

**CONTROL CONMUTADO BASADO EN PSOC PARA UN CONVERTIDOR DC-
DC**

**JOHNY ARNOLDO CRUZ RODRÍGUEZ
DANIEL ESTEBAN SERRANO CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

**CONTROL CONMUTADO BASADO EN PSOC PARA UN CONVERTIDOR DC-
DC**

**JOHNY ARNOLDO CRUZ RODRÍGUEZ
DANIEL ESTEBAN SERRANO CALDERÓN**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

**RICARDO ALZATE CASTAÑO
Ingeniero Electrónico, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A mis padres Gladys Rodríguez y Arnoldo Cruz por el apoyo fundamental en todo lo que soy.

Y en memoria de mi hermano Óscar Duván Cruz Rodríguez.

Johny Arnoldo Cruz Rodríguez

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres Elma Calderón y Daniel Serrano, quienes hacen parte fundamental en mi formación como persona.

Daniel Esteban Serrano C.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Ricardo Alzate, a Ckristian Ricardo Esteban Durán Blanco y a Nidia Zambrano.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	19
1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.1 Objetivo general.....	22
1.1.2 Objetivos específicos	22
2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA REGULAR LA TENSIÓN DE SALIDA EN UN RECTIFICADOR CONTROLADO	23
2.1 SISTEMA PARA CONTROL DE CIRCUITO RECTIFICADOR CONTROLADO	23
2.1.1 Controlador	24
2.1.2 Planta	25
2.1.3 Actuador	28
2.1.4 Sensor	29
2.1.5 Perturbaciones.....	30
2.1.6 Registro de datos.....	31
2.1.7 Sistema experimental definitivo	31
2.2 AJUSTE DE RANGOS EN EL LAZO DE CONTROL	32
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA REGULAR LA TENSIÓN DE SALIDA DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DC-DC	40
3.1 SISTEMA DE CONTROL PARA CONVERTIDOR DC-DC.....	40

3.1.1 Circuito acoplador.....	41
3.1.2 Perturbaciones.....	42
3.1.3 Sensor	43
3.1.4 Sistema experimental definitivo	43
3.2 AJUSTES DE RANGOS EN EL LAZO DE CONTROL.....	44
4. RESULTADOS	48
4.1 CONTROL PROPORCIONAL.....	48
4.1.1 Resultados control proporcional.....	49
4.2 CONTROL PID	52
4.2.1 Resultados control PID	53
4.3 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES	55
4.3.1 Resultados control por modos deslizantes	56
5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	69
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques para el control de disparo sobre un rectificador controlado a manera de circuito convertidor de potencia	23
Figura 2. Sistema de desarrollo para PSoC CY8CKIT-050	25
Figura 3. PSoC Programmable System on Chip	26
Figura 4. Diagrama esquemático del rectificador controlado	26
Figura 5. Tensión alterna de entrada al circuito rectificador	27
Figura 6. Tensión rectificada de salida al 60% de ciclo útil	27
Figura 7 Módulo PWM en PSoC Creator	28
Figura 8. Circuito de acople entre actuador y planta	29
Figura 9 Sistema de sensado	29
Figura 10. Perturbación en la entrada del sistema	30
Figura 11. Perturbación en la salida del sistema	31
Figura 12. Diagrama de bloques del sistema para captura de datos	31
Figura 13 Sistema experimental definitivo	32
Figura 14. Relación experimental para rangos de entrada y salida	33
Figura 15 Sistema para ajuste de rangos de señal implementado	36
Figura 16 Respuesta del sistema en lazo cerrado ante condiciones nominales	37
Figura 17 Respuesta del sistema perturbado en lazo cerrado	37
Figura 18 Respuesta del sistema perturbado en lazo abierto	38
Figura 19 Acción de control para sistema perturbado en lazo cerrado	38
Figura 20 Acción de control para sistema perturbado en lazo abierto	39
Figura 21. Circuito convertidor Buck implementado	40
Figura 22. Circuito acoplador	42
Figura 23 Tarjeta de perturbaciones en la entrada	42
Figura 24 Tarjeta de perturbaciones en la carga	43

Figura 25 Prototipo final para pruebas	43
Figura 26 Relación experimental para rangos de entrada y salida en convertidor DC-DC	44
Figura 27 Respuesta del sistema en lazo cerrado ante condiciones nominales	45
Figura 28 Respuesta del sistema aplicando y quitando la perturbación en la carga en lazo cerrado	46
Figura 29 Respuesta del sistema aplicando y quitando la perturbación en la carga en lazo abierto	46
Figura 30 Acción de control para sistema perturbado en la carga en lazo cerrado	47
Figura 31 Acción de control para sistema perturbado en la carga en lazo abierto	47
Figura 32 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 1$, en el circuito rectificador controlado	49
Figura 33 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 2$, en el circuito rectificador controlado	50
Figura 34 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 2.5$, en el circuito rectificador controlado	50
Figura 35 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 1$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	51
Figura 36 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 5$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	51
Figura 37 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 8$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	52
Figura 38 Respuesta del sistema y señal de control para controlador PID, en el circuito rectificador controlado	54
Figura 39 Respuesta del sistema y señal de control para controlador PID, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	55

Figura 40 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 1$, en el circuito rectificador controlado	57
Figura 41 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 5$, en el circuito rectificador controlado	57
Figura 42 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 10$, en el circuito rectificador controlado	58
Figura 43 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 1$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	59
Figura 44 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 7$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	59
Figura 45 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 15$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de la tarjeta CY8CKIT-050	24
Tabla 2 Características del rectificador controlado	27
Tabla 3 Parámetros del módulo PWM	28
Tabla 4 Valores de diseño para el circuito convertidor de potencia	41
Tabla 5 Parámetros de controlador PID	53
Tabla 6 Características del convertidos DC-DC ante perturbaciones	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Configuración módulo de PWM en PSoC Creator®.....	74
Anexo B. Sintonización experimental para controlador PID	76

RESUMEN

TÍTULO: CONTROL CONMUTADO BASADO EN PSoC PARA UN CONVERTIDOR DC-DC*

AUTORES: DANIEL ESTEBAN SERRANO CALDERÓN,
JOHNY ARNOLDO CRUZ RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVE: Control por Modos Deslizantes; Convertidor DC-DC Buck; Rectificador Controlado; PSoC.

Descripción:

El presente proyecto de grado aborda la manipulación del comportamiento dinámico de circuitos convertidores de potencia del tipo rectificador controlado y DC-DC reductor (tipo buck), empleando técnicas de control implementadas en un dispositivo programable basado en tecnologías tipo PSoC. Se realiza la configuración de un lazo experimental de control en el cual se ajustan a conveniencia los rangos de señal para evitar regiones de saturación y zona muerta en la operación de la planta. Los parámetros de control se ajustan de manera experimental permitiendo verificar un apropiado desempeño de la técnica por modos deslizantes sobre ambos circuitos, bajo la influencia de perturbaciones tanto en la entrada como en la salida del mismo. También se verifica el desempeño de técnicas de control PID y proporcional y se realiza un ajuste de rango que permite mejorar en gran medida los resultados de implementación de las estrategias de control analizadas. Trabajos complementarios incluyen la implementación y análisis de técnicas avanzadas de control de tipo adaptativo sobre el circuito y la profundización en el uso de las tecnologías PSoC debido a su gran potencial de aplicación en solución de problemas de ingeniería ya que tiene ciertas características que lo hacen de fácil manejo y versátil para cualquier aplicación.

Es conveniente mencionar que los desarrollos presentados en cuanto a diseño, configuración, ajuste de rangos e implementación de estrategias de control, fueron realizados no solamente para un circuito convertidor de potencia DC-DC, sino también para un circuito del tipo rectificador controlado.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD.

ABSTRACT

TITLE: SWITCHING CONTROL BASED ON PSoC FOR A DC-DC POWER CONVERTER*

AUTHORS: DANIEL ESTEBAN SERRANO CALDERÓN
JOHNY ARNOLDO CRUZ RODRÍGUEZ**

KEY WORDS: Buck Power Converter; PSoC; SCR based rectifier; Sliding Mode Control.

DESCRIPTION:

This project addresses the handling grade the dynamic behavior of power converter circuits controlled rectifier type DC - DC reducer (buck type) techniques implemented using a programmable control device type PSoC based technologies. Configuring an experimental control loop which fit ranges convenience to avoid signal saturation regions and dead zone in the operation of the plant is performed. The control parameters are adjusted allowing experimentally verify proper performance of the sliding mode technique on both circuits, under the influence of disturbances in both the input and the output thereof. Performance techniques and proportional PID control is also checked and adjustment range that greatly improves the results of implementing the strategies analyzed control is performed. Additional works include the implementation and analysis of advanced control techniques adaptive type on the circuit and deepening the use of PSoC technology due to its great potential for application in solving engineering problems as it has certain characteristics that make easy to use and versatile for any application .

It is worth mentioning that the developments presented in design, configuration, setting ranges and implementing control strategies were not only made for a DC - DC converter, power circuit but also to a circuit controlled rectifier type.

* Degree work.

** Physico-mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Supervisor: Ricardo Alzate Castaño, PhD.

INTRODUCCION

Durante las últimas décadas, los convertidores de potencia han sido estudiados con el fin de suplir necesidades tanto a nivel residencial como a nivel industrial, ya que de acuerdo con su topología, transforman corriente alterna en directa (AC/DC) o directa en alterna (DC/AC) y elevan o disminuyen los niveles de tensión [1]. En la industria electrónica, la administración del consumo energético de dispositivos se ha convertido en uno de los parámetros determinantes del diseño. De esta manera, surge una fracción de mercado, conocida como “power management” que abarca las técnicas y dispositivos, para que se haga una entrega eficiente de energía a las distintas partes de un sistema electrónico. Algunas de las motivaciones por las que este segmento de mercado sostiene un crecimiento rápido son: a) los sistemas portátiles y embebidos necesitan prolongar la vida de sus baterías, y asimismo reducir el consumo total de energía, b) los equipos electrónicos requieren reducir la disipación de calor para aumentar la estabilidad del sistema, reduciendo los requerimientos de refrigeración, y c) un constante interés por reducir el impacto sobre el medio ambiente que conlleva al consumo inteligente de energía y a la exploración de fuentes alternativas de la misma [2, 3].

Mejorar el desempeño de un circuito convertidor de potencia es por tanto una tarea de creciente interés, debido a la demanda energética del mundo moderno y a la consecuente necesidad de evitar al máximo el desperdicio de energía (aumentando la eficiencia) en esta clase de sistemas eléctricos. Esta eficiencia se manipula a partir de la conmutación de dispositivos en la topología del circuito. Lo anterior facilita la implementación de leyes de control por conmutación digital de señales modificadas en ancho de pulso (PWM – Pulse Width Modulation) [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

En términos de tecnologías disponibles para ejecutar este tipo de técnicas, ha surgido una plataforma embebida de amplia difusión y creciente uso denominada PSoC (Programmable System-on-Chip). Un PSoC se caracteriza por ser un circuito integrado con señales analógicas y digitales mezcladas en un mismo chip, lo cual es beneficioso dado que permite la implementación de sistemas híbridos o, dicho de otra forma, de tecnología mixta, con lo cual se combinan las ventajas de las arquitecturas configuradas y configurables programables. Algunos desarrollos con PSoC reportados en la literatura incluyen: filtración adaptativa con filtros de Kalman [11]; diseño de sistemas de riego [12] y controladores para un brazo robótico [13]. A nivel colombiano se resaltan resultados como: el control adaptativo bio-inspirado [14]; instrumentos virtuales para monitoreo de torres petroleras [15]; medición de presión plantar y aceleración de marcha [16]; interfaz para captura de señales de electro-oculografía [17]; Diseño de un microsistema de medida de impedancia bioeléctrica usando PSoC.[18]; entre otros.

1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los convertidores electrónicos de potencia se han consolidado como un elemento fundamental en los sistemas eléctricos debido esencialmente a su alta demanda. En particular, las topologías DC-DC (con entrada y salida de corriente continua) presentan una amplia gama de uso en tecnologías contemporáneas de dispositivos electrónicos, por ejemplo en todas aquellas que implican el uso de baterías. Este tipo de aplicaciones, cada vez más exigen rapidez de respuesta y estabilidad frente a perturbaciones, además de una alta eficiencia. En algunos casos prácticos estas características son difíciles de alcanzar como consecuencia principal de la naturaleza no-lineal que presentan dichos sistemas (convertidores) ante determinados regímenes de operación.

Debido a esto, el control de convertidores de potencia conmutados se convierte en un área de investigación muy activa tanto en electrónica de potencia como en teoría de control automático. Una alternativa aceptada para estudiar este tipo de fenómenos dinámicos, la constituyen los denominados sistemas híbridos (hybrid dynamical systems) que modelan el comportamiento dinámico del sistema mediante discontinuidades seleccionadas a partir de leyes de conmutación (control conmutado). Como estrategia de control para estos sistemas una solución válida corresponde a las técnicas en el espacio de estados, que a pesar de presentar ventajas para implementación computacional requieren de procedimientos metodológicos que faciliten ejecuciones eficientes de dichas técnicas (algunas veces de complejidad considerable) sobre dispositivos dedicados.

Por todo lo anterior, alrededor de esta temática es válido plantearse inquietudes de investigación como las siguientes: ¿Qué ventajas y/o desventajas presentan estrategias avanzadas de control respecto a las convencionales, en el

comportamiento de circuitos convertidores de potencia? ¿Qué tipo de mejoras en el desempeño de un convertidor DC-DC implica una técnica de control en el espacio de estados? ¿Presenta dicha técnica de control suficiente viabilidad para implementación y ejecución en un PSoC?

El presente proyecto de grado busca realizar aportes y obtener resultados direccionados a la resolución de estas inquietudes, constituyendo una base para posteriores desarrollos afines al interior del grupo de investigación CEMOS que permitan abordar de manera profunda esta temática en el contexto del área estratégica de *Energías* de la Universidad Industrial de Santander.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general Implementar una estrategia de control en el espacio de estados para un convertidor DC-DC empleando un PSoC.

1.1.2 Objetivos específicos

- Mejorar el desempeño de un circuito convertidor de potencia DC-DC ante perturbaciones de entrada y/o de carga a partir de una estrategia de control en el espacio de estados.
- Adecuar el algoritmo de control diseñado para implementación en un dispositivo programable del tipo PSoC.
- Evaluar experimentalmente el desempeño dinámico del circuito convertidor de potencia DC-DC.

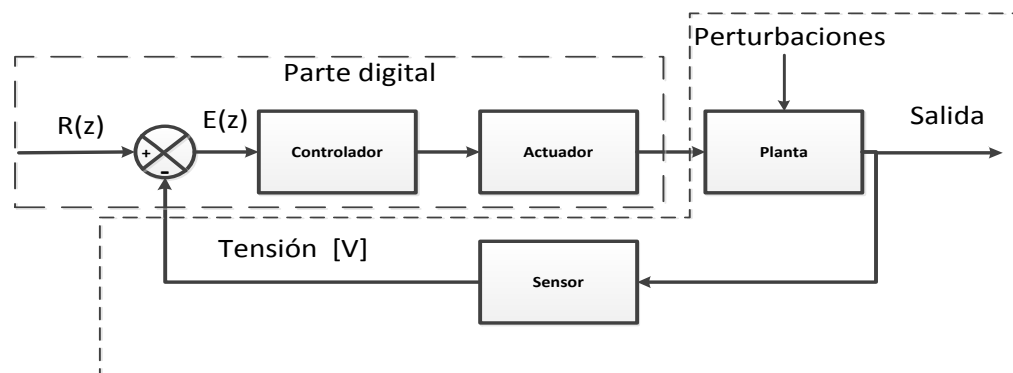
2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA REGULAR LA TENSION DE SALIDA EN UN RECTIFICADOR CONTROLADO

El presente capítulo muestra el diseño e implementación de estrategias de control para regular la tensión de salida en un rectificador controlado, a partir de la conmutación (disparo) de un SCR empleando como dispositivo de gobierno un sistema digital de tipo PSoC (Programable System-on Chip).

2.1 SISTEMA PARA CONTROL DE CIRCUITO RECTIFICADOR CONTROLADO

La Figura 1 presenta el diagrama de bloques general del sistema implementado para realizar el control de disparo sobre un rectificador controlado a manera de circuito convertidor de potencia. A continuación, se realiza una descripción funcional de los elementos que constituyen cada uno de estos bloques.

Figura 1. Diagrama de bloques para el control de disparo sobre un rectificador controlado a manera de circuito convertidor de potencia



Fuente: Autores

2.1.1 Controlador Para programar las tareas de control, se empleó un sistema de desarrollo de referencia CY8CKIT-050 basado en el PSOC® 5PL de Cypress Semiconductors® (ver Figura 2). Esta tarjeta posee otras características las listadas en la Tabla 1. En la misma medida, como ya se mencionó, el sistema de desarrollo opera alrededor de una arquitectura del tipo PSoC, acrónimo en Inglés para un sistema empaquetado programable (Programmable System on chip), y es *la denominación comercial de una familia de microcontroladores programables desarrollada por Cypress Semiconductor en 2002. Esta tecnología de microcontrolador incorpora todo un sistema configurable dentro de un único chip. Comprende una matriz configurable de funciones analógicas, solapada con otra de funciones digitales, proveyendo al sistema de la capacidad de asignar cualquier función a cualquier terminal del circuito integrado, lo que confiere una gran versatilidad al dispositivo*¹ (ver Figura 3).

Tabla 1. Características de la tarjeta CY8CKIT-050

Chip CY8C5868AXI-LP035 TQFP100	
Plataforma PSoC para aplicaciones de 8, 16 y 32 bits	
CPU con precisión analógica y lógica digital	
Núcleo de CPU de 32-bit ARM Cortex-M3	
Fuente de alimentación	9 o 12 [V] por el conector J4 9 [V] batería mediante USB JTAG/SWD
Tres tipos de tierra	GND, tierra universal Vssd, tierra digital Vssa, tierra análoga
Rango de tensión de operación: 0.5 V a 5.5 V	
Sistema versátil de entradas y salidas. 28 a 72 (I/Os)	
Puertos de expansión	Bloque E, puertos análogos Bloque D, puertos digitales
Periféricos analógicos ($1.71 \text{ V} \leq \text{VDDA} \leq 5.5 \text{ V}$)	
24 bloques digitales universales de dispositivos lógicos programables (PLD)	
Cuatro bloques configurables de temporizadores, contadores y PWM de 16-bit	

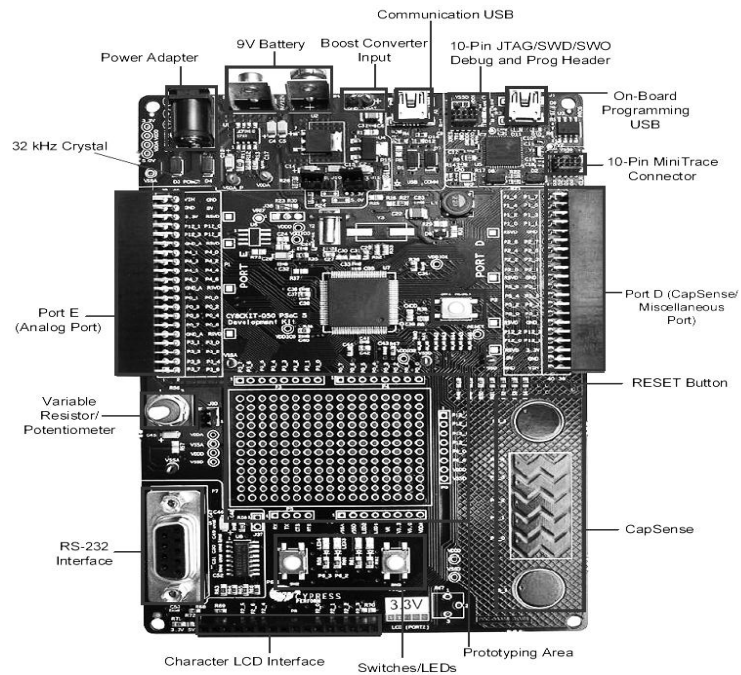
¹ WIKIPEDIA ENCICLOPEDIA LIBRE [en línea] disponible en: www.wikipedia.org

JTAG (4 cables), Cable serial para depurar (SWD) (2 cables)
Reloj en tiempo real (RTC), cristales de 32 [kHz] y 24 [MHz]
oscilador interno de 62-MHz
Un convertidor Boost
Interfaz de comunicación RS-232 (UART)
Botones CapSense y deslizadores
Módulo LCD alimentado a 3,3 [V]
-40 ° C a +85 ° C de temperatura industrial

Fuente: CYPRESS [en línea] disponible en: <http://www.cypress.com>

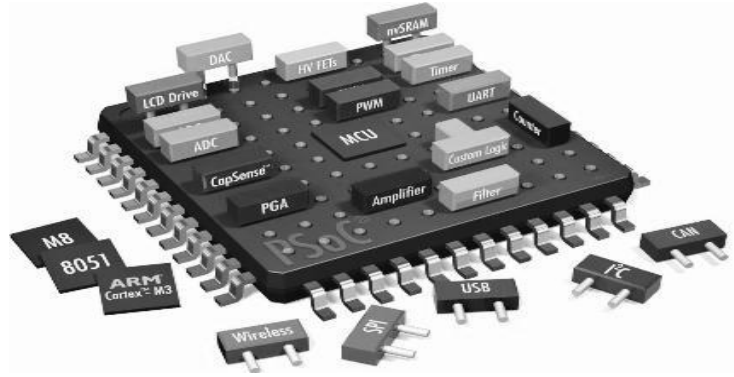
2.1.2 Planta El circuito sobre el cual se realizarán las acciones de control, corresponde con un rectificador controlado de media onda basado en un SCR, según se ilustra en el diagrama esquemático de la Figura 4.

Figura 2. Sistema de desarrollo para PSoC CY8CKIT-050



Fuente: CYPRESS [en línea] disponible en: <http://www.cypress.com>

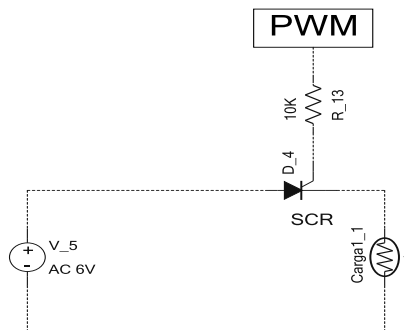
Figura 3. PSoC Programmable System on Chip



Fuente: CYPRESS [en línea] disponible en: <http://www.cypress.com>

Las características del circuito diseñado se resumen en la Tabla 2. Como dispositivo de conmutación se empleó un SCR de referencia C106D; como carga una bombilla de 6[V] / 6 [W]; y como tensión de entrada 7.58 [Vrms]. Por tanto, empleando como estímulo de activación una señal de PWM con 60 [Hz] y 60 [%] de ciclo útil (según se explica en 2.1.3), en la Figura 5 se observa la forma de onda de la tensión de entrada con una pequeña distorsión en el lóbulo superior, esto debido al arreglo que se hizo en la perturbación a la entrada del circuito, mientras que en la figura 6 se ilustra la señal de salida con un offset de 1[V] esto debido al efecto del INA128, la ilustración de estas dos figuras se realizaron en lazo abierto para valores nominales (i.e. sin la incidencia de perturbaciones).

Figura 4. Diagrama esquemático del rectificador controlado



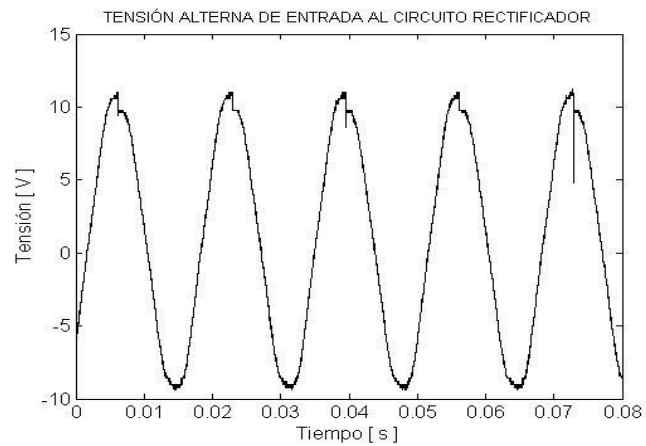
Fuente: Autores

Tabla 2 Características del rectificador controlado

PARÁMETRO	VALOR
Tensión de entrada V_{in}	7.58 [Vrms]
Tensión de salida V_{out}	1.31 [Vavg]
Resistencia de la carga	3.3 [Ω]
Frecuencia de conmutación	60 Hz
Ciclo útil del PWM	60%

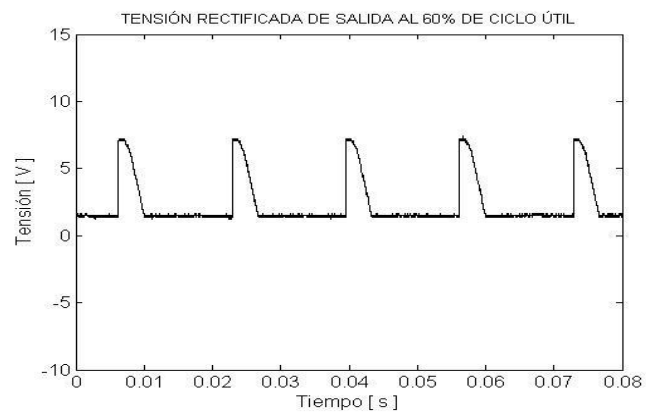
Fuente: Autores

Figura 5. Tensión alterna de entrada al circuito rectificador



Fuente: Autores

Figura 6. Tensión rectificada de salida al 60% de ciclo útil



Fuente: Autores

2.1.3 Actuador Como dispositivo de actuación, encargado de ejecutar las instrucciones de control en la planta, se configuró el módulo de PWM del dispositivo de proceso con los parámetros ilustrados en la Tabla 3.

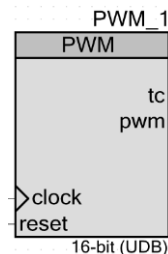
Tabla 3 Parámetros del módulo PWM

Tipo de implementación	UDB (Bloque digitales universales)
Resolución	16 bits
Periodo	10.923 ms
Base de tiempo	6 MHz
Modo de PWM	Salida única

Fuente: Autores

Para realizar la configuración de este módulo con los parámetros respectivos, se procedió como se muestra en el Anexo A. En la Figura 7 se observa la representación gráfica para el módulo de PWM en el software PSoC creator 2.2, paquete que permite realizar la configuración de periféricos del PSoC.

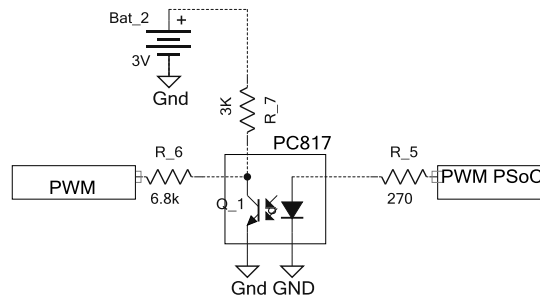
Figura 7 Módulo PWM en PSoC Creator



Fuente: Autores

Como dispositivos de acople entre la salida del módulo de PWM y la entrada al circuito (planta), se empleó un arreglo de resistencias junto con un optoacoplador de referencia SHARP-PC817 de modo tal que se pudieran aislar las tierras digital de la tarjeta y la analógica del rectificador. La configuración circuital resultante a partir de la hoja de datos del fabricante se presenta en la Figura 8.

Figura 8. Circuito de acople entre actuador y planta

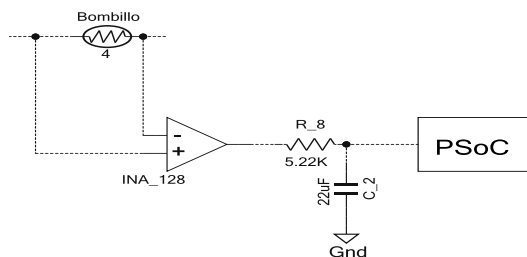


Fuente: Autores

2.1.4 Sensor Para obtener una medida cuantitativa de la magnitud de salida del sistema (planta), se realizó un sensado de tensión en la carga (bombilla), midiendo la diferencia de potencial en dicho punto, y representando una componente de DC proporcional a la tensión rectificada, posterior a un filtro pasa bajos.

Para realizar la toma de esta señal se empleó un amplificador de instrumentación de referencia INA128 Texas Instruments®. Posteriormente, la señal amplificada se hizo pasar a través de un filtro pasivo de paso bajo tipo RC diseñado para una frecuencia de corte de 1.4 [Hz], con pendiente de -19 [dB/dec] y bandas de paso y atenuación dadas respectivamente por 1.9 [dB] y -8.4 [dB]. Lo anterior pudo conseguirse empleando una resistencia de 5.22 [kΩ] y un capacitor de 22 [μF]. Un diagrama esquemático para el sistema de sensado implementado se ilustra en la Figura 9.

Figura 9 Sistema de sensado

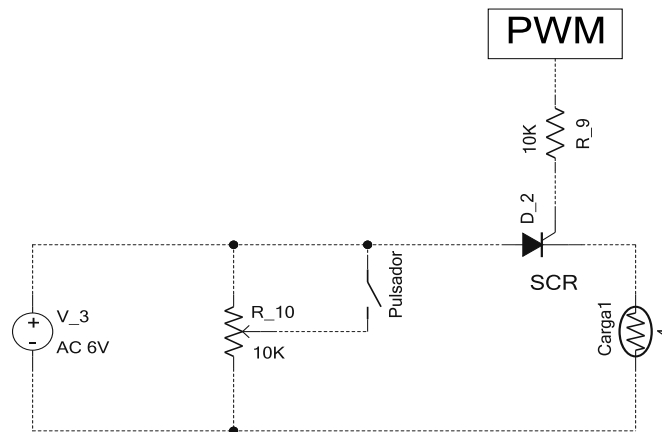


Fuente: Autores

Asimismo, la señal analógica obtenida a la salida del filtro se acopló como entrada al sistema de proceso a través de un seguidor de tensión configurado en su interior, con referencia a la tierra analógica de la tarjeta.

2.1.5 Perturbaciones Para perturbar el suministro de entrada, se utilizó un divisor de tensión junto con un pulsador (normalmente cerrado), de forma tal que, al activar el pulsador la tensión se reduzca súbitamente un 10%, según se ilustra en la Figura 10.

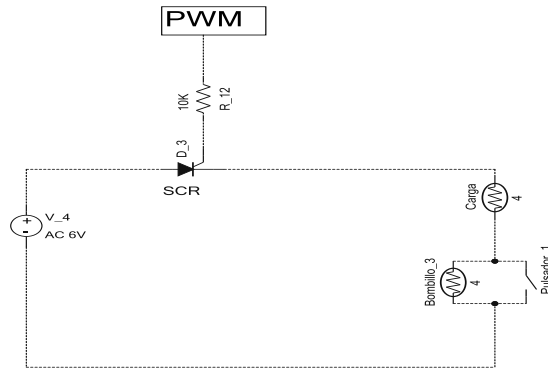
Figura 10. Perturbación en la entrada del sistema



Fuente: Autores

De otro lado, para la perturbación en la salida se empleó una bombilla en paralelo con un pulsador (normalmente cerrado). Estos elementos se conectaron en serie a la carga, de manera que el pulsador pudiera conectar o no una carga adicional a la nominal, tal y como se ilustra en el esquema de la Figura 11.

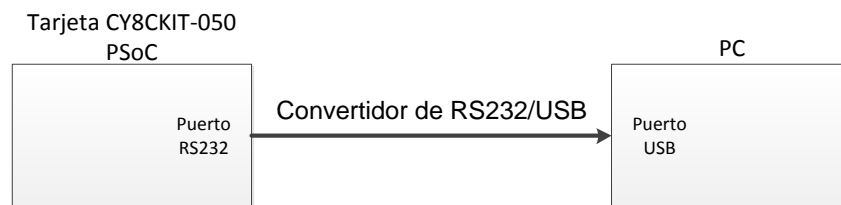
Figura 11. Perturbación en la salida del sistema



Fuente: Autores

2.1.6 Registro de datos Para la correspondiente captura de datos de medida y actuación, se empleó la interfaz de comunicación RS232 del dispositivo de proceso, acoplada a un convertidor RS232/USB. Estos datos seriales fueron leídos desde un PC a través de captura de puerto serial vía Hyperterminal. La configuración del puerto correspondió con 9600 baudios a 8 bits. La transmisión de datos se almacenó en un archivo de texto (tipo .txt) con una estructura por línea de texto siguiendo el siguiente modelo: [referencia, medida, tiempo, control, error]. En la Figura 12 se ilustra un diagrama de bloques genérico del sistema implementado para adquisición y registro de datos.

Figura 12. Diagrama de bloques del sistema para captura de datos

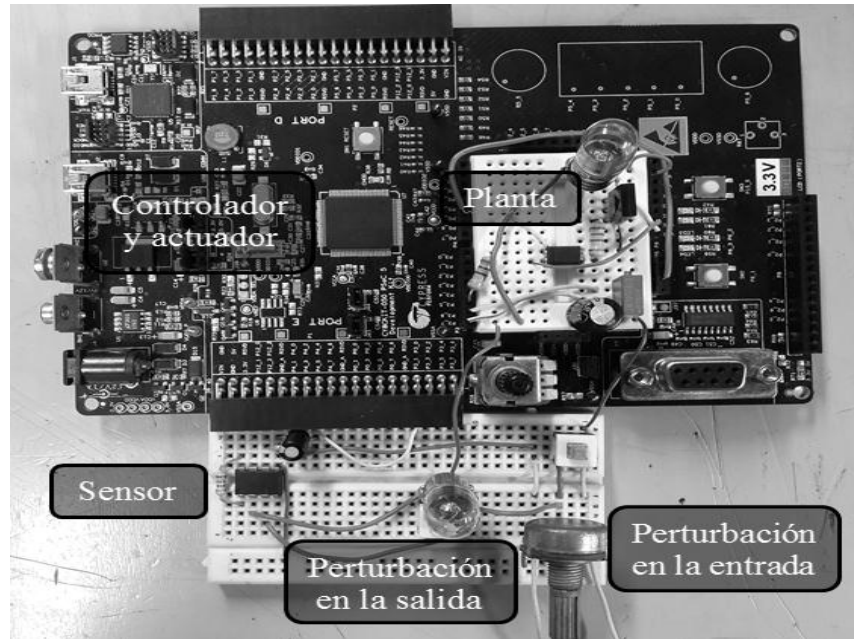


Fuente: Autores

2.1.7 Sistema experimental definitivo Una vez configurados los subsistemas descritos en la presente sección, se constituyó el sistema experimental mostrado

en la Figura 13, para realizar el control de disparo sobre un circuito rectificador de media onda basado en SCR.

Figura 13 Sistema experimental definitivo



Fuente: Autores

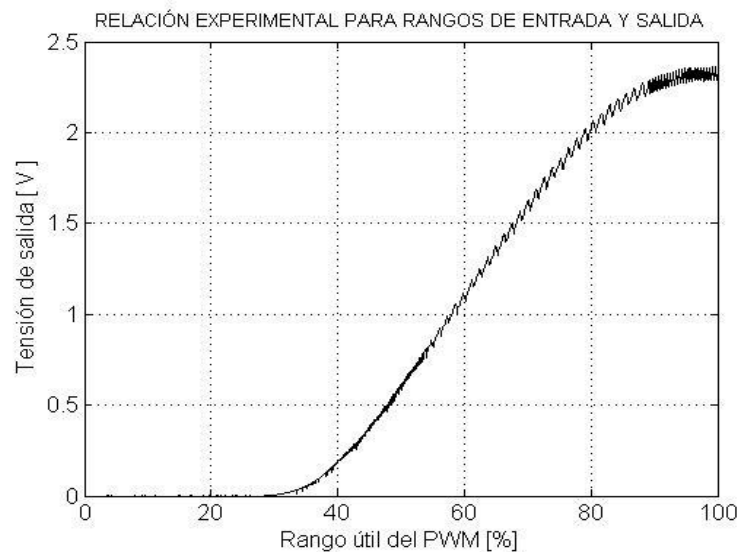
2.2 AJUSTE DE RANGOS EN EL LAZO DE CONTROL

Una vez constituidas y acopladas las diferentes etapas del sistema de control, es necesario realizar un ajuste de rango en las señales interactuantes, con el objetivo de reducir la saturación de señales producto de operaciones aritméticas y/o lógicas en el dispositivo de cómputo (PSoC), teniendo en cuenta que se asume operación del sistema en un régimen de linealidad.

Para ello entonces, debe determinarse inicialmente para la planta, el rango de valores posibles en la medida respecto a los valores posibles en la entrada. De esta manera se generan los datos visualizados en la Figura 14, la cual relaciona

en su eje horizontal el porcentaje de ciclo útil, mientras en el eje vertical se hace lo propio para la tensión de salida medido en la resistencia de carga. De la gráfica se observa la existencia de una relación de proporcionalidad entre entrada y salida, aproximadamente en el rango: 30 [%] – 90 [%] de la entrada y 0 [V] – 2.2 [V] en la salida; evitando fenómenos no lineales de banda muerta y saturación en la respuesta del sistema.

Figura 14. Relación experimental para rangos de entrada y salida



Fuente: Autores

A partir de lo anterior, se establecerá como condición nominal de operación el valor medio del rango de operación de la planta; es decir cerca de (60 [%], 1.1 [V]) restringiendo por tanto el error (diferencia entre las tensiones de referencia y medida) a valores en el intervalo [-2.2 [V], 2.2 [V]]. Adicionalmente, se define un mapeo entre la señal de error (dada en [V]) y la salida del actuador (ciclo útil del PWM en [%]), considerando una aproximación lineal de dos puntos para el rango de operación seleccionado, es decir, siendo $p_1 = (30 \text{ [%]}, 0 \text{ [V]})$ y $p_2 = (90 \text{ [%]}, 2.2 \text{ [V]})$ los puntos representativos, la función de primer orden que aproxima la curva entre dichos puntos viene dada por:

$$y = \frac{2,2}{60}(x - 30), \quad (2.1)$$

siendo y el valor de la tensión de salida y x el porcentaje de ciclo útil aplicado en el actuador. Con esta relación es posible entonces resolver los valores de ciclo útil a partir de una entrada de tensión mediante:

$$x = \frac{60}{2,2}y + 30, \quad (2.2)$$

donde para un bloque de acople entre el controlador y la salida hacia el actuador, y haría las veces de entrada y x la salida de porcentaje de ciclo útil correspondiente. Sin embargo, y en esta última expresión debe ajustarse a la escala de la señal de control u , ya que esta, es la verdadera señal de entrada al bloque de acople entre el controlador y el actuador (acondicionador de rangos de señal). Este ajuste se consigue mediante la expresión:

$$y = \begin{cases} \frac{1,1}{2,2}(u + 2,2), & u \leq 0 \\ \frac{(2,2-1,1)}{2,2}u + 1,1, & u > 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

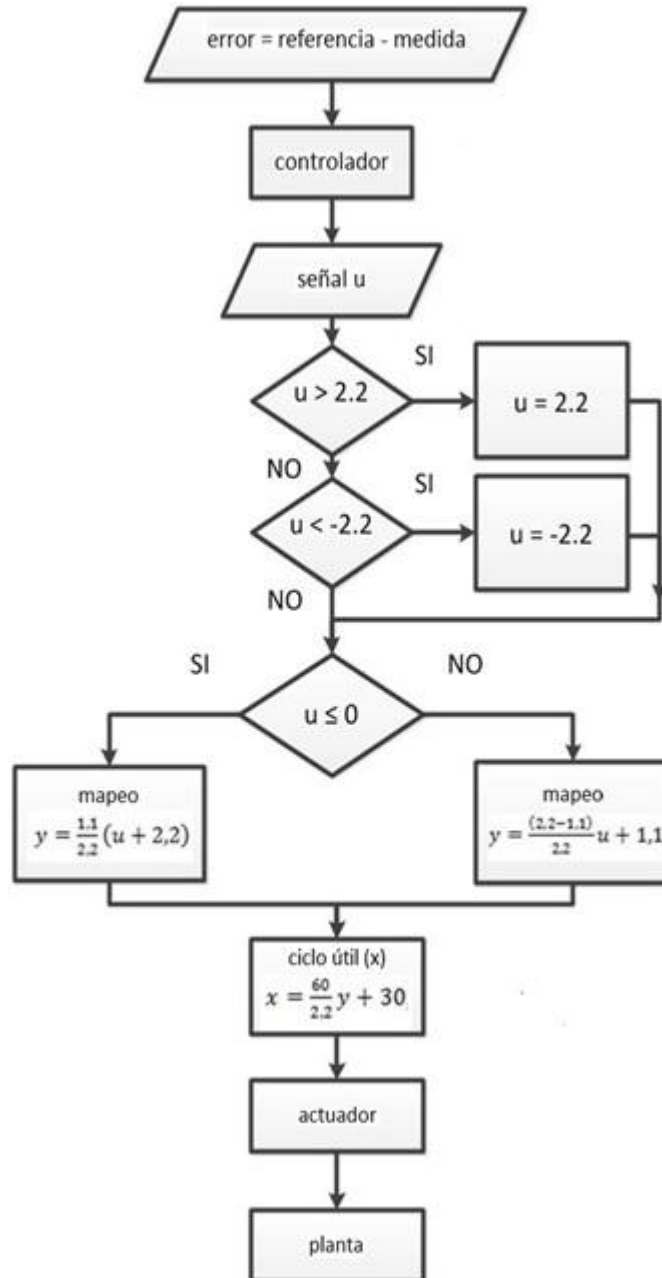
Para valores de u en el rango de $[-2.2, 2.2]$, de esta manera el acondicionamiento de rango sugerido implica que, la señal de error constituida como la diferencia entre las señales de referencia y medida, será alterada por la acción de control para producir como salida la señal u , misma que debe ser evaluada a través de (2.3) para adecuarse a los rangos de tensión permitidos en la planta, para después, posterior a ser evaluado el resultado mediante (2.2), permita obtener el valor de estímulo apropiado para la planta en términos de [%] de ciclo útil para el generador de señal PWM. La Figura 15 ilustra mediante un diagrama de bloques la estructura del sistema para ajuste de rangos de señal implementado.

Posteriormente, empleando estas consideraciones se realizó la implementación de un controlador proporcional de ganancia unitaria, equivalente a un simple cierre de lazo con realimentación negativa. La Figura 16 muestra la forma de onda obtenida para la tensión medida en la salida del circuito rectificador controlado, sin perturbación, cuando la referencia se encuentra en el valor nominal de 1.1 [V].

De otro lado, en la Figura 17 se observa el comportamiento del sistema en lazo cerrado afectado por la acción de perturbaciones en el sistema haciendo que la señal de salida baje su valor de tensión en un 33.61%, lo cual contrasta con el resultado visualizado para el comportamiento del sistema perturbado en lazo abierto de la Figura 18, donde la señal de salida baja su valor en un 50.42% lo cual indica que se ve más afectada por la perturbación.

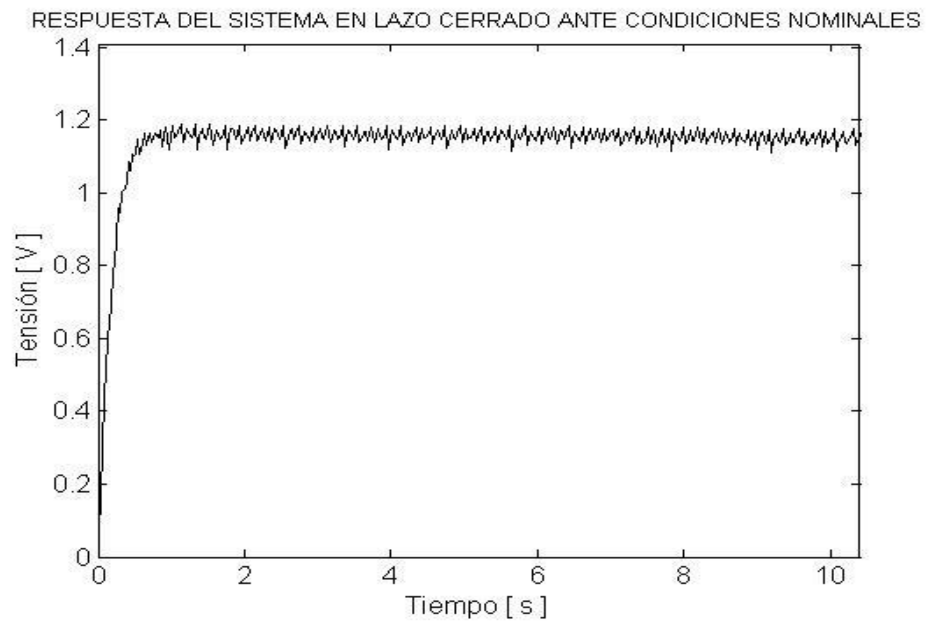
Asimismo las Figuras 19 y 20 muestran el comportamiento de la señal de control respectivamente para cada caso. Todo esto constituye el preámbulo que permitirá verificar las acciones de control propuestas para el sistema en el capítulo 4.

Figura 15 Sistema para ajuste de rangos de señal implementado



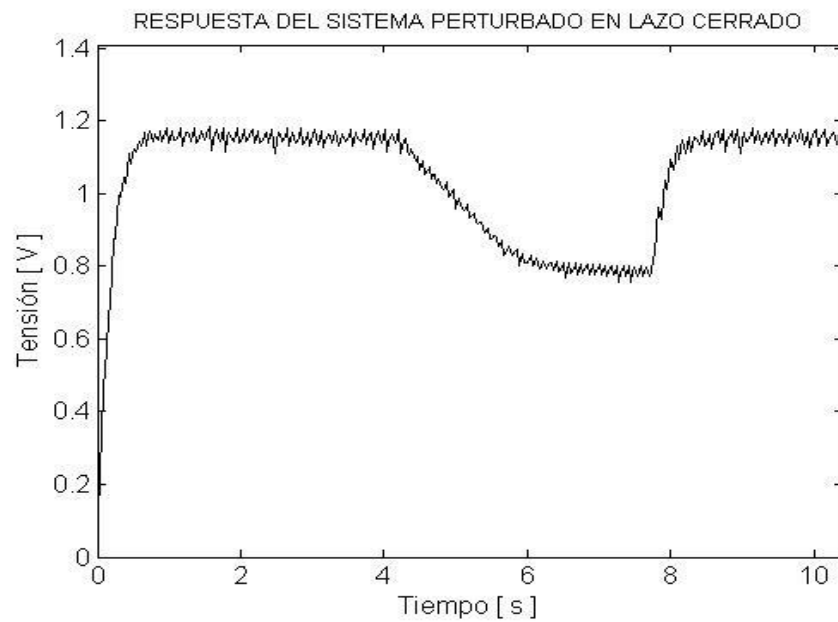
Fuente: Autores

Figura 16 Respuesta del sistema en lazo cerrado ante condiciones nominales



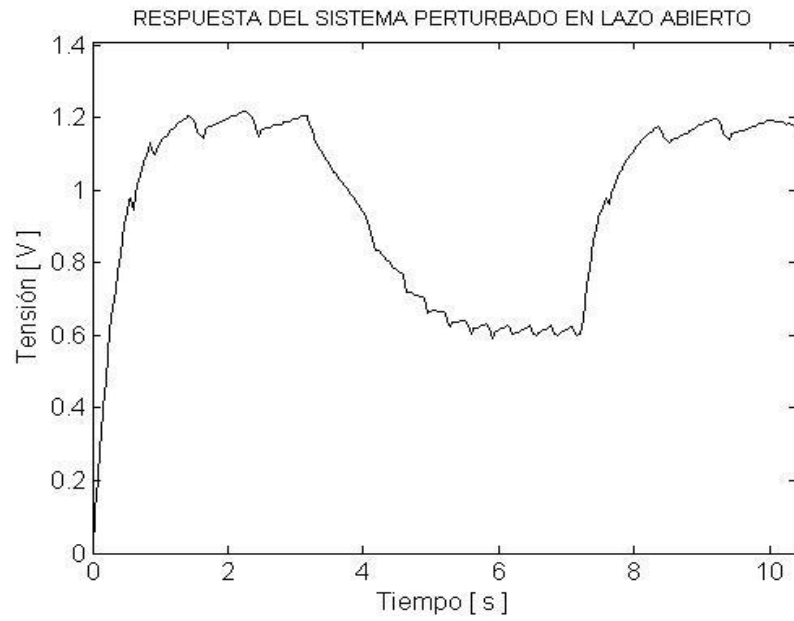
Fuente: Autores

Figura 17 Respuesta del sistema perturbado en lazo cerrado



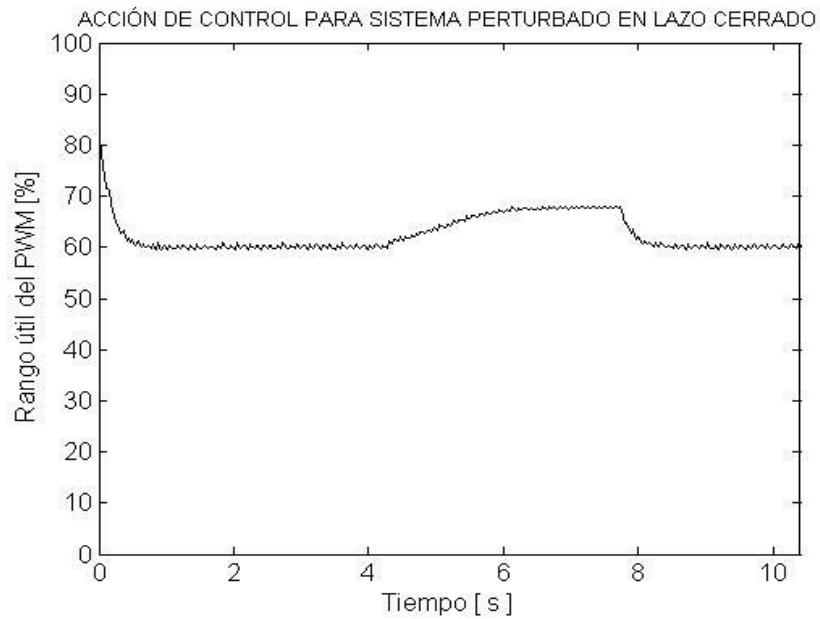
Fuente: Autores

Figura 18 Respuesta del sistema perturbado en lazo abierto



Fuente: Autores

Figura 19 Acción de control para sistema perturbado en lazo cerrado



Fuente: Autores

Figura 20 Acción de control para sistema perturbado en lazo abierto



Fuente: Autores

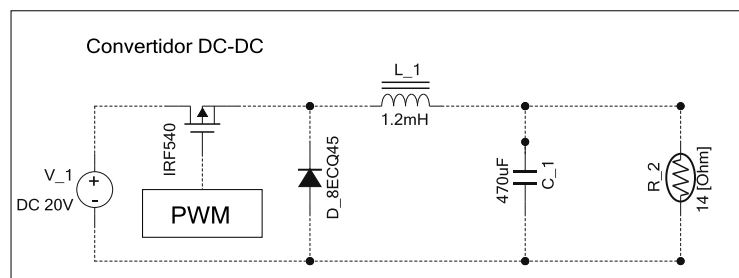
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA REGULAR LA TENSIÓN DE SALIDA DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DC-DC

En complemento a los desarrollos presentados previamente para el rectificador controlado, el presente capítulo muestra el diseño e implementación de estrategias de control para regular la tensión de salida de un convertidor de potencia DC-DC tipo Buck, utilizando como dispositivo de gobierno un sistema digital del tipo PSoC (Programmable System-on Chip). Asimismo, se expone el funcionamiento de cada etapa del prototipo experimental en forma detallada.

3.1 SISTEMA DE CONTROL PARA CONVERTIDOR DC-DC

El sistema experimental configurado para regular la tensión de salida de un convertidor de potencia DC-DC tipo reductor (Buck), se basa en el diagrama de bloques de la Figura 1 presentado y explicado en el capítulo anterior, con la única modificación se realizó sobre la planta, que ahora corresponde con un circuito representado por el diagrama esquemático de la Figura 21.

Figura 21. Circuito convertidor Buck implementado



Fuente: Autores

Este convertidor DC-DC reductor, conocido también como Buck, es un circuito eléctrico constituido por elementos pasivos que proporciona niveles de tensión DC en su salida inferiores a la tensión DC aplicada en su entrada, a partir de la acción controlada de un conmutador electrónico [19]. Los valores circuitales para el circuito correspondiente al convertidor se encuentran incluidos en la Tabla 4 y son producto del diseño e implementación realizados en los proyectos de grado concluidos [20], [21].

Tabla 4 Valores de diseño para el circuito convertidor de potencia

PARÁMETRO	VALOR
Tensión de entrada	20 [V]
Tensión de carga	8 [V]
Resistencia de carga	14.2 [Ω]
Frecuencia de conmutación	10 [kHz]
Ciclo útil PWM	40%
Inductancia L	1.2 [mH]
Capacitancia C	470 [μ F]

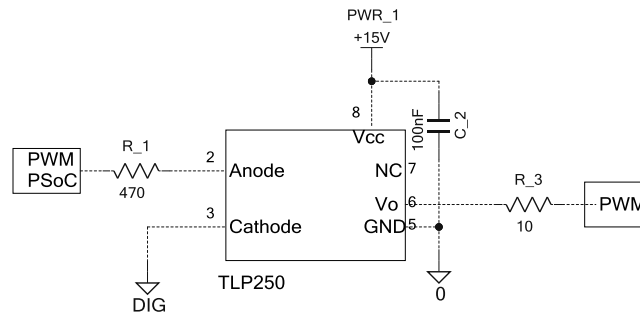
Fuente: [20], [21].

Adicionalmente, para facilitar la interacción entre el dispositivo de proceso y el circuito convertidor se requirió incluir la etapa de acople que se ilustra a continuación [20], [21].

3.1.1 Circuito acoplador Como acople entre la salida del módulo de PWM y la entrada al circuito, se empleó un arreglo de resistencias junto con un optoacoplador, ya que gracias a su interconexión óptica es posible proteger el dispositivo programable de picos de tensión o corriente. Se seleccionó el optoacoplador de referencia TLP250 debido a que trabaja a una frecuencia mayor a la que conmuta el convertidor de potencia DC-DC, además porque es un optoacoplador acondicionador de señal para compuerta de MOSFETs, lo cual permite amplificar la señal de PWM dada por la plataforma programable a un nivel

adecuado para el circuito convertidor. La configuración utilizada para esta etapa fue tomada de la hoja de datos del fabricante y es mostrada en la Figura 22.

Figura 22. Circuito acoplador

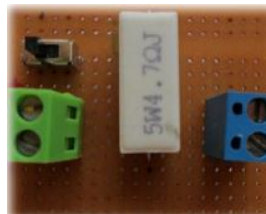


Fuente: [20], [21].

Adicionalmente, se consideraron las perturbaciones en el suministro de entrada y en la resistencia de carga que se describen a continuación.

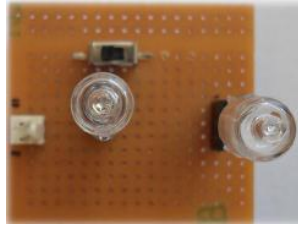
3.1.2 Perturbaciones Se construyeron dos circuitos de perturbaciones [20], [21]: uno para la entrada de tensión al convertidor DC-DC que consta de un interruptor y una resistencia cerámica de $4.6 [\Omega] / 5 [W]$, que al ser conectada a la rama de alimentación causa una caída de tensión del 15%. (esta tarjeta se puede observar en la Figura 23); el otro corresponde con un arreglo de interruptores manuales que modifican el valor nominal de la carga (aumentándola en un 50% y 100% aproximadamente), tras ubicar bombillas en serie sobre la misma rama del circuito donde se localiza la carga original, como se muestra en la Figura 24.

Figura 23 Tarjeta de perturbaciones en la entrada



Fuente: [20], [21].

Figura 24 Tarjeta de perturbaciones en la carga

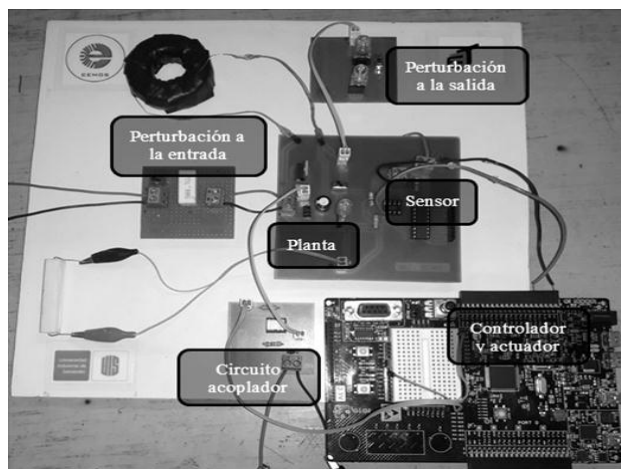


Fuente: [20], [21].

3.1.3 Sensor Para tener una medida adecuada de la tensión en carga del sistema se realizó un arreglo de resistencias de tal modo que la señal de salida de 0-20 [V] se redujera de 0-3.27 [V] tensión que soporta el ADC del PSoC.

3.1.4 Sistema experimental definitivo Una vez constituidas cada una de las etapas anteriormente descritas, fueron interconectadas en el prototipo experimental mostrado en la Figura 25, con el que se realizaron las pruebas mostradas a continuación. Es necesario mencionar que para este caso también se empleó la configuración para almacenamiento de datos experimentales descrita en el numeral 2.1.6.

Figura 25 Prototipo final para pruebas

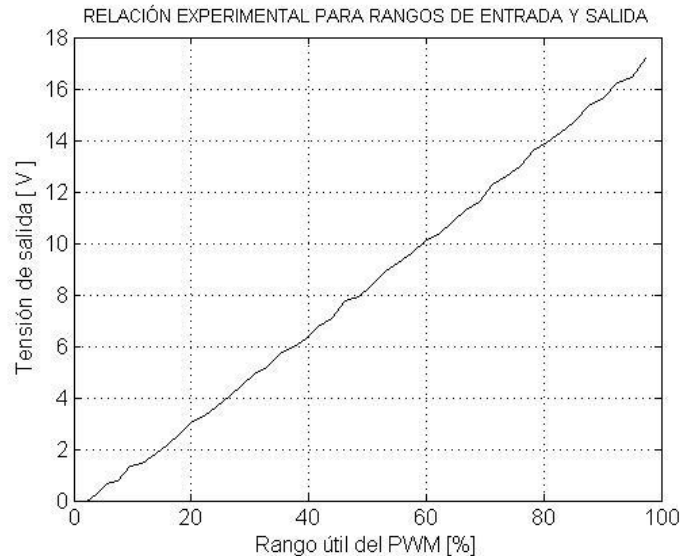


Fuente: Autores

3.2 AJUSTES DE RANGOS EN EL LAZO DE CONTROL

Para realizar este ajuste se procedió de manera semejante a como fue planteado en la sección 2.2. La relación de tensión de salida del convertidor (eje vertical) respecto al porcentaje de ciclo útil en el actuador (eje horizontal) para el circuito convertidor de potencia DC-DC obtenida experimentalmente, se presenta en la Figura 26. A partir de este resultado se verifica una relación proporcional (y más aún lineal) entre las variables de entrada y la salida para el rango 2 [%] – 97 [%] de la entrada y 0 [V] – 16.6 [V] en la salida.

Figura 26 Relación experimental para rangos de entrada y salida en convertidor DC-DC



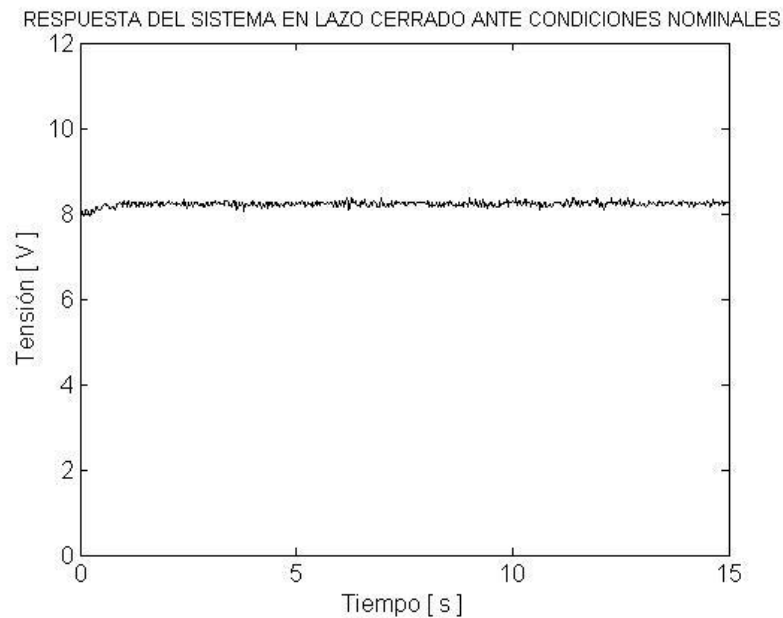
Fuente: Autores

De las condiciones anteriores se establece un punto de operación nominal en la mitad de la escala, es decir, alrededor de (50 [%], 8.3 [V]), restringiendo el error a valores en el intervalo de [-16.6 [V], 16.6 [V]]. Las ecuaciones de mapeo y el algoritmo de ajuste de rangos se realizaron a partir de estos datos, conforme a los desarrollos del capítulo 2.

En términos de resultados experimentales, la Figura 27 se muestra la forma de onda obtenida para la tensión medida a la salida de circuito en lazo cerrado sin perturbación, para un valor referencia nominal de 8.3 [V]. Asimismo, la Figura 28 permite observar el efecto sobre la tensión de salida ocasionado por perturbaciones en el sistema realimentado en donde la señal de salida tiene una caída del 13.17%, mostrando además una mejor respuesta en comparación al lazo abierto ilustrado en la Figura 29 en donde la señal de salida tiene una caída del 15.82%, con ilustración respectiva para las señales de control en cada caso dadas las Figuras 30 y 31.

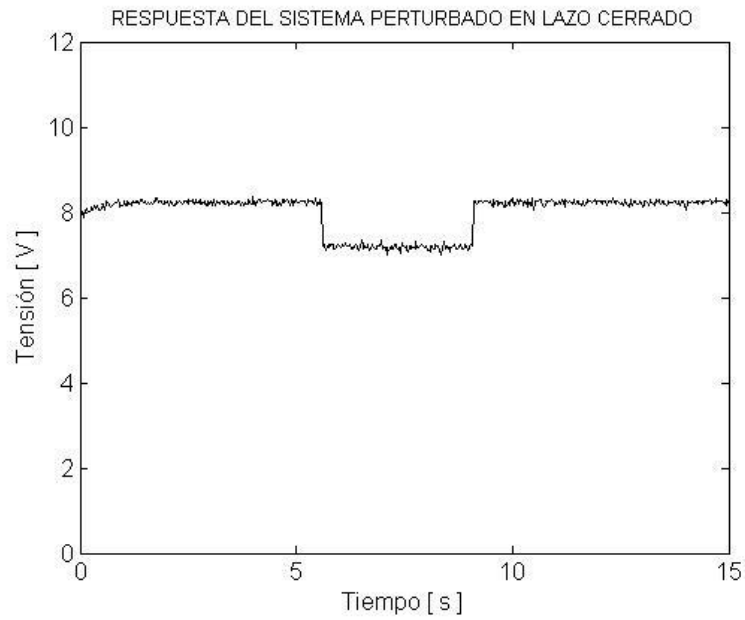
Todo esto constituye el preámbulo que permitirá verificar las acciones de control propuestas para el sistema en el capítulo 4.

Figura 27 Respuesta del sistema en lazo cerrado ante condiciones nominales



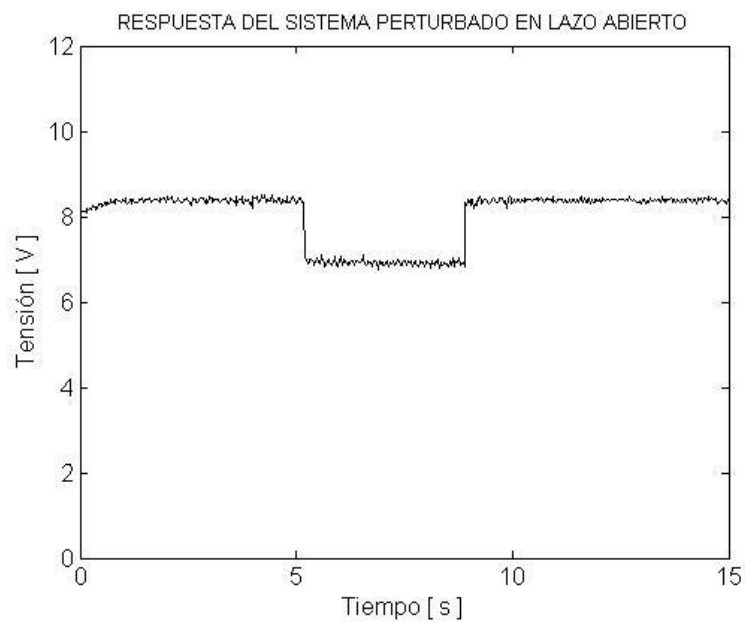
Fuente: Autores

Figura 28 Respuesta del sistema aplicando y quitando la perturbación en la carga en lazo cerrado



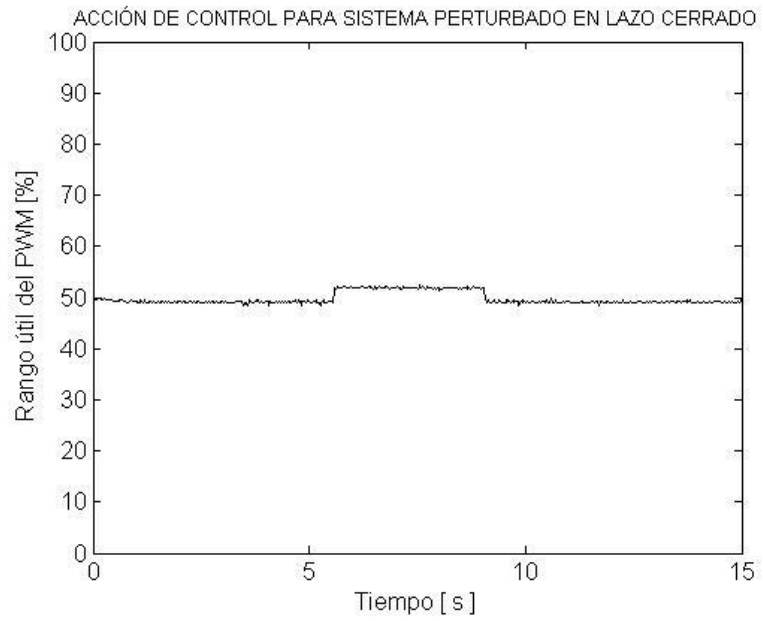
Fuente: Autores

Figura 29 Respuesta del sistema aplicando y quitando la perturbación en la carga en lazo abierto



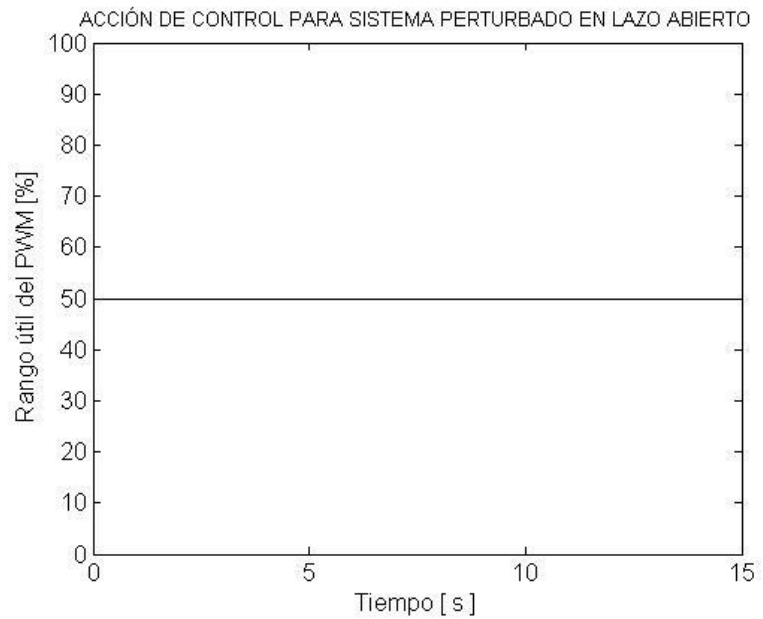
Fuente: Autores

Figura 30 Acción de control para sistema perturbado en la carga en lazo cerrado



Fuente: Autores

Figura 31 Acción de control para sistema perturbado en la carga en lazo abierto



Fuente: Autores

4. RESULTADOS

Teniendo los sistemas construidos e instrumentados, con sus respectivos lazos de control apropiadamente calibrados, se procederá en el presente capítulo con la verificación del desempeño ante la acción de perturbaciones para tres acciones de control (proporcional, PID y modos deslizantes) aplicadas sobre cada sistema. Se realizará una descripción general de los algoritmos de control implementados y de los resultados obtenidos para cada caso.

4.1 CONTROL PROPORCIONAL

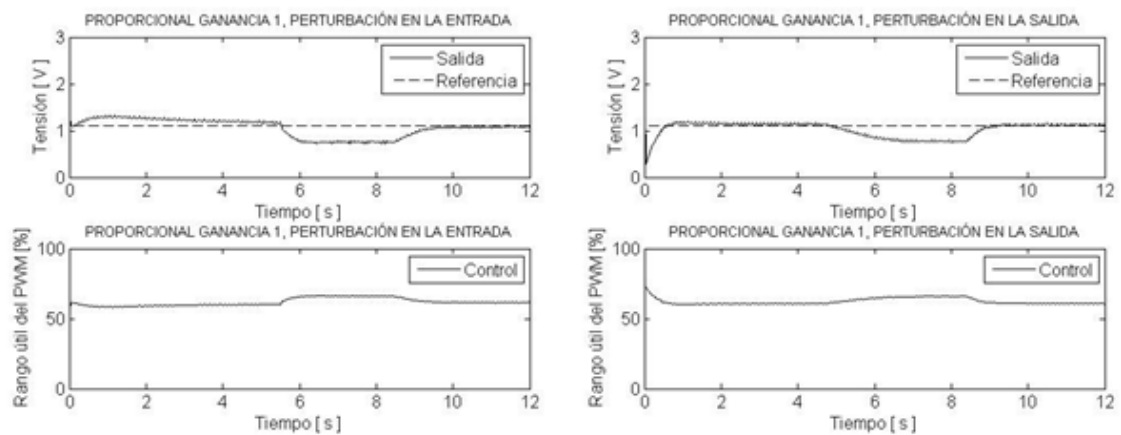
La acción de control más elemental corresponde con una señal proporcional al error de medida:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.1)$$

donde K_p es la ganancia proporcional. La asignación para dicho valor de ganancia se realizó tomando en cuenta valores que no excedieran el rango útil de la señal de control; es decir, que evitaran en el actuador los fenómenos de saturación y zona muerta. En cualquiera de los casos se determinó emplear valores en los rangos bajo, medio y alto de la escala. Como consecuencia de esto para el caso del circuito rectificador controlado se emplearon valores de ganancia proporcional correspondientes con: {1, 2, 2.5}; al tiempo que para el circuito convertidor DC-DC se realizó la selección de valores: {1, 5, 8}. En la sección 4.1.1 se presentarán los resultados experimentales correspondientes para cada caso. La implementación computacional para esta acción de control se realiza de manera directa a partir de evaluación de la expresión (4.1).

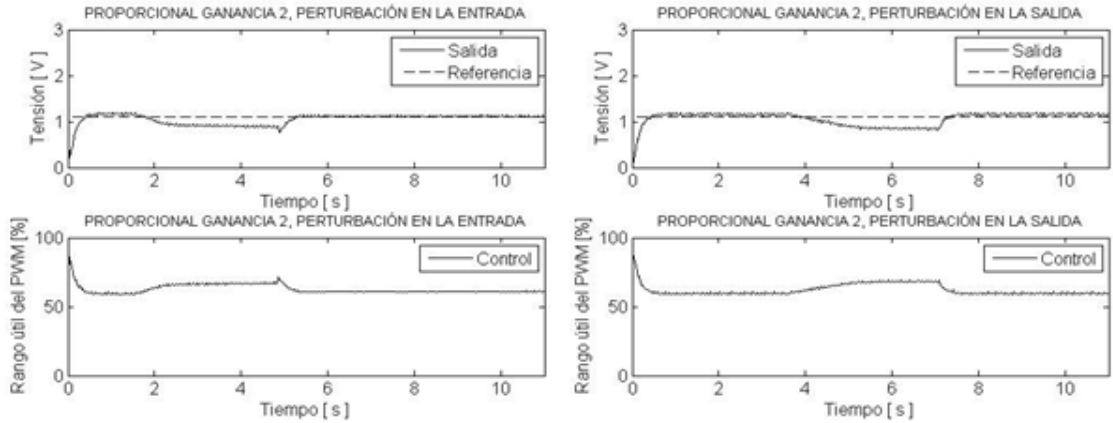
4.1.1 Resultados control proporcional Las Figuras 32 – 34 muestran las señales de tensión en la salida y de porcentaje de ciclo útil (control) en el actuador, bajo la acción de perturbaciones en la entrada (izquierda) y en la carga (derecha), para el circuito rectificador controlado para valores de ganancia proporcional dados respectivamente por 1, 2 y 2.5. De los resultados presentados se observa que a medida que se incrementa la ganancia proporcional se obtiene también un mejor desempeño en términos del valor final obtenido. Para todos los casos, el tiempo en que se aplicó la perturbación corresponde a 2 [s].

Figura 32 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 1$, en el circuito rectificador controlado



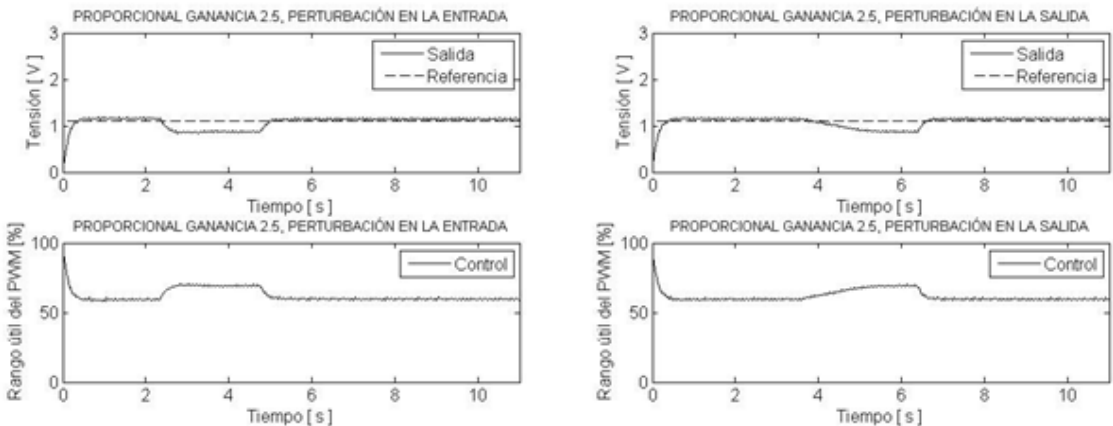
Fuente: Autores

Figura 33 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 2$, en el circuito rectificador controlado



Fuente: Autores

Figura 34 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 2.5$, en el circuito rectificador controlado

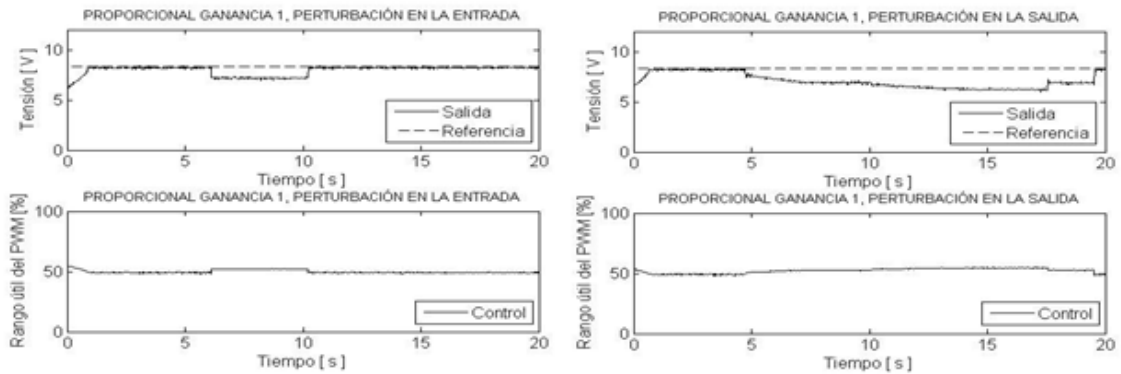


Fuente: Autores

Este fenómeno se observa de manera más clara con los resultados obtenidos para el circuito convertidor DC-DC a partir de las Figuras 35 – 37, en las cuales se emplearon valores de ganancia proporcional dados respectivamente por 1, 5 y 8. A partir de estos resultados, no solo se observa un mejor desempeño a medida

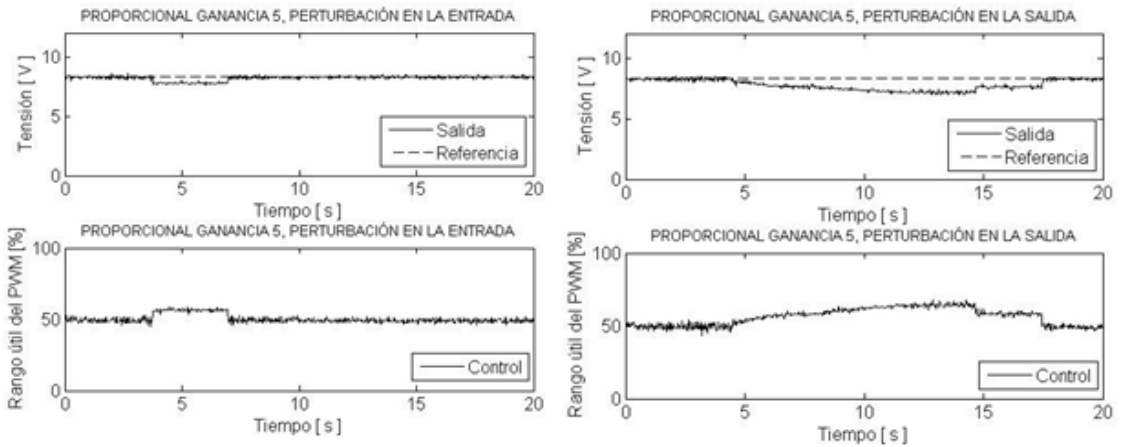
que se aumenta la ganancia del controlador, sino también una mayor influencia de perturbaciones en la salida con respecto a perturbaciones en la entrada.

Figura 35 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 1$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



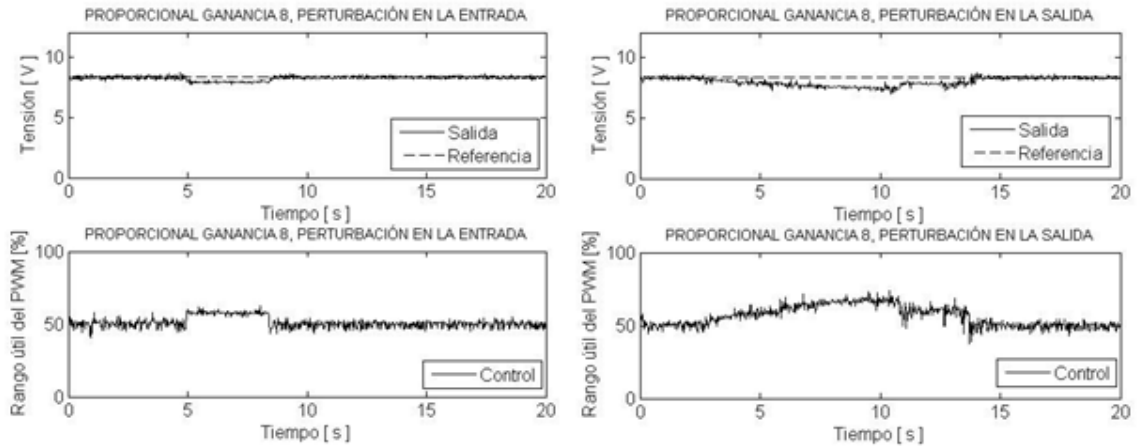
Fuente: Autores

Figura 36 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 5$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



Fuente: Autores

Figura 37 Respuesta del sistema y señal de control para controlador proporcional con $K_p = 8$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



Fuente: Autores

4.2 CONTROL PID

La acción de control PID toma la forma dada por la ecuación (4.2), siendo K_p , K_i y K_d respectivamente las constantes de ganancia proporcional, integral y derivativa, al igual que $e(t)$ representa la señal de error [22].

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d e(t)}{dt} \right) \quad (4.2)$$

La implementación digital del controlador es posible mediante discretización del control, la cual se basa en aproximar la ecuación diferencial (4.2) para obtener $u(kT)$ a partir de los valores de $e(t)$ en los periodos de muestreo. Para ello se considera la función de transferencia pulso para el controlador PID sugerida en [23], dada por la expresión (4.3):

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{\left(K_p + K_i \frac{T}{z} + \frac{K_d}{T} \right) z^2 + \left(-K_p + K_i \frac{T}{z} + \frac{-2K_d}{T} \right) z + \frac{K_d}{T}}{z^2 - z}, \quad (4.3)$$

donde T corresponde con el periodo de discretización. Esta expresión permite obtener posterior a un despeje matemático para $u[k]$, la ecuación en diferencias que relaciona la secuencia de control como función de la secuencia de error, tal y como se observa en la ecuación (4.4).

$$u[k] = u[k - 1] + \left(K_p + K_i \frac{T}{2} + \frac{K_d}{T} \right) e[k] + \left(-K_p + K_i \frac{T}{2} - \frac{2K_d}{T} \right) e[k - 1] + \frac{K_d}{T} e[k - 2] \quad (4.4)$$

La determinación de los parámetros del controlador se realizó en forma experimental, buscando una combinación que permitiera obtener un reducido valor de sobre impulso además de una alta velocidad de convergencia, eliminando el error en el estado estacionario. En la Tabla 5 se muestran los valores seleccionados.

Tabla 5 Parámetros de controlador PID

Parámetro	Valor
K_p	1
K_i	0,1
K_d	0,000009
T	1[ms]

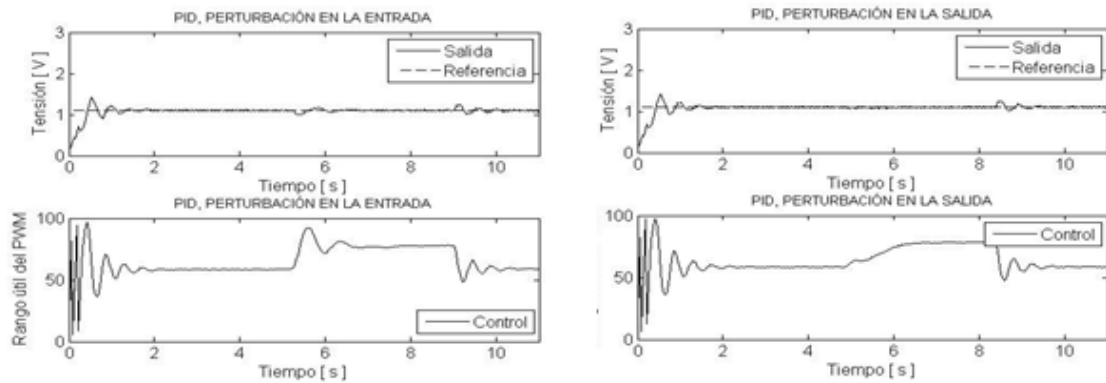
Fuente: Autores

El Anexo B ilustra el procedimiento que llevó a obtener dichos valores de parámetro. Cabe mencionar que estos fueron sintonizados experimentalmente para el circuito rectificador controlado; sin embargo su desempeño fue igualmente favorable en el caso del convertidor DC-DC y por tanto los mismos valores se emplearon en las pruebas para ambos casos. Nótese que la realización final del controlador corresponde más con un PI que con un PID. En la sección 4.2.1 se presentarán los resultados experimentales correspondientes para cada circuito.

4.2.1 Resultados control PID La Figura 38 muestra las señales de tensión en la salida y de porcentaje de ciclo útil (control) en el actuador bajo la influencia de perturbaciones para el circuito rectificador controlado, mientras es controlado por

una acción PID. De los resultados presentados se observa una corrección en el valor de estado estable en comparación con la acción proporcional simple visualizada previamente. También se evidencia el comportamiento oscilatorio típico de una respuesta escalón para este tipo de controlador.

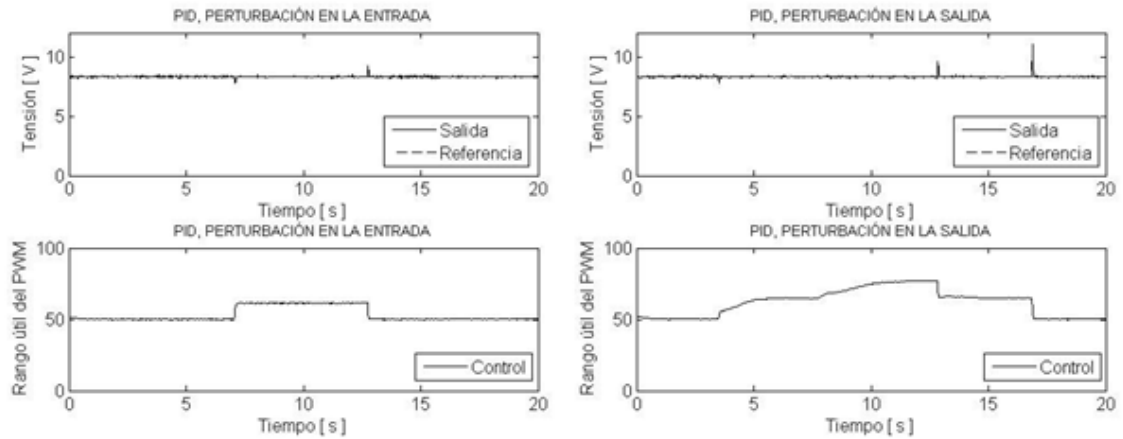
Figura 38 Respuesta del sistema y señal de control para controlador PID, en el circuito rectificador controlado



Fuente: Autores

El comportamiento obtenido es incluso mejor para el caso del convertidor de potencia DC-DC, según se muestra en los resultados de la Figura 39, donde se observa una respuesta mucho más veloz hacia el valor deseado; esta vez sin oscilaciones visibles, independientemente de si la perturbación es aplicada en la entrada (izquierda) o salida (derecha) del circuito convertidor de potencia.

Figura 39 Respuesta del sistema y señal de control para controlador PID, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



Fuente: Autores

4.3 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES

Es una estrategia de control robusta que se basa principalmente en llevar las trayectorias solución del sistema a converger sobre una superficie de deslizamiento. El control por modos deslizantes consiste en definir una ley de control que conmuta a alta frecuencia, la cual consigue llevar el estado del sistema a una superficie denominada superficie de deslizamiento y una vez en ella mantenerlo invariante ante posibles perturbaciones externas [24].

Para implementar este controlador se define un valor deseado $x_{1d}(t)$ y un valor medido $x_1(t)$ de tensión en la resistencia de carga, siendo la diferencia entre estos la superficie de deslizamiento definida como $s(t)$:

$$s(t) = x_{1d}(t) - x_1(t). \quad (4.5)$$

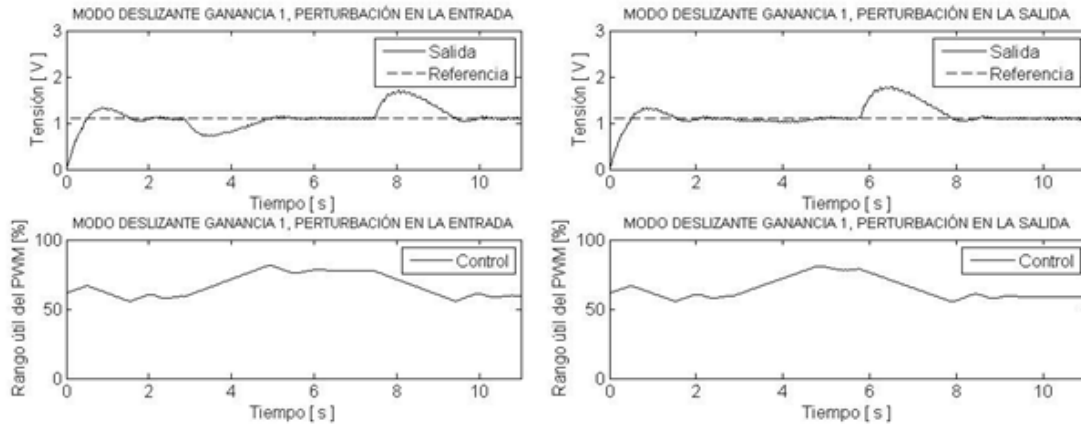
Con base en [24], se demuestra que es posible forzar la convergencia de la trayectoria a caer en un tiempo finito sobre dicha superficie, mediante la siguiente acción de control por modos deslizantes:

$$u(t) = k \frac{1}{2} (1 - \text{sgn}(s)) , \quad (4.6)$$

siendo k una ganancia seleccionada por ensayo y error de manera similar a lo antes mencionado para el caso del controlador proporcional. En la sección 4.3.1 se presentarán los resultados experimentales correspondientes para cada caso. La implementación computacional para esta acción de control se realiza de manera directa a partir de evaluación de la expresión (4.6) donde $\text{sgn}(\cdot)$ corresponde con la función signo.

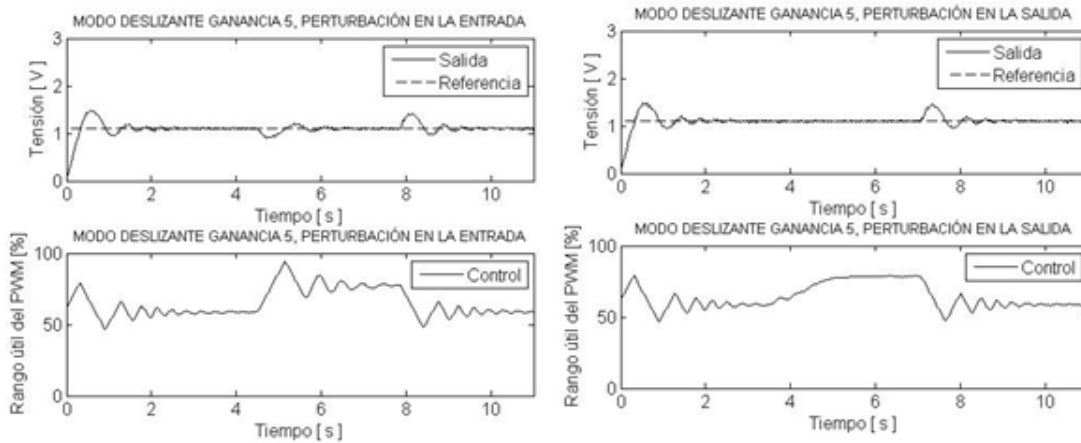
4.3.1 Resultados control por modos deslizantes Las Figuras 40 – 42 muestran las señales de tensión en la salida y de porcentaje de ciclo útil (control) en el actuador bajo la influencia de perturbaciones en la entrada (izquierda) y en la carga (derecha), para el circuito rectificador controlado mediante una estrategia por modos deslizantes con valores de ganancia dados respectivamente por 1, 5 y 10. De los resultados presentados se observa una respuesta oscilatoria que mejora a medida que se incrementa el valor de la ganancia de lazo. También es evidente el comportamiento conmutado de la señal de control con una forma casi triangular.

Figura 40 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 1$, en el circuito rectificador controlado



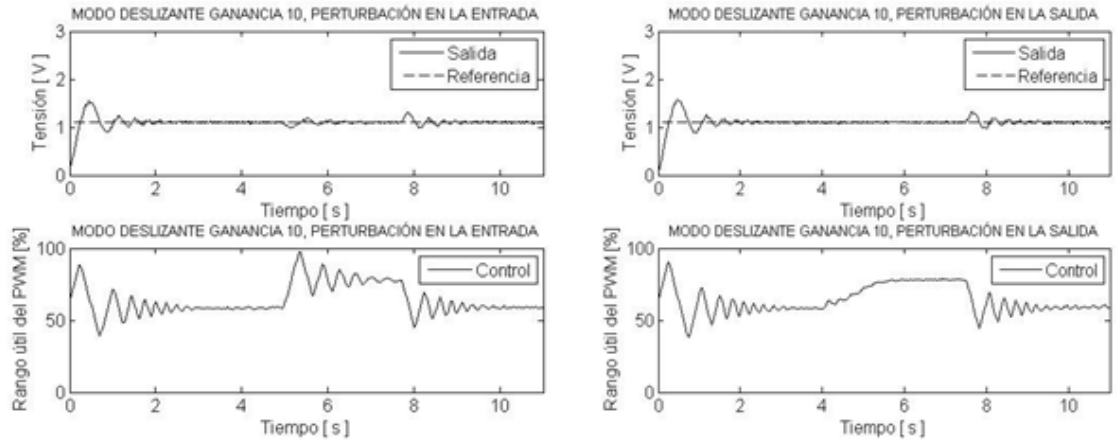
Fuente: Autores

Figura 41 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 5$, en el circuito rectificador controlado



Fuente: Autores

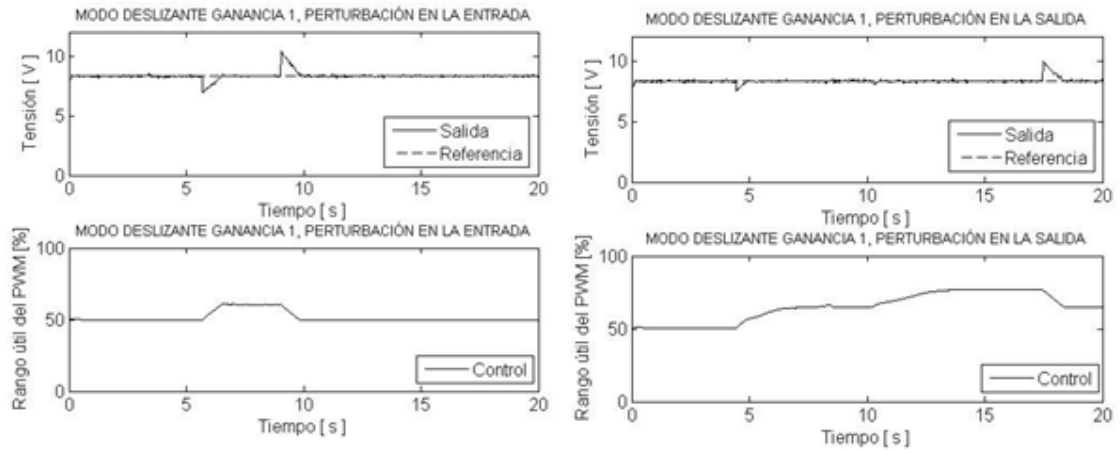
Figura 42 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 10$, en el circuito rectificador controlado



Fuente: Autores

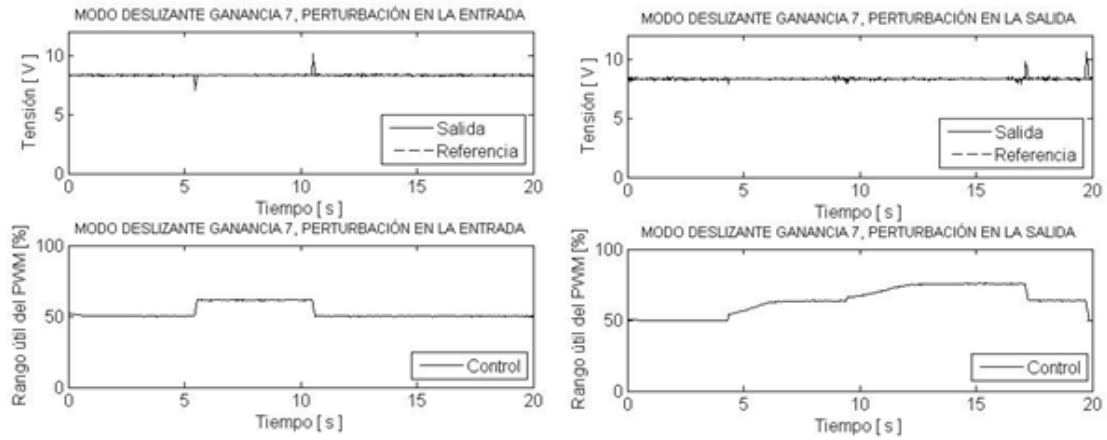
Asimismo, las Figuras 43– 45 muestran resultados similares para el circuito convertidor de potencia DC-DC cuando la ganancia del controlador se selecciona para valores respectivos de 1, 7 y 15. Las características del circuito hacen que la respuesta del mismo converja de manera más rápida hacia el valor final, fenómeno que se evidencia en la medida que la ganancia del control se hace mayor. En la misma medida, tal y como en el caso de los anteriores controladores, se evidencia una mayor sensibilidad del circuito ante cambios en su salida con respecto a la entrada, lo cual se manifiesta en el incremento percibido sobre la señal de control permitiendo la invariabilidad de la tensión entregada a la carga.

Figura 43 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 1$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



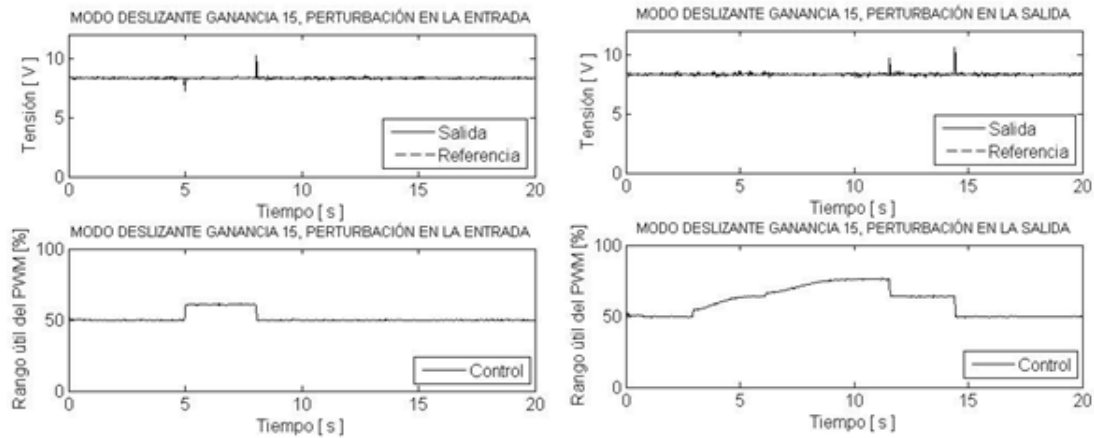
Fuente: Autores

Figura 44 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 7$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



Fuente: Autores

Figura 45 Respuesta del sistema y señal de control para controlador por modos deslizantes con $k = 15$, en el circuito convertidor de potencia DC-DC



Fuente: Autores

En la tabla 6 se puede evidenciar el mejoramiento del desempeño del convertidor de potencia DC-DC ante la acción de control por modos deslizantes, comparado con la respuesta en lazo abierto de la figura 29.

Tabla 6 Características del convertidos DC-DC ante perturbaciones

Acción de control	Ganancia	% de caída en la salida ante perturbación en la entrada en estado: Estable - Transitorio	Tiempo de respuesta [s]
Modos deslizantes	$k=1$	0% - 14.85%	0,87
Modos deslizantes	$k=7$	0% - 13.69%	0,17
Modos deslizantes	$k=15$	0% - 11.07%	0,087

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó una estrategia de control en el espacio de estados que permitió mejorar el desempeño de un circuito convertidor de potencia DC-DC ante perturbaciones de entrada y/o de carga. Lo anterior se obtuvo a partir de un control por modos deslizantes descrito en la sección 4.3. En complemento y a manera de base de referencia se revisaron las técnicas de control proporcional y control PID tal y como se describe en las secciones 4.1 y 4.2 respectivamente.
- Se adecuó el algoritmo de control diseñado para implementación en un dispositivo programable del tipo PSoC. Para ello se configuró el sistema de control presentado en la Figura 1 y explicó detalladamente en la sección 2.1. En particular se hizo uso del paquete de software PSoC Creator® de la compañía CYPRESS SEMICONDUCTORS, para configurar los periféricos del dispositivo de proceso de manera acorde con los requerimientos del bloque correspondiente al controlador del sistema. Otro aspecto interesante y que constituye tal vez uno de los aportes más interesantes del presente proyecto, corresponde con los ajustes de rango presentados en la sección 2.2 y que permiten mejorar ostensiblemente los resultados de implementación de las estrategias de control analizadas.
- Se implementó la técnica de control diseñada sobre un PSoC. El control por modos deslizantes para el circuito convertidor de potencia DC-DC fue implementado en el dispositivo de proceso, según se muestra a partir de los desarrollos contenidos en la sección 4.3. Adicionalmente, allí se presenta un análisis de resultados para diferentes valores de ganancia en el controlador por modos deslizantes. También fueron implementadas estrategias de control de

tipo proporcional y PID según se muestra respectivamente en los desarrollos de las secciones 4.1 y 4.2.

- Se verificó en laboratorio la validez de la estrategia de control implementada para atenuar las perturbaciones en el circuito convertidor de potencia DC-DC. Lo anterior se obtuvo a partir de los resultados presentados en la sección 4.3.1 para el control por modos deslizantes, en la sección 4.1.1 para el control proporcional y en la sección 4.2.1 para el controlador PID. En todos los casos se verificó el comportamiento para perturbaciones en la entrada y la salida del sistema. También se observaron respuestas para diferentes valores de parámetros de control, incluyendo los desarrollos presentados en el Anexo B.
- Es conveniente mencionar que los desarrollos presentados en cuanto a diseño, configuración, ajuste de rangos e implementación de estrategias de control, fueron realizados no solamente para un circuito convertidor de potencia DC-DC, sino también para un circuito del tipo rectificador controlado. Lo anterior se incluye en los resultados de los capítulos 2 y 4.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En el rectificador controlado AC-DC, la señal de AC que ingresa a la tarjeta para sincronización del PWM debe estar en el rango de 0 a 3.27 [V]. Para el convertidor de potencia DC-DC fue necesario ajustar el mismo rango de valores mediante un arreglo de resistencias. Por tanto se deben tomar las precauciones necesarias para evitar superar estas tensiones máximos y por tanto preservar la integridad del sistema de proceso.

También se recomienda en futuras implementaciones realizar una exploración más profunda de algunos periféricos disponibles en la tecnología PSoC, como son los módulos de comunicación.

Trabajos complementarios incluyen:

- La incorporación de técnicas avanzadas de control de tipo óptimo y adaptativo;
- El control de convertidores del tipo DC-AC (inversor);
- El desarrollo de prácticas de laboratorio orientadas al uso de tecnologías PSoC;
- El desarrollo de un diplomado en manejo de tecnologías PSoC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. MUÑOZ CATAÑO, Juan Guillermo. Convertidor boost en modo de corrección del factor de potencia usando la técnica ZAD. Manizales, 2012, 62h. Tesis de grado (Magister en Automatización Industrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
- [2]. BRUM SARTOR, Santiago, DE CALIMI POMBO, Alejandro y LANCIERI ALONSO, Damián. Plataforma de experimentación en control digital de convertidores DC-DC. Montevideo, 2010, 68h. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Eléctrica.
- [3]. VALDERRAMA, Freddy Fernando, MORENO, Henry y VEGA, Héctor Manuel. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost. En: Nuestra Universidad Publicaciones Ingenium [base de datos en línea]. Vol. 24, no. 5 (sep. 2011); p. 12 [citado en 6 de agosto de 2012] Disponible en [Index of /Nuestra_Universidad/Publicaciones/Ingenium](#).
- [4]. OCAMPO MARTÍNEZ, Carlos Augusto. Control de un convertor de potencia con modulador de ancho de pulso centrado usando modos deslizantes. Manizales, 2003, 88h. Tesis de grado (Magister en Automatización Industrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
- [5]. RAMOS, Rafael, ZARAGOSA BERTOMEU, Jordi y MÀNUEL, Antonio. Lógica difusa: Control difuso mediante una FPGA de Xilinx para convertidores DC/DC

elevadores. En: Revista Española de Electrónica [en línea]. (Junio de 2001). Disponible en: <<http://www.redeweb.com/txt/artikel/8274284.pdf>> [citado en 9 de agosto de 2012].

[6]. HOYOS VELASCO, Fredy Edimer, ANGULO GARCIA, Fabiola, TABORDA GIRALDO, John Alexander y OLIVAR TOST, Gerard. Implementación de una nueva técnica de control digital para convertidores dc-dc y dc-ac. En: Revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (Dyna), (Enero 2010); p. 11.

[7]. ZURITA BUSTAMANTE, Eric William. Diseño e implementación de un control GPI en un FPGA para un convertidor cd-cd tipo reductor. Huajuapán de León, 2011, 187 h. Tesis de maestría (maestro en electrónica y computación). Universidad tecnológica de la Mixteca.

[8]. ROCHE VACACELA, Ernesto Mesias y TERÁN TORRES, Santiago Francisco. Diseño y construcción de un conversor DC/DC Boost controlado mediante lógica difusa. Quito, 2011, 177h. Trabajo de grado (Ingeniero en Electrónica y Control). Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

[9]. CASANOVA TRUJILLO, Simeon. Análisis de la Dinámica de un Convertidor Boost Controlado con ZAD. Manizales, 2011, 123 h. Tesis de doctorado (Doctor en Ingeniería - Automática). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

[10]. PRADO FAJARDO, Elcy Patricia. Implementación de una Técnica de Conmutación Suave a un Convertidor tipo Boost Monofásico para Corregir el Factor de Potencia. Manizales, 2008, 116 h. Tesis de maestría. Universidad

Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

[11]. TONG, Chia-Chang. TSAI, Yau-Jeng. LI, Shih-Fan. LIN, Jhih-Yu. HO, Ming-Han. LIN, Yu-Hao. PSoC implementing vehicle auxiliary vacuum brake system with kalman filter. En: Circuits and Systems, 2008. APCCAS 2008. IEEE Asia Pacific Conference on [Base de datos en línea]. (nov. – dic. 2008); p.77-81.

[12]. NANDAKUMAR, R. Design of trickle irrigation control unit using PSoC. En : Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies, 2009. ACT '09. International Conference on [Base de datos en línea]. (dic. 2009); p.57-59.

[13]. BAKER, D. A paradigm of government/industry/university cooperation: a PSoC controller for a NASA robotic arm. En: Microelectronic Systems Education, 2007. MSE '07. IEEE International Conference on. [Base de datos en línea]. (jun. 2007); p. 129-130.

[14]. ARGOTE FUERTES, Víctor Andrés. Control adaptativo bioinspirado utilizando circuitos de señal mixta PSoC. Cali, 2011, 61 h. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico).Universidad Autónoma de Occidente. Disponible en el catalogo en línea de la biblioteca de la Universidad Autónoma de Occidente: <<http://bdigital.uao.edu.co>>.

[15]. SALAZAR BARRETO, Mario Alberto. GONZÁLEZ BUITRAGO, Francisco. Módulo de instrumentación virtual para torres de perforación petrolera. Manizales, 2008, 14 h. Trabajo de grado (Tecnólogos electrónicos). Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Facultad Tecnológica. Grupo de investigación INTEGRA.

[16]. CABRERA LÓPEZ, Jhon Jairo. GODOY JAIMES, Kristy Alejandra. SÁNCHEZ GARCÍA, Giovanni Andrés. Diseño de un microsistema para la medición de presión plantar y aceleración de la pierna utilizando PSoC. En: Colombia revista colombiana de física ISSN: 0120-2650 ed: Revista de la sociedad colombiana de fisica v.43 fasc.1 p.95 – 99, 2011.

[17]. CABALLERO GAVIRIA, A. D. CASTRO MILLER, I. D. ORDOÑEZ MEDINA S. y ROJAS GONZÁLES D. M. Implementación de una interfaz hombre-computador basada en registros EOG mediante circuitos de señal mixta PSoC. En: Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB (V: 2011: Cali). Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería: Grupo GBIO. p. 1194.

[18]. CABRERA, John Jairo. Diseño de un microsistema de medida de impedancia bioeléctrica usando PSoC. En: CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA (XXIII: 2009: Santa Marta). Universidad del Magdalena. ISBN 978-958-99225-0-7. p. 197

[19] RASHID Muhammad, electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones. México: Prentice-hall hispanoamericana. s.a. Tercera edición, 2005.

[20] JÁCOME MINORTA David Fernando. NAVARRO MINORTA Laura Gisela. Control conmutado basado en FPGA para un convertidor DC-DC. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad industrial de Santander. Facultad de físico mecánicas. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

[21] GÓMEZ JIMÉNEZ María Fernanda. Control por modos deslizantes de un convertidor DC-DC. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad industrial de Santander. Facultad de físico mecánicas. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

[22] OGATA Katsuhiko, Ingeniería de control moderno, quinta edición, ISBN-10: 0136156738

[23] REY SOTO Carlos Alberto, "Análisis de Señales y Sistemas en tiempo continuo y en tiempo discreto con aplicaciones en MATLAB" En: Venezuela 2006. Ed: Fondo Editorial UNET ISBN: 980-6300-25-4 v. 1 pags. 561

[24] MUÑOZ Elena, GAVIRIA Carlos. Control PID Multivariable y Modos Deslizantes de un Robot SCARA. Grupo en Automática Industrial, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca

BIBLIOGRAFIA

ARGOTE FUERTES, Víctor Andrés. Control adaptativo bioinspirado utilizando circuitos de señal mixta PSoC. Cali, 2011, 61 h. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Autónoma de Occidente. Disponible en el catalogo en línea de la biblioteca de la Universidad Autónoma de Occidente: <<http://bdigital.uao.edu.co>>.

BAKER, D. A paradigm of government/industry/university cooperation: a PSoC controller for a NASA robotic arm. En: Microelectronic Systems Education, 2007. MSE '07. IEEE International Conference on. [Base de datos en línea]. (jun. 2007); p. 129-130.

BRUM SARTOR, Santiago, DE CALIMI POMBO, Alejandro y LANCIERI ALONSO, Damián. Plataforma de experimentación en control digital de convertidores DC-DC. Montevideo, 2010, 68h. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Eléctrica.

CABALLERO GAVIRIA, A. D. CASTRO MILLER, I. D. ORDOÑEZ MEDINA S. y ROJAS GONZÁLES D. M. Implementación de una interfaz hombre-computador basada en registros EOG mediante circuitos de señal mixta PSoC. En: Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB (V: 2011: Cali). Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería: Grupo GBIO. p. 1194.

CABRERA LÓPEZ, Jhon Jairo. GODOY JAIMES, Kristy Alejandra. SÁNCHEZ GARCÍA, Giovanni Andrés. Diseño de un microsistema para la medición de presión plantar y aceleración de la pierna utilizando PSoC. En: Colombia revista

colombiana de física ISSN: 0120-2650 ed: Revista de la sociedad colombiana de física v.43 fasc.1 p.95 – 99, 2011.

CABRERA, John Jairo. Diseño de un micro sistema de medida de impedancia bioeléctrica usando PSoC. En: CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA (XXIII: 2009: Santa Marta). Universidad del Magdalena. ISBN 978-958-99225-0-7. p. 197

CASANOVA TRUJILLO, Simeon. Análisis de la Dinámica de un Convertidor Boost Controlado con ZAD. Manizales, 2011, 123 h. Tesis de doctorado (Doctor en Ingeniería - Automática). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

GÓMEZ JIMÉNEZ María Fernanda. Control por modos deslizantes de un convertidor DC-DC. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad industrial de Santander. Facultad de físico mecánicas. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

HOYOS VELASCO, Fredy Edimer, ANGULO GARCIA, Fabiola, TABORDA GIRALDO, John Alexander y OLIVAR TOST, Gerard. Implementación de una nueva técnica de control digital para convertidores dc-dc y dc-ac. En: Revista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (Dyna), (Enero 2010); p. 11.

JÁCOME MINORTA David Fernando. NAVARRO MINORTA Laura Gisela. Control conmutado basado en FPGA para un convertidor DC-DC. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad industrial de Santander. Facultad de físico mecánicas. Escuela ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

MUÑOZ CATAÑO, Juan Guillermo. Convertidor boost en modo de corrección del factor de potencia usando la técnica ZAD. Manizales, 2012, 62h. Tesis de grado (Magister en Automatización Industrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

MUÑOZ Elena, GAVIRIA Carlos. Control PID Multivariable y Modos Deslizantes de un Robot SCARA. Grupo en Automática Industrial, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca

NANDAKUMAR, R. Design of trickle irrigation control unit using PSoC. En : Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies, 2009. ACT '09. International Conference on [Base de datos en línea]. (dic. 2009); p.57-59.

OCAMPO MARTÍNEZ, Carlos Augusto. Control de un convertor de potencia con modulador de ancho de pulso centrado usando modos deslizantes. Manizales, 2003, 88h. Tesis de grado (Magister en Automatización Industrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

OGATA Katsuhiko, Ingeniería de control moderno, quinta edición, ISBN-10: 0136156738

PRADO FAJARDO, Elcy Patricia. Implementación de una Técnica de Conmutación Suave a un Convertidor tipo Boost Monofásico para Corregir el Factor de Potencia. Manizales, 2008, 116 h. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

RAMOS, Rafael, ZARAGOSA BERTOMEU, Jordi y MÀNUEL, Antonio. Lógica difusa: Control difuso mediante una FPGA de Xilinx para convertidores DC/DC elevadores. En: Revista Española de Electrónica [en línea]. (Junio de 2001). Disponible en: <<http://www.redeweb.com/txt/artikel/8274284.pdf>> [citado en 9 de agosto de 2012].

RASHID Muhammad, electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y apliCaciones. México: Prentice-hall hispanoamericana. s.a. Tercera edición, 2005.

REY SOTO Carlos Alberto, "Análisis de Señales y Sistemas en tiempo continuo y en tiempo discreto con aplicaciones en MATLAB" En: Venezuela 2006. Ed: Fondo Editorial UNET ISBN: 980-6300-25-4 v. 1 pags. 561

ROCHE VACACELA, Ernesto Mesias y TERÁN TORRES, Santiago Francisco. Diseño y construcción de un conversor DC/DC Boost controlado mediante lógica difusa. Quito, 2011, 177h. Trabajo de grado (Ingeniero en Electrónica y Control). Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

SALAZAR BARRETO, Mario Alberto. GONZÁLEZ BUITRAGO, Francisco. Módulo de instrumentación virtual para torres de perforación petrolera. Manizales, 2008, 14 h. Trabajo de grado (Tecnólogos electrónicos). Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Facultad Tecnológica. Grupo de investigación INTEGRA.

TONG, Chia-Chang. TSAI, Yau-Jeng. LI, Shih-Fan. LIN, Jhih-Yu. HO, Ming-Han. LIN, Yu-Hao. PSoC implementing vehicle auxiliary vacuum brake system with kalman filter. En: Circuits and Systems, 2008. APCCAS 2008. IEEE Asia Pacific Conference on [Base de datos en línea]. (nov. – dic. 2008); p.77-81.

VALDERRAMA, Freddy Fernando, MORENO, Henry y VEGA, Héctor Manuel. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost. En:

Nuestra Universidad Publicaciones Ingenium [base de datos en línea]. Vol. 24, no. 5 (sep. 2011); p. 12 [citado en 6 de agosto de 2012] Disponible en [Index of /Nuestra_Universidad/Publicaciones/Ingenium](#).

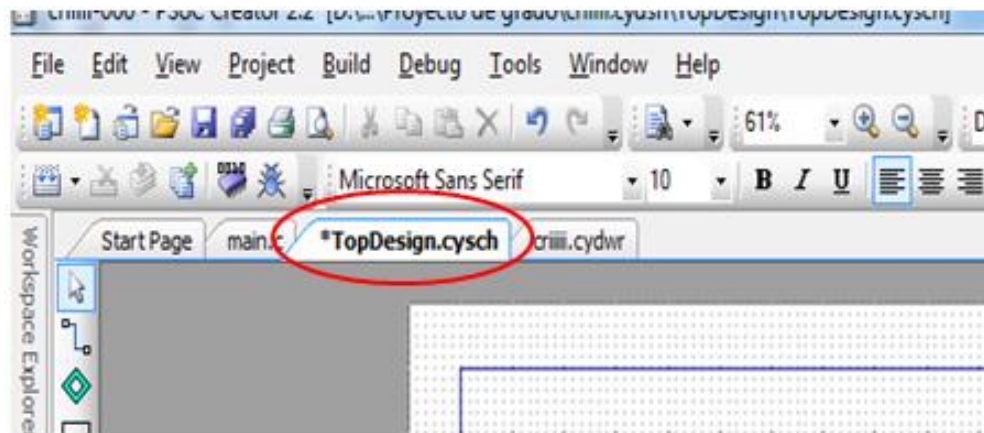
ZURITA BUSTAMANTE, Eric William. Diseño e implementación de un control GPI en un FPGA para un convertidor cd-cd tipo reductor. Huajuapán de León, 2011, 187 h. Tesis de maestría (maestro en electrónica y computación). Universidad tecnológica de la Mixteca.

ANEXOS

Anexo A. Configuración módulo de PWM en PSoC Creator®

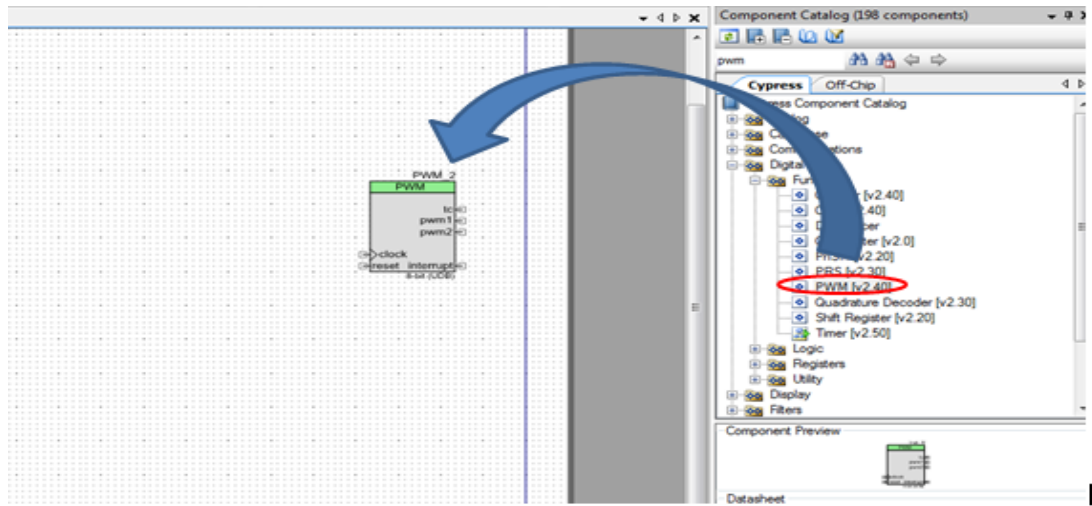
Una vez se crea un proyecto nuevo en el software PSoC Creator®, se debe posicionar en la pestaña TopDesign.cysch como se observa en la Figura A.1. Luego se agrega el módulo PWM en la barra de componentes que se muestra en la Figura A.2, arrastrando el módulo como se muestra. En esta parte también se agrega de la misma forma un reloj (clock), un puerto de salida digital y se conecta donde lo indica el módulo PWM. Luego de terminada esta conexión se procede a introducir los parámetros deseados dando doble clic sobre el módulo PWM. Una vez hecho esto, se abrirá una ventana como se ve en la Figura A.3. En esta parte de modo intuitivo se procede a introducir los parámetros que se requieran. Para configurar la frecuencia del reloj se da doble clic sobre el bloque del reloj que se agregó y se procede a cambiar el valor a la frecuencia deseada.

Figura A.1 Pestaña TopDesign.cysch en PSoC Creator®



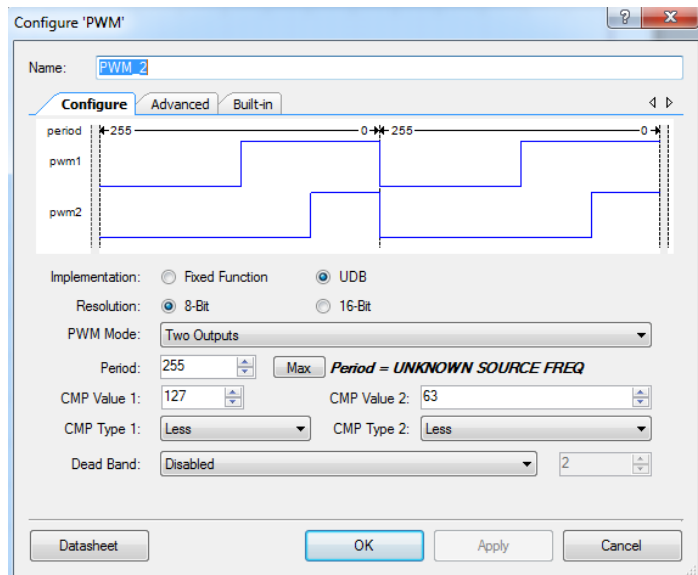
Fuente: Autores

Figura A.2 Modo de agregar módulo PWM en PSoC Creator®



Fuente: Autores

Figura A.3 Ventana de configuración módulo PWM en PSoC Creator®

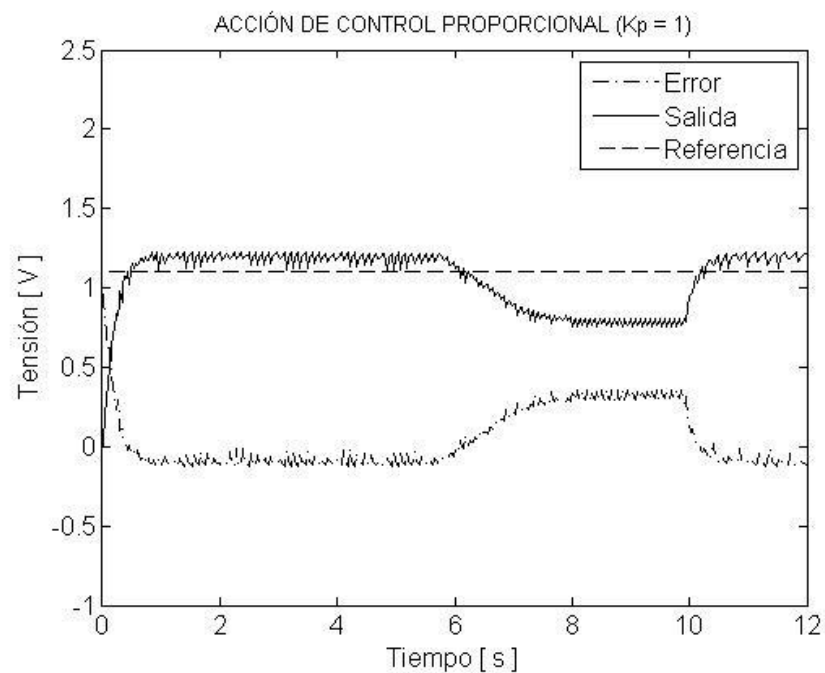


Fuente: Autores

Anexo B. Sintonización experimental para controlador PID

Para la sintonización del controlador PID inicialmente se ajustó la acción proporcional K_p en un valor de 1 manteniendo en cero los demás parámetros del controlador, obteniéndose una aceptable respuesta ante una perturbación con error en estado estable de -0.12 [v], tal y como se muestra en la Figura B.1. Al aumentar dicho valor se observó un incremento en este valor de error de estado estacionario, razón por la cual se conservó el valor inicial asignado de $K_p = 1$.

Figura B.1 Acción de control P ante una perturbación ($K_p = 1$)

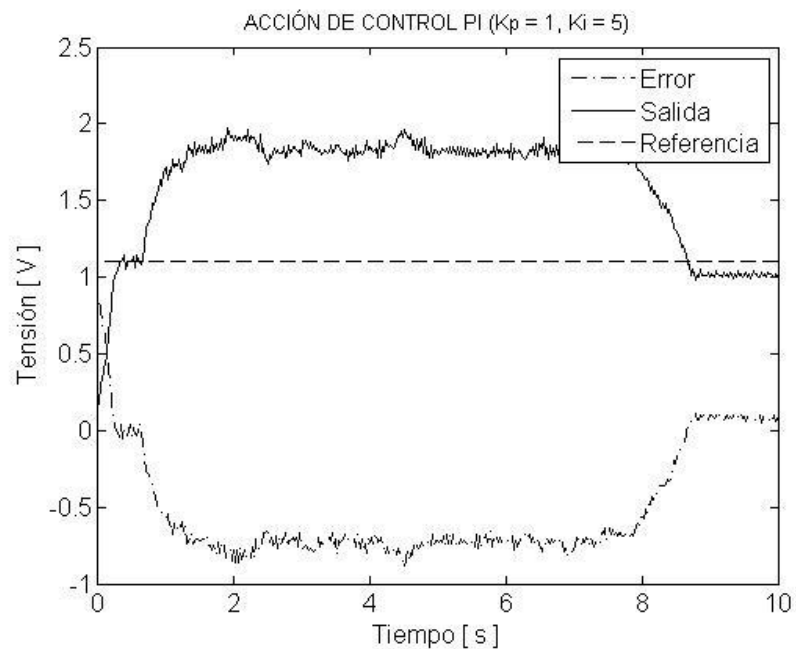


Fuente: Autores

Posteriormente se procedió a introducir la acción de control integral, con un valor inicial para K_i de 5 unidades adicional al valor de ganancia proporcional previamente establecido. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura B.2,

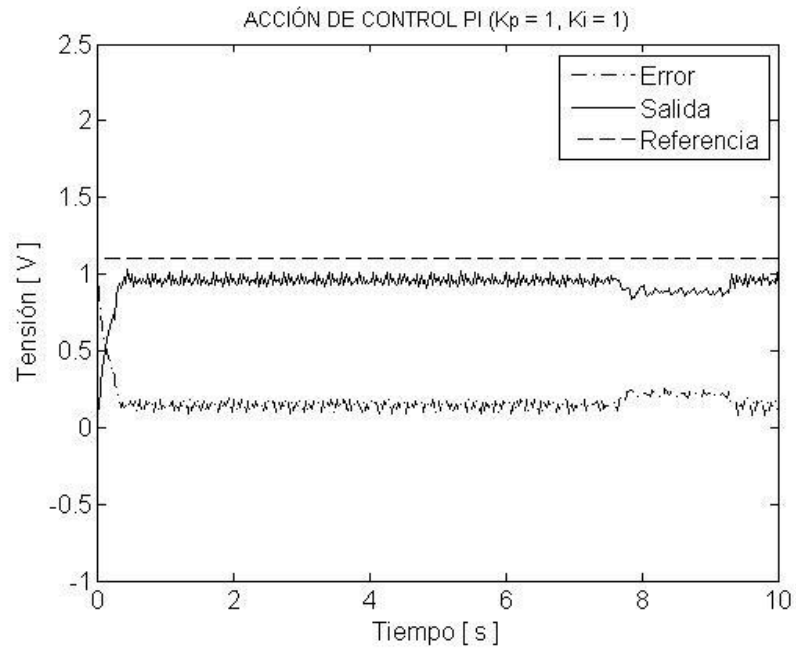
donde se observan resultados poco satisfactorios en términos del valor en estado estable. Por esta razón el valor de esta ganancia integral fue modificado a un valor menor correspondiente con $K_i = 1$ presentando una leve mejoría según se muestra en la Figura B.3. Sin embargo, fue un valor aún menor el finalmente asignado, $K_i = 0.1$, permitiendo obtener el mejor resultado experimental según se ilustra en la Figura B.4.

Figura B.2 Acción de control PI ante una perturbación ($K_P = 1$, $K_i = 5$)



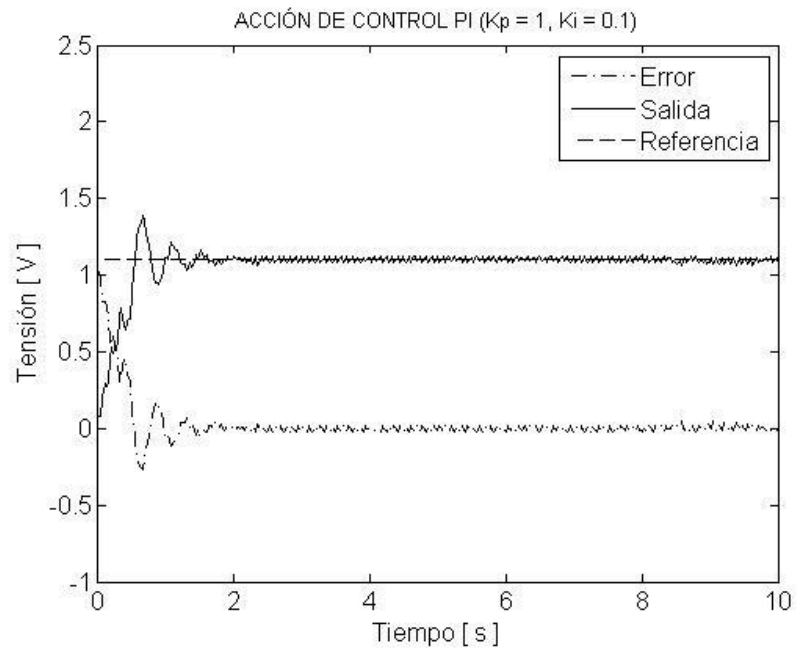
Fuente: Autores

Figura B.3 Acción de control PI ante una perturbación ($K_P = 1$, $K_i = 1$)



Fuente: Autores

Figura B.4 Acción de control PI ante una perturbación ($K_P = 1$, $K_i = 0.1$)

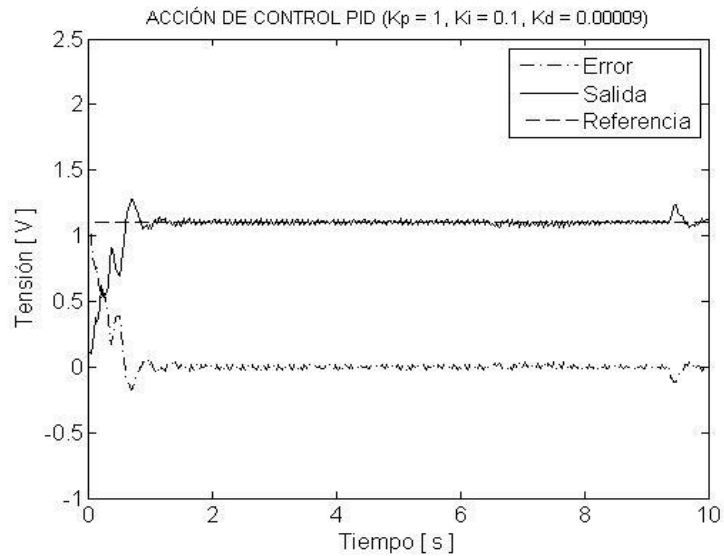


Fuente: Autores

Finalmente se introdujo la acción de control derivativo con elección inicial dada por $K_d = 0.000009$, permitiendo obtener los resultados presentados en la Figura B.5 a partir de la cual se observa una reducción en el tiempo de establecimiento de la respuesta, con adicional sensibilidad ante cambios de la entrada manifestada en la oscilación verificada al momento de remover la perturbación alrededor de 10 [s]. Este comportamiento de acción derivativa se obtiene también con valores altos en la escala. Por ejemplo, para $K_d = 1$ y $K_d = 5$ según se observa respectivamente en las Figuras B.6 y B.7, se obtienen resultados similares al anteriormente mencionado y por tanto, tomando en cuenta la criticidad de la acción derivativa en el lazo de control, se selecciona el valor más pequeño, $K_d = 0.000009$, como el parámetro para esta componente de la acción de control PID, y que en conjunto constituyen los valores presentados en la Tabla 5

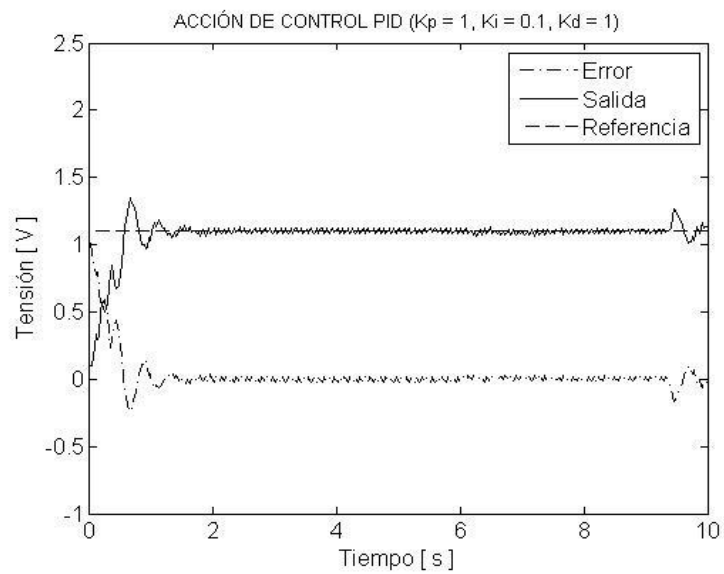
Asimismo, la selección para el intervalo de discretización $T = 1$ [ms] se realizó a partir de los parámetros de configuración del dispositivo de proceso, tomando en cuenta que la respuesta del sistema permite obtener un número suficiente de muestras para reconstruir las formas de onda en el estado transitorio considerando esta tasa de muestreo.

Figura B.5 Acción de control PID ante perturbación en la entrada ($K_P = 1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.000009$)



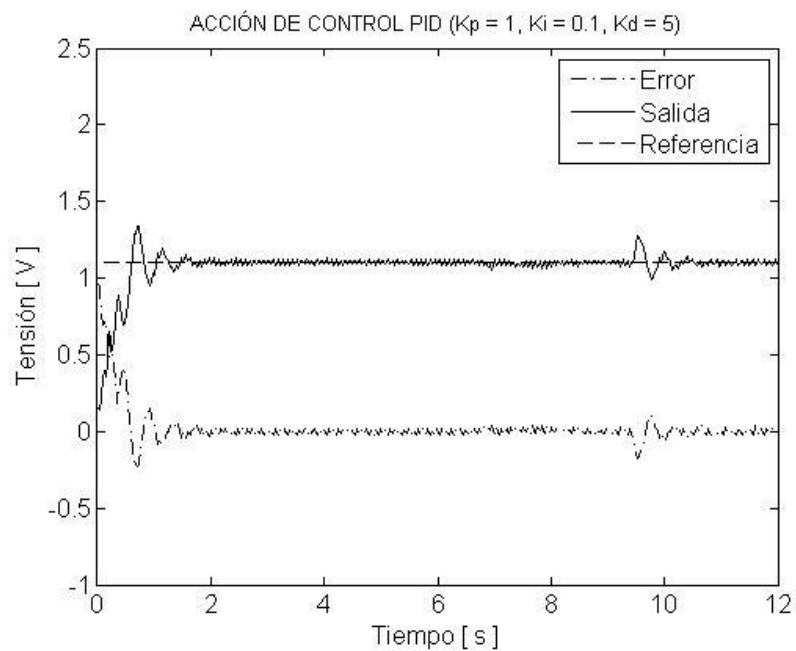
Fuente: Autores

Figura B.6 Acción de control PID ante perturbación en la entrada ($K_P = 1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 1$)



Fuente: Autores

Figura B.7 Acción de control PID ante perturbación en la entrada ($K_P = 1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 5$)



Fuente: Autores