

Control difuso para un convertidor CD-CD bidireccional de medio puente

Fuzzy control for a half bridge bidirectional dc-dc converter

Controle difuso para um conversor CD-CD bidireccional de media ponte

Para citar este artículo / To reference this article /
Para citar este artigo: Moreno Aguilar, L. M., Peralta Sánchez, É. y Morales Salgado, M. (2016). Control difuso para un convertidor CD-CD bidireccional de medio puente. *Ingenio Magno*, 7(1), 116-132.

Luz María Moreno-Aguilar

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
Doctorado en Ingeniería de Software
luzmaria.moreno@upaep.edu.mx

Édgar Peralta-Sánchez

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
Laboratorio de Conversión de Energía
edgar.peralta@upaep.mx

María del Rocío Morales-Salgado

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
Posgrados en Tecnologías de Información
e Ingeniería de Software
mariadelrocio.morales@upaep.mx

Fecha de recepción: 4 de mayo de 2016
fecha de aprobación: 2 de junio de 2016

Resumen

En este artículo se presenta el diseño, la simulación y la implementación de un control aplicado a un convertidor de corriente directa a corriente directa (CD-CD), bidireccional, de medio puente. La estrategia de control está basada en lógica difusa. El control modifica el valor del ciclo de trabajo del interruptor controlado mediante modulación por ancho de pulso, para asegurar un valor específico en el voltaje de salida del convertidor. El control fue validado experimentalmente en un convertidor de potencia operando tanto para funcionamiento en modo reductor como para el funcionamiento en modo elevador. La simulación se realizó en Matlab/Simulink. Un banco de pruebas fue construido con base en un convertidor CD-CD de 2 kW y el algoritmo de control fue implementado por medio de Labview y CompactRIO.

Palabras clave: algoritmo de control inteligente, control difuso, convertidor CD-CD.

Abstract

This article presents the design, simulation, and implementation of a control applied to a half bridge bidirectional direct current to direct current converter. The control strategy is based on fuzzy logic. The control modifies the values of the interrupter's work cycle controlled by pulse-width modulation in order to assure a specific value of voltage leaving the converter. The control was experimentally validated in a power converter operating both for function in step-down mode and for function in step-up mode. The simulation was carried out in Matlab/Simulink. A test bench was built based on a 2 kW DC-DC converter and the control algorithm was implemented with Labview and compactRIO.

Keywords: Intelligent control algorithm, fuzzy control, DC-DC converter.

Resumo

Neste artigo se apresenta o projeto, simulação e implantação de um controle aplicado a um conversor de corrente contínua-corrente contínua, bidireccional, de media ponte. A estratégia de controle esta baseada na lógica difusa. O controle modifica o valor do ciclo de trabalho do interruptor comandado mediante modulação por largura de pulso para garantir um valor específico de saída de tensão do conversor. O controle foi validado experimentalmente em um conversor de potência operando como agente abaixador e elevador. A simulação realizou-se em Matlab/Simulink. Um banco de ensaio foi construido baseado em um conversor CD-CD de 2kW e o algoritmo de controle foi implantado mediante Labview e compactRIO.

Palavras Chave: algoritmo de controle inteligente, controle difuso, conversor cd-cd.

1. Introducción

Los convertidores CD-CD son circuitos electrónicos ampliamente utilizados en sistemas de suministro de energía. Se usan para convertir la entrada de corriente directa (CD) no regulada en una salida de corriente directa controlada en el nivel de voltaje deseado (Mohan, Tore y Robbins, 2009).

Los convertidores contienen cuatro elementos básicos: inductor, capacitor, diodo e interruptor controlado. Se pueden dividir en dos tipos principales: convertidores de conmutación dura a través de modulación de ancho de pulso (*pulse-width modulation* [PWM]) y convertidores resonantes de conmutación suave (Rashid, 2010). Las configuraciones básicas de los convertidores CD-CD son tres: *buck* (reductor), que decrementa el voltaje de alimentación en la salida; *boost* (elevador), que incrementa el voltaje de alimentación en la salida, y *buck-boost* (elevador-reductor), que se considera bidireccional porque realiza ambas acciones (Rashid, 2010). En este caso, el convertidor que se busca controlar es bidireccional y de conmutación dura.

El convertidor se pone como parte de un circuito controlador de lazo cerrado. El objetivo del circuito controlador es regular ya sea el voltaje o la corriente de salida del convertidor. Para tal efecto, se actúa sobre el ciclo de trabajo D del interruptor controlado del convertidor (PWM). El ciclo de trabajo puede tomar valores en un intervalo $[0,1]$. En nuestro caso, el controlador actúa sobre el voltaje de alimentación, para reducirlo o elevarlo, según corresponda.

La estrategia de control consiste en comparar un voltaje de referencia con la medición del voltaje de salida del convertidor. A la diferencia resultante se le conoce como el error y es procesado por un controlador. La salida del controlador incide en el interruptor controlado del convertidor para modificar el voltaje de salida de este.

La problemática reside en diseñar el controlador, debido a que se requiere realizar mediciones del voltaje de salida del convertidor con una frecuencia muy alta y, con la misma frecuencia, realizar el procesamiento específico para obtener el dato necesario para proceder a la modificación del ciclo de trabajo del convertidor.

Aunque existen propuestas elaboradas y construidas de sistemas de control para un convertidor, la mayoría de estas propuestas revisadas (Govindaraj y Rasila, 2010; Khaburi y Rostami, 2011; Muruganandam, Thangaraju y Madheswaran, 2014) han sido elaboradas para convertidores de menor capacidad de manejo de voltaje, que van desde los 12 V hasta los 24 V. Solo una de las propuestas revisadas maneja voltajes de entre 20 V y 40 V (Elmas, Deperlioglu y Sayan, 2009).

La propuesta de este proyecto es un sistema de control adecuado a las características de nivel de voltaje y corriente que se manejan en el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, que son de entre 600 V y 1000 V.

En este trabajo se usan los algoritmos de control inteligente, entre los cuales se encuentra el uso de la lógica difusa, que presenta ciertas ventajas debido a que proporciona la facilidad de resolver situaciones complejas y dinámicas que son más fácilmente expresadas con palabras en lugar de usar modelos matemáticos (Kessal, Rahmani, Mostefai y Gaubert, 2012).

El objetivo es desarrollar un control automático para un convertidor CD-CD que permita lograr que el voltaje de salida se establezca en un valor de referencia, en un tiempo corto, a pesar de las variaciones del voltaje de entrada.

La organización del resto del artículo se realiza de la siguiente manera: en la parte II se presenta el marco de referencia de un controlador difuso clásico, así como

la metodología que se sigue para su desarrollo. En la parte III se presenta el diseño, la simulación y el resultado de la simulación de los controladores para el convertidor, tanto para el funcionamiento en modo *buck* como en modo *boost*. En la parte IV se reporta la implementación de los controladores. En la parte V se presentan los resultados obtenidos y, finalmente, en la parte VI se muestran las conclusiones.

2. Controlador difuso clásico para un convertidor CD-CD

Se describe a continuación cómo se realiza el control de un convertidor usando lógica difusa. Para ello se explica el funcionamiento de un controlador difuso y la metodología que se debe seguir para desarrollarlo.

A. Controlador por lógica difusa

Un controlador difuso contiene un algoritmo que convierte una estrategia de control lingüística en una de control automático. El controlador por lógica difusa, a diferencia de los controladores convencionales, no requiere un modelo matemático del sistema que debe ser controlado (Kessal, Rahmani, Mostefai y Gaubert, 2012). Sin embargo, es necesaria una comprensión adecuada del sistema y de los requisitos de control. En el diseño del controlador difuso se debe clarificar cómo es procesada la información (estrategia de control y decisión) y cómo fluye a través del sistema (solución, variable de salida).

La figura 1 muestra la arquitectura del circuito de control, en el cual se resalta el diseño típico del controlador basado en lógica difusa, formado por cuatro elementos (So, Tse y Lee, 1996):

- El fuzzificador, que convierte los datos de entrada en valores lingüísticos.
- Una base de conocimiento, que consiste de una base de datos con sus correspondientes definiciones lingüísticas y un conjunto de reglas de control.

- Un mecanismo de inferencia, que simula un proceso de decisión humano, a través de inferir acciones de control por medio de las reglas de la base de conocimiento.
- Un defuzzificador, que convierte los datos inferidos en datos numéricos de salida.

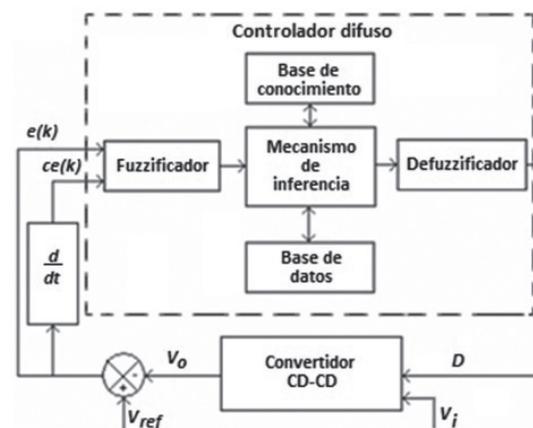


Figura 1. Controlador basado en lógica difusa

Fuente: So, Tse y Lee (1996).

1) Entradas

Un controlador por lógica difusa típico tiene dos entradas controladas:

- *El error $e(k)$* . Se refiere a la diferencia existente entre la salida del convertidor y el valor de referencia, obtenida a través de [1].
- *El cambio en el error $ce(k)$* . Se refiere a la variación existente entre el error actual $e(k)$ y el error del ciclo anterior $e(k-1)$. Se considera la derivada del error y se obtiene a través de [2].

$$e(k) = V_{ref} - V_o \quad [1]$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad [2]$$

2) Salida

La salida del controlador es un factor de ajuste D que se aplica al ciclo de trabajo del generador de PWM, obtenido por medio del algoritmo basado en lógica difusa.

B. Metodología para el diseño del controlador

Para realizar el diseño del controlador, se deben realizar los pasos siguientes (Rameshkumar y Arumugam, 2009):

- Seleccionar parámetros y elementos de control como factores de escala para las señales de entrada y salida.
- Particionar el universo de discurso del intervalo abarcado por cada variable en un número de subconjuntos difusos, y asignar una etiqueta lingüística a cada una.
- Asignar una función de pertenencia para cada subconjunto difuso.
- Asignar relacionales difusas entre los subconjuntos de entrada y salida, y formar así la base de conocimiento.
- Elegir factores de escala apropiados para las variables de entrada y de salida, con el fin de normalizar los valores en intervalos digitales de $[-1, 1]$ o $[0, 1]$.
- Fuzzificar las entradas, es decir, clasificar los datos de entrada en valores o conjuntos lingüísticos adecuados para el controlador.
- Usar un razonamiento difuso apropiado para inferir la salida contribuida por cada regla (relación).
- Agregar las salidas difusas recomendadas por cada regla.
- Aplicar la técnica de defuzzificación para formar una salida nítida.
- Enviar la acción de cambio del control hacia la planta, en este caso, el convertidor CD-CD.

3. Análisis, diseño y simulación del controlador difuso

En esta parte se presenta el reporte del proceso seguido para el diseño del control, así como el modelo realizado para validar su funcionamiento y los resultados obtenidos en la simulación; todo ello tanto para el funcionamiento en modo *buck* como en modo *boost*.

C. Análisis

Como punto inicial se definieron las características técnicas del convertidor para ambos sentidos: reductor y elevador. La tabla 1 muestra las características del convertidor funcionando en modo *buck* y la tabla 2 presenta las características del convertidor funcionando en modo *boost*.

Tabla 1. Características del convertidor en modo *buck*

Característica	Valores
Intervalo de valores de voltaje de alimentación V_i	[600-1000 V]
Voltaje de referencia V_{ref}	375 V
Intervalo de valores del ciclo de trabajo D	[0.38 – 0.62]

Fuente: autores.

Tabla 2. Características del convertidor en modo *boost*

Característica	Valores
Intervalo de valores de voltaje de alimentación V_i	[187.5 - 375 V]
Voltaje de referencia V_{ref}	750 V
Intervalo de valores del ciclo de trabajo D	[0.5 – 0.75]

Fuente: autores.

Para el convertidor en modo *buck*, el voltaje de salida se obtiene a través de [3], mientras que para el convertidor en modo *boost*, el voltaje de salida se obtiene a través de [4].

$$V_o = V_i \cdot D \quad [3]$$

$$V_o = V_i / (1 - D) \quad [4]$$

Donde:

V_i = valor de alimentación del convertidor

D = valor del ciclo de trabajo

V_o = valor de salida del convertidor

D. Diseño y simulación de los controladores difusos

Además de la metodología descrita en la sección II-B, para el diseño de un controlador se utilizó el método de observación del signo de la distancia (So, Tse y Lee, 1996). Este método utiliza una tabla de reglas para definir el comportamiento del controlador. El método se puede resumir de la siguiente manera:

- Cuando la salida del convertidor está lejos del punto de referencia, el cambio de ciclo de trabajo debe ser amplio, con el fin de llevar la salida al punto de ajuste rápidamente.
- Cuando la salida del convertidor se aproxima al punto de referencia, se considera un pequeño cambio de ciclo de trabajo.
- Cuando la salida del convertidor se encuentra cerca del punto de referencia y se acerca rápidamente, el ciclo de trabajo debe mantenerse constante a fin de evitar rebasarlo.
- Cuando se alcanza el punto de referencia y la salida todavía está cambiando, el ciclo de trabajo debe ser cambiado un poco para prevenir un alejamiento.
- Cuando se alcanza el punto de referencia y la salida es constante, el ciclo de trabajo se mantiene sin cambios.
- Cuando la salida está por encima del punto de referencia, el signo del ajuste de ciclo de trabajo debe ser negativo, y viceversa.

Para los controladores se definieron nueve variables lingüísticas, cuyo nombre y significado se muestran en la tabla 3. Estas variables representan conjuntos difusos para los valores del error y cambio de error.

Tabla 3. Variables lingüísticas del controlador por lógica difusa

Variable lingüística	Significado
NE	Negativo extra grande
NG	Negativo grande
NM	Negativo mediano
NP	Negativo pequeño
CE	Cero
PP	Positivo pequeño
PM	Positivo mediano
PG	Positivo grande
PE	Positivo extra grande

Fuente: autores.

A partir de las variables lingüísticas, se puede construir una tabla de reglas de dos dimensiones. Los encabezados de las filas y las columnas de la tabla son las variables lingüísticas ya definidas, que muestran las combinaciones posibles de mediciones para el error y el cambio en el error. Dicha tabla de reglas define el controlador por lógica difusa, ya que los cruces representan las decisiones de salida, de acuerdo con las reglas ya mencionadas. La tabla 4 muestra la tabla de reglas para el controlador. Esta configuración es válida tanto para el funcionamiento en modo *buck* como en modo *boost*.

Tabla 4. Reglas del controlador difuso

	NE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PE
PE	CE	PP	PM	PG	PE	PE	PE	PE	PE
PG	NP	CE	PP	PM	PG	PE	PE	PE	PE
PM	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PE	PE	PE
PP	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PE	PE
CE	NE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PE
NP	NE	NE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
NM	NE	NE	NE	NG	NM	NP	CE	PP	PM
NG	NE	NE	NE	NE	NG	NM	NP	CE	PP
NE	NE	NE	NE	NE	NE	NG	NM	NP	CE

Fuente: autores.

3) Diseño del controlador funcionando en modo *buck*

Como parte del diseño, se definieron los intervalos de valores de las variables de entrada, error y cambio en el error, y de salida y cambio en el ciclo de trabajo del

controlador difuso. En la tabla 5 se muestran estos intervalos, para el convertidor funcionando en modo *buck*.

Tabla 5. Intervalos de valores para las variables de entrada y salida del controlador difuso para el funcionamiento del convertidor en modo *buck*

Tipo	Característica	Valores
Entrada	Intervalo de valores del error	[-625, 375 V]
Entrada	Intervalo de valores del cambio en el error	[-1000, 1000 V]
Salida	Intervalo de valores del cambio del ciclo de trabajo	[-0.625, 0.625 V]

Fuente: autores.

Con estos datos se definieron los valores para las funciones de pertenencia de las variables tanto de entrada como de salida, para el controlador difuso, y sus valores, los cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores definidos para las funciones de pertenencia de las variables de entrada y la de salida del control difuso para el convertidor en modo *buck*

Entradas				Salida	
Error		Cambio en el error		Cambio en el ciclo de trabajo	
PE	13.1	PE	34.7	PE	0.625
PG	8.0	PG	19.0	PG	0.3
PM	4.0	PM	9.0	PM	0.075
PP	1.0	PP	3.0	PP	0.0025
CE	0.0	CE	0.0	CD	0.0
NP	-2.0	NP	-3.0	NP	-0.0025
NM	-6.0	NM	-9.0	NM	-0.075
NG	-12.0	NG	-19.0	NG	-0.3
NE	-21.5	NE	-34.7	NE	-0.625

Fuente: autores.

4) Simulación del controlador difuso del convertidor en modo *buck*

La figura 2 muestra la simulación del circuito controlador completo. La simulación se realizó en Matlab/Simulink y funciona de la siguiente manera:

- El emulador de señal permite generar una señal que puede ser configurada para realizar variaciones en un rango de entre 600V y 1000V.

- Esta señal sirve como entrada a la fuente, que la transforma en voltaje de alimentación para el convertidor CD-CD.
- El convertidor CD-CD es un subsistema también construido por simulación. Durante el primer ciclo, el valor del ciclo de trabajo es 1, a fin de obtener el mismo voltaje en la salida.
- La señal de salida del convertidor pasa por una resistencia para tener una medición confiable.
- La medición es el dato que se compara con un valor de referencia de 375 V, que también se puede considerar la salida deseada. La diferencia entre estos dos valores es el error.
- Se utiliza un retardador para guardar el valor del error en el ciclo anterior. La diferencia entre este y el error actual es el cambio en el error.
- El módulo de lógica difusa recibe como entradas el error y el cambio en el error, procesa estos valores con base en las funciones de pertenencia definidas en la tabla 6 y según las reglas de inferencia establecidas en forma interna; luego regresa una variación en el ciclo de trabajo, que puede ser negativa o positiva.
- El integrador obtiene el ciclo de trabajo a través de la sumatoria de todas las variaciones de este.
- Finalmente, se puso un saturador, que impide que el ciclo de trabajo rebase los límites establecidos.

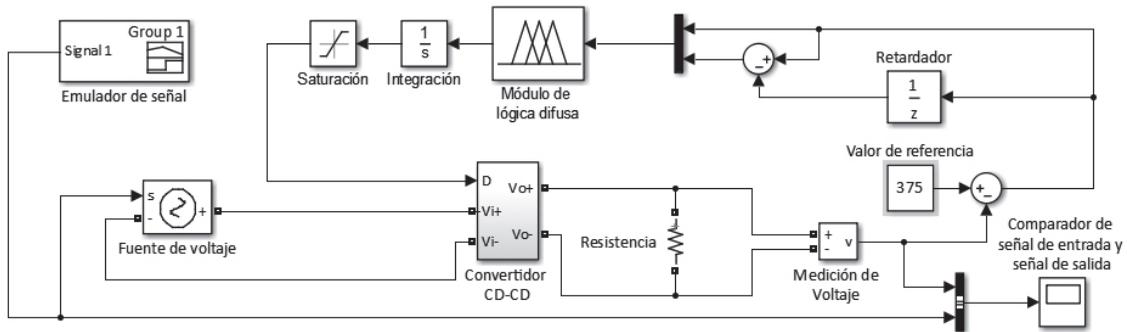


Figura 2. Modelo de simulación del circuito controlador para el convertidor funcionando en modo *buck*

Fuente: autores.

5. Resultados de la simulación

El controlador funciona para mantener el voltaje de salida a un valor constante de 375 V (valor de referencia), a pesar de las variaciones del voltaje de alimentación. La figura 3 muestra los resultados de la simulación del circuito en un transcurso de tiempo de 20 s.

En la gráfica, la señal superior muestra la variación del voltaje de alimentación al convertidor, en un rango entre los 600 V y los 1000 V. La señal inferior indica cómo la salida del convertidor se va ajustando y tiende

a la estabilización para lograr alcanzar el voltaje de referencia en un periodo corto.

6) Diseño del controlador funcionando en modo *boost*

De igual manera, se definieron los intervalos de valores de las variables de entrada, error y cambio en el error, y de salida y cambio en el ciclo de trabajo del controlador difuso para el convertidor funcionando en modo *boost*. En la tabla 7 se muestran estos intervalos.

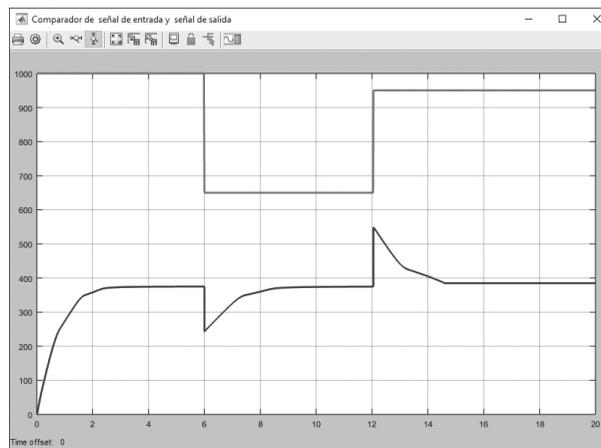


Figura 3. Resultados de la simulación del control para el convertidor en modo *buck*

Fuente: autores.

Tabla 7. Intervalos de valores para las variables de entrada y salida del controlador difuso simulado para el funcionamiento del convertidor en modo *buck*

Tipo	Característica	Valores
Entrada	Intervalo de valores del error	[-2250, 563 V]
Entrada	Intervalo de valores del cambio en el error	[-2815, 2815 V]
Salida	Intervalo de valores del cambio del ciclo de trabajo	[-0.75, 0.75 V]

Fuente: autores.

A partir de estos datos, se definieron los valores para las funciones de pertenencia de las variables tanto de entrada como de salida para el controlador difuso, así como sus valores (tabla 8).

Tabla 8. Valores definidos para las funciones de pertenencia de las variables de entrada y la de salida del control difuso simulado para el convertidor en modo *buck*

Entradas				Salida	
Error		Cambio en el error		Cambio en el ciclo de trabajo	
PE	563	PE	2815	PE	0.75
PG	300	PG	750	PG	0.3
PM	50	PM	100	PM	0.075
PP	5	PP	25	PP	0.0025
CE	0	CE	0	CD	0.0
NP	-25	NP	-25	NP	-0.0025
NM	-100	NM	-100	NM	-0.075
NG	-750	NG	-750	NG	-0.3
NE	-2250	NE	-2815	NE	-0.75

Fuente: autores.

7) Simulación del controlador difuso del convertidor en modo *boost*

La figura 4 muestra la simulación del circuito controlador completo en modo *boost*. Este circuito funciona de manera similar al circuito en modo *buck*, definido en el apartado III-D-4. Las características diferenciadoras son:

a) El emulador de señal permite generar una señal

discreta que puede ser configurada para realizar variaciones en un rango de entre 187.5 V y 375 V.

b) El valor de referencia o salida deseada es de 750 V.

c) El módulo de lógica difusa procesa el error y el cambio en el error con base en las funciones de pertenencia definidas en la tabla 8.

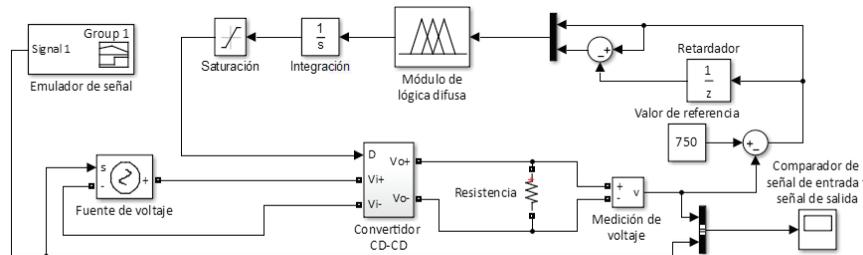


Figura 4. Modelo de simulación del circuito controlador para el convertidor funcionando en modo *boost*

Fuente: autores.

8) Resultados de la simulación

En la figura 5 se muestran los resultados de la simulación del circuito controlador difuso operando en modo *boost* en un intervalo de 20 s. Se puede apreciar la variación

en el voltaje de entrada (señal inferior) en un rango que va de 137,5 V a 350 V, y cómo el voltaje de salida (señal superior) tiende a la estabilización para lograr una salida constante de 750 V, que es el valor de referencia.

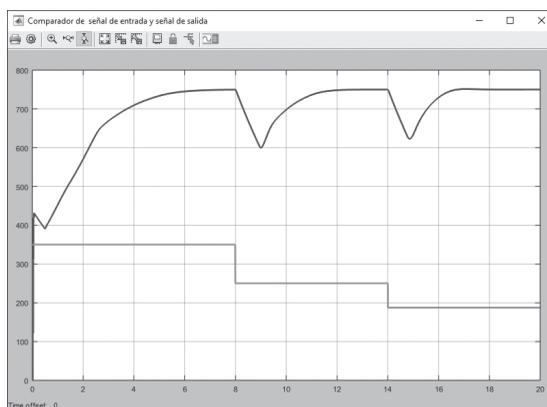


Figura 5. Resultados de la simulación del control para el convertidor en modo *boost*

Fuente: autores.

4. Implementación

En esta parte se presenta el reporte del proceso seguido para la implementación del sistema de control. La figura 6 muestra el diagrama de distribución para la implementación. El convertidor CD-CD es un sistema electrónico y la aplicación es un componente de *software*.

Para la comunicación entre ambos es necesario contar con un dispositivo de adquisición de señales. Debido a que la cantidad de mediciones por segundo que se requiere de la señal de salida del convertidor debe ser alta, a fin de obtener una mejor calidad en los datos, se optó por usar el sistema de adquisición NI CompactRIO, ya que permite la configuración del periodo en el que se harán las mediciones (National Instruments, 2014).



Figura 6. Diagrama de distribución para la implementación

Fuente: autores.

La implementación del controlador tanto para el modo *buck* como el modo *boost* se realizó en LabVIEW, debido a las ventajas que presenta por ser un lenguaje visual que permite desarrollar aplicaciones rápidamente, favorece una comunicación transparente con el

CompactRIO y cuenta con una interfaz para crear el módulo de lógica difusa.

La implementación se realizó para ser probada en un circuito completo usando un convertidor CD-CD

de prueba cuyo sensor de voltaje tiene un rango de medición de 0 V a 55 V, entregando una señal de medición acondicionada de 0 V a 3 V (Castellanos, 2013); por ello fue necesario realizar un escalamiento de los valores usados en la simulación.

E. Implementación del controlador para el convertidor en modo *buck*

La tabla 9 muestra las características de funcionamiento del convertidor de prueba en modo *buck*. Por su parte, la tabla 10 muestra los intervalos de valores de las variables de entrada y salida para el controlador difuso, usados para la implementación.

Tabla 9. Características del convertidor de prueba en modo *buck*

Característica	Valores
Intervalo de valores de voltaje de alimentación V_i	[21 - 35 V]
Voltaje de referencia V_{ref}	13.1 V
Intervalo de valores del ciclo de trabajo D	[0.38 - 0.62]

Fuente: autores.

Tabla 10. Intervalos de valores para las variables de entrada y salida del controlador difuso para el funcionamiento del convertidor de prueba en modo *buck*

Tipo	Característica	Valores
Entrada	Intervalo de valores del error	[-21.5, 13.1 V]
Entrada	Intervalo de valores del cambio en el error	[-34.5, 34.5 V]
Salida	Intervalo de valores del cambio del ciclo de trabajo	[-0.625, 0.625 V]

Fuente: autores.

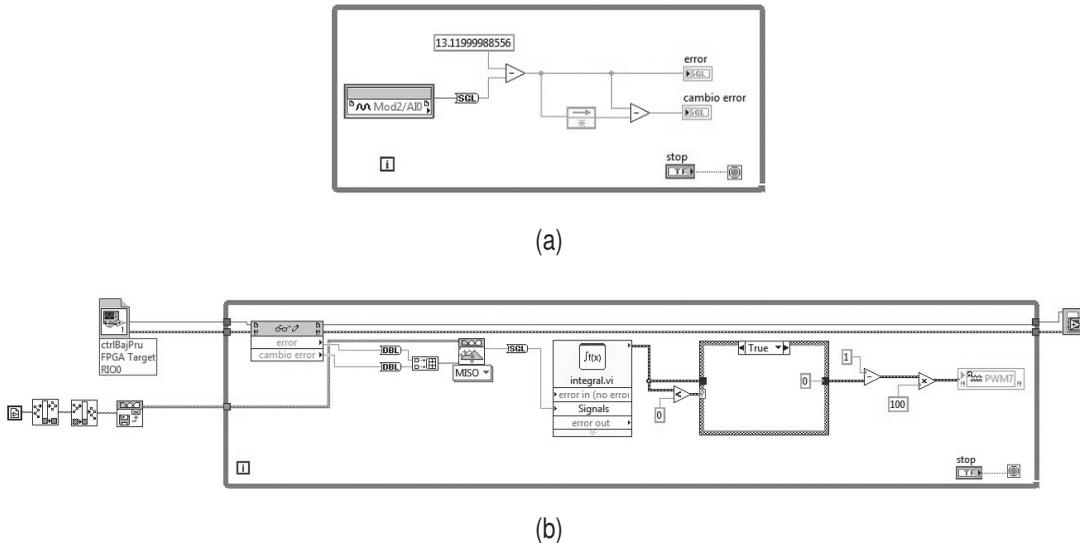


Figura 7. Implementación del controlador en modo *buck*: (a) adquisición de señal, obtención del error y cambio en el error; (b) obtención del ciclo de trabajo

Fuente: autores.

La figura 7 muestra la aplicación desarrollada para el modo *buck*. La aplicación se desarrolló en dos partes: la primera obtiene la señal de salida del convertidor (figura 7-a) a través del puerto 0 del módulo de adquisición del CompactRIO y obtiene el error y el cambio en el error de la señal; la segunda parte (figura 7-b) obtiene el error y el cambio en el error y los envía como entradas al módulo de lógica difusa.

La salida del módulo es integrada para obtener el ciclo de trabajo y saturada para evitar el desbordamiento. Posteriormente, es enviada al puerto 7 del módulo de salida del CompactRIO, el cual la convierte en una señal modulada de ancho de pulso.

F. Implementación del controlador para el convertidor en modo *boost*

Para la implementación en modo *boost* también fue necesario realizar ajustes de escala. La tabla 11 muestra las características de funcionamiento del convertidor,

en tanto la tabla 12 presenta los valores e intervalos de valores de las variables de entrada y de salida para el controlador difuso.

Tabla 11. Características del convertidor de prueba en modo *buck*

Característica	Valores
Intervalo de valores de voltaje de alimentación V_i	[6.5 - 13.1 V]
Voltaje de referencia V_{ref}	26.25 V
Intervalo de valores del ciclo de trabajo D	[0.5 - 0.75]

Fuente: autores.

Tabla 12. Intervalos de valores para las variables de entrada y salida del controlador difuso para el funcionamiento del convertidor en modo *buck*

Tipo	Característica	Valores
Entrada	Intervalo de valores del error	[-78.7, 19.7 V]
Entrada	Intervalo de valores del cambio en el error	[-99, 99 V]
Salida	Intervalo de valores del cambio del ciclo de trabajo	[-0.75, 0.75 V]

Fuente: autores.

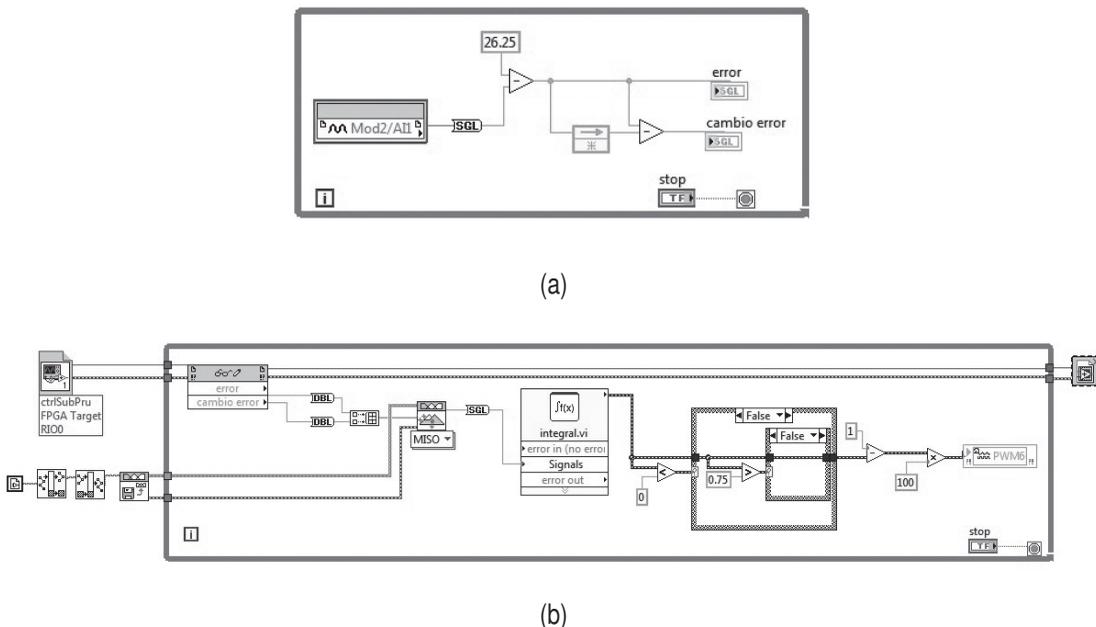


Figura 8. Implementación del controlador en modo *buck*: (a) adquisición de señal, obtención del error y cambio en el error; (b) obtención del ciclo de trabajo.

Fuente: autores.

La implementación del controlador en modo *boost* se muestra en la figura 8. Esta aplicación también se realizó en dos partes: por un lado, la adquisición de datos, a través del puerto 1 del módulo de adquisición del CompactRIO, y obtención de error y cambio en el error (figura 8-a); por otra, la obtención del ciclo de trabajo, a través de la ejecución del módulo de lógica difusa, y su posterior envío al puerto 6 del módulo de salida del

CompactRIO, para convertirla en una señal modulada de ancho de pulso (figura 8-b).

5. Resultados

El controlador fue puesto en ejecución en conjunto con el circuito físico completo para probar su funcionamiento. El circuito incluye un convertidor CD-CD de prueba de 2kW (figura 9).

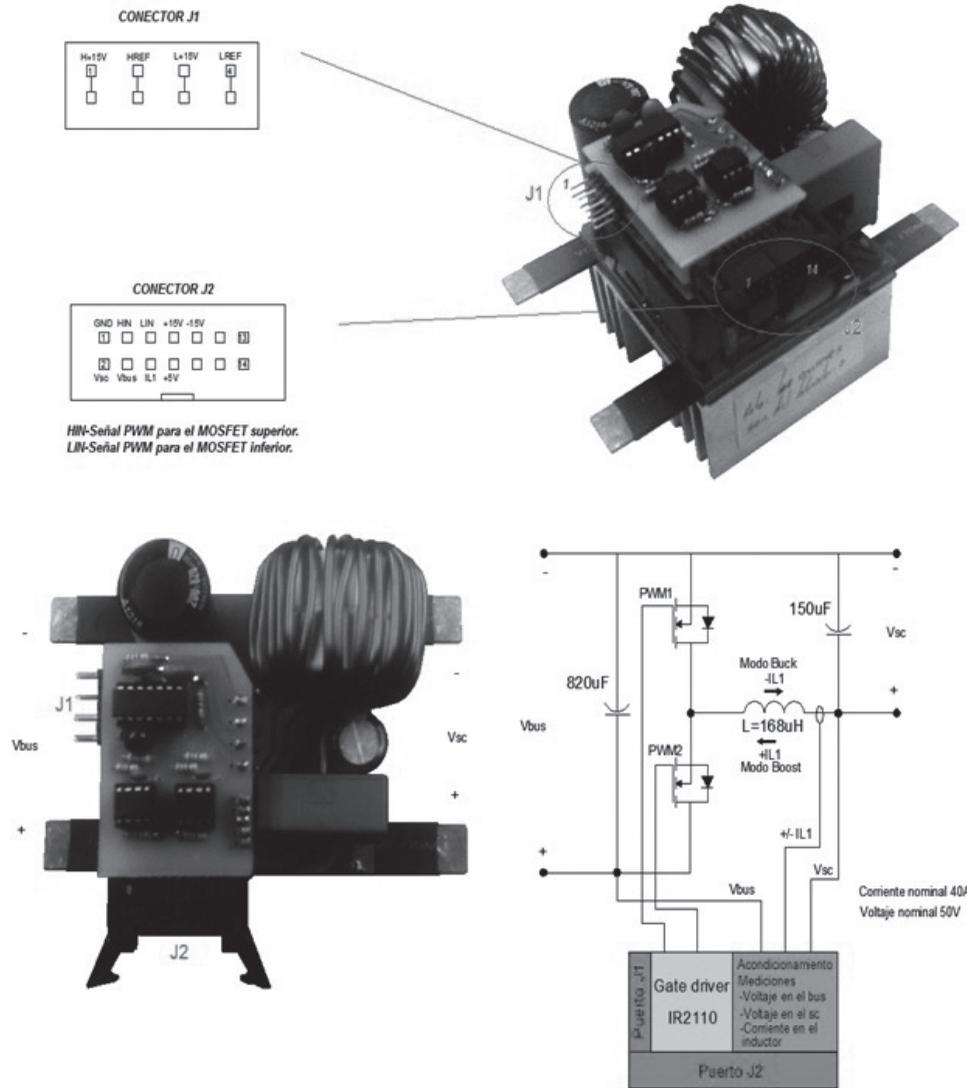


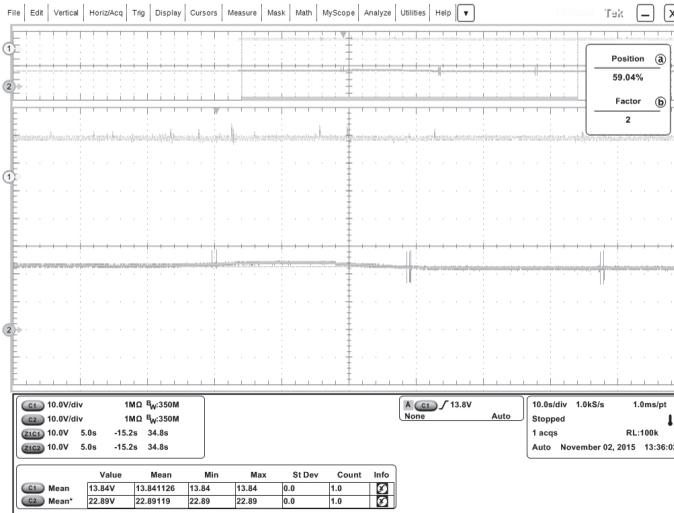
Figura 9. Convertidor CD-CD *buck/boost*: aspecto físico del convertidor, esquemático del convertidor, parámetros y configuración de los puertos de conexión

Fuente: Castellanos (2013).

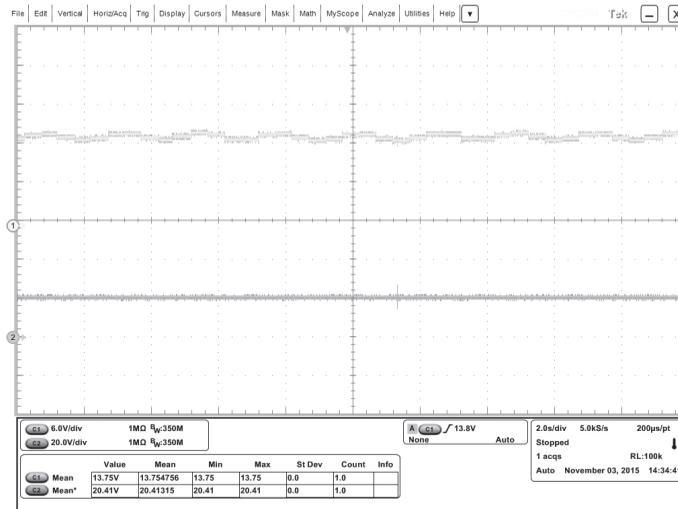
Para la visualización de los resultados, se utilizó un osciloscopio que mostraba, al mismo tiempo, la señal alimentadora y la señal de salida del convertidor, de manera similar a lo que se realizó en la simulación. Esto se hizo tanto para el controlador en modo *buck* como en modo *boost*.

G. Resultados del controlador en modo buck

La figura 10 muestra las capturas de pantalla del osciloscopio en dos diferentes momentos de la ejecución. La señal inferior (azul) corresponde al voltaje de alimentación del convertidor y la señal superior (amarilla) indica la señal de salida de este. En la parte inferior de cada gráfica se muestra el valor de cada señal en el momento de la captura.



(a)



(b)

Figura 10. Resultados en osciloscopio de la ejecución del controlador en modo *buck*

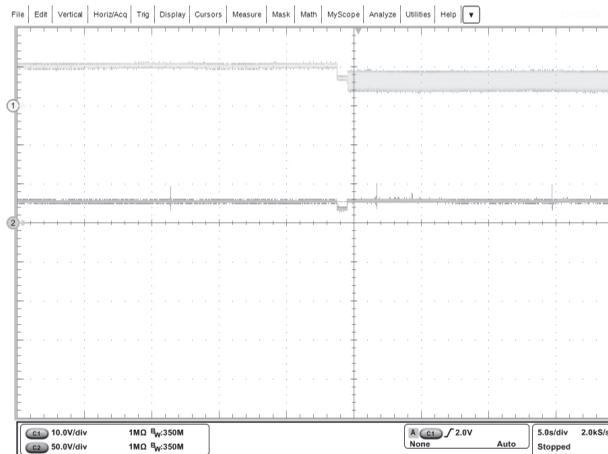
Fuente: autores.

La señal alimentadora varía de 22,89 V (figura 10-a) a 20,41 V (figura 10-b), mientras que la señal de salida varía de 13,84 V a 13,75 V, respectivamente, teniendo un promedio de 13,7 V. Esto indica que se aproxima a la referencia de 13.1 V marcada. La diferencia de 0,6 V en ejecución se considera razonable.

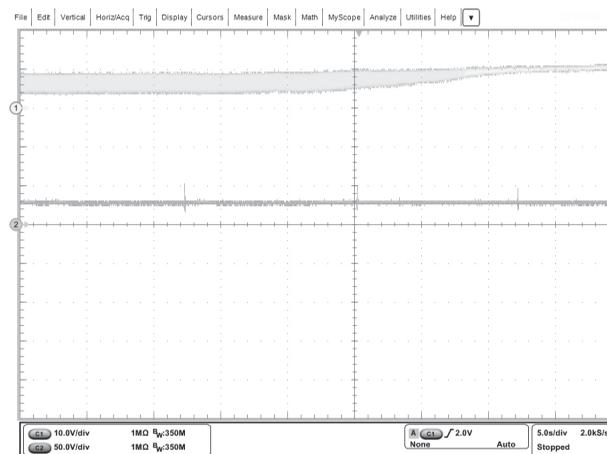
La figura 11 muestra los resultados de la ejecución en dos momentos distintos. La señal superior (amarilla) corresponde al voltaje de alimentación del convertidor y la señal inferior (azul), a la señal de salida de este. En la parte inferior de cada gráfica se muestra el valor de cada señal en el momento de la captura.

H. Resultados del controlador en modo *boost*

De la misma manera, se probó la ejecución del controlador en modo *boost* usando el circuito físico completo con la ayuda del osciloscopio.



(a)



(b)

Figura 11. Resultados en osciloscopio de la ejecución del controlador en modo *boost*

Fuente: autores.

La señal alimentadora se encuentra en el rango de los 8 V (figuras 11-a, 11-b), mientras que la señal de salida se encuentra en el rango de los 27 V, con un promedio cercano a los 27,01 V. Esto indica que se aproxima a la referencia de 26,25 V marcada. La diferencia de entre 0,76 V en ejecución se considera razonable.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el desarrollo de un control para un convertidor CD-CD *buck-boost*, bidireccional, de medio puente, mediante un algoritmo basado en lógica difusa. La principal aportación de este proyecto es la de contar con un sistema de control adecuado a las características de nivel de voltaje y corriente que se manejan en el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México.

Con la simulación se comprobó que la lógica difusa representa una opción adecuada para la resolución al problema planteado, pues los resultados fueron satisfactorios. De igual manera, con la implementación y posterior ejecución del control sobre el convertidor CD-CD, se comprobó la efectividad del algoritmo para lograr que la señal de salida del convertidor se mantenga a un voltaje determinado por una referencia, a pesar de las variaciones de voltaje de la señal de alimentación de este, para ambos sentidos, que era el objetivo que se perseguía con el proyecto.

Agradecimientos

Los autores agradecen al fondo mixto CONACYT-Gobierno del D.F., por el apoyo para la realización de este trabajo a través del proyecto "Sistemas de ahorro de energía para los trenes del Metro de la Ciudad de México", con clave 152954.

Referencias

Elmas, C., Deperlioglu, O. y Sayan, H. H. (2009). Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1540-1548.

Castellanos M., P. (2003). Programación del control para un convertidor CD/CD en un DSP (Reporte interno).

Govindaraj, T. y Rasila, R. (2010). Development of fuzzy logic controller for dc-dc buck converters. *International Journal of Engineering Techsci*, 2(2), 192-198.

Kessal, A., Rahmani, L., Mostefai, M. y Gaubert, J. (2012). Power factor correction based on fuzzy logic controller with fixed switching frequency. *Electronics & Electrical Engineering*, 118.

Khaburi, D. A. y Rostami, H. (2011). Controlling the both dc boost and ac output voltages of a z-source inverter using neural network controller with minimization of voltage stress across devices. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineer-ing*, 7(1).

Mohan, N., Tore, U. y Robbins W. P. (2009). *Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño* (3.ª ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill.

Muruganandam, M., Thangaraju, I. y Madheswaran, M. (2014). *Simulation and implementation of an embedded hybrid fuzzy trained artificial neural network controller for different DC Motor*. Rasipuram: Muthayammal Engineering College.

National Instruments (2014). *NI LabVIEW for CompactRIO: Developer's Guide*. Recuperado de <https://www.ni.com/compactriodevguide/>

Rashid, M. H. (2010). *Power electronics handbook: devices, circuits and applications* (3.ª ed.). Burlington: Elsevier.

Rameshkumar, A. y Arumugam, S. (2009). Design and simulation of fuzzy controlled quasi resonant buck converter. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(5), 91-100.

So, W. C., Tse, C. K. y Lee, Y. S. (1996). Development of a fuzzy logic controller for DC/DC converters: design, computer simulation, and experimental evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11(1), 24-32.