

**MODELADO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE TENSIÓN PARA UN CONVERTIDOR BUCK BASADO EN
LÓGICA DIFUSA**

**HIAN DANIEL DÍAZ SÁENZ
JONATHAN ALEXANDER PÉREZ MUNEVAR**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2017**

**MODELADO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE TENSIÓN PARA UN CONVERTIDOR BUCK BASADO EN
LÓGICA DIFUSA**

**HIAN DANIEL DÍAZ SÁENZ
JONATHAN ALEXANDER PÉREZ MUNEVAR**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

**Director:
JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ
Ingeniero Electricista, PhD.**

**Co-Director:
MARÌA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniero Electrónico, PhD.**

**FRANKLIN ALEXANDER SEPULVEDA
Ingeniero Electrónico, PhD.**

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

2017

DEDICATORIA

Primeramente a Dios y a la Virgen de Chiquinquirá que me han brindado su sabiduría, protección y fortaleza en este ciclo.

A mi madre, por enseñarme el verdadero significado del amor y de lo que es capaz de hacer una madre por su bebe. Gracias por brindarme tu amor y apoyo incondicional en todas las circunstancias agradables y no tan agradables que hemos vivido. Te he visto luchar como la mejor guerrera para hacer de mí la persona que hoy soy, un Ingeniero Electricista. Eres y seguirás siendo mi ejemplo a seguir. Te amo infinitamente.

A mis hermanos, por estar presentes en todo momento que necesite de un consejo, siendo parte fundamental en mi vida.

A mi sobrino, para que veas en mi un ejemplo a seguir.

A mis amigos en la carrera, gracias por compartir tantas dichas y desdichas, por mostrar siempre su actitud positiva y apoyarme para culminar este proceso.

A mi director de proyecto, por dedicarme su tiempo y sabiduría para guiarme de principio a fin.

A mi compañero de proyecto, por su carisma, empeño, por no desfallecer en las dificultades que se presentaron y su responsabilidad para así culminar este documento de la mejor manera posible.

Jonathan Alexander Perez Munevar

DEDICATORIA

Primeramente, agradezco a Dios quien me dio la vida, me da felicidad, fuerzas y todo lo que tengo. ¡Y que me dará mucho más en el futuro!

Mi gran ejemplo, mi padre, que me enseñó a ser como él: alegre, agradable, entregado... Mi madre que me ha enseñado la humildad y la lucha, a la que un día le prometí trabajar para ella. Mis hermanas (chiquis) que no me han dejado solo ni un minuto a pesar de la distancia. A todos ellos agradezco, son el motor de mi vida.

A mis tíos Jose y Julia y mis primos Beto, July, Jei y Yao que me abrieron las puertas de su hogar y me han permitido vivir a su lado durante los años de mi carrera universitaria. Que han apoyado mi travesía, han confiado en mí y me quieren como un integrante más de su familia.

A mi novia que ha hecho parte fundamental de este proceso, a ella también. A mis amigos de infancia y a esos valiosos amigos que he conseguido y que me han apoyado.

Agradezco también a la mejor patrona del mundo, Carmencita. Y a toda la oficina del Decanato de Ingenierías Fisicomecánicas: Paty, Maye, Albita, Moni, Deicy... Todas mujeres excepcionales que deberían multiplicarse para hacer un mundo más dulce. Sin ellas todo habría sido más difícil.

Al Doctor Ricardo Alfredo Cruz por brindarme la oportunidad de demostrar mis habilidades como auxiliar administrativo.

A mi director de proyecto, Javier Solano, quien dedicó horas de su valioso tiempo para enseñarnos, corregirnos y ayudarnos para que este objetivo se lograra de la mejor manera. A la profesora María Alejandra Mantilla y el profesor Jaime Barrero por su colaboración. Además, a los profesores que hicieron parte de mi formación académica en la E3T.

Agradezco a esas personas que no permitieron que desistiera, que con su voz de aliento, apoyo moral, su ayuda económica, etc.. Hicieron que hoy esté aquí celebrando este triunfo.

A todos los compañeros con los que algún día compartí. En especial a mi compañero de proyecto que se comprometió con la causa y que luchó hombro a hombro conmigo para lograr poner a funcionar ese convertidor....

¡Toma lo tuyo!

Hian Daniel Díaz Sáenz

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. CONVERTIDOR DC/DC BUCK	22
3.1. MODO DE OPERACIÓN	22
3.2 FORMULACIÓN TEÓRICA	23
3.3. DISEÑO	26
3.4. PARAMETRIZACIÓN DE CARGA	29
4. LÓGICA DIFUSA	32
4.1 ARQUITECTURA	32
4.2. SISTEMA DE CONTROL DE LÓGICA DIFUSA	34
5. SIMULACIÓN	38
5.1. CONVERTIDOR BUCK	38
5.1.1. Modelado.	39
5.1.2. Parametrización de Carga y Resultados.	39
5.2. SISTEMA DE CONTROL	43
5.3. SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN PARA EL CONVERTIDOR BUCK	48

5.4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN	49
5.4.1. Arranque con 390 [Ω].	50
5.4.2. Cambio de Carga de 1 [$k\Omega$] POR 390 [Ω].	51
5.4.3. Cambio de Carga de 390 [Ω] POR 1 [$k\Omega$].	52
6. IMPLEMENTACIÓN	54
6.1. MONTAJE	54
6.1.1. Convertidor Buck.	55
6.1.1.1. Selección de Elementos.	55
6.1.1.2. Implementación.	57
6.1.2. Controlador.	58
6.1.3. Sensores y Adecuación.	59
6.2. RESULTADOS	61
6.2.1. Fuente, carga y referencia variables.	62
6.2.1.1. Cambio de Carga.	63
6.2.1.2. Cambio de Referencia.	64
6.2.1.3. Cambio de la Tensión de Entrada.	65
6.2.2. Fuente y Carga Variables, Referencia Constante.	66
6.2.2.1. Cambio de la Tensión de Entrada.	66
6.2.2.2. Cambio de Carga.	67
7. CONCLUSIONES	69
8. PERSPECTIVAS	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
BIBLIOGRAFÍA	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de diseño Buck.....	27
Tabla 2. Parámetros obtenidos en Texas Instruments.....	28
Tabla 3. Valores de L y C teóricos calculados	29
Tabla 4. Ciclo de trabajo para las cargas seleccionadas	31
Tabla 5. Reglas de Lógica Difusa seleccionadas.....	35
Tabla 6. Valores finales obtenidos para simulación	47
Tabla 7. Parámetros de selección del Mosfet	56
Tabla 8. Parámetros de selección del Diodo	57
Tabla 9. Ganancia de los sensores de tensión de 60/10	60
Tabla 10. Valores de parámetros utilizados en la simulación del sistema	62
Tabla 11. Ciclo de trabajo teórico para cambio de carga (gm2)	63
Tabla 12. Ciclo de trabajo teórico para cambio de referencia (gm2).....	64
Tabla 13. Ciclo de trabajo teórico para cambio en la tensión de entrada (gm2)	65
Tabla 14. Ciclo de trabajo teórico para cambio en la tensión de entrada (gm1)	66
Tabla 15. Ciclo de trabajo teórico para cambio de carga (gm1)	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Topología básica de un convertidor Buck	22
Figura 2. Periodo ON - Buck	23
Figura 3 Periodo OFF – Buck	23
Figura 4. Parámetros obtenidos en Coilcraft.....	28
Figura 5. Configuración básica de un control con Lógica Difusa	33
Figura 6. Funciones de pertenencia del error	36
Figura 7. Funciones de pertenencia de la variación del error	36
Figura 8. Funciones de pertenencia de salida	37
Figura 9 Convertidor DC/DC Buck en simulación	39
Figura 10 Tensión y corriente de salida para carga resistiva mínima	40
Figura 11. Gráfica de la tensión y corriente de salida para el límite de carga.....	41
Figura 12. Gráfica de la tensión y corriente de salida para 390 [Ω]	42
Figura 13. Gráfica de la tensión y corriente de salida para 1 [k Ω]	42
Figura 14. Esquema de control para la simulación	43
Figura 15. Bloque de simulación de la normalización del error.....	44
Figura 16. Gráfica Tensión de salida Buck con $e_m=0.31$	44
Figura 17. Bloque de simulación de la variación del error	45
Figura 18. Bloque de simulación de la normalización de la variación del error.....	45
Figura 19. <i>Resultados de simulación con $d_{em}=1$</i>	46
Figura 20. Bloque de simulación de la ganancia del controlador difuso	46
Figura 21. Resultados de simulación con $g_m=0.0013$	47
Figura 22. Bloque de simulación del ciclo de trabajo.....	47
Figura 23. Bloque de simulación de Ciclo de Trabajo a PWM	48
Figura 24. Modelo de simulación de convertidor Buck con cambio de carga	48
Figura 25. Bloque de simulación de Ciclo de Trabajo a PWM	49
Figura 26. Gráfica simulación carga variables y referencia constante	50

Figura 27. Gráfica de arranque con 390 [Ω]	51
Figura 28. Gráfica de cambio de carga de 1 [k Ω] por 390 [Ω].....	52
Figura 29. Gráfica de cambio de carga de 390 [Ω] por 1 [k Ω].....	53
Figura 30. Diagrama de bloques para la implementación	54
Figura 31. Características generales de la bobina	55
Figura 32. Convertidor Buck implementado	58
Figura 33. Esquema de Implementación en la MicroLabBox - dSPACE.....	59
Figura 34. Montaje de implementación de un sistema de control para la tensión de salida de un convertidor Buck	61
Figura 35. Gráfica implementación con fuente, carga y referencia variables (gm2)	62
Figura 36. Gráfica implementación carga variable (gm2)	63
Figura 37. Gráfica implementación con referencia variable (gm2).....	64
Figura 38. Gráfica implementación con fuente variable (gm2).....	65
Figura 39. Gráfica implementación con carga variable (gm1).....	66
Figura 40. Gráfica implementación con fuente variable (gm1).....	67
Figura 41. Gráfica implementación con carga variable (gm1).....	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR	76
ANEXO B. DEFINICIÓN DE REGLAS EN LA TOOLBOX FUZZY DE MATLAB	77
ANEXO C. CORRIENTE EN EL INDUCTOR PARA ALGUNOS CASOS DE CARGA	78
ANEXO D. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.	80
ANEXO E. RESULTADOS DE PARAMETRIZACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO	81
ANEXO F. DATASHEET MOSFET IRF1010N	86
ANEXO G. DATASHEET DIODO SCS215AG	87
ANEXO H. DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES UTILIZADOS EN IMPLEMENTACIÓN EN LA MICROLABBOX	88

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN PARA UN CONVERTIDOR BUCK BASADO EN LÓGICA DIFUSA*

AUTORES: HIAN DANIEL DÍAZ SÁENZ
JONATHAN ALEXANDER PEREZ MUNEVAR**

PALABRAS CLAVE: MICROLABBOX, CONVERTIDOR BUCK, LÓGICA DIFUSA, MATLAB, SIMPOWERSYSTEMS, SIMULINK, FUZZY.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se desarrolla una aplicación para la herramienta MicroLabBox – dSPACE, adquirida por la Universidad y que permite implementar modelos tanto de controladores como de sistemas de disipación. Se describen cada uno de los pasos llevados a cabo para implementar un sistema de control de tensión basado en lógica difusa para un convertidor tipo Buck.

Inicialmente, se identifica un experimento realizado en la literatura [1] para replicarlo tanto en simulación como en condiciones experimentales. A continuación, se presentan las consideraciones de diseño para el convertidor y se realiza un modelo de simulación para este; se toman del documento guía las reglas y funciones de pertenencia del controlador y se parametriza de acuerdo la planta en estudio, mediante ensayos de prueba y error. Luego se muestran los resultados de simulación para cambios de carga, utilizando Matlab – Simulink y finalmente se obtienen resultados experimentales realizando cambios de carga, tensión de entrada y de referencia, mediante la conexión de la MicroLabBox, el circuito del convertidor implementado y elementos adquiridos en un trabajo de grado anterior [7]. Finalmente se concluye en base a los resultados de las etapas anteriores y se proponen aplicaciones futuras para el uso de la MicroLabBox en actividades de docencia y donde se requiera de automatización.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingenierías eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Javier Enrique Solano Martínez. Ingeniero Electricista, PhD.

ABSTRACT

TITLE: MODELING, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF A VOLTAGE CONTROL SYSTEM FOR A BUCK CONVERTER BASED FUZZY LOGIC*

AUTHORS: HIAN DANIEL DÍAZ SÁENZ
JONATHAN ALEXANDER PÉREZ MUNEVAR**

KEYWORDS: MICROLABBOX, BUCK CONVERTER, FUZZY LOGIC, MATLAB, SIMPOWERSYSTEMS, SIMULINK, FUZZY.

DESCRIPTION:

In this work we develop in an application for the tool MicroLabBox - dSPACE, acquired by the University. It allows you to deploy models of both drivers and dissipation systems. We describe each of the steps taken to implement a system of control of voltage based on fuzzy logic for a type of Buck converter.

Initially, we identified an experiment made previously in the literature [1] to replicate both in simulation and in experimental conditions. Then we present the design considerations for the converter and we performed a simulation model for this; the membership rules and functions of the controller are taken from the guidance document, and it is parameterized in accordance with the plant in the study through testing of trial and error. We then display the simulation results for load changes, using Matlab - Simulink. Finally, we obtain experimental results by making load changes, input and reference voltage, by connecting the MicroLabBox, the converter circuit implemented and acquired elements in a work of previous grade [7]. Finally, we conclude on the basis of the results of the previous stages and we propose future applications for the use of the MicroLabBox in teaching activities and where automation is required.

* Degree work

**Faculty of physical engineering mechanical. School of engineering electrical, electronic and of telecommunications. Director Javier Enrique Solano Martínez Electrical engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

El diseño y la optimización de sistemas físicos como lo son los controladores de tensión han sido presentados por múltiples autores en la literatura [1, 2, 3, 4]. Se considera interesante poder estudiar diversas técnicas de control para sistemas físicos. Por tanto, el grupo de investigación Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) adquirió una herramienta novedosa y versátil llamada MicroLabBox – dSPACE que permite implementar rápidamente controladores utilizando el software de modelado Simulink.

Se selecciona un trabajo encontrado en la literatura [1] el cual utiliza la lógica difusa para realizar el control de tensión de un convertidor DC/DC Buck, con el objetivo de realizar la implementación en el controlador MicroLabBox para contar con una práctica de laboratorio que pueda ser utilizada en varias materias de la escuela como electrónica de potencia o sistemas de control, en las cuales se utilizan equipos de alto nivel de tecnología de control y dispositivos electrónicos usados en la industria.

En el capítulo 2 se presenta un marco teórico para convertidores DC/DC tipo Buck exponiendo su modo de operación, las fórmulas que lo caracterizan y su diseño mediante una comparación entre tres herramientas. En el capítulo 3 se utiliza la toolbox de lógica difusa Fuzzy - MATLAB [5] para el diseño del controlador difuso, el cual lo componen tres partes: reglas, funciones de pertenencia de entrada y funciones de pertenencia de salida. El capítulo 4 expone la simulación del convertidor mediante la librería SimPowerSystems de Simulink – MATLAB [6], la obtención de los parámetros de simulación para el sistema de control mediante la librería de Fuzzy de MATLAB [5] y los resultados finales para cambios de carga en los terminales del convertidor. En el capítulo 5 se muestra el montaje y los

resultados de la implementación del sistema de control utilizando las toolbox RTI USB Fligh Recorder Blockset, RTI Electric Motor Control Blockset y RTI FPGA I/O Type 1 de la plataforma RTI 1202 dSPACE [7, 8].

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas clásicos en el campo de la Ingeniería Eléctrica es el control de máquinas, del cual se deriva la necesidad de contar con una tensión de alimentación dentro de un rango específico, independientemente de su cargabilidad. En los últimos años han ido apareciendo sistemas de “generación rápida de prototipos de control” (RCP, Rapid Control Prototyping), como la MicroLabBox – dSPACE, que pueden ser usados para el desarrollo de aplicaciones de control de dispositivos de electrónica de potencia.

Con este trabajo de grado se busca dar una aplicación a la herramienta existente para controlar la tensión de salida de un convertidor Buck utilizando el control por lógica difusa. Para lograrlo, inicialmente se diseña el convertidor, se seleccionan sus componentes y se construye físicamente. Posteriormente se utiliza Simulink – Matlab para simular un sistema de control mediante lógica difusa para el convertidor, con el fin de implementarlo en la MicroLabBox. La evaluación de este sistema se realiza mediante la conexión física de los elementos y el control del convertidor.

Se plantea aportar en actividades de docencia con una práctica de laboratorio que permita a los estudiantes matriculados en asignaturas cómo sistemas de control, electrónica de potencia, conocer y aprender a operar la herramienta MicroLabBox, de tal forma que puedan familiarizarse con el sistema de control, entender de mejor manera el funcionamiento de un convertidor Buck y modificar y/o diseñar un sistema de control particular. Adicionalmente, se busca contribuir en los procesos en los que se requiera la utilización de automatización.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de control de tensión basado en lógica difusa para un convertidor tipo Buck utilizando un controlador MicroLabBox – dSPACE.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

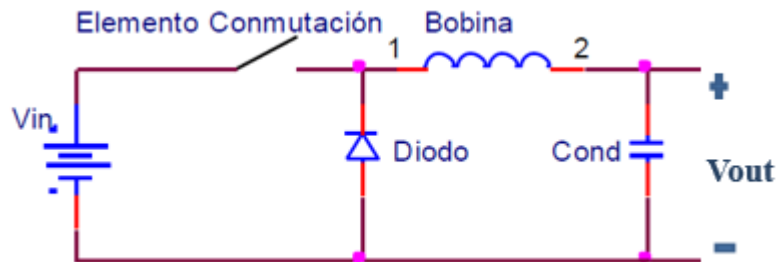
- Adquirir el conocimiento necesario acerca del uso de Matlab Simulink y utilizarlo en la implementación de un modelo de simulación para un convertidor Buck y el de su sistema de control mediante lógica difusa.
- Implementar físicamente un convertidor DC/DC tipo Buck y su sistema de control utilizando un controlador programable MicroLabBox - dSPACE.
- Comparar y concluir acerca de los resultados obtenidos en simulación con mediciones realizadas experimentalmente al convertidor Buck y su sistema de control.

A continuación, se describen los aspectos teóricos referentes al convertidor Buck, su formulación teórica y el diseño de este para la presente aplicación. Posteriormente, se presenta la arquitectura del sistema de control.

3. CONVERTIDOR DC/DC BUCK

Los convertidores Buck son utilizados para disminuir el nivel de tensión en la salida con respecto a la entrada. La topología básica de este tipo de convertidores se muestra en la Figura 1.

.Figura 1 Topología básica de un convertidor Buck

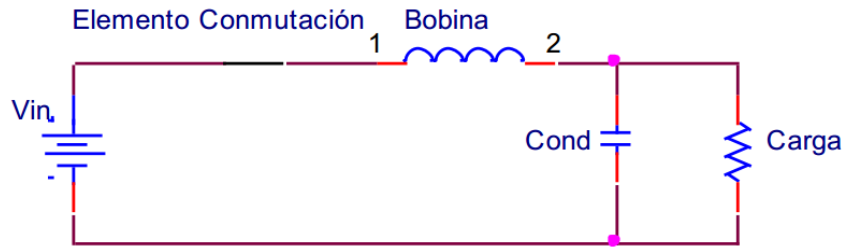


Estos convertidores basan su funcionamiento en la conmutación de un transistor, que durante ciertos intervalos de tiempo permite el paso de la energía necesaria para cargar el inductor. La tensión resultante a la salida, depende del ciclo de trabajo del transistor (ciclo conexión y desconexión).

3.1. MODO DE OPERACIÓN

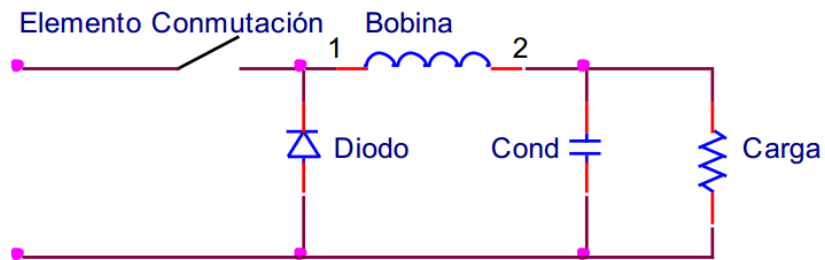
Cuando el transistor está en modo encendido (ver Figura 2), el diodo D1 no permite el paso de corriente por él y la carga es alimentada directamente por la fuente. Adicionalmente, la corriente suministrada por la fuente, que pasa a través del inductor y del condensador, permite que se acumule energía en dichos elementos.

Figura 2. Periodo ON - Buck



En el periodo en el que el transistor está apagado, la corriente fluye a través del diodo D1 (ver Figura 3). A su vez, la carga es alimentada inicialmente por la energía almacenada en el inductor y posteriormente por la energía almacenada en el capacitor durante el periodo ON.

Figura 3 Periodo OFF – Buck



3.2 FORMULACIÓN TEÓRICA

El circuito de un convertidor Buck puede funcionar en modo de conducción continua y discontinua dependiendo de la carga conectada a este. A continuación, se muestran las ecuaciones que representan dichos funcionamientos y que permiten hallar los valores de los parámetros para el diseño del convertidor [9].

- *Modo de conducción continua*

En este modo se tiene una tensión de salida que varía linealmente con el ciclo de trabajo del interruptor, dependiendo de la tensión de entrada como se muestra en la ecuación 1.

$$D = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{t_{enc}}{T_s} \quad (1)$$

Donde:

V_{sal} : Tensión de salida

V_{ent} : Tensión de entrada

- *Límite entre la conducción continua y discontinua*

Debido a la influencia de los parámetros del circuito, se presentan dos modos de conducción: continua y discontinua. La corriente límite entre estos modos de conducción se muestra en la ecuación 2. Un valor de corriente por debajo del límite hace que el convertidor trabaje en modo discontinuo.

$$I_{lim} = \frac{D}{2f_s L} (V_{ent} - V_{sal}) \quad (2)$$

Donde:

f_s : Frecuencia de conmutación mínima del convertidor

L : Valor de la inductancia del circuito

- *Modo de conducción discontinua con tensión de salida constante*

Para este modo la carga ejerce influencia sobre el ciclo de trabajo, haciendo que la ecuación para el este se convierta en:

$$D = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} \left(\frac{I_{sal}/I_{sal_max(lim)}}{1 - V_{sal}/V_{ent}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

La corriente límite máxima de salida se representa por la ecuación 4.

$$I_{lim(max)} = \frac{V_{sal}}{2Lf_s} \quad (4)$$

- *Parámetros del circuito*

En general, en el diseño se realizan los cálculos para hallar los valores teóricos de la inductancia, la capacitancia y el rizado de la corriente y la tensión. A continuación, se muestran las ecuaciones para el cálculo respectivo.

En el caso del inductor de la Figura 1 es necesario conocer la frecuencia de conmutación del convertidor, la tensión de entrada y la tensión de salida como se muestra a continuación:

$$L_{min} = \frac{V_{sal} * (V_{ent} - V_{sal})}{\Delta I_L * f_s * V_{ent}} \quad (5)$$

Donde:

ΔI_L : Rizado de la corriente del inductor (usualmente 20% de la corriente de salida)

El rizado de la corriente del inductor se puede expresar como se muestra en la ecuación 6. Sin embargo, la ecuación 7 [12] muestra una buena aproximación para este parámetro.

$$\Delta I_L = \frac{V_{sal}}{f_s L} (1 - D) \quad (6)$$

$$\Delta I_L = (0.2 \text{ a } 0.4) * I_{sal(max)} \quad (7)$$

Donde:

$I_{sal(max)}$: Máxima corriente de la carga

Para el cálculo del valor del capacitor de salida de la Figura 1 se debe tener en cuenta que este debe ser capaz de respaldar al inductor en el suministro de energía para la carga. A continuación, se muestra la ecuación con la cual se calcula la capacitancia mínima:

$$C_{sal(min)} = \frac{\Delta I_L}{8 * f_s * \Delta V_{sal}} \quad (8)$$

Donde:

ΔV_{sal} : Rizado de la tensión de salida

El rizado de la tensión de salida se puede hallar mediante la ecuación 9 para el modo continuo.

$$\Delta V_{sal} = \frac{V_{sal}}{8CLf_s^2} (1 - D) \quad (9)$$

3.3. DISEÑO

Partiendo de las ecuaciones 1 a 9, es posible obtener cada uno de los parámetros necesarios para el diseño del convertidor Buck. Los valores establecidos para el diseño y el criterio de selección utilizado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño Buck

PARÁMETRO		VALOR	DESCRIPCIÓN
f_s	Frecuencia de conmutación	50 [kHz]	Se seleccionó teniendo en cuenta los valores típicos de frecuencia encontrados en documentos [2, 3,10]
V_{ent}	Voltaje de entrada	30 [V]	Se seleccionó de acuerdo al valor de la fuente existente en el laboratorio.
V_{sal}	Voltaje de salida	24 [V]	Estos valores se escogieron de acuerdo a las características nominales de un motor de corriente continua que se pretende usar para aplicaciones futuras.
I_{sal}	Corriente de salida	2 [A]	
ΔI_L	Rizado de corriente en el inductor	0.4 [A]	Valor típico utilizado [12].

De acuerdo a los valores para el diseño bosquejados en la Tabla 1, se presentan los valores de inductancia y capacitancia hallados mediante la formulación matemática planteada en las ecuaciones 1 a 8 y verificados mediante dos herramientas.

- *Cálculos matemáticos bajo condiciones de diseño*

El ciclo de trabajo es:

$$D = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = 0.8$$

El valor mínimo de la inductancia es:

$$L_{min} = \frac{V_{sal} * (V_{ent} - V_{sal})}{\Delta I_L * f_s * V_{ent}} = 240 [\mu H]$$

El valor mínimo para la capacitancia es:

$$C_{out(min)} = \frac{\Delta I_L}{8 * f_s * \Delta V_{out}} = 4.17 [\mu F]$$

- *Cálculos mediante herramientas para verificación*

Con los valores obtenidos mediante las formulas se procede a la verificación mediante dos herramientas como se muestra a continuación.

A. Coilcraft

Para el cálculo, se tuvieron en cuenta los requerimientos de diseño escogidos y mostrados en la Tabla 1. La Figura 4 muestra el valor obtenido mediante esta herramienta, así como sus especificaciones.

Figura 4. Parámetros obtenidos en Coilcraft

Review inductor requirements

252.57	L min. (μH)	Duty cycle 0.85
2.2	Isat (A)	ΔIL peak-peak 0.4 Amps
2	I rms (A)	

Find a suitable inductor

Fuente: Tomada de [11]

B. Texas Instruments

La herramienta de Texas Instruments para el diseño de convertidores [12], al igual que Coilcraft, requiere el conocimiento de los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 1. En base a estos se encuentran los siguientes valores para la inductancia y capacitancia del convertidor (ver tabla 2).

Tabla 2. Parámetros obtenidos en Texas Instruments

PARÁMETRO		VALOR
L_{min} [μH]	Inductancia mínima	252.01
C_{min} [μF]	Capacitancia mínima	4.17

Se evidencia que los tres métodos utilizados para hallar el valor del inductor arrojan resultados similares. Por tal motivo se selecciona el mayor de ellos, teniendo en cuenta que los valores calculados corresponden a los mínimos. Los valores de L y C a utilizar son los mostrados a continuación:

Tabla 3. Valores de L y C teóricos calculados

PARÁMETRO		VALOR
L_{min} [μ H]	Inductancia mínima	252.57
C_{min} [μ F]	Capacitancia mínima	4.17

Luego de hallar el valor de los parámetros del convertidor, se realiza la selección de los parámetros según los valores comerciales encontrados. Este proceso se muestra en la sección 5.1.1.1. A continuación se caracterizan los valores de carga para ser utilizadas en las etapas posteriores.

3.4. PARAMETRIZACIÓN DE CARGA

Para que el convertidor diseñado funcione de manera adecuada, se deben seleccionar los valores límites de carga. En el caso del límite de carga resistiva menor, este se encuentra sujeto al valor máximo de la corriente propuesta en el diseño. Además, se selecciona un valor límite de carga en el cual el convertidor pasa de modo continuo a modo discontinuo. Los casos anteriormente descritos y sus resultados se muestran a continuación, teniendo en cuenta los valores de diseño de la Tabla 1 y el valor de la inductancia y capacitancia mostrados en la Tabla 3:

- *Carga resistiva mínima*

Para hallar este límite se utiliza la Ley de Ohm con los valores de diseño mostrados en la Tabla 1 para la tensión y la corriente de salida.

$$R_{min} = \frac{V_{sal}}{I_{sal}} = 12 [\Omega]$$

- *Carga límite entre modo continuo y discontinuo*

La ecuación 6 permite hallar la corriente límite para el modo continuo y el modo discontinuo. En este caso se utilizan.

$$I_{sal(lim)} = \frac{D}{2f_s L} (V_{ent} - V_{sal}) = 0.19 [A]$$

Teniendo la corriente de salida mínima, se puede calcular el valor de la resistencia máxima para que el convertidor opere en modo continuo, utilizando la Ley de Ohm como se muestra a continuación:

$$R_{lim} = \frac{V_{sal}}{I_{sal(lim)}} = 126.285 [\Omega]$$

- *Cargas seleccionadas*

Para el caso particular, se define la operación en modo discontinuo seleccionando resistencias mayores al límite calculado. Estas resistencias tienen valores comerciales de 390 $[\Omega]$ y 1 $[k\Omega]$. En la tabla 4 se muestra el ciclo de trabajo teórico obtenido para las cargas mencionadas anteriormente utilizando la Ley de Ohm y las ecuaciones 3 y 4.

Tabla 4. Ciclo de trabajo para las cargas seleccionadas

PARÁMETRO		R1 (390 Ω)	R2 (1 kΩ)
I_{sal} [mA]	Corriente de salida	61.54	24
$I_{sal(max)}$ [mA]	Corriente de salida máxima	950.23	950.23
D	Ciclo de trabajo	0.45	0.28

Después del diseño del convertidor y la selección de las cargas a usar, se procede a mostrar la arquitectura del sistema de control de lógica difusa para utilizarlo en el control de la tensión de salida del convertidor.

4. LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una de las ramas principales de las técnicas de Soft Computing, ésta se caracteriza por la imprecisión e incertidumbre y busca encontrar soluciones casi exactas a problemas difíciles de modelar. A pesar de que hace más de 50 años (1965) el Ingeniero Electricista L. Zadeh introdujo los conceptos básicos de lógica difusa, esta técnica de control se ha popularizado en los últimos 20 años [1]. La primera aplicación de este tipo fue realizada por Mamdani en 1975, creando un controlador difuso para una máquina de vapor. En la actualidad algunos electrodomésticos como lavadoras inteligentes, basan su funcionamiento en esta técnica de control para optimizar el empleo de agua y detergente. También es utilizada para el control de convertidores DC/DC [1,13].

Entre las ventajas más relevantes de ésta técnica se encuentran las siguientes: no requiere de modelos matemáticos complejos; además, es de fácil comprensión dado que su funcionamiento es parecido al comportamiento humano y permite controlar sistemas, aunque no se conozca el modelo matemático que lo rige. Una desventaja de ésta técnica radica en que al establecer las reglas de inferencia para los operadores difusos, no es posible justificar con total certeza su elección.

4.1 ARQUITECTURA

La estructura general de un control mediante lógica difusa, comprende tres etapas (ver figura 5):

1. Interfaz de Fusificación: En esta interfaz se traducen los valores numéricos de las entradas en valores lingüísticos de salida asociados a unos grados de

pertenencia (conjuntos difusos). Para lo anterior se utilizan un tipo de funciones llamadas funciones de pertenencia, las cuales relacionan los valores numéricos de las entradas dentro de un dominio, con valores lingüísticos o niveles cualitativos (ambos establecidos por el diseñador). Para cada entrada se deben diseñar un grupo de funciones de pertenencia.

2. Decisión lógica (Reglas): En esta etapa se define una única salida lingüística para cada combinación posible de los valores lingüísticos de entrada. A la salida se puede tener una o más salidas activas, dependiendo del grado de pertenencia que traigan las funciones de pertenencia de cada entrada.
3. Interfaz de defusificación: En este bloque se toman los grados de pertenencia asociados a cada salida lingüística activa del módulo anterior y mediante un método estadístico, se procede a hallar un único valor numérico a la salida del mismo.

Figura 5. Configuración básica de un control con Lógica Difusa



Para el caso particular, se definen las entradas del controlador: el error y la variación del error como se muestra a continuación:

Error: El error es una de las dos entradas al controlador en estudio. Esta variable permite cuantificar que tan lejano está el valor actual de un valor referencia establecido. Se define como:

$$e(k) = V_{out} - V_{ref} \quad (10)$$

Donde:

k: Tiempo de muestreo

Cabe resaltar que existe una ganancia, una normalización que depende del dominio seleccionado en el siguiente bloque para las funciones de pertenencia.

Variación del error: La variación del error es la otra entrada del controlador. Permite conocer el cambio en el error en un determinado tiempo de muestreo, se define como:

$$de(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (11)$$

Al igual que el error, existe una ganancia y una normalización que depende del dominio seleccionado en el siguiente bloque para las funciones de pertenencia.

4.2. SISTEMA DE CONTROL DE LÓGICA DIFUSA

Los sistemas de lógica difusa se diseñan utilizando dos metodologías: la primera basada en la experiencia humana y la segunda basada en técnicas de optimización. En este trabajo se toman las reglas y las funciones de pertenencia de entrada y salida planteadas en un trabajo realizado anteriormente. [1]

A continuación, se muestran las reglas utilizadas, definiendo siete niveles para cada una de las entradas: negativo alto (NH), negativo bajo (NL), negativo bajo cercano a cero (NVL), cero (Z), positivo bajo cercano a cero (PVL), positivo bajo (PL), positivo alto (PH).

Tabla 5. Reglas de Lógica Difusa seleccionadas

e <i>de</i>	NH	NL	NVL	Z	PVL	PL	PH
NH	NH	NH	NH	NL	NL	NVL	Z
NL	NH	NH	NL	NL	NVL	Z	PVL
NVL	NH	NL	NL	NVL	Z	PVL	PL
Z	NL	NL	NVL	Z	PVL	PL	PL
PVL	NL	NVL	Z	PVL	PL	PL	PH
PL	NVL	Z	PVL	PL	PL	PH	PH
PH	Z	PVL	PL	PL	PH	PH	PH

Teniendo las reglas para las entradas error y variación del error, se plantean las funciones de pertenencia. Estas funciones relacionan un valor numérico a la entrada (para este caso normalizado) y le asigna un grado de pertenencia para cada uno de los siete niveles lingüísticos definidos en las reglas. En la Figuras 6 y 7 se muestran también las respuestas a las combinaciones realizadas, es decir, las funciones de pertenencia o salidas del sistema.

Para entender las reglas y las funciones de pertenencia mostradas en la Tabla 5, se plantean los siguientes dos ejemplos:

- Para un nivel negativo alto (NH) para las entradas del error y la variación del error, se tiene una salida, o función de pertenencia de nivel negativo alto (NH).
- Para un nivel positivo alto (PH) para el error y un nivel negativo alto (NH) para la variación del error, la salida es cero (Z).

Las funciones de pertenencia se introducen en la toolbox Fuzzy de Matlab como se muestra en el Anexo B, obteniendo las funciones mostradas en las Figura 6 y 7 para el error y la variación del error, respectivamente.

Figura 6. Funciones de pertenencia del error

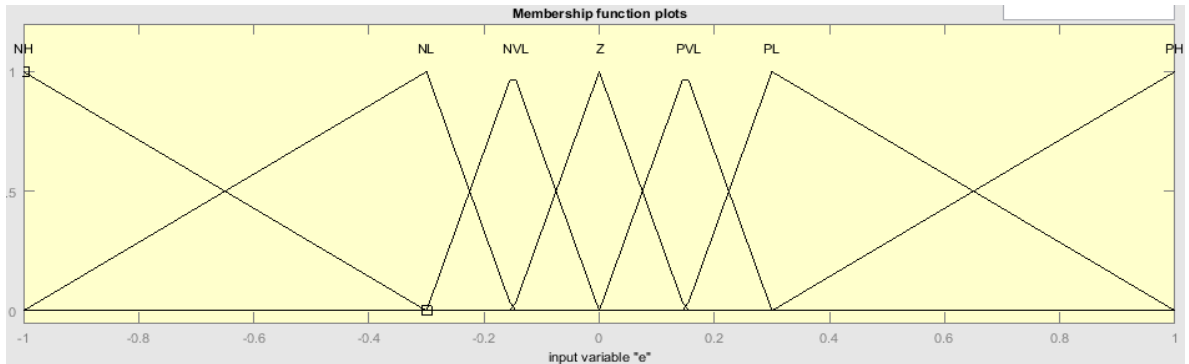
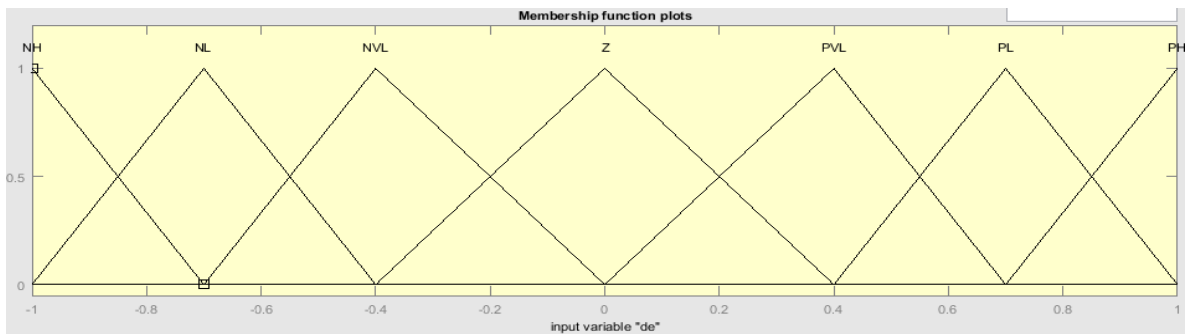


Figura 7. Funciones de pertenencia de la variación del error



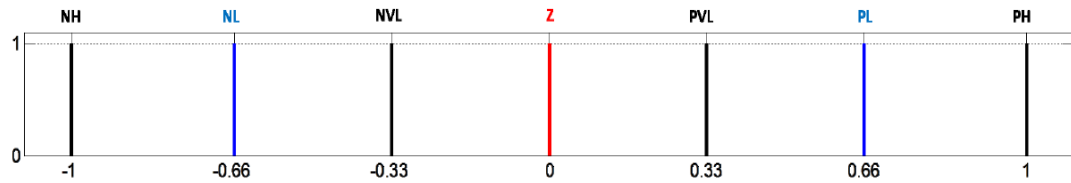
Para la selección de los límites de dichas entradas se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Para garantizar una convergencia rápida del controlador difuso, los límites para el error deben ser cercanos a cero. Por tanto, se seleccionan los valores de 0.15 y 0.3 como se muestra en la Figura 6.
- Para reducir la inestabilidad del controlador difuso, los límites para la variación del error deben ser cercanos a uno. Por tanto, se seleccionan los valores 0.6 y 0.7 como se muestra en la Figura 7.

Luego de evaluar las posibles combinaciones de las entradas, se deben crear funciones de pertenencia para cada salida. Con la finalidad de simplificar el

diseño, se definen funciones de pertenencia simples asignando valores numéricos a cada salida como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Funciones de pertenencia de salida



Fuente: Tomada de [1]

En la siguiente etapa se muestra la simulación del convertidor diseñado en el capítulo anterior y el sistema de control definido anteriormente.

5. SIMULACIÓN

La importancia de la simulación radica en el hecho que permite realizar pruebas antes de la implementación y conexión física de los equipos o elementos. Para las simulaciones realizadas en este capítulo se usa Simulink, puesto que es el software de programación de la MicroLabBox.

En la sección 4.1 se muestra la conexión de los elementos constitutivos para construir el modelo de simulación de un convertidor Buck y el comportamiento de este las cargas descritas en la sección 2.1.4, en la sección 4.2 se muestra la definición de parámetros de simulación, en la sección 4.3 se realiza el modelo de simulación del sistema de control de tensión para el convertidor Buck y finalmente, en la sección 4.4 se muestran los resultados de simulación.

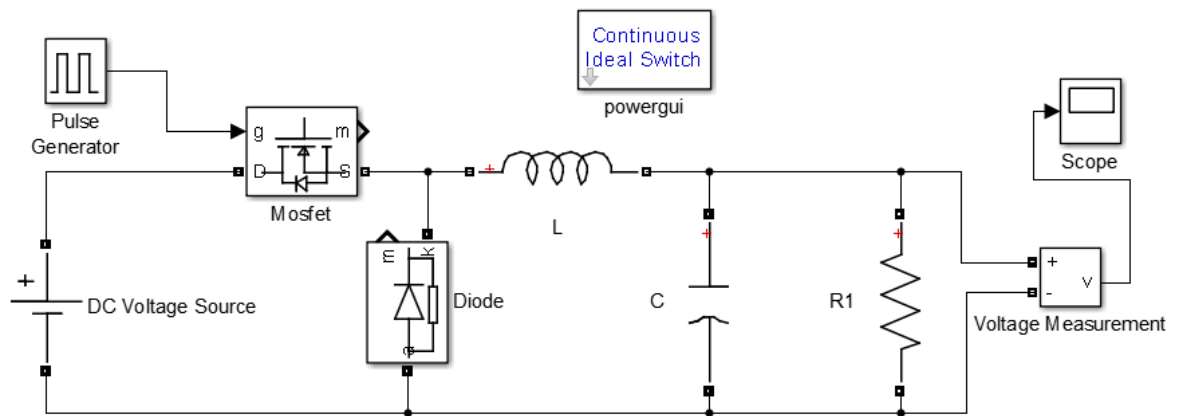
5.1. CONVERTIDOR BUCK

Para modelar el circuito del convertidor Buck, se utiliza la librería SimPowerSystems [6] de Simulink, que proporciona elementos propios de circuitos eléctricos de potencia.

A continuación, se describe el proceso para la simulación; inicialmente se muestra la conexión de los bloques o elementos en la Simulink (se explican en el Anexo A). Luego se muestran los resultados obtenidos mediante simulación para diferentes cargas.

5.1.1. Modelado. En esta etapa se realiza la interconexión del esquema básico de un convertidor DC/DC Buck, presentado en la Figura 1. Se añaden “scope” y medidores de tensión para comprobar que el circuito se comporte de acuerdo a lo esperado, es decir, que después de un periodo de tiempo se estabilice en la referencia asignada. En la Figura 9 se muestra la conexión realizada para la simulación del convertidor Buck.

Figura 9 Convertidor DC/DC Buck en simulación

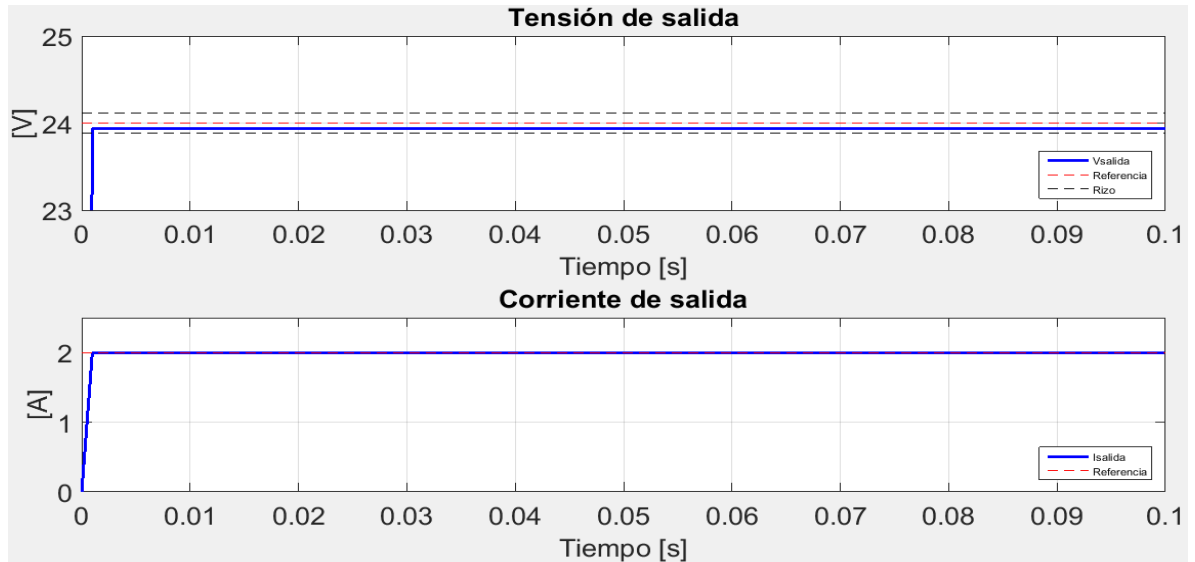


5.1.2. Parametrización de Carga y Resultados. A continuación, se presenta mediante simulación la validación de la parametrización de carga del convertidor Buck presentada en la sección 2.1.4. Para esto se muestra las gráficas de la tensión y la corriente de salida teniendo en cuenta los valores para la inductancia y capacitancia mostrados en la Tabla 3 para: carga resistiva mínima, carga límite entre el modo continuo y el modo discontinuo y finalmente las cargas seleccionadas.

- *Carga resistiva mínima*

Para un valor resistivo mínimo calculado en la sección 2.1.3 con la ecuación 1 se obtuvo un valor de 0.8 para el ciclo de trabajo. Simulando el circuito de la Figura 9 se obtiene la tensión y corriente de salida mostrada en la Figura 10.

Figura 10 Tensión y corriente de salida para carga resistiva mínima

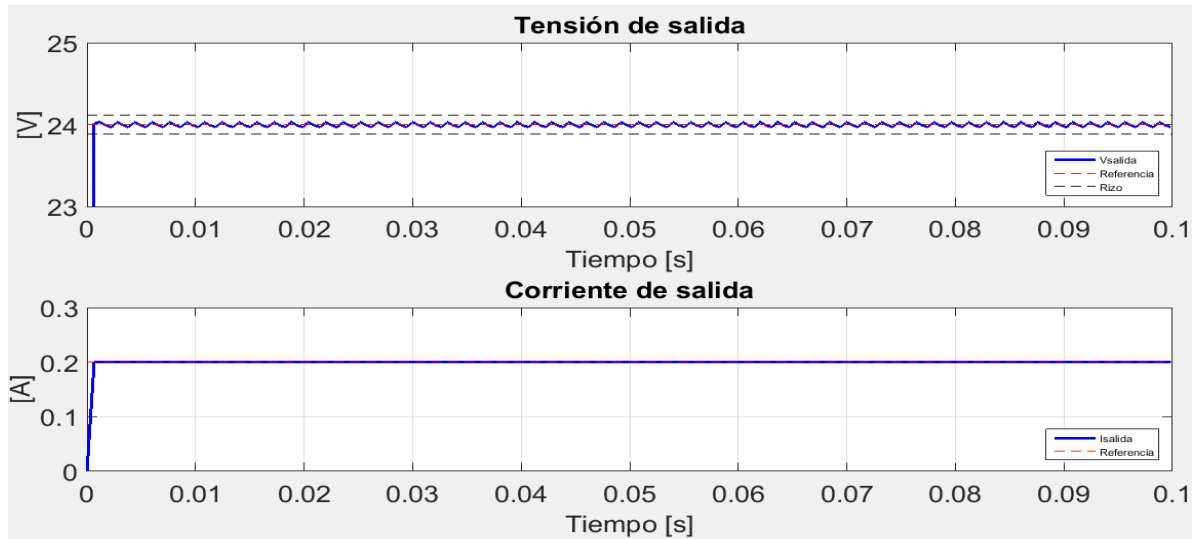


En la figura anterior se puede observar que la tensión se aproxima a la referencia con un valor aproximado de 23.9 [V] con un rizo prácticamente nulo. También se puede observar que la corriente llega al valor esperado teóricamente para esta carga, presentando al igual que la tensión, una ondulación aproximadamente nula.

- *Carga límite entre el modo continuo y discontinuo*

Para el valor resistivo límite entre el modo continuo y el modo discontinuo calculado en la sección 2.1.3 se obtiene la tensión y corriente de salida mostradas en la Figura 11.

Figura 11. Gráfica de la tensión y corriente de salida para el límite de carga

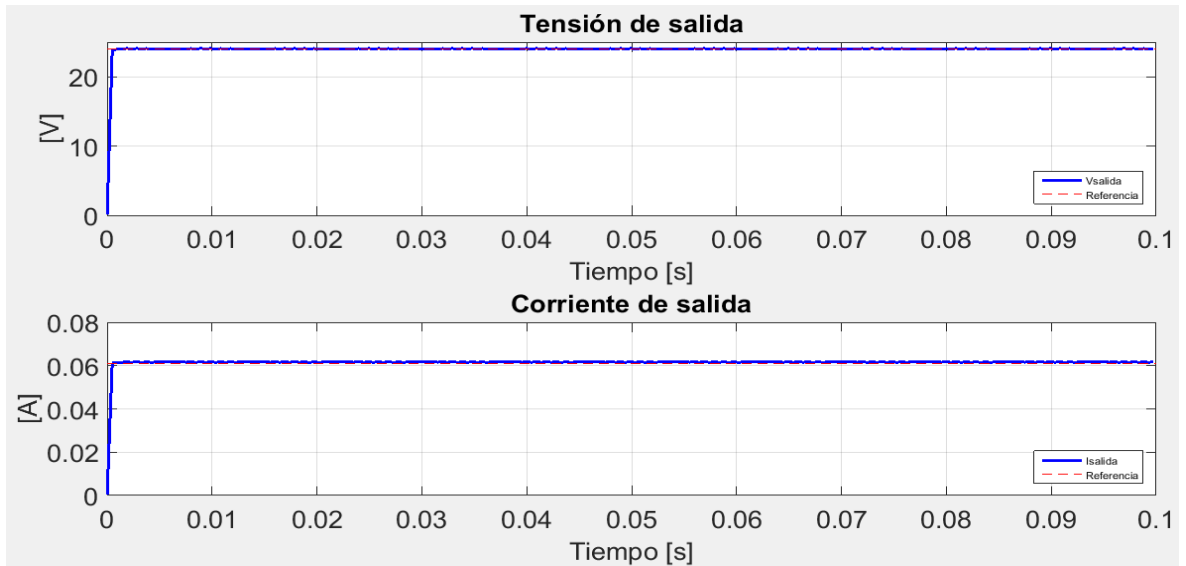


En la figura anterior se puede observar que la tensión mantiene su valor medio sobre la referencia con una oscilación leve, manteniéndose en el rizo esperado por el diseño en la ecuación 9. También se puede observar que la corriente llega al valor esperado teóricamente para esta carga, presentando un rizado despreciable.

- Cargas seleccionadas

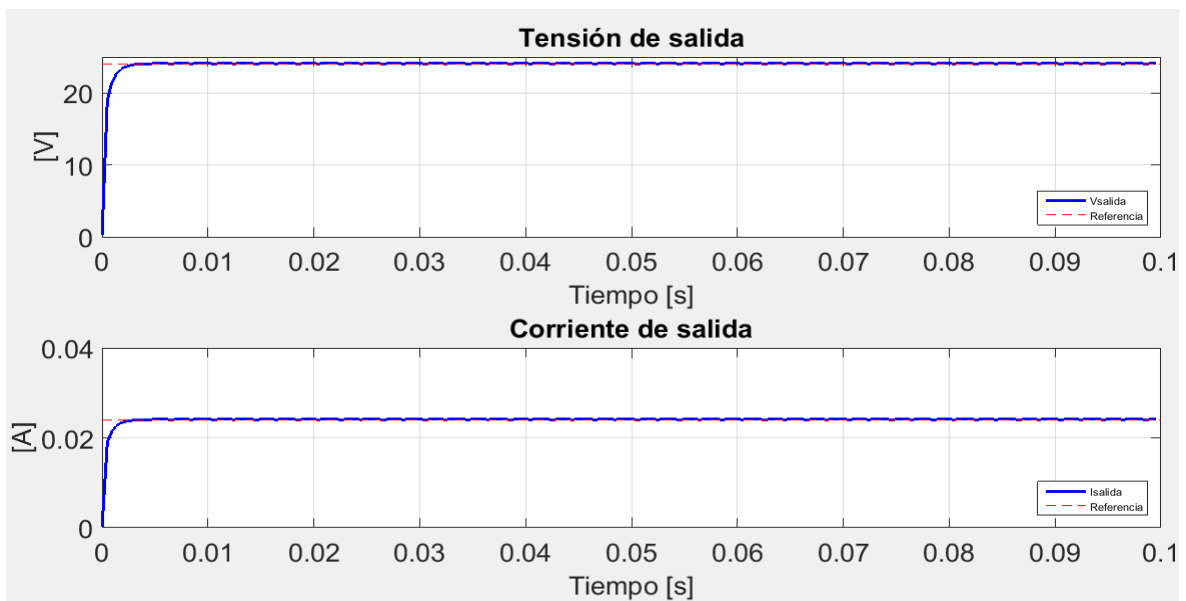
Con las cargas seleccionadas en la sección 2.1.4 para la operación en modo discontinuo del convertidor, se muestra el comportamiento de la tensión y la corriente de salida. En las Figuras 12 y 13 se muestran resultados para una carga de 390 [Ω] y una de 1 [k Ω], respectivamente.

Figura 12. Gráfica de la tensión y corriente de salida para 390 [Ω]



En la figura anterior se puede observar que la tensión mantiene su valor medio sobre la referencia (24 [V]) con una oscilación leve, también se puede observar que la corriente llega al valor esperado teóricamente para esta carga (61 [mA]) presentando un rizo leve.

Figura 13. Gráfica de la tensión y corriente de salida para 1 [kΩ]



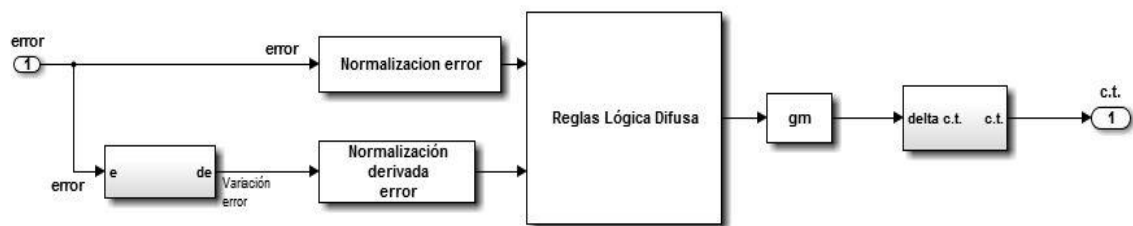
En la figura anterior se puede observar que la tensión mantiene su valor medio sobre la referencia con una oscilación leve, también se puede observar que la corriente llega al valor esperado teóricamente para esta carga (24 [mA]) presentando un rizo leve.

La corriente en el inductor para las cargas mencionadas anteriormente, se puede ver en el Anexo C. De acuerdo a la validación de carga realizada anteriormente, se procede a parametrizar el sistema de control.

5.2. SISTEMA DE CONTROL

En la Figura 14 se observa el esquema de conexión planteado para el sistema de control, se utilizan las entradas al sistema definidas anteriormente como el error y la variación del error. Los bloques utilizados se explican en el Anexo D.

Figura 14. Esquema de control para la simulación



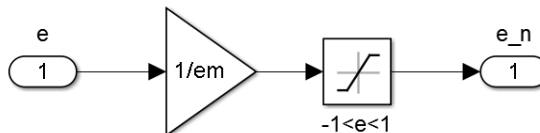
Se describen a continuación los aspectos básicos para realizar la simulación del sistema de control. Los valores característicos del controlador se obtienen mediante el método empírico de ensayos a prueba y error basados en [1]. Se debe tener en cuenta que, para todas las figuras siguientes de esta sección, se utiliza como carga una resistencia de 390 [Ω] y un tiempo de muestreo $Tech$ de 0,2 [μs]

(el cual fue seleccionado menor al tiempo de conmutación del mosfet para garantizar una correcta obtención de datos).

- *Error*

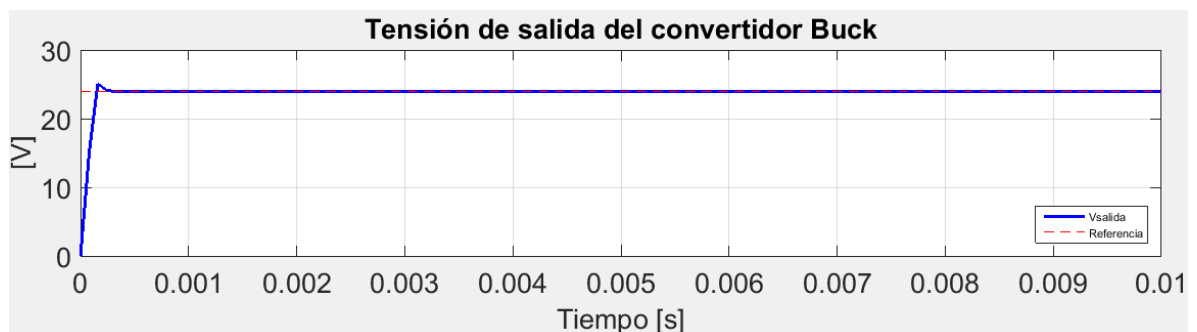
Como se plantea en la ecuación 10, el error es un dato numérico y una de las entradas al controlador. Antes de entrar al control difuso el error es afectado por una ganancia proporcional (em) y se normaliza entre $[-1,1]$, debido a que las funciones de pertenencia se normalizaron entre estos valores. En la Figura 15 se muestra la adaptación de esta entrada.

Figura 15. Bloque de simulación de la normalización del error



En el Anexo E se pueden observar las gráficas resultantes para la tensión de salida del convertidor ante variaciones de la ganancia del error em . En la Figura 16 se muestra la gráfica obtenida con el valor de em seleccionado.

Figura 16. Gráfica Tensión de salida Buck con $em=0.31$

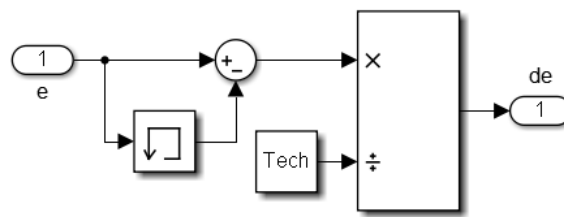


Para dicho valor se presenta una estabilización más cercana a la referencia. Además, se puede apreciar que se presenta un pico de 25 [V] y un tiempo de estabilización de 1.5 [ms].

- *Variación del error*

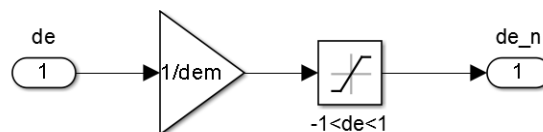
Es necesario conocer el cambio o la razón de cambio del error durante la simulación. En la Figura 17 se muestra el sistema de bloques utilizado en Simulink.

Figura 17. Bloque de simulación de la variación del error



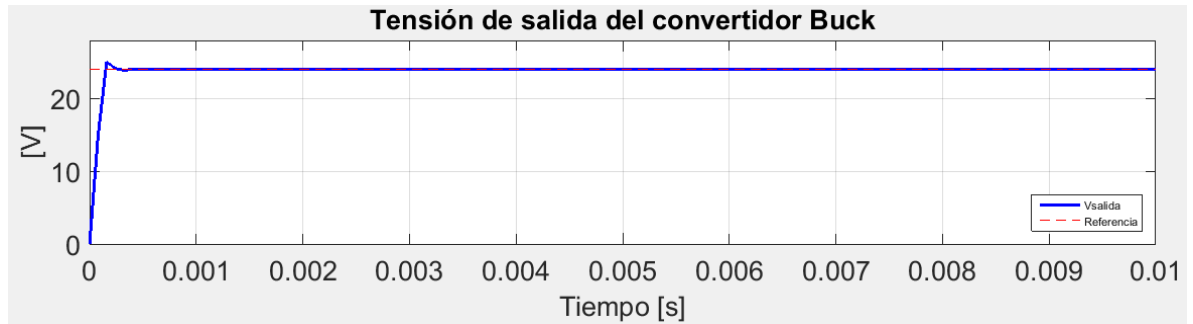
Al igual que la señal de error, es necesario afectar la variación del error por una ganancia derivativa dem y normalizarla entre $[-1,1]$ como se observa en la Figura 18.

Figura 18. Bloque de simulación de la normalización de la variación del error



En el Anexo E se pueden observar las gráficas resultantes para la tensión de salida del convertidor ante variaciones de dem . En la Figura 19 se muestra la gráfica obtenida con el valor de dem seleccionado.

Figura 19. Resultados de simulación con $dem=1$

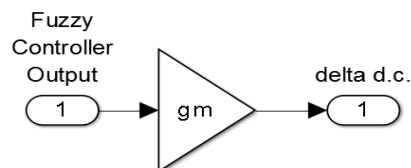


Con el valor de dem se presenta un tiempo de estabilización de 1.5 [ms] con un pico en el transitorio de 25 [V].

- *Ganancia del controlador*

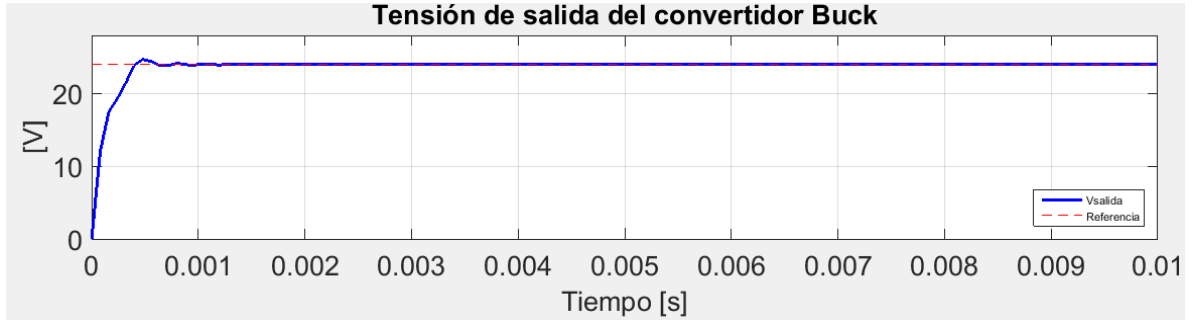
Su función es la de afectar el dato que sale del proceso de asignación de valor por las reglas de pertenencia definidas para el controlador difuso. En la simulación se modela como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Bloque de simulación de la ganancia del controlador difuso



Este parámetro influye en el pico y la estabilización de la respuesta. Por tanto, entre más grande es este valor mayor es el pico de la respuesta. Luego de ensayos se escoge un valor gm de 0.0013 (ver Figura 21) con un pico de 25 [V] y tiempo de estabilización de 1.5 [ms].

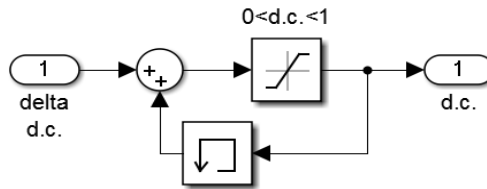
Figura 21. Resultados de simulación con $gm=0.0013$



- *Ciclo de trabajo*

Este subsistema es el último filtro utilizado para obtener el ciclo de trabajo para el convertidor Buck. Dado que la entrada es el cambio relativo del ciclo de trabajo, se debe tomar el valor de ciclo de trabajo antes de cualquier variación y aplicarle el respectivo cambio, con tal de obtener el nuevo ciclo de trabajo acotado entre [0,1]. Para tal fin, se utilizan los bloques mostrados en la Figura 22.

Figura 22. Bloque de simulación del ciclo de trabajo



Finalmente, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6 para los parámetros asociados a la simulación.

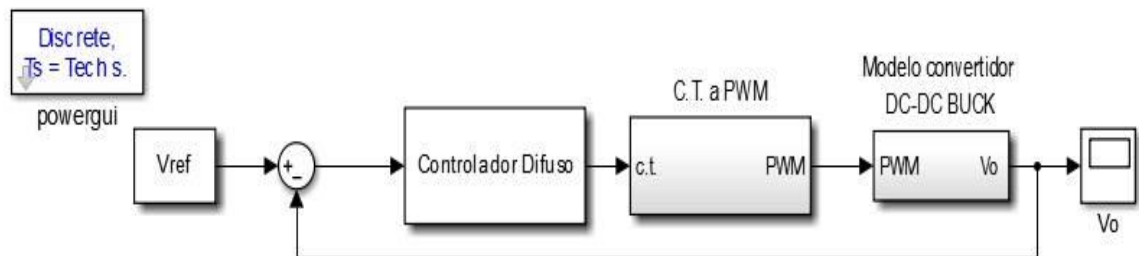
Tabla 6. Valores finales obtenidos para simulación

PARÁMETRO	VALOR
gm	0.0013
em	0.31
dem	1

5.3. SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN PARA EL CONVERTIDOR BUCK

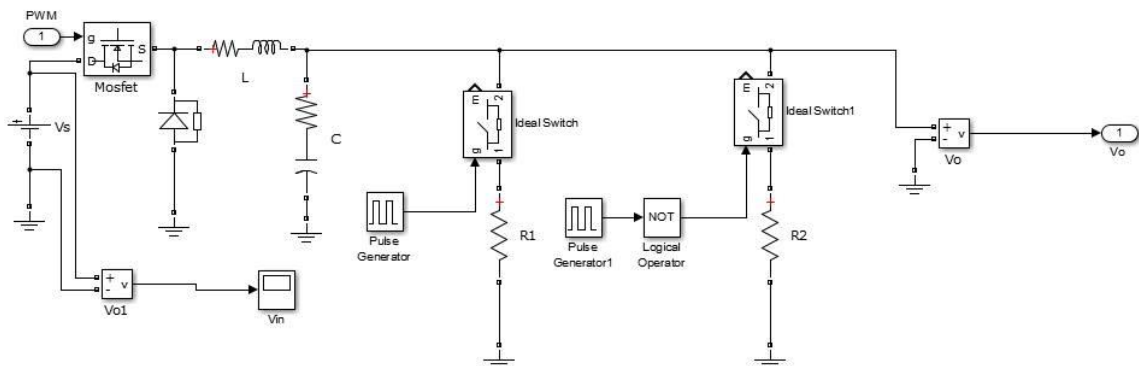
Teniendo la simulación del convertidor y del sistema de control mediante lógica difusa, se realiza la interconexión de los sistemas utilizando un sistema de control en lazo cerrado. Para esto se requiere una realimentación, es decir, tomar una medida de la tensión de salida para compararla con una tensión de referencia. En la Figura 23 se muestra el esquema de la interconexión de los sistemas

Figura 23. Bloque de simulación de Ciclo de Trabajo a PWM



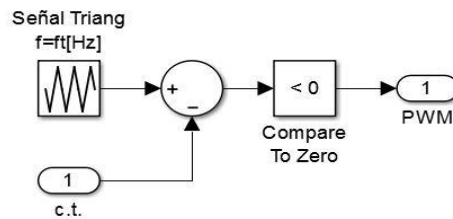
Para el controlador difuso mostrado en la figura anterior se utiliza el esquema de control de la Figura 14. El modelo del convertidor DC/DC Buck implementado en simulación se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Modelo de simulación de convertidor Buck con cambio de carga



Para la conexión de los bloques anteriormente mencionados es necesario utilizar el bloque mostrado en la Figura 25 para convertir el ciclo de trabajo proveniente del control en una señal PWM para activar el MOSFET.

Figura 25. Bloque de simulación de Ciclo de Trabajo a PWM



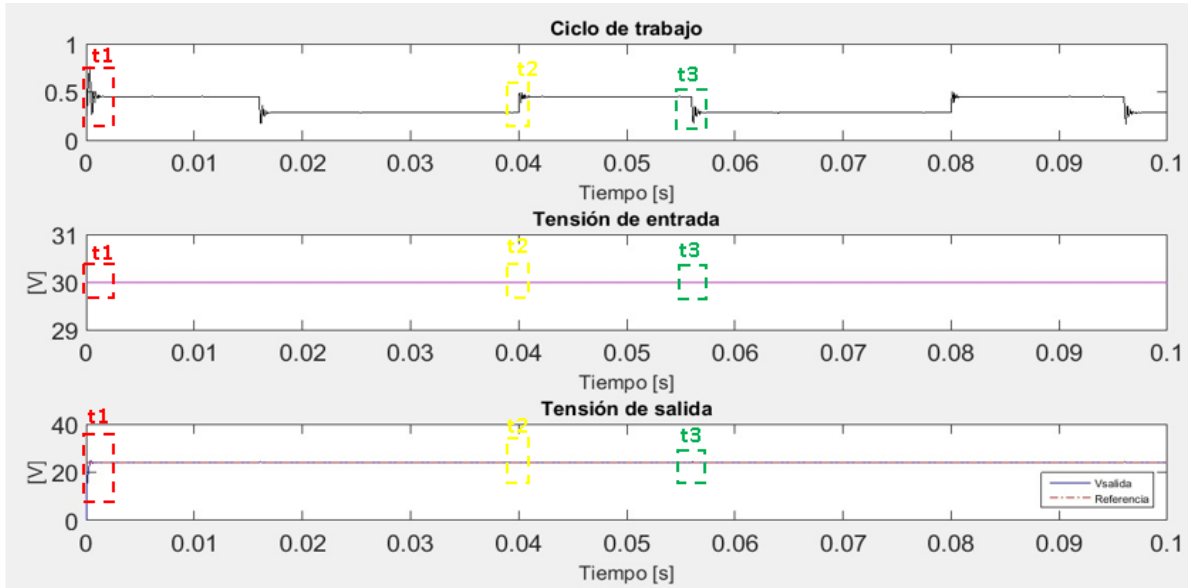
5.4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En la etapa de simulación se realizan las siguientes pruebas: variación de carga que consiste en cambiar una resistencia de 1 [k Ω] por una de 390 [Ω], variación de carga que consiste en cambiar una resistencia de 390 [Ω] por una de 1 [k Ω]; adicionalmente, se muestra el intervalo de arranque.

Para las pruebas se utilizan los siguientes parámetros: los presentados en las Tablas 3 y 6, una tensión de referencia de 24 [V] y un periodo de muestreo de 0.2 [μ s]. Para cada una de las simulaciones se muestra el ciclo de trabajo, la tensión de entrada y la tensión de salida.

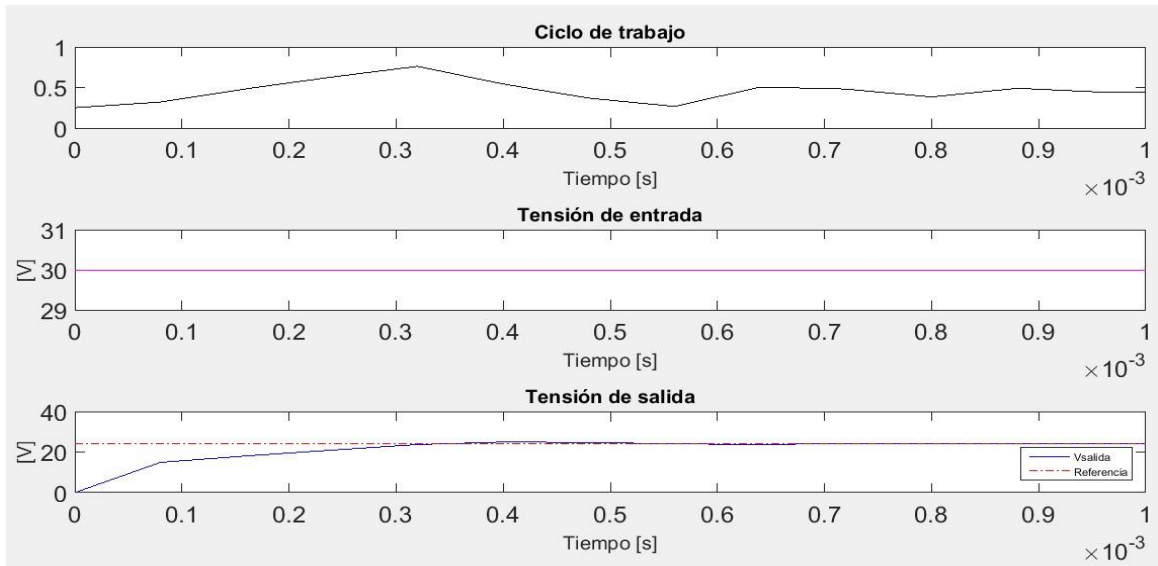
La Figura 26 muestra de manera general las variaciones realizadas y las Figuras 27,28 y 29 muestran el comportamiento ante las pruebas realizadas.

Figura 26. Gráfica simulación carga variables y referencia constante



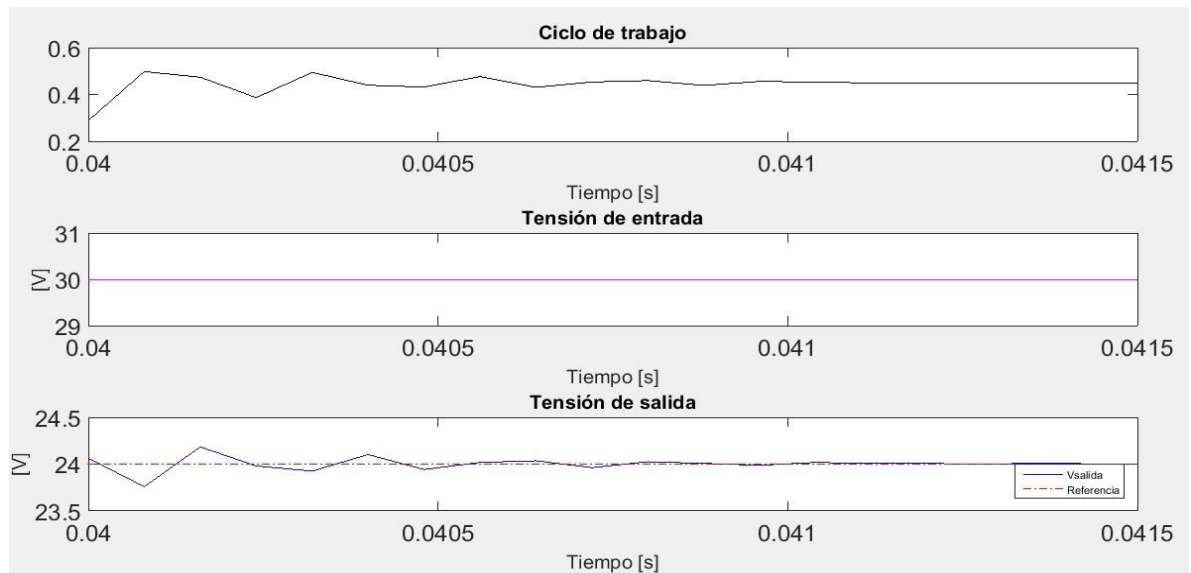
5.4.1. Arranque con 390 [Ω]. En la Figura 27 se muestra que, en el periodo de tiempo tomado el sistema de control lleva la tensión de salida del convertidor desde una tensión cero hasta la tensión de referencia. Durante este periodo se presentan oscilaciones en el ciclo de trabajo de máximo 0.8 y mínimo 0.25, estabilizándose en un valor cercano al teórico para este modo de operación mostrado en la Tabla 4.

Figura 27. Gráfica de arranque con 390 [Ω]



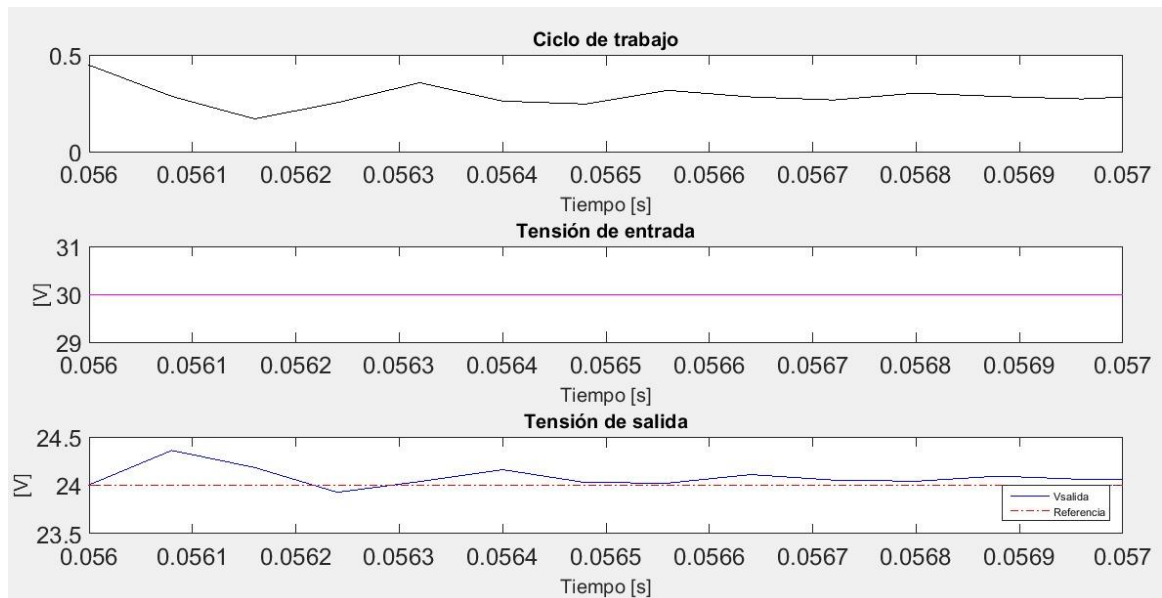
5.4.2. Cambio de Carga de 1 [kΩ] POR 390 [Ω]. Como el valor resistivo de carga disminuye la tensión tiende a caer, por tanto, el ciclo de trabajo aumenta para que la tensión continúe en la referencia deseada. Debido a que se utiliza una carga igual a la de la prueba anterior, el ciclo de trabajo se mantiene en un valor cercano al teórico mostrado en la Tabla 4. En la Figura 28 se aprecia que el sistema de control es capaz llevar la tensión de salida a la referencia en aproximadamente 1 [ms].

Figura 28. Gráfica de cambio de carga de 1 [kΩ] por 390 [Ω]



5.4.3. Cambio de Carga de 390 [Ω] POR 1 [kΩ]. En esta prueba se aumenta el valor resistivo de carga, por tanto, la tensión tiende a elevarse y el ciclo de trabajo disminuye para garantizar que la tensión continúe en la referencia. El ciclo de trabajo para este caso es aproximadamente el calculado y mostrado en la Tabla 4. Se puede apreciar en la Figura 29 que el sistema de control es capaz de estabilizarse en la tensión de referencia cuándo pasa aproximadamente 1 [ms].

Figura 29. Gráfica de cambio de carga de 390 [Ω] por 1 [k Ω]

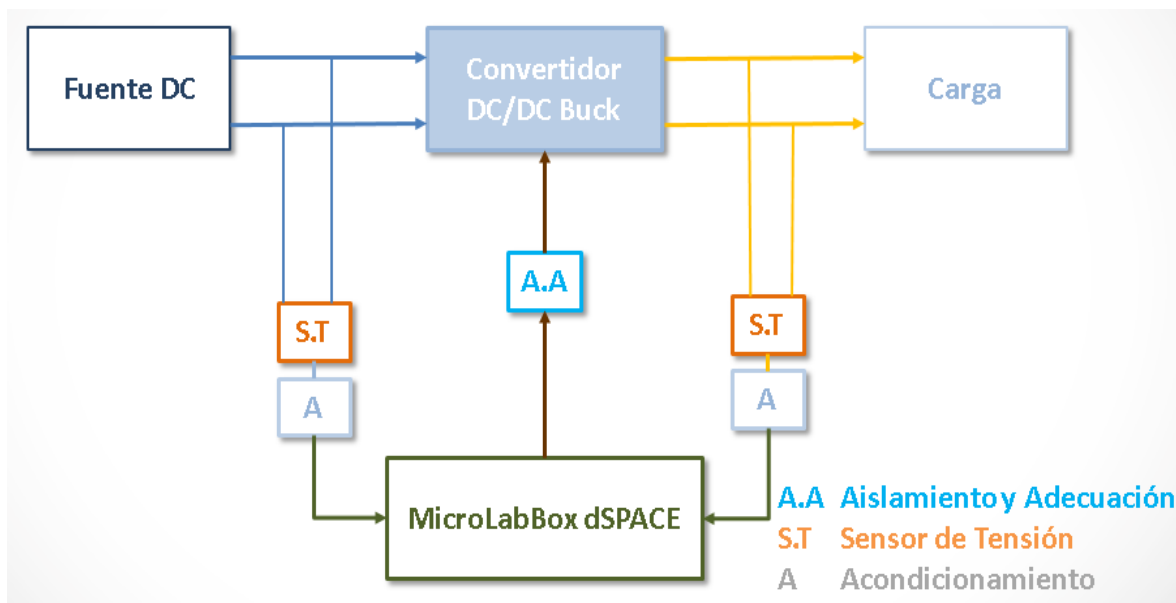


En las simulaciones mostradas anteriormente se puede ver que el sistema de control es capaz de mantener la tensión de salida del convertidor constante. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se procede a realizar la implementación física del convertidor y su sistema de control tomando el control parametrizado y probado en simulación.

6. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se describe la utilización de la MicroLabBox para la implementación de un convertidor Buck y su sistema de control; para lo anterior se presentan cada uno de los subsistemas que componen la implementación propuesta en la Figura 30. En la sección 5.1 se describe el montaje y en la sección 5.2 los resultados de la implementación.

Figura 30. Diagrama de bloques para la implementación



6.1. MONTAJE

A continuación, se describen los elementos utilizados en la implementación, entre ellos están: Controlador MicroLabBox, convertidor DC/DC Buck, sensor de tensión, optoacoplador. Los anteriores subsistemas, se bosquejan en la Figura 30.


6.1.1. Convertidor Buck. En esta sección, se describen los elementos seleccionados para la implementación del convertidor Buck. Además, se muestra la implementación física del circuito del convertidor.

6.1.1.1. Selección de Elementos.

- *Inductor*

Tomando como referencia el valor de inductancia mínima hallado en la sección 3.1, el valor comercial que se ajusta a los requerimientos necesarios para el inductor, se muestra en la Figura 31. La referencia de la bobina encontrada es la DO5040H-334 de Coilcraft, con valor nominal de inductancia de 330 [μ H], a 50 [kHz] y 3.5 [Apico].

Figura 31. Características generales de la bobina



252.57 μ H inductors ≥ 2.20 A peak at 25°C												
Part number	L actual	L nominal	Ipeak	Irms	DCR	Total losses	Part temp.	Temp. rating	Footprint	Length	Height	Price
	μ H	μ H	Amps	Amps	mOhms	mW	°C	°C	mm ²	mm	mm	
MSS1583-334	287.98	330.00	2.40	1.45	345.00	1260	105°C	125°C	240.25	15.50	8.60	\$1.00
DO5040H-334	318.97	330.00	3.50	1.50	325.00	1170	96°C	125°C	281.81	18.54	12.00	\$1.17

Fuente: Tomada de [11]

Para la selección del elemento de conmutación, en este caso el Mosfet, los parámetros más representativos a tener en cuenta son: la tensión de entrada, la frecuencia de trabajo, la corriente de diseño del circuito y la resistencia de encendido.

El mosfet escogido es tipo N, en este se conecta el terminal positivo del generador de señales a G (Gate) y el terminal negativo a S (Source). En la Tabla 7 se

especifica uno a uno los parámetros tomados en cuenta teniendo en cuenta el esquema y el datasheet de un mosfet tipo N mostrados en el Anexo F.

Tabla 7. Parámetros de selección del Mosfet

PARÁMETRO		VALOR REQUERIDO	VALOR NOMINAL	OBSERVACIONES
V_{DD5} (V)	Voltaje drenador – surtidor	$\geq 36,35$	55	El valor nominal del elemento debe ser aproximadamente el doble de la tensión de entrada.
V_{GS} (V)	Voltaje puerta – surtidor (V)	$5 \leq V_{GS} < 20$	± 20	El valor del generador de señales, debe ser inferior al V_{GS} nominal del mosfet.
R_{ON} (m Ω)	Resistencia de encendido	-	11	La resistencia debe ser pequeña para que la caída de tensión sea máximo $R_{ON} \cdot I_{OUT}$.
f (kHz)	Frecuencia	50	5682 máximo	El periodo nominal del mosfet se obtiene de la suma de los tiempos encontrados en el datasheet mostrado en el Anexo F. La frecuencia es el inverso del periodo.
I (A)	Corriente	4 mínimo	85	La corriente de operación máxima de diseño es 2 A. Sin embargo, se busca un mosfet con mínimo 4 A.

- *Diodo*

Para este tipo de aplicaciones se utilizan diodos de potencia y de alta frecuencia. En este caso se utiliza el diodo Schottky SCS215AG, el cual cumple con las características requeridas.

El diodo SCS215AG presenta una baja capacitancia, lo que le permite conmutar a altas frecuencias. Es importante resaltar que la frecuencia máxima de este elemento se obtiene con el tiempo de conmutación encontrado en el datasheet (ver Anexo G) ; dicha frecuencia es del orden de los 55 [MHz], de esta manera, el diodo trabaja sin problemas a la frecuencia de operación del convertidor. En el Anexo G se muestra el esquema básico del diodo y sus características principales. En la Tabla 8 se muestran los parámetros de selección del diodo y algunas observaciones respecto a su escogencia.

Tabla 8. Parámetros de selección del Diodo

PARÁMETRO		VALOR REQUERIDO	VALOR NOMINAL	OBSERVACIONES
V_R (V)	Tensión inversa	60 mínimo	650	El valor nominal del elemento debe ser aproximadamente el doble de la tensión de entrada.
V_F (V)	Tensión directa	$\leq 1,5$	1,35 Típico	La caída de tensión inversa generalmente debe ser menor a 1,5 V
f (kHz)	Frecuencia	50	55000 Máximo	El periodo nominal del diodo es el resaltado en el Anexo G. La frecuencia es el inverso del periodo.
I (A)	Corriente	4 mínimo	15	La corriente de operación máxima de diseño es 2 A. Sin embargo, se busca un mosfet con mínimo 4 A.

6.1.1.2. Implementación. Finalmente, se implementan los elementos descritos anteriormente en una PCB, como se puede apreciar en la Figura 32.

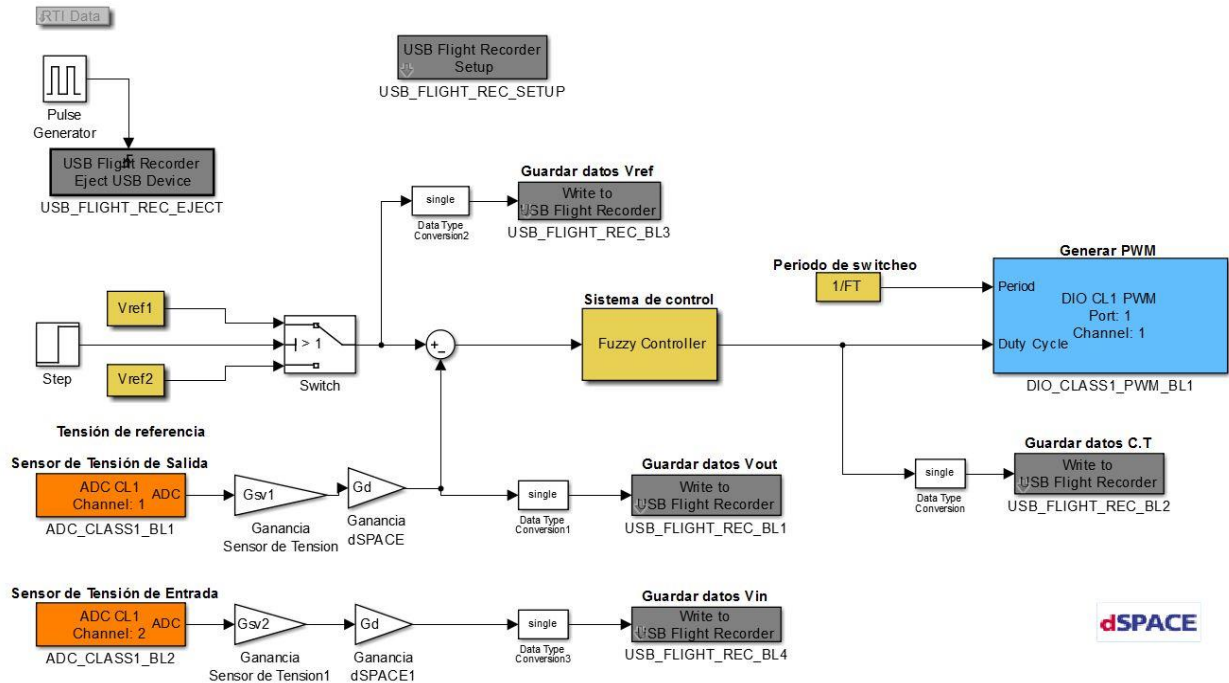
Figura 32. Convertidor Buck implementado



Como se observa en las figuras anteriores, al circuito del convertidor se le colocan terminales que permiten la conexión de la fuente DC, la carga y la señal PWM.

6.1.2. Controlador. El controlador utilizado es la MicroLabBox – dSPACE, del cual se realizó un manual en un trabajo de grado anterior [7] que fue utilizado como guía para el desarrollo de esta etapa. A continuación, se muestra el esquema general de la implementación para la aplicación requerida. La descripción de los bloques utilizados en la Figura 33 se muestran con detalle en el Anexo H.

Figura 33. Esquema de Implementación en la MicroLabBox - dSPACE



Los bloques de color naranja de la Figura 33 representan la entrada de las señales de tensión provenientes de la salida del convertidor Buck y la salida de la fuente DC, respectivamente.

Como salida, se genera un PWM, el cual se asigna al pin 1 del puerto digital I/O de la MicroLabBox. Para tal propósito se utiliza el bloque azul de la Figura anterior, asignándole un ciclo de trabajo proveniente del control y la frecuencia de conmutación del diseño.

6.1.3. Sensores y Adecuación. Se utilizan sensores de tensión y una etapa de aislamiento mediante optoacopladores; estos elementos fueron seleccionados y adquiridos en un trabajo de grado anterior [7].

El sensor de tensión además de tomar la medición de la señal de tensión en dónde se conecte, adecua la señal a un rango máximo entre ± 10 [V] para ser

ingresada a la MicroLabBox. Por tanto, maneja una relación teórica V_{in}/V_{out} de 6 para las entradas de 60 [V]. Sin embargo, para mayor exactitud en el control se toman algunos datos para calcular la ganancia real de los sensores y estos se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Ganancia de los sensores de tensión de 60/10

ENTRADA	SALIDA	ENTRADA/SALIDA
10	1.6	6.25
15	2.3	6.5217
20	3.2	6.25
24	3.9	6.1538
30	5.1	5.8823
PROMEDIO		6.2116

Teniendo en cuenta el valor promedio obtenido en la Tabla 9, se toma un valor para la constante G_{sv} de la simulación de 6.2.

El Optoacoplador se utiliza con el fin de aislar la MicroLabBox de los circuitos de potencia conectados a esta. Si se tiene una tensión de la señal de entrada es de 5 [V], la salida será de 15 [V]. Lo anterior es importante, teniendo en cuenta que el elemento de conmutación tiene un rango de tensiones admisibles para las señales de activación.

Finalmente, se realiza el montaje de los elementos mostrados anteriormente utilizando cargas resistivas de 390 [Ω] y 1 [k Ω], teniendo como resultado las conexiones mostradas en la Figura 34.

Figura 34. Montaje de implementación de un sistema de control para la tensión de salida de un convertidor Buck



6.2. RESULTADOS

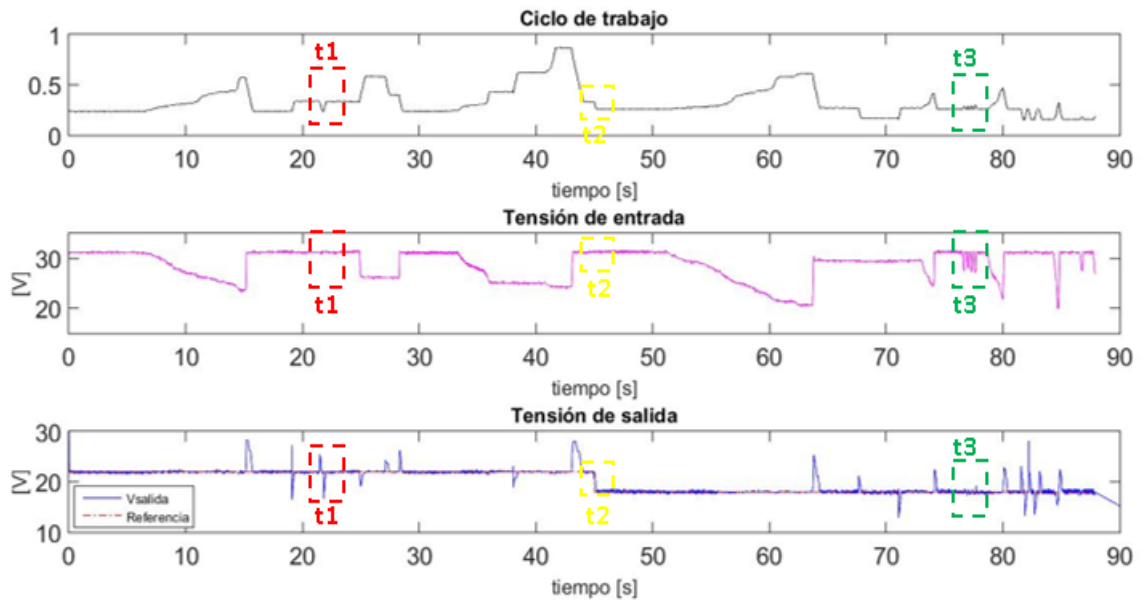
Se realizan diferentes pruebas bajo los parámetros de las Tablas 6 y 10 para observar el comportamiento del sistema de control ante las variaciones efectuadas. Primero se muestran los resultados con variaciones en la carga y en la fuente de entrada y un voltaje de referencia constante utilizando una ganancia del controlador $gm2$. Finalmente, se muestran los resultados con cambios de carga, de referencia y de la tensión de entrada con una ganancia del controlador $gm1$.

Tabla 10. Valores de parámetros utilizados en la simulación del sistema

PARÁMETRO		VALOR
V_{ref1}	Voltaje de referencia 1	22 [V]
V_{ref2}	Voltaje de referencia 2	18 [V]
T	Tiempo de simulación	90 [s]
Tech	Tiempo de muestreo	1 [ms]
Gsv1	Ganancia sensor de tensión 1	6.2
Gsv2	Ganancia sensor de tensión 2	6.2
Gd	Ganancia dSPACE	10
gm1	Ganancia del controlador 1	0.013
gm2	Ganancia del controlador 2	0.0013

6.2.1. Fuente, carga y referencia variables. Para el caso mostrado en la Figura 35 inicialmente se hace un cambio de carga a tensión constante, luego se hace un cambio de referencia entre 22 [V] y 18 [V] y finalmente, se hacen variaciones en la fuente de entrada.

Figura 35. Gráfica implementación con fuente, carga y referencia variables (gm2)

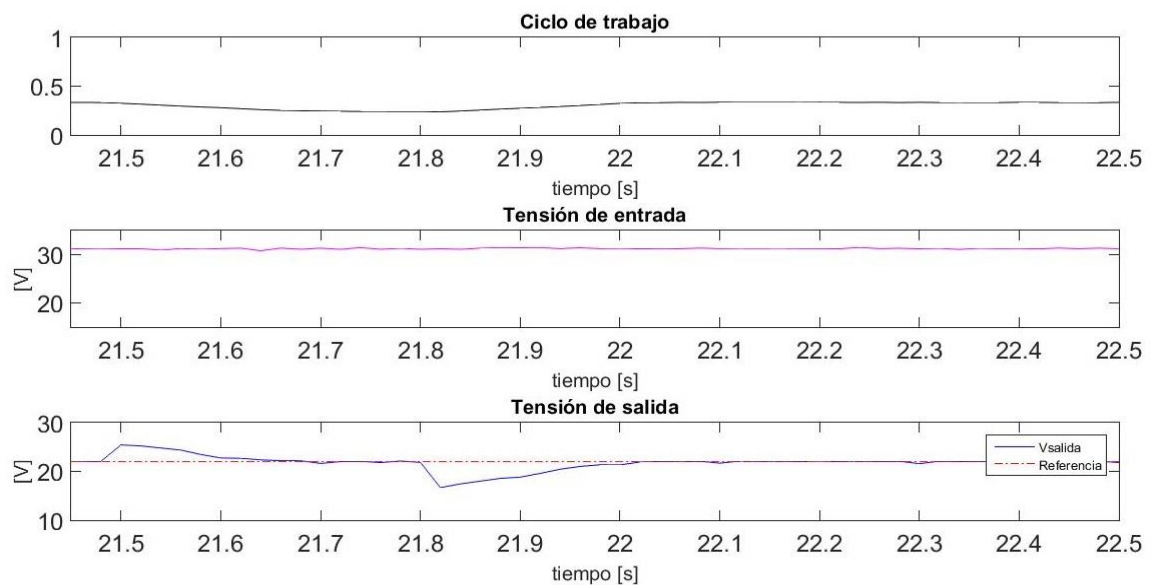


6.2.1.1. Cambio de Carga. En un primer lapso de tiempo se cambia la carga R1 por una carga R2, finalmente se coloca nuevamente la carga R1, quitando la carga R2. En la Tabla 11 se muestran los valores obtenidos para el ciclo de trabajo mediante la ecuación 3 utilizando el valor de inductancia comercial mostrada en la Figura 31, una tensión de salida de 22 [V] y una tensión de entrada de 32 [V].

Tabla 11. Ciclo de trabajo teórico para cambio de carga (gm2)

PRUEBA	PARÁMETRO	D
Cambio de carga	390 [Ω]	0.36
	1 [k Ω]	0.22

Figura 36. Gráfica implementación carga variable (gm2)



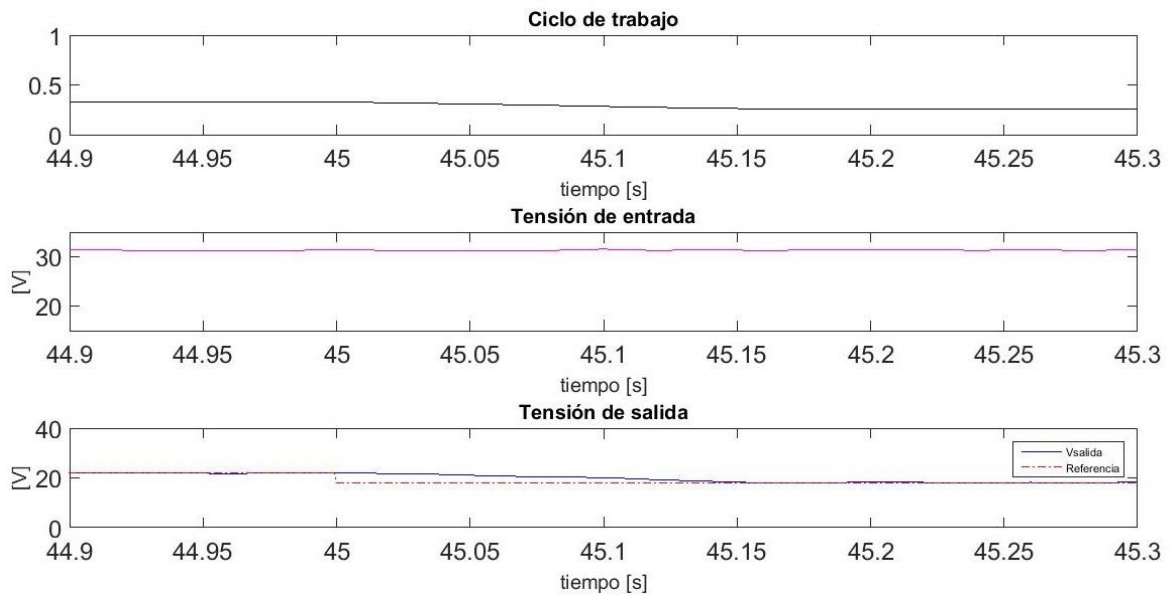
En ambos casos la Figura 37 permite apreciar que los tiempos de estabilización están entre los 200 y 300 [ms]. El ciclo de trabajo disminuye durante este periodo, pero vuelve a un valor de 0.4 al final de dicho periodo concordando con los valores teóricos del ciclo de trabajo registrados en la Tabla 11.

6.2.1.2. Cambio de Referencia. Teniendo una tensión de entrada constante, se realiza un cambio en la referencia de la tensión de salida, desde 22 hasta 18 [V]. En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos para el ciclo de trabajo mediante la ecuación 3 utilizando el valor de inductancia comercial mostrada en la Figura 31 y una carga de 390 [Ω].

Tabla 12. Ciclo de trabajo teórico para cambio de referencia (gm2)

PRUEBA	PARÁMETRO	D
Cambio de referencia	22 [V]	0.36
	18 [V]	0.22

Figura 37. Gráfica implementación con referencia variable (gm2)



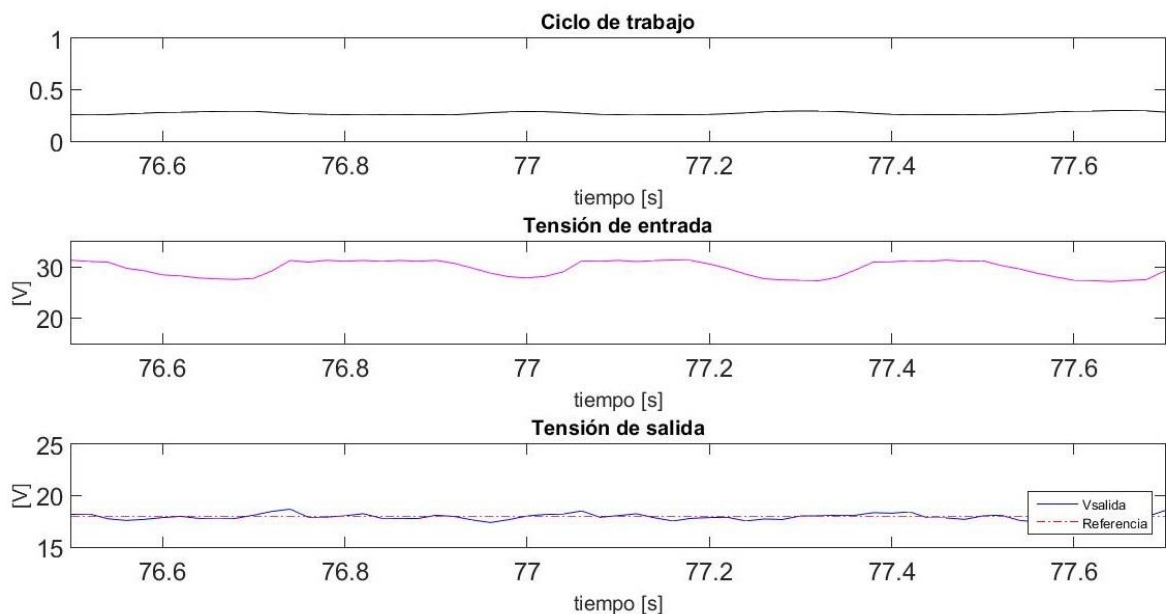
En la Figura 38 se puede ver la tensión de salida tarda 200 [ms] en llegar nuevamente a la referencia y el ciclo de trabajo cae de acuerdo a los valores teóricos mostrados en la Tabla 12.

6.2.1.3. Cambio de la Tensión de Entrada. Para esta prueba se realizan cambios rápidos y continuos de la tensión de entrada entre 32 y 28 [V]. En la Tabla 13 se muestran los valores obtenidos para el ciclo de trabajo mediante la ecuación 3 utilizando el valor de inductancia comercial mostrada en la Figura 31, una tensión de salida de 18 [V] y una carga de 390 [Ω].

Tabla 13. Ciclo de trabajo teórico para cambio en la tensión de entrada (gm2)

PRUEBA	PARÁMETRO	D
Cambio en la tensión de entrada	32 [V]	0.25
	27 [V]	0.34

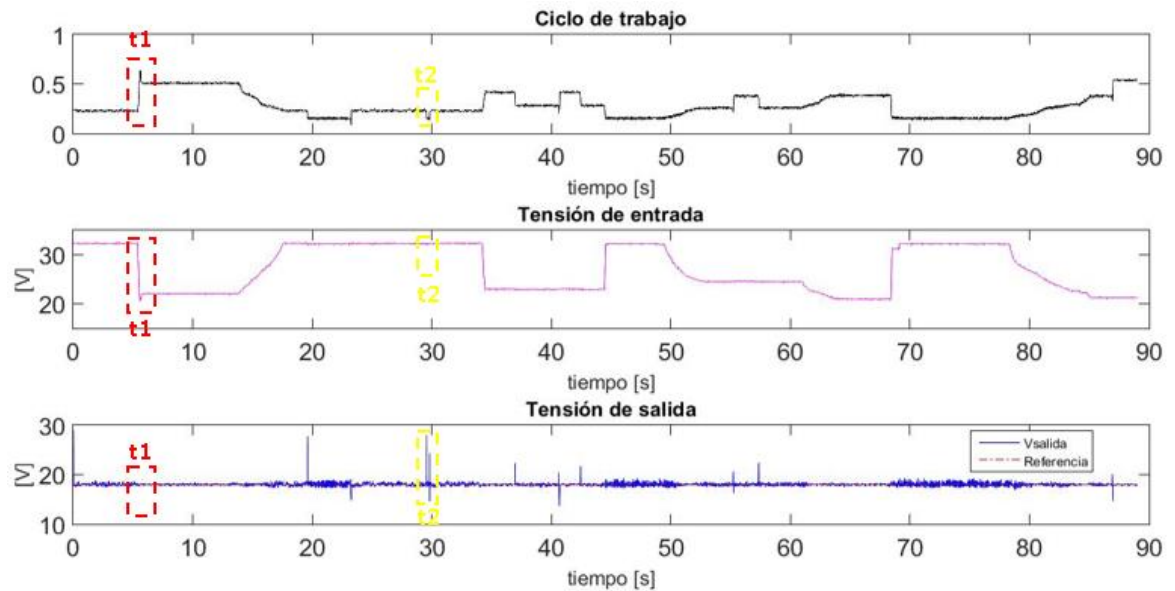
Figura 38. Gráfica implementación con fuente variable (gm2)



La Figura 38 permite ver que se presentan oscilaciones alrededor de la tensión de salida con un máximo 3 [V], restableciéndose en un promedio de tiempo de 100 [ms]. En el caso del ciclo de trabajo se puede apreciar que varía de acuerdo a los valores teóricos consignados en la Tabla 13.

6.2.2. Fuente y Carga Variables, Referencia Constante. Para el caso mostrado en la Figura 39 inicialmente se hace un cambio repentino en la tensión de entrada. Luego se hace un cambio de carga a tensión constante.

Figura 39. Gráfica implementación con carga variable (gm1)

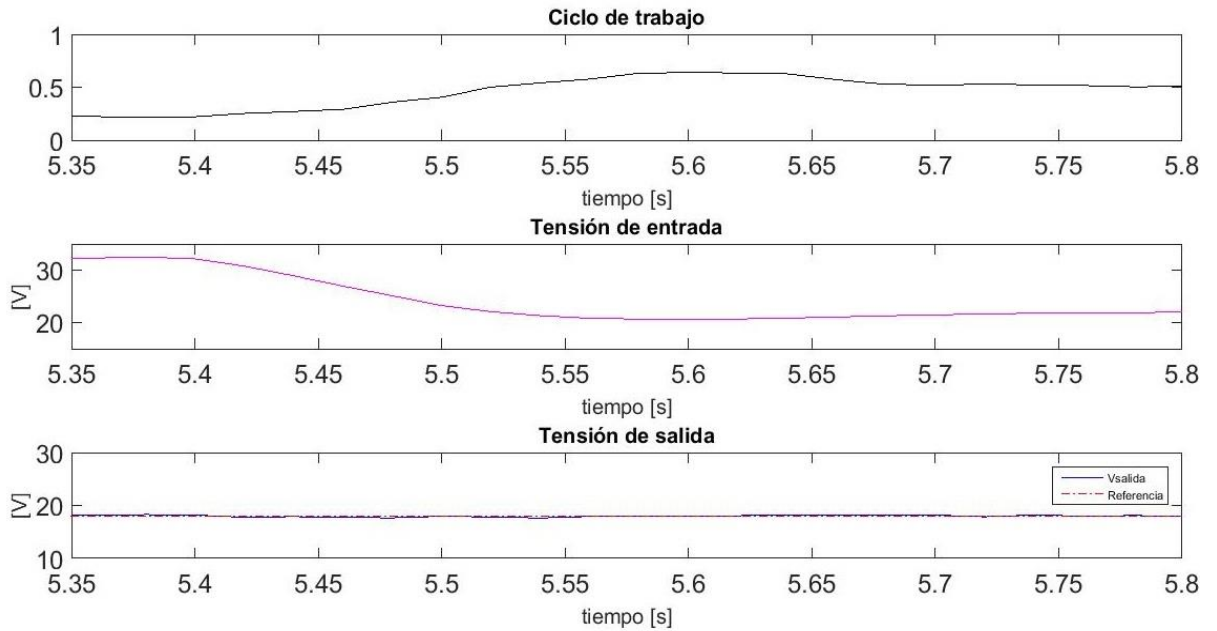


6.2.2.1. Cambio de la Tensión de Entrada. En este periodo se realiza un cambio rápido de la tensión de la fuente DC bajando desde 32 hasta 22 [V]. En la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos para el ciclo de trabajo mediante la ecuación 3 utilizando el valor de inductancia comercial mostrada en la Figura 31, una carga de 390 [Ω] y una referencia de 18 [V].

Tabla 14. Ciclo de trabajo teórico para cambio en la tensión de entrada (gm1)

PRUEBA	PARÁMETRO	D
Cambio en la tensión de entrada	32 [V]	0.25
	22 [V]	0.5

Figura 40. Gráfica implementación con fuente variable (gm1)



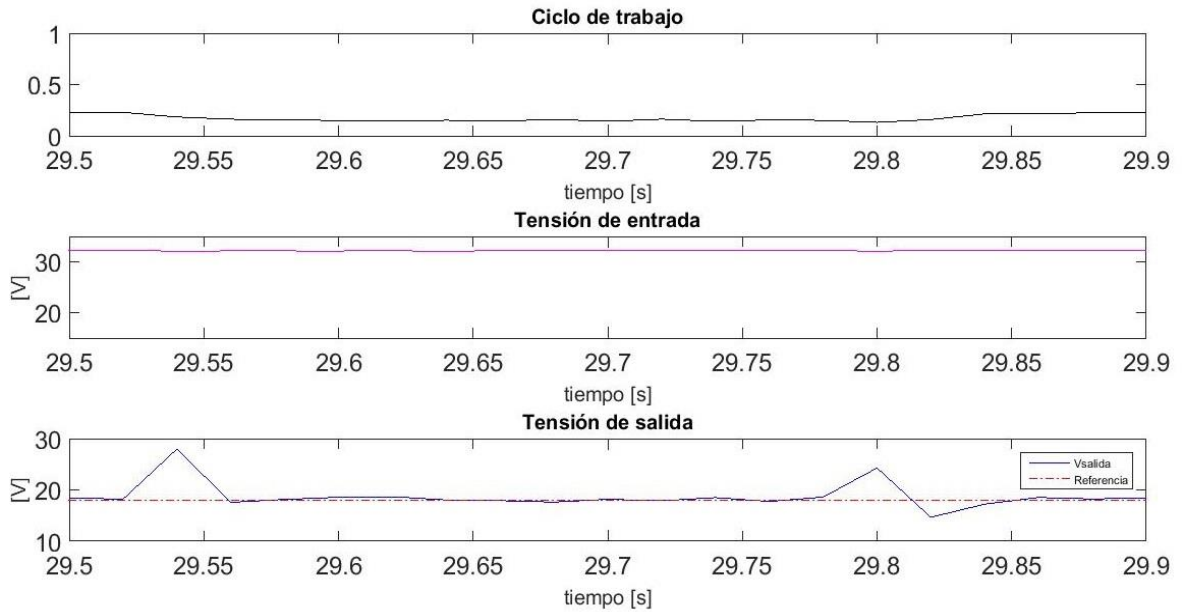
Para tal cambio, se puede notar en la Figura 40 que las oscilaciones del sistema respecto a la tensión de salida son pequeñas. El ciclo de trabajo en este periodo sube aproximadamente desde 0.23 hasta 0.5, cumpliendo los valores teóricos mostrados en la Tabla 14.

6.2.2.2. Cambio de Carga. En esta prueba se mantiene una tensión de entrada constante y se hacen dos variaciones de carga. En la Tabla 15 se muestran los valores obtenidos para el ciclo de trabajo mediante la ecuación 3 utilizando el valor de inductancia comercial mostrada en la Figura 31, una tensión de referencia de 18 [V] y una tensión de entrada de 32 [V].

Tabla 15. Ciclo de trabajo teórico para cambio de carga (gm1)

PRUEBA	PARÁMETRO	D
Cambio de carga	390 [Ω]	0.25
	1 [k Ω]	0.15

Figura 41. Gráfica implementación con carga variable (gm1)



Con el primer cambio de carga se puede ver en la Figura 41 que la tensión de salida del convertidor tiende a subir estabilizándose en aproximadamente 50 [ms]. Luego se invierte el proceso de carga que la tensión de salida se estabiliza en 100 [ms]. El ciclo de trabajo concuerda con el mostrado en la Tabla 15 y se mantiene aproximadamente entre 0.25 y 0.15.

Según lo planteado en las secciones 5.2.1 y 5.2.2, el sistema de control responde a todos los cambios efectuados. Para el primer caso, usando un $gm1$ de 0.013 las respuestas ocurren en un máximo de 100 [ms]. Para el segundo caso se obtienen tiempos de respuesta de hasta 300 [ms] utilizando un $gm2$ de 0.0013. Sin embargo, en implementación el objetivo no es comparar respuestas para distintas ganancias del controlador, sino verificar que el control funciona.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron las diversas etapas realizadas para la implementación de un sistema de control de tensión basado en lógica difusa para un convertidor tipo Buck utilizando un controlador MicroLabBox – dSPACE: Se modeló un convertidor y su sistema de control utilizando el software Simulink, el cual es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Con el modelo se realizó la simulación del comportamiento del sistema convertidor-controlador para diversas condiciones de operación del convertidor. Finalmente, se implementó un convertidor real tipo reductor y su sistema de control utilizando un controlador programable MicroLabBox – dSPACE.

Las conclusiones referentes a este trabajo de grado luego de realizar las etapas descritas anteriormente son las siguientes:

- En el presente trabajo se exploró el uso de la herramienta MicroLabBox. Se observa que una de las principales ventajas corresponde al hecho de que se puede realizar la programación directamente Simulink y enviarla directamente a la plataforma. Lo cual permite, si se quisiera, realizar una sintonización rápida experimentalmente, mediante prueba y error u otro método.
- Se pudo verificar que el sistema de control de lógica difusa es flexible, ya que en primera instancia se utilizó para realizar el control en lazo cerrado con una planta modelada idealmente en simulación y posteriormente se utilizó el mismo modelo para la implementación con una planta construida con elementos no ideales, presentando un comportamiento óptimo y confiable en ambas etapas.

- No se pueden comparar de manera estricta los resultados obtenidos en simulación con los obtenidos en implementación principalmente a que al simular el sistema de control en Simulink se tiene una única frecuencia (ó tiempo de muestreo) para generar la señal de PWM y para realizar el control en lazo cerrado. Mientras que en implementación se presenta una frecuencia de muestreo (ó tiempo de muestreo) para las referencias de control y otra frecuencia independiente para generar la salida física del sistema de control, que para el caso particular es el PWM.
- Se plantea como posible aplicación futura a este proyecto de grado, crear una interfaz en el programa de MicroLabBox, Control Desk - dSPACE que permita cambiar el sistema de control o la variación rápida de la tensión de referencia del convertidor DC/DC. También se puede diseñar una práctica de laboratorio de sistemas de control, máquinas eléctricas, electrónica de potencia o accionamientos eléctricos, e.g. el control de velocidad de un motor de DC mediante la utilización de la interfaz Control Desk – dSPACE. Se abre la posibilidad de utilizar la MicroLabBox como herramienta de prototipado para las necesidades existentes y que van surgiendo en el sector eléctrico a nivel mundial y local.

8. PERSPECTIVAS

- Diseñar laboratorio para Control de Sistemas Eléctricos y Electrónica de potencia, mediante la adquisición de más herramientas para el prototipado rápido de control (RCP) y elementos de electrónica de potencia.
- Se podrán realizar comparaciones entre el sistema de control de lógica difusa con técnicas de control como PID, por deslizamientos, etc.
- A la salida del convertidor se puede cambiar el tipo de carga, por ejemplo, un motor de continua y controlar su velocidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Hissel, M-C. Péra, J. Solano, (2012) *Type-2 fuzzy logic control of a DC/DC buck converter*.
- [2] P. Mattatavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti. *General-Purpose Fuzzy Controller for DC/DC Converters*.
- [3] Cetin Elmas, Omer Deperlioglu, Hasan Huseyin. (2009). *Adaptative fuzzy controller for DC-DC converters*.
- [4] Tarun Gupta, R. Boudreaux, M. Nelms, John Hung. (1997). *Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters Using an Inexpensive 8-b Microcontroller*.
- [5] MathWorks. (s.f.). *Simscape Power Systems Toolbox*. Obtenido de <http://www.mathworks.com/products/simpower/>
- [6] MathWorks. (s.f.). *Fuzzy Logic Toolbox*. Obtenido de <http://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic>
- [7] Jiménez Alvernia, D., & Contreras Herazo, J. (2015). *Contribución al diseño de un laboratorio de micro redes en baja tensión para el parque tecnológico de Guatiguará*. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

- [8] dSPACE . (Marzo de 2015). *MicroLabBox Product Information*. Obtenido de <https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/microlabbox.cfm>
- [9] Ned Mohan, Tore Undeland, William Robbins, “*Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*”, 3ra Edición
- [10] Samir Kouro R, Rodrigo Musalem M. *Control mediante Lógica Difusa*
- [11] http://www.coilcraft.com/apps/selector/selector_2.cfm. (s.f.).
- [12] Texas Instruments. (Agosto de 2015). *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*. Obtenido de www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf
- [13] Tarun Gupta, R. Boudreaux, R. Nelms, John Hung, (Octubre 1997) “*Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters using an Inexpensive 8-b Microcontroller*”

BIBLIOGRAFÍA

CETIN Elmas, OMER Deperlioglu, HASAN Huseyin. Adaptive fuzzy controller for DC-DC converters. 2009

COILCRAFT Selector [en línea] disponible en:
http://www.coilcraft.com/apps/selector/selector_2.cfm

DSPACE . MicroLabBox Product Information. [en línea] disponible en:
<https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/microlabbox.cfm>

HISSEL D., PÉRA M -C., SOLANO J., Type-2 fuzzy logic control of a DC/DC buck converter.2012

JIMÉNEZ ALVERNIA , D., & CONTRERAS HERAZO, J. Contribución al diseño de un laboratorio de micro redes en baja tensión para el parque tecnológico de Guatiguará. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. 2015

MATHWORKS. Fuzzy Logic Toolbox. [en línea] disponible en:
<http://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic>

MATHWORKS. Simscape Power Systems Toolbox. [en línea] disponible en:
<http://www.mathworks.com/products/simpower/>

MATTATAVELLI P., ROSSETTO L., SPIAZZI G., TENTI P.. General-Purpose Fuzzy Controller for DC/DC Converters.

NED Mohan, TORE Undeland, WILLIAM Robbins, “Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño”, 3ra Edición

SAMIR KOURO R, MUSALEM Rodrigo M. Control mediante Lógica Difusa

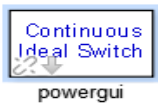


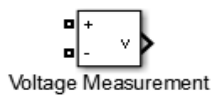
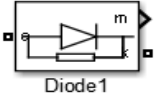
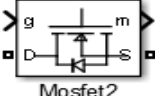

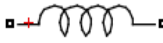
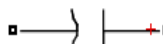
TARUN GUPTA, R. BOUDREAUX, M. NELMS, JOHN HUNG. Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters Using an Inexpensive 8-b Microcontroller. 1997

TARUN GUPTA, R. BOUDREAUX, R. NELMS, John Hung, “Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters using an Inexpensive 8-b Microcontroller” 1997

TEXAS INSTRUMENTS. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. [en línea] disponible en: www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Descripción de los elementos utilizados en la simulación del convertidor

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	
Powergui		Es la interfaz gráfica para el análisis de circuitos con la herramienta SimPowerSystems. Permite escoger el tipo de simulación.
Generador de Pulsos		En este caso, se utiliza para excitar la puerta del mosfet, para conseguir la conmutación a la frecuencia requerida.
Extensión		Elemento para observar gráficamente las señales en cualquier parte del circuito.
Medidor de Voltaje		Es un sensor que permite tomar medida de la tensión existente entre dos puntos cualesquiera del circuito.
Diodo		Elementos propios del circuito en estudio. Estos permiten ser caracterizados, con el objetivo de que tengan un comportamiento lo más real posible.
Mosfet		
Resistencia		Elementos propios del circuito en estudio. A estos se les asignan los valores necesarios para el funcionamiento del circuito.
Bobina		
Capacitor		

ANEXO B. Definición de reglas en la ToolBox Fuzzy de Matlab

The screenshot displays the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox rule editor. At the top, a scrollable list contains 17 rules, each starting with "1. If (e is NH) and (de is NH) then (output1 is NH) (1)".

The main area is divided into three columns: "If", "and", and "Then".

- If column:** A list box contains fuzzy membership functions: NH, NL, NVL, Z, PVL, PL, PH, none. PVL is selected.
- and column:** A list box contains fuzzy membership functions: NH, NL, NVL, Z, PVL, PL, PH, none. PH is selected.
- Then column:** A list box contains fuzzy membership functions: NH, NL, NVL, Z, PVL, PL, PH, none. PH is selected.

Below each list box is a checkbox labeled "not", which is currently unchecked.

At the bottom left, there is a "Connection" section with two radio buttons: "or" (unchecked) and "and" (checked).

To the right of the connection section is a "Weight" field containing the value "1".

At the bottom center, there are three buttons: "Delete rule", "Add rule", and "Change rule".

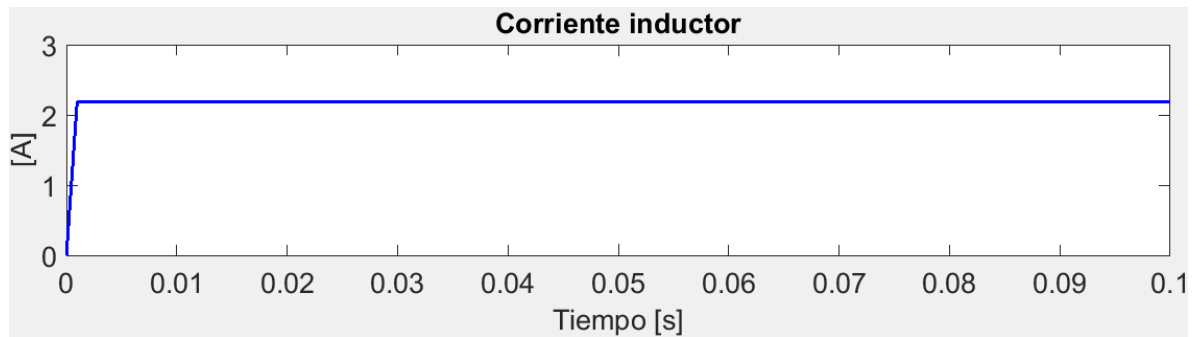
At the bottom right, there are two navigation buttons: "<<" and ">>".

The bottom status bar shows "FIS Name: Fuzzy" on the left and "Help" and "Close" buttons on the right.

ANEXO C. Corriente en el inductor para algunos casos de carga

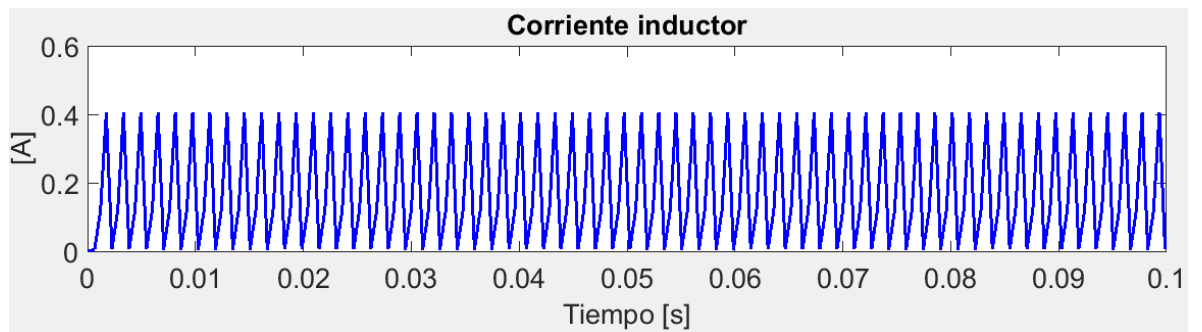
- **Carga resistiva minima**

✓ R=12 ohm



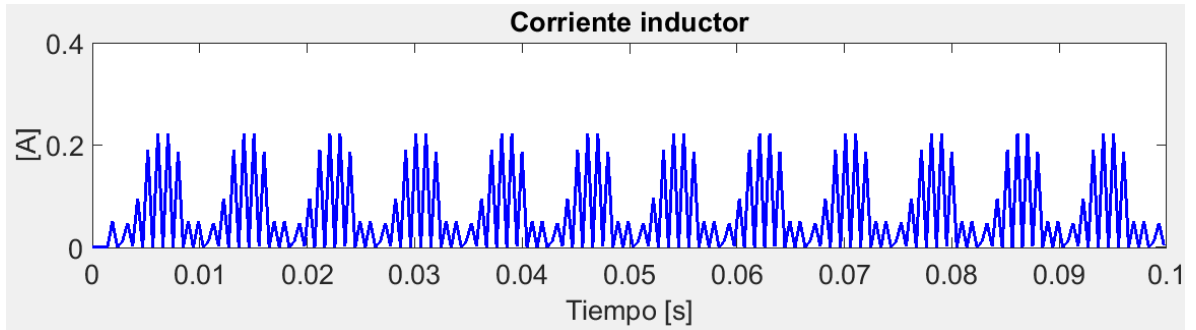
- **Carga límite entre el modo continuo y discontinuo**

✓ R=120 ohm

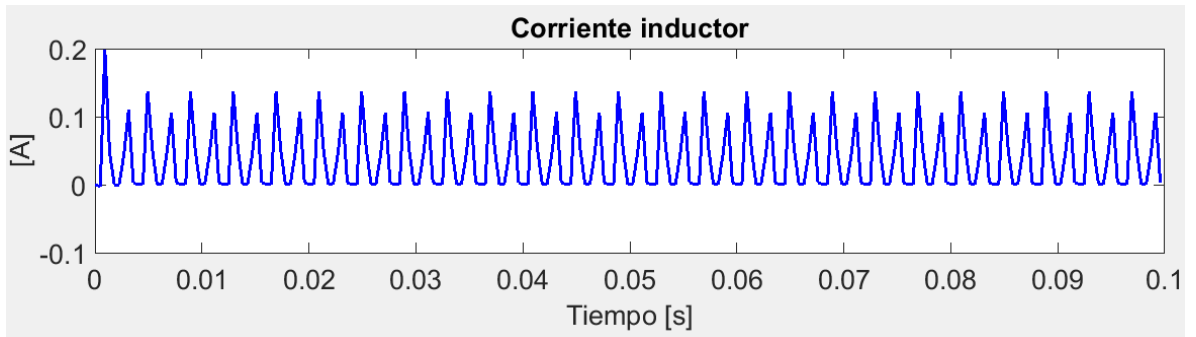


- **Cargas seleccionadas**

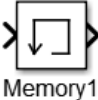
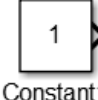


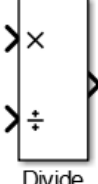

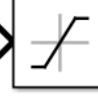
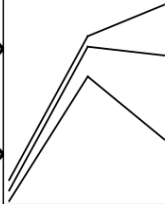
✓ R=390 ohm



✓ R=1000 ohm



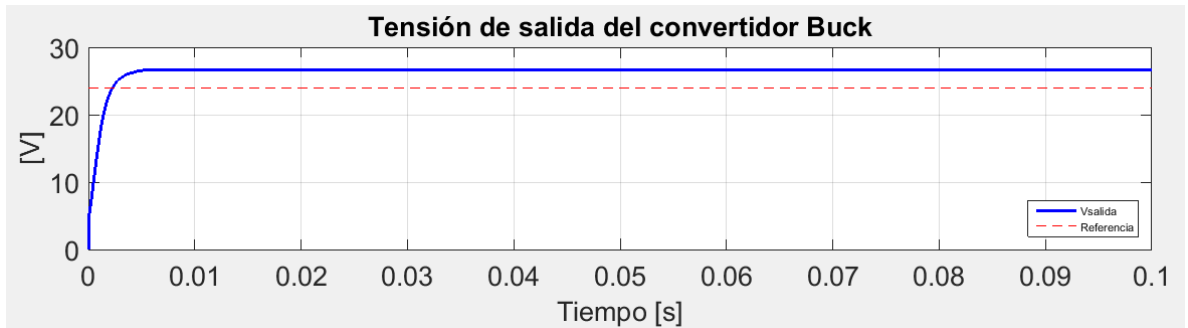
ANEXO D. Descripción de los elementos utilizados en la simulación del sistema de control.

ELEMENTO		DESCRIPCIÓN
Memoria		Su función es almacenar el dato de una variable inmediatamente anterior.
Constante		Utilizada para definir un parámetro que es constante durante la simulación.
Puerto de entrada		Utilizado para relacionar la entrada de un subsistema con el puerto de salida de otro subsistema.
Puerto de salida		Utilizado para relacionar la salida de un subsistema con el puerto de entrada de otro subsistema.
Divisor		Toma la variable que entra a "X" y la divide entre la variable que entra al otro puerto del bloque.
Ganancia		Utilizado para afectar a una variable de entrada y su salida es la variable multiplicada por el valor de ganancia.
Saturación		Bloque utilizado para restringir los valores de entrada a un rango determinado.
Interpolación		Este bloque toma dos vectores de entrada y le asigna un vector de salida.

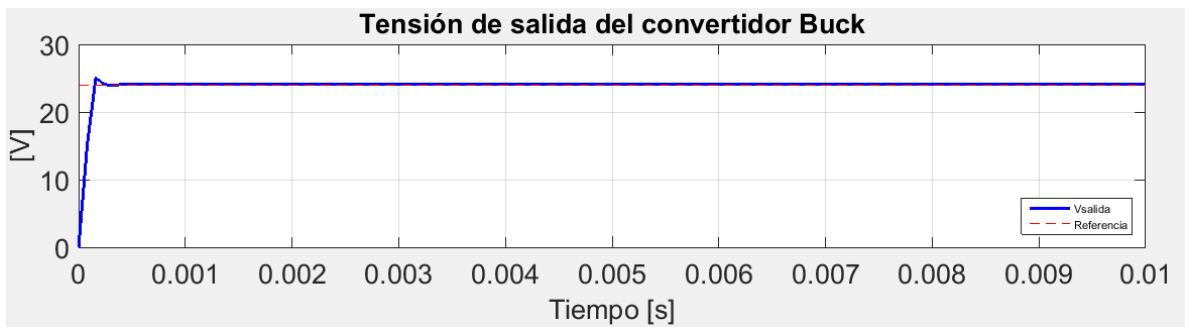
ANEXO E. Resultados de parametrización del controlador difuso

- **Parámetro em**

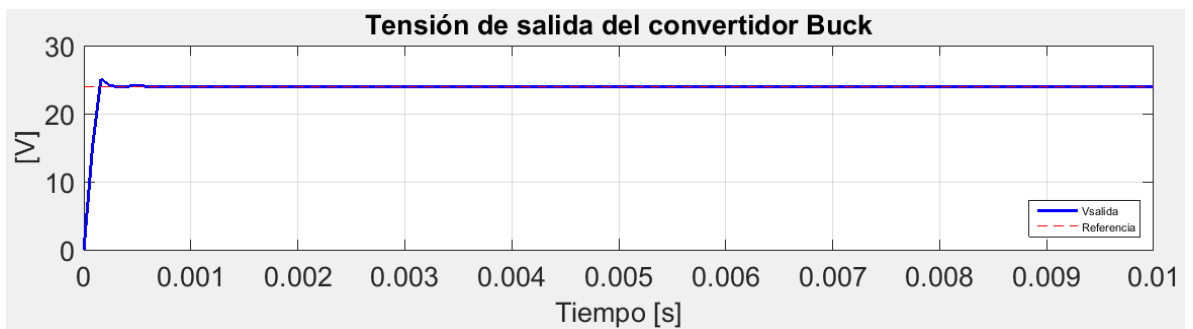
✓ em=100



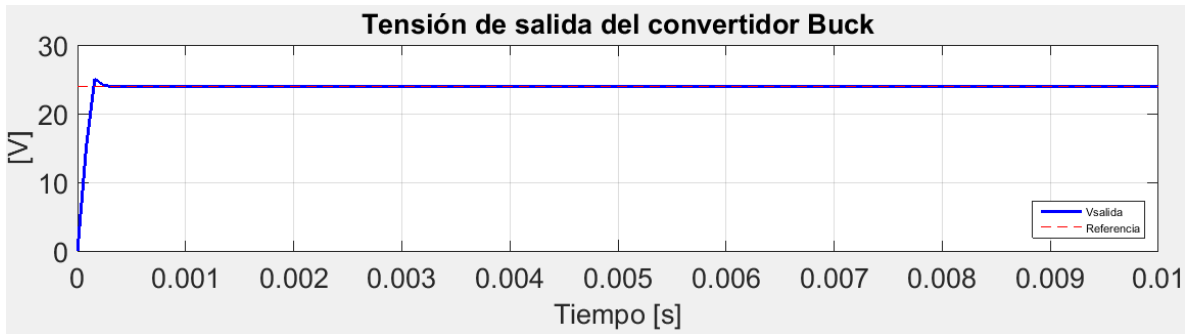
✓ em=1



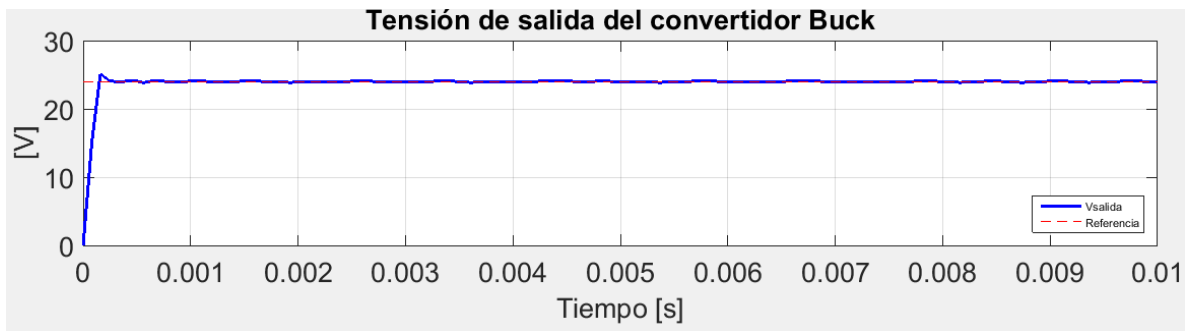
✓ em=0.1



✓ $em=0.31$

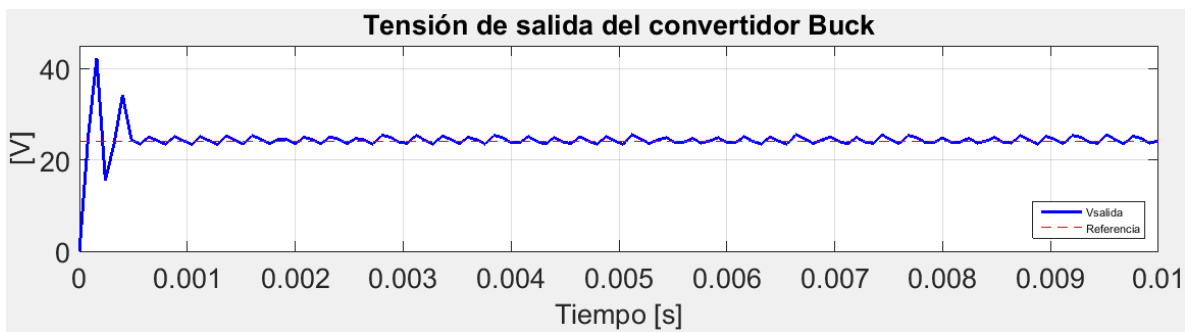


✓ $em=0.01$

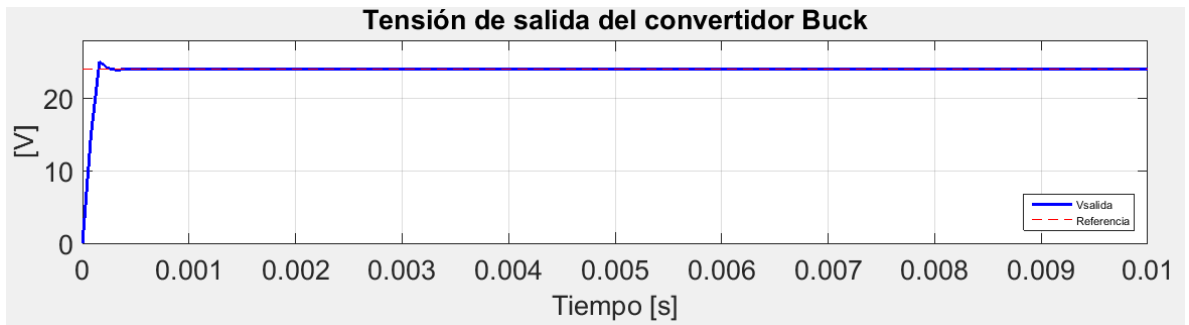


• **Parámetro dem**

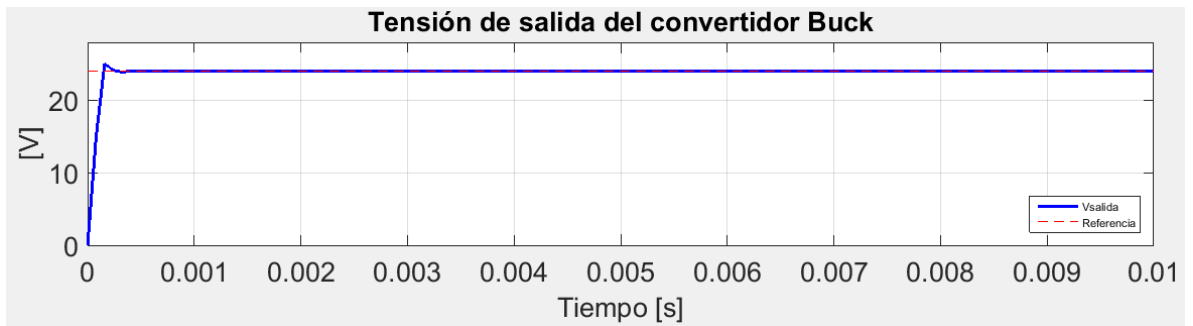
✓ $dem=1000000000$



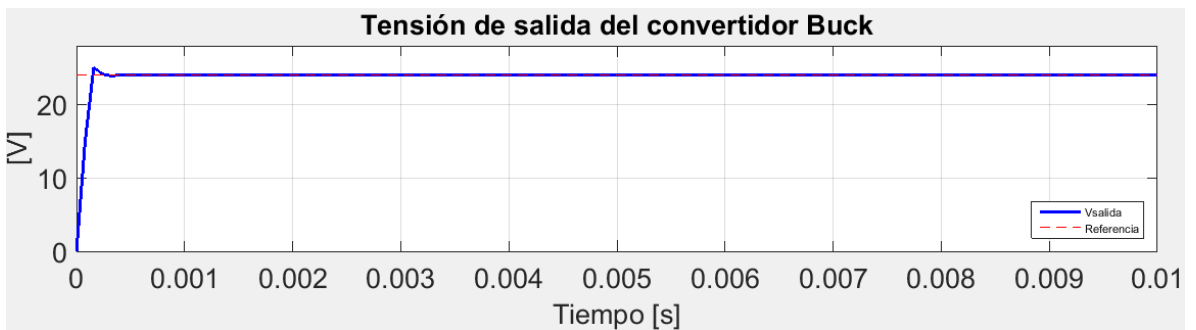
✓ dem=1000



✓ dem=0.1

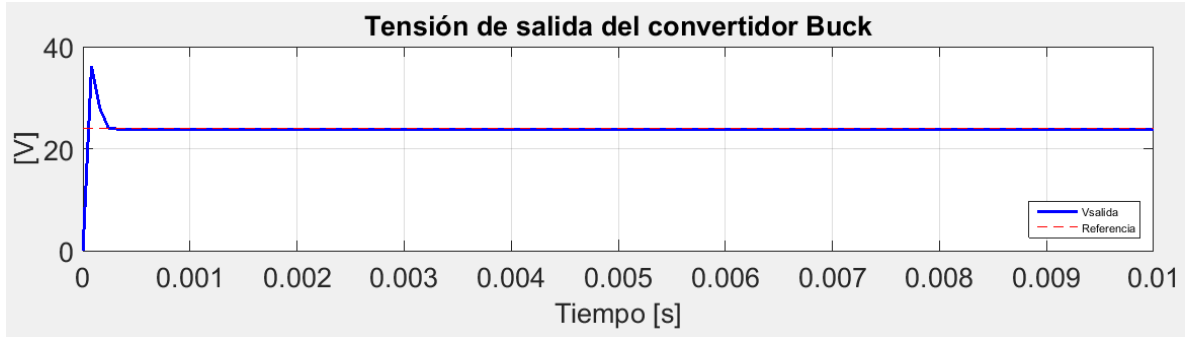


✓ dem=0.000001

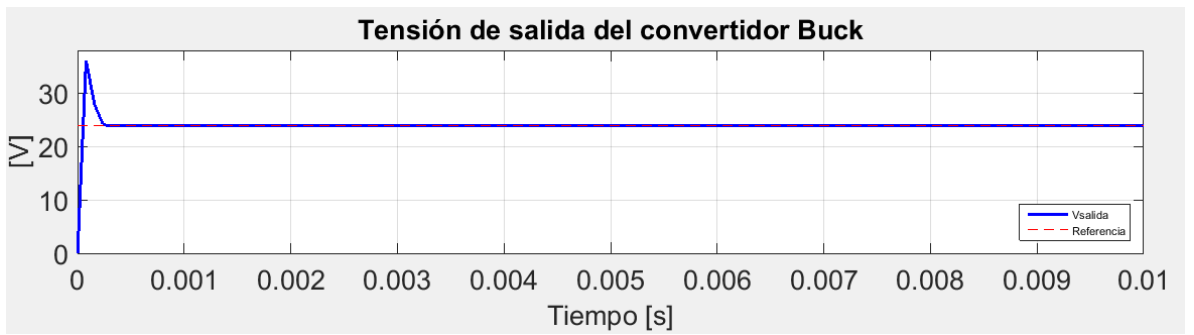


- **Parámetro gm**

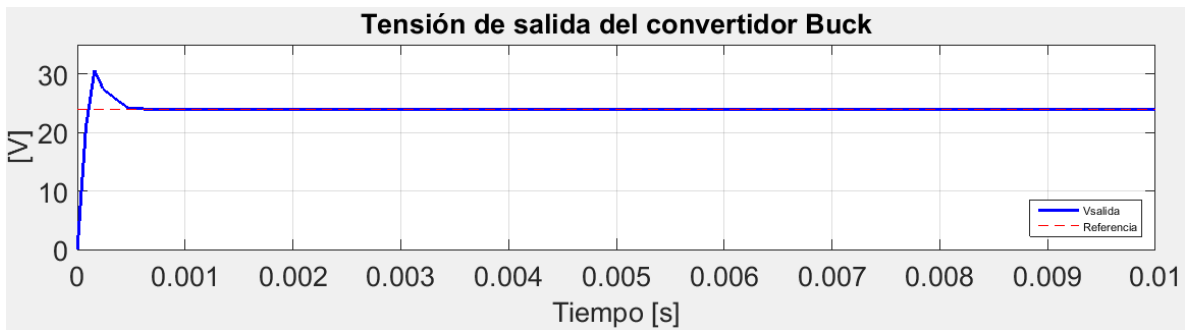
✓ Gm=100



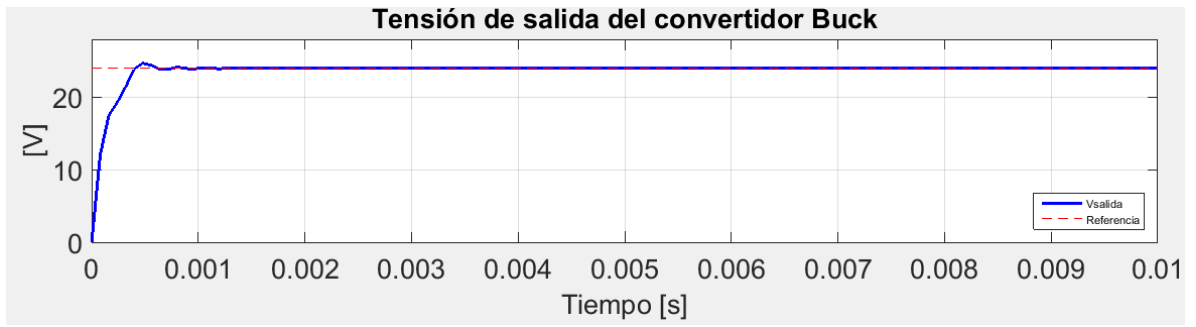
✓ Gm=1



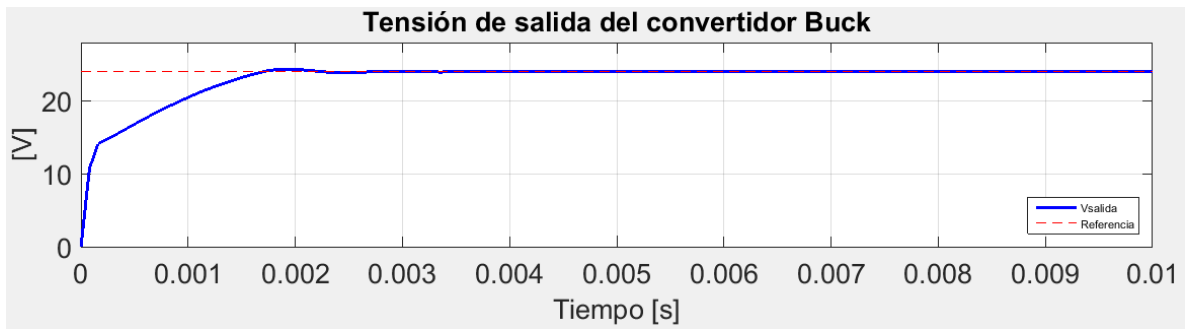
✓ Gm=0.01



✓ $G_m=0.0013$



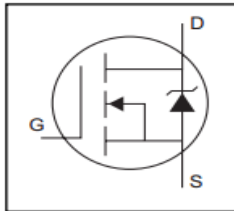
✓ $G_m=0.0001$



ANEXO F. Datasheet Mosfet IRF1010N

IRF1010N

HEXFET® Power MOSFET




$V_{DS} = 55V$
$R_{DS(on)} = 11m\Omega$
$I_D = 85A\textcircled{2}$

IRF1010N

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ C$ (unless otherwise specified)

Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/°C	Reference to $25^\circ C, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	11	mΩ	$V_{GS} = 10V, I_D = 43A \textcircled{4}$
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	32	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 43A \textcircled{4}$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ C$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = 20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	120	nC	$I_D = 43A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	19	nC	$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	41	nC	$V_{GS} = 10V, \text{ See Fig. 6 and 13}$
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	$V_{DD} = 28V$ $I_D = 43A$ $R_G = 3.6\Omega$ $V_{GS} = 10V, \text{ See Fig. 10 } \textcircled{4}$
t_r	Rise Time	—	76	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—		
t_f	Fall Time	—	48	—		
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	3210	—	pF	$V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 25V$ $f = 1.0MHz, \text{ See Fig. 5}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	690	—		
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	140	—		
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy $\textcircled{2}$	—	1030	250 $\textcircled{6}$	mJ	$I_{AS} = 4.3A, L = 270\mu H$

ANEXO G. Datasheet Diodo SCS215AG



SCS215AG SiC Schottky Barrier Diode

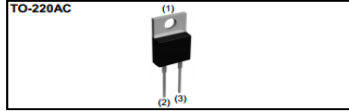
Datasheet

V_R	650V
I_F	15A
Q_C	23nC

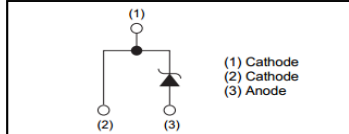
●Features

- 1) Shorter recovery time
- 2) Reduced temperature dependence
- 3) High-speed switching possible

●Outline



●Inner circuit



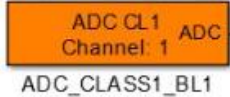
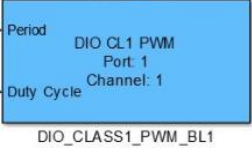




SCS215AG


Data Sheet

●Electrical characteristics (T_j = 25°C)

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
DC blocking voltage	V_{DC}	$I_R=0.3mA$	600	-	-	V
Forward voltage	V_F	$I_F=15A, T_j=25^\circ C$	-	1.35	1.55	V
		$I_F=15A, T_j=150^\circ C$	-	1.55	-	V
		$I_F=15A, T_j=175^\circ C$	-	1.63	-	V
Reverse current	I_R	$V_R=600V, T_j=25^\circ C$	-	3	300	μA
		$V_R=600V, T_j=150^\circ C$	-	45	-	μA
		$V_R=600V, T_j=175^\circ C$	-	105	-	μA
Total capacitance	C	$V_R=1V, f=1MHz$	-	550	-	pF
		$V_R=600V, f=1MHz$	-	56	-	pF
Total capacitive charge	Q_C	$V_R=400V, di/dt=350A/\mu s$	-	23	-	nC
Switching time	t_c	$V_R=400V, di/dt=350A/\mu s$	-	18	-	ns

ANEXO H. Descripción de los bloques utilizados en implementación en la MicroLabBox

ELEMENTO	LIBRERÍA	DESCRIPCIÓN
Entrada Analógica MicroLabBox	 <p>ADC CLASS1 Block: ADC CL1, ADC Channel: 1, ADC_CLASS1_BL1</p>	FPFA I/O Type 1 – dSPACE Este bloque se utiliza para representar entradas analógicas.
Salida Digital PWM MicroLabBox	 <p>DIO CLASS1 PWM Block: Period, DIO CL1 PWM Port: 1, Duty Cycle, Channel: 1, DIO_CLASS1_PWM_BL1</p>	RTI Electric Motor Control Blockset Reference - dSPACE Se utiliza para generar PWM, asignándole un periodo y un ciclo de trabajo.
Guardar datos	 <p>Write to USB Flight Recorder Block: USB_FLIGHT_REC_BL1</p>	RTI USB Flight Recorder Blockset Reference - dSPACE Permite guardar los datos de la simulación en tiempo real en un dispositivo USB conectado a la MicroLabBox.
Expulsar dispositivo USB	 <p>USB Flight Recorder Eject USB Device Block: USB_FLIGHT_REC_EJECT</p>	RTI USB Flight Recorder Blockset Reference - dSPACE Se utiliza para evitar la pérdida de datos cuando se desconecta el dispositivo USB mientras se ejecuta una aplicación.
Sobrescribir datos	 <p>USB Flight Recorder Setup Block: USB_FLIGHT_REC_SETUP</p>	RTI USB Flight Recorder Blockset Reference – dSPACE Se usa para sobrescribir los datos, cuando sea necesario.
Conversión de tipos de datos	 <p>Data Type Conversion Block: single, Data Type Conversion</p>	- Permite cambiar el tipo de datos para poder ser guardados.

Ganancia		Math Operations – Simulink	Este bloque de Simulink es utilizado para asignar las ganancias correspondientes.
----------	---	-------------------------------	---