

**CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO DE UN LABORATORIO DE MICRO-REDES EN  
BAJA TENSIÓN PARA EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ**

**JUAN CARLOS CONTRERAS HERAZO  
DIEGO ALFONSO JIMENEZ ALVERNIA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2015**

**CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO DE UN LABORATORIO DE MICRO-REDES EN  
BAJA TENSIÓN PARA EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ**

**JUAN CARLOS CONTRERAS HERAZO  
DIEGO ALFONSO JIMENEZ ALVERNIA**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista**

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

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

**2015**

## DEDICATORIA

En toda meta que se proponga cada uno siempre habrán aquellos que te brindan una mano para construir tus sueños y aspiraciones. Por esta razón quiero citar a todos aquellos que estuvieron presente con su esfuerzo y apoyo incondicional, en este proceso de ser un ingeniero electricista, ya que sin ellos no habría sido posible hacerlo.

En primera estancia dedico este trabajo a mi padre y a mi madre por su gran esfuerzo y dedicación y que a pesar de las adversidades nunca dudaron de mí.

A mi hermana mayor por escucharme y estar ahí cuando más lo necesite, a pesar de nuestros conflictos supimos cómo mantenernos unidos.

A mi tío Emiro por ayudarme a encontrar una carrera profesional y enseñarme muchas cosas que me han sido muy útiles en mi vida, especialmente darme a conocer esta gran institución que es la UIS.

A los docentes que fueron parte de mi ciclo universitario, ya que sin sus aportes no hubiera podido construir mi propio conocimiento y lograr ser un profesional.

Al profesor Raúl O. Vila Casado y la escuela de tutores de la E3T, por darme su voto de confianza y permitirme dar mis primeros pasos en el bello arte de la enseñanza.

A mis grandes y mejores amigos (Ellos sabrán de quienes hablo) que he conocido en la universidad, que estuvieron conmigo en todo momento e inclusive confiaron en mi cuando yo no lo hacía.

A mis abuelos por ser mis primeros ejemplos de vida, pero especialmente a “Luis Eduardo” que a pesar que no está conmigo físicamente, por alguna razón él esta influyendo en mis pensamientos para hacer las cosas de la manera más correcta.

Por último, dedico especialmente este trabajo a las dos personitas más importantes de mi vida, ustedes fueron mi causa y motivación para seguir adelante, les agradezco que siempre están pendientes de mí, divertirme con sus travesuras y brindarme su más sincero cariño. Estas dos personas son mis hermanitas Giselle y Nikol.

***Diego A. Jimenez Alvernia.***

A mi familia.

***Juan Carlos Contreras Herazo***

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	21
1. MICRO-REDES	23
1.1 DESCRIPCIÓN DE MICRO-RED	23
1.1.1 Ventajas de las micro-redes	24
1.1.2 Desventajas de las micro-redes	25
1.2 SISTEMAS QUE CONFORMAN UNA MICRO-RED	25
1.2.1 Sistema de generación	26
1.2.2 Sistema de electrónica de potencia	27
1.2.3 Sistema de almacenamiento de energía	29
1.2.4 Sistema de control y gestión	29
1.2.5 Sistema de protecciones	30
1.3 ARQUITECTURA DE UNA MICRO-RED	30
1.3.1 Micro-redes implementadas a nivel mundial	31

1.3.1.1 Micro-red AC implementada en la Universidad Nacional de Colombia	32
1.3.1.2 Micro-red DC implementada en la Universidad Nacional de Colombia	34
1.3.1.3 Micro-red híbrida AC/DC implementada en la Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur	36
1.3.1.4 Micro-red DC implementada en el Instituto de Tecnología de Tokyo, Japón	38
1.3.1.5 Micro-red DC implementada por la DGA (ejército francés) y el laboratorio FEMTO-ST, Francia	40
1.3.2 Proyecto de micro-red del Parque Tecnológico de Guatiguará	42
2. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	44
2.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	44
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	46
2.2.1 Características de hardware y software	46
2.2.2 Conexión de la dSPACE MicroLabBox	49
2.2.2.1 Configuración de la conexión	50
2.2.2.2 Comprobación de la conexión	53
2.2.3 Registro de la plataforma dSPACE MicroLabBox	54

3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS DE UNA MICRO-RED	58
3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)	59
3.2 ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO	60
3.3 SENSORES	62
3.3.1 Tipos de sensores	62
3.3.1.1 Sensores Magnéticos (efecto Hall)	62
3.3.1.2 Bobina de Rogowski	64
3.3.2 Aspectos técnicos de selección de un sensor	65
3.4 SELECCIÓN DE SENSORES DISPONIBLES EN EL MERCADO	66
3.4.1 Selección de sensores de corriente	72
3.4.2 Selección de sensores de tensión	76
4. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE CONTROL PARA LAS ETAPAS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA	80
4.1 RANGOS DE SALIDA DE LAS SEÑALES DE CONTROL	81
4.2 CIRCUITO DE AISLAMIENTO Y ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES DE CONTROL	81

5. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE MODELOS PARA LECTURA DE SEÑALES DE ENTRADA A UN MÓDULO MICROLABBOX	84
5.1 INTRODUCCIÓN A SIMULINK	84
5.1.1 Acceso a Simulink	85
5.1.2 Entorno de trabajo de Simulink	88
5.1.3 Modelado y simulación de un sistema en Simulink	89
5.2 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA LECTURA Y GENERACIÓN DE SEÑALES EN LA MICROLABBOX	94
5.2.1 Bloques de entrada y salida	95
5.2.2 Desarrollo de una aplicación de prueba para lectura y generación de señales en la MicroLabBox	97
5.2.3 Desarrollo de aplicación de monitorización del sistema de PF en la MicroLabBox	105
6. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE MODELOS PARA LA GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL DESDE UN MÓDULO MICROLABBOX	109
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA TOOLBOX dSPACE <ELECTRIC MOTOR CONTROL BLOCKSET>	109

6.2 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PWM	111
6.3 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA REGISTRO DE DATOS EN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO MASIVO USB	115
6.3.1 Descripción de la Toolbox empleada <RTI USB Flight Recorder Blockset>	115
6.3.2 Implementación de la Toolbox <RTI USB Flight Recorder Blockset>	119
6.3.3 Lectura de información registrada en la unidad de almacenamiento masivo USB	122
7. CONCLUSIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	130

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Acoplamiento PV – DC Bus	27
Figura 2. Acople AC Bus – DC Bus	28
Figura 3. Sistema de conversión de energía eólica	28
Figura 4. Arquitectura básica de una micro-red en baja tensión	31
Figura 5. Micro-red AC. Estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia	33
Figura 6. Representación del esquema de micro-red AC de la figura 5	34
Figura 7. Micro-red DC. Estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia	35
Figura 8. Representación del esquema de micro-red DC de la figura 7	36
Figura 9. Micro-red híbrida AC/DC. Estudio realizado en la Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur	37
Figura 10. Representación del esquema de micro-red híbrida AC/DC de la figura 9	38
Figura 11. Micro-red DC. Estudio realizado en el Instituto de Tecnología de Tokyo, Japón [14]	39
Figura 12. Representación del esquema de micro-red DC de la figura 11	40
Figura 13. Esquema de una micro red en un vehículo híbrido eléctrico	41
Figura 14. Representación del esquema de micro-red DC (EV) de la figura 13	41
Figura 15. Esquema de elementos existentes en la universidad para formar micro-red	42
Figura 16. Representación del esquema de elementos existentes en la universidad para formar micro-red	43
Figura 17. Módulo dSPACE MicroLabBox	46
Figura 18. Conectores panel superior de la MicroLabBox	48

Figura 19. Componentes panel trasero de la MicroLabBox	49
Figura 20. Conexión entre el pc y la MicroLabBox	50
Figura 21. Cuadro de diálogos “Propiedades de conexión de área local”	51
Figura 22. Cuadro de diálogos “Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)”	52
Figura 23. Propiedades del cuadro de diálogos	53
Figura 24. Comprobación de la conexión	54
Figura 25. Ventana principal de ControlDesk	55
Figura 26. Cuadro de registro del dSPACE	55
Figura 27. Recuadro para seleccionar plataforma dSPACE	56
Figura 28. Recuadro de registro de la plataforma	57
Figura 29. Conexión de las etapas de sensado y acondicionamiento con el módulo de control	59
Figura 30. Componentes de un sistema de adquisición de datos	60
Figura 31. Circuito de adquisición de señal para un sensor de tensión	61
Figura 32. Circuito conversor de corriente a tensión	61
Figura 33. Principio del efecto hall	63
Figura 34. Esquema de circuito de un sensor Hall de corriente	63
Figura 35. Esquema de circuito de un sensor Hall de tensión	64
Figura 36. Modelo de la bobina de Rogowski	65
Figura 37. Sistema FV implementado por el grupo de investigación CEMOS	67
Figura 38. Diagrama de bloques representativo de la adquisición, procesamiento y visualización de señales del sistema de paneles fotovoltaicos	68
Figura 39. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico implementado por el grupo de investigación CEMOS	69
Figura 40. Diagrama de bloques del sistema de adquisición conectado al dSPACE	79
Figura 41. Conexión de las etapas de sensado y acondicionamiento con el módulo de control	80
Figura 42. Circuito esquemático de la etapa de los optoacopladores	82

Figura 43. Acceso a la ventana de librerías de Simulink	85
Figura 44. Simulink Library Browser	88
Figura 45. Entorno de trabajo de Simulink	88
Figura 46. Diagrama de bloques del sistema	91
Figura 47. Parámetros bloque de fuente: generador de pulsos	92
Figura 48. Scope 1: señal escalón unitario $u(t-5)$	93
Figura 49. Scope 2: bloque de suma entre generador de pulsos y constante $k=1$	93
Figura 50. Scope: señal de salida $y(t)$	94
Figura 51. Toolbox <Real-Time Interface for the DS1202 MicroLabBox> y bloques de E/S del módulo de control	95
Figura 52. Relación de bloques en Simulink y conectores del dSPACE	97
Figura 53. Esquema de aplicación de prueba	98
Figura 54. Aplicación de prueba caso 1	99
Figura 55. Aplicación de prueba caso 2	99
Figura 56. Aplicación de prueba caso 3	100
Figura 57. Aplicación de prueba caso 4	100
Figura 58. Conexión de los elementos caso 1	101
Figura 59. Medida de osciloscopio caso 1	101
Figura 60. Conexión de los elementos caso 2	102
Figura 61. Medida de osciloscopio caso 2	102
Figura 62. Conexión de los elementos caso 3	103
Figura 63. Medida de osciloscopio caso 3	103
Figura 64. Conexión de los elementos caso 4	104
Figura 65. Medida de osciloscopio caso 4	104
Figura 66. Magnitud de tensión del generador de señales	105
Figura 67. Esquema de aplicación de monitoreo en Simulink	108
Figura 68. Bloques de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>	110
Figura 69. Esquema de la aplicación en Simulink para la generación de señal PWM	113

Figura 70. Descripción del Puerto Digital I/O A	113
Figura 71. Conexión de los elementos para visualizar la señal PWM	114
Figura 72. Señal PWM generada por medio de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>	115
Figura 73. Toolbox <Rti Usb Fligh Recorder Blockset>	116
Figura 74. Implementación en Simulink de la toolbox <dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset>	120
Figura 75. Gráfica de la señal de entrada al bloque <USB Flight Recorder Eject USB Device>	121
Figura 76. Conexión USB	121
Figura 77. Archivo .BIN creado para lectura de datos	122
Figura 78. Ventana Control Desk - Measurement Data Pool	123
Figura 79. Ventana Control Desk - Apertura archivo .BIN	124
Figura 80. Archivo .MAT para lectura de datos	124
Figura 81. Código para gráfica de datos almacenados	125
Figura 82. Gráfica de datos almacenados para n = 1: señal de pulsos	125
Figura 83. Gráfica de datos almacenados para n =2: señal senoidal	126

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diferencias principales entre equipos de control	45
Tabla 2. Especificaciones de los parámetros de la MicroLabBox	47
Tabla 3. Especificaciones técnicas de un sensor	65
Tabla 4. Características de los sensores a implementar en el sistema de paneles fotovoltaicos	70
Tabla 5. Especificaciones técnicas sensores de corriente	73
Tabla 6. Tabla comparativa de los sensores de corriente consultados	75
Tabla 7. Especificaciones técnicas sensores de tensión	76
Tabla 8. Tabla comparativa de los sensores de tensión consultados	78
Tabla 9. Rangos de salida de señales de control PWM	81
Tabla 10. Detalles de algunos bloques representativos de Simulink	86
Tabla 11. Bloques para el sistema	90
Tabla 12. Descripción de los bloques de E/S	96
Tabla 13. Característica bloques E/S	105
Tabla 14. Especificaciones de los canales de E/S y las variables a medir	106
Tabla 15. Descripción de los bloques de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>	110
Tabla 16. Descripción de bloques a implementar para el modelo de generación de señal PWM	112
Tabla 17. Descripción de los bloques de la Toolbox <dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset>	117
Tabla 18. Descripción de bloques a implementar para el modelo de lectura de datos	119

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. APLICACION DE PRUEBA	
ANEXO B. APLICACION PARA MONITOREO DEL SISTEMA DE PANELES FOTOVOLTAICO	
ANEXO C. APLICACION PARA GENERACION DE UNA SENAL DE MODULACION POR ANCHO DE PULSOS	
ANEXO D. APLICACION PARA REGISTRO DE DATOS EN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO MASIVO USB	

## RESUMEN

**TÍTULO:** CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO DE UN LABORATORIO DE MICRO-REDES EN BAJA TENSIÓN PARA EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ.

**AUTORES:** JUAN CARLOS CONTRERAS HERAZO  
DIEGO ALFONSO JIMENEZ ALVERNIA\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** MICRORRED, ENERGÍAS RENOVABLES, RED DE DISTRIBUCIÓN, SENSORES.

**DESCRIPCIÓN:** En una primera etapa de este trabajo, se realiza un análisis de la literatura científica para identificar arquitecturas utilizadas en micro-redes. Se identifican los componentes y elementos que la conforman así como sus ventajas y desventajas. Este análisis permite determinar la complejidad de la construcción y puesta en marcha de una micro-red.

En la segunda fase, este trabajo se enfoca en la selección del sistema de control local y gestión de energía, para un laboratorio de micro-redes de baja tensión, incluyendo la selección de la instrumentación necesaria para la adquisición y acondicionamiento de señales eléctricas, provenientes de la misma.

Como aplicación de este trabajo, se seleccionan los sensores de tensión y de corriente y se diseña el software de monitorización con el fin de realizar medidas para evaluar el comportamiento de un sistema de generación de energía fotovoltaica, instalado en el laboratorio de control de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Uno de los objetivos del laboratorio de micro-redes es implementar un sistema de control programable, que permita evaluar diferentes técnicas de control en una micro-red. En este trabajo se implementa un software que permite la lectura de señales eléctricas provenientes de la micro-red, así como generación de señales de control hacia las etapas de electrónica de potencia. Por tal motivo es necesario configurar la conexión, determinar los rangos de operación, programar y realizar las acciones necesarias para el funcionamiento del sistema de control. Se realizan aplicaciones que permiten monitorizar, registrar y generar señales para el estudio de micro-redes, además del acondicionamiento de señales de control para las etapas de electrónica de potencia.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD Javier Enrique Solano Martínez

## ABSTRACT

**TITLE:** A CONTRIBUTION TO THE DESIGN OF A LOW VOLTAGE MICROGRID LABORATORY IN GUATIGUARÁ TECHNOLOGICAL PARK<sup>\*</sup>.

**AUTHORS:** JUAN CARLOS CONTRERAS HERAZO,<sup>\*\*</sup>  
DIEGO ALFONSO JIMENEZ ALVERNIA<sup>\*</sup>.

**KEYWORDS:** MICROGRID, RENEWABLE ENERGY, DISTRIBUTION GRID, SENSORS.

**DESCRIPTION:** In the first stage of this work, a review of the scientific literature is performed to identify architectures used in micro-grids. The components and elements that make it up are identified as well as its advantages and disadvantages. This analysis allows determining the complexity of the construction and the start up of a micro-grid.

In the second phase, this work focuses on the selection of the local control system and management of energy, for a laboratory of low voltage micro-grids, including selection of the necessary instrumentation for acquisition and conditioning of electrical signals, coming from them.

As an application of this work, the voltage and current sensors are selected and is designed the software of monitoring in order to make measures to evaluate the behavior of a photovoltaic power generation system, installed in the laboratory of control of the faculty of electrical engineering.

One of the micro-grids objectives is to implement a programmable control system, enabling you to evaluate different control techniques in a micro-grid. In this work is implemented a software which allows the reading of electrical signals coming from the micro-grid, as well as generation of control signals to the stages of power electronics. For this reason, is necessary configure the connection, determine the ranges of operation, schedule and perform the actions necessary for the control system to function. There are applications that enable monitor, register and generate signals for the study of grids, as well as the refurbishment of control signals for the stages of power electronics.

---

<sup>\*</sup> Degree Work

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications School. Director: PhD Javier Enrique Solano Martinez

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los grandes sistemas de energía eléctrica se diseñan con el fin de suplir las demandas y necesidades que exijan las cargas de cualquier tipo (residencial, comercial, industrial, entre otras) en una zona determinada con la mejor calidad energética posible. No obstante, existen ciertos sectores los cuales no cuentan con proyectos de electrificación, debido a los costos y/o dificultades técnicas que exigen. Esto ha obligado al estudio e implementación de nuevas tecnologías que puedan suplir el abastecimiento del consumo de energía, aprovechando los recursos locales (radiación solar, viento, fuerza mareomotriz, etc.) para la generación de electricidad.

Debido a esto, a nivel mundial se están desarrollando centros de investigación y laboratorios desde los cuales universidades y entes privados han empezado a estudiar a fondo micro-redes. Entre los pioneros en esto se encuentran los laboratorios de: "ISET (Germany), the University of Manchester (U.K.), Ecole de Mines (France) y NTUA (Greece)"<sup>1</sup>.

El grupo GISEL de la E<sup>3</sup>T planea la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta, Santander), sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Este laboratorio, en el que se podrán estudiar las diferentes etapas que componen una micro-red, debe contar con un sistema de control así como una etapa para el sensado de señales de la micro-red a analizar, permitiendo medir los flujos de potencias (tensiones y corrientes) en cualquier parte del sistema. De igual forma debe contar con una etapa de

---

<sup>1</sup> HATZIARGYRIOU, Nikos. ASANO, Hiroshi. IRAVANI, Reza. MARNAY, Chris. Microgrids. IEEE Power and Energy magazine, JULY/AUGUST 2007

acondicionamiento de las señales de control provenientes del módulo con destino de las etapas de electrónica de potencia. De cierta manera se crea una especie de laboratorio móvil que permite el análisis de cualquier sistema eléctrico ya instalado, dado que el sistema de control permite su movilidad.

Este trabajo contribuye con la identificación y selección del módulo de control, de la instrumentación para adquisición de señales y de las etapas para el acondicionamiento de las diferentes señales (de entrada y salida) para el laboratorio. Adicionalmente se crean aplicaciones que se envían al módulo de control que permiten la monitorización y estudio de una micro-red.

Una aplicación inmediata consiste en el diseño de modelos de monitorización de las diferentes variables presentes en un sistema fotovoltaico realizado en la universidad, implementado por el semillero de investigación en instrumentación y control del Grupo CEMOS, titulado “Introducción al control de fuentes alternativas de energía”, coordinado por el profesor PhD. Ricardo Alzate Castaño.

## 1. MICRO-REDES

Para que un sistema eléctrico sea considerado una micro-red, debe cumplir con ciertas características. En este capítulo se describe el concepto de micro-redes, los elementos que la conforman y la arquitectura de la misma.

### 1.1 DESCRIPCIÓN DE MICRO-RED

La arquitectura fundamental de la red eléctrica actual, vertical en su operación (generación – transmisión – distribución) y con flujos de energías unidireccionales ha empezado a experimentar cambios, resultado de nuevas tecnologías participantes en la generación de energía eléctrica, como lo son los sistemas de generación en base a energías renovables<sup>2</sup>.

Es por eso que surge un escenario de red eléctrica integrada a la que se le ha denominado micro-red, la cual se caracteriza por usar fuentes de generación distribuida, basadas generalmente en energías renovables. También dispone de dispositivos almacenadores de energía debido a que la generación es de carácter discontinuo en algunos sistemas (por ejemplo, la generación FV solo genera de día, la generación eólica solo genera cuando hay viento), un sistema de control, un sistema de comunicaciones y una etapa de electrónica de potencia, que permite transformar y controlar tensiones y corrientes de diferentes niveles<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS. Introducción al concepto de microrredes [en línea]. <http://www.iie.org.mx/boletin032010/tenden.pdf> [citado el 9 de Julio de 2015]

<sup>3</sup> ROCABERT, Joan. LUNA, Alvaro. BLAABJERG, Frede. RODRÍGUEZ, Pedro. Control of Power Converters in AC Microgrids. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 27, No. 11, November 2012

Cualquier sistema a pequeña escala con sus propios recursos de energía, generación, cargas y límites definidos, califica como micro-red. Las micro-redes pueden ser pensadas como energía de respaldo, o para reforzar la red eléctrica principal durante los períodos de alta demanda.

Una micro-red puede funcionar en paralelo a la red de suministro eléctrico o puede operar en modo aislado, proporcionando servicios de UPS (sistema de alimentación ininterrumpida). El sistema puede desconectarse de la red de distribución durante eventos como fallas o colapsos de tensión, pero también puede desconectarse intencionalmente cuando la calidad de la energía supera los límites de operación normalizados<sup>4</sup>.

Las fuentes de generación no convencionales en una micro-red operan cerca de los puntos de consumo, de esta forma se puede obtener energía del medio circundante, reduciendo de manera significativa los costos a mediano y largo plazo, debido a que se reducen las pérdidas por transmisión de la energía.

**1.1.1 Ventajas de las micro-redes** Las principales ventajas que proporciona una micro-red son:

- Permiten menor dependencia de la red de distribución.
- Micro-redes con fuentes de energía renovables reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Un aumento en el uso de micro-redes supondrá una reducción de pérdidas de energía debido a la disminución de la demanda pico en la red de distribución.
- La micro-red permite que el excedente de energía sea incorporada a la red de suministro.
- Las micro-redes operan en media y baja tensión, por lo que se puede transformar directamente la tensión de generación a la tensión de consumo.

---

<sup>4</sup> LASSETER, Robert H. CERTS Microgrid Laboratory Test Bed. Submitted to IEEE Transactions on Power Delivery, JULY 2010

- La reducción entre las distancias de fuentes y cargas mejora la señal de tensión en el sistema al reducir los reactivos y por consiguiente aumenta la eficiencia energética del conjunto.

**1.1.2 Desventajas de las micro-redes** Una micro-red cuenta con diversas desventajas, dentro de las cuales se pueden señalar:

- Falta de una normativa específica que impide su generalización, en vista que no han sido altamente probadas ni implementadas masivamente.
- Al tratarse de una tecnología que todavía no está implantada en mercados, resulta una inversión de sistemas energéticos considerablemente costosos.
- Debido a la incertidumbre y las características intermitentes de velocidad del viento, nivel de radiación solar y temperatura ambiente, para micro-redes con energías renovables, se hace necesario un sistema de almacenamiento de energía<sup>5</sup>.
- Tanto el sistema de almacenamiento de energía como otros equipos en la micro-red requieren un mantenimiento permanente.
- Debido a la intermitencia de la energía solar y eólica, el tiempo de carga de las baterías se hace más prolongado.
- En caso de falla de alguno de los componentes críticos (e.g. sistema de control, electrónica de potencia) del sistema, se vería afectada la continuidad del servicio.

## **1.2 SISTEMAS QUE CONFORMAN UNA MICRO-RED**

La micro-red está compuesta por diferentes etapas, que comprenden: Fuentes de energía, elementos de electrónica de potencia, almacenamiento de energía, sistema de control, comunicaciones y protecciones. Las fuentes de energía

---

<sup>5</sup> LIU, Xiong. WANG, Peng. LOH, Poh Chiang. A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control. IEEE Transactions on Smart GRID, VOL. 2, NO. 2, June 2011

pueden ser fuentes de combustibles fósiles o fuentes de energías renovables, como micro-turbinas, paneles solares, aerogeneradores y/o celdas de combustible.

A continuación se describen los sistemas que componen una micro-red.

**1.2.1 Sistema de generación** Consiste básicamente en la generación de energía eléctrica por medio de diversas fuentes en lugares próximos a la carga. Idealmente son fuentes de energía renovables como los biocombustibles, biomasa, eólica, geotérmica, marina, hidráulica y/o solar. Dichas fuentes tienden a ser pequeñas unidades de baja tensión de alta fiabilidad y con pocas emisiones contaminantes<sup>6</sup> <sup>7</sup>. La instalación e implementación de cada uno de estos sistemas dependerá en gran medida de las condiciones climáticas y ubicación geográfica del lugar donde se ubicará la micro-red.

Generalmente, los sistemas de generación eléctrica en zonas remotas no interconectadas, cuentan con generación a base de diésel. Preferiblemente se busca la reducción del consumo de este tipo de energías, pero no necesariamente eliminarlas. Esto se puede lograr implementando de manera paralela un sistema de generación a base de energías renovables, convirtiéndose así en un sistema híbrido. La reducción de este tipo de energías se plantea debido a su gran impacto ambiental y a sus altos costos. Estos costos se generan principalmente por el transporte del combustible a dichos lugares de destino, que tienden a estar en zonas remotas de difícil acceso<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE ENERGÍAS RENOVABLES. Tipos de fuentes de energía renovable [en línea]. <http://www.appa.es/01energias/08tiposfuentes.php> [citado el 9 de Julio de 2015]

<sup>7</sup> LASSETER, Robert H. MicroGrids. IEEE Distributed Generation, 2002

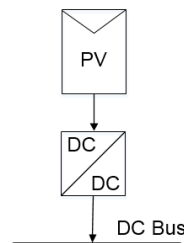
<sup>8</sup> RYAN L, Kelly. GIOVANNA, Oriti. ALEXANDER L, Julian. Reducing Fuel Consumption at a Remote Military Base. IEEE Electrification Magazine. DECEMBER 2013

**1.2.2 Sistema de electrónica de potencia** La electrónica de potencia incluye todos los dispositivos que permiten acoplar fuentes y cargas eléctricas de distintas naturalezas (AC, DC) o niveles de tensión, es decir, permite el control y la conversión de energía eléctrica de la forma suministrada por una fuente a la forma requerida por la carga, por medio de los distintos tipos de convertidores (AC/DC, DC/AC, AC/AC, DC/DC) y reguladores.

Los convertidores de acuerdo a su función pueden dividirse en diversas clases como unidireccionales o bidireccionales. Un convertidor unidireccional funciona al permitir el flujo de potencia en un solo sentido, tiene la finalidad de evitar flujos de potencia hacia la fuente e.g. para evitar la motorización de un grupo de generación diésel. Los convertidores bidireccionales permiten el flujo de potencia en cualquier sentido.

Un convertidor DC/DC es un sistema electrónico cuya misión es transformar una corriente continua en otra de igual carácter pero diferente valor. Se puede encontrar un símil en corriente alterna con los transformadores y su relación de transformación. Una aplicación de este tipo de convertidor, es acoplar un sistema de generación PV con un barraje de corriente continua como se muestra en la Figura 1.

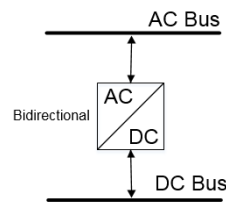
**Figura 1. Acoplamiento PV – DC Bus**



Un convertidor bidireccional AC/DC o DC/AC es un sistema electrónico que tiene la finalidad de transformar una forma de corriente en otra, dependiendo el flujo de

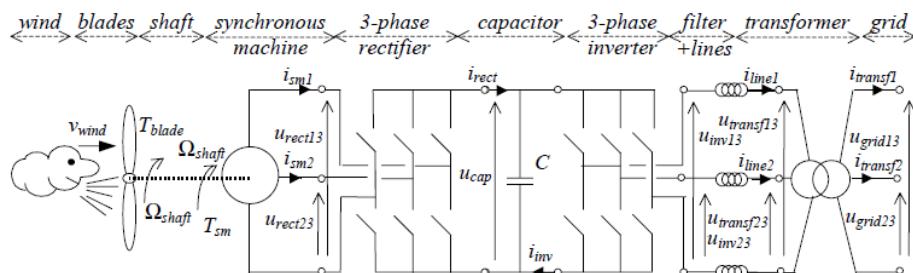
la potencia, es decir, este convertidor puede funcionar como inversor si la conversión es de corriente directa a corriente alterna, o rectificador, si la conversión es de corriente alterna a corriente directa. Una aplicación de este tipo de convertidor, es acoplar un sistema de corriente alterna (AC) con un sistema de corriente continua (DC) (ver Figura 2).

**Figura 2. Acople AC Bus – DC Bus**



Un convertidor AC/AC es un sistema electrónico cuya función es transformar una corriente alterna en otra de igual carácter pero variando el valor de su magnitud y frecuencia. Una aplicación de este tipo de convertidor, es el de acoplar un aerogenerador con un sistema AC. Tratándose de una máquina síncrona, debido a que la velocidad del viento no es constante, varía la frecuencia de la tensión generada, con lo que este convertidor se encarga de asignar un valor de frecuencia estable. En la Figura 3 se representa el esquema de un sistema de conversión de energía eólica por medio de un convertidor AC/AC, compuesto de dos etapas; una etapa de rectificación (AC/DC) y una etapa de inversión (DC/AC).

**Figura 3. Sistema de conversión de energía eólica**



Fuente: A, Bouscayrol. Delarue. X, Guillaud. Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine. Renewable Energy. MAY 2005

El último módulo que compone este sistema de electrónica de potencia es el regulador, el cual tiene como función fundamental impedir que una batería continúe recibiendo energía una vez que ha alcanzado su carga máxima. Si, una vez que se ha alcanzado la carga máxima, se intenta seguir introduciendo energía, se inicia en la batería procesos de gasificación (hidrólisis del agua en hidrógeno y oxígeno) o de calentamiento, que pueden llegar a ser peligroso y, en cualquier caso, acortaría sensiblemente su vida útil. Otra función del regulador es la prevención de la sobre descarga, con el fin de evitar que se agote en exceso la carga de la batería, siendo éste un fenómeno que puede provocar una sensible disminución en la capacidad de carga de la misma<sup>9</sup>.

**1.2.3 Sistema de almacenamiento de energía** Para almacenar la energía eléctrica, se utilizan comúnmente acumuladores o baterías, para poder ser utilizada posteriormente al abastecer la carga. La configuración de las baterías se diseña de manera que se pueda mantener la tensión de operación mientras se proporciona la potencia necesaria para el funcionamiento de la carga, sin sobrepasar los límites mínimos de almacenamiento de las baterías, según las características definidas por los fabricantes. El número total de baterías dependerá del consumo promedio en amperes-hora y el número de días de autonomía que se estime conveniente<sup>10</sup>.

**1.2.4 Sistema de control y gestión** El control de la micro-red basado en un sistema de medidas, es capaz de realizar un análisis de los diferentes parámetros de operación de las fuentes presentes y de las condiciones de operación de la carga, con el objetivo de establecer la distribución de energía entre las fuentes

---

<sup>9</sup> UNIVERSIDAD DE JAÉN. Regulador fotovoltaico [en línea]. [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/03\\_regulador/01\\_basico/4\\_regu\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/03_regulador/01_basico/4_regu_01.htm) [citado el 10 de Julio de 2015]

<sup>10</sup> BIBLIOTECA DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microredes eléctricas [en línea]. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/1.+Introduccion.pdf> [citado el 10 de Julio de 2015]

presentes y así proporcionar las mejores condiciones de operación para el correcto funcionamiento de la carga.

**1.2.5 Sistema de protecciones** Las protecciones deben responder a las dos estructuras básicas que componen una micro-red, la red eléctrica y los sistemas de generación. Si la falla es en la red eléctrica, la respuesta deseada del sistema es que aisle la micro-red de dicha red, tan rápido como sea necesario para proteger las cargas del sistema. Si la falla es dentro de la micro-red, el sistema coordinador debe aislar la menor parte posible de la micro-red para eliminar la posible falla. Los sistemas de protección convencionales se basan en la medición de la corriente de cortocircuito del sistema<sup>11</sup>.

Para el caso de protección de una sobretensión, se colocan cerca de los sistemas de generación dispositivos conocidos como descargadores de tensión o varistores de alta energía. La función de este dispositivo es detectar sobretensiones en un tiempo determinado y derivarlas a tierra. Para las protecciones de los paneles solares se recomienda utilizar protecciones termo-magnéticas.

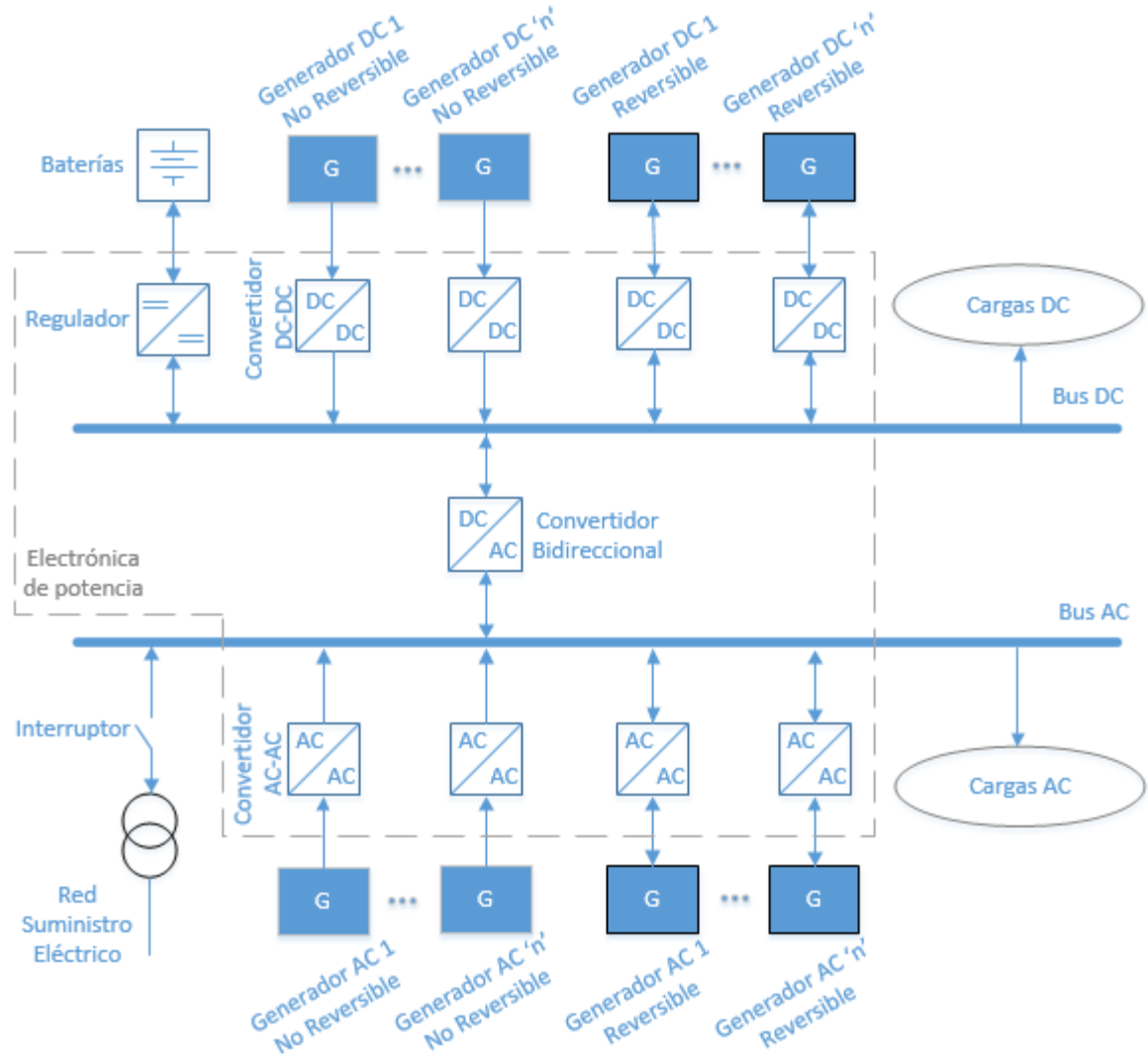
### **1.3 ARQUITECTURA DE UNA MICRO-RED**

En la Figura 4 se presenta la arquitectura básica de una micro-red, la cual puede alimentar una serie de cargas, tanto en corriente continua como en corriente alterna, por medio de un conjunto de sistemas de generación y etapas de electrónica de potencia. Idealmente las micro-redes funcionarían con fuentes de generación de energías renovables, no obstante pueden contar con fuentes de generaciones de energías convencionales (no renovables).

---

<sup>11</sup> REY, Juan. VERGARA, Pedro. Diseño de una micro-red de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012. 163 p

**Figura 4. Arquitectura básica de una micro-red en baja tensión**



**1.3.1 Micro-redes implementadas a nivel mundial** Consultando fuentes de distintos países y universidades alrededor del mundo, se encontraron esquemas de micro-redes que se están desarrollando e investigando. Micro-redes en AC, micro-redes en DC y micro-redes híbridas (AC/DC), componen la lista de estos sistemas en estudio. Algunas de ellas cuentan con sistemas de generación de energías renovables y otras con tipos de generación convencional.

A continuación se muestran las diferentes topologías de micro-redes encontradas y se detalla su esquema por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

#### **1.3.1.1 Micro-red AC implementada en la Universidad Nacional de Colombia**

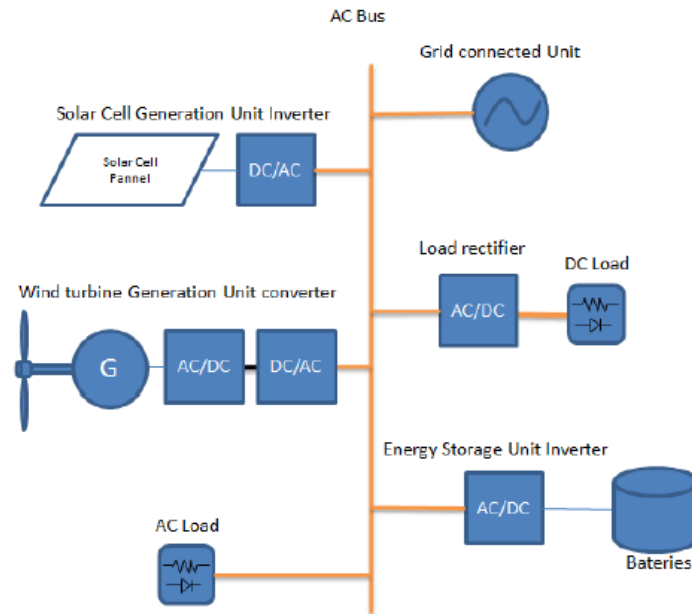
La micro-red AC de la Figura 5 consiste en la integración de fuentes de generación en un bus AC, la cual es estudiada como una micro-red basada en inversores conectados en paralelo (representado por las fuentes de generación, las cargas y las baterías). Las principales características de este enfoque son<sup>12</sup>:

- Cada fuente de generación está conectada al bus a través de un inversor, sincronizada en frecuencia y fase para mantener la tensión del bus en el PCC.
- El control de la potencia activa y la potencia reactiva en inversores está gestionado por la electrónica de potencia.
- Dependiendo del tipo de fuente de generación, se pueden necesitar más convertidores (por ejemplo, AC-DC-AC en un WG).

---

<sup>12</sup> MORENO, Andres F. NAVA, Eduardo Mojica. LVDC Microgrid Perspective For A High Efficiency Distribution System. National University of Colombia. IEEE. 2014

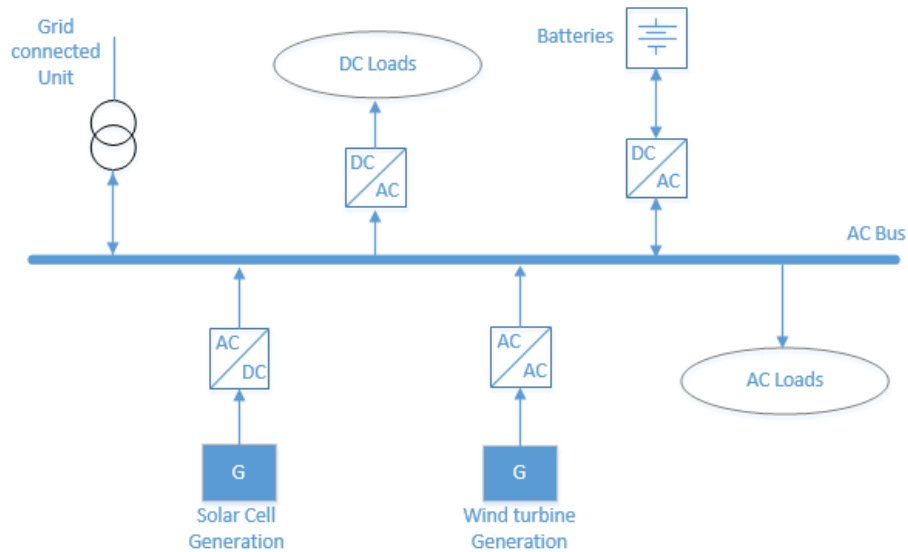
**Figura 5. Micro-red AC. Estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia**



Fuente: MORENO, Andres F. NAVA, Eduardo Mojica. LVDC Microgrid Perspective For A High Efficiency Distribution System. National University of Colombia. IEEE. 2014

En la Figura 6 se muestra el esquema de la Micro-red AC implementada en la Universidad Nacional de Colombia, por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

**Figura 6. Representación del esquema de micro-red AC de la figura 5**



### 1.3.1.2 Micro-red DC implementada en la Universidad Nacional de Colombia

En la micro-red DC de la Figura 7 se estudian ventajas de una micro-red de este tipo, como una forma de deshacerse de los problemas asociados con los sistemas de generación basados en AC. Algunas de las principales características son<sup>13</sup>:

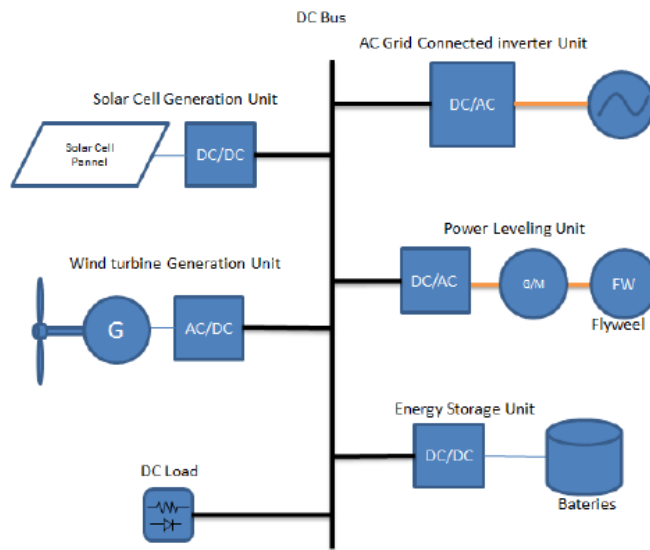
- Cada fuente de alimentación conectada puede funcionar de manera autónoma debido a que controlan solamente la tensión DC de la red.
- Cuando la red de suministro eléctrico cae en condiciones anormales o de falla, el sistema de red DC se conmuta a operación en la que la energía generada se suministra a las cargas conectadas al bus DC independiente.
- El costo del sistema se puede reducir porque sólo se necesita un inversor, el cual va conectado a la red AC.

La naturaleza DC de las energías renovables se puede complementar con la naturaleza también DC de casi todas las tecnologías de almacenamiento de

<sup>13</sup> Ibíd.

energía (baterías, volantes, supercondensadores) para crear una micro-red más eficiente<sup>14</sup>.

**Figura 7. Micro-red DC. Estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia**



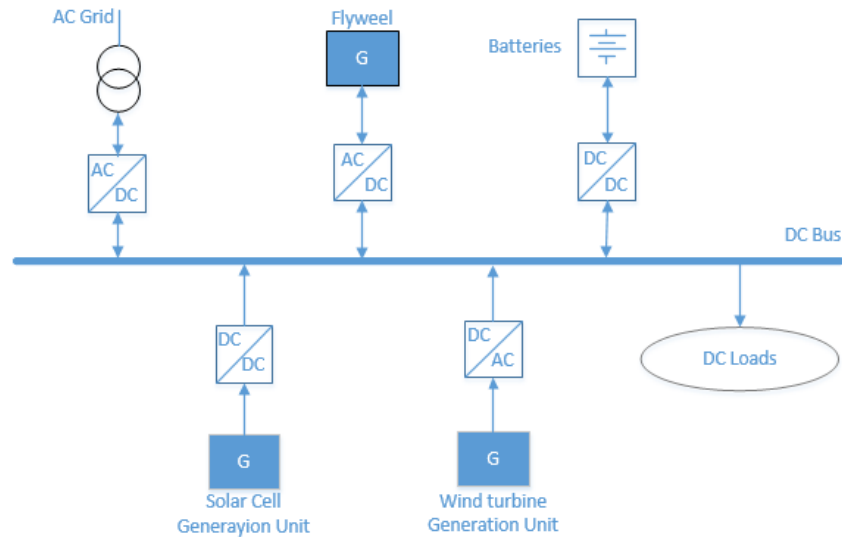
Fuente: MORENO, Andres F. NAVA, Eduardo Mojica. LVDC Microgrid Perspective For A High Efficiency Distribution System. National University of Colombia. IEEE. 2014

En la Figura 8 se muestra el esquema de la Micro-red DC implementada en la Universidad Nacional de Colombia, por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

---

<sup>14</sup> Ibíd.

**Figura 8. Representación del esquema de micro-red DC de la figura 7**



**1.3.1.3 Micro-red híbrida AC/DC implementada en la Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur** La Figura 9 muestra la configuración de un sistema híbrido, donde diversas fuentes y cargas de AC y DC están conectados a las redes de AC y DC correspondientes. Los enlaces de AC y DC están conectados entre sí a través de dos transformadores y dos convertidores trifásicos. El bus de AC de la red híbrida está unido a la red de suministro eléctrico.

Las tensiones nominales de las barras DC y AC son 400 [V] y 400 [Vrms] respectivamente. Un convertidor principal trifásico bidireccional DC/AC con filtro RLC conecta el bus de corriente continua al bus de corriente alterna a través de un transformador de aislamiento<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> LIU, Xiong. WANG, Peng. LOH, Poh Chiang. Op. Cit.

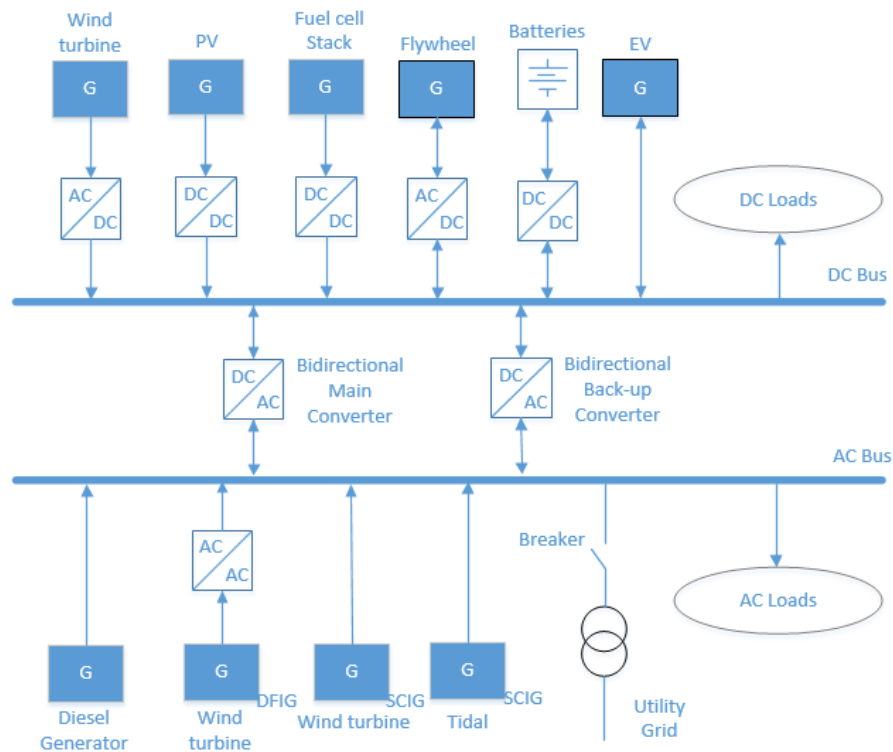
**Figura 9. Micro-red híbrida AC/DC. Estudio realizado en la Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur**



Fuente: LIU, Xiong. WANG, Peng. LOH, Poh Chiang. A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 2, NO. 2, June 2011

En la Figura 10 se muestra el esquema de la Micro-red híbrida AC/DC implementada en la Universidad Tecnológica de Nanyang, por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

**Figura 10. Representación del esquema de micro-red híbrida AC/DC de la figura 9**



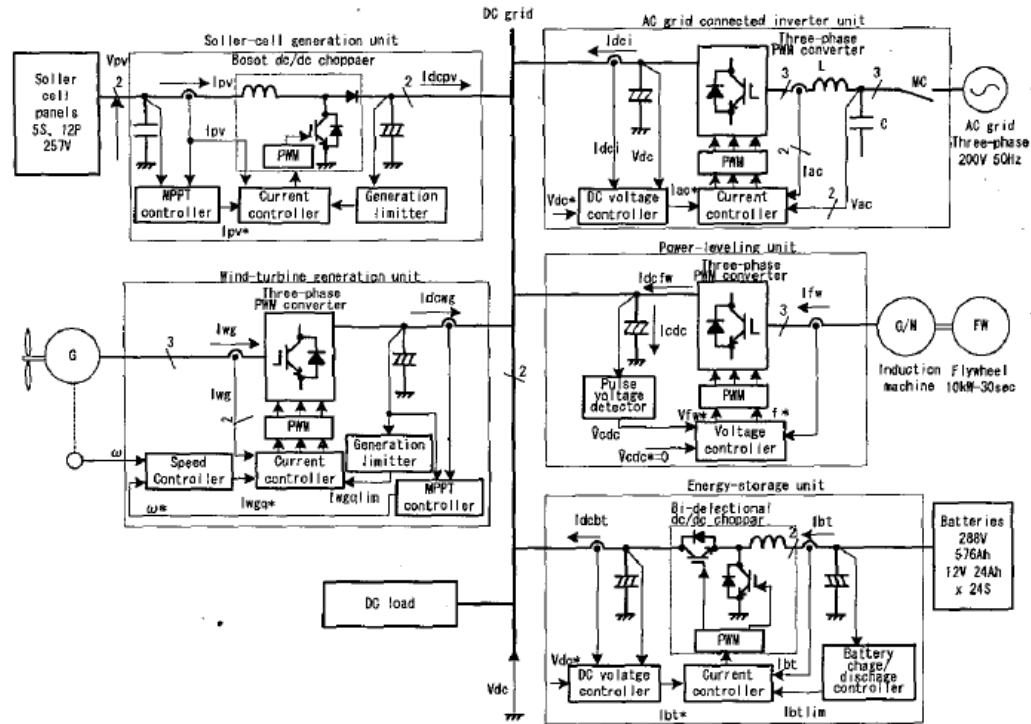
**1.3.1.4 Micro-red DC implementada en el Instituto de Tecnología de Tokyo, Japón**

La Figura 11 muestra la configuración de una micro-red DC de 10kW. El sistema consta de cinco unidades; la unidad de generación de celdas solares, la unidad de generación de turbinas eólicas, la unidad de control de almacenamiento de energía de la batería, la unidad de energía de nivelación de volante de inercia y la unidad de inversor de potencia conectada a la red AC.

La potencia generada por la celda solar y la turbina eólica alimenta la carga de corriente continua a través de la red DC. Un excedente de energía carga la batería. El inversor envía el excedente de energía hacia la red AC cuando la batería está con carga completa. Cuando la cantidad de la generación de energía es insuficiente, la batería descarga la energía a la red DC. El inversor toma la energía del sistema de red AC cuando la batería se queda sin potencia. El volante

suaviza los cambios en la generación de energía. Los cambios son causados por cambios en el sol y/o condiciones de viento<sup>16</sup>.

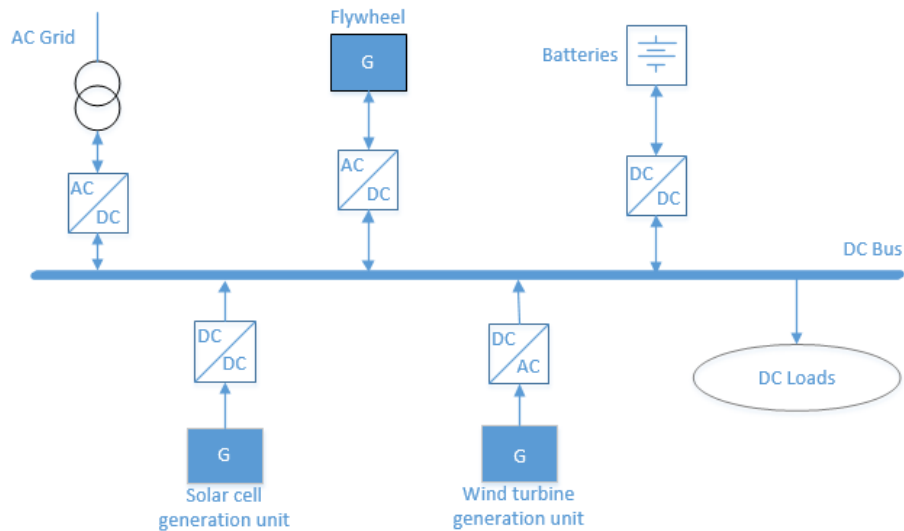
**Figura 11. Micro-red DC. Estudio realizado en el Instituto de Tecnología de Tokyo, Japón [14]**



En la Figura 12 se muestra el esquema de la Micro-red DC implementada en el Instituto de Tecnología de Tokyo, por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

<sup>16</sup> ITO, Youichi. ZHONGQING, Yang. AKAGI, Hirofumi. DC Micro-grid Based Distribution Power Generation System

**Figura 12. Representación del esquema de micro-red DC de la figura 11**

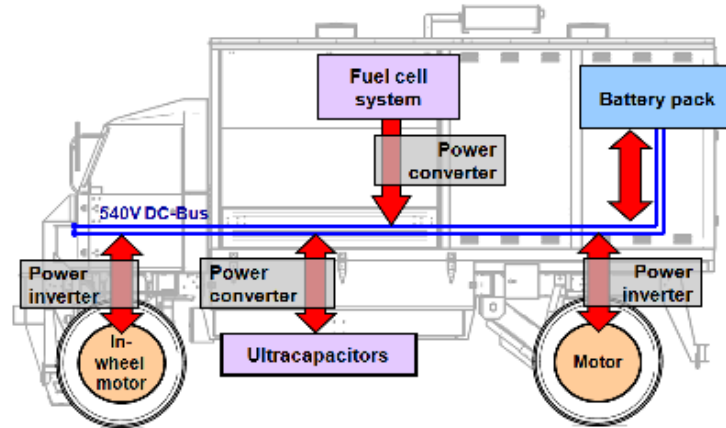


**1.3.1.5 Micro-red DC implementada por la DGA (ejército francés) y el laboratorio FEMTO-ST, Francia** Generalmente el concepto de micro-redes es asociado con redes estáticas para el sector residencial o industrial. Sin embargo los vehículos híbridos eléctricos representan también un tipo de micro-red. La Figura 13 ilustra el laboratorio de vehículos híbridos eléctricos ECCE desarrollado por el ejército francés y el laboratorio FEMTO-ST<sup>17</sup>.

La micro-red DC está conformada por los siguientes elementos: Baterías, un sistema de celdas de combustible (hidrógeno) y un sistema de supercondensadores. Todos los sistemas son conectados a un barraje DC, las baterías se conectan directamente, los sistemas de celda de combustible y supercondensadores por medio de convertidores DC/DC. Las cargas representadas por las máquinas eléctricas son conectadas mediante convertidores DC/AC bidireccionales, para permitir la implementación de un sistema de frenado regenerativo.

<sup>17</sup> SOLANO, J. MULOT, J. HAREL, F. HISSEL, D. PÉRA, M. C. JOHN, R. I. AMIET, M. Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013

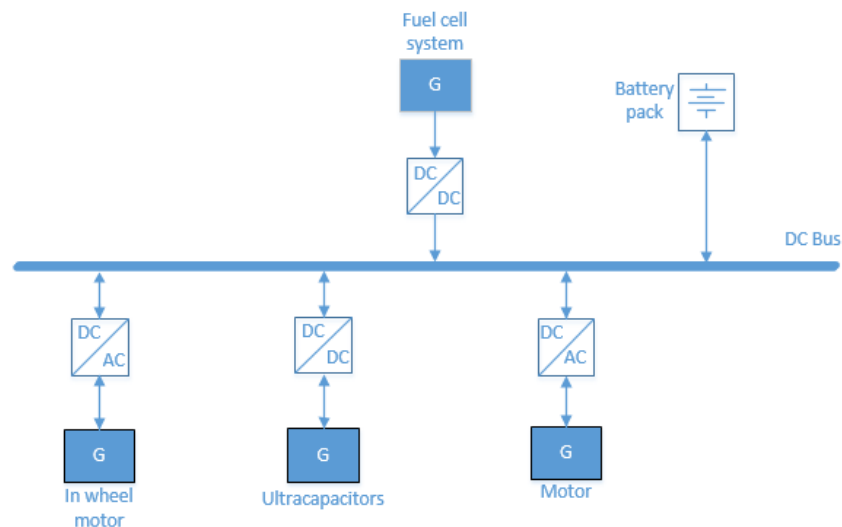
**Figura 13. Esquema de una micro red en un vehículo híbrido eléctrico**



Fuente: SOLANO, J. MULOT, J. HAREL, F. HISSEL, D. PÉRA, M. C. JOHN, R. I. AMIET, M. Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013

En la Figura 14 se muestra el esquema de la Micro-red DC implementada por la DGA (ejército francés) y el laboratorio FEMTO-ST, por medio de la representación basada en la arquitectura básica mostrada en la Figura 4.

**Figura 14. Representación del esquema de micro-red DC (EV) de la figura 13**

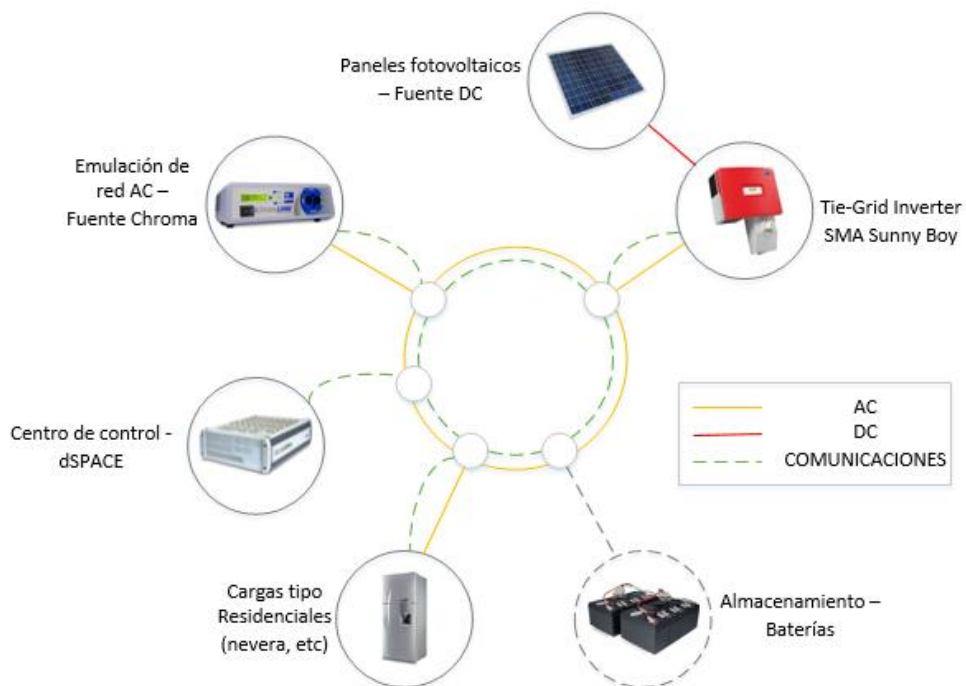


### 1.3.2 Proyecto de micro-red del Parque Tecnológico de Guatiguará

Actualmente en la universidad se cuenta con una serie de elementos con los cuales se podría montar una micro-red. Estos elementos están compuestos por paneles fotovoltaicos, un inversor de potencia SMA Sunny Boy, una fuente Chroma, un laboratorio de control programable dSPACE MicroLabBox, y cargas tipo residenciales de corriente alterna.

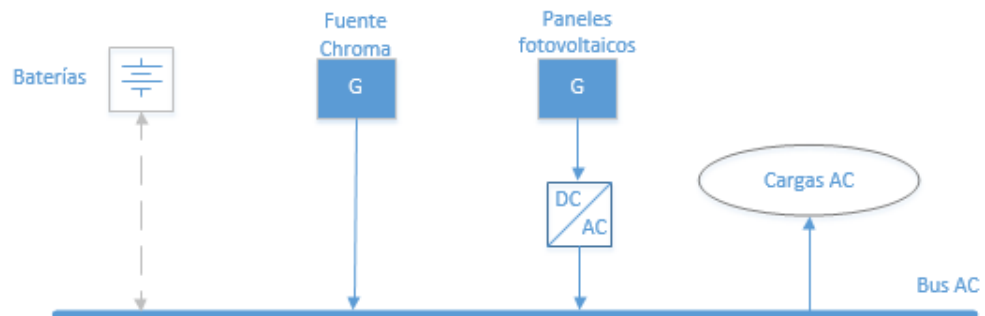
Se busca que próximamente se cuente con un sistema de almacenamiento de energía eléctrica compuesto por baterías. En la Figura 15 se muestra un esquema de lo señalado.

**Figura 15. Esquema de elementos existentes en la universidad para formar micro-red**



En la Figura 16 se representa por medio de la arquitectura básica de una micro-red mostrada en la Figura 4, el esquema de la micro-red que podría ser implementada con los elementos existentes en la universidad.

**Figura 16. Representación del esquema de elementos existentes en la universidad para formar micro-red**



Se espera que a futuro esta micro-red cuente con más elementos en su sistema de generación, principalmente con fuentes de generación de energías renovables, para el aprovechamiento energético de los recursos disponibles en la zona, con el fin de tener mayor capacidad de carga y poder avanzar en el desarrollo de este tipo de tecnologías.

## **2. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

Para diseñar un laboratorio de micro-redes se debe tener presente, al igual que en todo laboratorio de cualquier tipo, se necesitan equipos y/o instrumentos ya sean de medida, análisis o control, lo cual conforma el eje principal de dicho laboratorio. En este caso se busca que el laboratorio de micro-redes para el parque tecnológico de Guatiguará, cuente con un sistema de control que permita el estudio de todas las etapas que componen una micro-red, así como su control e investigación de posibles mejoras.




### **2.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

Teniendo en cuenta equipos ya utilizados en la universidad, rama de productos existentes en la escuela para aplicaciones afines a la de este proyecto, los cuales destacan por tener buenas características y ser de buena calidad, se decidió consultar catálogos de los mismos fabricantes.

Revisando los catálogos proporcionados por los fabricantes, se realizó la comparación de los productos dedicados al control de sistemas eléctricos, entre otras muchas más aplicaciones. Se identificaron los productos más destacados y se realizó una tabla comparativa para determinar cuál de ellos tenía la mejor relación en cuanto a características y precio.

En la Tabla 1 se detallan las principales características de los equipos identificados:

**Tabla 1. Diferencias principales entre equipos de control**

<b>Característica</b>	<b>DS1005 PPC Board</b> 	<b>MicroLabBox</b> 	<b>OP4500</b> 
Procesador	PowerPC 750GX running at 1 GHz	Freescale QorIQ P5020, dual-core procesador at 2 GHz	4-core Intel® processors at 2.3 GHz or over
FPGA	--	Xilinx® Kintex®-7 XC7K325T 50,950 slices - 840 DSP slices	KINTEX 7 XILINX FPGA with 225,000 slices and 840 DSP multipliers
Memoria tarjeta base	128 MB SDRAM	1 GB DRAM	1 GB DRAM
Sistema E/S. Número de canales	--	Más de 100 canales E/S de alto rendimiento con bloques análogos y digitales, con fácil acceso a través del panel conector integrado	96 canales con módulos de E/S análogos y digitales
Conexión con el computador	Correa, imposibilita el uso del laboratorio móvil	Cable Ethernet, posibilita su fácil traslado, permitiendo el uso del lab. móvil	Cable Ethernet, posibilita su fácil traslado, permitiendo el uso del lab. móvil
Manejo y traslado	No portátil	Compacto y portátil	Compacto y portátil
Número de puertos USB	1	2	1
Precio	14.294,00 €	11.130 €	18.980 USD (16.697 €)

Debido a las ventajas frente a los demás equipos, se llegó a la conclusión de sugerir la adquisición del sistema de desarrollo todo en uno, de tamaño compacto, de alto rendimiento y gran versatilidad para entorno de laboratorio, MicroLabBox.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La MicroLabBox es un sistema de “generación rápida de prototipos de control” (RCP) para el entorno de laboratorio. Se puede utilizar en la investigación, en el desarrollo de aplicaciones de mecatrónica y para el desarrollo de controladores en diferentes campos de la ingeniería, gracias a las interfaces de entrada/salida con las que cuenta, sus características técnicas y el software especializado que permite la fácil programación de algoritmos desde MATLAB/Simulink y su ejecución en tiempo real<sup>18</sup>. La Figura 17 muestra el módulo de control dSPACE MicroLabBox.

**Figura 17. Módulo dSPACE MicroLabBox**



Fuente: Manual dSPACE. MicroLabBox. Hardware Installation and Configuration. May 2015

**2.2.1 Características de hardware y software** La MicroLabBox cuenta con una tarjeta base DS1202 y una tarjeta interna de E/S DS1302 con un panel conector superior.

La conexión entre el PC y la MicroLabBox se realiza vía Ethernet por medio de un puerto denominado “Host PC” con el fin de descargar y supervisar las aplicaciones.

---

<sup>18</sup> Manual dSPACE. MicroLabBox. Hardware Installation and Configuration. May 2015

La Tabla 2 muestra las especificaciones de los parámetros de la MicroLabBox.

**Tabla 2. Especificaciones de los parámetros de la MicroLabBox**

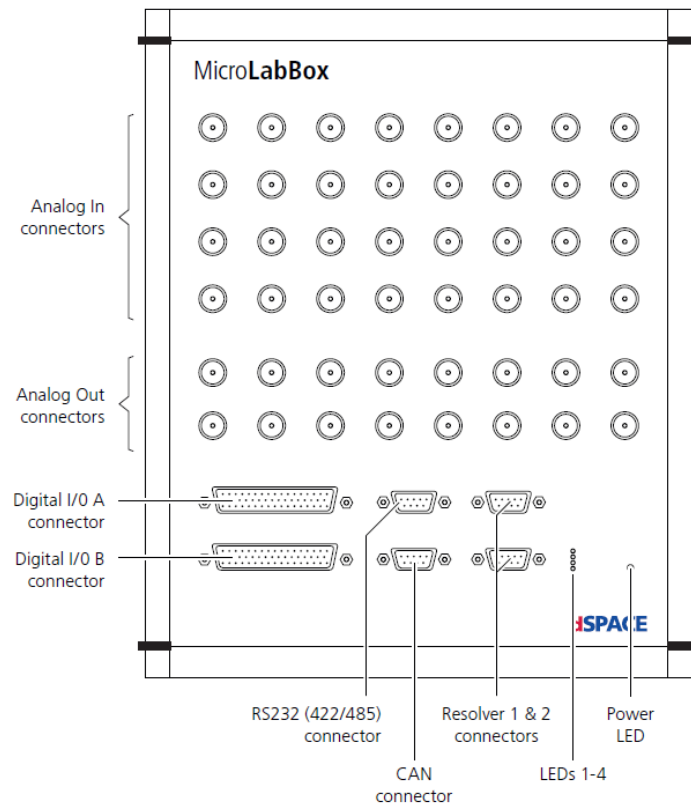
Parameter		Specification
Base Board (DS1202)	Real-time processor	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Freescale QorIQ P5020 64-bit dual-core processor with 2 GHz CPU clock</li> <li>■ 32 KB L1 data cache per core</li> <li>■ 32 KB L1 instruction cache per core</li> <li>■ 512 KB L2 cache per core</li> <li>■ 2 MB L3 cache</li> </ul>
	Memory	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 GB DRAM</li> <li>■ 96 MB flash for firmware</li> <li>■ 32 MB flash for user applications</li> </ul>
	Host communication coprocessor	Freescale QorIQ P1011
	Timer	Three general-purpose timers for each core
	Interrupt controller	One interrupt controller for each core for handling real-time events
I/O Board (DS1302)	FPGA	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Xilinx® Kintex®-7 XC7K325T</li> <li>■ 326,080 logic cells</li> <li>■ 50,950 slices</li> <li>■ 4,000 kbit distributed RAM (max.)</li> <li>■ 840 DSP slices</li> <li>■ 16,020 kbit block RAM</li> <li>■ 10 Clock Management Tiles</li> </ul>
	Memory	36 Mbit ZBT SRAM (not user programmable)
Communication interfaces	CAN	2 x high-speed ISO 11898 CAN interfaces
	Ethernet	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3 x Ethernet ports that are connected to a configurable Ethernet switch.</li> <li>■ High-speed Gigabit Ethernet for communication with the host PC.</li> <li>■ Low-latency Gigabit Ethernet for communication with external devices.</li> </ul>
	Serial	2 x serial interfaces <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Each serial interface can be configured to RS232, RS422, or RS485.</li> </ul>
	USB	1 x USB interface for USB flight recording (USB Port A)
Analog and digital I/O		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 24 analog Class 1 inputs</li> <li>■ 8 analog Class 2 inputs</li> <li>■ 16 analog Class 1 outputs</li> <li>■ 48 digital Class 1 bidirectional channels</li> <li>■ 12 digital Class 2 bidirectional channels</li> </ul>

Parameter		Specification
Environment		For indoor use only
Altitude		Up to 3000 m
Degree of protection		IP20, according to EN 60529
Relative humidity		5 ... 80 % (noncondensing)
Pollution degree		2, according to IEC 664 (normal clean and dry environment)
Mains connection		100 V ... 240 V AC, 50/60 Hz, max. 125 W
Protection class		1
Maximum I/O voltage levels		All voltages must not exceed the absolute maximum levels against protective ground, refer to <i>Absolute Maximum Levels</i> on page 17.
Chassis dimensions	Case depth	310 mm (12.2 in)
	Case width	250 mm (9.8 in)
	Case height	115 mm (4.5 in)
Weight		4.5 kg

Fuente: Manual dSPACE. MicroLabBox Hardware. Data Sheets. May 2015

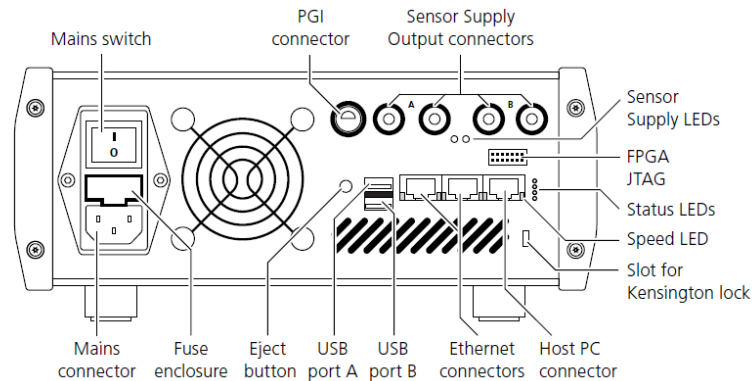
Las figuras 18 y 19 muestran las características de los paneles de la MicroLabBox.

**Figura 18. Conectores panel superior de la MicroLabBox**



Fuente: Manual dSPACE. MicroLabBox Hardware. Data Sheets. May 2015

**Figura 19. Componentes panel trasero de la MicroLabBox**



Fuente: Manual dSPACE. MicroLabBox Hardware. Data Sheets. May 2015

Por defecto, la MicroLabBox está configurada de la siguiente manera:

- Dirección IP: 192.168.140.7
- Máscara de red: 255.255.255.0
- Modo IP: Estática

La dirección MAC es: 64:4D:70:00:2E:EC

Para realizar una aplicación en Matlab/Simulink y ejecutarla en el dSPACE, se hace necesaria su conexión con el computador, de la misma manera si se desea hacer control en tiempo real con la aplicación Control Desk (software de dSPACE, similar a Lab View de National Instruments). A continuación se describen los pasos a seguir para configurar y establecer dicha conexión.

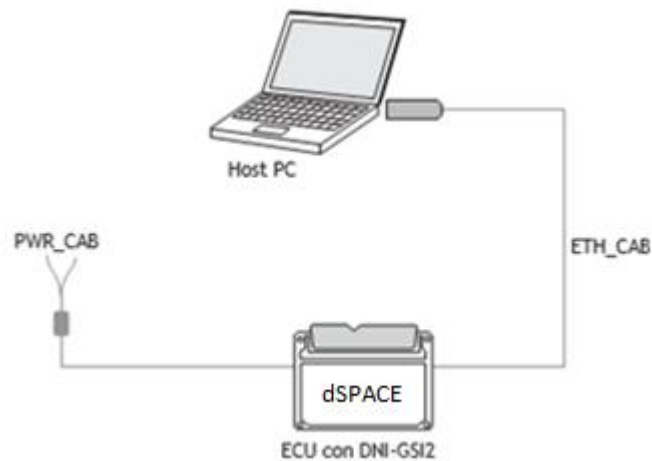
**2.2.2 Conexión de la dSPACE MicroLabBox** La conexión para la comunicación entre la MicroLabBox y un computador para efectos de su programación, se realiza directamente a través de una interfaz Ethernet.

Restricciones: Se debe utilizar únicamente los cables suministrados por dSPACE para conectar las Interfaces. Los cables dSPACE tienen un rango de temperatura más amplio, mayor resistencia mecánica y conectores de auto-retención robustos.

Si se utilizan otros cables o se extienden los mismos, las interfaces podrían no funcionar.

Para realizar la conexión se requiere el cable de conexión Ethernet y el cable de suministro de energía. La Figura 20 muestra la configuración resultante.

**Figura 20. Conexión entre el pc y la MicroLabBox**



**2.2.2.1 Configuración de la conexión** La conexión con el PC se basa en la red Ethernet TCP/IP. Para realizar la conexión es necesario configurar el protocolo TCP/IP del adaptador de red en el PC.

El método para configurar el protocolo TCP/IP (windows) es el siguiente:

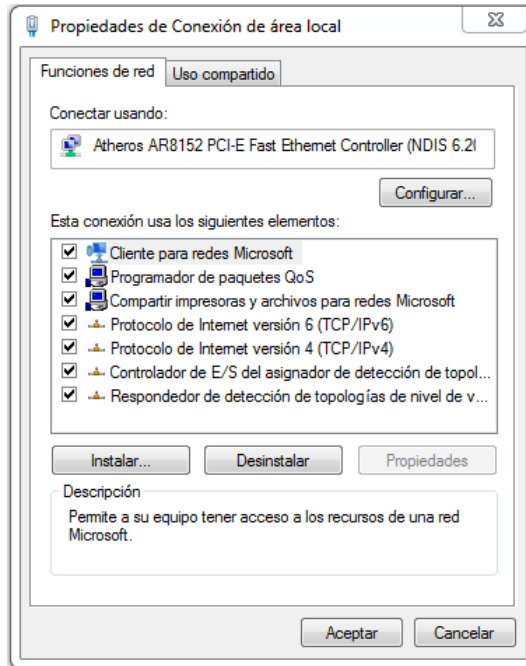
- Abrir “Centro de redes y recursos compartidos”

Menú-Panel de control-Redes e Internet- Centro de redes y recursos compartidos.

- Clic en “Cambiar configuración del adaptador”
- Doble clic en “Conexión de área local”

Se abre el cuadro de diálogo de “Propiedades de conexión de área local”, mostrado en la Figura 21.

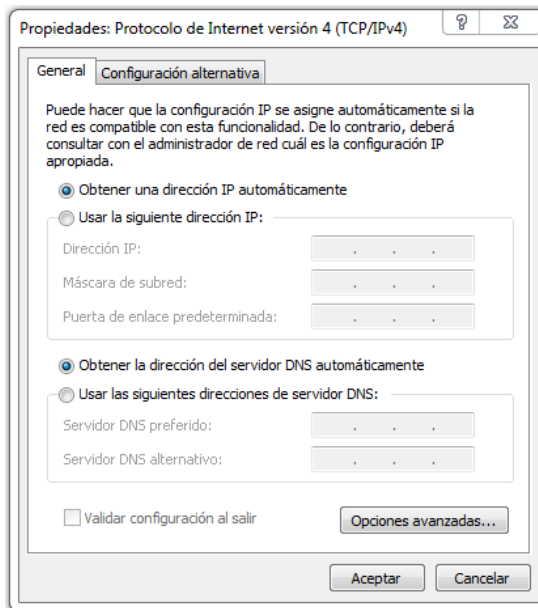
**Figura 21. Cuadro de diálogos “Propiedades de conexión de área local”**



- Clic en “Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)” y “Propiedades”

Se abre el cuadro de diálogos “Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)”, mostrado en la Figura 22.

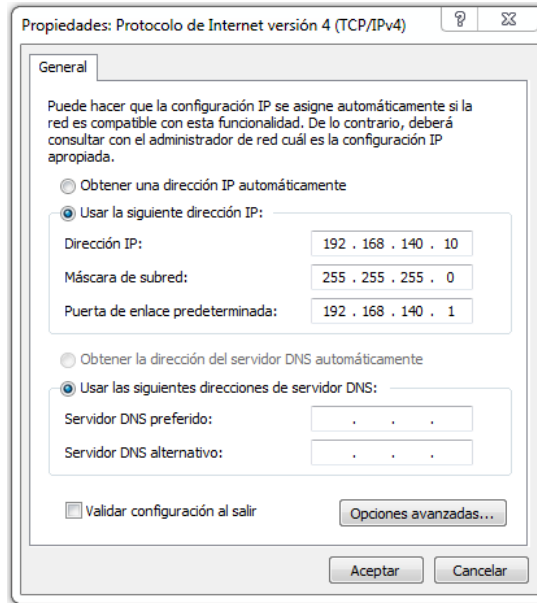
**Figura 22. Cuadro de diálogos “Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)”**



- Clic en “Usar la siguiente dirección IP” y llenar los siguientes campos
  - Dirección IP: 192.168.140.X (‘X’ puede ser cualquier número entre 3 y 254 exceptuando el 7)
  - Máscara de subred: 255.255.255.0
  - Puerta de enlace predeterminada: 192.168.140.1

En la Figura 23 se puede observar el resultado de esta configuración.

**Figura 23. Propiedades del cuadro de diálogos**



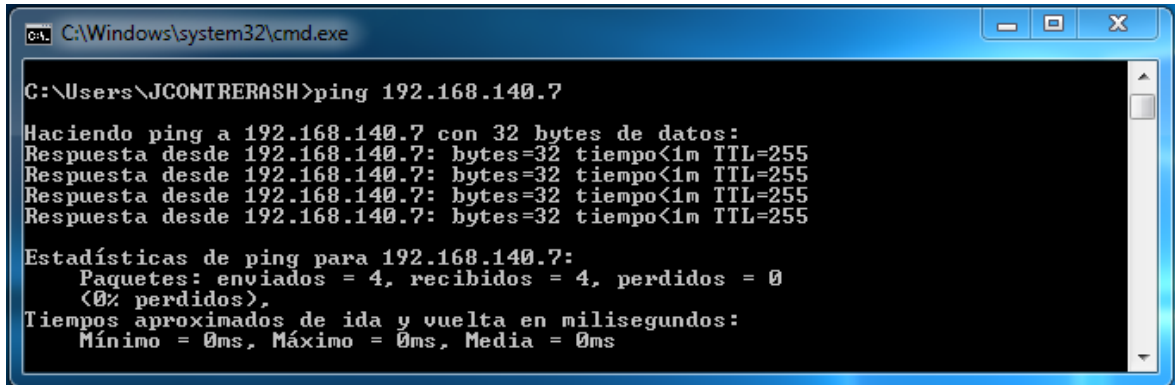
- Clic en “Aceptar” en el cuadro de diálogos de “Propiedades: Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)”
- Clic en “Cerrar” en el cuadro de diálogo de “Propiedades de conexión de área local”

**2.2.2.2 Comprobación de la conexión** Es necesario comprobar si el sistema funciona correctamente. Para comprobar la conexión Ethernet se debe:

- Abrir una ventana del símbolo del sistema  
Menú-Accesorios-Símbolo del sistema
- Introducir el siguiente comando  
ping 192.168.140.7

Para comprobar que la conexión está completa debe detallar lo mostrado en la Figura 24.

**Figura 24. Comprobación de la conexión**



```
C:\Windows\system32\cmd.exe

C:\Users\JCONTRERASH>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<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
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 = 0ms, Media = 0ms
```

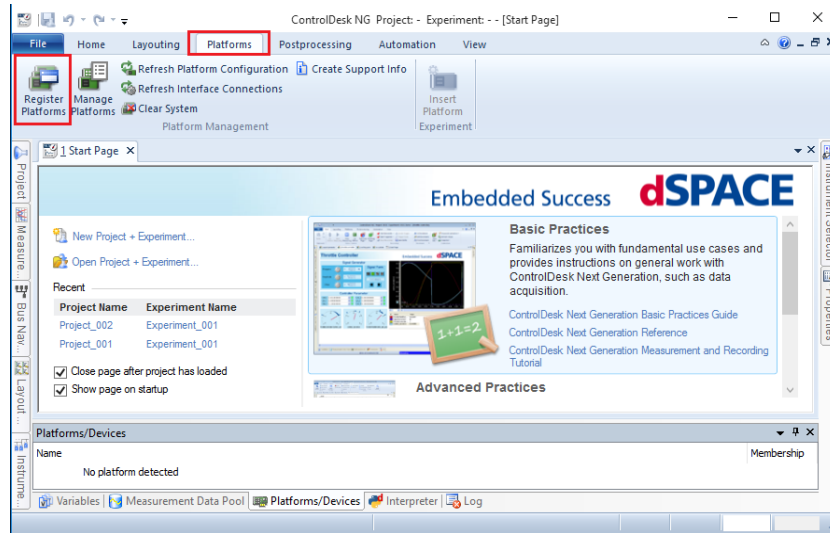
Con la interfaz web de la MicroLabBox se puede configurar el sistema y gestionar las aplicaciones descargadas.

Para acceder a la interfaz web, se escribe la dirección IP de la MicroLabBox en la barra de direcciones del navegador del PC. La dirección IP predeterminada es 192.168.140.7

**2.2.3 Registro de la plataforma dSPACE MicroLabBox** El desarrollo de aplicaciones para la MicroLabBox, hace necesario su registro en el software ControlDesk suministrado por dSPACE. A continuación se detalla de manera ilustrativa el registro.

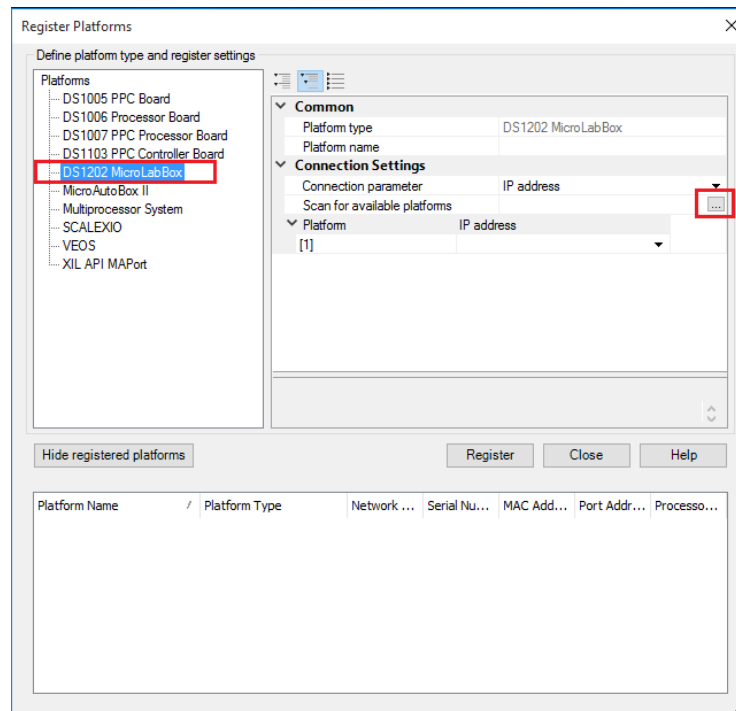
- En primera instancia, se abre el programa ControlDesk. En la pestaña <Platforms> se selecciona el ícono <Register Platforms> (ver Figura 25).

Figura 25. Ventana principal de ControlDesk



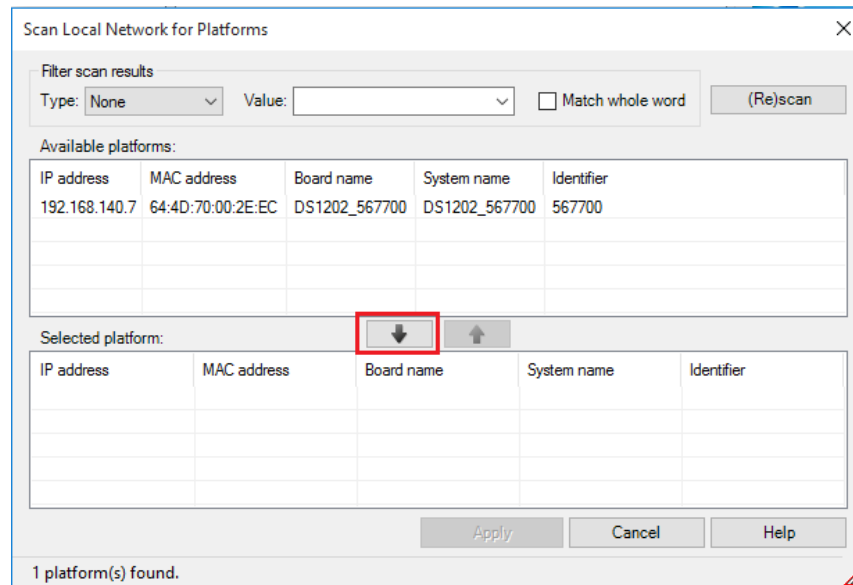
- A continuación se abre el cuadro de registro. Se selecciona la referencia de la tarjeta dSPACE (en este caso la DS1202 MicroLabBox) y se da clic en el recuadro de <Scan for available platforms> (ver Figura 26).

Figura 26. Cuadro de registro del dSPACE



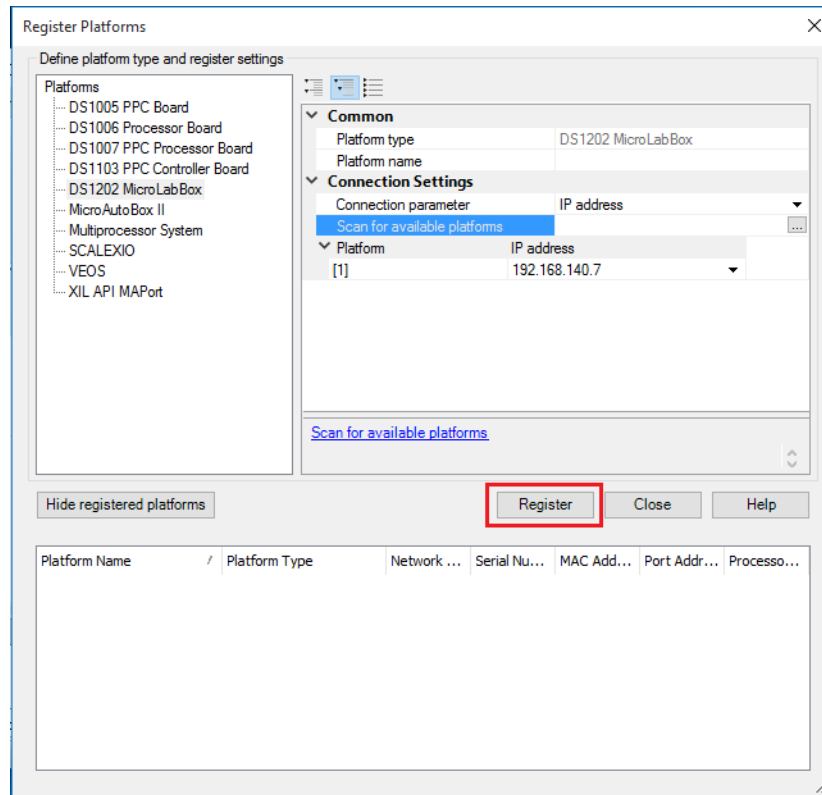
- A continuación, se selecciona la plataforma disponible en el recuadro <Available platforms> y se da clic en la flecha en dirección del recuadro <Select platform>, una vez seleccionada la plataforma se da clic en <Apply> (ver Figura 27).

**Figura 27. Recuadro para seleccionar plataforma dSPACE**



- Por último, una vez identificada la plataforma, se procede a registrar, dando clic en el recuadro <Register> (ver Figura 28).

**Figura 28. Recuadro de registro de la plataforma**



Para efectos de comprobación del registro de la plataforma, se pueden observar las plataformas registradas en el recuadro <Manage Platforms> de la pestaña <Platforms>.

Cabe mencionar que para poder hacer el registro, se debe tener la licencia del producto, esta consiste en una llave tipo USB proporcionada junto con la MicroLabBox.

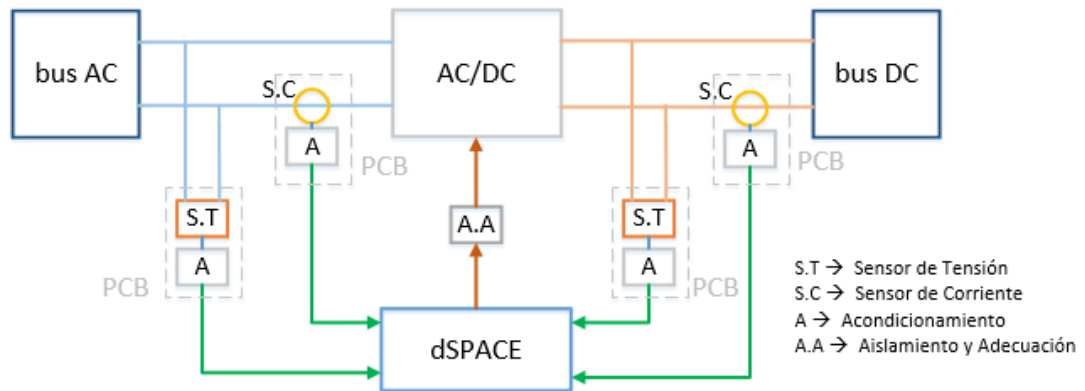
### **3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ELÉCTRICAS DE UNA MICRO-RED**

En esta sección se selecciona la instrumentación necesaria para la adquisición de señales eléctricas de una micro-red que serán centralizadas en un módulo de control dSPACE.

Esta etapa de adquisición de señales (sensado) está compuesta por sensores y un circuito de acondicionamiento. Los sensores son de tensión o corriente dependiendo la variable a registrar. Se espera que con esta selección se construyan dichas etapas en PCBs, permitiendo ser conectadas al módulo de control por medio de cables BNC-BNC, contribuyendo así con el hecho de poder adquirir señales en cualquier sistema ya instalado permitiendo el uso de un laboratorio móvil.

En la Figura 29 se observan las etapas de sensado tanto de tensión como de corriente, las cuales interconectan las señales de la micro-red con el módulo de control.

**Figura 29. Conexión de las etapas de sensado y acondicionamiento con el módulo de control**



### 3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

Para la seguridad, control y calidad del servicio de la energía eléctrica en una micro-red, se deben adquirir muestras en tiempo real de las diferentes variables presentes en el sistema, para generar datos que puedan ser procesados y visualizados a través de un ordenador u otro tipo de hardware de lectura de información, y así detallar el comportamiento y estabilidad de la red eléctrica. A este proceso de manejo de señales se le denomina adquisición de datos (Data Acquisition, DAQ).

Un sistema DAQ como se puede ver en la Figura 30, se compone básicamente de sensores (que reciben y transforman una variable física para que sea tangible), hardware de procesamiento de señales o un controlador lógico programable (PLC) y un sistema que permita la visualización de señales (p.e computadores u osciloscopios).

**Figura 30. Componentes de un sistema de adquisición de datos**



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Partes de un sistema DAQ [en línea]. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/> [citado el 17 de Septiembre de 2015]

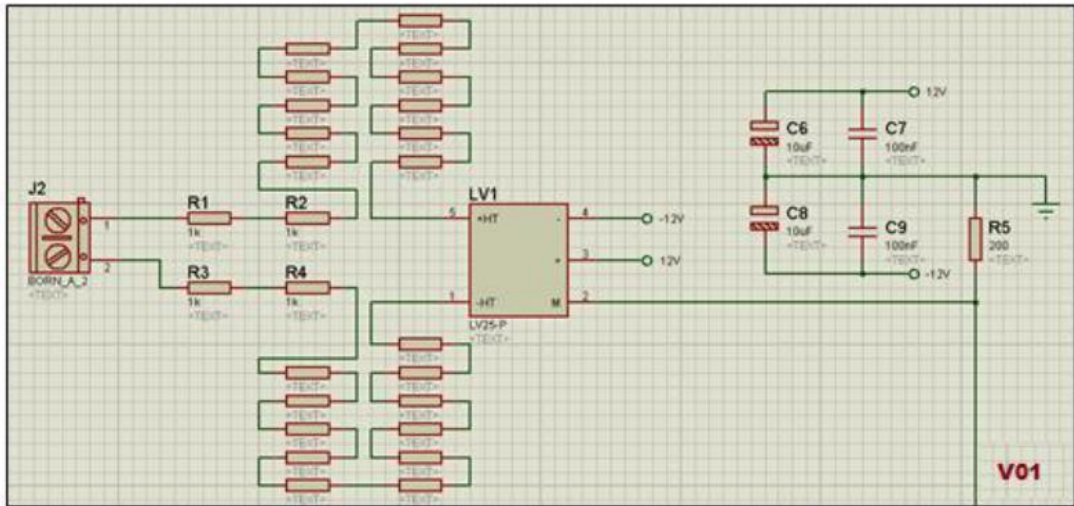
En esta sección se hará énfasis en la definición, tipos, aspectos técnicos y selección de los sensores con la etapa de acondicionamiento respectiva que permita la conexión con el sistema de control, con el objetivo de poder adquirir de señales de tensión y corriente de una micro-red.

### 3.2 ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO

La etapa de acondicionamiento de la señal, es la encargada de ajustar las señales de tensión y corriente de salida de los captadores a la entrada del dSPACE. Principalmente se busca adaptar el rango de valores de los sensores de tensión con la entrada de la MicroLabBox ( $\pm 10$  [V]). Esto se logra por medio de resistencias de precisión en la entrada y salida del sensor, con el fin de ir creando divisores de tensión equivalente a los rangos del módulo de control con relación a los valores nominales del transductor a seleccionar.

En la Figura 31 se detalla el módulo de sensado y acondicionamiento para un sensor de tensión.

**Figura 31. Circuito de adquisición de señal para un sensor de tensión**

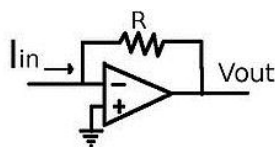


Fuente: MENESES AGRESOTH, Víctor Elías. ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando. Sistemas de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. 94 p

De la misma forma que con el sensor de tensión, se necesita hacer un circuito de acondicionamiento para la señal de salida del transductor de corriente. El módulo de control fija los límites que deben tener las señales y estos son los mismos que en el caso del transductor de tensión, por esta razón se aplica el mismo circuito de acondicionamiento.

Debido a que el módulo de control solo recibe señales de tensión, el circuito de acondicionamiento para los sensores de corriente, debe convertir la salida de intensidad del sensor a valores de tensión que esten en los rangos de entrada del dSPACE. Esta adaptación se hace por medio de amplificadores operacionales de tipo inversor de corriente a tensión como el mostrado en la Figura 32.

**Figura 32. Circuito conversor de corriente a tensión**



Para esta etapa de acondicionamiento de la etapa de sensado se tomó como referencia el modelo propuesto en un proyecto de grado realizado en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, titulado “sistemas de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON”<sup>19</sup>, dirigido por la profesora María Alejandra Mantilla Villalobos. La utilización de este diseño se basa en que la finalidad de dicho circuito es simplemente adecuar las señales captadas por los sensores a los valores admisibles en el sistema de control.

### **3.3 SENSORES**

Un sensor o captador, es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que recibe y transforma magnitudes físicas como temperatura, velocidad, magnetismo, presión, etc., en señales eléctricas (transducción). Los sensores pueden ser de tipo activo (generan señales representativas de las magnitudes a medir de forma autónoma, sin requerir una fuente de alimentación) o pasivo (generan señales representativas de las magnitudes a medir por intermedio de una fuente auxiliar).

**3.3.1 Tipos de sensores** Los sensores se pueden clasificar según el tipo de variable física a medir (Eléctricos, Mecánicos, Térmicos, Acústicos, Ultrasónicos, Químicos, entre otros). Como se mencionó anteriormente, solo se identificarán los tipos de sensores más comunes implementados para la adquisición y medición de señales de tensión y corriente en una micro-red.

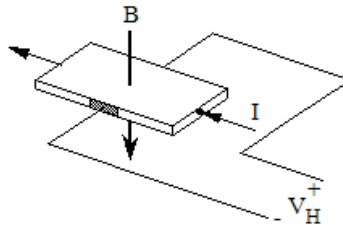
**3.3.1.1 Sensores Magnéticos (efecto Hall)** El principio de funcionamiento de este sensor se basa en el fenómeno físico denominado efecto Hall (ver Figura 33). Cuando fluye una intensidad en el sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que es perpendicular al mismo, este genera una señal de tensión en

---

<sup>19</sup> Ibíd.

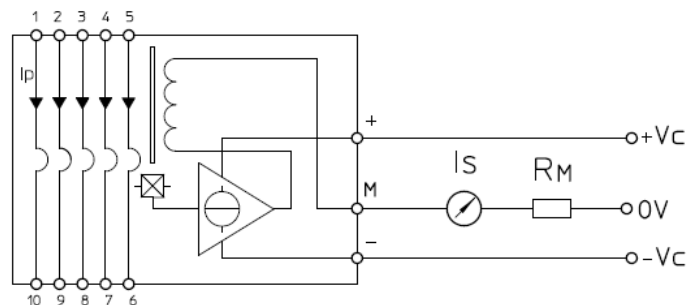
salida en el captador, proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Este sensor se emplea para cuantificar magnitudes de campos magnéticos y corrientes eléctricas (tanto en AC como en DC) en un conductor sin potencial.

**Figura 33. Principio del efecto hall**



En la Figura 34 se aprecia el diagrama de circuito de un sensor de efecto Hall, donde se observa que el proceso de transducción se hace a través de un transformador que altera los niveles de corriente en la entrada del sensor, para que en la salida se obtenga una señal que pueda ser medible. Adicionalmente se agrega una resistencia de medida para que el sensor trabaje con sus rangos nominales.

**Figura 34. Esquema de circuito de un sensor Hall de corriente**

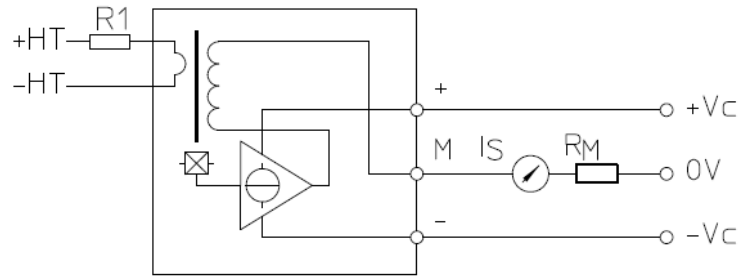


Fuente: LEM. Datasheet Current Transducer LA 25-NP [en línea]. <http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf> [citado el 17 de Septiembre de 2015]

A partir del esquema de la Figura 34, para realizar medición de tensión se conecta en la salida del sensor una configuración de resistencias de precisión (equivalente

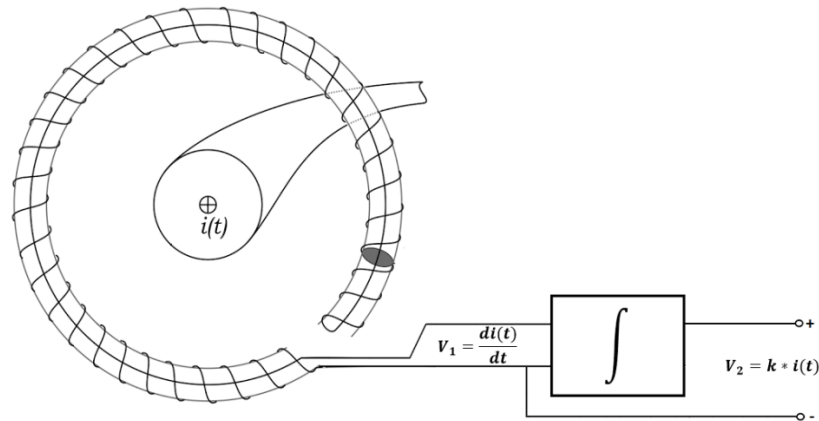
de Thévenin), creando un divisor de tensión proporcional a la tensión a medir. Esta adecuación del sensor Hall se detalla en la Figura 35.

**Figura 35. Esquema de circuito de un sensor Hall de tensión**



**3.3.1.2 Bobina de Rogowski** Este sensor es empleado para medición de corriente alterna y pulsos rápidos de corriente, basándose en el modelo de un bobinado toroidal con núcleo de aire (no ferromagnético) o dieléctrico, por el cual circula una corriente en un hilo conductor dentro del núcleo, registrando las variaciones del campo magnético en el enrollamiento. La señal de tensión de salida en el sensor es proporcional a la razón de la corriente respecto al tiempo, debido a esto dicha salida se conecta usualmente a un circuito integrador para obtener una salida equivalente a la corriente a medir. El modelo del sensor de Rogowski se puede apreciar en la Figura 36.

**Figura 36. Modelo de la bobina de Rogowski**



**3.3.2 Aspectos técnicos de selección de un sensor** Para la selección de un sensor, se deben tener en cuenta las especificaciones técnicas descritas en la Tabla 3.

**Tabla 3. Especificaciones técnicas de un sensor**

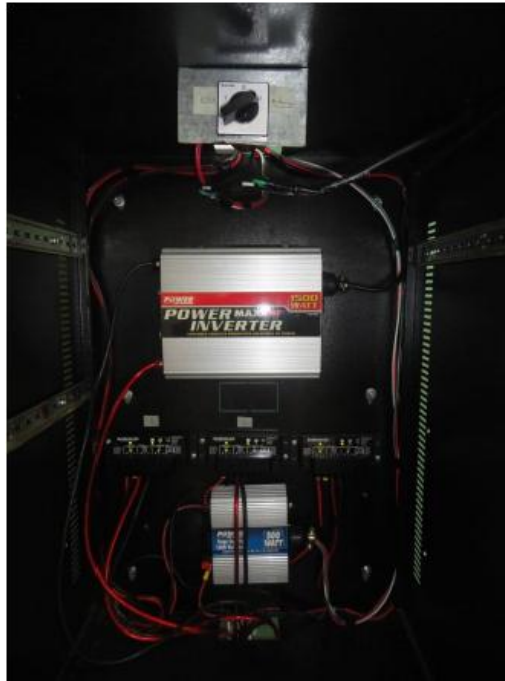
Parámetro	Definición
Rango de medida	Valores máximos y mínimos de las señales de entrada y salida del sensor.
Exactitud	Desviación de la medida del sensor respecto a la señal de entrada.
Repetición de la medida	Capacidad de reproducir una medida a cierta precisión.
Reproducibilidad	Mediciones distintas bajo condiciones diferentes.
Resolución	Magnitud más pequeña de una variable que se puede detectar.
Error	Diferencia entre valor teórico y valor experimental.
Linealidad	Desviación de la medida al valor real. La no linealidad se presenta en factores como saturación, histéresis y zona muerta.

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
Sensibilidad	Relación de cambio entre la señal de salida respecto a cambios en la señal de entrada (perturbaciones).
Excitación	Cantidad de intensidad y tensión requerida para el funcionamiento del sensor.
Estabilidad	La salida del sensor debe ser la misma en un rango en el cual la señal de entrada es constante.

### **3.4 SELECCIÓN DE SENSORES DISPONIBLES EN EL MERCADO**

En la Universidad Industrial de Santander (UIS) se encuentra en funcionamiento un sistema de generación de energía fotovoltaica, instalado en el laboratorio de control del edificio de Alta Tensión (LAT) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, desarrollado por el grupo de investigación CEMOS, que consiste en una serie de paneles los cuales alimentan el sistema de alumbrado de dicho laboratorio (ver Figura 37).

**Figura 37. Sistema FV implementado por el grupo de investigación CEMOS**

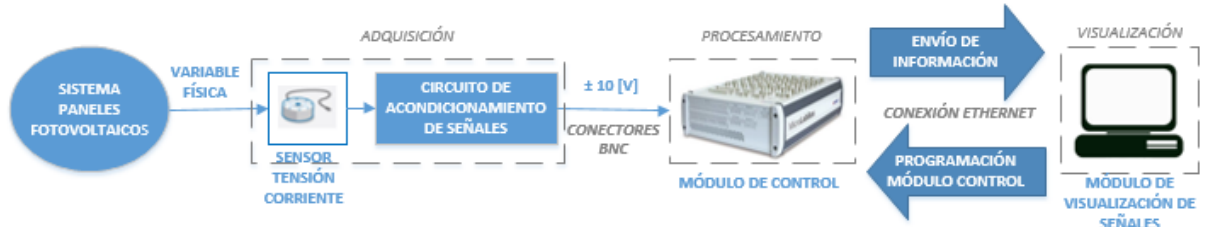


Fuente: SUÁRES LARGO, Johan Sebastián. RIBERO FIGUEROA, Xiomara. Introducción al control de fuentes alternativas de energía. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015. 66 p

Dicho sistema no cuenta con ningún tipo de instrumentación que permita la monitorización de los diferentes componentes que lo integran. Como una aplicación del presente trabajo, se seleccionarán sensores de corriente y tensión con una etapa de acondicionamiento para la adquisición de señales que puedan ser procesadas por medio de la MicroLabBox, permitiendo la visualización en tiempo real de las variables eléctricas del sistema fotovoltaico mencionado. No obstante los sensores que se seleccionen pueden ser implementados en otras redes eléctricas.

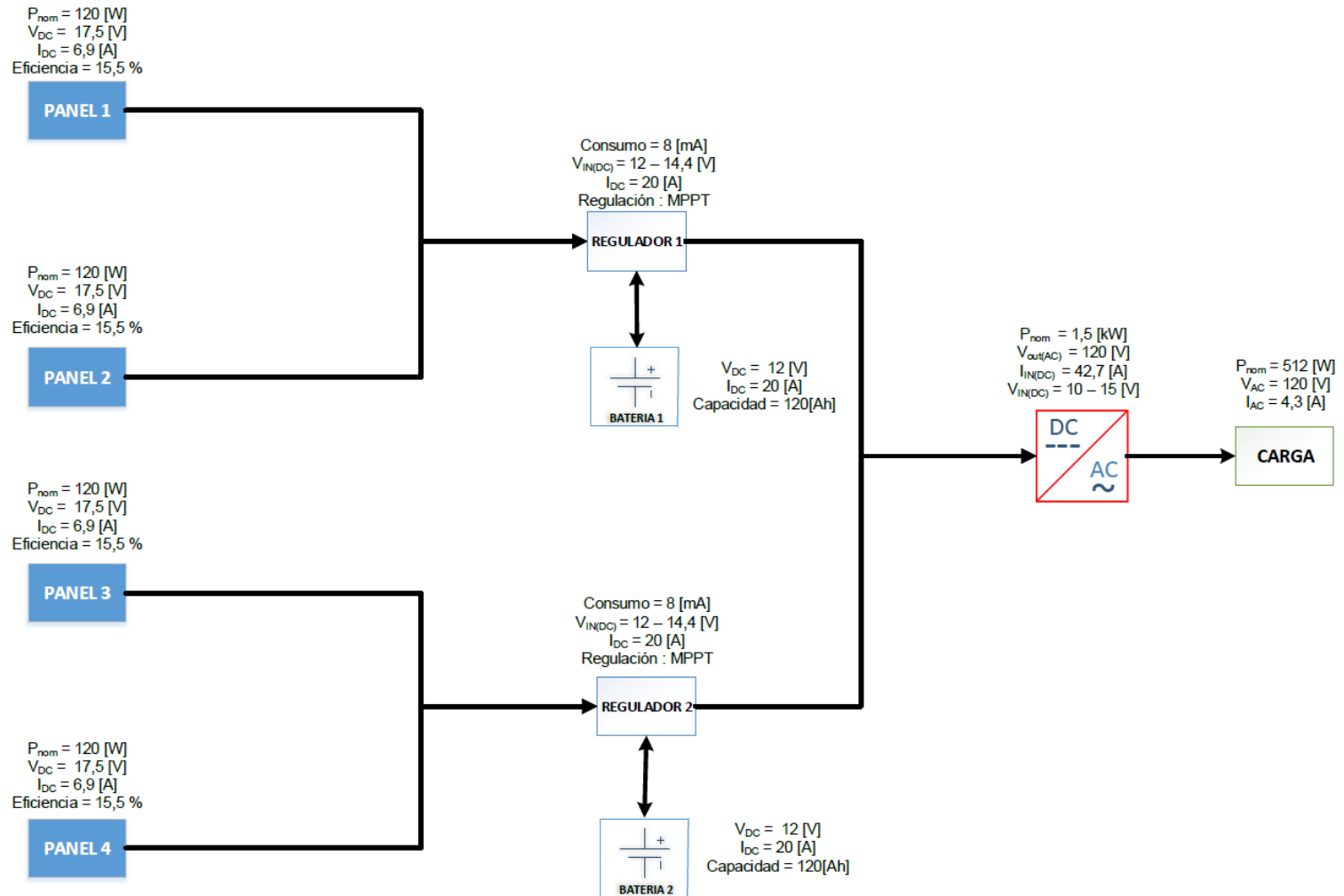
En la Figura 38 se muestra el modelo de adquisición, procesamiento y visualización de señales representativo del sistema de paneles fotovoltaicos.

**Figura 38. Diagrama de bloques representativo de la adquisición, procesamiento y visualización de señales del sistema de paneles fotovoltaicos**



En la Figura 39 se detallan los diferentes elementos que componen el sistema fotovoltaico con sus respectivos parámetros nominales.

**Figura 39. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico implementado por el grupo de investigación CEMOS**



Una vez identificados los parámetros nominales de este sistema, el módulo de sensado debe cubrir los rangos de las señales de tensión y corriente (AC y DC) que se necesiten medir, con relación a las tensiones soportadas por el dSPACE.

Otro factor importante a tener en cuenta, es que la etapa de sensado conste de un nivel de aislamiento de acuerdo a los niveles de tensión manejados en la red de paneles fotovoltaicos.

En la Tabla 4 se describen las características que deben tener los sensores a seleccionar.

**Tabla 4. Características de los sensores a implementar en el sistema de paneles fotovoltaicos**

<b>Sensor</b>	<b>Magnitud máxima esperada<sup>20</sup></b>	<b>Nivel máximo de sensado</b>	<b>Relación etapa de acondicionamiento</b>	<b>Nivel de aislamiento<sup>21</sup></b>
Sensor de corriente panel 1	6,9 [A]	± 10 [A]	10 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de corriente panel 2	6,9 [A]	± 10 [A]	10 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de corriente panel 3	6,9 [A]	± 10 [A]	10 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de corriente panel 4	6,9 [A]	± 10 [A]	10 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de tensión del regulador 1	17,5 [V]	± 60 [V]	60 : 10 [V/V]	600 [V]
Sensor de tensión del regulador 2	17,5 [V]	± 60 [V]	60 : 10 [V/V]	600 [V]

<sup>20</sup> Según el esquema del montaje detallado en la figura 39

<sup>21</sup> El nivel de aislamiento se asigna conforme a ANSI/ISA 82.02.01 (61010-1) 2004, CAN/CSA-C22.2 N° 61010-1-04 e IEC/EN 61010-1 2ª edición para categoría IV 600 V (CAT IV)

<b>Sensor</b>	<b>Magnitud máxima esperada<sup>20</sup></b>	<b>Nivel máximo de sensado</b>	<b>Relación etapa de acondicionamiento</b>	<b>Nivel de aislamiento<sup>21</sup></b>
Sensor de tensión de batería 1	12 [V]	± 60 [V]	60 : 10 [V/V]	600 [V]
Sensor de corriente batería 1	20 [A]	± 25 [A]	25 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de tensión de batería 2	12[V]	± 60 [V]	60 : 10 [V/V]	600 [V]
Sensor de corriente batería 2	20 [A]	± 25 [A]	60 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de tensión inversor	12 [V]	± 60 [V]	60 : 10 [V/V]	600 [V]
Sensor de corriente inversor	42,7 [A]	± 50 [A]	50 : 10 [A/V]	600 [V]
Sensor de tensión carga	120 [V]	± 150 [V]	150 : 10 [V/V]	600 [V]
Sensor de corriente carga	4,3 [A]	± 10 [A]	10 : 10 [A/V]	600 [V]

Respecto a los niveles máximos de sensado, se determinó asumir dichas magnitudes por las siguientes razones:



- Protección del módulo de procesamiento de señales, ya que no es recomendable que la relación E/S de los sensores esté en los márgenes nominales del sistema, dando posibilidad que en caso que se presente un aumento en la tensión en cualquiera de los elementos de la red de paneles fotovoltaico, se produzca una avería tanto en los sensores como en la MicroLabBox.
- A pesar que los sensores se seleccionan a raíz de los parámetros nominales del sistema de paneles fotovoltaicos, se proyecta que dicha instrumentación se


pueda implementar en otras redes eléctricas que manejen diferentes niveles de tensión.

**3.4.1 Selección de sensores de corriente** En el mercado se encuentra una variedad de sensores de corriente que podrían ser potenciales soluciones para la monitorización del sistema de paneles fotovoltaicos. Entre las diferentes tecnologías de sensores existentes, se optó por seleccionar sensores que trabajan a base del efecto Hall, ya que estos permiten lecturas de señales en DC y AC, a diferencia de los sensores de Rogowski que solo permite la lectura de señales en AC.

Se consultaron catálogos de diferentes proveedores y fabricantes de sensores y se cotizaron los más llamativos en cuanto a sus características. En la Tabla 5 se describen las especificaciones técnicas de dichos sensores.

**Tabla 5. Especificaciones técnicas sensores de corriente**

Sensor	Especificaciones	Características según fabricante
<p>LA50 – S/SP1 (LEM)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>*I<sub>PN</sub>: ±50 [A]</li> <li>*I<sub>SN</sub>: ±25 [mA]</li> <li>*Radio conversión: 1:2000</li> <li>*Sensibilidad: No especificada</li> <li>*Aislamiento: 3 [kV]</li> <li>*Precisión: 0.5 %</li> <li>*Ancho de banda: 0 – 150 [kHz]</li> <li>*Temperatura ambiente operación: -25/85 [°C]</li> <li>*Tipo medición: CC/CA</li> <li>*Voltaje fuente: ± 15 [V]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Lazo cerrado (compensado) *Transductor de corriente utilizando el efecto Hall</li> <li>*Caja de plástico aislado, reconocido según UL 94-V0</li> <li>*Excelente precisión</li> <li>*Muy buena linealidad</li> <li>*Deriva de baja temperatura</li> <li>*Tiempo de respuesta optimizado</li> <li>*Alto ancho de banda</li> <li>*Alta inmunidad a las interferencias externas</li> <li>*Capacidad de sobrecarga de corriente</li> </ul>
<p>S23P50 (TAMURA)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>*I<sub>PN</sub>: ±50 [A]</li> <li>*I<sub>SN</sub>: ± 25 [mA]</li> <li>*Radio conversión: 1:2000</li> <li>*Aislamiento: 5 [kV]</li> <li>*Precisión: 0.25 %</li> <li>*Sensibilidad: No especificada</li> <li>*Ancho de banda: 0 – 100 [kHz]</li> <li>*Temperatura ambiente operación: -40/85 [°C]</li> <li>*Tipo de medición: CC/CA</li> <li>*Voltaje fuente: ± 12-15 [V]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Lazo cerrado (compensado) *Transductor de corriente utilizando el efecto Hall</li> <li>*Caja de plástico aislado, reconocido según UL 94-V0</li> <li>*Excelente precisión y linealidad</li> <li>*Deriva de baja temperatura</li> <li>*Tiempo de respuesta optimizado</li> <li>*Alto ancho de banda</li> <li>*Alta inmunidad a las interferencias externas</li> <li>*Capacidad de sobrecarga de corriente</li> </ul>

Sensor	Especificaciones	Características según fabricante
<p data-bbox="323 349 571 423">50 A   HE055T01 (ELECTROHMS)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>*<math>I_{PN}</math>: <math>\pm 50</math> [A]</li> <li>*<math>I_{SN}</math>: <math>\pm 50</math> [mA]</li> <li>*Radio conversión: 1:1000</li> <li>*Aislamiento: 2.5 [kV]</li> <li>*Precisión: 0.1 %</li> <li>*Sensibilidad: No especificada</li> <li>*Ancho de banda: 0 – 200 [kHz]</li> <li>*Temperatura ambiente operación: -40/85 [°C]</li> <li>*Tipo de medición: CC/CA</li> <li>*Voltaje fuente: <math>\pm 12-15</math> [V]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*De efecto Hall en lazo cerrado</li> <li>*Montado sobre un circuito integrado (PCB)</li> <li>*Compacto con aislamiento galvánico</li> </ul>

Los sensores descritos en la tabla anterior, cumplen con las características necesarias para ser una solución en la adquisición de señales de corriente, como método de selección se realizó la Tabla 6 para comparar los sensores, resaltando los aspectos más importantes de cada sensor y en base a esto, seleccionar el más adecuado.

**Tabla 6. Tabla comparativa de los sensores de corriente consultados**

<b>Característica</b>	<b>LA50 – S/SP1</b>	<b>S23P50</b>	<b>50 A   HE055T01</b>
Nivel de aislamiento	**	***	**
Precisión	**	**	***
Ancho de Banda	***	**	***
Alimentación	***	***	***
Económicamente viable	***	**	**

\*\*\* Excelente

\*\* Bueno

\* Malo

Un factor restrictivo a la hora de la selección de dichos sensores es el presupuesto con el que se cuenta para este proyecto que es aportado por medio del programa capital semilla de los profesores Javier Solano y Juan Manuel Rey, haciendo que las posibilidades de selección sean limitadas. Los sensores S23P50 y HE055T01 son soluciones que presentan buenas características y son los más costosos. Sin embargo se opta por seleccionar el sensor LA50-S/SP1, el cual aparte de tener buenas características, es económicamente viable. Adicionalmente y como un valor agregado, la marca LEM ya ha sido implementada por otros proyectos en la universidad<sup>22</sup>, con los cuales se han obtenido buenos resultados en su implementación.


---


<sup>22</sup> MENESES AGRESOTH, Víctor Elías. ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando Op. Cit.

**3.4.2 Selección de sensores de tensión** Análogamente a la selección de los sensores de corriente, se parte de los mismos criterios de análisis y selección.

En la Tabla 7 se detallan las características de los sensores de tensión consultados en catálogos de diferentes proveedores y fabricantes.

**Tabla 7. Especificaciones técnicas sensores de tensión**

Sensor	Especificaciones	Características
LV25 – P  	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Rango de entrada: <math>\pm 500</math> [V]</li> <li>*<math>I_{PN} = 10</math>[mA]</li> <li>*<math>I_{SN} = 25</math>[mA]</li> <li>*Radio conversión: 2500:1000</li> <li>*Aislamiento: 2.5 [kV]</li> <li>*Precisión: 0.9 %</li> <li>*Ancho de banda: 0 – 150 [kHz]</li> <li>*Temperatura ambiente operación: 0/70 [°C]</li> <li>*Tipo medición: CC/CA</li> <li>*Voltaje de alimentación: <math>\pm 15</math> [V]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Lazo cerrado (compensada) transductor de corriente utilizando el efecto Hall</li> <li>*Caja de plástico aislado, reconocido según UL 94-V0</li> <li>*Excelente precisión</li> <li>*Muy buena linealidad</li> <li>*Deriva de baja temperatura</li> <li>*Tiempo de respuesta optimizado</li> <li>*Ancho de banda de frecuencia ancha</li> <li>*Alta inmunidad a las interferencias externas</li> <li>*Capacidad de sobrecarga de corriente</li> </ul>

Sensor	Especificaciones	Características
<p data-bbox="306 350 422 378">ISO122</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Rango de entrada: <math>\pm 150</math> [V]</li> <li>*Aislamiento: 1.5 [kV]</li> <li>*Ancho de banda: 0 – 50 [kHz]</li> <li>*Temperatura ambiente operación: -25 / 80 [°C]</li> <li>*Tipo medición: CC/CA</li> <li>*Voltaje de alimentación: <math>\pm 15</math> [V] (Para los dos extremos aislados)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*La señal es transmitida digitalmente a través de una barrera capacitiva diferencial 2 [pF]</li> <li>*No requiere componentes externos para la operación</li> <li>*Sensor que emplea un amplificador operacional asilado y requiere polarización en los dos extremos aislados</li> </ul>

Aplicando el mismo método de selección empleado en los sensores de corriente, se realizó la Tabla 8 para comparar las características de los sensores.

**Tabla 8. Tabla comparativa de los sensores de tensión consultados**

<b>Característica</b>	<b>Sensor LV50 – P (LEM)</b>	<b>Sensor ISO122</b>
Nivel de aislamiento	* * *	* *
Precisión	* *	*
Ancho de Banda	* * *	* *
Alimentación	* * *	* *
Económicamente viable	* *	* * *

\* \* \* Excelente

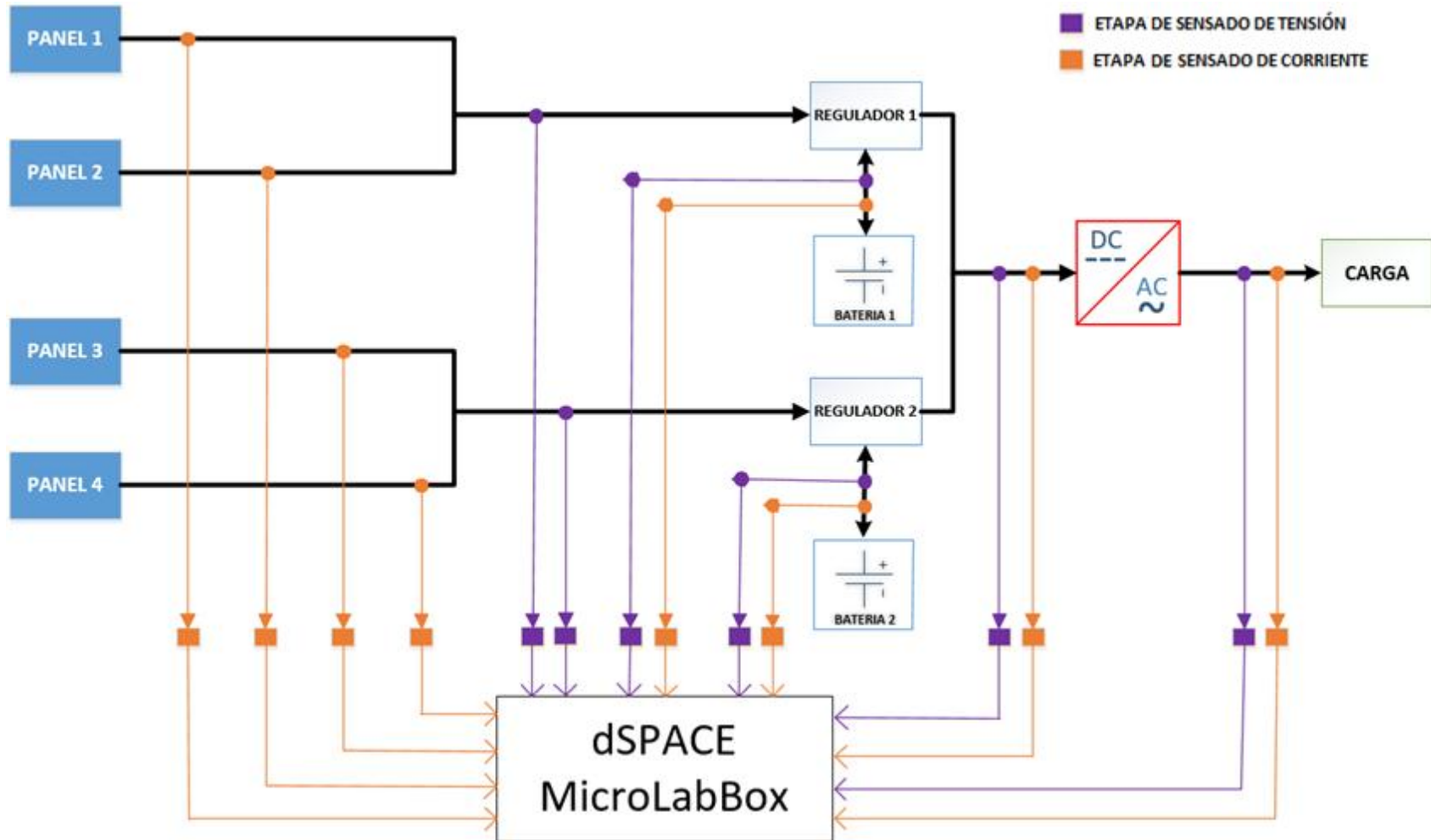
\* \* Bueno

\* Malo

Con respecto a la tabla anterior, se emplea como solución para la adquisición de señales de tensión el sensor LV25-P, puesto que ofrece mejores características para lo que se necesita en el sistema de paneles fotovoltaicos. Aunque el sensor ISO122 es más accesible económicamente, en aspectos técnicos no ofrece mayor comodidad. Además como se mencionó en la selección de los sensores de corriente, la marca de este sensor ya ha sido implementada en la universidad, adicionalmente se opta por tener la misma marca tanto en sensores de tensión como de corriente.

En la Figura 40 se muestra la distribución de los módulos de sensado en la red del sistema fotovoltaico.

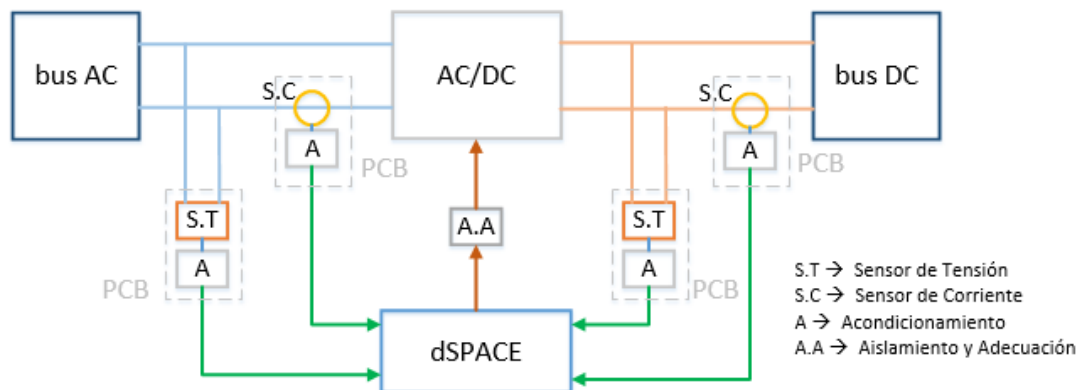
Figura 40. Diagrama de bloques del sistema de adquisición conectado al dSPACE



#### 4. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE CONTROL PARA LAS ETAPAS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Esta etapa (bloque A.A de la Figura 41) contiene dispositivos que garantizan el aislamiento y acondicionamiento de las señales de control generadas a partir del dSPACE, es decir, se encarga de aislar el sistema de control de la etapa de potencia.

**Figura 41. Conexión de las etapas de sensado y acondicionamiento con el módulo de control**



El bloque A.A contiene los búfer y los optoacopladores que adecuan las señales de control, acoplan impedancias y a su vez funcionan como elementos de aislamiento para separar elementos del circuito que operan con diferentes niveles de tensión y corriente.

#### 4.1 RANGOS DE SALIDA DE LAS SEÑALES DE CONTROL

En este trabajo de grado se emplea la generación de señales de control basada en modulación por ancho de pulsos (PWM). Los rangos de salida de las señales de control por medio de los puertos digitales (DIO) en la MicroLabBox se especifican en la Tabla 9.

**Tabla 9. Rangos de salida de señales de control PWM**

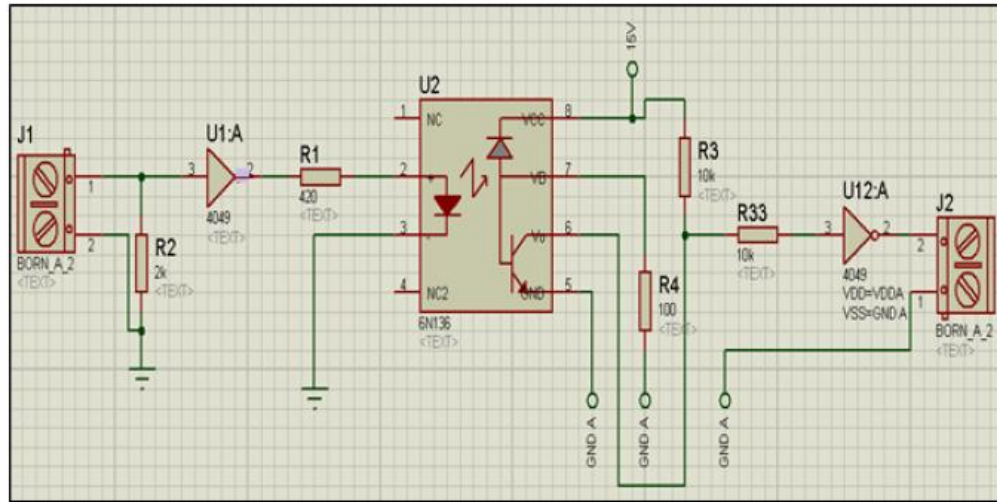
Nivel de tensión [V]	Rango de corriente [mA]	
	Mín.	Máx.
2,5	-15	15
3,3	-45	45
5,0	-45	45

#### 4.2 CIRCUITO DE AISLAMIENTO Y ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES DE CONTROL

Esta etapa es utilizada para aislar los *drivers* de los módulos de electrónica de potencia de la etapa de control realizada por el dSPACE. Además, en esta etapa se considera la adecuación de los niveles de corriente y tensión de las señales de control, con el fin de cumplir con las características de corriente y tensión requeridas por los *drivers* de los módulos de electrónica de potencia (convertidores).

El circuito de aislamiento y adecuación se presenta en la Figura 42. Como se puede observar, en primera instancia se considera el búfer CD4050 alimentado a 5 [V], utilizado para garantizar una corriente de aproximadamente 20 [mA] a la entrada del optoacoplador y limitar la corriente de salida de la etapa de control.

**Figura 42. Circuito esquemático de la etapa de los optoacopladores**



Fuente: MENESES AGRESOTH, Víctor Elías. ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando. Sistemas de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. 94 p

Posterior al búfer CD4050, es empleado el optoacoplador de alta velocidad 6N136, utilizado para proporcionar aislamiento entre la etapa de control y la etapa de los *drivers* del módulo convertidor. Este elemento es también utilizado para adecuar la señal de control a un valor entre 0 y 15 [V] para controlar los convertidores.

El optoacoplador está configurado en modo inversor, por lo que finalmente se utiliza el búfer inversor CD4049. Este búfer es también utilizado para acoplar impedancias entre el optoacoplador y los *drivers* de los convertidores.

Finalmente las señales de control entregadas a los convertidores se encuentran en el rango de 0 a 15 [V].

Esta etapa de diseño fue basada en un proyecto de grado realizado en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, titulado “sistemas de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización

del módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON<sup>23</sup>, dirigido por la profesora María Alejandra Mantilla Villalobos. La utilización de este diseño se basa en que las señales de control generadas por el dSPACE, tiene características similares a las señales de entrada de este circuito de acondicionamiento.

Basados en las etapas de sensado de las señales de entrada al sistema de control y en las etapas de acondicionamiento de las señales de salida de dicho sistema, se espera contar con una fuente de alimentación externa para el funcionamiento de los siguientes dispositivos:

- Sensores de tensión: requieren una alimentación de  $\pm 15$  [V].
- Sensores de corriente: requieren una alimentación de  $\pm 15$  [V].
- Etapas de acondicionamiento: requieren una alimentación de  $\pm 5$  [V].
- Etapas de aislamiento y adecuación (optoacopladores): requieren dos alimentaciones diferentes aisladas entre sí de 15 [V] y 5 [V].

---

<sup>23</sup> MENESES AGRESOTH, Víctor Elías. ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando Op. Cit.

## **5. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE MODELOS PARA LECTURA DE SEÑALES DE ENTRADA A UN MÓDULO MICROLABBOX**

Una de las grandes ventajas de la MicroLabBox, es que se pueden crear experimentos por medio del entorno de programación visual Simulink, facilitando la construcción de aplicaciones para la monitorización y/o control de sistemas eléctricos.

Para desarrollar e implementar aplicaciones en la MicroLabBox, es necesario identificar la estructura, el funcionamiento y las herramientas que ofrece el entorno de trabajo de Simulink, además de identificar las diferentes Toolbox y bibliotecas ofrecidas por dSPACE para el desarrollo de modelos.


En la universidad se ofrecen cursos limitados que permitan el desarrollo de modelos a través de Simulink, así que se hará una introducción sobre esta herramienta ofrecida por Matlab y en base a esto, poder crear aplicaciones con las bibliotecas de dSPACE, que permitan la lectura de señales de entrada, la generación de señales de control, la monitorización de sistemas eléctricos y el envío de datos a un dispositivo de almacenamiento UBS.

### **5.1 INTRODUCCIÓN A SIMULINK**

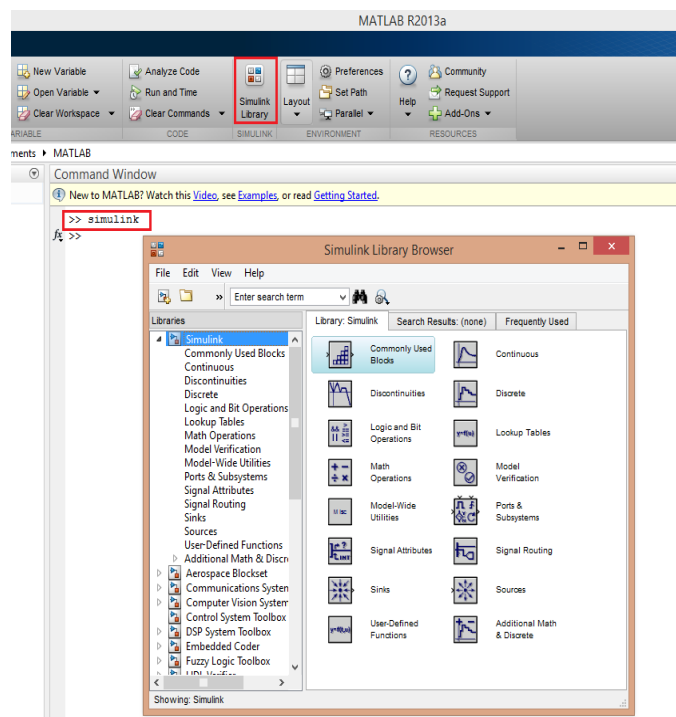
Simulink es un entorno programación visual que permite construir, recrear y simular en tiempo real (continuo y discreto), modelos de sistemas dinámicos lineales y no lineales mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se estructura por medio de funciones de transferencia, operaciones matemáticas, herramientas de Matlab y funciones predefinidas de

cualquier tipo. Esta aplicación es compatible con simulación, generación automática de código y verificación de sistemas embebidos.

A continuación se detalla el proceso para acceder al entorno de Simulink, se detallan algunos bloques principales característicos de esta aplicación, herramientas y un ejemplo de modelado y simulación de un sistema.

**5.1.1 Acceso a Simulink** Para acceder a la biblioteca de Simulink se debe iniciar en primera instancia la ventana principal de Matlab (Matlab command Windows) y en esta se ejecuta el comando “simulink” o también se puede hacer dando click al símbolo respectivo de Simulink (  ) en la barra de herramientas de la ventana principal (ver Figura 43).

**Figura 43. Acceso a la ventana de librerías de Simulink**





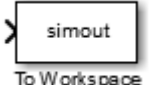




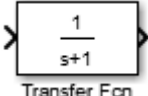






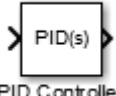

La ventana inicial de Simulink no permite crear y diseñar modelos, puesto que su utilidad solo se limita a navegar por las bibliotecas de bloques y Toolbox

disponibles para recrear un sistema. En esta misma ventana se puede observar en la parte izquierda todas las bibliotecas y Toolbox instaladas que contienen los bloques representativos de Simulink. Cabe mencionar que entre todos estos bloques los más comunes que ofrece esta herramienta son: “Simulink”, “Control System Toolbox” y “Real Time Workshop”. Este último permite generar un código C de control para determinadas plataformas de Hardware comercial.

La biblioteca “Simulink” contiene los bloques necesarios para representar un sistema físico mediante técnicas convencionales de operación (generación de señales, operaciones aritméticas, decodificación, derivación, integración, funciones convencionales, entre otras). Las otras bibliotecas son herramientas adicionales que se emplean para aplicaciones específicas y también las implementadas por algún módulo comercial (p.e las diseñadas por dSPACE). La tabla 10 detalla algunos de los bloques representativos de Simulink.

**Tabla 10. Detalles de algunos bloques representativos de Simulink**

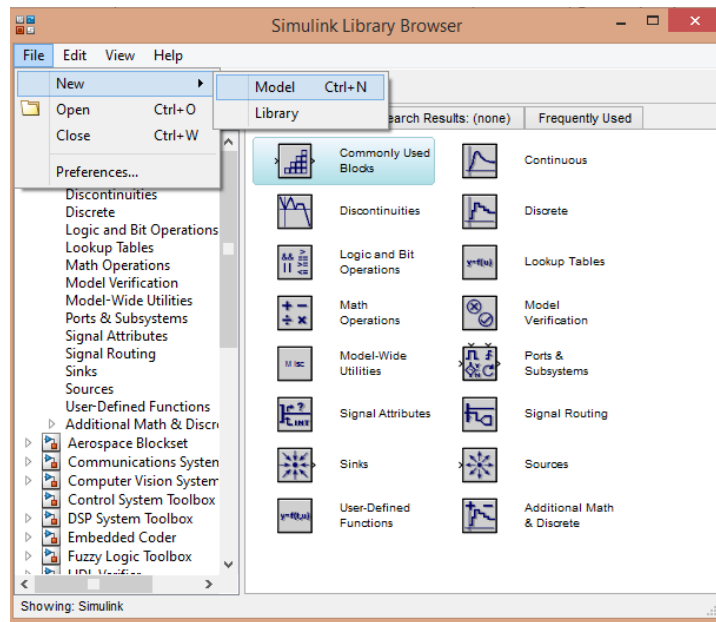
<b>Bloque</b>	<b>Función</b>	<b>Librería</b>	<b>Parámetros necesarios</b>
 Constant	Asigna un valor constante a la señal de entrada	Sources	Valor de la constante
 Step	Asigna una señal de escalón de magnitud especificada en un tiempo dado	Sources	Tiempo del escalon, Valor inicial del escalón, Valor final del escalón
 Ramp	Introduce una señal rampa en un tiempo especificado	Sources	Tiempo de la rampa, pendiente
 Sine Wave	Introduce una señal rampa en un tiempo especificado	Sources	Amplitud de la onda, Fase
 To Workspace	Almacena datos de la señal que llega a un bloque y las transforma en vector. Si se conecta un reloj se almacena	Sinks	Nombre y tipo de la variable (Save format: Matrix)

Bloque	Función	Librería	Parámetros necesarios
	el vector tiempo		
	Grafica la señal que se introduzca respecto al tiempo (de la misma forma que un osciloscopio)	Sinks	Entradas
	Grafica la entrada superior en el eje X y la inferior en el eje Y	Sinks	Rango de los ejes
	Representa la función de transferencia en lazo abierto	Continuos	Numerador y Denominador de la función de transferencia
	Integra una señal en el dominio del tiempo	Continuos	Valor inicial desde el cual se va a integrar
	Introduce un retardo en el dominio del tiempo en el cual aparece la señal	Continuos	Valor de retardo (Debe ser un número positivo)
	Multiplica la señal por cualquier valor que se introduzca	Math	Valor de la ganancia
	Suma dos señales cualesquiera	Math	Número de entradas a sumar
	Multiplica dos señales cualesquiera	Math	Número de entradas a multiplicar
	Aplica una función matemática creada en matlab	Functions and Tables	Función a implementar
	Se aplica un control PID a una señal	Blocksets & Toolbox	Proporcional: K; integral: K/Ti, Derivativo: K*Td
	Permite mostrar dos señales distintas en la misma gráfica	Signals & System	Número de entradas

Fuente: UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR Cuerpo de profesores. Introducción a Simulink [en línea]. <http://prof.usb.ve/lamanna/cursos/simulink.pdf> [citado el 27 de Septiembre de 2015]

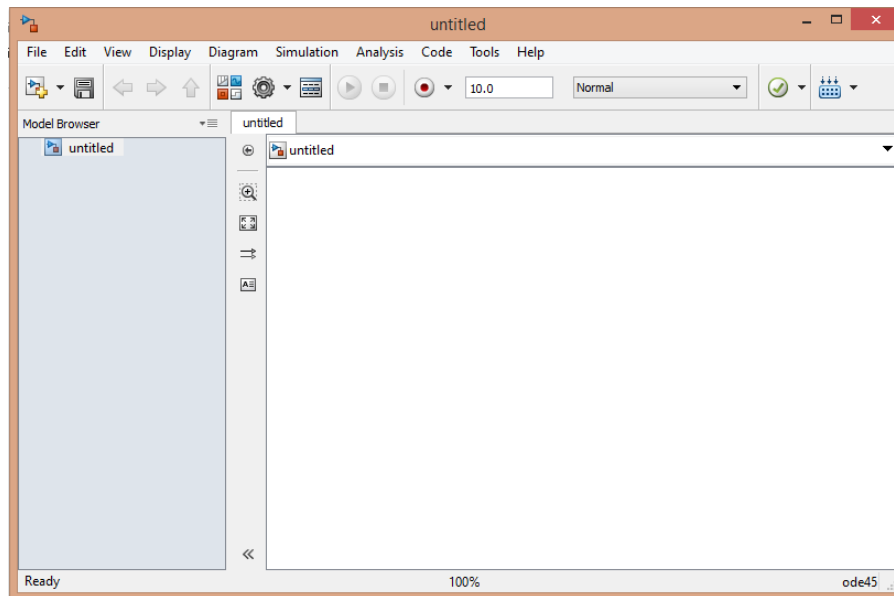
**5.1.2 Entorno de trabajo de Simulink** Para acceder al entorno de trabajo de Simulink, en la parte superior izquierda de la ventana “Simulink Library Browser” se selecciona: File → New → Model, como se detalla en la Figura 44.

**Figura 44. Simulink Library Browser**



Se abre la ventana de entorno de trabajo de Simulink y en ésta es donde se pueden crear y simular modelos de sistemas, insertando los bloques correspondientes de las diferentes bibliotecas para interconectarlos entre sí y recrear cualquier tipo de aplicación (ver Figura 45).

**Figura 45. Entorno de trabajo de Simulink**



Se debe tener en cuenta que:

- Una forma de insertar los bloques es arrastrándose con clic presionado.
- Los bloques se deben unir mediante flechas. Esto se logra haciendo clic en la flecha de salida del bloque que se desea adherir.
- Para que las modificaciones en el entorno hagan efecto, este deberá ser grabado después de realizar los cambios.

**5.1.3 Modelado y simulación de un sistema en Simulink** A continuación, a manera de ejemplo se modela el siguiente sistema:

$$y(t) = (x(t) + K) * u(t - 5)$$

Donde:

- $x(t)$  es una señal de pulsos de periodo 1 [s], amplitud 1 y ancho de pulso de 5% del periodo.
- $K = 1$
- $u(t)$  es la función escalón unitario.

**Selección de bloques**

Los bloques a emplear para este sistema son los descritos en la Tabla 11.

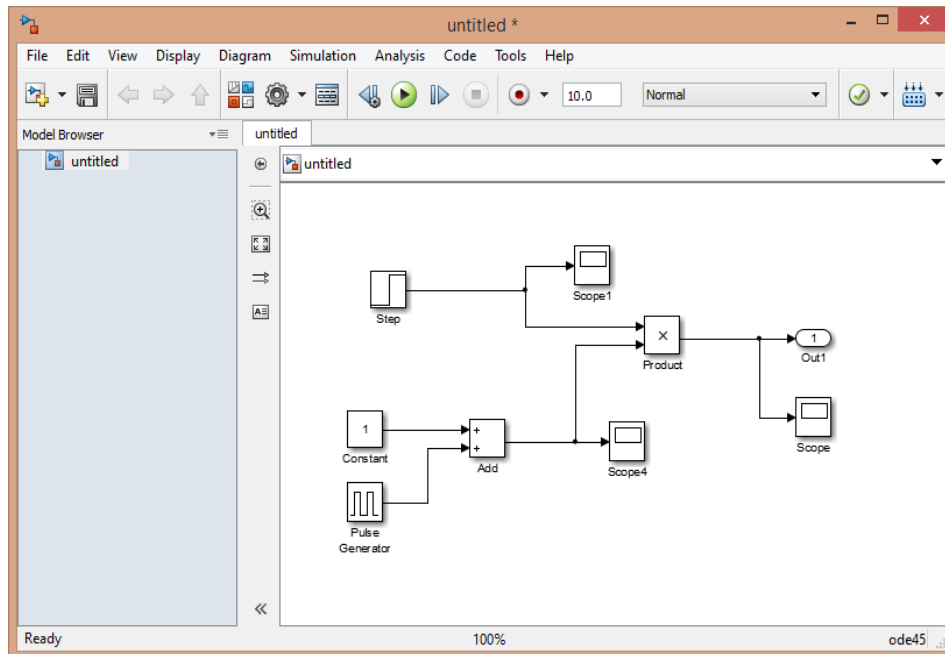
**Tabla 11. Bloques para el sistema**

<b>Bloque</b>	<b>Librería</b>	<b>Parámetro</b>
Constante	Sources	Señal constante de valor 1
Entrada Escalón	Sources	Señal escalón unitario de amplitud 1 y arranque en $t = 5$
Sumador	Math	Suma la señal constante con el generador de pulsos
Multiplicador	Math	Multiplica el resultado de la suma de la señal constante y el generador de pulsos con la señal escalón
Generador de pulso	Sources	Señal de pulso con amplitud 1, período 1 y ancho de pulso de 5% del periodo
Scope	Sinks	Visualiza la señal resultante en el sistema
Scope 1	Sinks	Visualiza la señal escalón unitario
Scope 2	Sinks	Visualiza la señal resultante de la suma del generador de pulsos con la señal constante
Out 1	Sinks	Señal de salida del sistema $y(t)$

### **Construcción del modelo**

Se arrastran los bloques desde las bibliotecas de Simulink al entorno de trabajo y se unen entre sí, como se muestra en la Figura 46.

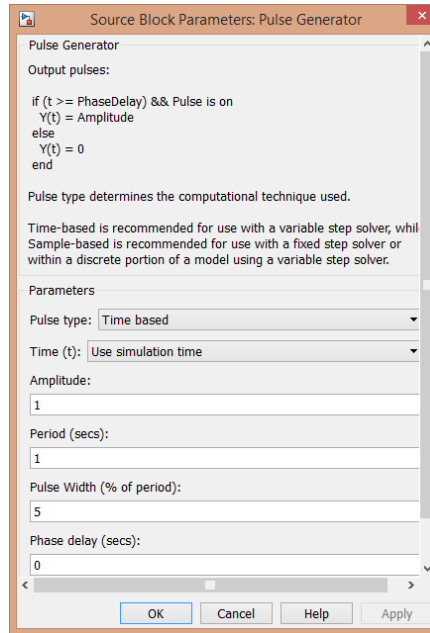
**Figura 46. Diagrama de bloques del sistema**



Haciendo doble clic en cualquiera de los bloques se puede detallar su funcionamiento y configurar sus parámetros.

Por ejemplo, para el generador de pulsos se observa en la Figura 47, que se puede modificar: La amplitud, el periodo, el ancho de pulso y el ángulo de fase.

**Figura 47. Parámetros bloque de fuente: generador de pulsos**

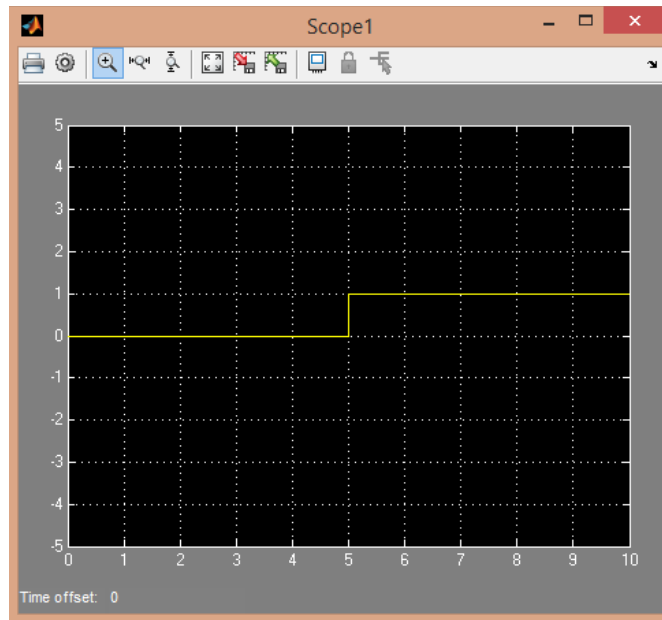


## Simulación

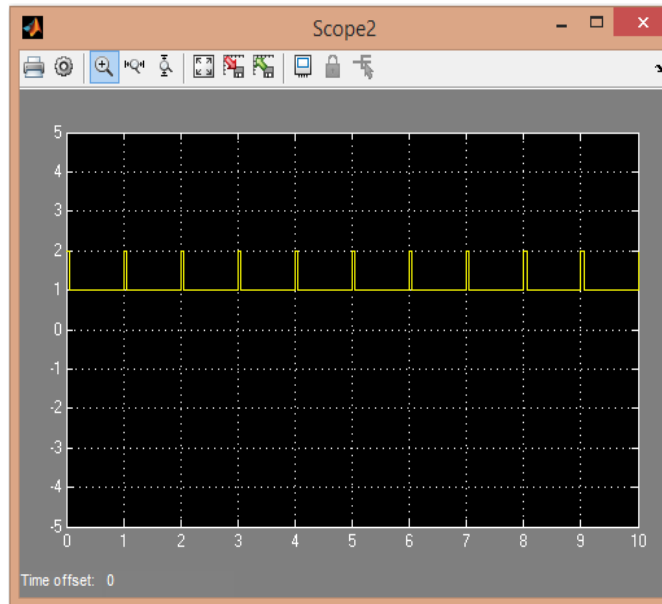
Para la simulación del modelo, se abre el menú de simulation → Simulation Parameters y se modifica el tiempo de parada. Para este ejemplo se detallará el comportamiento del sistema para 10 [s]. Presionando el botón “play” en la parte superior del entorno de trabajo de Simulink se espera que el programa realice los cálculos del sistema.

Finalmente haciendo doble clic en los bloques de “scope” se puede ver gráficamente los resultados de las señales conectadas como se muestran en las figuras 48 a 50.

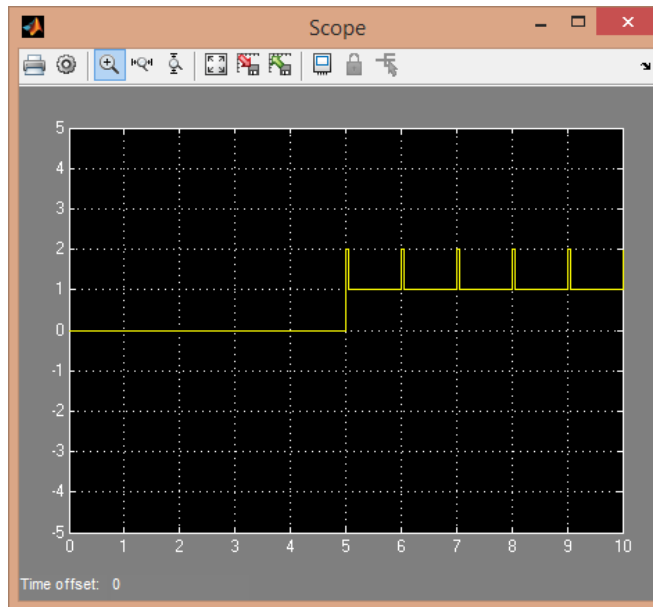
**Figura 48. Scope 1: señal escalón unitario  $u(t-5)$**



**Figura 49. Scope 2: bloque de suma entre generador de pulsos y constante  $k=1$**



**Figura 50. Scope: señal de salida  $y(t)$**



Cabe resaltar que es posible realizar cualquier cambio en los parámetros del sistema, adicionalmente se puede simular en tiempo real por medio de las múltiples herramientas que ofrece Simulink y también analizar los diferentes comportamientos que tiene un sistema en diferentes contextos.

## **5.2 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA LECTURA Y GENERACIÓN DE SEÑALES EN LA MICROLABBOX**

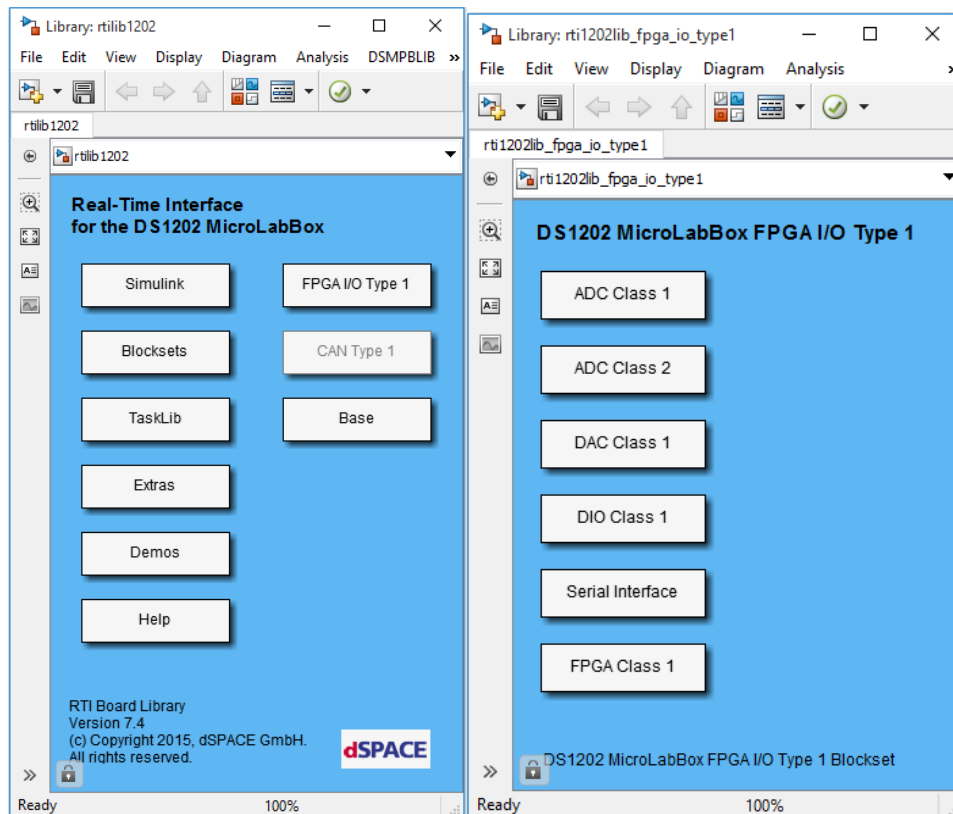
Las aplicaciones desarrolladas en esta sección en Matlab/Simulink tienen dos componentes, el registro de información (lectura de las diferentes señales de entrada tanto de tensión como de corriente) y la generación de dichas señales a través del módulo MicroLabBox.

El desarrollo de estas aplicaciones se basa en el uso de las Toolbox dSPACE de la tarjeta interna asociada a la MicroLabBox (DS1202).

A continuación se representa la Toolbox empleada, la cual contiene las bibliotecas y los bloques necesarios para la construcción del modelo.

La forma de abrir esta Toolbox es escribiendo en la ventana de comandos de Matlab la referencia rti1202. La Toolbox <Real-Time Interface for the DS1202 MicroLabBox> tiene la biblioteca <DS1202 MicroLabBox FPGA I/O Type 1> donde se encuentran los bloques de entrada y salida asociados al módulo de control (ver Figura 51).

**Figura 51. Toolbox <Real-Time Interface for the DS1202 MicroLabBox> y bloques de E/S del módulo de control**



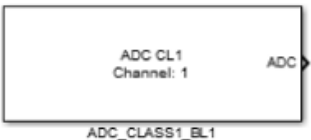
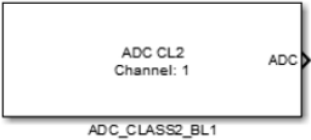
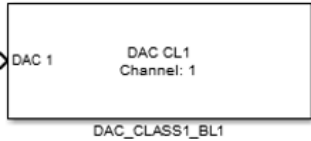
**5.2.1 Bloques de entrada y salida** Para cada una de las entradas y salidas físicas presentes en la MicroLabBox, existe un bloque en la Toolbox de Simulink.

Para mostrar el funcionamiento, se implementan modelos en Simulink que permiten verificar dicho funcionamiento de cada uno de los módulos considerados.

Los bloques de entrada son tipo ADC (analog-to-digital converter) de clase 1 y clase 2, la diferencia entre ambos consiste en el cambio de polaridad en los terminales de conexión de la MicroLabBox. Los bloques de salida son tipo DAC (digital-to-analog converter) de una sola clase.

En la Tabla 12 se presenta la descripción y las características de los bloques utilizados para la construcción de la aplicación.

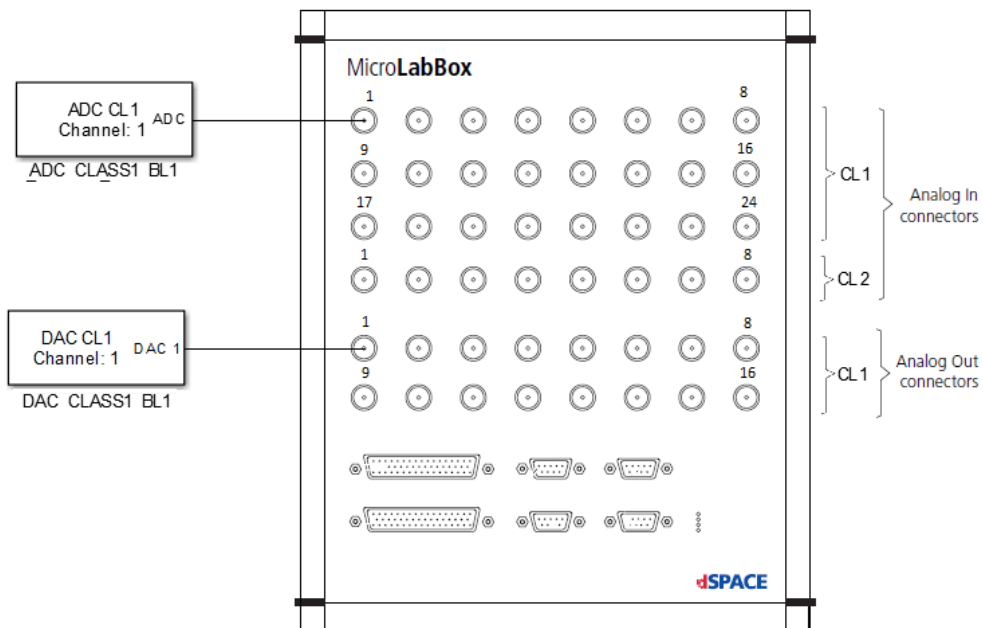
**Tabla 12. Descripción de los bloques de E/S**

Bloque	Esquema	Descripción				
Entrada Clase 1		<p>Este bloque permite controlar hasta 24 canales de entrada analógica ADC clase 1, cada convertidor A/D (Análogo/Digital) es independiente. La escala entre la tensión de entrada analógica y el bloque de salida es:</p> <table border="1" data-bbox="951 1188 1297 1262"> <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 Clase 2		<p>Con un bloque ADC clase 2 se pueden controlar hasta 8 canales de entrada analógica diferencial, con cada convertidor A/D por separado. La escala entre la tensión de entrada analógica y el bloque de salida es:</p> <table border="1" data-bbox="951 1528 1297 1602"> <thead> <tr> <th>Input Voltage Range</th> <th>Simulink Output</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-10.0 V ... +10.0 V</td> <td>-1.0 ... +1.0</td> </tr> </tbody> </table>	Input Voltage Range	Simulink Output	-10.0 V ... +10.0 V	-1.0 ... +1.0
Input Voltage Range	Simulink Output					
-10.0 V ... +10.0 V	-1.0 ... +1.0					
Salida Clase 1		<p>Un bloque DAC clase 1 controla hasta 16 canales de salida analógica, los convertidores D/A se actualizan de forma síncrona. La siguiente tabla muestra la escala entre el bloque de entrada y la tensión de salida</p>				

Bloque	Esquema	Descripción				
		analógica: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <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					

Como se ilustra en la Figura 52, cada uno de ellos representa una entrada/salida analógica del panel conector superior de la MicroLabBox:

**Figura 52. Relación de bloques en Simulink y conectores del dSPACE**

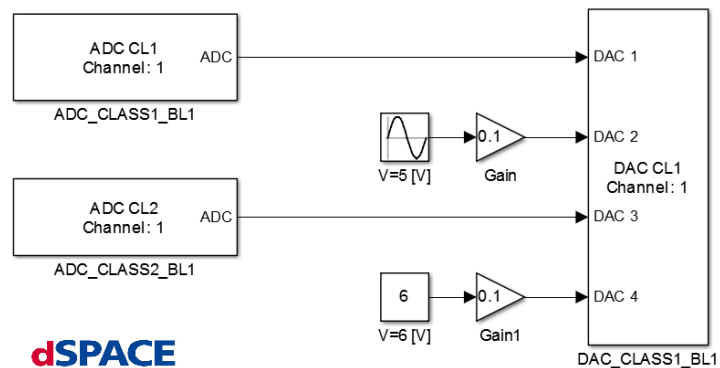


**5.2.2 Desarrollo de una aplicación de prueba para lectura y generación de señales en la MicroLabBox** Debido a que la medida de las variables en la red de paneles fotovoltaicos ya mencionada, depende de sensores especificados en el Capítulo 3 y adicionalmente de un sistema de aislamiento para la protección en la entrada al dSPACE, los cuales se encuentran en proceso de adquisición, se realiza una aplicación de prueba para comprobar el funcionamiento de los bloques de E/S y del diseño, conectando en la entrada del dSPACE un generador el cual

representa la lectura de la señal y un osciloscopio en la salida para evidenciar de la misma manera el funcionamiento de dichos bloques. Las conexiones se realizan por medio de cables BNC-BNC.

La Figura 53 ilustra la aplicación de prueba creada para verificar el funcionamiento de los bloques de E/S de las Toolbox, utilizados para la creación de la aplicación de monitorización uno de los sistemas de paneles fotovoltaicos de la universidad. En este experimento se utilizan dos señales de entrada por medio de la MicroLabBox y se generan cuatro señales de salida, basadas en las registradas por el módulo y en otras creadas directamente en Simulink.

**Figura 53. Esquema de aplicación de prueba**

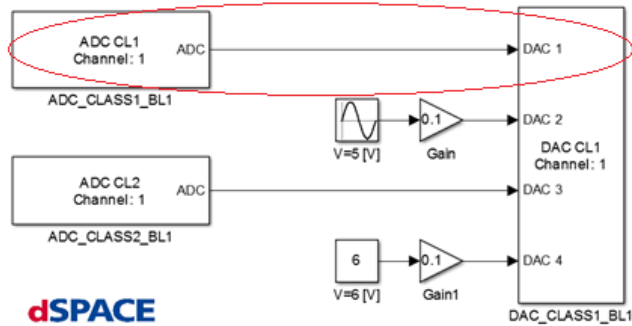


En este experimento se evidencian los casos que se describen a continuación.

### **CASO 1**

Se conecta un generador de señales en un canal seleccionado de clase 1 (ADC CL1) y se aprecia su salida por medio de un osciloscopio en el puerto de salida AO1 ch1 (DAC 1) (ver Figura 54).

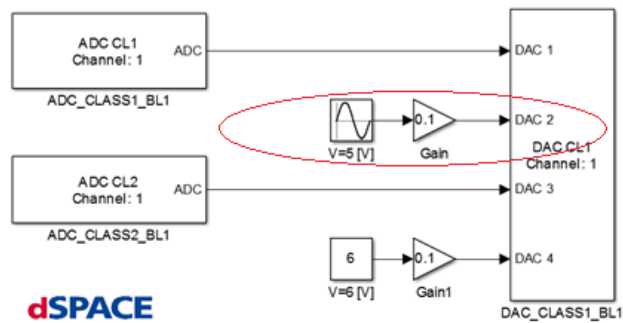
**Figura 54. Aplicación de prueba caso 1**



### **CASO 2**

Se genera una onda sinusoidal directamente desde Simulink y se observa por medio de un osciloscopio en el puerto de salida AO1 ch2 (DAC 2) (ver Figura 55).

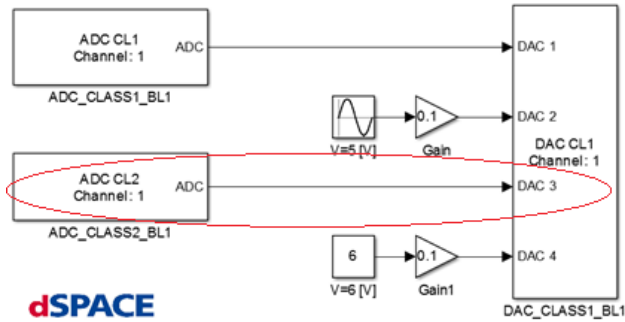
**Figura 55. Aplicación de prueba caso 2**



### **CASO 3**

Se conecta un generador de señales en un canal seleccionado de clase 2 (ADC CL2) y se aprecia su salida por medio de un osciloscopio en el puerto de salida AO1 ch3 (DAC 3) ver Figura 56).

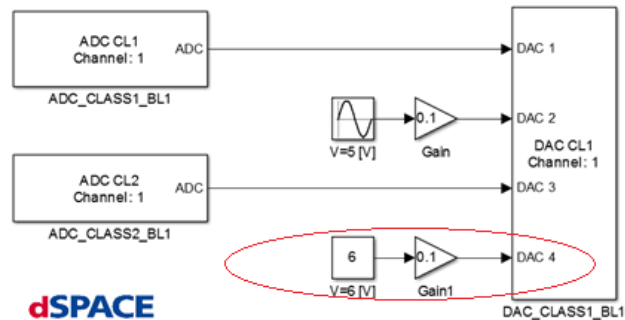
**Figura 56. Aplicación de prueba caso 3**



#### **CASO 4**

Se genera una constante directamente desde Simulink y se observa por medio de un osciloscopio en el puerto de salida AO1 ch4 (DAC 4) (ver Figura 57).

**Figura 57. Aplicación de prueba caso 4**



### **RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE PRUEBA**

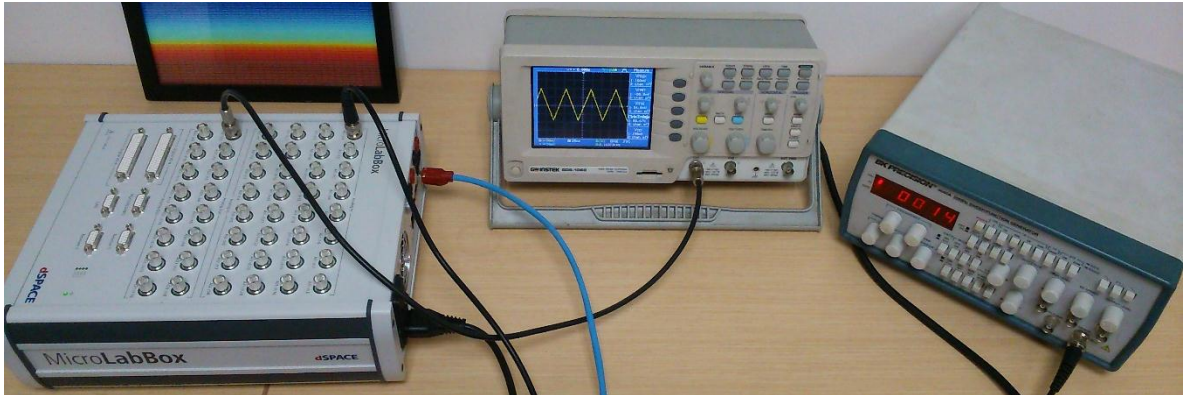
A continuación se evidencian los resultados para los diferentes casos descritos.

#### **CASO 1**

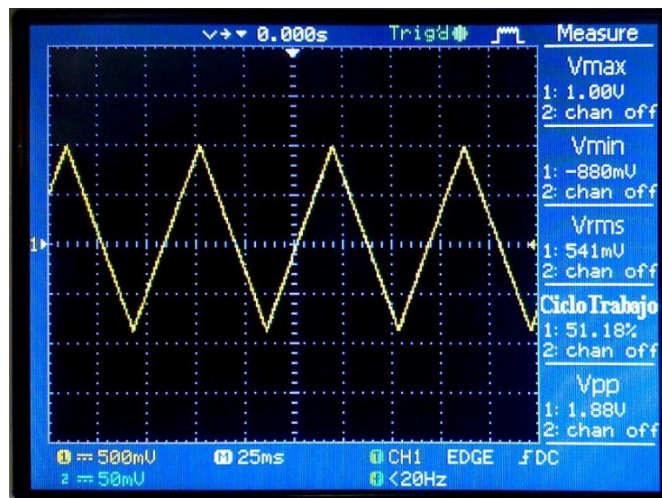
Se conecta un generador de señales con una onda triangular de magnitud igual a 1 [V] en el canal 1 de entrada y se observa la salida con un osciloscopio en el

canal 1 de salida. Las figuras 58 y 59 muestran la conexión de los diferentes elementos y el resultado de la medida del osciloscopio, respectivamente.

**Figura 58. Conexión de los elementos caso 1**



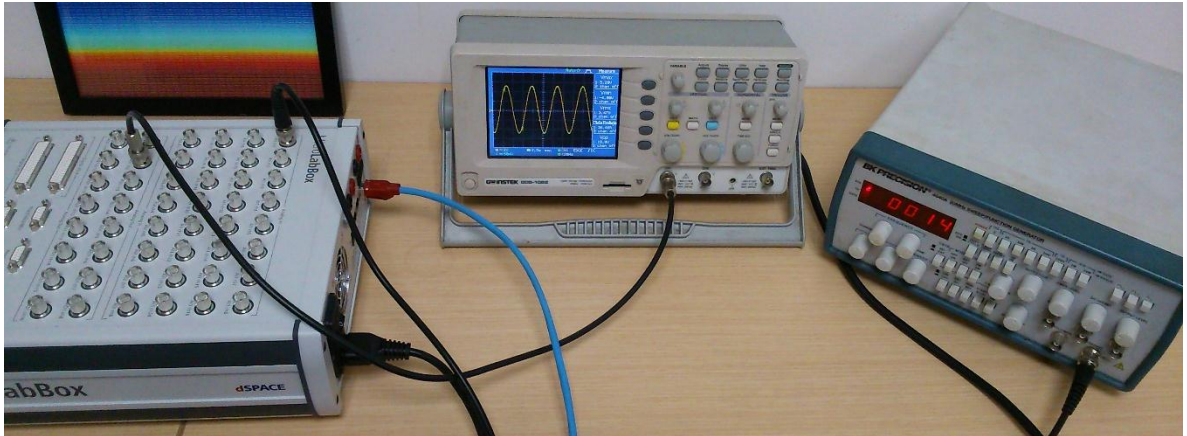
**Figura 59. Medida de osciloscopio caso 1**



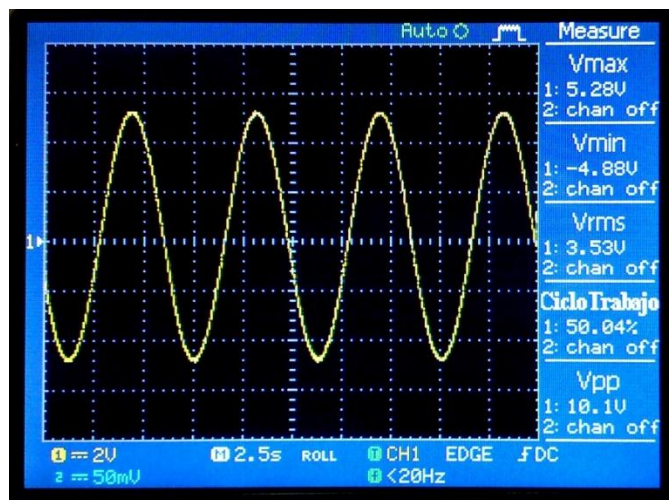
## CASO 2

Se genera una onda sinusoidal en Simulink de magnitud igual a 5 [V] y se observa la salida con un osciloscopio en el canal 2 de salida. Las figuras 60 y 61 muestran la conexión de los diferentes elementos y el resultado de la medida del osciloscopio, respectivamente.

**Figura 60. Conexión de los elementos caso 2**



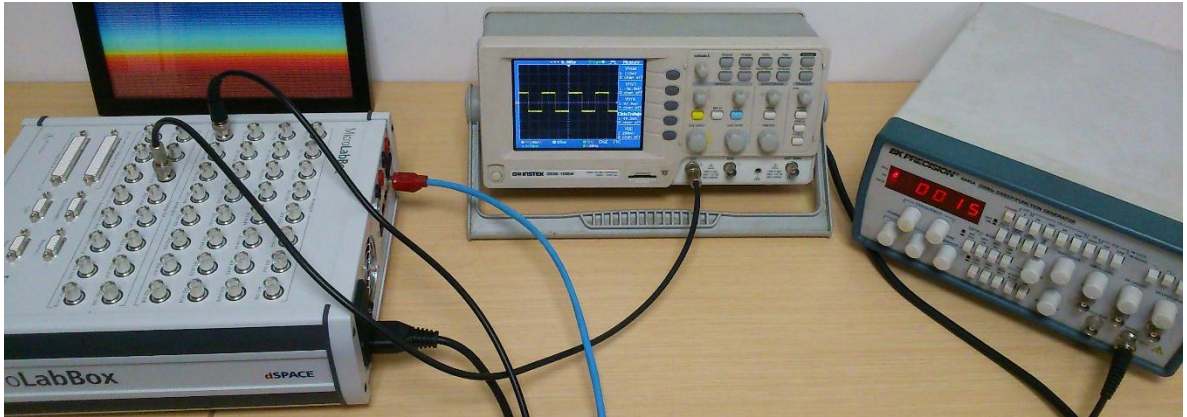
**Figura 61. Medida de osciloscopio caso 2**



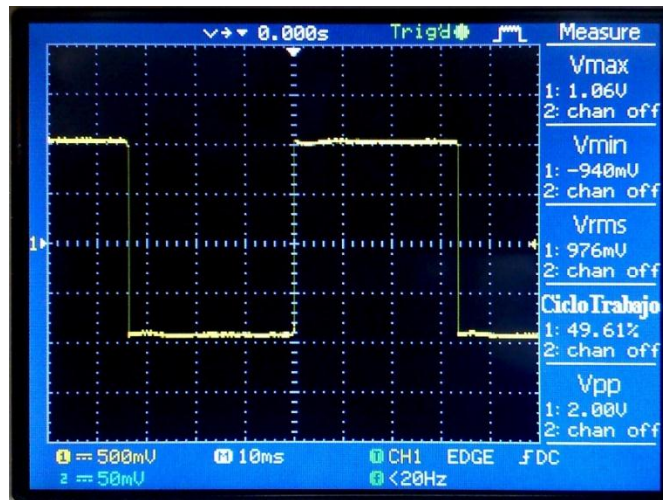
### **CASO 3**

Se conecta un generador de señales con una onda cuadrada de magnitud igual a 1 [V] en el canal 1 de entrada y se observa la salida con un osciloscopio en el canal 3 de salida. Las figuras 62 y 63 muestran la conexión de los diferentes elementos y el resultado de la medida del osciloscopio, respectivamente.

**Figura 62. Conexión de los elementos caso 3**



**Figura 63. Medida de osciloscopio caso 3**



#### **CASO 4**

Se genera una onda constante en Simulink de magnitud igual a 6 [V] y se observa la salida con un osciloscopio en el canal 4 de salida. Las figuras 64 y 65 muestran la conexión de los diferentes elementos y el resultado de la medida del osciloscopio, respectivamente.

Figura 64. Conexión de los elementos caso 4

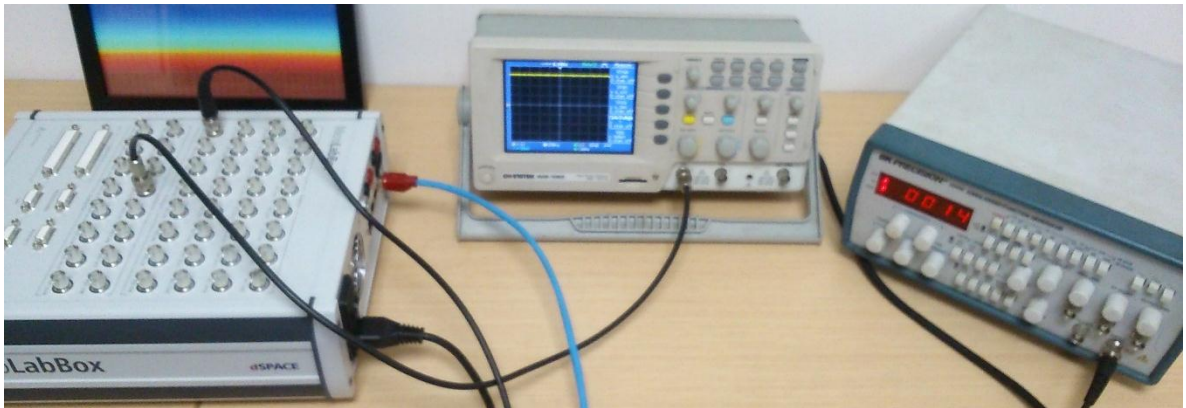
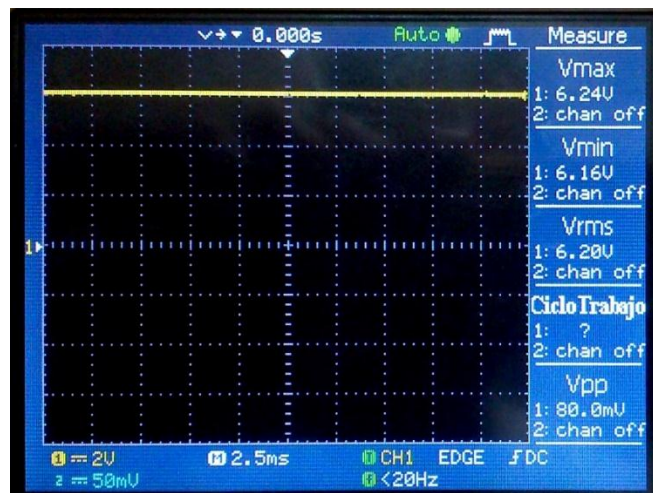
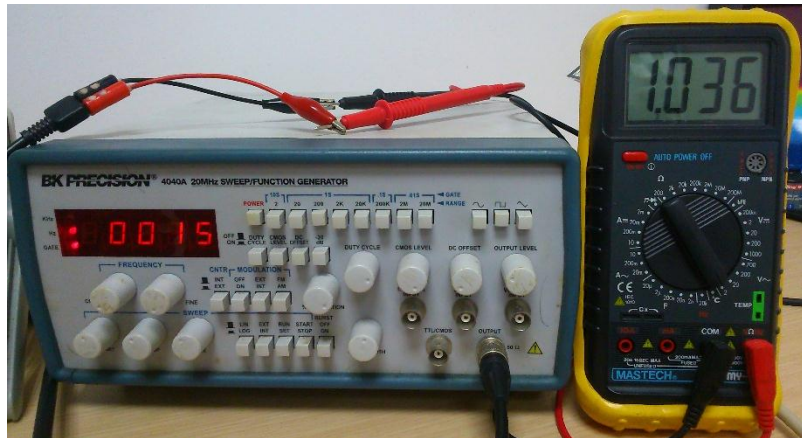


Figura 65. Medida de osciloscopio caso 4



En la Figura 66 se muestra la magnitud del valor eficaz de la tensión ( $v \approx 1$  [V]) de las ondas generadas por el generador de señales (triangular y cuadrada).

**Figura 66. Magnitud de tensión del generador de señales**



La Tabla 13 muestra la escala entre el bloque de entrada de Simulink y la tensión de salida, la cual indica que por cada [V] en la entrada se generan 10 [V] en la salida del bloque dSPACE. Es por esta razón que los bloques de la señal sinusoidal y la señal de continua en la aplicación de prueba, pasan por una ganancia de valor 0,1 de tal manera que el valor visto en la salida del dSPACE sea el mismo valor de los bloques de las señales.

**Tabla 13. Característica bloques E/S**

Simulink Input	Output Voltage Range
-1.0 ... +1.0	-10.0 ... +10.0 V

**5.2.3 Desarrollo de aplicación de monitorización del sistema de PF en la MicroLabBox** Debido a que en este momento no existe un laboratorio en el que se pueda implementar una aplicación desarrollada en el módulo de control, se hace basada en el sistema de generación de energía fotovoltaica, instalado en el laboratorio de control ubicado en el edificio de Alta Tensión, que consiste en una serie de paneles los cuales alimentan el sistema de alumbrado de dicho laboratorio.

Este sistema no es controlable y no cuenta con sensores para evaluar el desempeño y la cantidad de energía generada y consumida. Por lo que se desarrolló una aplicación que permite conectar el dSPACE como centro de monitorización con los sensores seleccionados en el Capítulo 3. En espera de la adquisición de los mismos, se deja creada la aplicación. En todo caso el proceso de medida de datos ya ha sido comprobado con la aplicación de prueba desarrollada anteriormente.

En la Tabla 14 se detalla la lista de canales asociados a la variable a medir en la MicroLabBox y el nombre de dicha variable del registro de datos en un sistema de almacenamiento externo (USB) por medio de las Toolbox dSPACE.

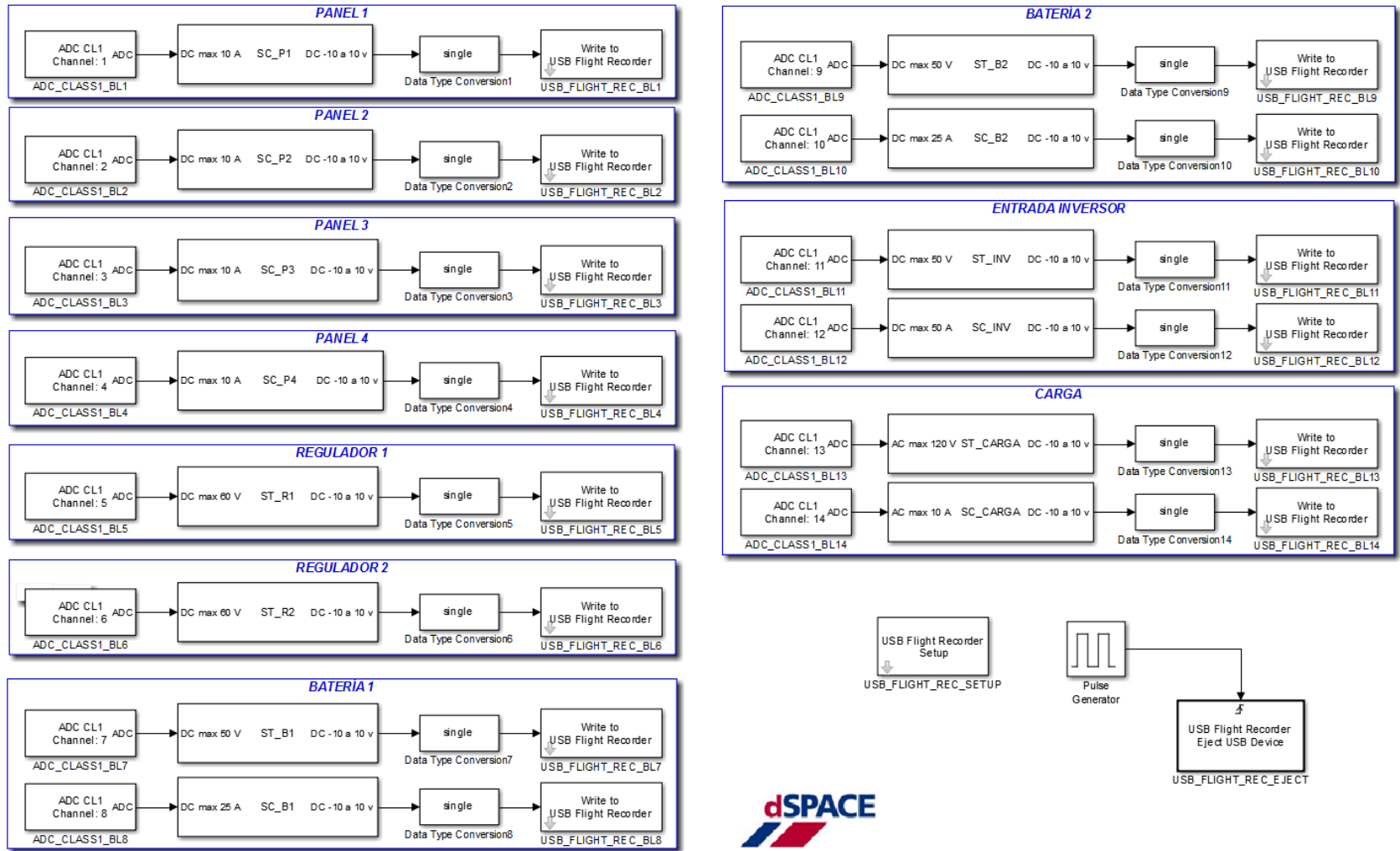
**Tabla 14. Especificaciones de los canales de E/S y las variables a medir**

Bloque Entrada dSPACE	Descripción	Nombre variable registro de datos asociado al bloque USB_FLIGHT_REC_BL1	Bloque Salida dSPACE	Bloque de ganancia asociado
AI1 ch1	Corriente panel 1	I_panel1	USB_FLIGHT_REC_BL1	SC_P1
AI1 ch2	Corriente panel 2	I_panel2	USB_FLIGHT_REC_BL2	SC_P2
AI1 ch3	Corriente panel 3	I_panel3	USB_FLIGHT_REC_BL3	SC_P3
AI1 ch4	Corriente panel 4	I_panel4	USB_FLIGHT_REC_BL4	SC_P4
AI1 ch5	Tensión de entrada regulador 1	V_reg1	USB_FLIGHT_REC_BL5	ST_R1
AI1 ch6	Tensión de entrada regulador 2	V_reg2	USB_FLIGHT_REC_BL6	ST_R2
AI1 ch7	Tensión batería 1	V_bat1	USB_FLIGHT_REC_BL7	ST_B1
AI1 ch8	Corriente	I_bat1	USB_FLIGHT_REC_BL8	SC_B1

Bloque Entrada dSPACE	Descripción	Nombre variable registro de datos asociado al bloque USB_FLIGHT_REC_BL1	Bloque Salida dSPACE	Bloque de ganancia asociado
	batería 1			
AI1 ch9	Tensión batería 2	V_bat2	USB_FLIGHT_REC_BL9	ST_B2
AI1 ch10	Corriente batería 2	I_bat2	USB_FLIGHT_REC_BL10	SC_B2
AI1 ch11	Tensión de entrada Inversor	V_inv	USB_FLIGHT_REC_BL11	ST_INV
AI1 ch12	Corriente de entrada Inversor	I_inv	USB_FLIGHT_REC_BL12	SC_INV
AI1 ch13	Tensión carga	V_carga	USB_FLIGHT_REC_BL13	ST_CARGA
AI1 ch14	Corriente Carga	I_Carga	USB_FLIGHT_REC_BL14	SC_CARGA

El archivo de la aplicación (.slx) se encuentra adjunto a este documento. En la Figura 67 se muestra una imagen del esquema de la misma.

Figura 67. Esquema de aplicación de monitoreo en Simulink



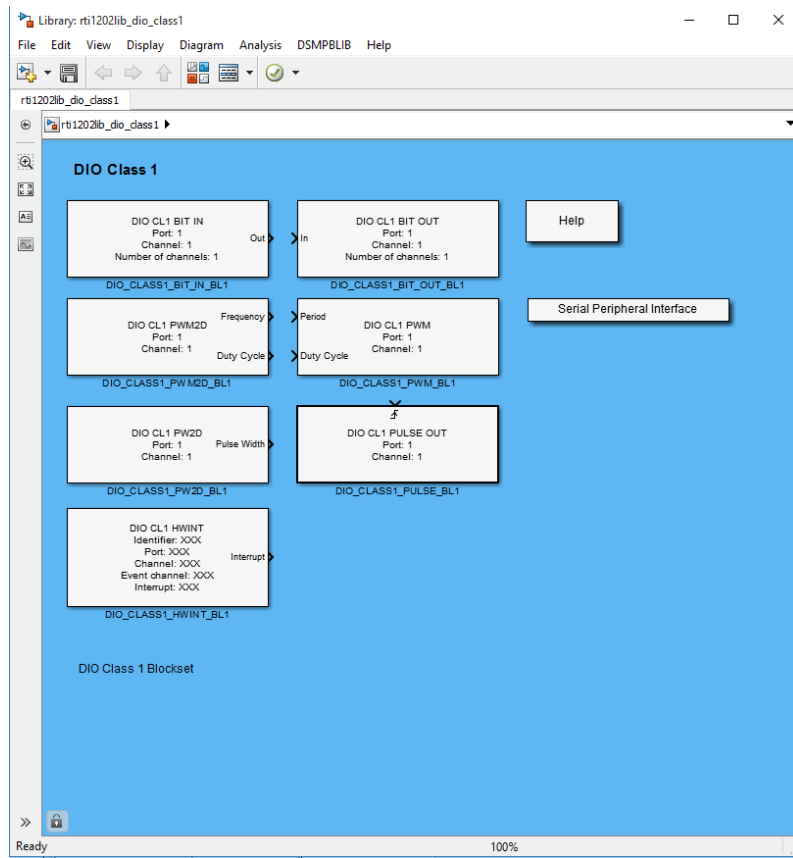
## **6. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE MODELOS PARA LA GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL DESDE UN MÓDULO MICROLABBOX**

Para el control de los bloques asociados a la electrónica de potencia en las micro-redes eléctricas, existen diversos métodos de control que permiten la regulación de la carga, el control de velocidad de motores y el control de frecuencia de un sistema de generación de frecuencia variable (como son los sistemas eólicos). Entre las diversas técnicas de modulación, la más tradicional es la asociada con la modulación por ancho de pulsos (PWM), permitiendo modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica (*p.e* senoidal o cuadrada), ya sea para transmisión de información o controlar la cantidad de energía enviada a un elemento pasivo.

### **6.1 DESCRIPCIÓN DE LA TOOLBOX dSPACE <ELECTRIC MOTOR CONTROL BLOCKSET>**

Con ayuda de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset> detallada en la Figura 68, se desarrolla una aplicación para la generación de señales de control basada en modulación por ancho de pulsos (PWM).

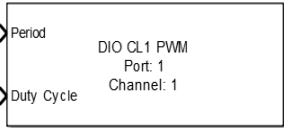
**Figura 68. Bloques de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>**



En la Tabla 15, se detallan los bloques empleados para la generación de la señal PWM, ya que esta Toolbox presenta diversos tipos de bloques para implementar en otro tipo de aplicaciones que no serán utilizados.

**Tabla 15. Descripción de los bloques de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>**

Bloque	Descripción	Características E/S				
		<p>La siguiente tabla muestra la escala entre el ciclo de lavado y entrada de Simulink del bloque:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Simulink Input</th> <th>Duty Cycle</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 ... 1</td> <td>0 ... 100%</td> </tr> </tbody> </table>	Simulink Input	Duty Cycle	0 ... 1	0 ... 100%
Simulink Input	Duty Cycle					
0 ... 1	0 ... 100%					

Bloque	Descripción	Características E/S	
		Puerto	Descripción
 <p>DIO_CLASS1_PWM_BL1</p>	<p>Este bloque permite ajustar el periodo y el ciclo de trabajo en tiempo de ejecución, una señal PWM generada en tiempo de ejecución.</p>	Input	
		Period	<p>-Especifica el período de la señal PWM.</p> <p>-Tipo de datos: doble</p> <p>-Gama: 100 ns... 1.34 s</p> <p>-Resolución: 10 ns</p>
		Duty Cycle	<p>-Especifica el ciclo de trabajo de la señal PWM.</p> <p>-Tipo de datos: doble</p> <p>-Rango: 0... 1</p> <p>-La resolución del ciclo de trabajo depende del valor período especificado. La resolución para intervalos de tiempo dentro de la unidad de generador de señal PWM es de 10 ns. Si el intervalo de tiempo resultante del ciclo de trabajo solicitadas no puede ser representado en múltiplos de 10 ns, el valor real se determina por el redondeo hacia el valor más cercano posible</p>

A continuación se desarrolla la aplicación a manera de ejemplo, mostrando el proceso necesario para generar señales PWM.

## 6.2 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL PWM

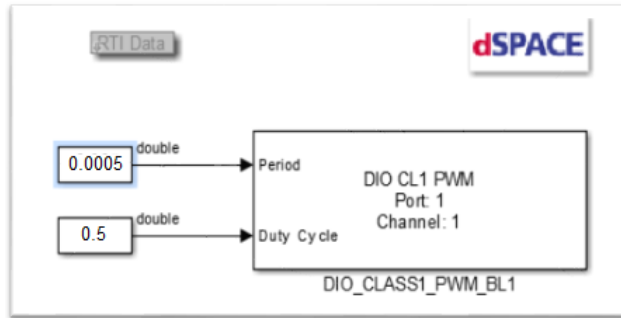
Los bloques que se utilizan para generar señales PWM en los puertos de salida de señales digitales, se describen en la Tabla 16.

**Tabla 16. Descripción de bloques a implementar para el modelo de generación de señal PWM**

<b>Bloque</b>	<b>Librería</b>	<b>Parámetro</b>
DIO_CLASS1_PWM_BL1	dSPACE RTI Electric Motor Control Blockset	Event Mode: Trigger Signal Conector Pin: DIO1 ch1 High Level: 2.5 [V]
Constant 1	Sources	Señal de 0.5 (50%) asociado como la entrada de ciclo de trabajo del bloque DIO_CLASS1_PWM_BL1
Constant 2	Sources	Señal de 0.002 (f = 2kHz) asociado como el periodo de la señal entrada del bloque DIO_CLASS1_PWM_BL1
RTI Data		Este bloque se utiliza en RTI, para almacenar datos internos dependiendo del modelo. Se debe mantener este bloque en el nivel raíz del modelo. Eliminar este bloque resultará en pérdida de datos. Nunca eliminar o copiar este bloque.

Construyendo el modelo en Simulink, se tiene el esquema mostrado en la Figura 69.

**Figura 69. Esquema de la aplicación en Simulink para la generación de señal PWM**



Ahora se genera el Código C en la opción Build Mode (🔧) de la barra de tareas (o se presiona CTRL+B) y se envía la aplicación creada a la MicroLabBox. Entre las opciones del bloque DIO\_CLASS1\_PWM\_BL1 se designa que la señal se pueda monitorizar en el puerto DIO ch1 de la MicroLabBox. En la Figura 70 se detalla la nomenclatura de los canales de salida del puerto Digital I/O A del módulo.

**Figura 70. Descripción del Puerto Digital I/O A**

Digital I/O A	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND	18	GND	34	DIO1 ch32
	2	DIO1 ch16	19	GND	35	DIO1 ch31
	3	DIO1 ch15	20	GND	36	DIO1 ch30
	4	DIO1 ch14	21	GND	37	DIO1 ch29
	5	DIO1 ch13	22	GND	38	DIO1 ch28
	6	DIO1 ch12	23	GND	39	DIO1 ch27
	7	DIO1 ch11	24	GND	40	DIO1 ch26
	8	DIO1 ch10	25	GND	41	DIO1 ch25
	9	DIO1 ch9	26	GND	42	DIO1 ch24
	10	DIO1 ch8	27	GND	43	DIO1 ch23
	11	DIO1 ch7	28	GND	44	DIO1 ch22
	12	DIO1 ch6	29	GND	45	DIO1 ch21
	13	DIO1 ch5	30	GND	46	DIO1 ch20
	14	DIO1 ch4	31	GND	47	DIO1 ch19
	15	DIO1 ch3	32	GND	48	DIO1 ch18
	16	DIO1 ch2	33	GND	49	DIO1 ch17
	17	DIO1 ch1	50	GND	50	GND

Fuente: Manual dSPACE. MicroLabBox Hardware. Data Sheets. May 2015

Una vez enviada la aplicación a la MicroLabBox, con ayuda de un osciloscopio se pueden detallar los resultados de la implementación de la Toolbox dSPACE <Electric Motor Control Blockset>

La señal generada tiene un ciclo de trabajo del 50%, frecuencia de 2 [kHz] y un valor de tensión pico a pico de 2.6 [V], cumpliendo con los parámetros de configuración de los bloques.

Las figuras 71 y 72 se muestran la conexión de los elementos para la visualización de la señal PWM y la medida del osciloscopio de dicha señal, respectivamente.

**Figura 71. Conexión de los elementos para visualizar la señal PWM**



**Figura 72. Señal PWM generada por medio de la Toolbox <Electric Motor Control Blockset>**



Con la ayuda de esta Toolbox se pueden implementar señales de control ajustables, permitiendo hacer cualquier tipo de control en los diferentes bloques de electrónica de potencia de una micro-red.

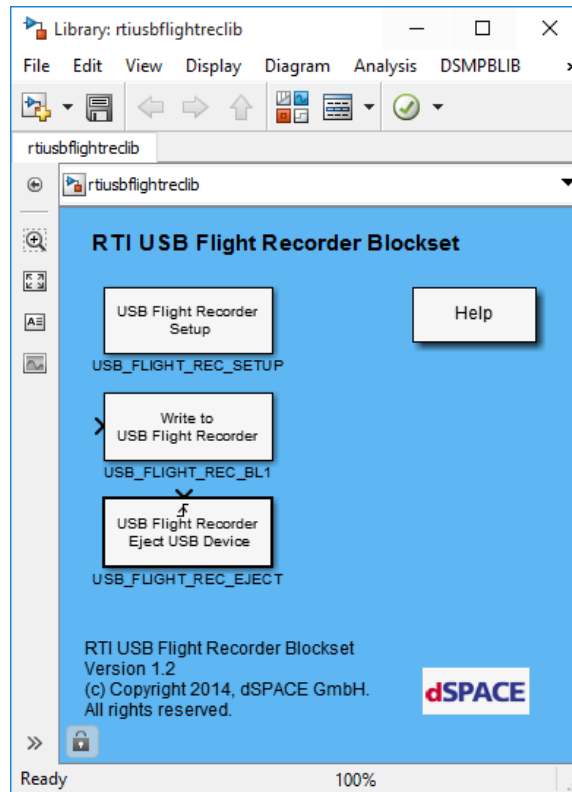
### **6.3 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA REGISTRO DE DATOS EN DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO MASIVO USB**

Adicionalmente como trabajo extra se plantea el desarrollo de una aplicación en Matlab/Simulink que permite la adquisición de información desde la MicroLabBox a una unidad externa de almacenamiento USB por medio de la Toolbox dSPACE <RTI USB Flight Recorder Blockset>, lo cual es de gran utilidad al momento del análisis de dicha información.

**6.3.1 Descripción de la Toolbox empleada <RTI USB Flight Recorder Blockset>** La Toolbox dSPACE <RTI USB Flight Recorder Blockset> puede realizar la toma de datos en periodos extensos de muestreo y en tiempo real. Los valores de las variables seleccionables se escriben en el dispositivo de


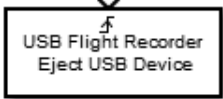
almacenamiento masivo USB conectado durante la simulación. El tamaño de almacenamiento está limitado sólo por la capacidad de la unidad USB a conectar. La Figura 73 muestra la Toolbox empleada para el desarrollo de la aplicación para registro de datos en un dispositivo UBS.


**Figura 73. Toolbox <Rti Usb Fligh Recorder Blockset>**



En la Tabla 17 se detallan las características y funciones de los bloques de la Toolbox <Rti Usb Fligh Recorder>

**Tabla 17. Descripción de los bloques de la Toolbox <dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset>**

Bloque	Descripción	Características E/S	
 <p>Write to USB Flight Recorder USB_FLIGHT_REC_BL1</p>	<p>Durante la simulación, los valores de la variable seleccionada (conectada al bloque) en tiempo real se escriben en el dispositivo USB conectado a la MicroLabBox. Cuando se haya terminado el tiempo de registro de datos, el módulo envía un archivo de extensión .BIN a la unidad externa y así poder leer la información adquirida desde una computadora. Al mismo tiempo se pueden grabar un máximo de 250 diferentes variables en tiempo real.</p>	<p><b>Puerto</b></p> <p>Write to USB Flight Recorder</p>	<p><b>Descripción</b></p> <p>Guarda las variables en tiempo real grabadas en el dispositivo de almacenamiento masivo USB conectado.</p> <p>Tipo de datos: seleccionable (solo Int8, UInt8, Int16, UInt16, Int32, UInt32)</p> <p>Rango: Depende del tipo de datos seleccionado</p>
 <p>USB Flight Recorder Eject USB Device USB_FLIGHT_REC_EJECT</p>	<p>Este bloque puede usarse para evitar pérdida de datos cuando se desconecta el dispositivo de almacenamiento USB mientras se ejecuta una aplicación. El bloque puede ser desencadenado por un flanco ascendente, un flanco descendente o en ambos. También puede especificar un “function-call” para expulsar el dispositivo.</p>	<p><b>Puerto</b></p> <p>Trigger Input</p> <p>Trigger Type</p>	<p><b>Descripción</b></p> <p>Especifica la señal de disparo para expulsar el dispositivo de almacenamiento masivo USB de su hardware.</p> <p>Tipo de datos: la entrada de disparador o “Function-call”.</p> <p>Rising: Especifica para expulsar el dispositivo de almacenamiento masivo de USB si se detecta un flanco ascendente en la entrada de disparador.</p> <p>Falling: Especifica para expulsar el dispositivo de almacenamiento masivo de USB si se detecta un flanco descendente</p>

Bloque	Descripción	Características E/S	
			<p>en la entrada de disparador.</p> <p>Either: Especifica para expulsar el dispositivo de almacenamiento masivo de USB si se detecta un flanco ascendente o un flanco descendente en la entrada de disparador.</p> <p>FUNCTION-call: Especifica para expulsar el dispositivo de almacenamiento masivo USB por medio de una "function-call"</p>
 <p>USB Flight Recorder Setup ↓ USB_FLIGHT_REC_SETUP</p>	<p>Este bloque se utiliza para inicializar la grabadora de vuelo de USB en el modelo y especificar el comportamiento de sobrescribir. Se crea un nuevo archivo en el dispositivo de almacenamiento masivo USB para cada adquisición de datos que se inicia. Si un archivo ha alcanzado un tamaño de archivo de 32 MB, se cierra y se abre automáticamente un nuevo archivo.</p>	<p><b>Modo</b></p>	<p><b>Significado</b></p>
		<p>Discard new data</p>	<p>Cuando el dispositivo de almacenamiento masivo USB está lleno, no se registran mas datos</p>
		<p>Replace old data</p>	<p>Cuando el dispositivo de almacenamiento masivo USB ha alcanzado 90% de su capacidad, se sobrescribirán los archivos más antiguos por nuevos archivos</p>

A continuación se desarrolla una aplicación mostrando la funcionalidad de la Toolbox y los pasos necesarios para registrar datos a un dispositivo USB.

**6.3.2 Implementación de la Toolbox <RTI USB Flight Recorder Blockset>** Se plantea como ejemplo el monitoreo de dos señales generadas en Simulink durante un lapso de 15 segundos.

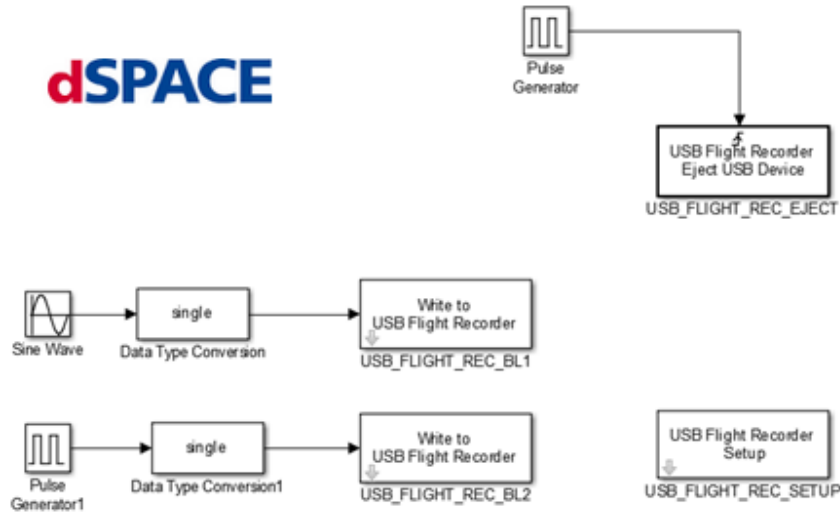
Los bloques para construir la aplicación se detallan en la Tabla 18.

**Tabla 18. Descripción de bloques a implementar para el modelo de lectura de datos**

Bloque	Librería	Parámetro
USB_FLIGHT_REC_BL1	dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset	Variable name: Senoidal Data Type: single
USB_FLIGHT_REC_BL2	dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset	Variable name: Pulso Data Type: single
USB_FLIGHT_REC_SETUP	dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset	Discard New Data
USB_FLIGHT_REC_EJECT	dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset	Trigger type: Rising
Pulse Generador		Señal de pulso con amplitud 1, período 12s y ancho de pulso de 5% del periodo
Pulse Generador1	Sources	Señal de pulso con amplitud 0.2, período 1s y ancho de pulso de 5% del periodo
Sine Wave	Sources	Señal senoidal de amplitud 0.4 con frecuencia 1 rad/s y desfase 0°
Data Type Conversion	HDL coder	Opuput data Type: Single

Construyendo el modelo en Simulink, se obtiene el esquema mostrado en la Figura 74.

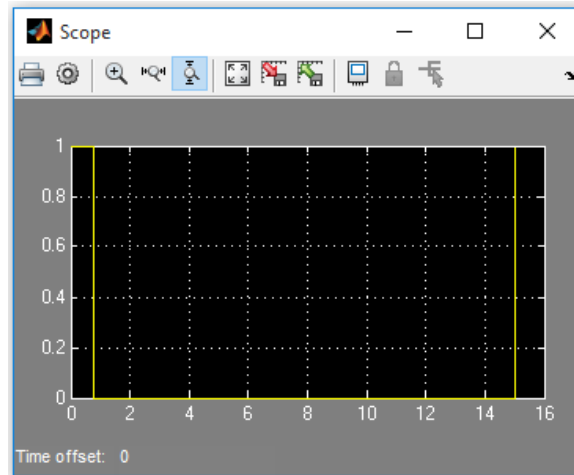
**Figura 74. Implementación en Simulink de la toolbox <dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset>**



El bloque <USB Flight Recorder Eject USB Device> registra una señal inicial de alto nivel enviada por el <Pulse Generator> al inicio de la simulación, pero no detecta el flanco ascendente que se presenta, puesto que en este instante la señal de pulso empieza en un valor determinado. Seguidamente un segundo después de iniciada la simulación, la señal de entrada pasa de 1 a 0 presenciándose un flanco descendente (falling), pero bajo estas condiciones el módulo dSPACE solamente está registrando las señales Sine Wave y Pulse Generator 1 al bloque Write to USB Flight Recorder correspondiente. A los 15 segundos de simulación se activa de nuevo la señal de Pulse Generator (flanco ascendente) y en esta condición se da por terminado el proceso de lectura de señal. La información ya queda registrada en el dispositivo de almacenamiento y al mismo tiempo el bloque <USB Flight Recorder Eject USB Device> al registrar el flanco ascendente, permite que se pueda retirar de forma segura la unidad USB. La Figura 75

muestra la gráfica de la señal de entrada al bloque <USB Flight Recorder Eject USB Device>

**Figura 75. Gráfica de la señal de entrada al bloque <USB Flight Recorder Eject USB Device>**



Ahora se procede a enviar la aplicación, antes de esto se debe conectar la unidad de almacenamiento masivo USB a la MicroLabBox, de manera instantánea se encenderá el LED del puerto USB indicando la conexión, como se observa en la Figura 76.

**Figura 76. Conexión USB**




En el entorno de trabajo de Simulink se procede a generar el Código C en la opción Build Mode (🏗️) de la barra de tareas y se envía la aplicación creada a la MicroLabBox.

En el proceso de codificación, el tiempo de espera es aproximadamente el tiempo de lectura de datos, durante este proceso el LED del puerto USB permanece titilando, hasta que finalice la simulación quedando apagado, como indicación que ya la aplicación montada en la MicroLabBox generó un archivo .BIN en el dispositivo USB y posteriormente se procede a retirar la unidad para poder hacer la lectura de datos en una computadora.

El archivo creado por defecto esta nombrado de la misma manera que en el modelo creado en Simulink, con la diferencia que adicionalmente se muestra la fecha y hora de registro de finalización del proceso como se muestra en la Figura 77.

**Figura 77. Archivo .BIN creado para lectura de datos**

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
 test1.ppc_2015_10_09_16_14_36	09/10/2015 4:14 p....	Archivo BIN	2.374 KB

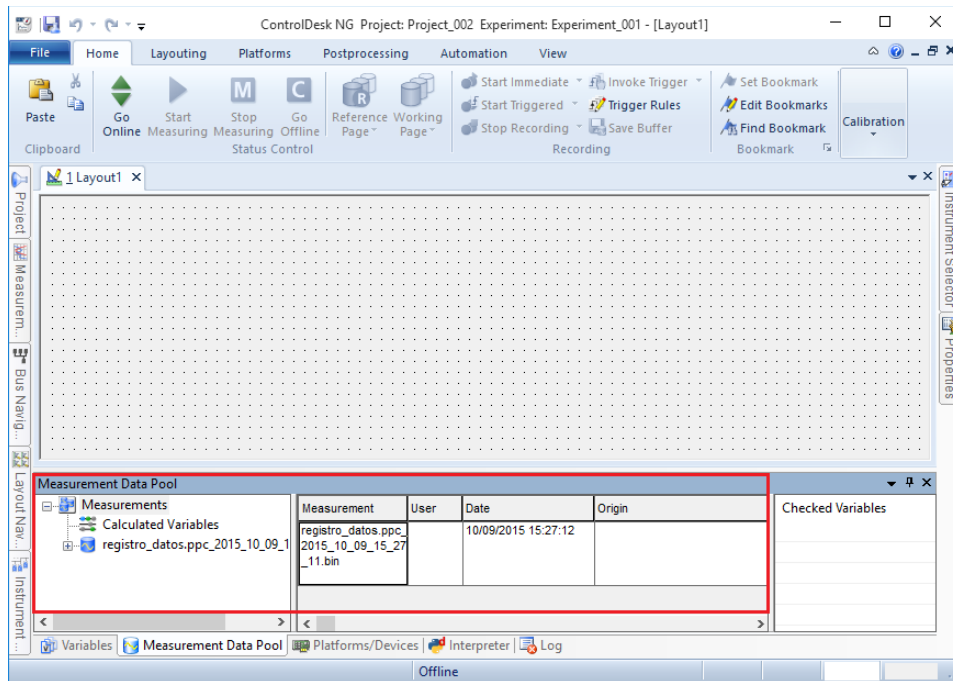
**6.3.3 Lectura de información registrada en la unidad de almacenamiento masivo USB** Teniendo el archivo de los datos de las variables registradas, se procede a la visualización de la información en Matlab.

El archivo generado por la MicroLabBox es de extensión .BIN como se observa en la sección anterior, así que se recurre a convertir el archivo a extensión .MAT por medio de Control Desk (Software de dSPACE) para ser visualizado en Matlab, como se explica a continuación.

1 - Ejecutar Control Desk




**Figura 79. Ventana Control Desk - Apertura archivo .BIN**



6 - Clic derecho en el icono registro\_datos.ppc\_2015\_10\_09\_15\_27\_11.bin, en la opción de exportar de selecciona el tipo de archivo que se quiere guardar y se selecciona la extensión .MAT para que pueda ser legible en Matlab.

7 - Por comodidad aunque no es necesario, se puede editar el nombre del archivo como se muestra en la Figura 80.

**Figura 80. Archivo .MAT para lectura de datos**

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
 test1	09/10/2015 4:17 p....	MATLAB Data	4.689 KB

Se ingresa el archivo .MAT al entorno de trabajo de Matlab, y en la ventana de comandos se ingresa el código mostrado en la Figura 81.

**Figura 81. Código para gráfica de datos almacenados**

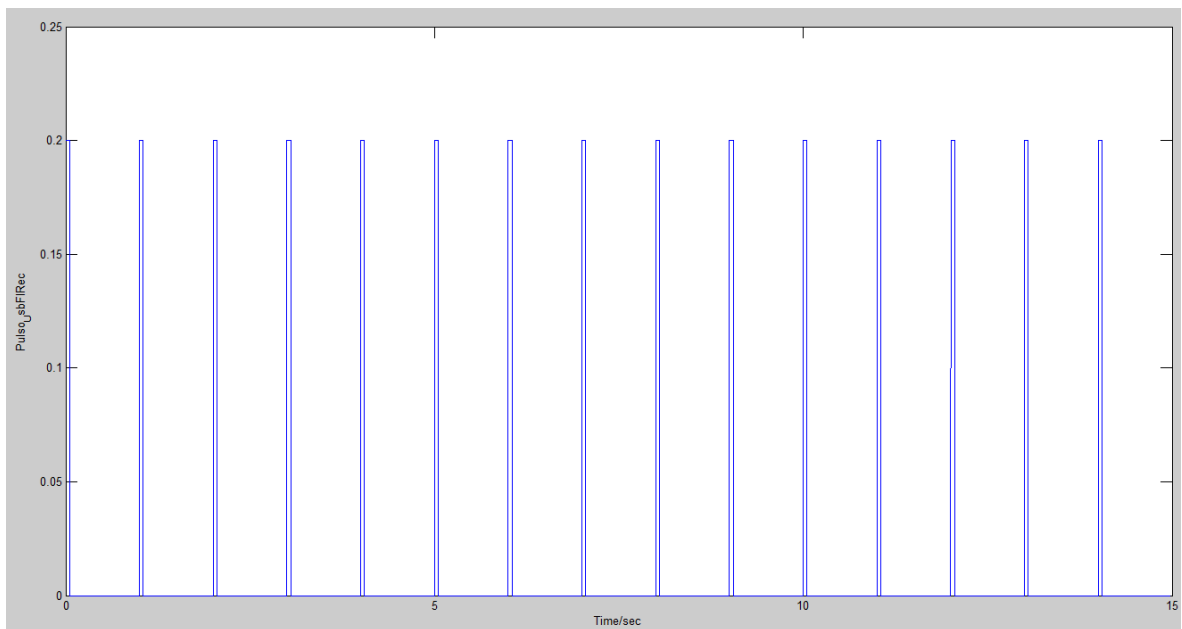
```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started

fx >> clc;close all;clear all
load test1.mat
varValues = test1;
n = 1;
figure;
use_XIndex = varValues.Y(n).XIndex;
plot(varValues.X(use_XIndex).Data, varValues.Y(n)
xlabel('Time/sec');
ylabel(varValues.Y(n).Name);
```

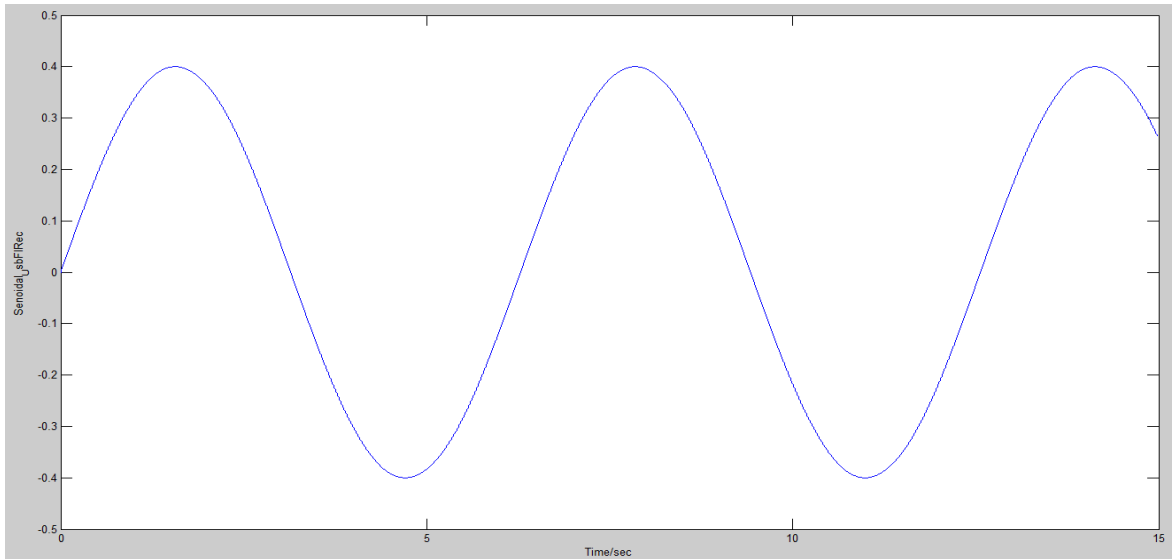
Donde n, indica el número de variables registradas, que para este ejemplo son 2 (señal de pulsos y señal senoidal).

Ejecutando el código se puede graficar la variable registrada durante el tiempo configurado para la lectura de información como se muestra en las figuras 82 y 83.

**Figura 82. Gráfica de datos almacenados para n = 1: señal de pulsos**



**Figura 83. Gráfica de datos almacenados para n =2: señal senoidal**



Gracias a la toolbox <dSPACE RTI USB Flight Recorder Blockset> se pueden monitorear hasta 250 variables presentes en un sistema eléctrico.

## 7. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado contribuye con el diseño del laboratorio de integración energética y micro-redes, que el grupo GISEL de la E<sup>3</sup>T está construyendo. Se seleccionaron los elementos principales que componen un laboratorio de micro-redes, como lo es el sistema de control, los sensores necesarios para ser conectados a una red y las etapas de acondicionamiento de señales que permiten la conexión entre los sensores y el sistema de control, para poder tomar medidas. Adicionalmente se identificaron diferentes arquitecturas de micro-redes implementadas y estudiadas alrededor del mundo y se planteó una arquitectura básica con todos los elementos que la conforman. Otro punto importante fue la implementación de software para el desarrollo de aplicaciones, basadas en el sistema de control seleccionado.

La selección del sistema de control, se determinó basados en las características técnicas proporcionadas por el mismo, comparadas con otros productos de la misma categoría, además del precio más factible. Este módulo de control es muy importante, debido a que es el eje principal del laboratorio de micro-redes, el cual se encarga de monitorizar y controlar cualquier sistema eléctrico.

La selección de la instrumentación de medida, se basó en sensores tipo magnéticos (de efecto Hall) debido a que son los más adecuados para el registro de señales de tensión y corriente tanto en DC como AC, también a que han sido probados e implementados en otros proyectos de la universidad dando la posibilidad de tener una referencia técnica de funcionamiento. La importancia de estos sensores en un laboratorio de micro-redes radica en el hecho de que sin ellos, no sería posible registrar las diferentes variables eléctricas en sistemas como una micro-red. Esto permite determinar el comportamiento de dichos

sistemas eléctricos, así como evaluar cada una de las etapas y/o elementos presentes en los mismos.

Al estudiar las diferentes topologías presentes en micro-redes alrededor del mundo, se concluye que todas estas comparten una estructura básica, determinada por sistemas encargados de generación, electrónica de potencia, almacenamiento y control y gestión. La capacidad de la carga conectada a una micro-red, se ve limitada solo por la cantidad de fuentes de generación presentes en la misma. Dichas cargas y fuentes pueden ser de cualquier naturaleza (AC o DC), de igual manera que el tipo de micro-red, aunque en algunos casos éstas pueden ser de ambos tipos, denominándose así como micro-red híbrida (AC-DC). Se definieron las principales ventajas y desventajas con la finalidad de determinar la complejidad de la puesta en marcha de una micro-red.

Basados en el hecho de que un sistema de control debe tener la capacidad de adaptarse a cualquier sistema eléctrico, para su respectivo análisis, monitorización y control, se crearon aplicaciones que permiten la lectura de las diferentes señales de entrada al módulo de control, así como la generación por medio de dicho módulo, de señales de control para la etapa de electrónica de potencia. Debido a que el análisis de un sistema eléctrico real debe contar con los sensores y las etapas de adecuación descritos en este trabajo, con los cuales no se disponen actualmente, se implementó una aplicación de prueba, con la cual se representó la lectura de señales con generadores de señales, dando como resultado la evidencia del funcionamiento de los bloques de las Toolbox empleadas en los modelos de las aplicaciones, así como del módulo de control.

Con la aplicación creada y los sensores seleccionados, es posible monitorizar y evaluar el comportamiento del sistema de paneles fotovoltaicos, instalado en el laboratorio de control de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Dicho sistema no permite hacer control de sus etapas debido

a que este lo realizan las mismas etapas implementadas (reguladores, convertidor).

Las aplicaciones desarrolladas en este proyecto tienen la posibilidad de ser modificadas y adaptadas, en caso que se requiera el análisis de otro sistema eléctrico con diferentes características al presentado (sistema de paneles fotovoltaicos).

Se recomienda que los próximos aportes a este proyecto, incluyan la creación de una aplicación de control en Matlab/Simulink por medio de las Toolbox dSPACE, con el fin de definir la distribución de energía de las diferentes fuentes presentes en el sistema. También se podrían diseñar prácticas de laboratorios en sistemas de control, accionamientos eléctricos y/o máquinas eléctricas, como (p.e) el control de velocidad de un motor por medio de convertidores DC/DC utilizando el módulo dSPACE.

Como trabajo complementario se propone la creación de más aplicaciones utilizando las demás Toolbox dSPACE asociadas al módulo de control MicroLabBox, así como el aprovechamiento de ControlDesk en cuanto a implementaciones de aplicaciones en tiempo real.

Este proyecto abre muchas puertas para nuevos trabajos de investigación asociados al laboratorio de integración energética y micro-redes en desarrollo en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatigará (Piedecuesta, Santander), sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

## BIBLIOGRAFÍA

A, Bouscayrol. Delarue. X, Guillaud. Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine. Renewable Energy. MAY 2005

ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE ENERGÍAS RENOVABLES. Tipos de fuentes de energía renovable [en línea]. <http://www.appa.es/01energias/08tiposfuentes.php> [citado el 9 de Julio de 2015]

BIBLIOTECA DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas [en línea]. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/1.+Introduccion.pdf> [citado el 10 de Julio de 2015]

HATZIARGYRIOU, Nikos. ASANO, Hiroshi. IRAVANI, Reza. MARNAY, Chris. Microgrids. IEEE Power and Energy magazine, JULY/AUGUST 2007

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS. Introducción al concepto de microrredes [en línea]. <http://www.iie.org.mx/boletin032010/tenden.pdf> [citado el 9 de Julio de 2015]

ITO, Youichi. ZHONGQING, Yang. AKAGI, Hirofumi. DC Micro-grid Based Distribution Power Generation System

LASSETER, Robert H. CERTS Microgrid Laboratory Test Bed. Submitted to IEEE Transactions on Power Delivery, JULY 2010

LASSETER, Robert H. MicroGrids. IEEE Distributed Generation, 2002

LEM. Datasheet Current Transducer LA 25-NP [en línea]. <http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf> [citado el 17 de Septiembre de 2015]

LIU, Xiong. WANG, Peng. LOH, Poh Chiang. A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 2, NO. 2, JUNE 2011

Manual dSPACE. MicroLabBox Hardware. Data Sheets. May 2015

Manual dSPACE. MicroLabBox. Hardware Installation and Configuration. May 2015

MENESES AGRESOTH, Víctor Elías. ALMEYDA RUEDA, Jaime Armando. Sistemas de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. 94 p

MORENO, Andres F. NAVA, Eduardo Mojica. LVDC Microgrid Perspective For A High Efficiency Distribution System. National University of Colombia. IEEE. 2014

NATIONAL INSTRUMENTS. Partes de un sistema DAQ [en línea]. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/> [citado el 17 de Septiembre de 2015]

REY, Juan. VERGARA, Pedro. Diseño de una micro-red de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012. 163 p

ROCABERT, Joan. LUNA, Alvaro. BLAABJERG, Frede. RODRÍGUEZ, Pedro. Control of Power Converters in AC Microgrids. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 11, NOVEMBER 2012

RYAN L, Kelly. GIOVANNA, Oriti. ALEXANDER L, Julian. Reducing Fuel Consumption at a Remote Military Base. IEEE Electrification Magazine. DECEMBER 2013

SOLANO, J. MULOT, J. HAREL, F. HISSEL, D. PÉRA, M. C. JOHN, R. I. AMIET, M. Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013

SUÁRES LARGO, Johan Sebastián. RIBERO FIGUEROA, Xiomara. Introducción al control de fuentes alternativas de energía. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015. 66 p

UNIVERSIDAD DE JAÉN. Regulador fotovoltaico [en línea]. [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/03\\_regulador/01\\_basico/4\\_regu\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/03_regulador/01_basico/4_regu_01.htm) [citado el 10 de Julio de 2015]

UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR Cuerpo de profesores. Introducción a Simulink [en línea]. <http://prof.usb.ve/lamanna/cursos/simulink.pdf> [citado el 27 de Septiembre de 2015]

# **ANEXOS**

(Ver documentos adjuntos)