

Diseño e implementación de un módulo de laboratorio para el control de velocidad de un motor
de corriente continua de imanes permanentes

Sergio Andrés Vargas Navarro

Jhonatan Alexander Porras Barba

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director:

Javier Enrique Solano Martínez

Ingeniero Electricista, PhD.

Co-Directora:

Diana Sofía Mendoza Contreras

Ingeniera Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-mecánicas

Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional en toda mi carrera universitaria, por comprender y apoyarme en todo momento para poder convertirme en un profesional.

A mis tíos, especialmente Rafael, Martha y Carmenza por su hospitalidad, cariño y enseñanzas.

A todos mis compañeros que hicieron amena esta experiencia, se luchó y se logró.

Sergio Andrés Vargas Navarro

Agradecimientos

*A mi familia por su apoyo incondicional y a todas las personas que hicieron parte de mi vida
universitaria.*

Jhonatan Alexander Porras Barba

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Planteamiento del problema.....	16
3. Sistema de control de velocidad.	16
3.1 Control propuesto.....	17
3.2 Simulación del sistema de control.	18
4. Implementación del módulo	20
4.1 Esquema de conexión	21
4.2 Elementos.....	21
4.2.1 MicroLabBox – dSPACE.	21
4.2.2 Motor de corriente continua de imanes permanentes.	22
4.2.3 Sensor de velocidad.	24
4.2.4 Convertidor DC/DC tipo Buck.	25
4.2.5 Opto Driver.	26
4.2.6 Sonda de medición de tensión.....	26
4.3 Módulo implementado.	27

4.3.1 Presupuesto estimado.....	28
5. Pruebas experimentales.....	29
5.1 Variación en la velocidad de referencia de manera experimental.	29
5.2 Variación de la tensión de alimentación del convertidor Buck a manera de perturbación eléctrica.	31
5.3 Comparación entre pruebas.....	33
6. Práctica de laboratorio.	38
7. Conclusiones.	42
Referencias Bibliográficas.....	44
Apéndices.....	46

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Control propuesto.	18
<i>Figura 2.</i> Lazo cerrado de control	19
<i>Figura 3.</i> Esquema convertidor Buck y MCCIP.	19
<i>Figura 4.</i> Cambios en la velocidad de referencia simulada.	20
<i>Figura 5.</i> Esquema de conexión.	21
<i>Figura 6.</i> MicroLabBox – dSPACE.	22
<i>Figura 7.</i> Motor empleado.	23
<i>Figura 8.</i> Sensor de velocidad.	24
<i>Figura 9.</i> Convertidor DC/DC Buck.	25
<i>Figura 10.</i> Opto Driver.	26
<i>Figura 11.</i> Sonda de medición de tensión.	27
<i>Figura 12.</i> Módulo implementado.	27
<i>Figura 13.</i> Variación en la velocidad de referencia.	30
<i>Figura 14.</i> Velocidad de referencia y velocidad medida.	30
<i>Figura 15.</i> Rizado en la señal de velocidad.	31
<i>Figura 16.</i> Perturbaciones eléctricas.	32
<i>Figura 17.</i> Velocidad y tensión.	32
<i>Figura 18.</i> Tiempo de ajuste.	33

<i>Figura 19.</i> Velocidad simulada y experimental.....	34
<i>Figura 20.</i> Sobreimpulso [Mp] en la respuesta de control.	35
<i>Figura 21.</i> Tiempos pico y de establecimiento.....	36
<i>Figura 22.</i> Perturbaciones eléctricas.....	37
<i>Figura 23.</i> Perturbaciones eléctricas simuladas.....	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Placa del motor</i>	23
Tabla 2. <i>Características del sensor</i>	24
Tabla 3. <i>Elementos del convertidor Buck</i>	25
Tabla 4 <i>Presupuesto del módulo</i>	28
Tabla 5. <i>Sobreimpulsos</i>	35
Tabla 6. <i>Tiempos pico y de establecimiento</i>	37

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Características de la MicroLabBox dSPACE.	46
Apéndice B. Conexión y configuración.	48
Apéndice C. Activación de la licencia de ControlDesk dSPACE.	51
Apéndice D. Registro de la plataforma.	53
Apéndice E. Toolbox de SIMULINK.	57
Apéndice F. Comunicación entre SIMULINK y ControlDesk.	60
Apéndice G. Exportación de datos .mat en ControlDesk.	62
Apéndice H. Características de los elementos que conforman el convertidor Buck	64
Apéndice I. Circuito esquemático convertidor DC/DC Buck.	67

Resumen

Título: Diseño e implementación de un módulo de laboratorio para el control de velocidad de un motor de corriente continua de imanes permanentes. *

Autores: Sergio Andrés Vargas Navarro, Jhonatan Alexander Porras Barba. **

Palabras clave: dSPACE, Motor de corriente continua de imanes permanentes, Convertidor DC/DC Buck, Módulo.

Descripción: En la primera etapa de este trabajo, se propone un tipo de control para realizar simulaciones que emulan el comportamiento de un motor de corriente continua de imanes permanentes variando su velocidad de referencia mediante un convertidor DC/DC tipo Buck. Posteriormente, se ilustran los elementos que conforman el módulo de control que fue construido y un esquema de sus conexiones. El módulo de adquisición de datos usado es la MicroLabBox – dSPACE, se realiza una interfaz gráfica en el software ControlDesk en que se pueden visualizar en tiempo real las variables del motor (velocidad, ciclo útil, tensión). En la segunda etapa, se realizaron diferentes pruebas experimentales con el módulo de control implementado, variaciones en la velocidad de referencia para estudiar el comportamiento del control y se emularon perturbaciones eléctricas para visualizar el tiempo en el actúa el control. Finalmente se realizan comparaciones entre las pruebas de simulación y las pruebas realizadas experimentalmente, se analizan los tiempos pico y tiempos de establecimiento. Se propone una práctica de laboratorio que sirva como apoyo académico en los laboratorios de las asignaturas Control de Sistemas Eléctricos y Máquinas Eléctricas I. El módulo se plantea para que funcione de manera dinámica, se puede modificar el tipo de control realizando pequeñas modificaciones en el software Simulink y poder estudiar el comportamiento de la máquina bajo estas características.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Javier Enrique Solano Martínez, Ingeniero Electricista, PhD. Co-Directora: Diana Sofía Mendoza Contreras, Ingeniera Electricista.

Abstract

Title: Design and implementation of a laboratory module for the speed control of a permanent magnet DC motor. *

Author: Sergio Andrés Vargas Navarro, Jhonatan Alexander Porras Barba. **

Keywords: dSPACE, Permanent Magnet DC Motor, DC/DC Buck Converter, Module.

Description: In the first stage of this work, a type of control is proposed to perform simulations that emulate the behavior of a permanent magnet DC motor varying the reference speed using a DC / DC buck converter. Then, the elements that make up the control module that was built and a diagram of its connections are illustrated. The data acquisition module used is the MicroLabBox - dSPACE. A graphic interface is made in the Control Desk software in which the motor variables (speed, useful cycle, voltage) can be displayed in real time. In the second stage, different experimental tests were carried out with the control module implemented, variations in the reference speed to study the behavior of the control and electrical disturbances were emulated to visualize the time in which the control acts. Finally, comparisons are made between simulation tests and experimental tests, peak times and establishment times are analyzed. A laboratory practice is proposed that serves as academic support in the laboratories of the subjects Control de Sistemas Eléctricos and Máquinas Eléctricas I. The module is designed to work dynamically, the type of control can be modified by making minor modifications to the Simulink software and being able to study the behavior of the machine under these characteristics.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: Javier Enrique Solano Martínez, Ingeniero Electricista, PhD. Co-Directora: Diana Sofía Mendoza Contreras, Ingeniera Electricista.

Introducción

Este proyecto de grado está planteado para ser un complemento en los laboratorios de las asignaturas de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, tales como Máquinas Eléctricas I y Control de sistemas eléctricos, con el objetivo de estudiar el comportamiento de un motor de corriente continua de imanes permanentes controlado mediante un lazo cerrado, adicional a esto, el propósito es que se puedan aplicar diferentes técnicas de control en un mismo módulo.

Se escoge la aplicación de control debido a que se emplea continuamente en la industria, además con los sistemas de “Rápida generación de prototipos de control” (RCP), se pueden ampliar las posibilidades de estudio de estos motores combinándolo con elementos de electrónica de potencia (Díaz Sáenz & Pérez Munevar, 2017). La Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones cuenta con herramientas como National Instruments, dSPACE, MATLAB, se decide utilizar los recursos disponibles en el laboratorio para llevar a cabo la construcción del módulo de control de velocidad de un motor de corriente continua.

Este proyecto está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se describe el planteamiento del problema y cómo se planea solucionar; en el capítulo 3 se muestra el controlador propuesto y se hacen pruebas de simulación; en el capítulo 4 se describen los elementos que conforman el módulo de control para el laboratorio y se muestra el esquema de conexiones; en el capítulo 5 se realizan las prácticas experimentales y se realiza una comparación entre las pruebas de simulación y las experimentales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un módulo de laboratorio para realizar pruebas en un motor de corriente continua de imanes permanentes y la creación de una interfaz gráfica donde se podrá visualizar los parámetros y realizar el control de la velocidad.

1.2. Objetivos Específicos

- Implementar físicamente un convertidor DC/DC tipo Buck y todo el sistema de control mediante el controlador programable MicroLabBox - dSPACE.
- Documentar a modo de guía de laboratorio, las prácticas que puedan realizarse en el módulo de laboratorio diseñado.
- Comparar y concluir los resultados obtenidos en las simulaciones respecto a las prácticas realizadas experimentalmente en el controlador programable MicroLabBox - dSPACE.
- Crear una interfaz gráfica en la cual se pueda realizar el control de la velocidad del motor y observar en tiempo real las variables en el software dSPACE ControlDesk.

2. Planteamiento del problema

Se desea controlar la velocidad de un motor de corriente continua de imanes permanentes mediante un control Proporcional Integral (PI), las pruebas servirán de apoyo académico en las asignaturas de Máquinas Eléctricas I, Accionamientos Eléctricos y Electrónica de Potencia. Las pruebas están divididas en dos secciones, la primera sección consiste en realizar simulaciones, con el objetivo de que el estudiante entienda los parámetros necesarios para realizar el control y los resultados que se deberían esperar; en la segunda sección se realizan las pruebas experimentales, las cuales incluyen análisis y comparación de resultados con lo obtenido en simulación.

3. Sistema de control de velocidad.

El propósito del sistema de control planteado es llevar la maquina a una velocidad de referencia definida por el usuario, siendo este un control de velocidad con referencia en la misma. Por lo tanto, se espera que a medida que haya variaciones en la velocidad de referencia o en la alimentación del convertidor, el sistema pueda seguir la velocidad de referencia.

Se implementa un control PI debido a que es uno de los más comunes en la industria (Simulacion de Procesos Udenar, s.f.).

En la sección 3.1 se muestra el control propuesto y en la sección 3.2 se muestran las simulaciones creadas en el software Simulink.

3.1 Control propuesto.

Para controlar la velocidad, la variable controlada es la tensión de alimentación del motor. El controlador obtiene una medida de la velocidad del motor, la medida se compara con una velocidad de referencia.

En la Figura 1 se ilustra el control propuesto, el cual cuenta con los siguientes bloques.

Controlador: Es el encargado de recibir la retroalimentación a través del lazo, en este caso la variable realimentada es la velocidad del motor. Dicho controlador calcula la diferencia entre la variable real contra la variable deseada, la cual es la velocidad de referencia definida, de esta forma se varía el ancho de pulso de la señal PWM que ingresa al controlador DC/DC Buck y modificar la tensión de alimentación del motor DC.

Planta: En un sistema de control, la planta es el elemento físico que se desea controlar, en este caso es un motor DC de imanes permanentes que es alimentado a través del convertidor DC/DC tipo Buck, el convertidor varía su tensión de salida mediante el ancho de pulso por medio de una señal PWM.

Sensor: Es el encargado de recibir el estado actual de la variable que se desea manipular, en este caso la velocidad del motor. Este bloque recibe la velocidad en forma de pulsos y la convierte en revoluciones por minuto (r.p.m) mediante el software Simulink.

La señal de error es la diferencia entre la variable de referencia del sistema y la variable manipulada.

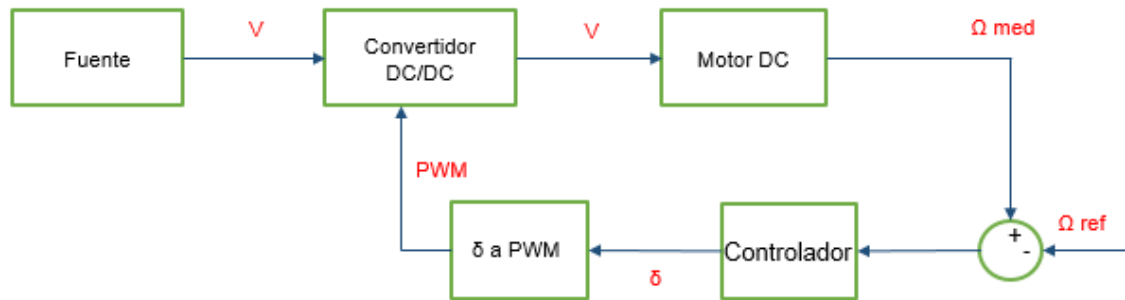


Figura 1. Control propuesto.

Para definir los parámetros del control utilizamos la herramienta PIDTOOL disponible en MATLAB, para esto es necesario simular el sistema que se desea controlar. PIDTOOL presenta varias opciones sobre el tipo de control PID (proporcional, integral y derivativo) que se desea utilizar, y así mismo se puede ajustar el comportamiento de control para obtener parámetros de control acordes a lo deseado (Ogata, Katsuhiko, 2010).

Se escoge realizar un control tipo PI en lugar de uno PID debido a que el único criterio deseado es el cumplimiento del punto de ajuste de la velocidad, se obtiene una respuesta subamortiguada dando como resultados los siguientes parámetros de P y de I:

$$P = 0.1$$

$$I = 1$$

3.2 Simulación del sistema de control.

Para la simulación del banco de control que se desea implementar se utiliza la herramienta de simulación gráfica Simulink, en ella se simula el motor y su sistema de control. En la figura 2 se presenta el lazo de control simulado.

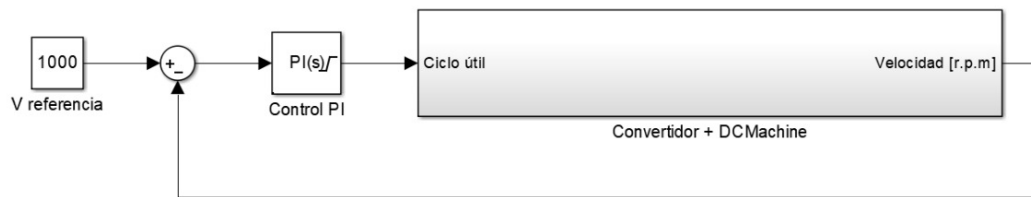


Figura 2. Lazo cerrado de control

En la figura 3 se presenta el convertidor DC/DC buck y el motor DC simulado

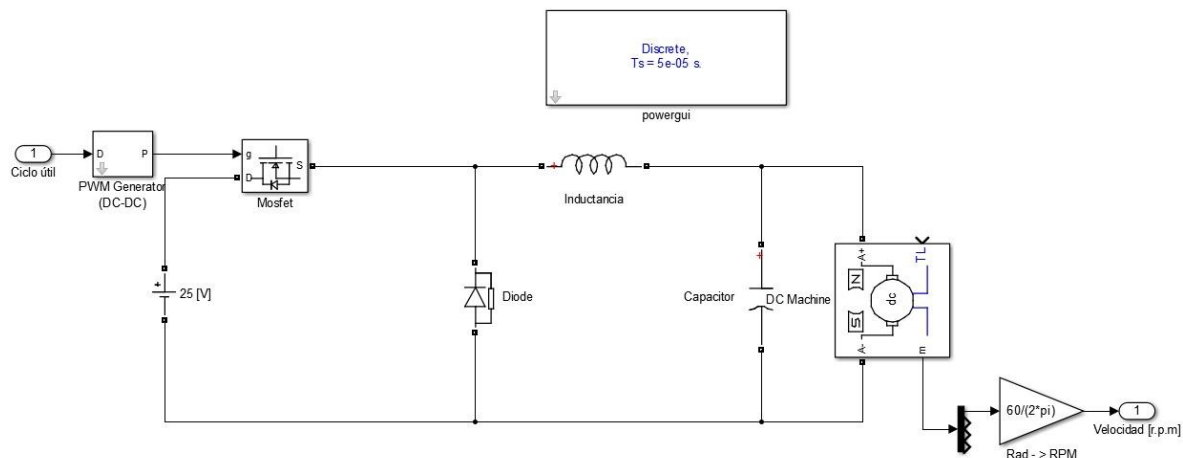


Figura 3. Esquema convertidor Buck y MCCIP.

Se propone realizar la prueba de control de velocidad del motor de corriente continua de imanes permanentes (MCCIP), empleando una velocidad de referencia variable.

En la figura 4 se observa cómo el sistema reacciona al cambio de referencia en la velocidad, el control se comporta de manera rápida tal como se espera (Ogata, Katsuhiko, 2010), sin embargo, se aprecia un sobre impulso que podría reducirse al hacer un control más detallado.

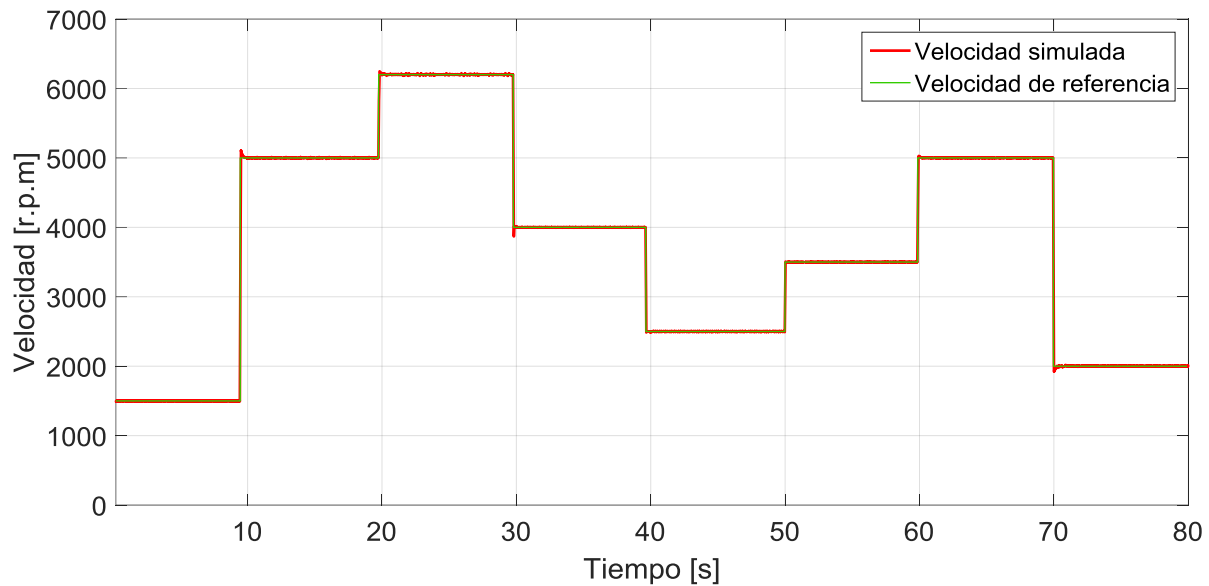


Figura 4. Cambios en la velocidad de referencia simulada.

En el capítulo 5 se realiza de manera experimental esta práctica y se pueden estudiar los comportamientos del control.

4. Implementación del módulo

En este capítulo se presentan todos los elementos que conforman la planta del módulo de control implementado.

En la sección 4.1 se ilustra el esquema donde se interconectan todos los elementos; en la sección 4.2 se describen cada uno de los elementos que conforman el módulo y en la sección 4.3 se muestra el módulo implementado.

4.1 Esquema de conexión

En la Figura 5 se ilustra la interconexión de los elementos que conforman el módulo de control.

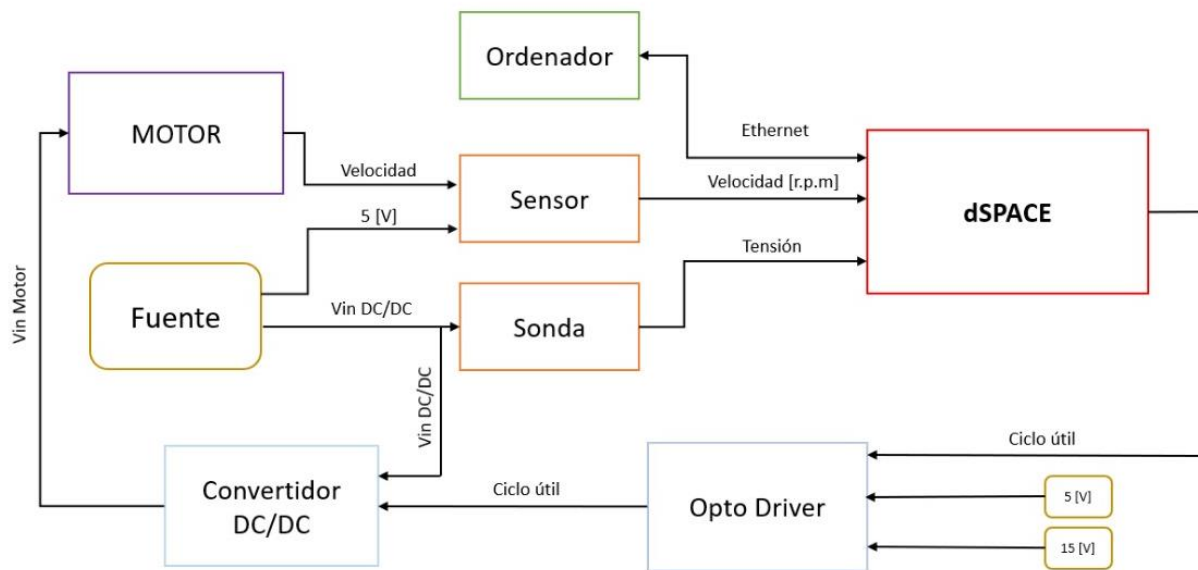


Figura 5. Esquema de conexión.

4.2 Elementos.

El banco experimental de pruebas está compuesto por varios elementos que se conectan entre sí, la descripción de dichos elementos es la siguiente.

4.2.1 MicroLabBox – dSPACE. MicroLabBox permite configurar aplicaciones de control, prueba o medición de forma rápida y sencilla, y ayuda a convertir los nuevos conceptos de control en realidad. Más de 100 canales de E/S de diferentes tipos hacen de MicroLabBox un sistema versátil que puede usarse en áreas de investigación y desarrollo mecatrónico, como robótica,

ingeniería médica, control de accionamientos eléctricos, energía renovable, ingeniería de vehículos o aeroespacial. (Jiménez Alvernia & Contreras Herazo, 2015) La figura 6 muestra el módulo de control MicroLabBox dSPACE



Figura 6. MicroLabBox – dSPACE.

La MicroLabBox cuenta con una tarjeta base DS1202 y una tarjeta interna de entradas y salidas DS1302. La conexión entre la MicroLabBox y un computador se hace mediante un puerto ethernet llamado “Host PC”. En el Anexo A. se muestran las características de la MicroLabBox; en el Anexo B se muestra la configuración de conexión entre el controlador y el computador; en el Anexo C se explica cómo activar la licencia; en el Anexo D se muestra cómo registrar el controlador en el software; en el Anexo E se explica el uso de las TOOLBOX de SIMULINK.

4.2.2 Motor de corriente continua de imanes permanentes. La referencia del motor con el que se trabaja es el 42ZYT04B el cual se encuentra en la Figura 7 y sus características se encuentran en la Tabla 1.

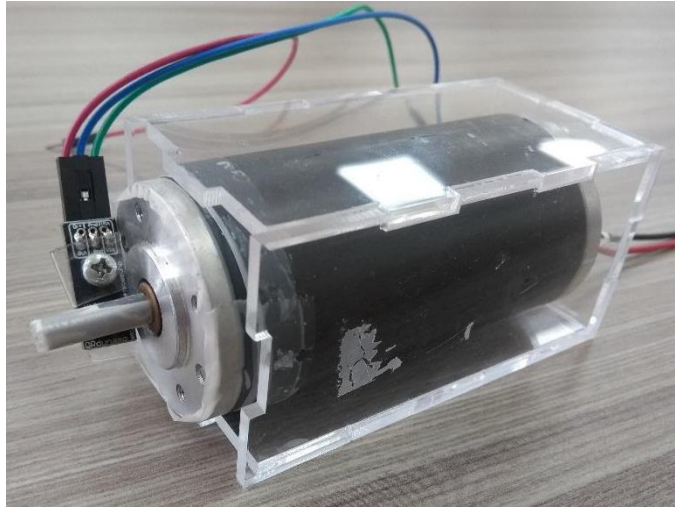


Figura 7. Motor empleado.

Tabla 1.

Placa del motor.

Modelo	42ZYT04B	Unidades
Tensión nominal	24	V dc
Velocidad nominal continua	4700	rpm
Par nominal continuo	100	mN.m
Corriente continua	2.86	A
Par de arranque	479	mN.m
Corriente de arranque	12.79	A
Velocidad sin carga	5900	r.p.m
Corriente sin carga	0.35	A
Corriente de desmagnetización	24	A
Inercia del rotor	154	gcm ²
Peso	550	g
Longitud	90	mm

Para hacer el control de velocidad de este MCCIP, se debe variar su tensión de alimentación, al no tener control directo sobre su fuente de alimentación, se usa el convertidor DC/DC tipo Buck y se modifica el ciclo de trabajo para controlar la tensión de alimentación del motor y así variar su velocidad.

4.2.3 Sensor de velocidad. Mediante una señal eléctrica, se puede indicar la posición angular de un eje, velocidad y aceleración del rotor de un motor. Cuando el rotor del motor gira, el emisor infrarrojo emite una luz que es recibida por el sensor óptico, generando pulsos digitales a medida que el rotor gira. En la Figura 8 se puede ver el sensor empleado y en la Tabla 2 sus características.

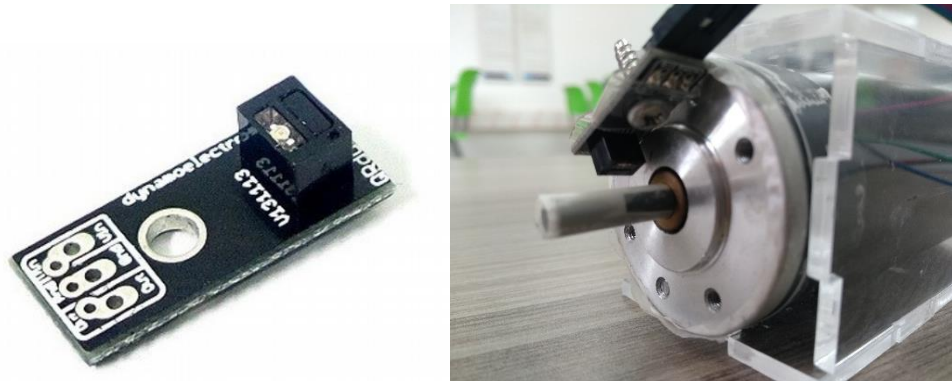


Figura 8. Sensor de velocidad.

Tabla 2.

Características del sensor.

Tensión de alimentación	3-5 V
Dimensiones	2,3 cm x 1 cm
Puertos	Vin / GND / Vout
Operación TOR	0 si es de color negro ; 1 si es lo contrario

4.2.4 Convertidor DC/DC tipo Buck. Este convertidor se usa para poder tener un control en la tensión de alimentación del motor y así poder controlar su velocidad. La tensión de salida del convertidor variará según el ciclo útil que se le aplique.

La caracterización de los elementos para la construcción del convertidor Buck fueron seleccionados y adquiridos de un trabajo de grado anterior (Díaz Sáenz & Pérez Munevar, 2017) (p. 27). (Ver Figura 9)

Los elementos implementados en el convertidor Buck se pueden visualizar en la Tabla 3 y su circuito esquemático se encuentra en el Anexo I. Si se desea tener un análisis más profundo de estos elementos se puede consultar el Anexo H

Tabla 3.

Elementos del convertidor Buck.

Elemento
MOSFET IRF1010
Diodo SCS215AG
Inductor DO504H-334
Capacitor CL 47

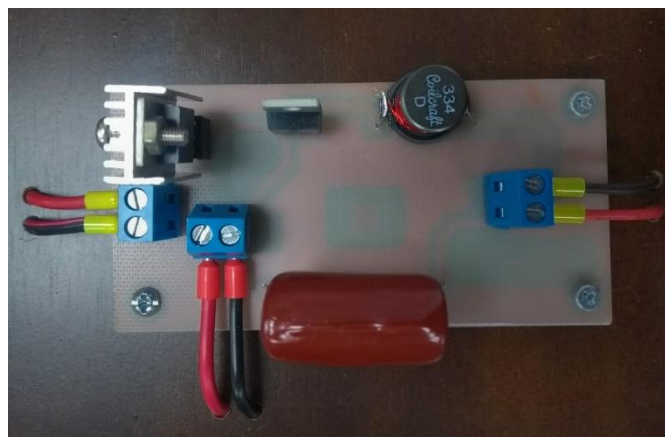


Figura 9. Convertidor DC/DC Buck.

4.2.5 Opto Driver. Para poder aislar los circuitos de potencia a la MicroLabBox, se usa el opto driver, es el dispositivo encargado de aislar un circuito y evitar que algunas partes se vean afectadas por corrientes o tensiones excesivas (transitorios) y está conformado por un optoacoplador y cuatro buffers. Si se tiene en la entrada una señal de tensión de 5 [V], la salida será de 15 [V]. Esto se debe tener en cuenta debido a que el elemento de conmutación tiene un rango especificado de tensiones para las señales de activación. El optoacoplador requiere una fuente de alimentación separada. Este elemento se obtuvo de un trabajo de grado anterior. (Jiménez Alvernia & Contreras Herazo, 2015) (Figura 10)

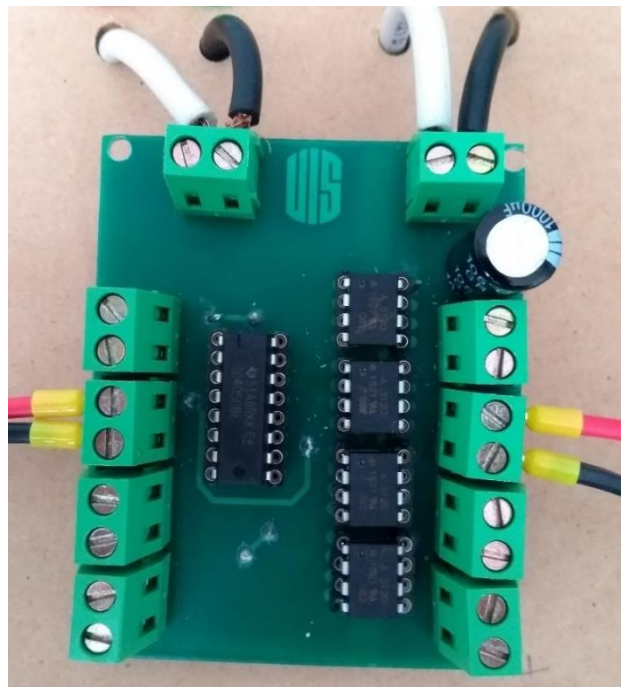


Figura 10. Opto Driver.

4.2.6 Sonda de medición de tensión. Este dispositivo nos permite obtener una lectura de la tensión de alimentación en el circuito del convertidor DC/DC tipo Buck, la medición se hace con

el objetivo de visualizar las perturbaciones eléctricas que se apliquen y sus comportamientos.
(Figura 11)



Figura 11. Sonda de medición de tensión.

4.3 Módulo implementado.

En la Figura 12 se muestran los elementos que componen la planta de control y el módulo implementado.

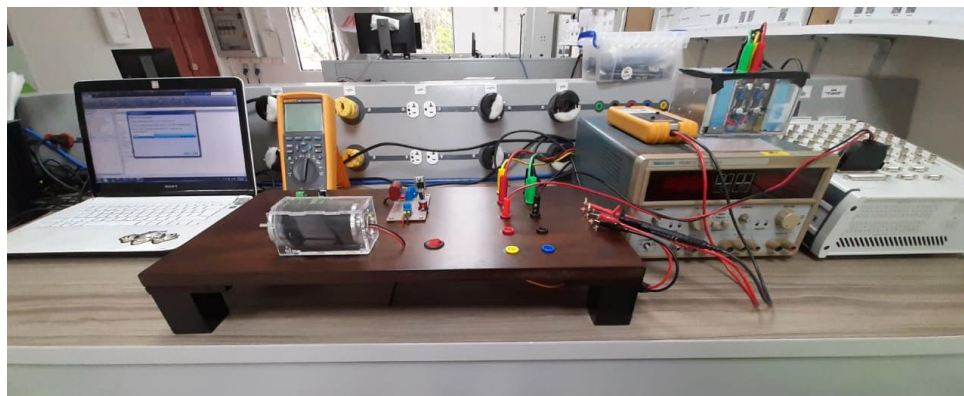


Figura 12. Módulo implementado.

4.3.1 Presupuesto estimado. En la Tabla 4 se estiman los precios individuales de los elementos que conforman el módulo, esto como posible idea de construir prototipos que sean de bajo costo, compactos y de fácil manejo para comercialización en planteles educativos.

Tabla 4

Presupuesto del módulo.

UNIDAD CONSTRUCTIVA			
UND	CANT	DESCRIPCIÓN	Precio (COP)
Convertidor DC/DC			
un	1	Diodo SCS215AG	\$ 35,000.00
un	1	Mosfet IRF1010	\$ 5,000.00
un	1	Inductor DO504H-334	\$ 15,000.00
un	1	Capacitor CL 470	\$ 5,000.00
un	1	Diseño PCB	\$ 35,000.00
Opto - Driver			
un	1	Buffer	\$ 10,000.00
un	1	Optoacoplador	\$ 5,000.00
Motor			
un	1	Motor DC imanes permanentes	\$ 100,000.00
Accesorios			
un	12	Borneras	\$ 24,000.00
ml	5	Cable AWG #18	\$ 4,000.00
un	1	Interruptor	\$ 2,000.00
un	1	Base	\$ 25,000.00
TOTAL			\$ 265,000.00

5. Pruebas experimentales.

En esta sección se presentarán las practicas o pruebas experimentales que se realizaron en el banco experimental implementado. En la sección 5.1 se evalúa la primera prueba la cual consiste en realizar modificaciones en la velocidad de referencia; en la sección 5.2 se hacen pruebas haciendo perturbaciones eléctricas; en la sección 5.3 se modifica la velocidad de referencia de manera descendente para observar el comportamiento del ciclo útil y en la sección 5.4 se realizan comparaciones entre los resultados del experimento de simulación y las pruebas experimentales.

Para realizar las siguientes pruebas se necesita conocer información relacionada a la conexión y uso del software dSPACE ControlDesk como de la MicroLabBox, por esta razón es necesario primero consultar los anexos (Díaz Sáenz & Pérez Munevar, 2017) (MicroLabBox®, 2017), que contienen información sobre el MicroLabBox y además una guía sobre su uso.

5.1 Variación en la velocidad de referencia de manera experimental.

Para realizar la prueba propuesta primero se deben cargar los archivos necesarios, este procedimiento se encuentra en el Anexo F. En la Figura 13 se puede apreciar la interfaz gráfica realizada en el software ControlDesk dSPACE.

En esta prueba se varía la velocidad de referencia en el recuadro indicado y se puede monitorear en tiempo real los cambios realizados en la velocidad del motor (gráfica roja) y también la velocidad de referencia (gráfica verde).

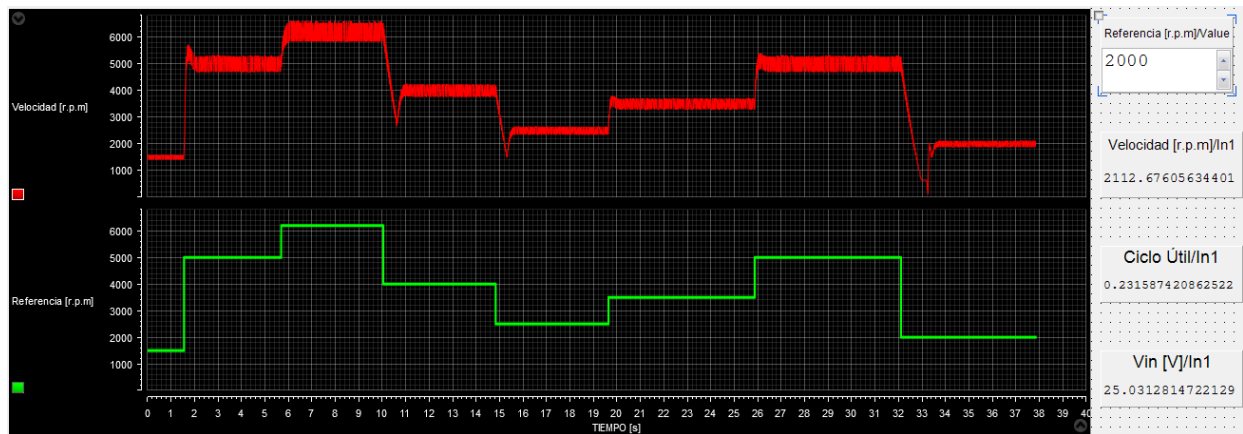


Figura 13. Variación en la velocidad de referencia.

Los cambios de velocidad de referencia se realizan en el recuadro <Referencia [r.p.m]/Value>.

Para realizar un análisis detallado del comportamiento de la velocidad, se pueden exportar los datos medidos en formato .mat (Anexo G). En la Figura 14 se observa la velocidad de referencia y la velocidad medida.

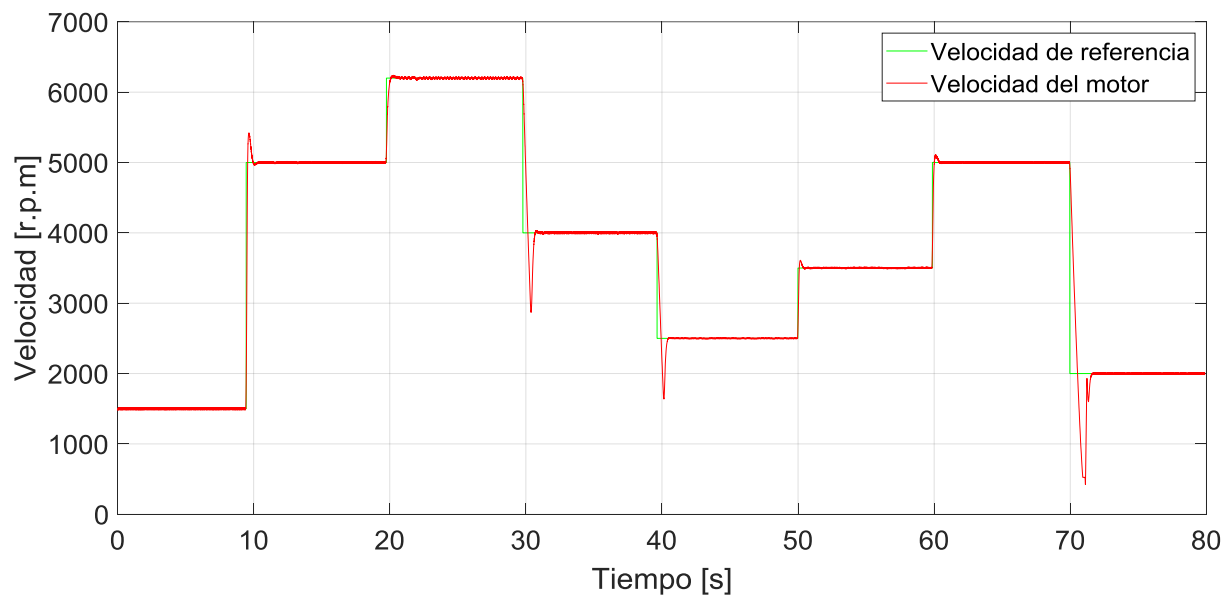


Figura 14. Velocidad de referencia y velocidad medida.

En la Figura 14 se observan los cambios realizados en la velocidad de referencia y cómo el motor busca el ajuste de velocidad.

En la Figura 15 se observa el comportamiento de la velocidad sensada en ControlDesk, se puede apreciar que se presenta la señal en forma de pulsos, y que el ancho disminuye al incrementar la velocidad. Se considera que esto se deba al sensor utilizado, ya que este recibe la señal en forma de pulsos digitales y se adecuó la señal para ser leída mediante la entrada analógica A11 ch1 del MicrolaBox.

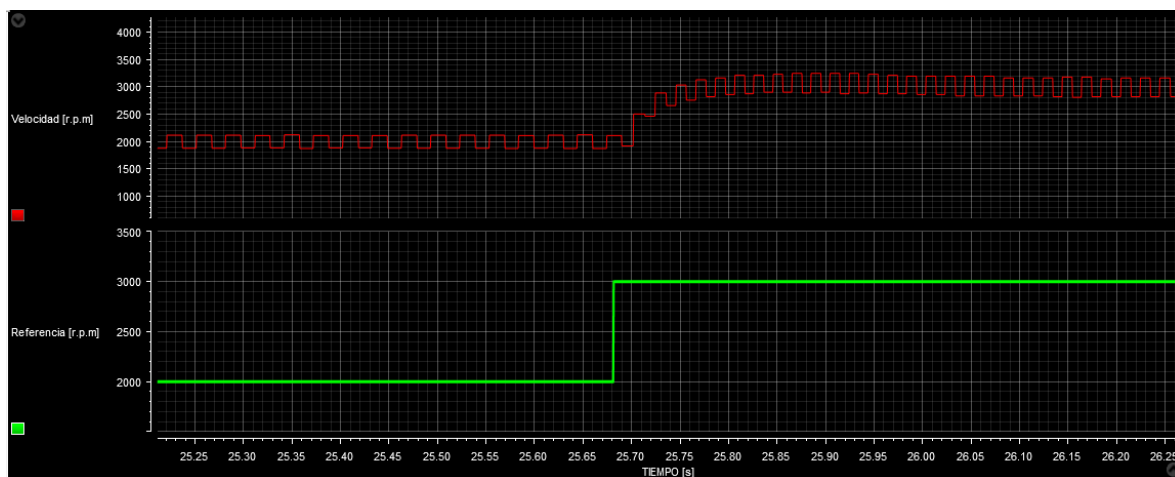


Figura 15. Rizado en la señal de velocidad.

5.2 Variación de la tensión de alimentación del convertidor Buck a manera de perturbación eléctrica.

Para realizar esta prueba, se hacen cambios abruptos en la tensión de alimentación del convertidor DC/DC tipo Buck, en la Figura 16 y 17 se puede observar el comportamiento del control cuando se realiza el cambio de tensión, se aprecia un leve cambio en la velocidad y la rapidez en la que retoma a su velocidad de referencia.

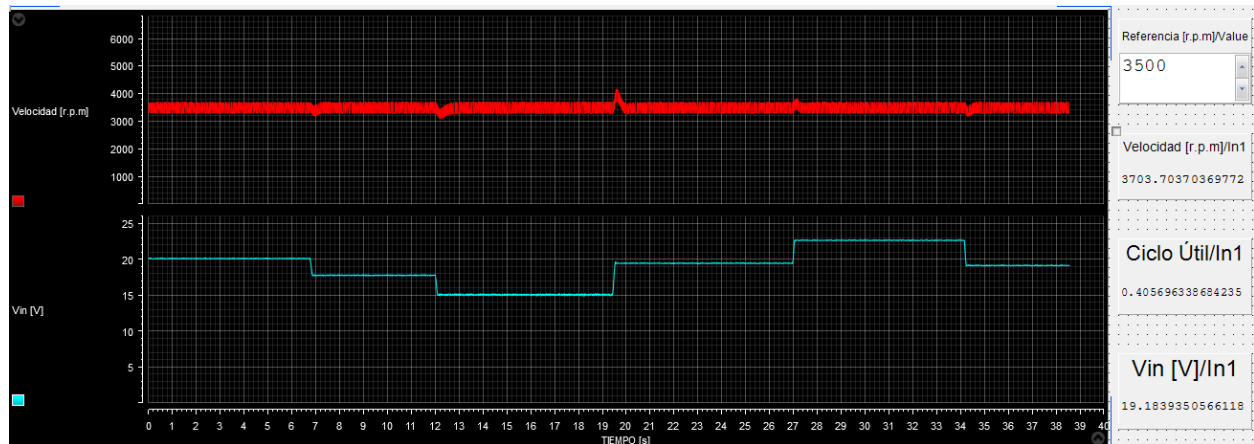


Figura 16. Perturbaciones eléctricas.

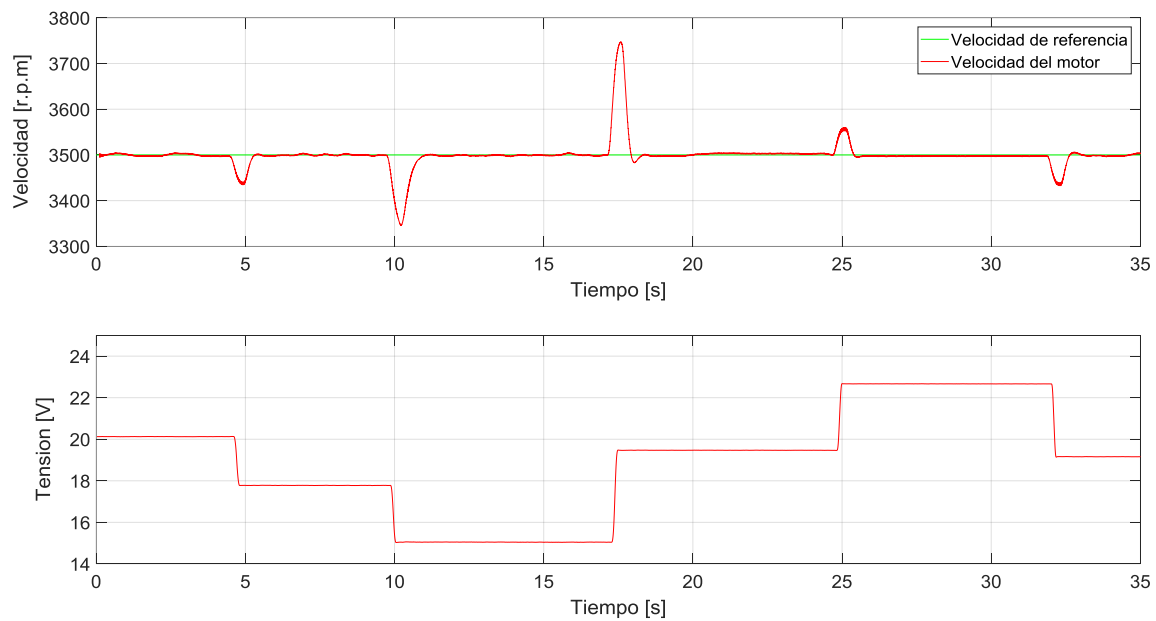


Figura 17. Velocidad y tensión.

En la Figura 17 se observa que rápidamente la velocidad del motor retoma a su velocidad de referencia en el momento en que se varía la tensión. En la Figura 18 se puede apreciar el tiempo en que la velocidad hace su ajuste, en este caso lo hace en 1,31 segundos

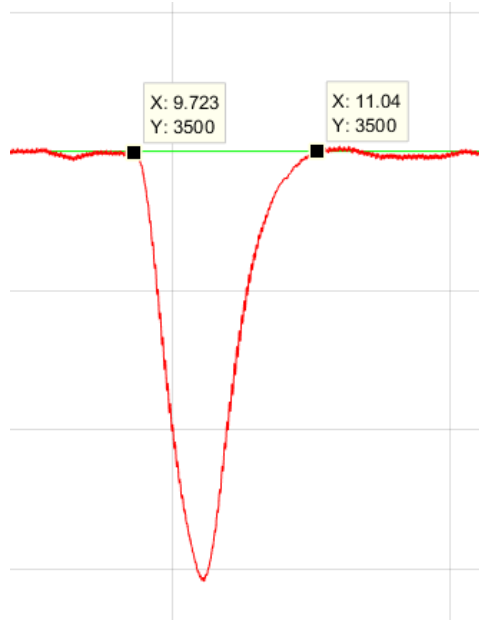


Figura 18. Tiempo de ajuste.

5.3 Comparación entre pruebas.

Habiendo elaborado las pruebas propuestas en los capítulos 3 y 5, se procede a realizar la comparación, entre los resultados obtenidos de manera experimental y en simulación al momento de llevar a cabo los cambios en la velocidad referencia. (Ver Figura 19)

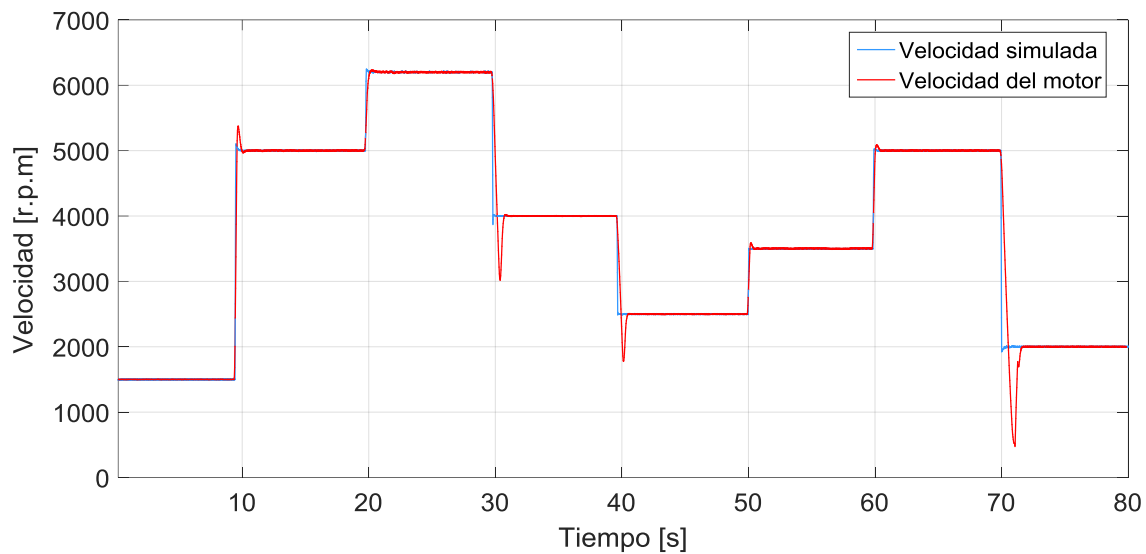


Figura 19. Velocidad simulada y experimental.

En la Figura 19 se observa que la prueba realizada es la misma, teniendo los cambios de velocidad en los mismos tiempos y comportándose de manera semejante. En la Figura 21 se realiza un acercamiento para poder apreciar la diferencia de tiempo en que estas gráficas llegan al punto deseado.

En la Figura 20 se presenta el cambio más crítico en las pruebas realizadas, es decir, el mayor cambio en velocidad presentado. Se realizó un cambio desde 1500 [r.p.m.] a 5000 [r.p.m.], por esta razón en dicho cambio se presenta el sobreimpulso más grande, a su vez se observa el cambio hacía la mayor velocidad que puede reproducir el motor manteniendo un control estable.

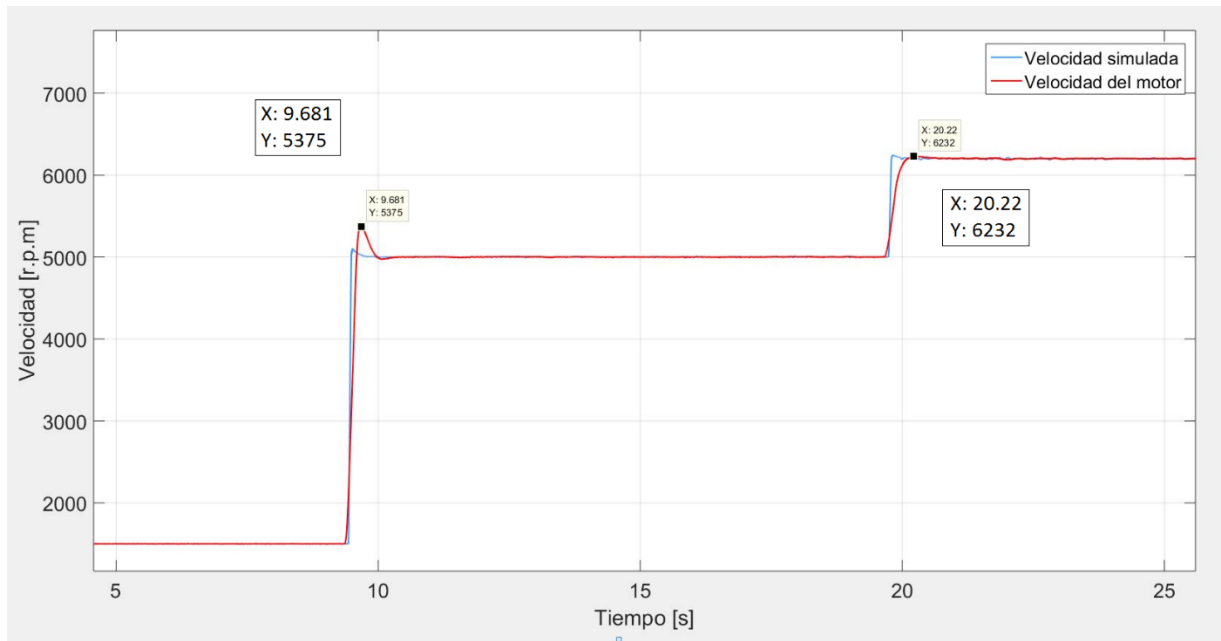


Figura 20. Sobreimpulso [Mp] en la respuesta de control.

Es necesario tener en cuenta el sobreimpulso, debido a que puede traducirse en un aumento proporcional en la corriente del sistema.

Los valores de sobreimpulsos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.

Sobreimpulsos

	Sobreimpulso 1500 - 5000	Sobreimpulso 5000 - 6200
Mp	107,5%	103,87%

En la Figura 21 se ilustran los tiempos pico y de establecimiento para las señales de velocidad en la parte simulada y en la experimental.

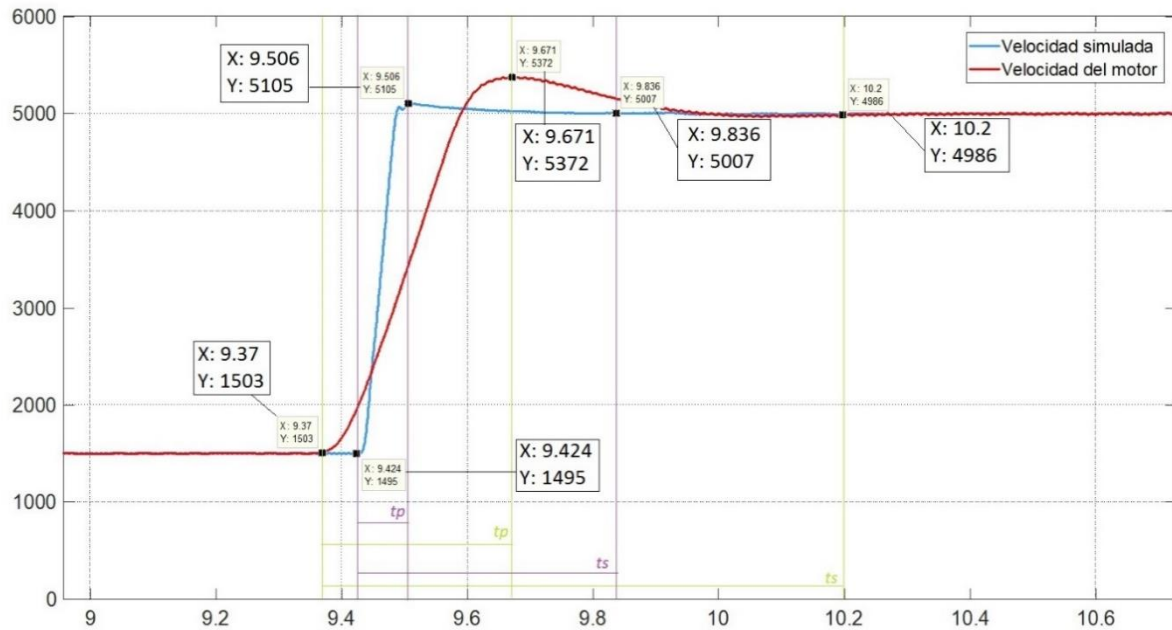


Figura 21. Tiempos pico y de establecimiento.

En la Figura 21 se realiza un acercamiento al primer cambio de referencia en la velocidad, se pueden observar los tiempos de establecimiento y tiempos picos entre los dos casos comparados, simulación y experimental.

El valor t_p hace referencia al tiempo en que la velocidad alcanza su punto pico, mientras que el t_s hace referencia al tiempo de establecimiento del sistema ante este cambio, dicho tiempo se calcula cuando la velocidad alcanza $\pm 5\%$ del su valor de referencia.

El primer cambio se aprecia en la Figura 21 y se realiza desde 1500 [r.p.m] hasta 5000 [r.p.m], y los tiempos t_p y t_s obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 6.

Tiempos pico y de establecimiento.

	Simulación	Experimental
t_p	0.082 [s]	0.301 [s]
t_s	0.412 [s]	0.83 [s]

En la Figura 22 se pueden apreciar sobreimpulsos generados por cambios de tensión en la alimentación que representan perturbaciones eléctricas. En la Figura 23 nuevamente se realiza la prueba de variar la tensión de entrada del convertidor DC/DC Buck, esta vez de manera simulada, esperando obtener un comportamiento similar al de la Figura 22.

En las Figuras 22 y 23 se observan diferencias en el comportamiento de la velocidad, esto puede ser debido a que los parámetros obtenidos en el momento en el cual se caracterizó la máquina no correspondan en su totalidad al motor empleado, sin embargo, se pueden visualizar ligeros cambios en los tiempos correspondientes de la prueba experimental.

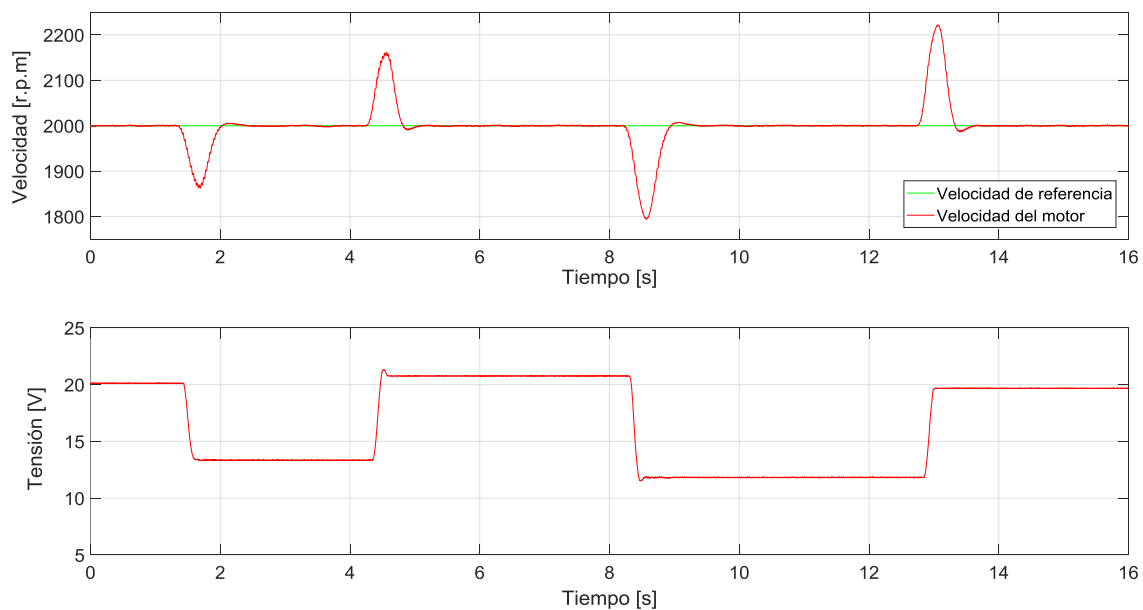


Figura 22. Perturbaciones eléctricas

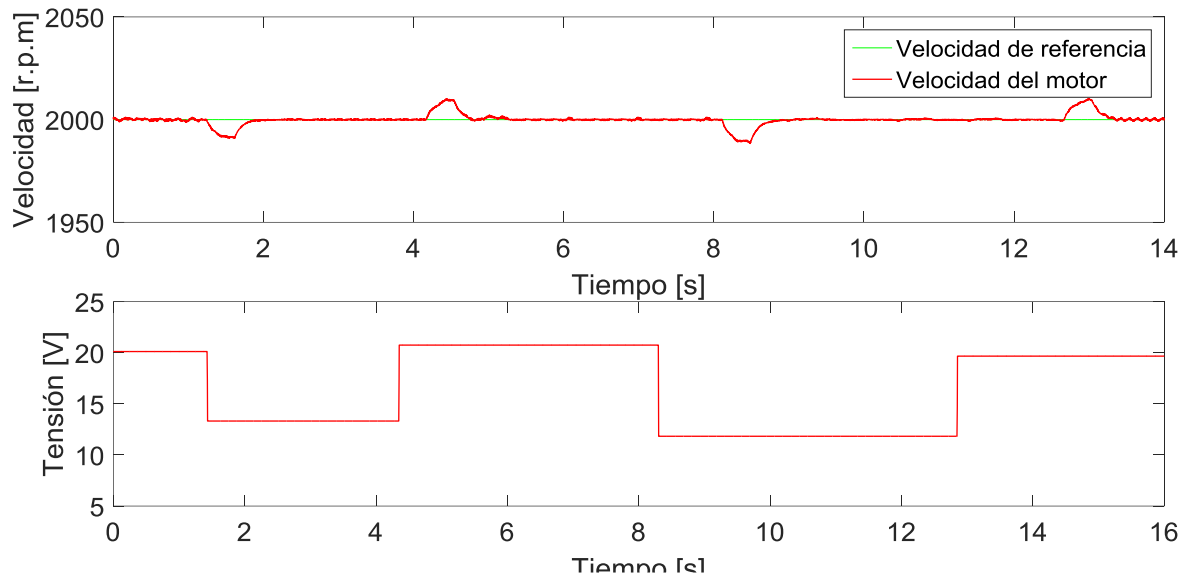


Figura 23. Perturbaciones eléctricas simuladas.

6. Práctica de laboratorio.

En este capítulo se documenta a modo de guía de laboratorio, actividades de apoyo para realizar los laboratorios de las asignaturas de Máquinas Eléctricas I y Control de Sistemas Eléctricos, el cual cuenta con los equipos necesarios y marco teórico.

OBJETIVOS

- Realizar el control de un motor de corriente continua de imanes permanentes.
- Evaluar la comprensión de lo realizado y observado en el laboratorio.

ACTIVIDADES PREVIAS

- Leer detenidamente este documento.
- Leer los documentos anexos sobre el uso del software ControlDesk.

- Realizar la simulación del sistema de control para tener un acercamiento a lo que se realizará de manera experimental, esto con el archivo adjunto.

EQUIPO NECESARIO

- Módulo de control de motor de corriente continua de imanes permanentes.
- MicroLabBox – dSPACE.
- Sonda de tensión.
- Fuentes.
- Ordenador con software ControlDesk y MATLAB

MARCO TEORICO

Los motores de imanes permanentes se han convertido en un buen reemplazo para los motores shunt de corriente continua convencionales, se han podido reemplazar motores de hasta más de 75 HP, sin embargo, la aplicación de los imanes se limita por factores económicos. En un motor de corriente continua convencional con circuito del devanado de campo, el flujo por polo depende de la corriente que fluye por el devanado de campo y puede ser controlado, no obstante, el flujo de un motor de imanes permanentes es esencialmente constante.

Este tipo de motor ofrece ciertas ventajas respecto a los motores de C.C en derivación, las cuales serían:

- No requieren circuito de campo externo, por tal razón no poseen pérdidas de cobre en el circuito de campo.
- Al no necesitar bobinas de campo sus diseños son más compactos.
- Son más prácticos en áreas donde no se requiera de grandes potencias, ahorrando así espacio.

CONTROL PROPOCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

El control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular variables de un proceso en general, como pueden ser velocidad, flujo, presión u otras.

El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales: Ganancia proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D).

El parámetro Proporcional (P) mide la diferencia entre el valor actual y el set-point (en porcentaje) y aplica el cambio.

El parámetro Integral (I) se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, el ajuste es más rápido, pero puede causar inestabilidad en el sistema, oscilaciones, vibración de motor

El parámetro Derivativo (D) emite una acción predictiva, es decir, prevé el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

CONTROL DE VELOCIDAD

Si variamos el voltaje en terminales o la resistencia de armadura, podemos controlar la característica velocidad-par del motor. El cambio de voltaje modifica la velocidad sin carga del motor sin afectar la pendiente de la característica, por lo tanto, si tenemos diferentes valores de voltaje, se pueden obtener un conjunto de características paralelas de velocidad-par. Variando la resistencia de armadura, la pendiente de la curva está controlada y la velocidad sin carga del motor permanece sin cambio. Hay infinitas posibilidades infinitas de diseño para un motor de imanes permanentes con densidades de flujo diferentes y las mismas áreas transversales. Puede lograrse un incremento en el par con rotor fijo solo acostas de una velocidad sin carga más baja.

ACTIVIDADES DE LABORATORIO

- Conectar el módulo de control a la MicroLabBox dSPACE y realizar la respectiva configuración.
- Utilice el control proporcional integral (PI) disponible en el archivo anexo de Simulink para realizar el control de velocidad, adicional a esto cambie el control a proporcional y observe la diferencia en las respuestas de control.
- Exporte los resultados obtenidos como se indica en el Anexo G, esto con el fin de estudiar el comportamiento que se presenta en los casos desarrollados.
- Varíe los valores de control del bloque PID de Simulink, con el fin de observar el cambio que se presenta en la respuesta de control.

INFORME

- Describa el comportamiento que se presenta en los casos de control desarrollados en el laboratorio.
- Realice una comparación entre los casos ejecutados en el módulo de control.
- De haber realizado la actividad previa de simulación presentar una comparación con esta.

NOTA

- Tener en cuenta los anexos del laboratorio disponibles para el uso de los softwares, dichos anexos serán suministrados por el docente encargado.

7. Conclusiones.

En este trabajo de grado se presenta el proceso de implementación de un módulo de laboratorio para el control de velocidad de un motor de corriente continua de imanes permanentes utilizando un controlador MicroLabBox – dSPACE. El proceso se documenta en dos partes, modelamiento del control en el software Simulink, en el cual por medio de diagramas de bloques se obtienen datos y se realiza una comparación mediante un lazo cerrado; prácticas de laboratorio experimentales que sirven de apoyo para los estudiantes de las asignaturas Control de Sistemas Eléctricos y Máquinas Eléctricas I, en donde los estudiantes pueden estudiar los comportamientos del MCCIP.

El módulo implementado fue planteado para que funcione de manera versátil, con la herramienta de simulación Simulink se podría variar el tipo de control, por ejemplo, reemplazar el control Proporcional - Integral (PI) por alguna de sus variantes: Proporcional (P) , Proporcional – Integral - Diferencial (PID), esto con el fin de estudiar el comportamiento de la máquina en diferentes tipos de control, como trabajo complementario se propone la aplicación de un control Fuzzy propuesto en el trabajo de grado encontrado en la literatura (Díaz Sáenz & Pérez Munevar, 2017). En caso de que se requiera reemplazar o modificar la carga eléctrica de la planta, debe hacerse una caracterización para reemplazar los elementos de electrónica de potencia que hacen parte del módulo.

Se documentó a modo de práctica de laboratorio las pruebas propuestas para que sean desarrolladas como actividades de apoyo en las asignaturas de Control de Sistemas Eléctricos y

Máquinas Eléctricas I, así mismo en los anexos adjuntos se encuentra en forma de tutorial el procedimiento a seguir para usar los software necesarios en la utilización del módulo de control implementado.

Como se aprecia en la Figura 21, a pesar de replicar en simulación la misma prueba realizada de manera experimental, se logra notar una diferencia en el tiempo en que la velocidad empieza el cambio en velocidad que se pide. Una posible causa de esto es que los datos obtenidos mediante el software ControlDesk han sido filtrados en MATLAB, este filtrado reduce la cantidad de datos que se tomaron, y ocasiona que se presente un ligero retraso al momento de visualizarlos en MATLAB. Así mismo los datos obtenidos en la simulación se pasan por un filtro, pero al ser una simulación los datos recogidos son menores, por esta razón se considera que el retraso es más notorio.

En la Tabla 5 se puede observar que los tiempos de establecimiento en simulación y experimental son diferentes, mientras que el caso experimental presenta un comportamiento subamortiguado y la simulación es mucho más estable (Anexo J), esto podría deberse a que el valor de inercia trabajado en la simulación es diferente al provisto por la placa del motor utilizado, el cambio en el valor de inercia se realizó debido a que el comportamiento que se presentaba con el valor de placa distaba mucho de lo que se obtuvo en el comportamiento experimental.

Este proyecto de grado abre las puertas para nuevos trabajos de investigación y también como posible idea de realizar prototipos de bajo costo que sean compactos y de fácil manejo para comercialización en los diferentes planteles educativos.

Las posibles causas del rizado en la señal de velocidad de la Figura 15 pueden deberse a el tipo de sensor utilizado, ya que es de tipo digital y la entrada del controlador es de tipo análogo-digital, esto puede inducir errores en la lectura.

Referencias Bibliográficas

Alibert, L. (2018). *Réalisation d'un système de mesure afin de caractériser un supercondensateur*. École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications. .

ControlDesk. . (2019). *Experiment and Visualization Software*. .

Díaz Sáenz, H., & Pérez Munevar, J. (2017). *Modelado, simulación e implementación de un sistema de control de tensión para un convertidor buck basado en lógica difusa*. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Ghaffari, A. (2012). *dSPACE and Real-Time Interface in Simulink*. San Diego: Department of ECE. San Diego State University. .

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*. Bucaramanga: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

MicroLabBox®. (2017). *Compact prototyping unit for the laboratory*.

Ochoa Arredondo, A., & Rodriguez Campiño, S. (2017). *Control en lazo cerrado de un convertidor cc/cc tipo buck utilizando lógica difusa mediante la implementación de Arduino*. . Pereira: Programa de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.

Ogata, Katsuhiko. (2010). *Ingeniería de control moderna*.

Simulación de Procesos Udenar. (s.f.). *Control proporcional integral derivativo (PID) y estabilidad de sistemas dinámicos*. Obtenido de

<https://simulaciondeprocesosudenar.wordpress.com/control-proporcional-integral-derivativo-pid-y-estabilidad-de-sistemas-dinamicos/>

Solano, J., Jimenez, D., Díaz, H., Pérez, J., Sepulveda, A., & Mantilla, M. (2017). *A modular power electronics/control systems laboratory as educational tool for electrical engineering courses*. Bucaramanga: . Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

Universidad Carlos III de Madrid. . (2011). *Estudio Temporal de Sistemas Continuos de 1er y 2º Orden. Práctica 1*. . Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. .

Apéndices

Apéndice A. Características de la MicroLabBox dSPACE.

Figura 24. Panel delantero MicroLabBox.

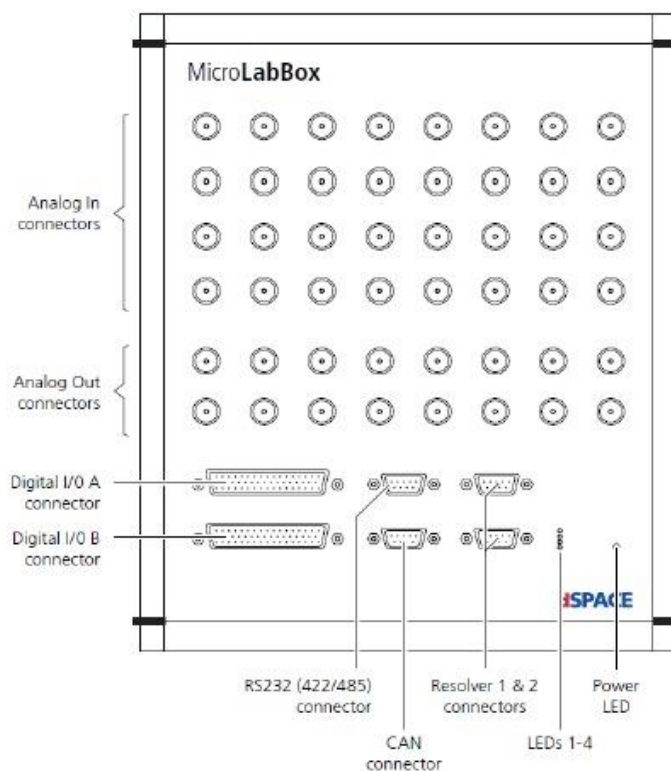
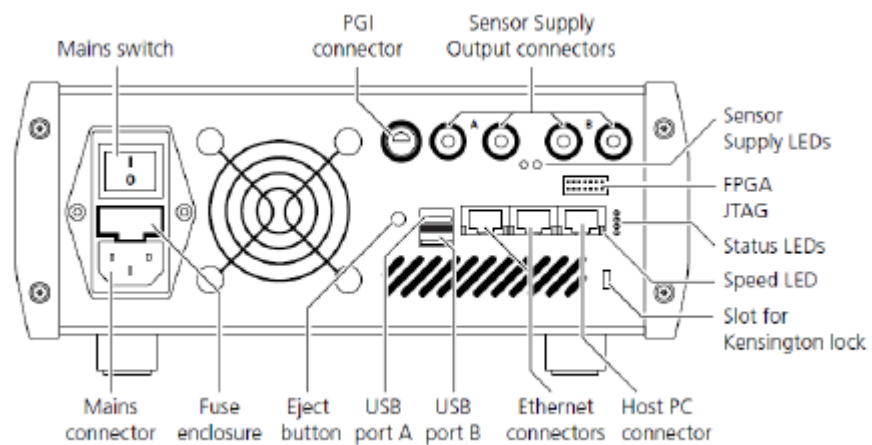


Figura 25. Panel trasero MicroLabBox.

Apéndice B. Conexión y configuración.

La MicroLabBox viene configurada por defecto de la siguiente manera:

Dirección IP: 192.168.140.7

Máscara de red: 255.255.255.0

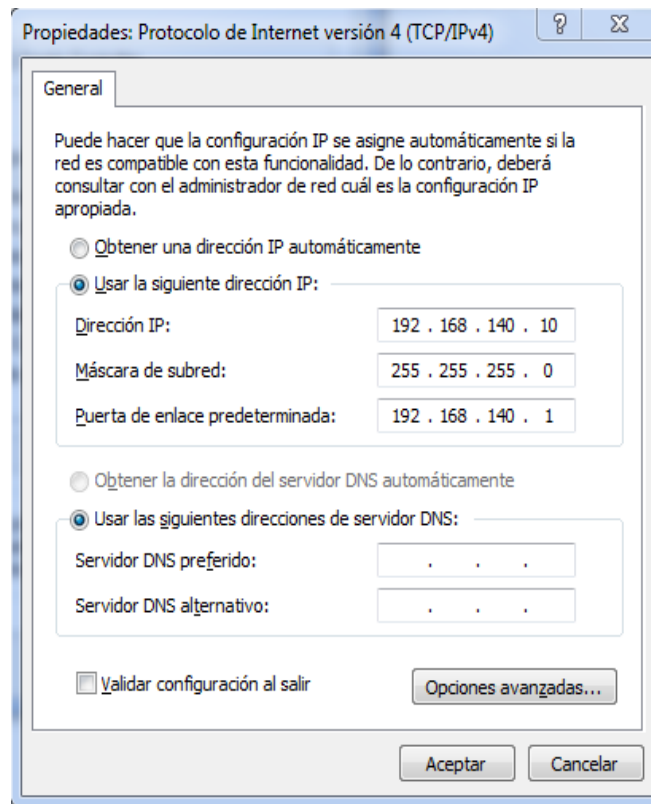
Modo IP: Estática

Dirección MAC: 64:4D:70:00:2E:EC

Conexión de la dSPACE ControlDesk

Para realizar una aplicación en SIMULINK y hacer un control en tiempo real mediante dSPACE es necesario tener una conexión entre el computador y la MicroLabBox, los pasos para la conexión son los siguientes.

- Energizar la MicroLabBox mediante un cable de poder.
- Conectar un cable ethernet al computador y a la MicroLabBox (Se deben utilizar únicamente los cables suministrados por dSPACE, estos cables tienen un rango de temperatura y resistencia mecánica mayor, si se utilizan otros cables puede que las interfaces no funcionen)
- Configurar el protocolo TCP/IP de la siguiente manera
 - En sistema operativo Windows, abrir “Centro de redes y recursos compartidos”
 - Cambiar configuración del adaptador
 - Clic derecho en “Conexión de área local” – Clic en Propiedades
 - Protocolo de Internet versión 4 (TCP /IPv4) – Clic en Propiedades
 - Clic en “Usar la siguiente dirección IP” y configuramos de la siguiente manera

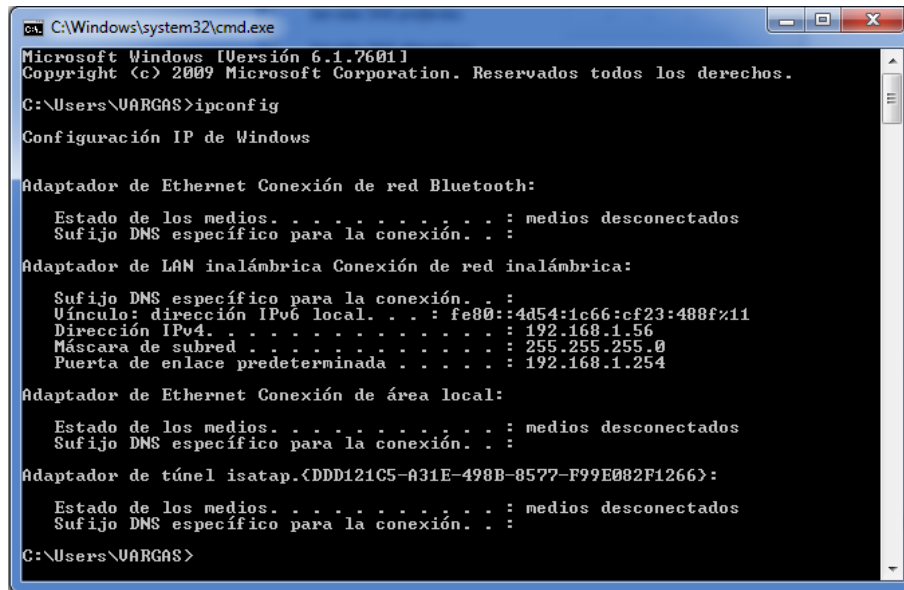
Figura 26. Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4).

Comprobación de conexión

Para comprobar que la conexión funcionó correctamente procedemos de la siguiente manera

- Presionar las teclas Windows + R
- Escribir el comando "cmd"
- Escribir el comando "ipconfig" para asegurarnos de que cambiamos nuestra dirección IP correctamente, debe verse de la siguiente manera:

Figura 27. Comprobación IP



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

C:\Users\UARGAS>ipconfig

Configuración IP de Windows

Adaptador de Ethernet Conexión de red Bluetooth:

    Estado de los medios. . . . . : medios desconectados
    Sufijo DNS específico para la conexión. . . :

Adaptador de LAN inalámbrica Conexión de red inalámbrica:

    Sufijo DNS específico para la conexión. . . :
    Vínculo: dirección IPv6 local. . . : fe80::4d54:1c66:cf23:488f%11
    Dirección IPv4. . . . . : 192.168.1.56
    Máscara de subred. . . . . : 255.255.255.0
    Puerta de enlace predeterminada. . . . . : 192.168.1.254

Adaptador de Ethernet Conexión de área local:

    Estado de los medios. . . . . : medios desconectados
    Sufijo DNS específico para la conexión. . . :

Adaptador de túnel isatap.{DDD121C5-A31E-498B-8577-F99E082F1266}:

    Estado de los medios. . . . . : medios desconectados
    Sufijo DNS específico para la conexión. . . :

C:\Users\UARGAS>
```

Para verificar que hay comunicación entre la MicroLabBox y el computador escribimos el comando “ping 192.168.140.7” (Ver Figura 28)

Figura 28. Comando ping.

```
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

C:\Users\UARGAS>ping 192.168.140.7

Haciendo ping a 192.168.140.7 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.140.7: bytes=32 tiempo=1ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.140.7: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.140.7: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.140.7: bytes=32 tiempo<1m TTL=255

Estadísticas de ping para 192.168.140.7:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 0ms, Máximo = 1ms, Media = 0ms
```

Apéndice C. Activación de la licencia de ControlDesk dSPACE.

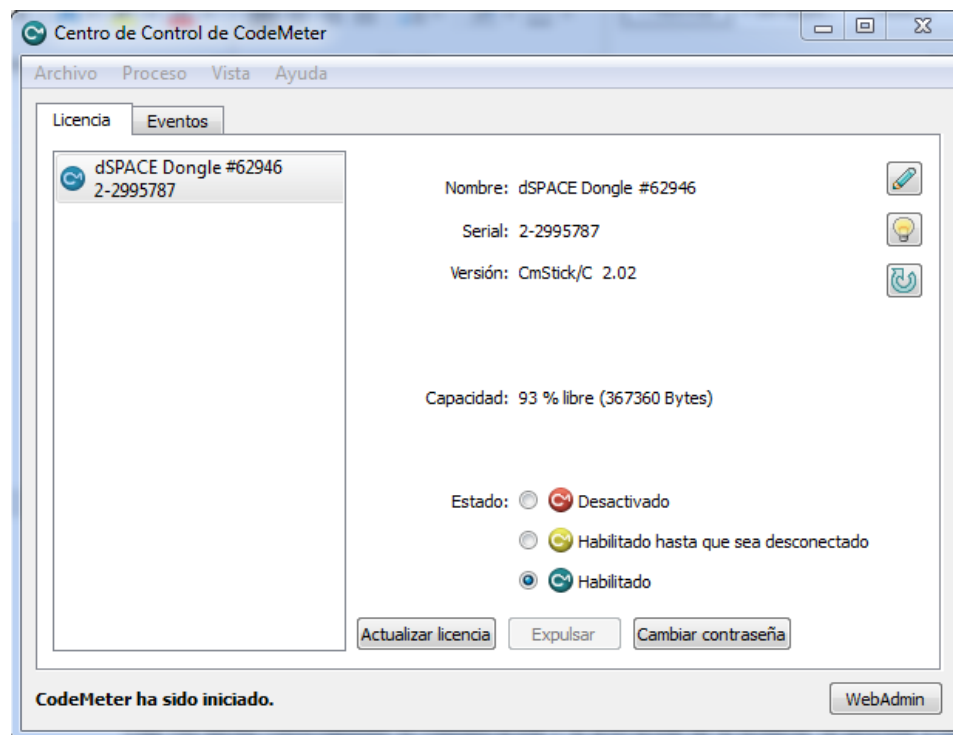
Es necesario contar con la licencia del producto que consiste en una llave tipo USB que debe estar conectada en todo momento para poder trabajar. (Ver Figura 29)

Figura 29. Llave tipo USB.



Una vez conectada la llave tipo USB, se abre el programa CodeMeter, se da clic en <Actualizar Licencia> (Ver Figura 30) y se siguen los pasos que se indiquen.

Figura 30. CodeMeter.

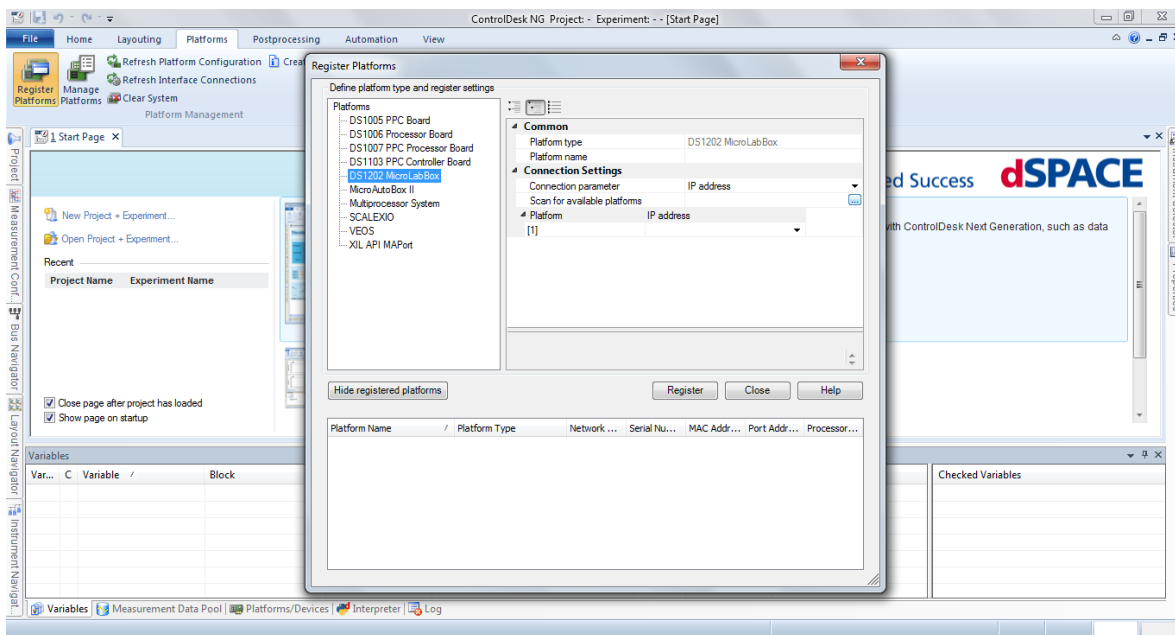


Apéndice D. Registro de la plataforma

Una vez hecha correctamente la comunicación y la activación de la licencia, se procede a registrar la plataforma con la que vamos a trabajar, en nuestro caso es la DS1202 y se hace de la siguiente manera.

- Abrir el programa dSPACE ControlDesk 5.4
- Clic en la pestaña <Platforms> y Seleccionar <Register Platforms> (Ver Figura 31)

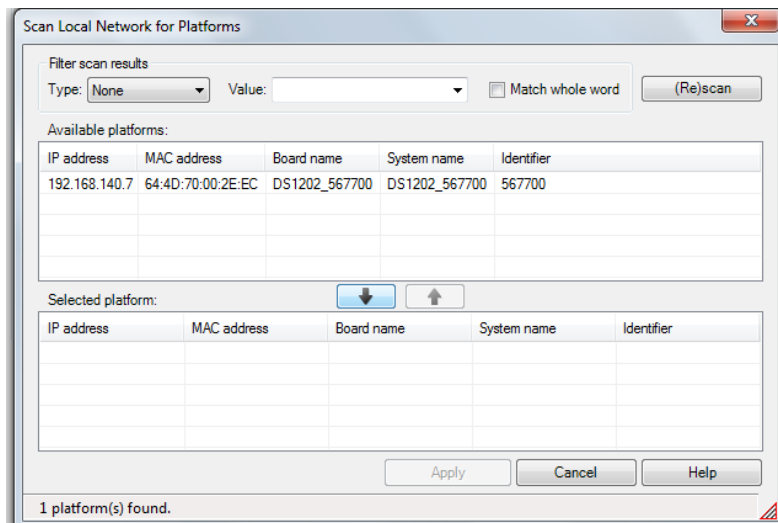
Figura 31. Pestaña <Platforms> en dSPACE ControlDesk 5.4



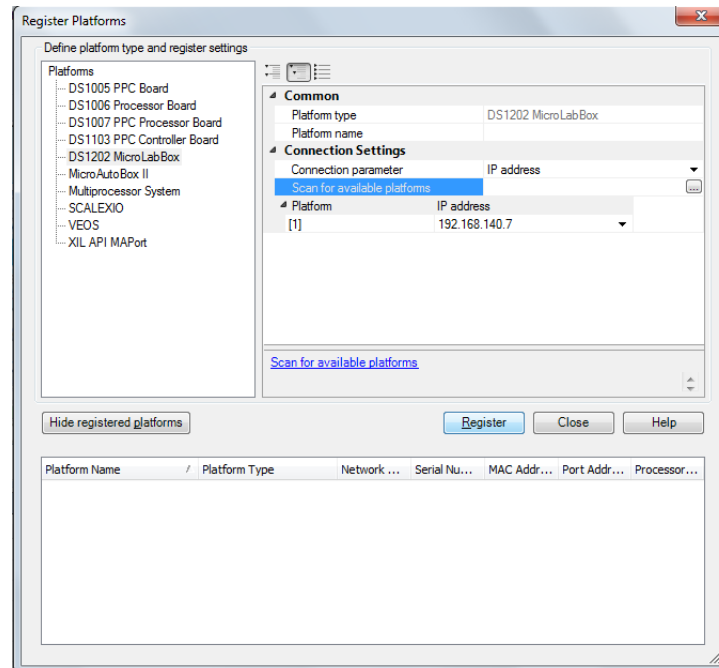
Se selecciona la tarjeta con la que se va a trabajar (DS1202 MicroLabBox) y damos clic en <Scan for available platforms>

En el recuadro <Available Platforms> se selecciona la plataforma que aparece en pantalla, se da clic en la flecha y posteriormente <Apply> (Ver Figura 32)

Figura 32. Selección de plataforma.

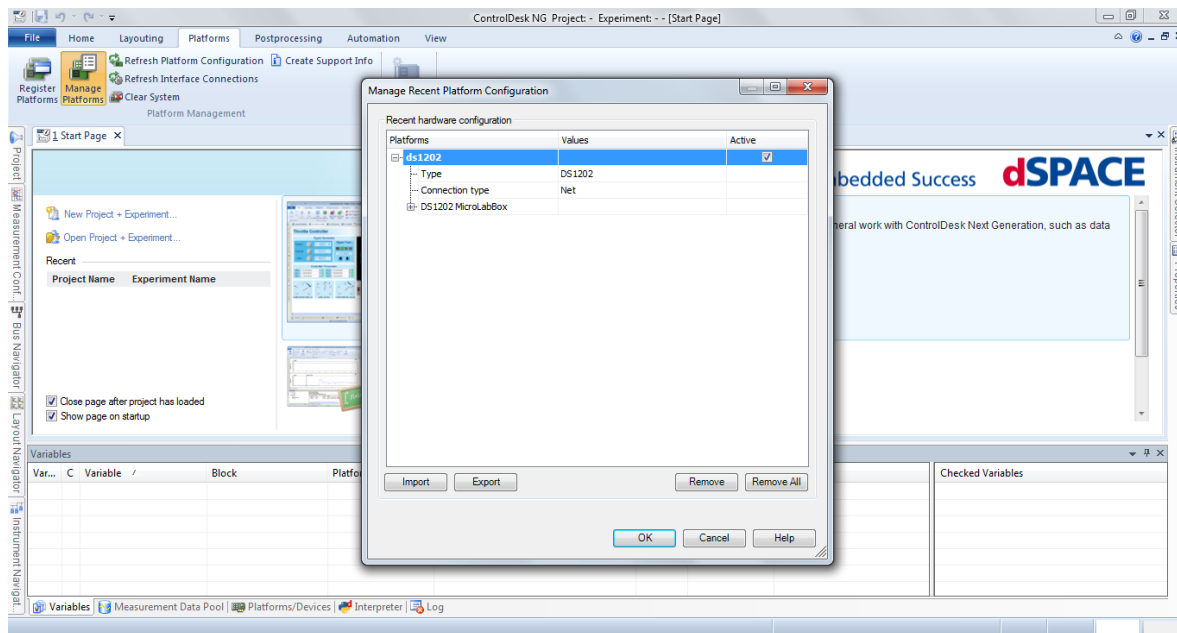


Para finalizar se da clic en <Register> (Ver Figura 33)

Figura 33. Finalización del registro.

Para comprobar que el proceso de activación se hizo correctamente damos clic en la pestaña <Manage Platforms> y debe estar activa la plataforma registrada. (Ver Figura 34)

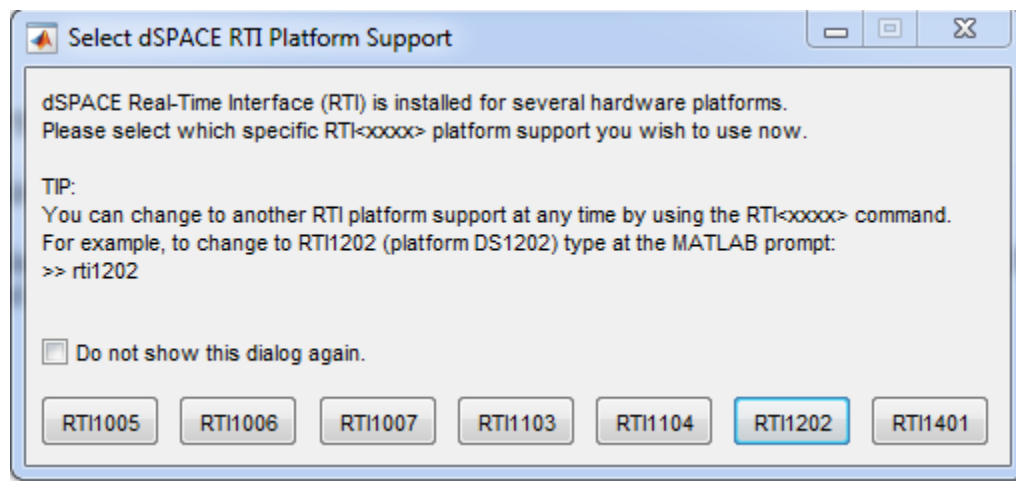
Figura 34. Comprobación de la activación



Apéndice E. Toolbox de SIMULINK

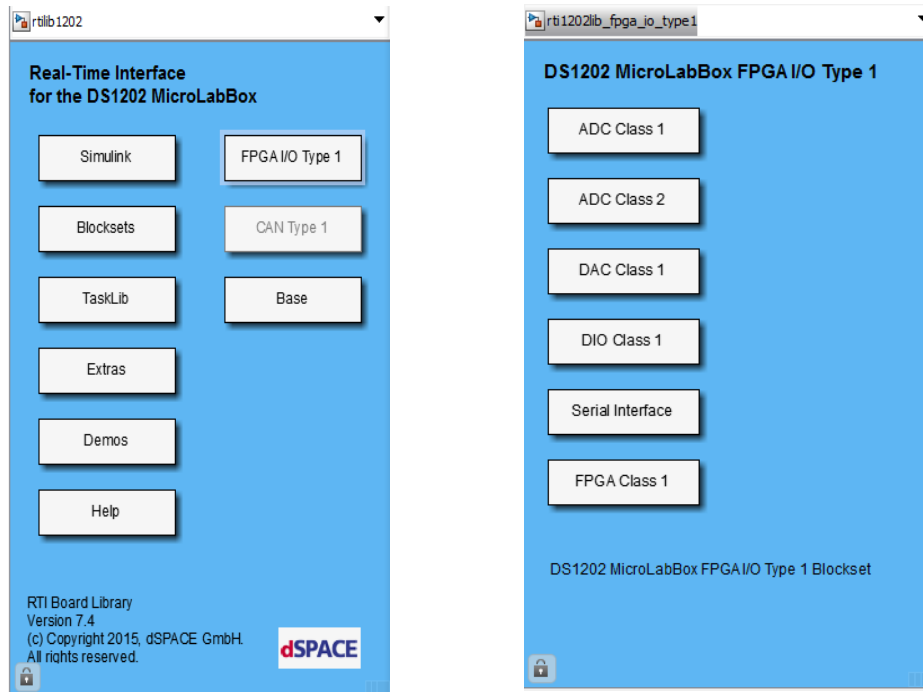
Al instalar dSPACE ControlDesk 5.4, también se instalan sus respectivas librerías en MATLAB, al abrir el software, aparece el siguiente mensaje (Figura 35)

Figura 35. Selección de la plataforma RTI



Se selecciona la opción <RTI1202>, se debe tener especial cuidado en no seleccionar <Do not show this dialog again>

Se escribe <RTI1202> en el Comand Window de MATLAB y se podrá tener acceso a la toolbox para trabajar en SIMULINK. Los bloques de entrada y salida asociados al módulo de control los podemos encontrar en la biblioteca <DS1202 MicroLabBox FPGA I/O Type 1> (Ver Figura 36)

Figura 36. Toolbox DS1202 MicroLabBox

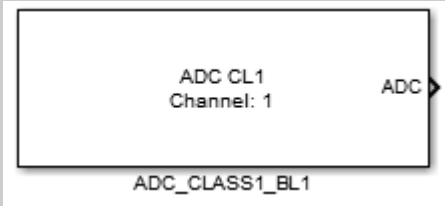
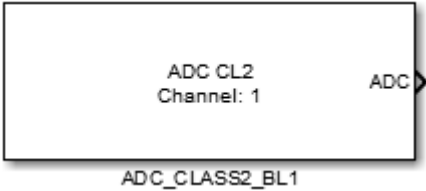
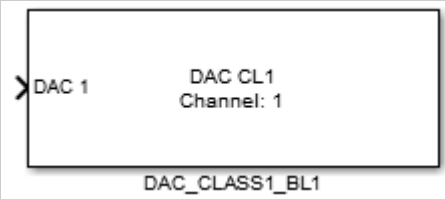
Bloques de entrada y salida

Para cada entrada y salida física de la MicroLabBox, existe un bloque en la toolbox de Simulink. Los bloques de entrada son tipo ADC y los bloques de salida son tipo DAC.

Para las entradas tipo ADC (analog to digital converter) existen dos clases y se diferencian entre sí por su polaridad en las terminales de conexión y las salidas tipo DAC (digital to analog converter) solo tienen una clase.

En la Tabla 5 se presenta la descripción para los bloques.

Tabla 7. Descripción de los bloques de entrada y salida.

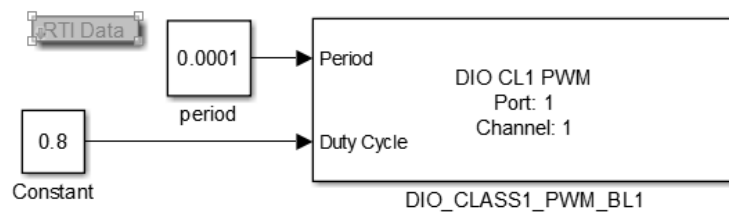
Bloque	Descripción				
Entrada ADC: Clase 1 	Cada convertidor A/D se puede configurar por separado para el modo de conversión simple o de ráfaga. Se pueden controlar hasta 24 canales de entrada analógica, cada uno independiente. La escala entre el voltaje de entrada analógica y la salida del bloque es: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Input Voltage Range</th><th>Simulink Output</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-10 V ... +10 V</td><td>-1.0 ... +1.0</td></tr> </tbody> </table>	Input Voltage Range	Simulink Output	-10 V ... +10 V	-1.0 ... +1.0
Input Voltage Range	Simulink Output				
-10 V ... +10 V	-1.0 ... +1.0				
Entrada ADC: Clase 2 	El bloque ADC clase 2 permite controlar hasta 8 canales de entrada analógica diferencial, cada convertidor por separado. La escala entre el voltaje de entrada analógica y la salida del bloque es: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Input Voltage Range</th><th>Simulink Output</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-10 V ... +10 V</td><td>-1.0 ... +1.0</td></tr> </tbody> </table>	Input Voltage Range	Simulink Output	-10 V ... +10 V	-1.0 ... +1.0
Input Voltage Range	Simulink Output				
-10 V ... +10 V	-1.0 ... +1.0				
Salida DAC 	Este bloque DAC permite controlar hasta 16 canales con salida analógica, estos convertidores se actualizan de forma síncrona. La escala entre la entrada del bloque y la tensión de salida analógica es: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Simulink Input</th><th>Output Voltage Range</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-1.0 ... +1.0</td><td>-10.0 ... +10.0 V</td></tr> </tbody> </table>	Simulink Input	Output Voltage Range	-1.0 ... +1.0	-10.0 ... +10.0 V
Simulink Input	Output Voltage Range				
-1.0 ... +1.0	-10.0 ... +10.0 V				

Apéndice F. Comunicación entre SIMULINK y ControlDesk.

Para poder trabajar en ControlDesk con los sistemas de bloques creados en Simulink se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Crear una simulación mediante los bloques de las librerías disponibles en Simulink. (Ver Figura 37)

Figura 37. Simulación de ciclo útil.



- Crear un script en MATLAB y guardarlo en la misma carpeta donde se encuentra el archivo de simulación. El script debe tener el comando `<rti_build>`. A continuación, un ejemplo.

El nombre del archivo de Simulink es:

`<PruebaPWM>`

Por lo tanto, el script de MATLAB debe escribirse de la siguiente manera:

`<rti_build('PruebaPWM')>`

Al realizar este paso, en la ventana de comandos debe visualizarse `<ans=0>` (Ver Figura 38)

Figura 38. Compilación en MATLAB.

```
LOADING APPLICATION "pruebaPWM.sdf" ("E:\Documents\MATLAB") ...
PLATFORM:      ds1202
Application stopped (0xaddca3).[7677.660]
RTI: Simulation state: STOP (1/702)[7677.299]
Application unload (0xaddca3).[7677.714]
System information: Hardware initialization succeeded. (5/8001)[7677.921]
Application loaded by host 'VARGAS-PC' (192.168.140.10).[7679.044]
Application loaded (0xaddca4).[7681.762]
RTLIB: I/O FPGA successfully programmed with standard FPGA application. (5/2001)[7681.410]
Application started (0xaddca4).[7681.845]
RTI: Initializing ... (1/720)[7681.511]
RTI: Initialization completed (1/721)[7681.512]
RTI: Simulation state: RUN (1/700)[7681.512]
LOADING FINISHED

ans =

    0
```

- Se revisan la carpeta donde se guardó el script y debe haber un archivo tipo sdf.

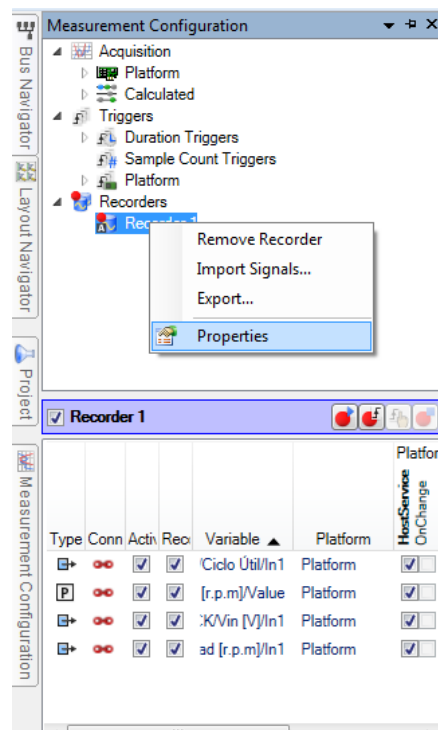
En este archivo está guardada la información de Simulink y se podrá exportar a ControlDesk.

Apéndice G. Exportación de datos .mat en ControlDesk.

Para poder exportar los datos medidos en ControlDesk se deben realizar el siguiente proceso:

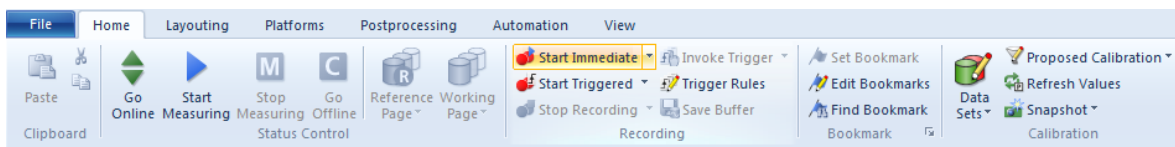
- Abrir el proyecto creado
 - Clic en <Measurement Configuration>, clic derecho en <Recorder 1> y luego <Properties>
- (Ver Figura 39)

Figura 39. Measurement Configuration.



- Clic en <Storage information> y habilitar la opción <Automatic export>
- Se escoge la ubicación donde se desee guardar el archivo
- En <Automatic export: file type> se selecciona la opción <MATLAB Files (*.mat)>
- Para comenzar con la exportación de los datos se da clic en <Start Immediate> (Ver Figura 40)

Figura 40. Start Immediate.



- Para terminar el proceso de exportación de datos se da clic en <Stop Recording> (Ver Figura 40)

Apéndice H. Características de los elementos que conforman el convertidor Buck

En las Figura 41, 42 y 43 se muestran las características de los elementos que conforman el convertidor DC/DC Buck

Figura 41. Inductor DO5040H-334


[Link to Coilcraft finder results](#)

252.57 μ H inductors ≥ 2.20 A peak at 25°C												
Part number	L actual	L nominal	I _{peak}	I _{rms}	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

Figura 42. MOSFET IRF1010

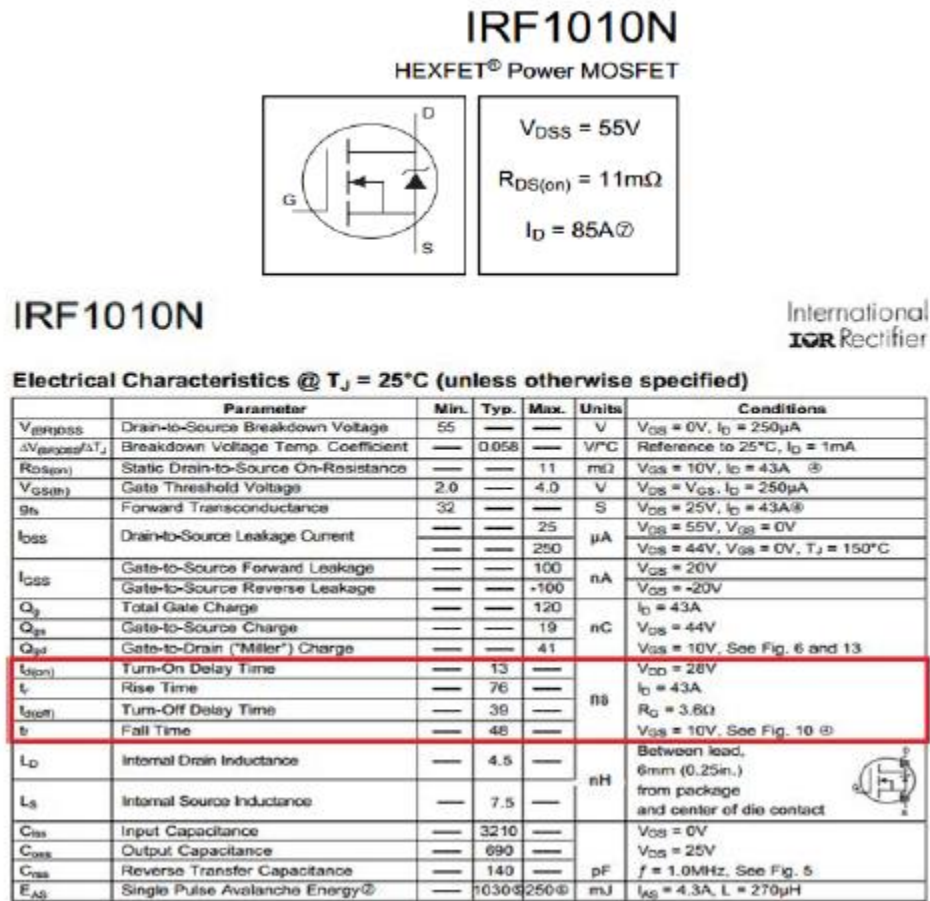
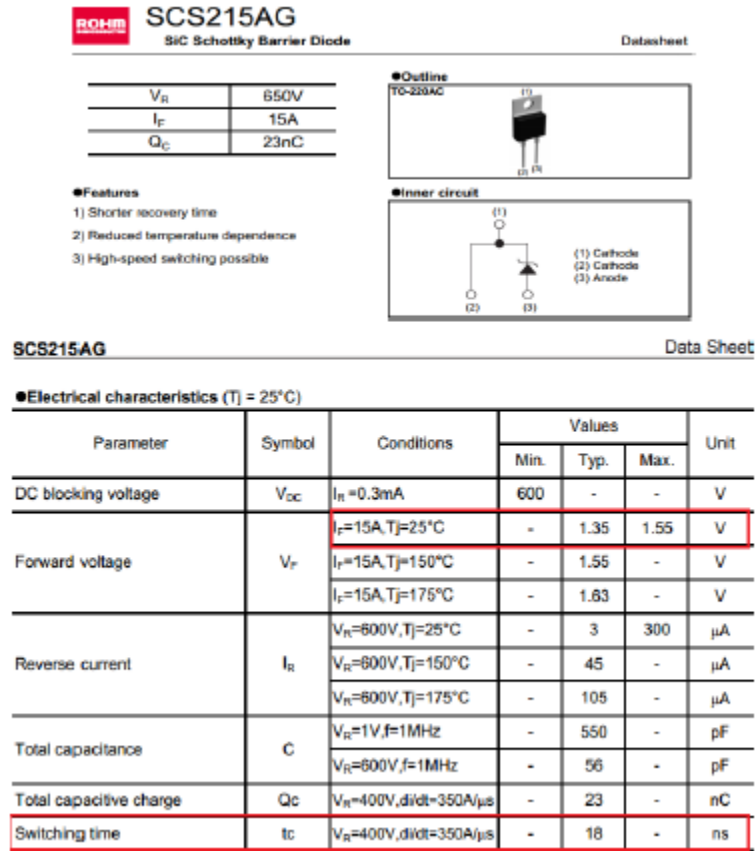
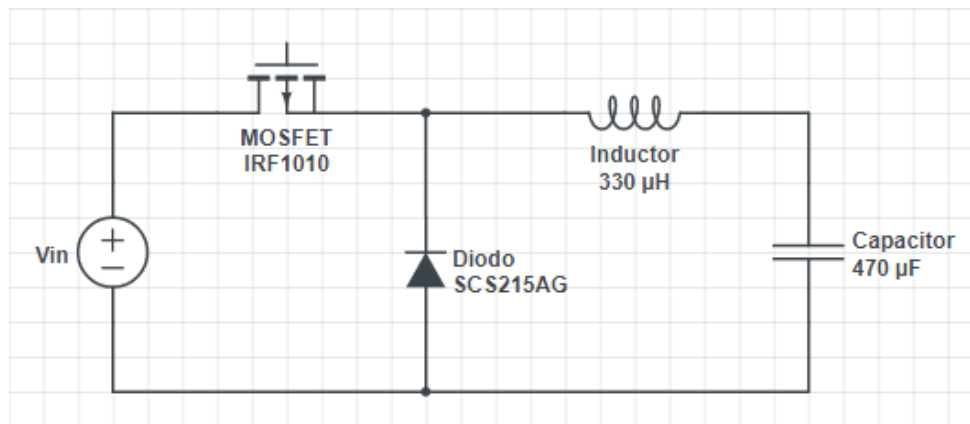


Figura 43. Diodo SCS215AG



Apéndice I. Circuito esquemático convertidor DC/DC Buck.

Apéndice J. Respuesta subamortiguada.

