra que conforme se varía el potenciómetro se modifica el Duty Cycle.

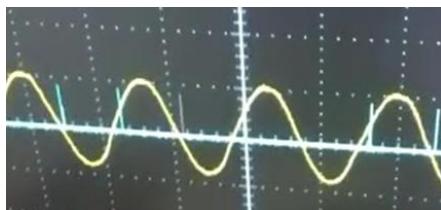


Figura 12. Duty Cycle ajustado al 0% aproximadamente.



Figura 13. Duty Cycle ajustado al 50% aproximadamente.

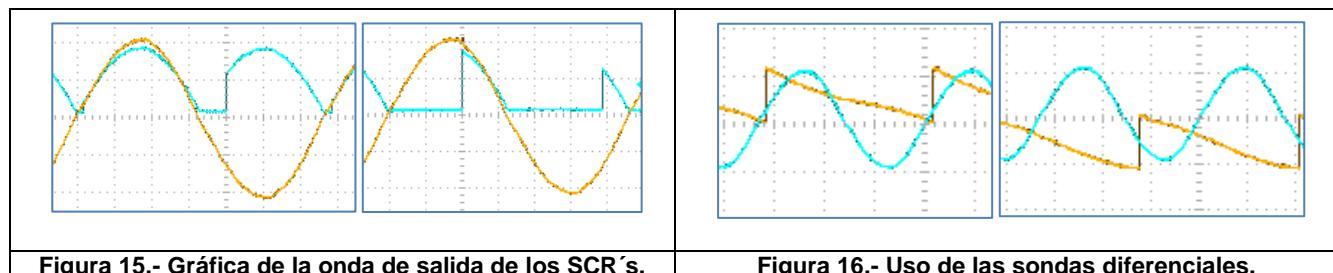


Figura 14. Duty Cycle ajustado al 90% aproximadamente.

Con la modificación del método de cruce por cero, ha sido posible que se tengan dos ángulos de disparo diferentes, logrando que se modifiquen las señales de salida de los SCR's. Como parte de la experimentación, se modificó el circuito de cruce por cero con OPAM's, que en realidad funciona mediante un transformador de 10:1, con el cual podemos reducir el voltaje de la fuente monofásica de 169.7 V a 16.97 V. Enseguida se diseñó el circuito comparador de voltajes, con amplificadores operacionales con voltaje de referencia 0 V y con alimentación de 5 V, para que cuando se sature nos muestre una forma de onda similar a la de la figura 15 y 16.

Una vez que fue establecido el funcionamiento de la fuente semicontrolada, se concluye que, para establecer un ángulo de disparo, es necesario utilizar una resolución de 10 bits provista por el microcontrolador programado, para ello al obtener valores de 0–1023 es posible identificar con precisión el momento exacto para realizar las interrupciones y por ende los retrasos del disparo de la compuerta. Para ello se hace uso de un potenciómetro de 10k ohms. Siendo el tiempo de un ciclo completo en una frecuencia de 60 Hz el periodo es igual a 16.667 milisegundos en un total de 180 grados, por lo que para nuestra consideración el ángulo de 90° se alcanzó en 8.333 milisegundos, al tener dos SCR's es posible realizar la rectificación en ambos semiciclos (positivo y negativo) obviamente identificando correctamente el cruce por cero y en función del tiempo controlar cada uno de ellos (figura 17).

Después de obtener la señal de cruce por cero, esta fue utilizada como entrada del microcontrolador (Arduino UNO) como señal digital, ya que se trata de un tren de pulsos y por medio de la función de interrupciones *falling* y *rising*, el microcontrolador es capaz de distinguir cuando es el cambio de semi ciclo y poder así saturar la compuerta del SCR, todo eso dependía de la consigna que se puede variar a través de un potenciómetro y por programación del mismo Microcontrolador. En la figura 18, se pueden apreciar los ángulos de disparo de las compuertas de los SCR (amarillo) y en azul el resultado de la señal de CC que llegará a la carga resistiva, coincidiendo con el comportamiento reportado por Álvarez [11] y por Compean [12].



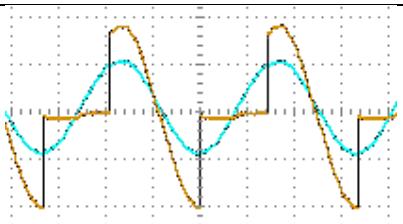


Figura 17.- Regulación por SCR semicírculo negativo y positivo.

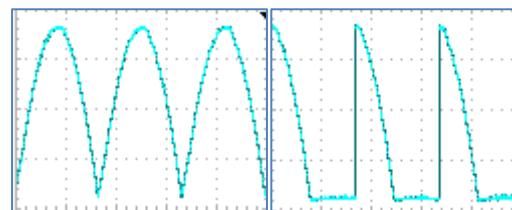


Figura 18.- Forma de onda final en la carga, con 0% y 50% de ajuste del potenciómetro.

Trabajo a futuro

Como trabajo futuro se encuentra el desarrollo de un manual de prácticas, para reducir el tiempo de enseñanza-aprendizaje de fuentes de CA-CD semicontroladas en sustitución de las fuentes de CA-CC convencionales no controladas. Asimismo, se proyecta su aplicación en microredes de distribución eléctrica en viviendas urbanas marginadas sin servicios públicos.

Conclusiones

El objetivo se ha cumplido de manera satisfactoria y actualmente se cuenta con la información suficiente para documentar un procedimiento que permita reproducir la experimentación de una fuente de CA-CC semicontrolada con alta la repetibilidad de los resultados deseables y esperados. Con esta información se ha iniciado el manual de prácticas de electrónica de potencia que sea posible reproducir en el nivel de licenciatura los principios de la electrónica de potencia y se incremente su enseñanza y aprendizaje, en los estudios de posgrado. En cuanto a la aportación de este trabajo se encuentra la comparativa realizada en la detección de cruce por cero y la determinación con mayor precisión sobre el programa de Arduino, para la generación de las señales de disparo a los SCR's.

Referencias

- [1] G. J. Benavente, G. A. Abellán y A. E. Figueres, Electrónica de Potencia. Alfaomega, 2000.
- [2] R. F. Gastón y M. G. Luciano, «IMPLEMENTACIÓN DE UN RECTIFICADOR CONTROLADO CON FINES DIDÁCTICOS,» de XXIIº Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, 2010.
- [3] G. D. A. Acosta y V. V. A. Espinosa, «Simulación en PSIM de convertidores CA-CD controlados,» Pistas Educativas, pp. 176-206, 2015.
- [4] N. Mohan, T. Undeland y W. Robbins, Electronica de potencia, México D.F.: Mc Graw Hill, 2009.
- [5] POWER SIM, «<https://powersimtech.com>,» 2018. [En línea]. Available: <https://powersimtech.com/products/psim/>. [Último acceso: 30 06 2018].
- [6] National semiconductor, «www.utm.edu,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.utm.edu/staff/leeb/LM301.pdf>. [Último acceso: 30 06 2018].
- [7] L. Llamas, «www.luisllamas.es,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-cruce-por-cero-h11aa1/>. [Último acceso: 30 06 2018].
- [8] Fairchild, «[Alldatasheet.com](https://www.alldatasheet.com),» 2018. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/52722/FAIRCHILD/H11AA1/405/1/H11AA1.html>. [Último acceso: 30 06 2018].
- [9] ON SEMICONDUCTOR, «<http://pdf.datasheetcatalog.com>,» 2018. [En línea]. Available: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet2/7/0yx8zar9lzcry267dt1e591p4cy.pdf>. [Último acceso: 30 06 2018].
- [10] P. Scherz y S. Monk, Practical Electronics for Inventors, Mc Graw Hill, 2013.
- [11] A. F. Alvarez, Estudio e implementación de un convertidor de AC/DC para el control de un motor de continua del laboratorio, Coruña: Universidade da Coruña, 2016. 06 2018].
- [12] V. Compean, C. Lara, G. Moctezuma, G. Luna y D. Campos, «[Researchgate.net](https://www.researchgate.net),» 2000. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Victor_Compean_Jasso/publication/242617328_DISEÑO_DIDACTICO_DE_UN_RECTIFICADOR_CONTROLADO_TRIFASICO/links/58f7c1c9a6fdcc86f8122fb6/DISEÑO-DIDACTICO-DE-UN-RECTIFICADOR-CONTROLADO-TRIFASICO.pdf. [Último acceso: 30 06 2018].