

ALGORITMO DE CONTROL PARA UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO SPWM CON BASE EN LA PLATAFORMA DSPACE-DS1104

Rivera-Rodríguez Alonso Alberto, López-Flores David Ricardo, Durán-Gómez José Luis
Tecnológico Nacional de México / I. T. Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de Mayo
Chihuahua, Chih., México, CP. 31310
Tel.: (614) 201-2012, Fax: (614) 413-5187
aariverar@itchihuahua.edu.mx, jlduran@ieee.org

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo, la implementación y la demostración de un algoritmo de control para un rectificador trifásico con activación por modulación de ancho de pulso (*PWM, Pulse Width Modulation*) con base en una plataforma de desarrollo en Tiempo Real (*RT, Real Time*). La implementación se lleva a cabo utilizando un sistema de control de adquisición de datos en tiempo real basado en el procesador de señal digital *dSPACE DS1104* y las herramientas de software *MATLAB/Simulink*. El algoritmo de control se desarrolla en Simulink con base en diagramas de bloques. El Taller en Tiempo Real de *MATLAB (RTW, MATLAB Real-Time Workshop)* convierte automáticamente el conjunto de bloques de *Simulink* en código máquina para ejecutarse en el procesador *DS1104*. La plataforma *dSPACE DS1104* proporciona un mecanismo que permite cambiar los parámetros del controlador en *RT*, bajo este escenario se presentan pruebas experimentales del desempeño del algoritmo de control.

Palabras Clave: *DS1104, MATLAB, Simulink, Tiempo Real, rectificador*.

ABSTRACT

This article describes the development, implementation and demonstration of a control algorithm for three-phase rectifier with activation by *Pulse Width Modulation (PWM)* based on a platform of development in Real time (*RT*) the implementation is done by using a data acquisition control system in real-time based on a digital signal processor *dSPACE-DS1104* and tools of software *MATLAB/Simulink*. Control algorithm is developed in Simulink's block diagrams. Real-Time Workshop in *MATLAB (MATLAB RTW)* automatically converts the set of Simulink blocks into machine code to run on the *DS1104* processor. The *dSPACE DS1104* platform provides a mechanism that allows to change the parameters of the controller in *RT*, under this scenario experimental tests of the performance of the control algorithm are presented.

Keywords: *DS1104, MATLAB, Simulink, Real-Time, rectifier*.

1. INTRODUCCIÓN

El esquema general para implementar un algoritmo de control en un rectificador trifásico *PWM* consiste en un microcontrolador para la implementación del algoritmo, un convertidor analógico-digital (*ADC, Analog-to-Digital Conversion*) y digital-analógico (*DAC, Digital-to-Analog*

Conversión) para el procesamiento de las señales de entrada y salida. Sin embargo, el presente esquema no soporta actualización de parámetros en *RT* en el algoritmo de control, con la finalidad de realizar pruebas de desempeño, eficiencia y sintonización en el rectificador trifásico *PWM* y el algoritmo de control, es decir, para modificar parámetros se tendría que detener la operación del algoritmo de control, complicando esto, el proceso de pruebas experimentales y de sintonización del algoritmo de control en la búsqueda de mejores resultados.

En este artículo, se describe una plataforma de laboratorio que permite actualizar parámetros en *RT*, aplicado en el diseño, análisis e implementación de un sistema de un algoritmo de control para un rectificador trifásico *PWM*. El diseño del controlador se realiza con en diagramas de bloques en la interfaz gráfica de *Simulink* [1]-[2]. El diagrama de bloques es procesado por medio de *RTW* para generar el código C optimizado para el *dSPACE DS1104*. *Simulink* vincula a la plataforma *dSPACE DS1104* con base en el modo externo [3]. De esta forma, los parámetros del controlador se pueden parametrizar y sintonizar desde el entorno de trabajo de *Simulink* y las variables de control se pueden rastrear mediante bloques de alcance de Simulink. Los resultados experimentales en *RT* se pueden observar a través de ControlDesk, la cual es una herramienta integrada en la plataforma de desarrollo del *dSPACE DS1104*.

2. ESQUEMA DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO PWM

2.1. Rectificador trifásico PWM

En la Fig. 1 se muestra un Rectificador por Fuente de Voltaje (*VSR, Voltage Source Rectifier*) trifásico, donde V_{dc} es el voltaje de salida, L y R son la inductancia y la resistencia por fase, respectivamente, C_{dc} es el capacitor de enlace, e_{sa} , e_{sb} y e_{sc} son los voltajes de entrada del rectificador e I_{load} es la corriente de carga. El *VSR* trifásico es de tipo elevador, ya que aumenta el voltaje a la salida. La forma de realizar el encendido de los Transistores Bipolares de Puerta Aislada (*IGBTs, Insulated Gate Bipolar Transistor*) del *VSR* trifásico es con base en Modulación de Ancho de Pulso Senoidal (*SPWM, Sinusoidal Pulse Width Modulated*).

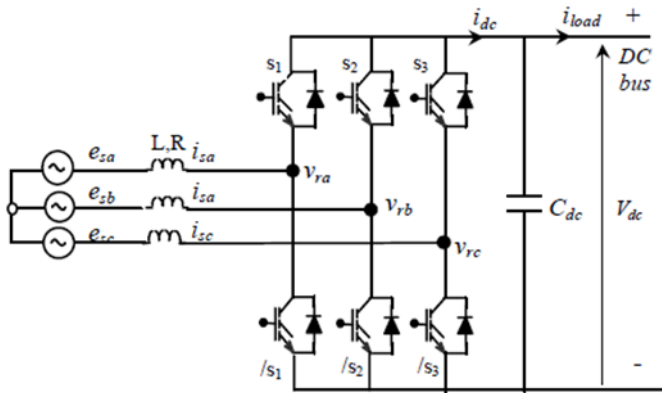


Fig. 1 Diagrama esquemático básico de un rectificador trifásico del tipo PWM.

2.2. Modulación SPWM

La modulación SPWM es una técnica de modulación por ancho de pulso, en la cual se utiliza como referencia una señal senoidal que se compara contra una señal portadora de alta frecuencia y como resultado de esta comparación se genera un tren de pulsos que acciona los IGBTs. Esta técnica se muestra en la Fig. 2.

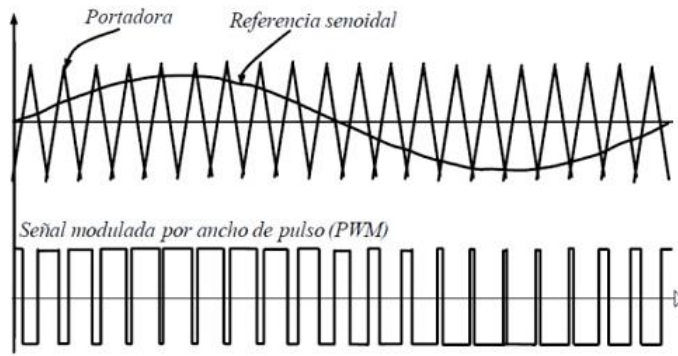


Fig. 2 Formas de onda características para la generación del patrón de pulsos de la modulación SPWM.

Un parámetro importante a determinar es el índice de modulación en amplitud, el cual se determina por medio de la ecuación (1), donde $\hat{V}_{control}$ es el valor pico de la señal de control senoidal y \hat{V}_{tri} es el valor pico de la señal triangular, usualmente empleado como un valor unitario. Otra manera de determinar el índice de modulación en amplitud es mediante (2), donde está directamente relacionado con el voltaje de entrada y el voltaje de salida [4]-[5].

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (1)$$

$$m_a = \frac{V_{LL,rms}}{0.612 * V_{cd}} \quad (2)$$

3. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL

3.1. Generación del algoritmo de control en Simulink

Simulink es un paquete de simulación basado en la interfaz gráfica de usuario y un diagrama a bloques que funciona dentro del entorno de MATLAB y permite la simulación lineal y no lineal, en tiempo continuo y en tiempo discreto. Esta interfaz permite generar algoritmos en código C para el DS1104 a partir de bloques en Simulink. Esta interfaz proporciona un canal bidireccional entre MATLAB y la tarjeta DS1104.

El diseño del algoritmo de control se implementa en Simulink, el cual genera dos archivos en código C con formato .ppc y .sdf para programar la tarjeta DS1104. Simulink cuenta con algunos bloques dedicados únicamente a la generación de código C para la tarjeta DS1104, algunos de ellos se muestran en la Fig. 3.

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de bloques empleado para realizar el algoritmo de control para el rectificador, dentro del cual se puede observar que se tienen tres bloques ADC utilizados para el sensado de los voltajes de fase, cuyo valor debe ser multiplicado por 10 para su procesamiento, debido a que la tarjeta DS1104 cuenta con una atenuación por 10 en el manejo del ADC. A la salida se deben de generar los pulsos de disparo para cada uno de los IGBTs, para lo cual se utiliza el bloque de señal PWM trifásico que se muestra en la Fig. 4. Además, se colocaron visores (scopes) en cada una de las señales para visualizarlas por medio del programa ControlDesk mientras el código se encuentra en ejecución.

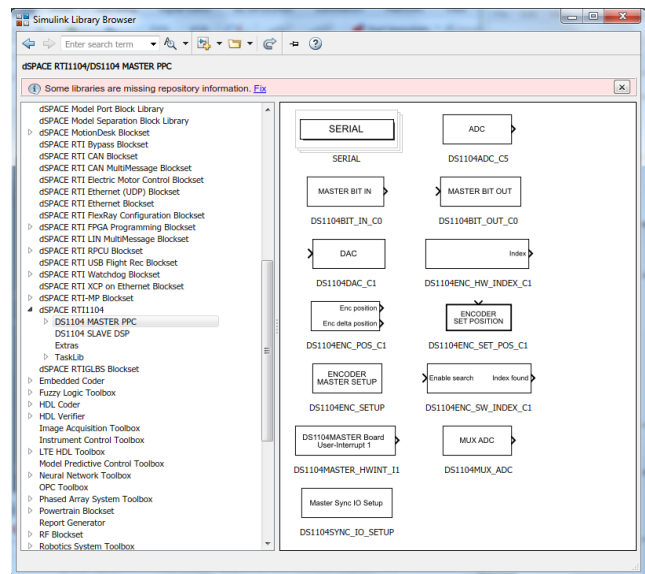


Fig. 3 Estructura de los bloques dedicados para la tarjeta DS1104.

3.2. Panel de conectores

La tarjeta de investigación y desarrollo de la plataforma dSPACE-DS1104 cuenta con un panel de conectores dedicado a la conexión de las señales de entrada (voltajes de fase) y salida (señal PWM) del algoritmo de control empleado. El panel de conectores se muestra en la Fig. 5, donde se resaltan

los conectores de entradas del ADC y salidas PWM que se utilizan en este trabajo.

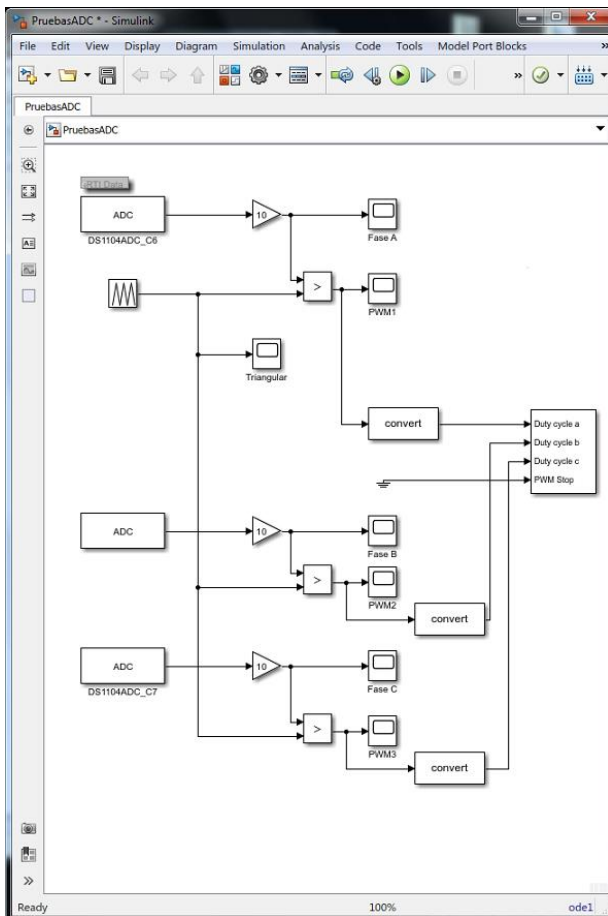


Fig. 4 Diagrama de bloques del algoritmo de control para el rectificador trifásico PWM generado en la plataforma Simulink™.

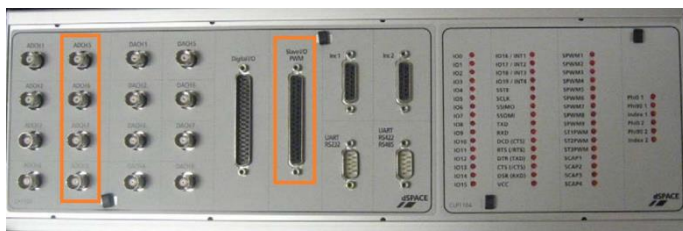


Fig. 5 Panel de conectores de la salida de la tarjeta dSPACE DS1104.

3.3. ControlDesk

ControlDesk es un software de experimentación de *dSPACE* para el desarrollo sencillo de una unidad de control electrónico (*ECU*) [6]. Realiza todas las tareas necesarias y le proporciona al usuario un entorno único de trabajo.

El usuario puede mostrar o almacenar variables y mientras los experimentos están en progreso se puede cambiar los parámetros del controlador, las señales de referencia y observar los resultados sin tener que reconstruir y descargar un nuevo

modelo de *Simulink* a la tarjeta DS1104 [7]. Cuando se detiene el experimento, es posible descargar un archivo donde se almacenaron los resultados experimentales. La interfaz gráfica de *ControlDesk* se muestra en la Fig. 6, donde se tiene una sección de diseño para visualizar las señales a monitorear. Para esto solo se debe de cargar el archivo generado por *MATLAB* en formato con extensión **.sdf* al experimento en *ControlDesk*.

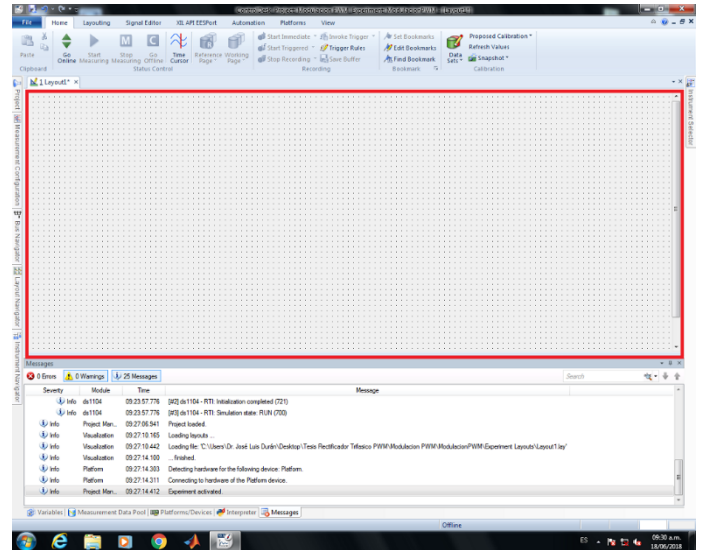


Fig. 6 Interfaz visual del usuario en ControlDesk.

3.4. Montaje experimental

El montaje del sistema *VSR* trifásico a emplear se muestra en la Fig. 7, donde se pueden observar los componentes utilizados, como son los inductores por fase, un módulo de *IGBTs*, una fuente de dc, el panel de conectores de la tarjeta *DS1104*, un capacitor de enlace de cd y una carga resistiva, con los que se lleva a cabo el proceso de rectificación en conjunto con la generación de las señales de control.

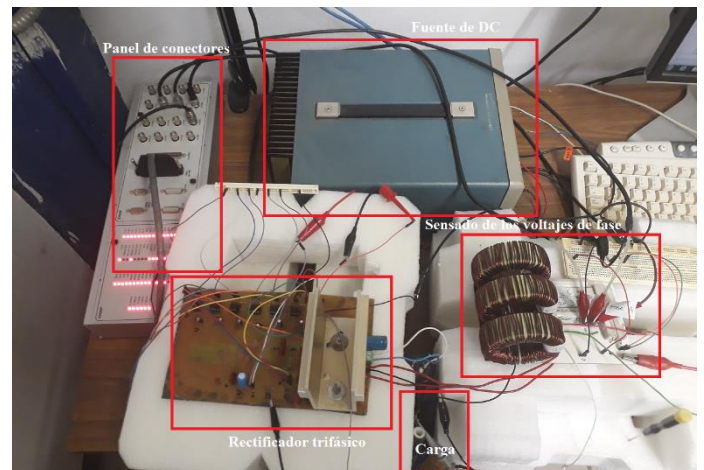


Fig. 7 Montaje experimental empleado.

De la Fig. 7, la fuente de dc alimenta el módulo de IGBTs, el panel de conectores realiza el sensado de los voltajes de fase, el módulo de IGBTs realiza el proceso de rectificación, el sensado de los voltajes de fase consta de un arreglo de resistencias para reducir la amplitud de voltaje y no dañar el ADC de la tarjeta DS1104 y la carga consta de un arreglo de resistencias.

4. RESULTADOS

Se utilizó la tarjeta dSPACE DS1104 para generar el algoritmo de control de los IGBTs del VSR trifásico y para verificar el funcionamiento se utilizaron los parámetros de la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros del rectificador.

Parámetro	Valor
V_s	30 Vrms
V_{dc}	100 V
m_a	0.83
L	1 mH
C	1000 μ F
R_L	500 Ω

donde m_a se define en (2). Por medio del panel de conectores se realizó el sensado de los voltajes de fase, los cuales se pueden observar en la Fig. 8. Estos voltajes se visualizaron por medio del programa ControlDesk, donde se observa que los voltajes tienen una amplitud de 0.83, el cual es el valor requerido para tener una modulación en amplitud de 0.83.

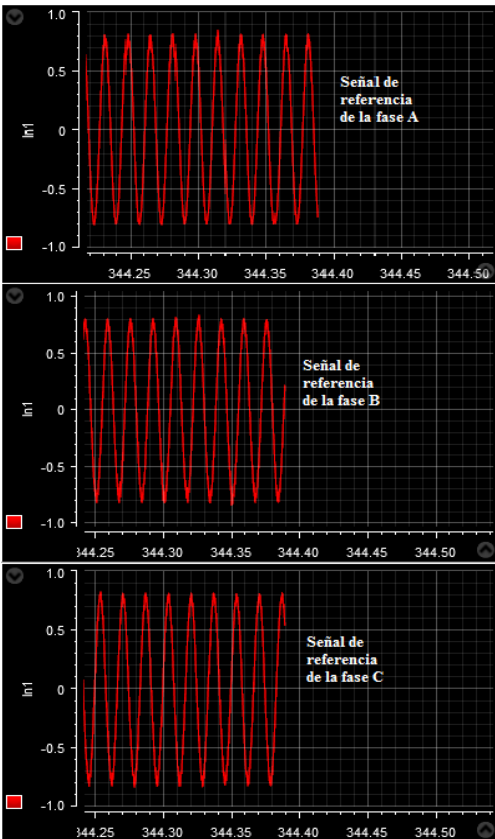


Fig. 8 Formas de onda del sensado de los voltajes de fase, v_{an} , v_{bn} , y v_{cn} .

Las señales de disparo generadas por el DS1104 para una modulación en amplitud de 0.83 se muestran en la Fig. 9, donde se puede visualizar el voltaje sensado de la fase A, la señal triangular de alta frecuencia y el tren de pulsos generados para la parte alta de la fase A, donde las gráficas se muestran por medio de ControlDesk. El mismo patrón de pulsos se observa en la Fig. 10, donde se pueden visualizar físicamente con un osciloscopio digital Agilent. Las fases restantes tienen la misma forma de onda pero se encuentran desfasadas 120° entre sí.

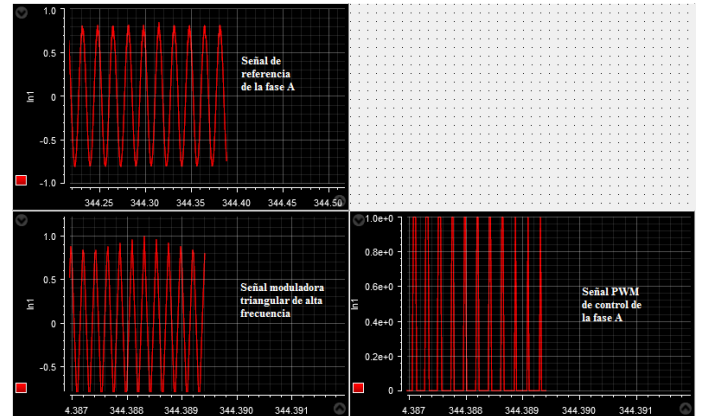


Fig. 9 Señales de disparo generadas por el DS1104 vistas en ControlDesk.

En la Fig. 11 se muestra la forma de onda del voltaje de salida. Como se puede observar, se tiene un voltaje de 95 V, lo que significa que existe una pérdida de voltaje de 5 V de los 100 V establecidos como valor de diseño y un rizo de voltaje del 5%, el cual es parte de los resultados esperados. Con esto se comprueba el correcto funcionamiento del algoritmo de control desarrollado en Simulink y ejecutado por la tarjeta de desarrollo DS1104.

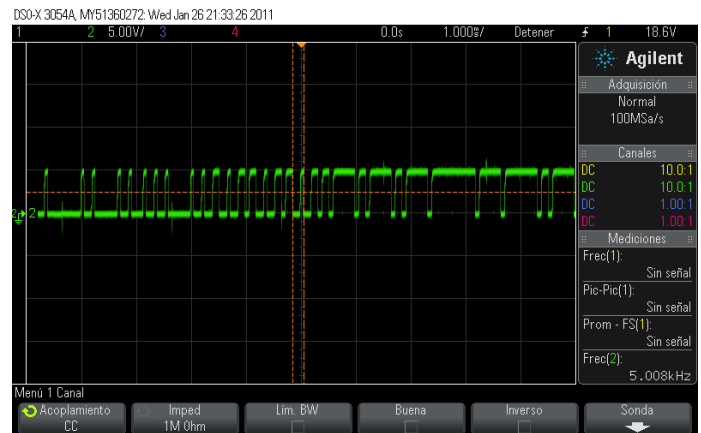


Fig. 10 Patrón de las señales de disparo PWM generadas por la tarjeta DS1104 y visualizadas en un osciloscopio digital Agilent MSO-X 3054A.

De la Fig. 4, los parámetros utilizados en el diagrama a bloques que se pueden modificar en RT mediante ControlDesk son los valores de las ganancias, con lo cual se puede modificar el

valor del índice de modulación en amplitud y por tanto el comportamiento del rectificador para la evaluación del desempeño del mismo bajo distintas circunstancias.

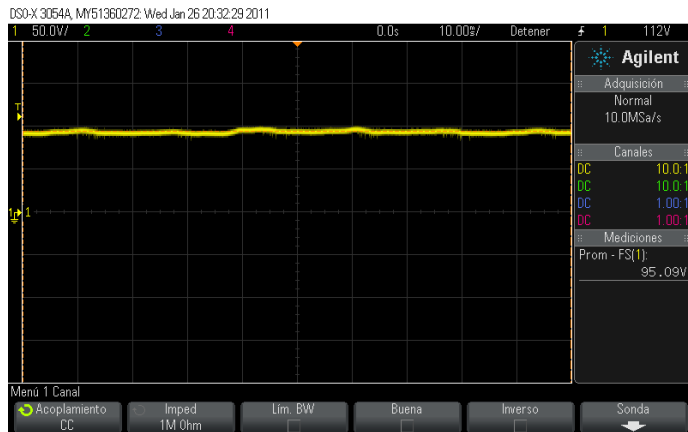


Fig. 11 Resultado experimental del voltaje de enlace cd de salida del rectificador, V_{cd} .

5. CONCLUSIONES

Se demostró el desarrollo de un algoritmo de control para un rectificador trifásico *PWM* por medio la plataforma de desarrollo *dSPACE DS1104*. Se explicó el procedimiento para generar código en C por medio de *MATLAB* y la manera de realizar el diseño con base en diagramas a bloques en el entorno de trabajo de *Simulink*. Además, se mostró que se pueden monitorear las señales de control en el programa *ControlDesk* mientras se encuentra el programa en ejecución.

Se realizó el algoritmo de control para el rectificador y se mostraron resultados satisfactorios al probarlo experimentalmente y tener un voltaje de corriente directa cercano al valor del diseño, teniendo una pequeña pérdida de voltaje dentro del proceso de rectificación y un valor pequeño de rizo de voltaje.

6. REFERENCIAS

- [1] M. Cruz, R. Silva, C. Merlo, M. Villarreal, D. Muñoz and V. Hernández. "Modeling and Construction of a Furuta Pendulum Prototype," in International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, 2014, pp. 98-103.
- [2] J. Alba, R. Silva, H. Taud, J. Rodríguez and V. Hernández. "Simulation, construction, and validation of a DC/DC buck power converter-DC motor system," in International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), 2016, pp. 118-124.
- [3] M. Cruz, R. Silva, J. Sandoval, C. Merlo, H. Taud, C. Márquez and V. Hernández. "Modeling, simulation, and construction of a furuta pendulum test-bed," in International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), 2015, p. 72-79.
- [4] M. H. Rashid. *Electrónica de Potencia – Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. México, D.F.: Prentice Hall, 1995, pp. 172-176.
- [5] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins. *Electrónica de Potencia – Convertidores, Aplicaciones y Diseño*. México, D.F.: Mc Graw Hill, 2009, pp. 179-200.
- [6] dSPACE (2018), "ControlDesk." Available: <https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/experimentandvisualization/controldesk.cfm>
- [7] C. Merlo, M. Cruz, R. Silva, H. Taud, I. Rivera, D. Muñoz and V. Hernández. "Modeling and Construction of an Inertia Wheel Pendulum Test-bed," in International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, 2014, pp. 116-121.