

CONTROL DE DISPARO DE UN MOSFET, PARA EL MANEJO DE UN BUCK CONVERTER.

Filiberto Candia García¹
Jorge Luis Arizpe Islas²
Cristian Eliud Robles Ginez³

RESUMEN

En el marco de los convertidores de CD-CD, este trabajo presenta la construcción de un circuito de manejo de compuerta de bajo costo y de propósitos generales para dispositivos electrónicos de potencia de compuerta aislada, tales como un MOSFET, utilizado para el control de un Buck Converter. El documento ilustra la construcción de dicho circuito de manejo, se presentan los resultados y formas de onda de las pruebas realizadas por medio de un control por Arduino. Se utiliza como complemento del driver de la compuerta el circuito integrado IR2111 y un inductor de 3.9 mH en serie con una resistencia de potencia de 15 Watts como carga del circuito. La experimentación y construcción de un Buck Converter permitió una mejor comprensión de las ventajas de utilizar fuentes de CD-CD en aplicaciones de energías alternativas y sistemas automotrices, aplicaciones de alta demanda de dispositivos de electrónica de potencia.

Palabras Clave: Circuito de disparo, MOSFET, Buck Converter.

Fecha de recepción: 25 de septiembre, 2017.

Fecha de aceptación: 10 de abril, 2018.

¹ Doctor en Educación, Profesor-Investigador de la Universidad Tecnológica de Puebla-UADI, filinc@hotmail.com.

² Maestro en Ciencias con Especialidad en Potencia Eléctrica, Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, jorge.arizpei@uanl.mx.

³ Estudiante del Doctorado en Mecatrónica, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

INTRODUCCIÓN

Este documento es un estudio que representa el aprendizaje de las fuentes de potencia no controladas, semi-controlados y controladas, puesto que en la electrónica de potencia ocupan una importante posición en el estudio y desarrollo de los convertidores DC/DC. Estos se dividen en diferentes topologías: reductora o buck; elevadora o boost, y un híbrido de las dos anteriores llamado Flyback.

El funcionamiento básico de los convertidores conmutados consiste en el almacenamiento temporal de energía y la cesión de esta en un periodo de tiempo. Este periodo de tiempo determina la cantidad de energía cedida a la carga.

Los convertidores de DC-DC se pueden dividir en tres bloques:

- Conmutación, se encarga de trocear la señal de entrada según la frecuencia y el ciclo de trabajo requerido.
- Acumulación de energía, depende estrictamente de la conmutación, ya que este determina cuándo se libera energía hacia la carga del sistema.
- Filtrado, Se encarga de filtrar la señal conmutada.

Es importante mencionar las ventajas y desventajas en el uso de convertidores DC-DC como reguladores de tensión.

Ventajas

- Rendimiento con márgenes entre el 60% y el 90% contra el 14% de las fuentes de alimentación lineales.
- Tamaño reducido.
- Desventajas
- Generación de EMI (Emisión electromagnética, tanto reducida como radiada).
- Aumento de las pérdidas con el aumento de la frecuencia.

Los convertidores DC-DC son muy utilizados en la industria de alto desarrollo tecnológico tanto metal mecánica, aeronáutica o aeroespacial, gracias a sus numerosas ventajas en el área de conversión de potencia mediante el estado sólido. Sus principales aplicaciones están orientadas a fuentes de poder, sistemas de potencia fotovoltaicos, pilas de combustibles, vehículos híbridos, entre otros, como primeras etapas de acondicionamiento y administración de energía. Estos describen una topología fácil de trabajar (figura 1); sin embargo, su dinámica es muy compleja porque son sistemas de naturaleza no lineal, generalmente de fase capaz de garantizar la estabilidad y las condiciones de operación consideradas durante el diseño frente a perturbaciones de carga o de línea.

JUSTIFICACIÓN

Se desea realizar el convertidor CD-CD reductor a través de un driver IR2111 y una señal de 10 KHz de frecuencia proporcionados por un microcontrolador Arduino, para describir el comportamiento de los elementos involucrados en el proceso de la experimentación desde el concepto teórico, el proceso de la simulación y la construcción del circuito. Así mismo los retos que representa el pasar de lo teórico a lo pragmático, además de los riesgos de trabajar con tecnología CMOS y la electricidad estática.

Así mismo se pretende, exaltar la necesidad de implementar el tema por ser una aplicación vanguardista de elevadas prestaciones en control de potencia para los desarrollos de la ciencia y la tecnología, enfocados a las energías alternativas, los vehículos eléctricos y la industria aeroespacial.

ANTECEDENTES

Este apartado describe los elementos involucrados en la simulación-experimentación del convertidor CD-CD, con Arduino y driver IR2111.

IR2111

El IR2111 es un driver de alto voltaje, de alta potencia y de alta velocidad, para el MOSFET. Con canales dependientes de salida del lado de referencia de alta y baja, diseñados para aplicaciones de medio puente. La entrada lógica es compatible con las salidas CMOS estándar. El IR2111 cuenta con una etapa de amortiguación de intensidad de impulsos elevada diseñada para la conducción cruzada mínima del conductor. El tiempo muerto interno se proporciona para evitar disparar a través en el medio puente de salida. El canal flotante del IR2111 se puede utilizar para conducir un MOSFET de potencia de canal N o IGBT en la configuración de lado alto que opera hasta 600 voltios.

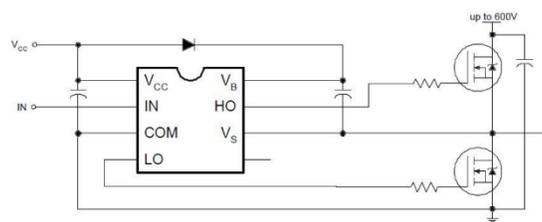


Figura 1.- Conexión Driver IR2111.

Carga

En electricidad, se denomina carga a cualquier componente de un circuito (resistencia, motor, equipo electrónico, etc.) que ofrece una mayor o menor resistencia al paso de la corriente, por lo que al conectarse a una fuente de fuerza electromotriz se considera como una "carga" o consumidor de energía eléctrica. Junto a las fuentes de alimentación, y el cableado forman los tres elementos básicos de todo circuito eléctrico. La carga también se puede definir como la impedancia de entrada de un circuito.

Efecto de la carga en un circuito

Cuando se estudia el efecto que produce la carga en un circuito, es de gran ayuda esquematizar el circuito real y considerar su circuito Thévenin equivalente o su circuito Norton equivalente, ver figura 2.

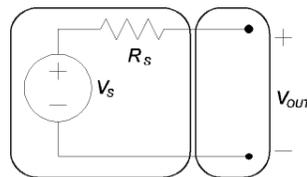


Figura 2.- El circuito se representa por una fuente ideal de voltaje Vs en serie con una resistencia interna Rs.

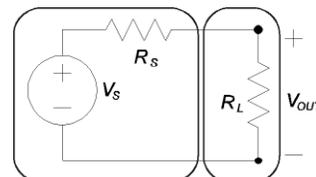


Figura 3.- La resistencia de la carga está en serie con Rs.

Una fuente de voltaje sin carga (terminales en circuito abierto), la totalidad de Vs cae a través de la salida; el voltaje de salida es Vs. Sin embargo, si se conecta una carga el circuito se comportará de forma diferente. Si usamos una resistencia de entrada para representar la carga, el circuito completo quedará como en la figura 3.

Considerando la fuente de voltaje por sí misma como un circuito abierto, al añadir la carga obtenemos un circuito cerrado permitiendo el flujo de la corriente eléctrica. Esta corriente provoca

que el voltaje caiga a través de R_s , y el voltaje en los terminales de salida ya no será V_s . Este voltaje de salida puede determinarse por la regla del divisor de tensión:

$$V_{OUT} = V_s \cdot \frac{R_L}{R_L + R_s}$$

Si la resistencia de la fuente no es despreciablemente menor comparada con la impedancia de carga, el voltaje de la salida caerá.

Capacitor

Un condensador eléctrico (también conocido frecuentemente con el anglicismo capacitor, proveniente del nombre equivalente en inglés) es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra) separadas por un material dieléctrico o por el vacío. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total, ver figura 4.

Aunque desde el punto de vista físico un condensador no almacena carga ni corriente eléctrica, sino simplemente energía mecánica latente; al ser introducido en un circuito se comporta en la práctica como un elemento "capaz" de almacenar la energía eléctrica que recibe durante el periodo de carga, la misma energía que cede después durante el periodo de descarga.

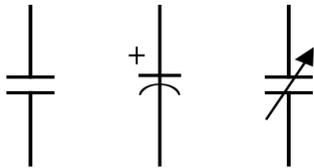


Figura 4.- Símbolos del capacitor.

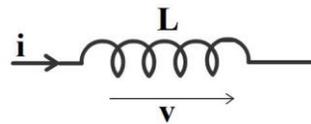


Figura 5.- Símbolo del inductor.

El inductor

La bobina o inductor por su forma (espiras de alambre arrollados) almacena energía en forma de campo magnético. El inductor es diferente del condensador / capacitor, que almacena energía en forma de campo eléctrico.

Una característica interesante de los inductores es que se oponen a los cambios bruscos de la corriente que circula por ellas. Esto significa que a la hora de modificar la corriente que circula por ellos (ejemplo: ser conectada y desconectada a una fuente de alimentación de corriente continua), esta intentará mantener su condición anterior. Este caso se da en forma continua, cuando una bobina o inductor está conectada a una fuente de corriente alterna y causa un desfase entre el voltaje que se le aplica y la corriente que circula por ella, ver figura 5.

Disparo de un MOSFET

El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o MOSFET (en inglés Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor) es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica, ya sea en circuitos analógicos o digitales. Prácticamente la totalidad de los microprocesadores comerciales están basados en transistores MOSFET.

El MOSFET es un dispositivo de cuatro terminales llamados fuente (S, Source), drenador (D, Drain), puerta (G, Gate) y sustrato (B, Bulk) (ver figura 7). Sin embargo, el sustrato generalmente está conectado internamente al terminal de fuente y por este motivo se pueden encontrar dispositivos MOSFET de tres terminales.

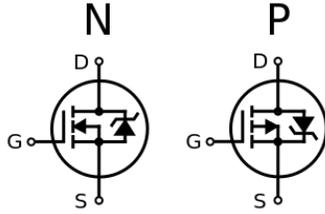


Figura 6.- Símbolo del SCR.

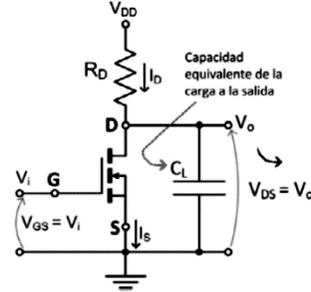


Figura 7.- Conexión de un MOSFET canal N.

MOSFET IRF740

A continuación, se muestran las características del MOSFET a utilizar el cual es de canal N y soporta una corriente de 10 amperes.

Tabla 1. Datos del Mosfet IRF740

TYPE	V _{DSS}	R _{DS(on)}	ID
IRF740	400 V	< 0.55 Ω	10 A

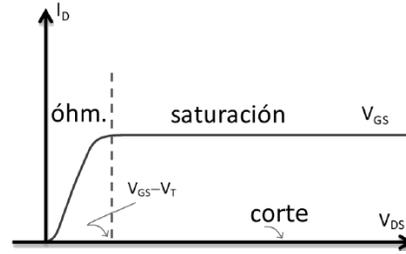
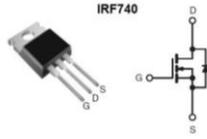
- 5 TYPICAL R_{DS(on)} = 0.48 Ω
- 5 EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 5 100% AVALANCHE TESTED
- 5 VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- 5 GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

APPLICATIONS

- 5 HIGH CURRENT SWITCHING
- 5 UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)
- 5 DC/DC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT.



Regiones de funcionamiento de un MOSFET canal n cuando $V_{GS} \geq V_T$.

Figura 8.- Gráfica de las regiones de un MOSFET

En la Tabla 1, se muestran los datos de fabricante típicos para un Mosfet IRF740. Así mismo la figura 8, muestra la gráfica de las regiones de funcionamiento de un MOSFET.

Cálculos de los elementos de carga

Las formulas que se muestran corresponde a la metodología general para el *diseño de un Buck Converter*.

$$D = \frac{V_o}{V_s}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_o(1 - D)}{2L} * T$$

$$L_{MIN} = \frac{(1 - D)R}{2f}$$

$$C = \frac{T^2(1 - d)V_o}{8L\Delta V}$$

Desarrollo de las ecuaciones con las variables y las constantes:

$$v_0 = 15 \text{ V} \quad v_s = 10 \text{ KHz} \quad v_d \in (25,30) \text{ V}$$

$$I_0 \text{ MAX} = 3 \text{ A} \quad P_o \text{ MAX} = 45 \text{ watts}$$

$$1) \quad \frac{V_0}{D_0} = D \quad D = \frac{15}{25} = 0.6 \quad D = \frac{15}{30} = 0.5$$

$$2) \quad \Delta I_L = \left(\frac{v_0 T}{L}\right)(1 - D) = \left(\frac{15 \left(\frac{1}{10000}\right)}{0.0039}\right)(0.5) = 0.1923 \text{ A}$$

$$I_{max} = \frac{\Delta I_L}{0.2} = \frac{0.1923}{0.2} = 0.9615 \text{ A}$$

$$3) \quad \Delta v_0 = \left(\frac{1}{C}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\Delta I_L}{2}\right) \left(\frac{T}{2}\right)$$

$$C = \left(\frac{1}{\Delta v_0}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\Delta I_L}{2}\right) \left(\frac{T}{2}\right) = \left(\frac{1}{0.15}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{0.1923}{2}\right) \left(\frac{1}{10000}\right)$$

$$C = \frac{0.00001923}{23} = 16 \mu\text{F}$$

$$4) \quad I_{LBmax} = \frac{V_0 T_s}{2L} = \frac{(15) \left(\frac{1}{10000}\right)}{(2)(0.039)} = \frac{0.0015}{0.0078} = 0.1923 \text{ A}$$

NOTA: Corriente mínima $D=0.6$; $V_0 = 15 \text{ V}$; $R=15.6 \Omega$

$$I_{oMax} = 0.96$$

En la figura 9, se muestran las curvas de entrada y salida de un transistor MOSFET N con $V_t=2\text{V}$ conectado en Fuente común (SC), es decir, el terminal de Fuente es común la señal de entrada V_{GS} y las señales de salida I_D y V_{DS} .

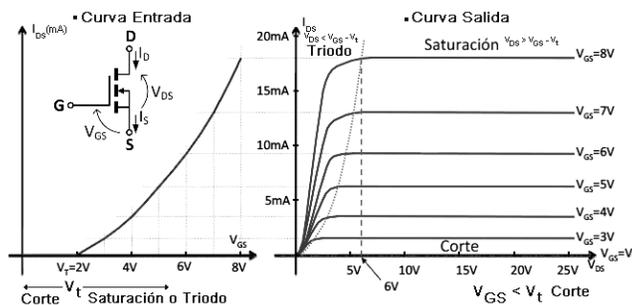


Figura 9.- Curva de salida de MOSFET de canal N.

La existencia de condensadores parásitos en la estructura MOS origina el retraso en la respuesta del mismo, cuando es excitado por una señal de tensión o intensidad externa. La carga/descarga de los condensadores parásitos, requiere un determinado tiempo, que determina la capacidad de respuesta de los MOSFET a una excitación. La figura 10 muestra la curva de disparo de un MOSFET.

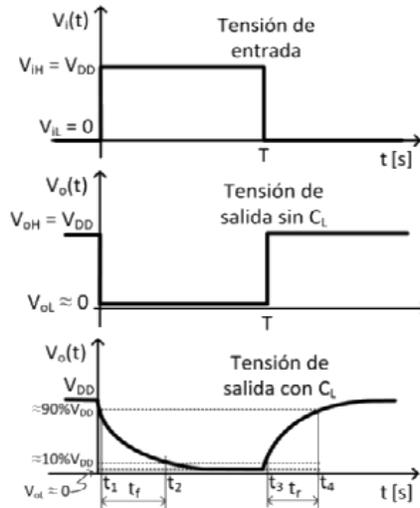


Figura 10.- Diagrama de disparo de un MOSFET.

METODOLOGÍA

Diagrama de conexión del Buck Converter

La práctica inició con el diagrama de control del disparo de un MOSFET a partir de un microcontrolador 4N25 (figura 11), en el cual resistencia de carga se sustituye por el circuito mostrado en la figura 12, que es el circuito completo a construir y experimentar, figura 13. Para obtener al final el circuito montado en el protoboard, figura 14.

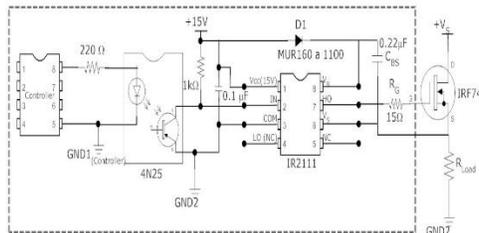


Figura 11.- Circuito de construcción base, para un *Buck Converter*.

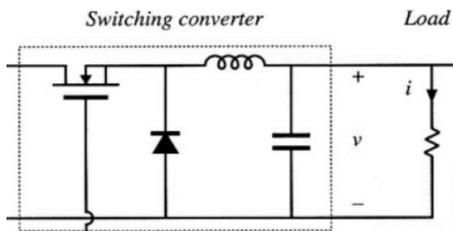


Figura 12.- Circuito de construcción de la carga, para un *Buck Converter*.

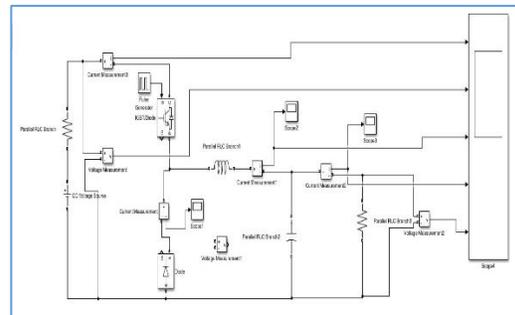


Figura 13.- Diagrama completo de un *Buck Converter* realizado en Simulink.

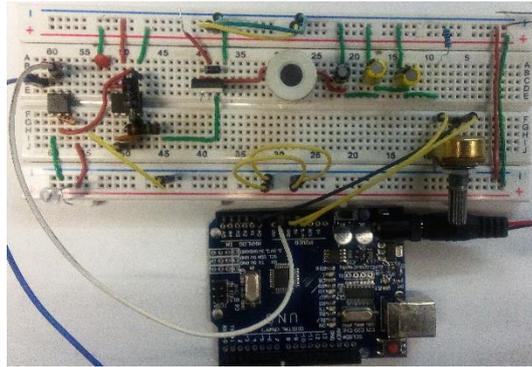


Figura 14.- Armado del circuito del *Buck Converter* montado en protoboard.

Código

Se presenta el código utilizado para generar la señal de control con Arduino.

This example runs on mega and uno.

```

*/
#include <PWM.h>
//use pin 11 on the Mega instead, otherwise there is
//a frequency cap at 31 Hz
int led = 3;          // the pin that the LED is attached to
int pwm = 0;         // how bright the LED is
int fadeAmount = 5;  // how many points to fade the LED by
int32_t frequency = 10000; //frequency (in Hz)
void setup()
{
  //initialize all timers except for 0, to save time keeping
  //functions
  InitTimersSafe();
  //sets the frequency for the specified pin
  bool success = SetPinFrequencySafe(led, frequency);
  //if the pin frequency was set successfully, turn pin 13 on
  if(success) {
    pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13, HIGH);
  }
}
void loop()
{
  pwm = map(analogRead(A0),0,1023,0,255);
  pwmWrite(led, pwm);
  delay(30);
}
    
```

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la figura 15 se muestra la salida del driver IR2111, el cual se encarga de recibir la señal del Arduino que es aislada por el optoacoplador 4N25. Manteniendo un voltaje constante de señal de 5 VCD a 15 VCD.



Figura 15.- Salida de driver alimentado por el Arduino 14.4 volts.



Figura 16.- Voltaje en la carga y variación del Cycle Duty, para fijar la salida a 13.3 VCD.

Al suministrar la señal de disparo a la compuerta del MOSFET (ver figura 16), este comienza a conducir y dependiendo de la amplitud del disparo que es controlado por el Duty Cycle, es posible regular el voltaje de salida del MOSFET.

El voltaje inicial de potencia del Buck Converter es de 15 VCD. Sin embargo, la señal de salida inicio en 10.3 VCD.

Al manipular el Duty Cycle, el voltaje de CD en el Buck Converter inicio un incremento lineal de amplitud, llegando a 10.6 VCD, manteniendo la carga funcionando (ver figura 17).

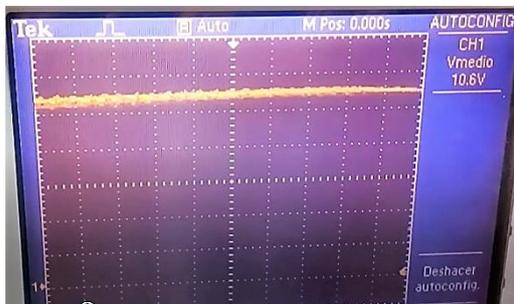


Figura 17.- Voltaje en la carga y variación del Cycle Duty, para fijar la salida a 10.6 VCD.

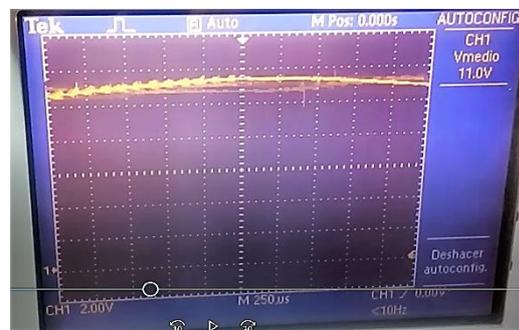


Figura 18.- Voltaje en la carga y variación del Cycle Duty, para fijar la salida a 11 VCD.

Al llegar a los 11 VCD (ver figura 18), el Buck Converter inicio una etapa de transición de una zona estable a una zona inestable, haciendo insegura la operación de la fuente de CC. Concluyendo que es importante conocer los parámetros mínimos y máximos de trabajo de un Buck Converter para mantenerlo siempre en una zona de trabajo segura.

Finalmente, al incrementar a 13.3 VCD la amplitud de la señal de potencia (ver figura 19), se observa que el Buck Converter se encuentra en zona inestable de funcionamiento y es conveniente regresarlo a un nivel de amplitud menor (10 VCD). Lo cual permitió mantener funcional el Buck Converter.

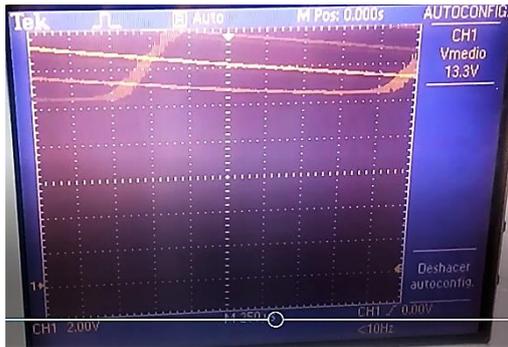


Figura 19.- Voltaje en la carga y variación del Duty Cycle, para fijar la salida a 13.3 VCD.



Figura 20.- Voltaje en la carga y variación del Duty Cycle, para fijar la salida a 1.47 mVCD.

La experimentación concluyó fijando la salida del Buck Converter a 0 VCD (ver figura 20), logrando un valor de 1.47 mVolts de CD, la cual fue una aproximación bastante precisa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Este trabajo presenta el diseño y las pruebas básicas de un *Buck Converter* para dispositivos de potencia. Como lo demuestran las pruebas en el prototipo desarrollado en protoboard, la señal de control aplicada a la compuerta produce la conmutación del dispositivo de potencia controlado siguiendo la trayectoria óptima.

Las experimentaciones muestran un buen comportamiento dinámico de las variables de estado del convertidor. Comprobando por que el uso es cada vez es más frecuente de los convertidores CD-CD como dispositivos administradores de potencia en sistemas de alimentación ininterrumpida y accionamientos para manejar motores en vehículos híbridos, se debe no solo a su eficacia en la regulación de tensiones CD, sino también a su construcción interna y a los dispositivos de electrónica de potencia empleados para conmutación, capaces de garantizar una menor presencia de ruido y de transitorios, mejorando así la calidad de la energía involucrada.

Este tipo de convertidores son sin duda alguna parte fundamental de sistemas ecológicos y ahorradores de energía, de acuerdo a la revisión de estado del arte.

En cuanto a la configuración de Buck Converter, se comprobó que es posible manejar la potencia de fuentes de CD-CD a partir de un efectivo control de disparo, el cual permite tener una fuente de CD-CD variable. En lo personal el manejo de estos dispositivos se determina como complejo, sin embargo, es posible a través de la experimentación realizada extender el uso del circuito de prueba a elementos como los IGBT's

Agradecimientos

Al departamento de electrónica de potencia de la UPAEP, por su invaluable disposición, para la enseñanza de la asignatura en la educación superior.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] H. O. M. Taborda y S. K. A. Alarcón, «<https://es.scribd.com>,» 15 03 2017. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/173943260/Informe-4-Detector-de-Cruce-Por-Cero-y-Temporizador-on-Delay-y-Off-Delay>.
- [2] Sin referencia, «<https://es.scribd.com>,» 15 03 2017. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/102960125/Phase-Control-Dimmer-Using-Arduino>.
- [3] G. D. A. Acosta y V. V. A. Espinosa, «Simulación en PSIM de convertidores CA-CD controlados,» *Pistas Educativas*, nº 113, pp. 176-206, 2016.
- [4] R. G. E. Gallego, «<https://es.scribd.com>,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/223588416/Elementos-Electronica-de-Potencia-v3-2-2013>. [Último acceso: 15 03 2017].
- [5] M. M. Granda y B. E. Mediavilla, INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA: TRANSDUCTORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL, UNIVERSIDAD DE CANTABRÍA.
- [6] G. M. A. Pérez y et al, Instrumentación Electrónica, THOMSON.
- [7] L. Llamas,
«<file:///C:/Users/CANDIA/Desktop/ELECTRONICA%20DE%20POTENCIA/Salidas%20y%20entradas%20aisladas%20con%20Arduino%20y%20optoacoplador.html>,» [En línea]. Available: <file:///C:/Users/CANDIA/Desktop/ELECTRONICA%20DE%20POTENCIA/Salidas%20y%20entradas%20aisladas%20con%20Arduino%20y%20optoacoplador.html>. [Último acceso: 15 03 2017].
- [8] ON SEMICONDUCTOR, «<http://pdf.datasheetcatalog.com/>,» [En línea]. Available: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet2/7/0yx8zar9lzrciy267dt1e591p4cy.pdf>. [Último acceso: 15 03 2017].
- [9] POWERSIM, «<https://powersimtech.com/>,» POWERSIM, [En línea]. Available: <https://powersimtech.com/products/psim/>. [Último acceso: 15 03 2017].
- [10] P. Scherz, Practical Electronics for Inventors, United States of America.: McGraw-Hill, 2000.
- [11] G. Ceglia, V. Guzmán, M. Giménez y J. Walter, «Circuito de Manejo de Compuerta de Bajo Costo para MOSFET e IGBT,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 3, nº 4, pp. 332-338, 2005.
- [12] V. García, «ELECTRONICA PRACTICA APLICADA,» EL TRANSISTOR MOSFET , 15 11 2015. [En línea]. Available: <http://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-transistor-mosfet>. [Último acceso: 31 03 2017].