 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

HARDWARE IN THE LOOP PARA LA EMULACIÓN DE UNA BATERÍA DE ION DE LITIO PARA APLICACIONES DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

Juana María Bustamante Montoya

Programa Académico

Ingeniería Mecatrónica

Juan Pablo Villegas

Diego Herrera

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

23-07-2022

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto era simular el comportamiento de una batería de ion de litio a través de *“Hardware In the Loop”*. Se partió del análisis y revisión de los manuales de cada uno de los dispositivos usados para la simulación con el fin de entender correctamente el comportamiento de cada uno de ellos y de esta manera identificar posibles problemas durante la ejecución. También sirvió para identificar la correcta configuración de cada uno de los dispositivos antes de generar la simulación.

Se evidencio que se debe trabajar a bajas frecuencias, adicionalmente fue necesario utilizar un sensor de corriente debido a que se identificó que una de las terminales a usar se encontraba quemada y el sensor sirvió de solución a este inconveniente. En cuanto a las visualizaciones de las señales se requirió el uso de un software de recolección de datos adicional para poder obtener los gráficos que no se visualizan en la simulación en tiempo real.

Finalmente, se validó el funcionamiento correcto de los dispositivos: Speedgoat, fuente de cuatro cuadrantes o banco de potencia y Matlab – Simulink los cuales en conjunto dan como resultado el HIL.

Palabras clave: Baterías, Speedgoat, MATLAB, *“Hardware in the Loop (HIL)”*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer a mi mamá y a mi hermana por apoyarme en este proceso de formación, ya que sin ellas no lo habría logrado, al profesor Diego Hincapié Zuluaga ya que siempre me impulso a mejorar como estudiante, persona y como profesional.

Quiero agradecer a todos mis compañeros y amigos por estar siempre ahí cuando los necesite, pero especialmente Juan Pablo Y Carolina por apoyarme en los últimos semestres de la carrera y en la elaboración de este trabajo; al Profesor Elkin Henao por darme la oportunidad de realizar el proyecto en el Laboratorio de electrónica y energías renovables en parque i, quienes me prestaron las herramientas necesarias para la realización de éste. También quiero agradecer a mi asesor Juan Pablo Villegas Ceballos por la pertinencia al corregirme en cada error cometido durante el proceso de elaboración del proyecto.

Finalmente me gustaría agradecerle a Cristian Escudero por darme las pautas necesarias para correcto avance en cada paso del proyecto.

En memoria de María Isabel Montoya Arroyave y José Luis Montoya

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

.TXT → Archivo de texto

A2A5J6 → Conector D-SUB15 de dos filas

Ah → Amperio hora.

BTMS → Sistema de gestión térmica de una batería.

C → Capacitor.

Duty → Ciclo de trabajo

GPIB → Bus de interfaz de propósito general

Hercules → *Software* para adquisición de datos por puerto serial.

HIL → Sistema de prueba que simula en tiempo real "*Hardware In the Loop*".

Host Link → Protocolo de comunicación

Hz → Unidad de frecuencia de un sistema

I → Corriente.

KERNEL → Núcleo, es un software que es parte fundamental de un sistema

LAN → Red de área local

LSB → Bit menos significativo

MATLAB® → *Software* de programación para analizar, desarrollar y crear modelos de sistemas numéricos.

MSB → Bit más significativo

Neural Network → *librería de MATLAB de redes neuronales para la clasificación binaria y multiclase*

Q → Capacidad de descarga.

R → Resistencia.

RCP → Llamada a Procedimiento Remoto

RJ45 → Puerto de red de área local

RS 232 → Es un interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Scope → Nombre que se le da al bloque que proporciona la visualización de resultados en *Simulink*

Simscape Electrical™ → Librerías de componentes para modelizar y simular sistemas electrónicos, mecatrónicos y eléctricos.

Simulink Coder™ → Genere código C y C++ desde modelos de *Simulink*.

Simulink Real-Time™ → Prototipado rápido de sistemas de control y pruebas de hardware-in-the-loop.

Simulink® → Es un sistema de diseño de diagramas de bloques para modelos asociado a *MATLAB*.

SOC → Estado de carga de una batería.

Speedgoat → Dispositivo para emular sistemas en tiempo real.

Speedgoatlib → Comando de *MATLAB* para llamar una librería única de “*Speedgoat*”

Stateflow® → Modelice y simule la lógica de decisión utilizando máquinas de estados y diagramas de flujo

U → Voltaje.

xPC target → Nombre anterior de *Simulink Real-Time*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
1.1.	OBJETIVOS.....	8
1.1.1.	General.....	8
1.1.2.	Específicos.....	8
2.	MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.	Tipos de baterías.....	11
2.1.1	<i>Baterías de plomo-ácido:</i>	11
2.1.2	<i>Batería de níquel-cadmio (Ni-Cd):</i>	11
2.1.3	<i>Batería de níquel-hidruro metálico (Ni-MH):</i>	11
2.1.4	<i>Baterías de iones de litio (Li-ion):</i>	11
2.1.5	<i>Baterías de polímeros de litio (Li-Po):</i>	12
2.2	Aplicaciones.....	13
2.2.1.	<i>Sistemas de almacenamiento con baterías de flujo:</i>	13
2.2.2.	<i>Sistemas de gestión térmica de baterías (BTMS) para aplicaciones de movilidad:</i>	14
2.3	Modelos de circuitos equivalente.....	15
2.3.1	<i>Resistencia interna (Rint):</i>	16
2.3.2	<i>Modelo de Thévenin</i>	16
2.3.3	<i>Modelo de Thévenin doble</i>	17
2.4	<i>“Hardware in the Loop” (HIL)</i>	18
2.4.1	<i>“Hardware-in-the-loop” con MATLAB y Simulink</i>	19
2.5	<i>“Speedgoat” Education Real-Time Target Machine”</i>	19
2.6	Fuente cuatro cuadrantes BOP 20-50GL.....	20
2.7	Software <i>“Hercules Utility”</i>	21
2.8	Sensor de corriente ACS712.....	22
3.	METODOLOGÍA.....	23
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	50
5.1.	Conclusiones.....	50

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.2. Trabajos futuros.....51

REFERENCIAS 52

APÉNDICE..... 55

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Las baterías son un elemento primordial en la vida cotidiana, las cuales permiten tener portabilidad y autonomía a algunos dispositivos. Adicionalmente en los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables permiten almacenar la energía generada en las horas pico de generación para usarla en las horas en la que la generación es baja y la demanda de energía es alta. Para el desarrollo de dispositivos de control, gestor de potencia y carga de las baterías es necesario realizar pruebas experimentales, las cuales por estar en un estado de prueba pueden llevar a la batería a un estado de estrés, generando un posible deterioro acelerado de la misma. Para poder generar condiciones de prueba seguras para este tipo de estrategias, normalmente en la literatura se recomienda utilizar estrategias de emulación sobre computadores industriales, la cual es conocida como *“Hardware In the Loop (HIL)”*. Este trabajo busca implementar un sistema *“hardware in the loop”* para baterías de Ion de Litio que permita probar bajo un entorno experimental seguro las estrategias de control y gestión desarrolladas para aplicaciones en vehículos y Microrredes eléctricas

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. General

Implementar un sistema *“hardware in the loop”* para la emulación de baterías de ion litio con electrónica de potencia.

1.1.2. Específicos

- Consultar en las bases de datos de la institución modelos de baterías de ion de Litio.
- Emular uno de los modelos consultados de una batería de ion de litio sobre un sistema Hardware Loop.
- Probar el modelo emulado sobre un sistema de potencia utilizando los equipos del Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables .
- Desarrollar un manual de usuario para el manejo del emulador de baterías implementado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el capítulo dos de este trabajo se muestra la información necesaria sobre las baterías, los tipos de baterías, los modelos dinámicos investigados, el *software MATLAB (Simulink)* y *hardware "Speedgoat"* con los cuales se van a trabajar el sistema de prueba "*hardware in the loop*", fuente de alimentación cuatro cuadrantes y el *software Hercules* con el cual se van a obtener los datos en el tiempo real de descarga de la batería.

En el capítulo tres se muestra el proceso de verificación de compatibilidad entre el *software* y *hardware* utilizados. Posterior a esto, se inicia con la configuración del modelo seleccionado para emular el comportamiento de la batería, donde a través de un osciloscopio se obtiene una muestra de descarga en tiempo real.

El capítulo cuatro, hace referencia al análisis de los resultados obtenidos del modelo ajustado con los parámetros ideales y conexiones al banco de alimentación, esto con el fin de realizar el ciclo completo de descarga de la batería donde se recolectan los datos para realizar la comparación con la información obtenida en el capítulo anterior.

Por último, se concluye el trabajo realizado teniendo en cuenta los aportes, dificultades, y soluciones identificadas durante el desarrollo del proyecto con respecto a todas las herramientas y programas utilizados para la identificación del comportamiento de la batería de ion de litio en su proceso de descarga en tiempo real.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Para Etecé (2021) la batería eléctrica es un dispositivo que puede acumular energía por medio de compuestos electroquímicos en celdas capaces de convertir energía química en energía eléctrica, algunas veces se le suele llamar pila o acumulador eléctrico. Estos generan una corriente continua, la cual sirve para suministrar energía a distintos circuitos eléctricos, teniendo en cuenta su consumo de potencia

“Las baterías contienen celdas químicas que presentan un polo positivo (ánodo) y otro negativo (cátodo)...” (Etecé, 2021).

Conociendo la estructura interna de la batería, se puede explicar el funcionamiento de una batería recargable, cuando esta se va a descargar el ánodo se mueve hacia el cátodo, pero cuando se carga estos se invierten, es decir, el cátodo se mueve hacia el ánodo (Voltimum, 2019). En ambos procesos las celdas transmutan la energía química en eléctrica con un proceso llamado reversible (el cual mantiene el sistema constante, es decir, sin cambio en el proceso que se esté realizando) o irreversible (es una alteración en el sistema sea un aumento o disminución), lo cual depende de cada tipo de batería.

Etecé (2021) afirma que este comportamiento es el que diferencia los dos tipos de celdas¹ que existen:

- Primarias: Corresponden a las que una vez realizan la reacción química en su interior, no pueden regresar a su estado original, así su capacidad de acumular energía se agota. Éstas se les conoce comúnmente como pilas no recargables.
- Secundarias: Son las que pueden recibir energía eléctrica para restablecer su composición química a la inicial y sea reutilizable más de una vez hasta agotar toda su capacidad. También conocidas como las pilas recargables

¹ Celda: “es simplemente una batería en su forma más simple. La celda consiste de tres partes principales: un ánodo y un cátodo, que se encuentran separados por un electrodo”. (Mcclain, 2018)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1. Tipos de baterías

Shops (2022) afirma que los principales tipos de batería dependen de la singularidad de su interior y propiedades electroquímicas, con esto se pueden diferenciar unas de otras.

Algunos tipos son los siguientes:

2.1.1 Baterías de plomo-ácido: Su interior está hecho de electrodos de plomo impregnados de electrolitos de ácido sulfúrico. Habitualmente son económicos y sencillos de fabricar. No soportan sobrecargas ni descargas muy bajas, poseen un peso y volumen alto para la energía que acumula. (Shops, 2022).

2.1.2 Batería de níquel-cadmio (Ni-Cd): Internamente constituido por electrodos de cadmio impregnado de electrolito de hidróxido de potasio. Trabajan en una amplia escala de temperatura y soporta sobrecargas sin causar daños, tampoco se ven afectadas si las descargas son muy bajas, razón por la cual se logra otorgar un buen número de ciclos de recarga (Shops, 2022).

2.1.3 Batería de níquel-hidruro metálico (Ni-MH): Su interior está comprendido por un ánodo de cadmio y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Reemplazan a las baterías de níquel-cadmio dado que tiene una baja pérdida de capacidad² y mayor almacenamiento. No obstante, la cantidad de ciclos que brinda es menor y no funcionan bien en muy bajas temperaturas, reduciendo rotundamente su capacidad (Shops, 2022).

2.1.4 Baterías de iones de litio (Li-ion): Su interior está compuesto de un ánodo de grafito, un cátodo de óxido de cobalto y trifilina u óxido de manganeso. Con respecto a los tipos de baterías mencionado anteriormente son más modernas, su capacidad está ligada con el peso y el volumen, poseen un factor de auto descarga muy pequeño, no se ven alteradas por la reducción de la capacidad (más conocido como efecto memoria) y tiene la posibilidad de cargarse sin haber agotado completamente la energía. Las desventajas más importantes son: No toleran la

² Efecto memoria: "una descarga parcial frecuente, la batería solo "recuerda" la necesidad de energía de las cargas más recientes y, por ello, carga la batería con esta cantidad de energía "recordada" en lugar de con la capacidad total original." (Stihl, 2021)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

alteración de temperatura y no permiten descargas excesivas, cuando esto ocurre causa daños a la batería. (Shops, 2022).

2.1.5 Baterías de polímeros de litio (Li-Po): Son una versión que mejora las particularidades asociadas al peso y volumen, como, por ejemplo: los niveles de descarga. Sin embargo, siguen teniendo el problema de las descargas profundas, así como sus primas de ion de litio quedando imposibilitadas por exceso de descarga (Shops, 2022).

2.1.6 Baterías de flujo: son baterías recargables que contienen sustancias químicas (electrolitos) en estado líquido, los cuales contienen una o más especies de electroactivas³, que fluyen a través de las celdas electroquímicas convirtiendo la energía química en electricidad, las cuales se almacenan en tanques. y se bombean dentro de los “*stacks*” de celdas.

Se recargan fácilmente solo cambiando o sustituyendo el electrolito, donde su capacidad depende del tamaño del tanque en el que se está almacenando y la potencia por el tamaño del “*stacks*”. (CENER, 2016)

Teniendo en cuenta los tipos de baterías, los análisis y comparaciones realizados, se infiere que las baterías de ion de litio son la mejor opción de aplicación y usabilidad en el proyecto. Poseen una versatilidad en cuanto a su peso y volumen, que a la hora de determinar la capacidad y el efecto memoria, no es tan marcado como en las demás anteriormente mencionadas. Sin embargo, éstas aún no soportan altas temperaturas y descargas profundas, las cuales hacen que su vida útil sea limitada y no sea recomendable llevar al extremo su capacidad de descarga.

Con base a lo mencionado anteriormente, se selecciona las baterías de ion de litio para dar continuidad a investigaciones aún en desarrollo del Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables, dado que es necesario identificar como monitorear los límites de descarga de

³ “Las especies electroactivas son todas aquellas sustancias con carácter oxidante y reductor, que son capaces de transportar carga, sin sufrir modificación atómica.” (Fontan, 2016)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

una batería para evitar recalentamiento y descargas profundas, además de identificar que opción de visualización es la más adecuada para su monitoreo.

2.2 Aplicaciones

A pesar de que las baterías de ion de litio tienen limitantes con el sobrecalentamiento y las descargas excesivas, son muy usadas para el almacenamiento de la energía en celulares, automóviles y en los sistemas de energía de emergencia, algunas aplicaciones son las siguientes:

2.2.1. *Sistemas de almacenamiento con baterías de flujo:*

Las baterías de flujo tienen una particularidad en su tecnología que las hace ideales para los sistemas de almacenamiento para energías renovables dado que tiene dos características importantes:

- La energía almacenada no está relacionada con la potencia suministrada.
- Poseen largos periodos de descarga.

Debido a lo anterior, su tecnología aún está en etapa de investigación, ya que se busca reducir costos para aumentar la eficiencia con respecto a los sistemas de litio.

“Las baterías de flujo son una de las soluciones más adecuadas en las que se está trabajando de cara al futuro de los sistemas de almacenamiento conectados a las energías renovables.” (EnelGreenPower, 2020). Se sabe que por la naturaleza y funcionamiento de estas tienden a ser mucho más grandes que las de estado sólido, lo que quiere decir que con su capacidad energética pueden hacer funcionar una instalación o un vehículo, pero cabe aclarar que las de estado sólido son mucho más versátiles e ideales para dispositivos pequeños. Algunas de las energías limpias son intermitentes, ya que no disponen de la luz solar en las noches, por lo que las baterías de flujo son ideales por su gran tamaño y gran potencia, lo cual permite mantener una fábrica en funcionamiento. “Por eso se dice que son el futuro de las renovables.”. (Generación, 2020)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.2. Sistemas de gestión térmica de baterías (BTMS) para aplicaciones de movilidad:

Ortega (2021) explica el propósito de los BTMS (“Battery Thermal Management System”, de sus siglas en inglés) que es básicamente prevenir el desgaste apresurado de las baterías interviniendo el calor suministrado por sus componentes, buscando así que esta funcione de forma prolongada en las mejores condiciones de temperatura.

A la hora de seleccionar una BTMS se sabe que hay varias alternativas a nivel comercial como las activas, pasivas e híbridas. “los BTMS activos basados en aire forzado o líquidos refrigerantes son los más usados en vehículos eléctricos.”. (Ortega, 2021).

Tanto Toyota como Lexus utilizan ventiladores para refrescar las celdas de la batería. Caso contrario, Tesla y Audi emplean canales por los cuales circula un fluido refrigerante que hace contacto con las celdas, pero una de las grandes desventajas de esta aplicación es que se tiene poca información sobre los fluidos dieléctricos, dado que no da una buena respuesta al funcionamiento de la celda; además se tienen los costos que deben ser razonables y garantizar la seguridad del vehículo en caso de tener una colisión.

Con el paso de los años las baterías de ion de litio han sido reconocidas y usadas para muchas aplicaciones, tanto en dispositivos pequeños como en grandes industrias. Como vimos anteriormente, se necesita también comprender el funcionamiento interno, dado que existen varios modelos de baterías, como: el electroquímico que “se basan en las características constructivas y los fenómenos electroquímicos que se producen en el interior de la celda de la batería” (Rodríguez Cea, 2017); el matemático, tiene como “objetivo reproducir las no linealidades de la batería utilizando ecuaciones menos complejas que los formulados para los modelos electroquímicos” (Miniguano Miniguano, como se citó F. Díaz-González, A. Sumper, and G.-B. Oriol, 2016.) y los circuitos equivalentes, que son los que “utilizan elementos eléctricos tales como resistencias, bobinas, condensadores y fuentes de tensión entre otros para simular el comportamiento de la batería.” (Rodríguez Cea, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Flores Gaspar (como se citó en Iglesias et al., 2012) describe como es internamente una o varias celdas, las cuales pueden estar conectadas en serie, paralelo o combinadas; donde las conexiones más importantes dependen del voltaje que se requiere a la salida y la capacidad de almacenamiento de energía que se desee. Por otro lado, Plett (2015) expone en su libro dos modelos fundamentales: Modelos basados en la física y los modelos de circuitos equivalentes, pero en esta investigación se trabaja con los basados sobre los componentes eléctricos, los cuales se aproximan al comportamiento real de una batería. Éstos funcionan de manera análoga dando pie a un sistema dinámico con el que se puede observar cómo se comporta una celda en diferentes escenarios, comprobando así sus puntos críticos.

2.3 Modelos de circuitos equivalente

A los circuitos eléctricos equivalentes se les conocen en la literatura como los mejores en representar la dinámica de una batería de ion-litio, los cuales están constituidos por resistencias, capacitores y una fuente de voltaje ideal; los valores que toman los componentes no siempre corresponden a los reales dado que se busca ver sus comportamientos en ciertas circunstancias. (Flores Gaspar, 2020).

Los modelos más usados son el de Thévenin y Thévenin doble, pero también se tienen el modelo más simple, Resistencia interna (R_{int}), del cual parte toda la elaboración de los modelos. (Flores Gaspar, 2020)

Antes de empezar con los modelos, se define el estado de carga (SOC) como el fenómeno de tener la batería en una carga al 100% (1,0) y pasa a estar descargada al 0% (0,0). Esto es completamente distinto a la capacidad de la batería, dado que ésta se define como la tasa de carga y descarga de corriente constante en un tiempo estimado, se mide en amperios-hora. (Plett, 2015). Se calcula de la siguiente manera:

$$Q(Ah) = I(A) * t(h)$$

Ecuación 1 capacidad de una batería (Company, 2018)

Donde Q es la capacidad de descarga, I es la corriente de descarga en amperios y t el tiempo de descarga en horas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A continuación, se explicará cada uno de los modelos mencionados.

2.3.1 Resistencia interna (R_{int}):

Es el modelo más sencillo que representa el comportamiento de una batería, que está constituido por una fuente de tensión ideal y una resistencia en la cual está la caída de voltaje por la demanda de energía. (Flores Gaspar, 2020)

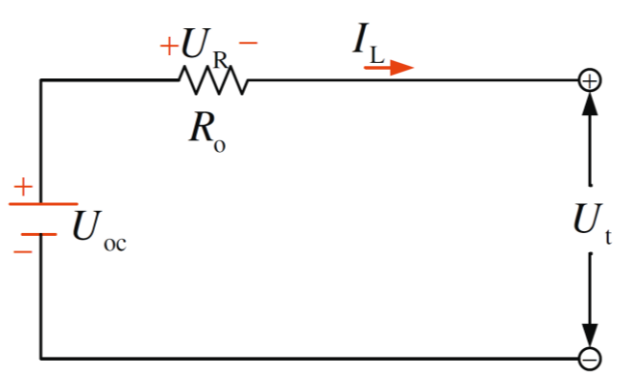


Figura 1. Circuito del modelo de resistencia interna (Hongwen , Rui, Hongqiang, & Shuchun , 2012)

El modelo por su simplicidad ofrece mejores resultados dado que se tiene una descarga constante cuando el circuito está en funcionamiento. Donde U_t es el voltaje en las terminales de la batería e I_L es la corriente que circula por la batería, como se observa en la *Figura 1*. El signo que tenga la corriente es la que va a marcar el sentido (carga – descarga), positivo si la batería se está descargando y negativo si la batería se está cargando (Rodríguez Cea, 2017)

Rodríguez Cea (como se citó en Jiang, 2015) explica que “ R_o depende de la batería y del estado en que se encuentre, por lo que el valor es diferente para cada batería, temperatura y estado de carga, aunque este último solo produce variaciones significativas con bajos niveles de carga.”

2.3.2 Modelo de Thévenin

Este modelo parte del anterior dado que se le añade una red RC con la función de generar una dinámica del comportamiento de la batería a estudiar. (Rodríguez Cea, 2017)

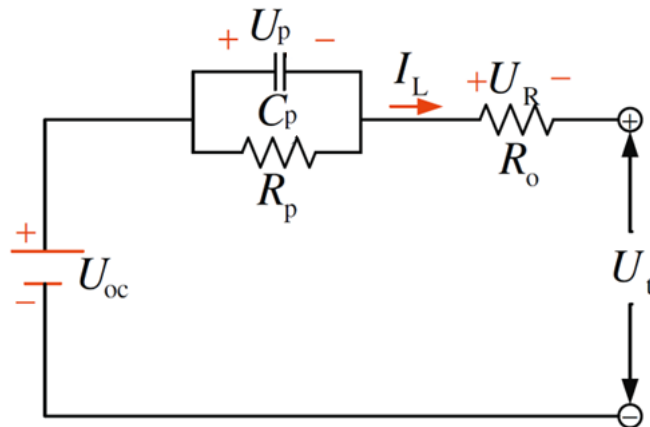


Figura 2. Circuito del modelo de Thévenin (Hongwen , Rui, Hongqiang, & Shuchun , 2012)

Como se puede ver en la *Figura 2* el modelo está compuesto por una fuente ideal de voltaje U_{oc} (la cual está en función de SOC) que es el voltaje de la batería, la resistencia R_o en serie la cual es la resistencia interna de la batería, el RC se usa para ver el comportamiento dinámico de la batería, U_t es el voltaje de la terminal de la batería, U_p es el voltaje del C_p y el flujo de corriente de la batería es I_L (Flores Gaspar, 2020).

2.3.3 Modelo de Thévenin doble

El modelo doble surgió de la investigación de las características de las baterías de ion-litio. Lo que se observó fue que el modelo de Thévenin tiene una gran similitud en su comportamiento con las curvas estudiadas, pero notaron que al aumentar la RC , se obtenía mayor exactitud en el modelo, mejorando así la respuesta transitoria en la carga y descarga de la batería. (Rodríguez Cea, 2017)

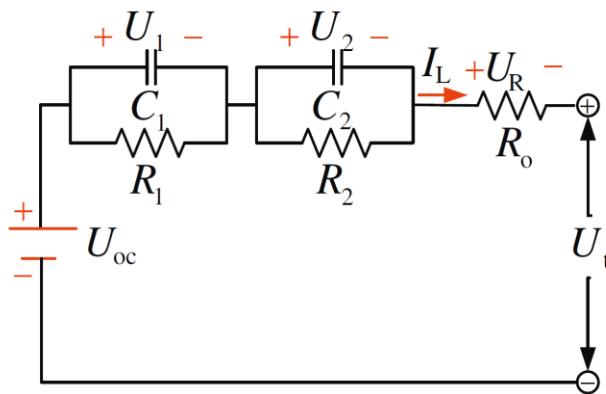


Figura 3. Circuito del modelo de Thévenin doble (Hongwen , Rui, Hongqiang, & Shuchun , 2012)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Flores Gaspar (2020) interpreta el circuito de la *Figura 3* de la siguiente manera: U_{OC} es el voltaje de la batería en función de SOC, R_o es la resistencia interna de la batería con la cual da la caída de voltaje que hay en la batería, las mallas RC que están constituidas por R_1 , C_1 , R_2 y C_2 son las encargadas de dar la respuesta transitoria de la batería, U_1 y U_2 son los voltajes de los capacitores en cada una de las mallas y U_t es el voltaje a la salida de la batería.

2.4 “Hardware in the Loop” (HIL)

Para entender cómo funciona el “*hardware in the loop*” es necesario saber cuál es la diferencia entre las siguientes palabras:

- Simulación: “Es un sistema que se comporta similar a otra cosa, pero se implementa de una manera completamente diferente. Proporciona el comportamiento básico de un sistema” (S.Robins, 2012)
- Emulación: “Es lo que hacemos cuando tratamos que un sistema se comporte de cierta forma o imite un sistema diferente.” (Executradmin, 2021)
- Virtualizar: “Consiste en montar más de un sistema operativo dentro de otro. Se puede definir como una ventana a través de la cuál se accede a otro operativo.” (EM, 2018)

Se conoce como prueba *HIL* a la simulación en tiempo real, iniciado con la comprobación del sistema embebido el cual se comporta como el real. Otorga la seguridad de no someter el *hardware* a condiciones inadecuadas y fallos que puedan causar daños al mismo. Los sistemas que más usan este tipo de pruebas son los de transporte eléctrico y energías renovables dado que al realizar pruebas con los dispositivos reales se corren el riesgo de dañar su infraestructura. (MathWorks, 2022). Además, se pueden realizar infinidad de pruebas posibles para llevar a cabo un análisis del controlador, sin malgastar tiempo y dispositivos en pruebas físicas

“El rendimiento de la simulación de hardware-in-the-loop depende tanto de la complejidad de la dinámica del sistema eléctrico que se modela como del hardware informático en tiempo real que se utiliza.”. También se debe tener en cuenta los tiempos de conmutación

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

del sistema real, dado que para la simulación en *HIL* la frecuencia de muestreo debe ser 100 veces más rápido para obtener datos no lineales del dispositivo de conmutación. (MathWorks, 2022)

2.4.1 “Hardware-in-the-loop” con MATLAB y Simulink

MathWorks (2022) asegura que “Las pruebas de hardware-in-the-loop para sistemas de electrónica de potencia comienzan con una simulación del sistema de control que modela el comportamiento eléctrico de los componentes de circuitos activos y pasivos, las cargas y las fuentes de alimentación”. Con lo anterior, se puede conocer cómo se comporta cada parte del sistema y tener la certeza de que no va a ocasionar ningún accidente a la hora de realizar la prueba con el dispositivo real.

MATLAB en conjunto con *Simulink* son herramientas ideales para la ejecución de simulaciones en tiempo real, ya que proveen complementos compatibles con equipos destino en tiempo real “*Speedgoat*”. Las librerías o complementos son las siguientes:

- *Simscape Electrical™*: “Librerías de componentes para modelizar y simular sistemas electrónicos, mecatrónicos y eléctricos.” (MathWorks, 2022)
- *Simulink Coder™*: “Genera y ejecuta código C y C++ a partir de modelos de *Simulink*®, diagramas de *Stateflow*® y funciones de *MATLAB*®”. (MathWorks, 2022)
- *Simulink Real-Time™*: “Permiten pasar de la simulación al prototipado rápido de sistemas de control (*RCP*) y las pruebas de *hardware-in-the-loop (HIL)*”. (MathWorks, 2022).

2.5 ““Speedgoat” Education Real-Time Target Machine”

La *Figura 4* hace referencia a un dispositivo de tiempo real con una plataforma de simulación y pruebas de alto rendimiento, con la cual se busca enseñar conceptos en mecatrónica, procesamiento de señales y electrónica de potencia. Está constituida por canales analógicos y digitales, los cuales van a ser conectados con el *HIL*. Su diseño fue pensado para comprender los sistemas de monitoreo y ajustarse a las aplicaciones que

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ofrece *MATLAB* desde *Simulink* como *xPC Target* donde se ejecutara en tiempo real. (Mathworks, 2012)



Figura 4. “Speedgoat” Education Real-Time Target Machine (Promod, s.f)

2.6 Fuente cuatro cuadrantes BOP 20-50GL

Es una fuente de tensión y corriente programable, lo que significa que va a suministrar o disminuir la potencia; tiene un rizado de corriente y ruido bastante bajos. Son ideales para accionar cargas inductivas. Esta fuente bipolar tiene además la facilidad de pasar por el cero proporcionando así una tensión tanto positiva como negativa e igualmente con la corriente esta puede ser positiva o negativa. Por último, esta fuente tiene la capacidad de ser controlada por su puerto análogo el cual trabaja con valores negativos como positivos en su canal principal (tensión o corriente) y en su entrada de +1 a +10V para los canales de limitación, igualmente la corriente y la tensión a la salida se controla por este puerto. Ver *Figura 5*.

Por otro lado, la fuente tiene una interfaz digital estándar (GPIB o RS 232) donde se puede modificar y controlar la tensión, corriente y los cuatro límites de protección. (KEPCO, 2018)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 5. BOP-GL tomado de <https://i.ebayimg.com/images/g/kOUAAOSwjcVh4qFO/s-1500.jpg>

2.7 Software “Hercules Utility”

Es un programa utilizado para la adquisición de datos, por medio de diferentes puertos de comunicación con un interfaz en la cual se puede elegir qué tipo de conexión se va a usar y las características necesarias para adquirir la información.

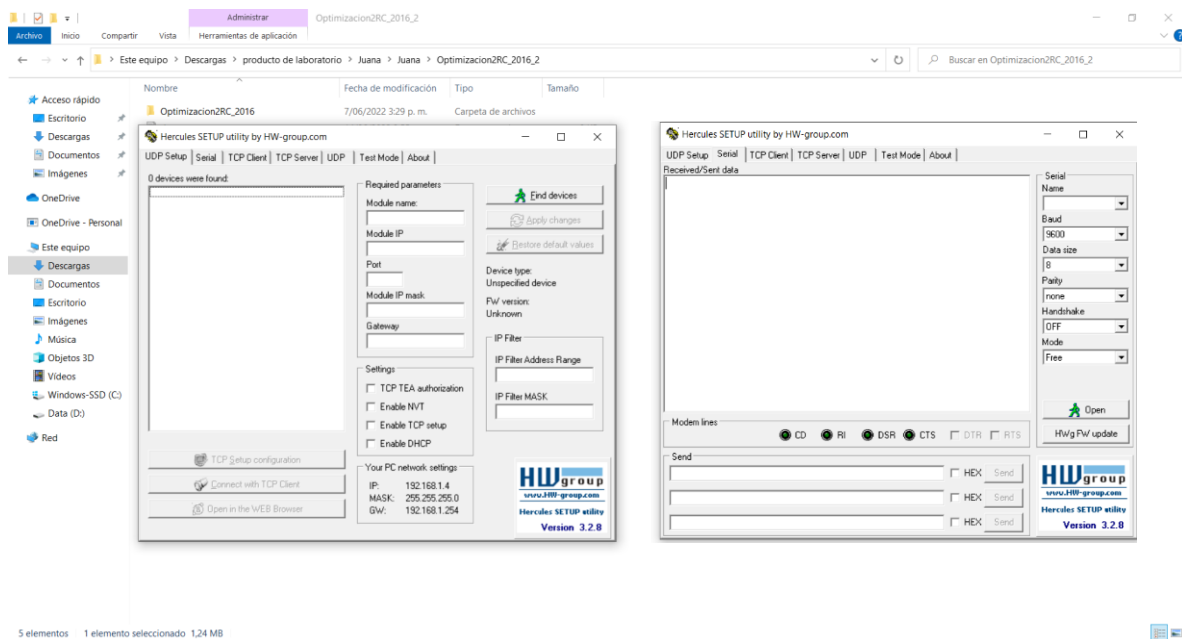


Figura 6 Interfaz de hercules (Hw-group, 2022)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8 Sensor de corriente ACS712

“Permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor. Podemos emplear el ACS712 junto con un procesador como Arduino para medir la intensidad o potencia consumida por una carga”. (LLAMAS, 2017)

El sensor a su salida tiene un voltaje proporcional a la intensidad que lo atraviesa, teniendo así un offset de 2.5V, lo que permite tener obtener intensidades positivas como negativas. Éste tiene una sensibilidad de 60 mV/A (milivoltios – amperio) como indica su hoja de datos (ALLEGRO, 2013), dado que hay de 5A, 20A, y 30A.

La manera cómo se conecta, se ve en la *Figura 7*, ya que este es un sensor intrusivo y es necesario insertarlo en un conductor. (LLAMAS, 2017)

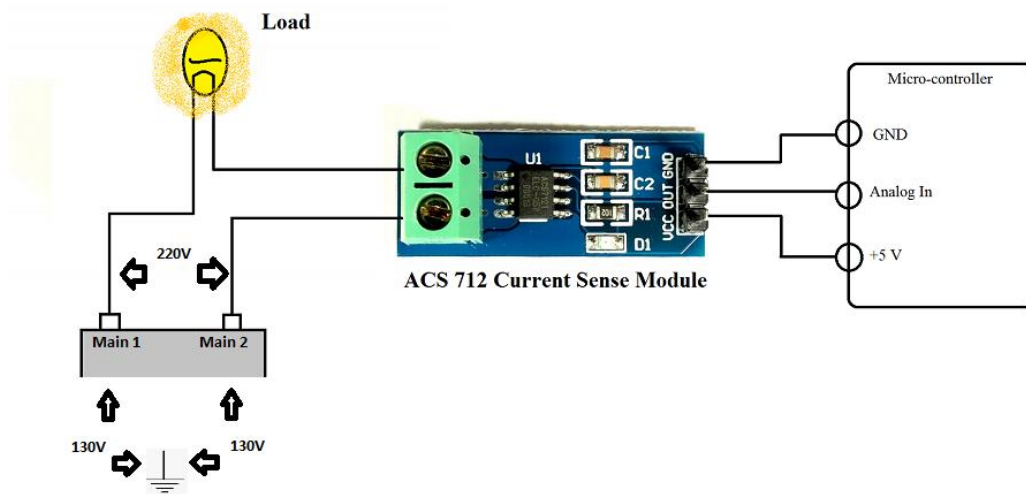


Figura 7 Conexiones del sensor de corriente (Ferdinandcinzano, 2019)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la emulación de la batería de ion de litio se realizó la verificación de las versiones de *MATLAB* compatibles con la “*Speedgoat*” que hay en el Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables. Se realiza también, la revisión de manuales y documentación de trabajos anteriores para la instalación de las librerías necesarias para el montaje en *Simulink*.

Se corrobora que *MATLAB* tenga la licencia activa y se pueda instalar los controladores de “*Speedgoat*”, dado que el dispositivo lo requiere, seguidamente se revisa los manuales que se tiene de ésta y un documento donde está la guía de como instalar un complemento que puede hacer falta a la hora de instalar la librería de “*Speedgoat*”, en la *Figura 8* se evidencia el error que puede salir.

```
>> mex -setup
Error using mex
No supported compiler or SDK was found. You can install the freely available MinGW-w64 C/C++ compiler; see Install MinGW-w64 Compiler. For more options, visit http://www.mathworks.com/support/compiler/R2016a/win64.html.
```

Figura 8. Error de complemento de *MATLAB*

Para garantizar el buen funcionamiento del aplicativo, se busca e instala (*Figura 9*) el complemento que hace falta para poder ejecutar los controladores y se pueda ejecutar la librería que se usara para la elaboración del proyecto

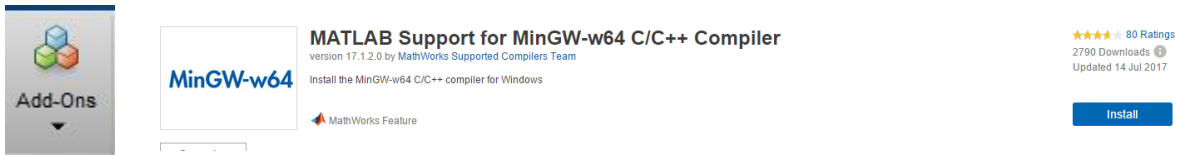


Figura 9 Instalación de *MinGw-64*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los controladores para instalar son los siguientes: *Simscape Electrical*, *Simulink Coder* y *Simulink Real-Time*, siendo el último el más importante, dado que, si esté controlador no está, no se podrá instalar la librería de este dispositivo en específico.

Cabe aclarar que el archivo de instalación para las librerías fue suministrado por el laboratorio⁴, pero a la hora de instalarse, salió un error con la versión de MATAB que se estaba usando, ya que decía que la librería trabaja con versiones anteriores a *MATLAB 2017b*, así que se instaló *MATLAB 2016* como se ve **Figura 10** para que fuera compatible.

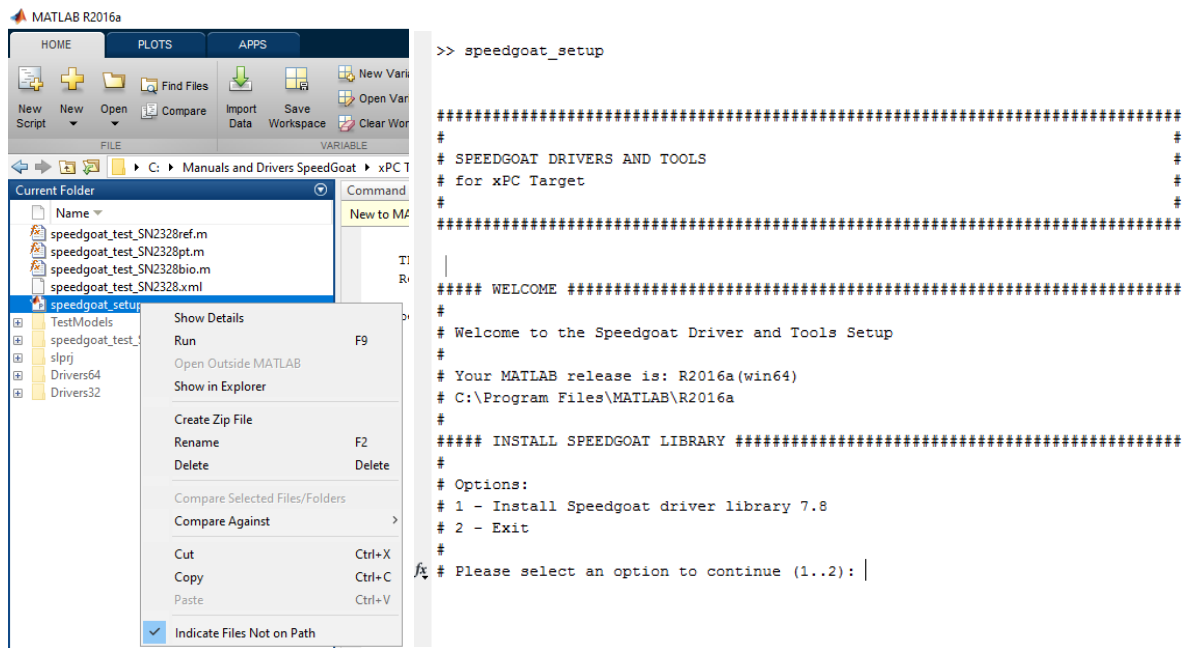


Figura 10 Instalación de la librería de la “Speedgoat”

Con la librería ya instalada, se usa el comando *Speedgoatlib* como se observa en la **Figura 11(a)** para ver los bloques con los que se hacen la comunicación entre la PC y el Modelo IO102, en los cual están las entradas y salidas como se visualizan en **Figura 11(b)**.

⁴ Nota 1: Para poder acceder a los controladores y documentación de la Speedgoat se debe tener una cuenta autorizada por el proveedor. Como se ilustra en (Mttis, 2021) de la página 2-6

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

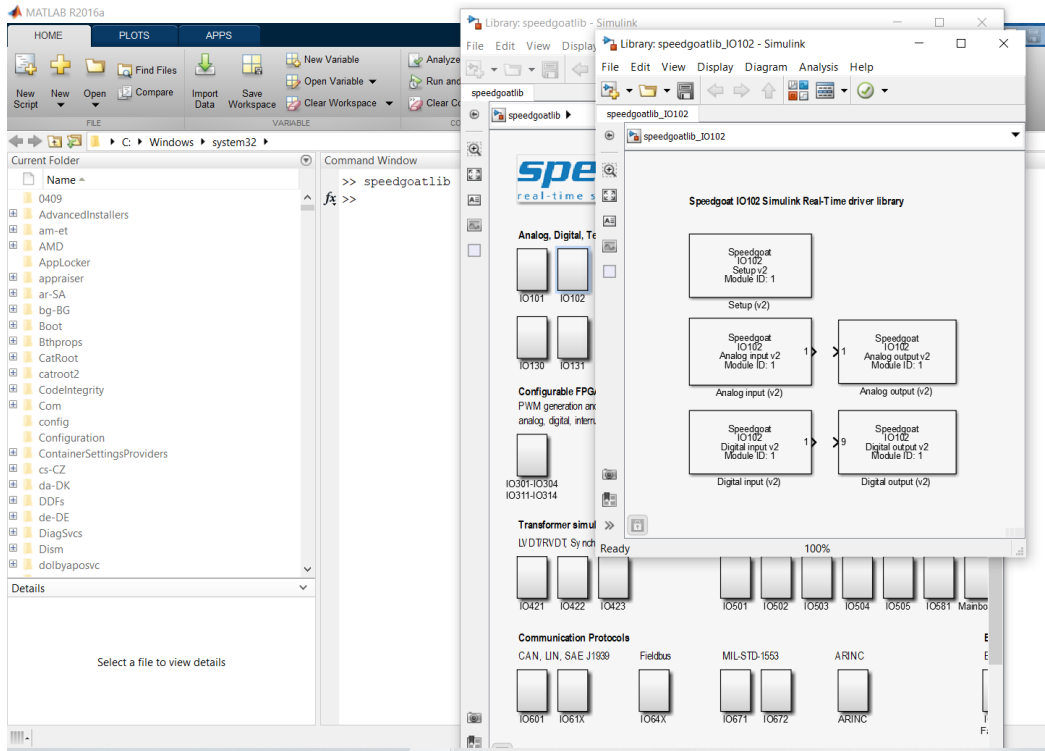


Figura 11a. Bloques de la librería “Speedgoat”



Figura 11b. Entradas y salidas del modelo IO102 de la “Speedgoat”

En el manual de “Speedgoat” (2006-2013) hay una pequeña lista donde se puede saber cuáles son algunas de las entradas y salidas digitales y análogas que se pueden usar. Con el *MATLAB* listo, controladores y librerías, se procede a realizar el KERNEL que se necesita para poder hacer la comunicación completa entre los dos dispositivos; sin embargo, la conexión entre el PC y la “Speedgoat” es por LAN, lo que hace necesario

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

verificar que el dispositivo tenga un puerto llamado *Host Link*, el cual debe estar conectado para que se pueda generar conexión IP entre los dos. *Figura 12.*



Figura 12. Puerto RJ45 Host Link en el “Speedgoat”

Para la realización del *KERNEL*, se usa el comando *Speedgoatkerneltransfer*, el cual abre una interfaz como se ve en la *Figura 13*, allí se configura la dirección IP y la máscara de red con las cuales se van a poder conectar en red los dispositivos y transferir la información. Con esos datos coincidiendo se procede a guardar la información en una USB y posteriormente subirlos en la “Speedgoat”.

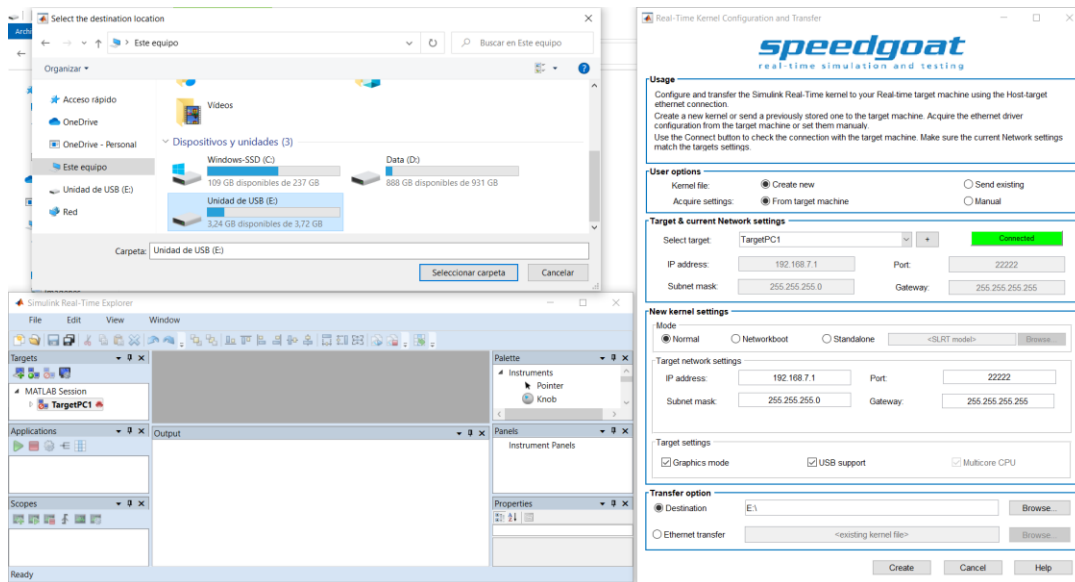


Figura 13. Configuración de la dirección IP para el KERNEL

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego de seleccionar la USB donde se van a guardar los datos, se selecciona la opción crear, acción que hace que se escriban los archivos en el dispositivo, ver *Figura 14*

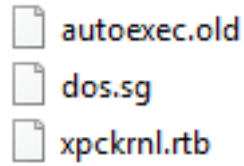


Figura 14. Archivos del KERNEL

Con los archivos disponibles en la memoria, esta se introduce en la “Speedgoat” *Figura 15* para que éste la reconozca luego de reiniciar el dispositivo, y de esta manera la identifique en su unidad principal.



Figura 15. Puerto USB para el KERNEL, botones de reinicio y encendido

Con un mensaje en la pantalla se indica que se está instalando el KERNEL⁵ y al finalizar la “Speedgoat” pide que se reinicie el equipo. Una vez realizado el reinicio se inicia con las nuevas direcciones de comunicación con el PC a trabajar. *Figura 16*

⁵ Nota: Se realizó el KERNEL con MATLAB 2022a y el dispositivo arrojó un error por la pantalla indicando que trabajan con versiones anteriores a MATLAB 2016b, así que las simulaciones se realizan en esta versión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

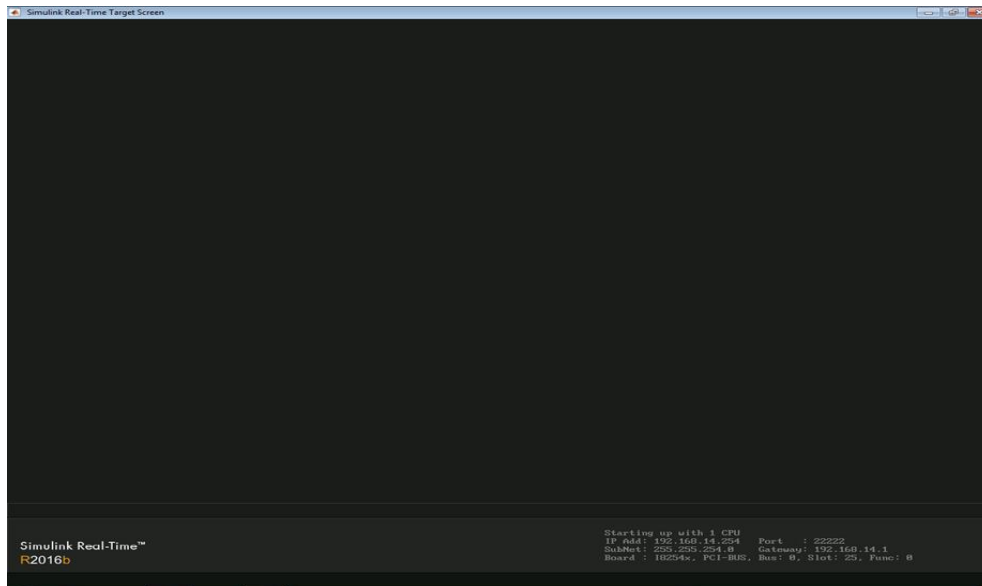


Figura 16. Pantalla de la “Speedgoat”

Teniendo los dispositivos sincronizados, se verifican cuáles son los bloques que hacen posible la comunicación entre la “Speedgoat” y el simulink, los cuales están en la librería *Speedgoat I/O Driver* Figura 17. Para que el sistema funcione correctamente es necesario tener los bloques IO102, dado que se probó con los demás que se ven en la Figura y el dispositivo arrojaba un error de incompatibilidad.

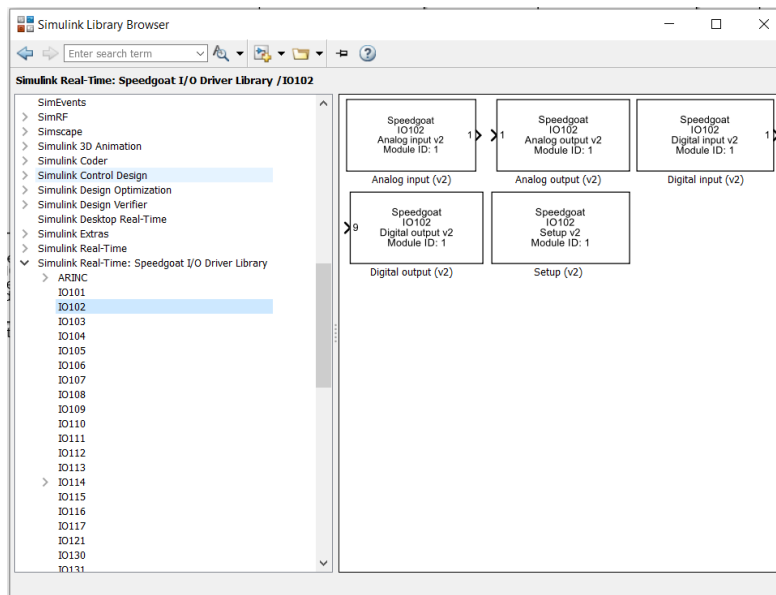


Figura 17. Librerías de Simulink

Se hace una primera prueba con los elementos mencionado anteriormente en el *Simulink*, donde el bloque *Setup*, es el bloque con el que se configura las entradas y salidas análogas y digitales e igualmente con el que se reconoce el modelo físico, el cual no tiene el mismo número para las entradas y salidas, en la *Figura 18* se ve un pequeño fragmento de la tabla que se encuentra en el manual (Speedgoat, IO102 I/O module, 2006-2012), dónde el numero en negrilla hace referencia a la casilla en el modelo IO102 y el número que acompaña el texto es al que se ven en la ventana de configuración del bloque en Simulink *Figura 19*

61	Output Return
62	Analog Output 04
63	Output Return
64	Analog Output 03
65	Output Return
66	Analog Output 02
67	Output Return
68	Analog Output 01

Figura 18. Fragmento de Tabla de entradas y salidas del Moledo IO102 (Speedgoat, IO102 I/O module, 2006-2012)

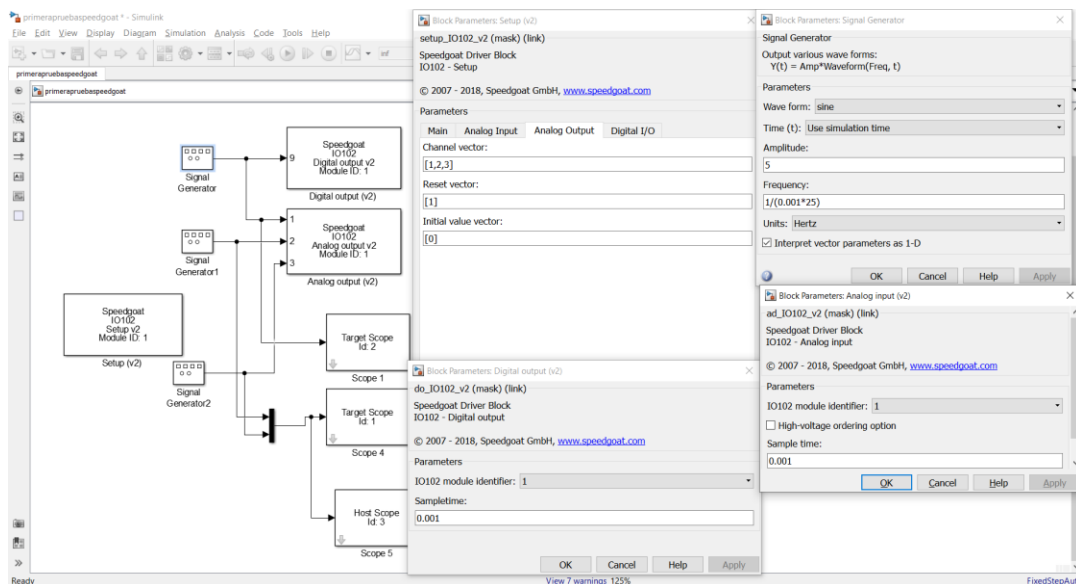


Figura 19. Primera prueba de las salidas del Moledo IO102

En la *Figura 19*, se observan varias ventanas donde se visualizan las salidas análogas y digitales, en la sección de los parámetros se introduce el tiempo de muestreo, variable que

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

es muy importante, dado que, como se mencionó en el capítulo anterior, los dispositivos de *HIL* trabaja con tiempos de muestreo unas cien veces más rápido, para poder obtener los datos más amplios por unidad tiempo.

Por otro lado, se tiene en cuenta en este ejercicio la frecuencia de onda con la que se va a trabajar:

$$f = \frac{1}{(\text{tiempos de muestreo} * \text{numero de puntos})} = \frac{1}{0.001 * 25}$$

Ecuación 2. Frecuencia de Onda

Para la simulación, primero se debe cargar el modelo a la “Speedgoat”, por medio del botón azul que se ve en la *Figura 20*.



Figura 20. Botón para cargar el modelo

Al cargarse el modelo en el dispositivo se va a ver en pantalla de la “Speedgoat” el número de *Scope* que se tenga para visualizar las ondas o valores de este como se ve en la *Figura 21* y además se va a abrir una ventana en el PC llamada *Simulink Real-Time Explore* *Figura 22* en la cual se va a dar Play para que pueda iniciar la simulación e igualmente ver en simultaneo con la de la “Speedgoat”

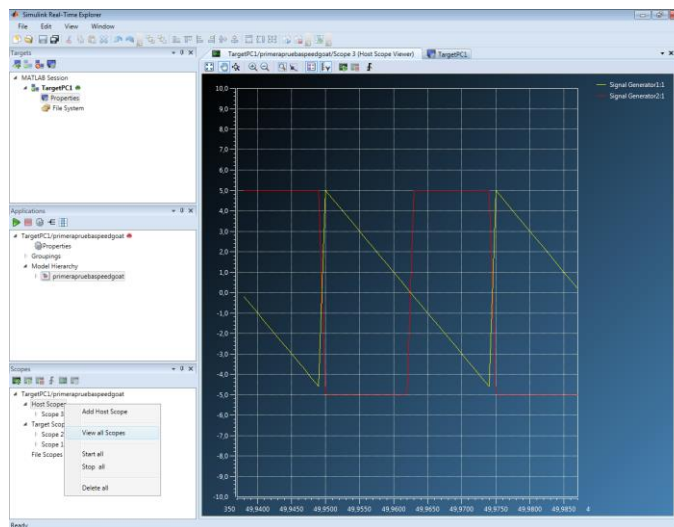


Figura 21. Simulación en el PC

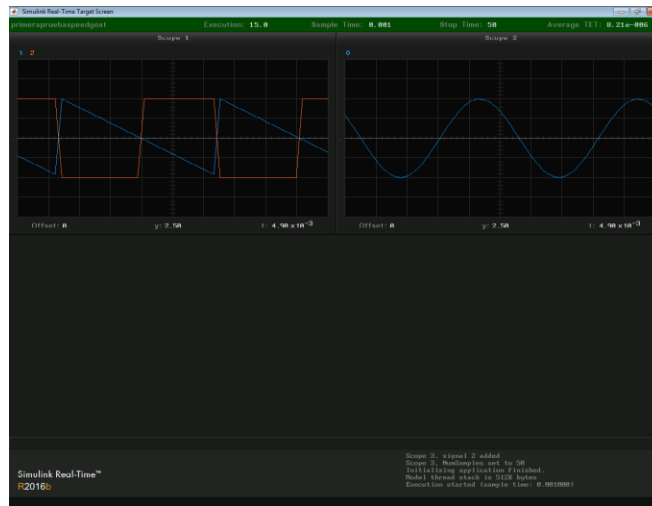


Figura 22. Simulación en la “Speedgoat”

Este mismo proceso se realizó para verificar las entradas del modelo IO102 y comprobar los bloques de la librería en simulink, además se nota que la manera de habilitar entrada es muy diferente a la habilitación de salidas, ya que tiene dos modos de conectar como se muestra en la Tabla del manual (Speedgoat, Technical Reference Information and Full System Test, 2006-2013) *Figura 23.*

Pin	Signal	Signal
	Analog Single ended mode	Analog Differential mode
1	Analog Input 32	Analog Input 16 (-)
2	Analog Input 31	Analog Input 16 (+)
3	Analog Input 30	Analog Input 15 (-)
4	Analog Input 29	Analog Input 15 (+)
5	Analog Input 28	Analog Input 14 (-)
6	Analog Input 27	Analog Input 14 (+)
7	Analog Input 26	Analog Input 13 (-)

Figura 23. Fragmento de Tabla de entradas y salidas del Moledo IO102 (Speedgoat, IO102 I/O module, 2006-2012)

Para la simulación de las entradas del modelo IO102 se usó un generador de señal⁶ como se muestra en las siguientes *Figuras (24,25,26).*

⁶ El cual fue suministrados por el Laboratorio de Electrónica y Energías Renovables, para la realización de todas las pruebas.

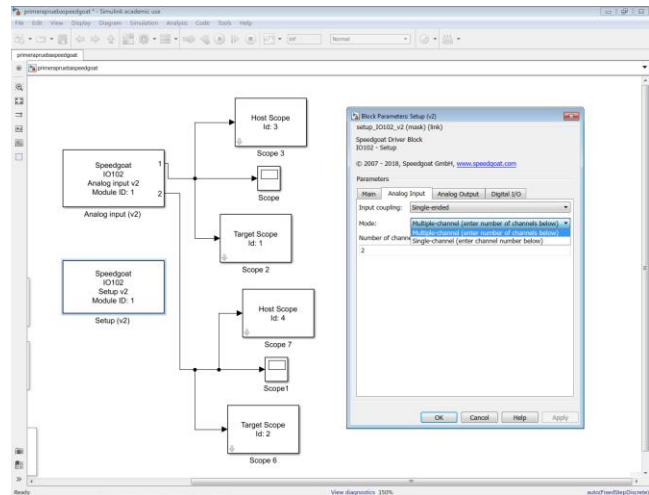


Figura 24. Configuración del número de entradas

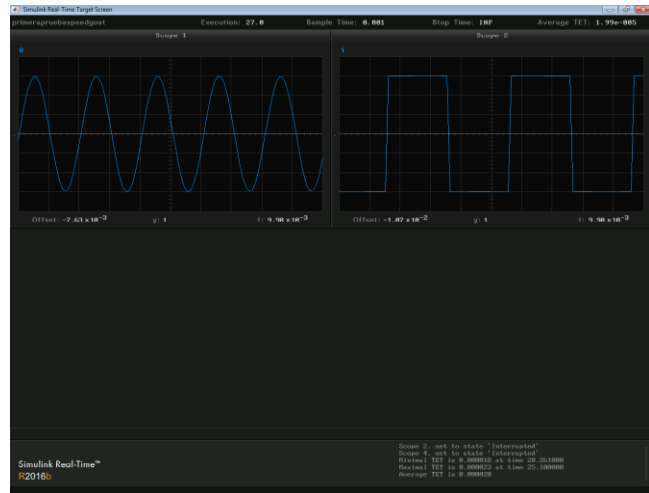


Figura 25. Visualización de las entradas en la pantalla de la “Speedgoat”

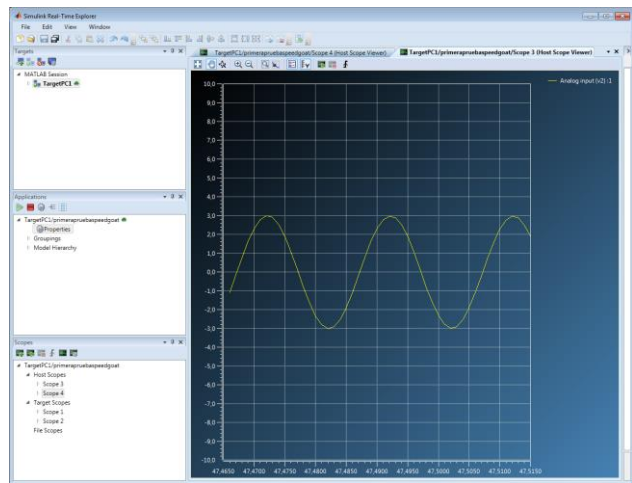


Figura 26. Visualización de la simulación en el PC

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Después de verificar que los componentes propios de la “Speedgoat” en *MATLAB* funcionan de manera correcta con respecto a los tiempos de muestreo, se hicieron varias pruebas aumentando la frecuencia para visualizar cuanto era el tiempo de muestreo que toleraba el dispositivo. Se notó que era hasta 0.0001 ya que, si se aumenta un 0, el dispositivo arroja un error de saturación en el sistema; con respecto a la frecuencia si se aumenta hasta un 1KHz esta distorsiona la señal que se le envía, pero se puede trabajar entre 100Hz - 900Hz el dispositivo.

Con las condiciones de los parámetros se realiza el montaje del modelo de resistencia interna, para la verificar que los componentes eléctricos de *Simulink* sean reconocidos por la “Speedgoat” a la hora de cargar el circuito, como se ve en la siguiente *Figura 27*

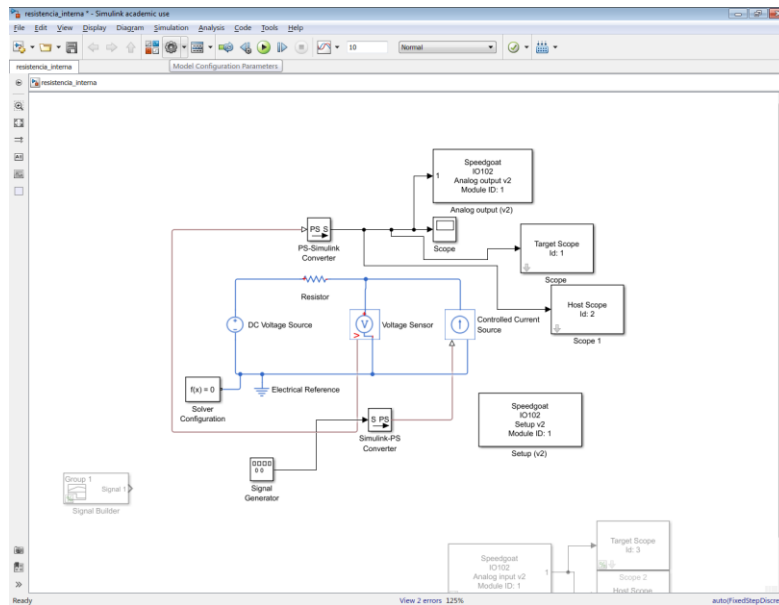


Figura 27. Modelo de resistencia interna.

Al cargar el modelo, se genera un error sobre el compilador del lenguaje, dado que se está trabajando con *xPC target*⁷ que está asociada a los complementos que se instalaron previamente para la sincronización y configuración la “Speedgoat”, así que se cambió la configuración (Team, 2013) como se ven en la siguiente *Figura 28(a y b)*

⁷ *xPC target*: es el controlador que actualmente se llama *Simulink Real-Time* (Kuratli, 2022)

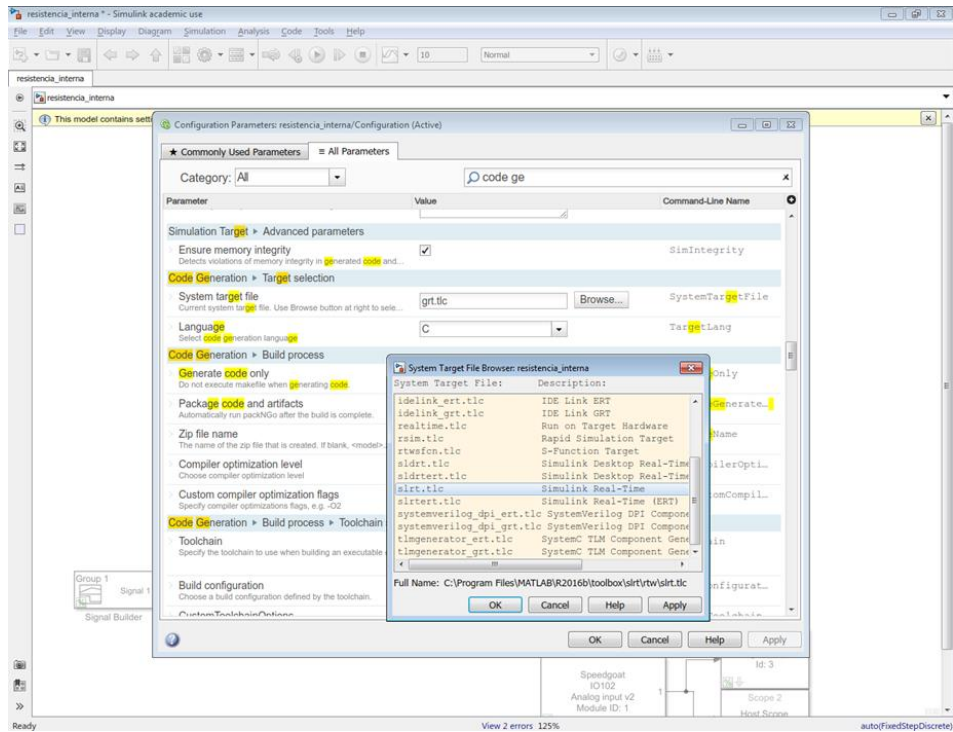


Figura 28a. Corrección del error del compilador

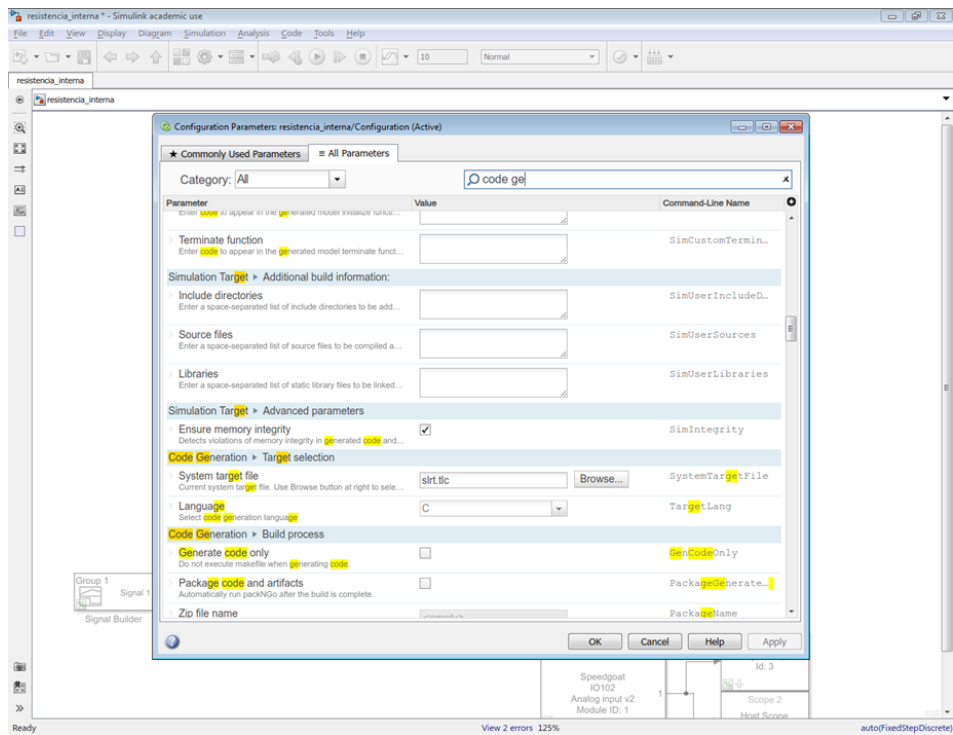


Figura 28b. Corrección del error del compilador

Al hacer la corrección del error, el circuito se pudo simular de manera correcta como se vio en las pruebas anteriores, dando paso a la realización del montaje del [Modelo de Thévenin doble](#), éste es el más cercano al comportamiento de una batería de ion de litio según lo visto en el capítulo dos; por lo tanto, el circuito a simular es suministrado por el laboratorio basándose en trabajos e investigaciones anteriores que se venían desarrollando en el simulador de *Matlab*, como se ven en la *Figura 29(a y b)*. Éste simulará una batería con los siguientes parámetros⁸: Em es igual a 4V, con una capacidad (Q) de 27Ah, los cuales van a estar en función del estado de carga (SOC). Se ingresa una corriente, la cual hace que cambien el voltaje a la salida con respecto al tiempo hasta que llegue el estado de carga a cero.

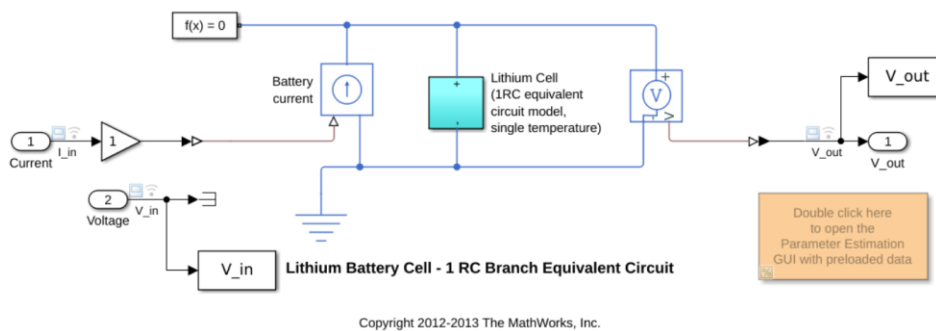
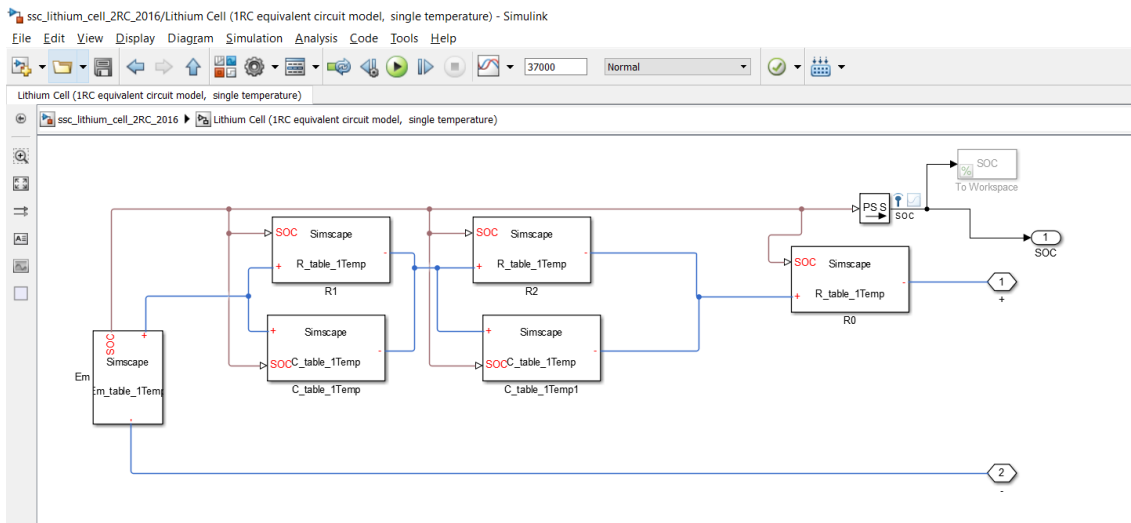


Figura 29a. Circuito de una batería de ion de litio



⁸ El valor de los parámetros utilizados es experimental, ya que son resultado de una aceleración para que el proceso no fuera tan lento y poder evidenciar mejor la descarga

Figura 29b. Circuito del Modelo doble de Thévenin

Además, se tiene los valores en la de cada uno del componente del circuito de la *Figura 29b*, con los cuales se hará la simulación o la prueba HIL. *Tabla 1*

VALORES DE LOS COMPONETNES DEL MODELO DE THEVENIN						
C_1	C_2	R_0	R_1	R_2	E_m	$SOC - LUT$
2,39E+04	1,09E+04	7,69E-03	1,34E-03	7,33E-04	4,18E+00	1,00E+00
7,96E+04	8,37E+04	9,34E-03	7,18E-04	9,88E-04	4,08E+00	9,00E-01
6,13E+04	6,00E+04	8,45E-03	1,74E-03	1,30E-03	3,98E+00	8,00E-01
4,59E+04	4,14E+04	8,21E-03	8,58E-04	1,40E-03	3,88E+00	7,00E-01
2,81E+04	6,94E+04	8,56E-03	1,71E-03	4,45E-04	3,80E+00	6,00E-01
9,24E+04	6,08E+04	9,19E-03	2,50E-04	1,35E-03	3,72E+00	5,00E-01
7,42E+04	8,90E+04	9,02E-03	8,07E-04	1,40E-03	3,69E+00	4,00E-01
1,84E+04	6,85E+04	8,58E-03	1,57E-03	1,42E-03	3,65E+00	3,00E-01
5,54E+04	9,32E+04	8,35E-03	1,21E-03	1,49E-03	3,61E+00	2,00E-01
3,16E+04	6,39E+04	8,86E-03	1,39E-03	1,04E-03	3,57E+00	1,00E-01
5,95E+04	8,43E+04	9,85E-03	2,09E-04	1,34E-03	3,50E+00	0,00E+00

Tabla 1. Valores de los componentes

En la *Figura 30* se puede observar cómo queda el montaje con los componentes propios de la “Speedgoat” y el circuito mencionado anteriormente.

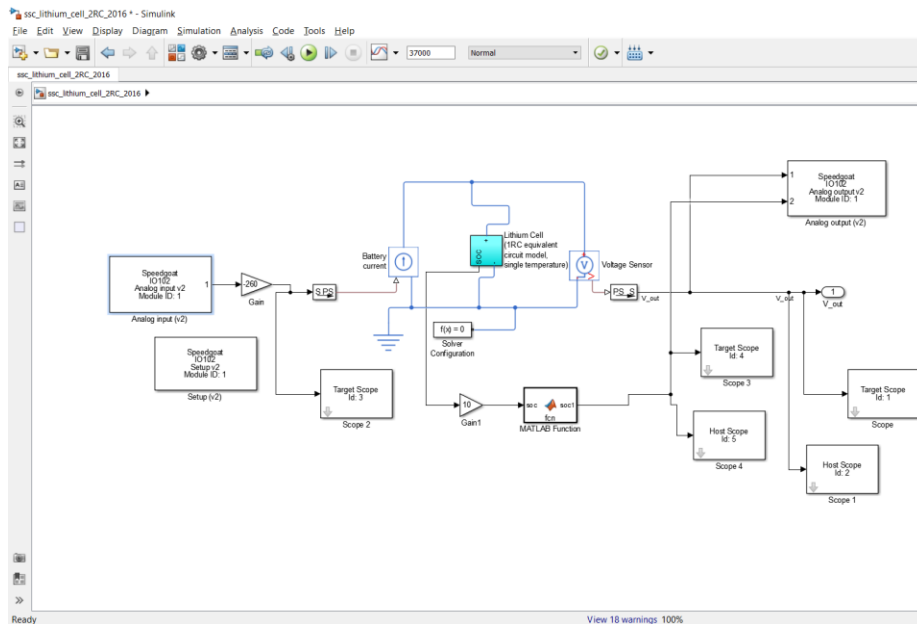


Figura 30. Montaje del modelo doble de Thévenin con componentes propios de “Speedgoat”

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La validación del funcionamiento de esta primera etapa del proyecto se explica en el [capítulo 4](#).

Ya con la primera parte del proyecto funcional, se pasa a la segunda etapa, la cual es la conexión y configuración de la [Fuente cuatro cuadrantes](#), que tiene como función recibir el voltaje a la salida de la “Speedgoat” en su puerto análogo. Simultáneamente debe generar el voltaje de entrada de la “Speedgoat” en su salida, creando así el ciclo o bucle de la simulación del HIL.

Lo primero que se hace es mirar la configuración de los interruptores de la parte superior de la fuente, como muestra la *Figura 31*, donde S1 indican el encendido del dispositivo, S2 selecciona si el dispositivo es esclavo o maestro y S3 asigna el modo en el que va a trabajar junto con las protecciones de este, como se indica en el manual (KEPCO, 2018).

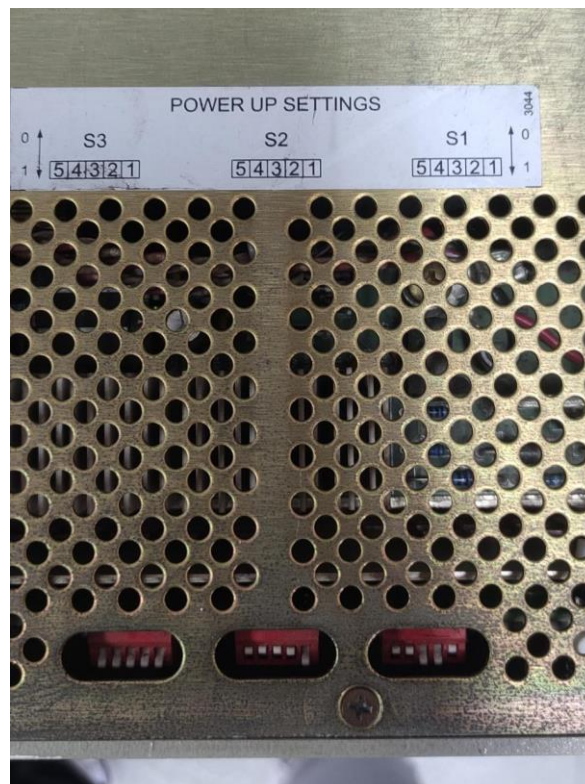


Figura 31. Interruptores de configuración de la fuente cuatro cuadrantes.

Para ilustrar el manejo de los interruptores del banco de potencia, se utilizan los valores de la *Tabla 2*, donde se muestra los parámetros con lo que se va a trabajar en conjunto con la “Speedgoat” en modo tensión.

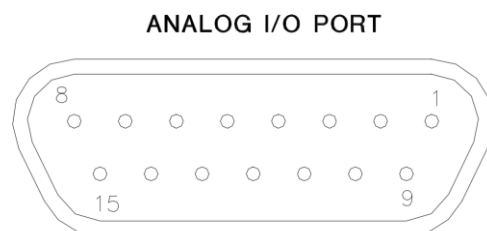
CONFIGURACION DE ENCENDIDO Y MODO DE LA FUENTE CUATRO CUADRANTES						
S	1(LSB)	2	3	4	5(MSB)	ESTADO
S1	0	1	1	0	0	Encendido normal
S2	1	0	0	0	0	Maestro
S3	1	1	1	1	1	Modo tensión con protección al máximo

Tabla 2. Configuración de los interruptores de la fuente cuatro cuadrantes

Luego, se realiza el reconocimiento del puerto análogo, que está en la parte del atrás del dispositivo *Figura 32* que funciona con un conector A2A5J6, el cual tiene 15 terminales, como se muestra en la *Figura 33*.



Figura 32. Parte trasera de la fuente cuatro cuadrantes



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 33. Conector y puerto análogo

La *Figura 34* muestra las terminales del puerto análogo, las cuales se verificaron para poder realizar la conexión de la “Speedgoat”.

1	NC	8	NC
2	VM-/CM	9	GND
		10	SGND
3	IOUT_DMM	11	EXT_REF
		12	GND1
4	SGND	13	+I_LIM_EXT
5	-I_LIM_EXT		+V_LIM_EXT
6	-V_LIM_EXT	14	+V_LIM_EXT
		15	VOUT_DMM
7	NC		

Figura 34. Fragmentos de la *Tabla 2-12* de especificaciones del puerto análogo (KEPCO, 2018)

La terminal 11 es la entrada análoga del dispositivo el cual trabaja con un voltaje entre 0V a $\pm 10V$ y la terminal 10 es su polo a tierra. Se conecta a una fuente externa para comprobar que la salida de la fuente cuatro cuadrantes, internamente realice correctamente la escalización, es decir, que el valor que arroja indica es proporcional al valor que se le ingresó. Posteriormente, se indica que la terminal 2 define el modo, los cuales son (0V) modo corriente y (#V), modo tensión, pero esta trabaja con tecnología TTL, entonces se le conecta una fuente externa con el valor de 5V para trabajar en modo tensión y se referencia con la terminal 9 a tierra. Por último, se verifica la terminal 3 junto con su referencia a tierra la terminal 4, las cuales no dieron un valor acorde a la escalización en la salida del dispositivo que es un valor entre 0V a $\pm 10V$ que corresponde a una corriente entre 0 a 20A, por tanto, no se pueden usar. Para la solución para este problema se utiliza un Sensor de corriente *Figura 35* el cual va conectado a las terminales de la fuente de cuatro cuadrantes y una carga para que este devuelva un voltaje de salida que ingresara a la “Speedgoat”.

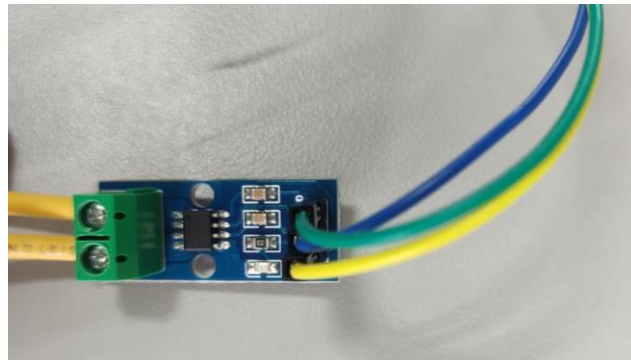
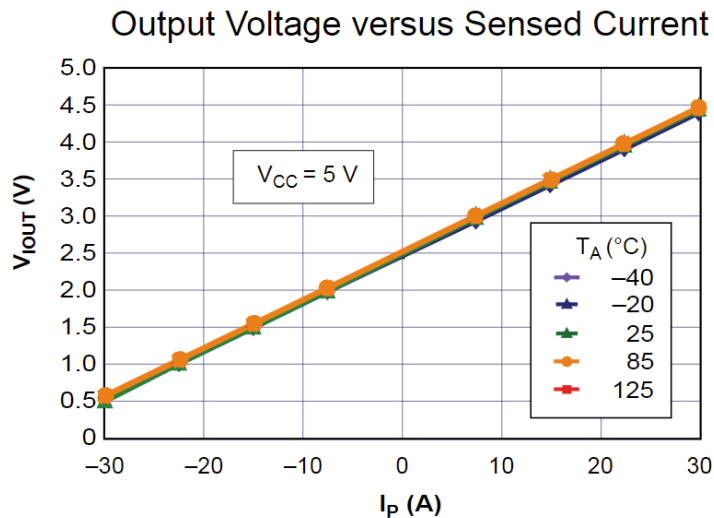


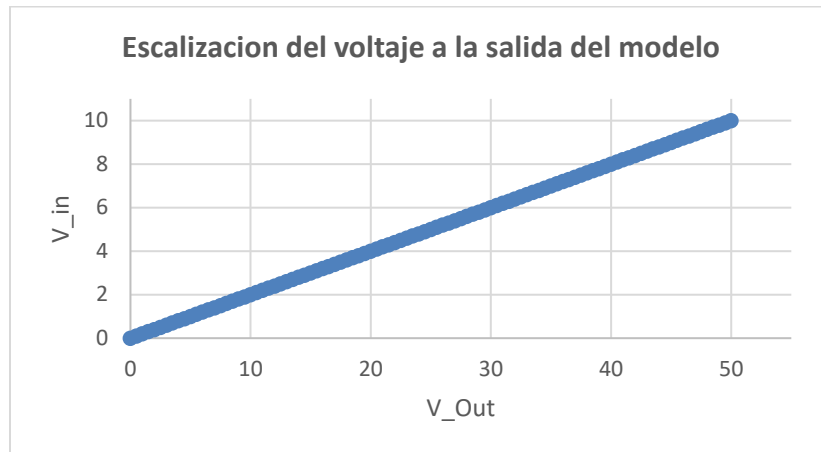
Figura 35. Sensor de corriente ACS712 de 30A

Finalmente, antes de conectar todo el sistema, se debe escalizar la entrada y la salida del circuito del modelo de la batería. La primera escalización debe realizarse a la entrada del circuito, donde la señal viene del sensor de corriente. Se sabe que la entrada del dispositivo esta entre 0V a 10V, por lo cual, se escaliza la señal del sensor con respecto a su gráfica y la sensibilidad de este, que es de 60mV (ALLEGRO, 2013). por cada amperio que aumenta la corriente, sube 60mv el voltaje. como se muestra en la *Grafica 1*.



Grafica 1. Voltaje de salida versus la corriente (ALLEGRO, 2013)

Igualmente se hace una escalización a la salida del circuito *Grafica 2* dado que esta entrega valores entre 0V y 50V, para que esta pueda ingresar a la terminal análoga de los cuatro cuadrantes que debe funcionar de 0V a 10V.



Gráfica 2. Escalizacion del voltaje a la salida del modelo doble de Thévenin

Como se muestra en la *Figura 36*, se añaden los bloques de la librería *Neural Network* con los cuales se realiza las escalizaciones teniendo en cuenta los máximos y mínimos de las *Gráficas* anteriores, que contienen la entrada y la salida del circuito, cumpliendo así con los parámetros de la fuente cuatro cuadrantes, dado que esta funciona a 50V/20A.

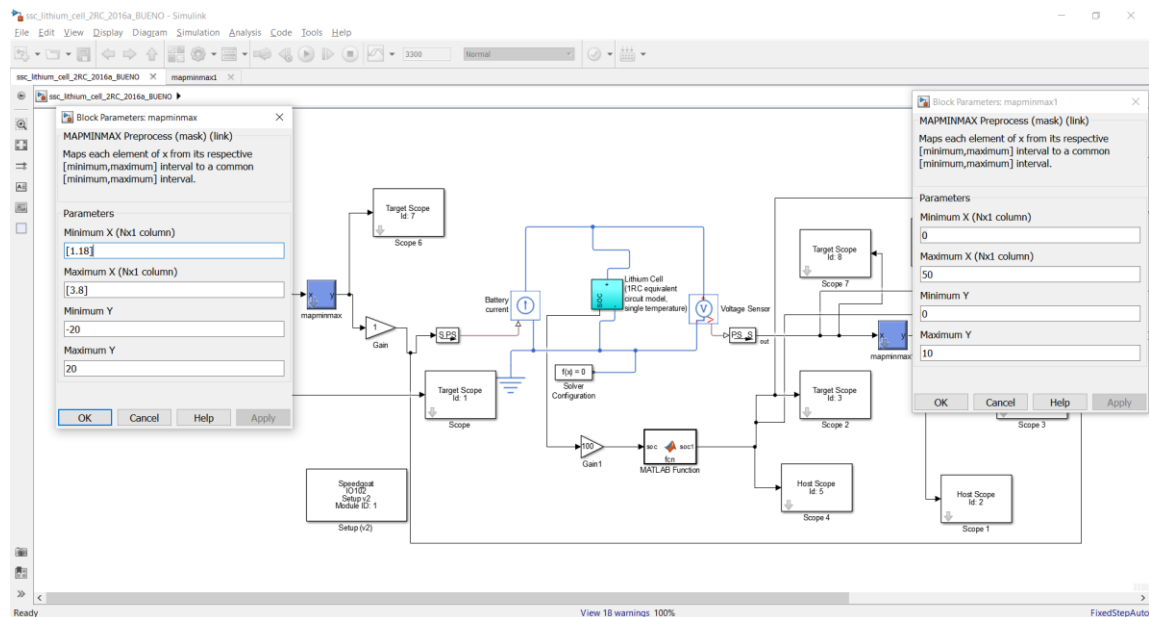


Figura 36. Circuito de la batería de ion de litio completo con su respectiva escalizacion.

Con el circuito completo y las configuraciones adecuadas, se procede a realizar las pruebas con el banco de potencia, para comparar los resultados con la primera etapa del proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del proyecto se dividen en dos partes; la primera, consiste en simular el circuito con un generador de señal y la segunda es conectarlo el circuito de la primera parte a una fuente cuatro cuadrantes cerrando el ciclo del *HIL*, obteniendo su comportamiento en tiempo real.

En el capítulo anterior se muestra todas las configuraciones que llevan al montaje del circuito equivalente de Thévenin doble. Las primeras simulaciones se realizaron con un generador de señal y con el circuito que se observar en la *Figura 27*, obteniendo una aproximación del comportamiento de descarga de la batería en una muestra de tiempo

En la primera prueba del modelo, en la entrada del IO102 se tiene un generador de señal que simulara una corriente que trabaja con un Duty al 80%, con una frecuencia menor a 1KHz y con un tiempo de simulación de 37.000 segundos en el *Simulink*. Además, se trabaja con los siguientes parámetros: la ganancia a la entrada del voltaje se tiene a -260 con lo que se busca tener un cambio más rápido en el tiempo e igualmente el *SOC* que tiene una ganancia de 10, para ver más cerca el cambio de la señal, con la cual se indica donde arranca al máximo la batería y cuanto llega a su mínimo de carga.

Al realizar la simulación se genera una inconsistencia con el *SOC*, dado que este sobrepasa el valor de cero, por tanto, se limita con un bloque de *Matlab* el cual lo restringe para que trabaje en un rango de 1 a 0, los que indica que la batería se descargó por completo.

Con la primera parte del trabajo lista, se realizan pruebas nuevamente, conectando un osciloscopio a una salida de modelo IO102 para visualizar su comportamiento y corroborar que lo que se ve en la pantalla de la "*Speedgoat*" *Figura 37* sea los mismo que en el osciloscopio *Figura 38*.

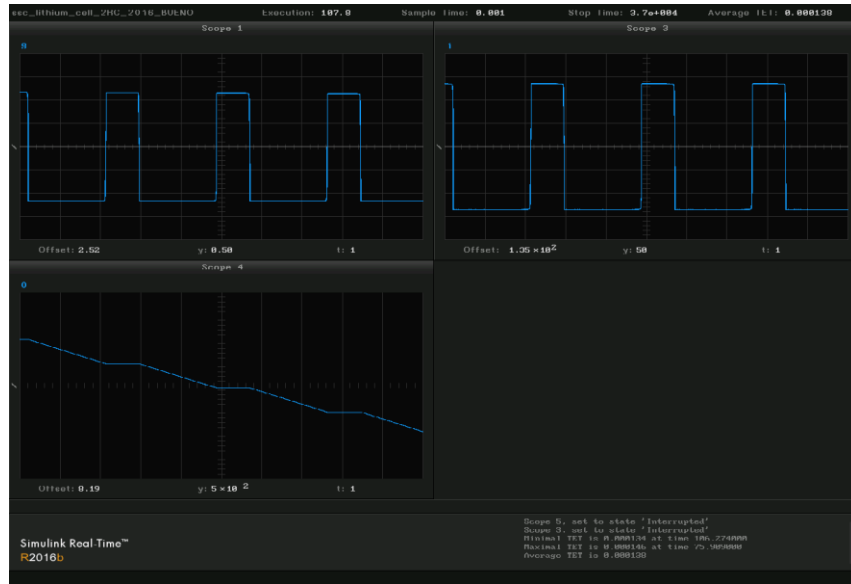


Figura 37. Señales de la entrada, SOC y voltaje a la salida

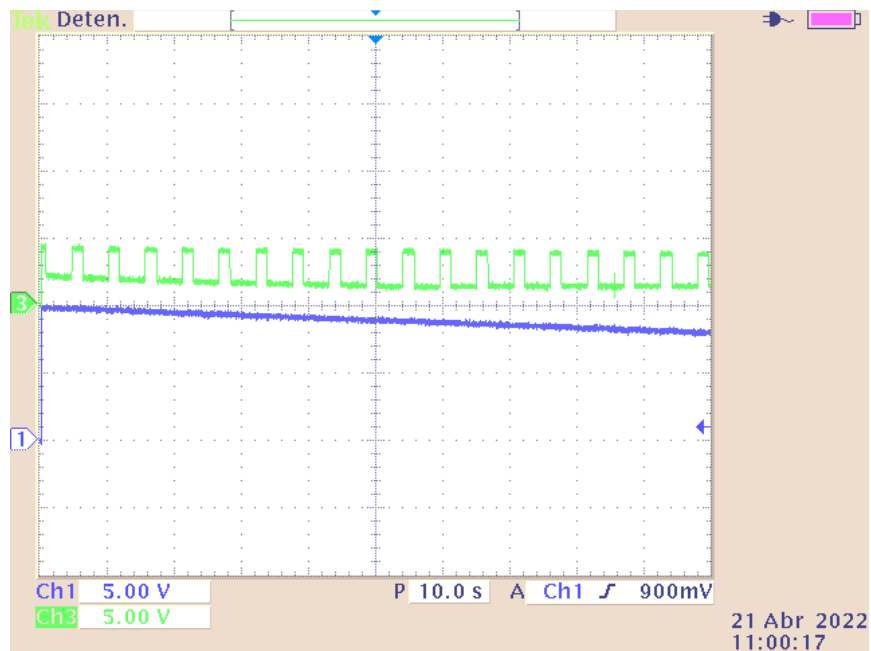
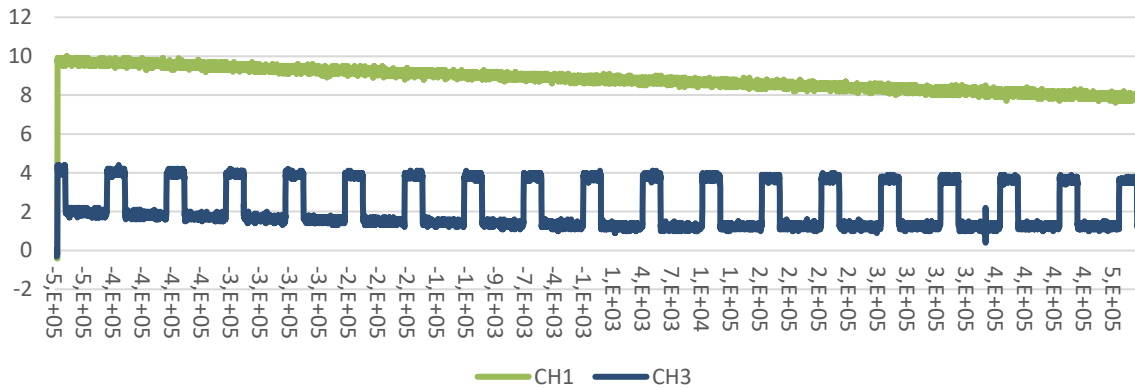


Figura 38. Señales de la entrada y SOC en el osciloscopio

Por medio del osciloscopio se puede obtener una pequeña muestra de los datos arrojados por la “Speedgoat” en un tiempo determinado, los cuales se grafican para comparar con los mencionados anteriormente. *Gráfica 3.*

Muestra del Modelo de Thevenin doble



Gráfica 3. Primeras simulaciones del modelo de Thévenin.

Con las primeras pruebas no se genera tantos problemas con los tiempos de muestro, dado que, al aumentar la ganancia, la descarga de la batería se logra en menos tiempo, ya que los parámetros que se dan son solo experimentales, para corroborar que el circuito equivalente si hace el comportamiento de una batería real en descarga.

No obstante, en la segunda parte del proyecto se logra terminar la configuración y verificación de la fuente cuatro cuadrantes, al conectarla al sistema de prueba *HIL* se generan algunos problemas con el tiempo de muestreo dado que no puede superar el valor de 10^{-3} , por que se genera un error de saturación en el sistema del *HIL*, la solución que se obtuvo fue aumentar el número de puntos en todos los *Scope*, pero tampoco se puede elevar el valor a más de 10.000, dado que se continua generando el mismo error.

Se hace la primera prueba con todo el sistema conectado y con los parámetros experimentales del siguiente circuito *Figura 39*, obteniendo así una descarga en poco tiempo, pero en la pantalla de la “*Speedgoat*” no se logra visualizar bien las señales que se tiene a la entrada y salida del dispositivo *Figura 40*. El SOC se visualiza, pero presenta algunas perturbaciones. Con respecto a los *Scope* numéricos se logra ver que los valores de

entrada y salida donde se ven los cambios en todo el sistema, es decir, se cumple con las escalizaciones y el tiempo estimado de descarga.

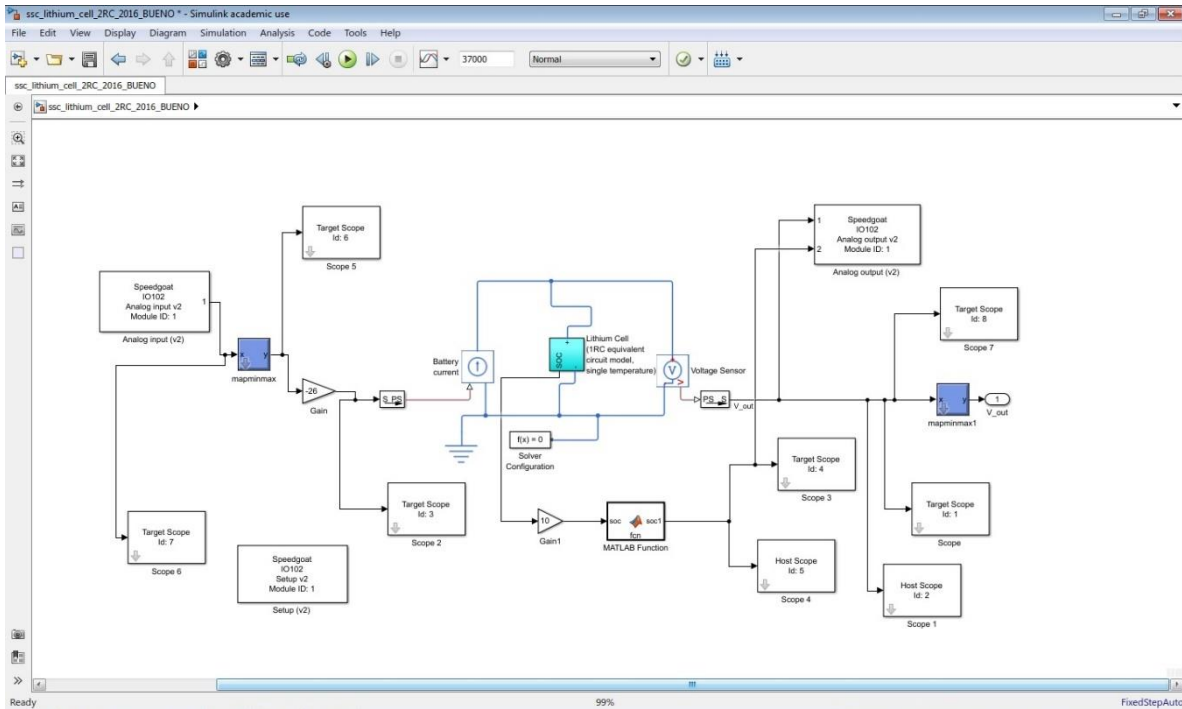
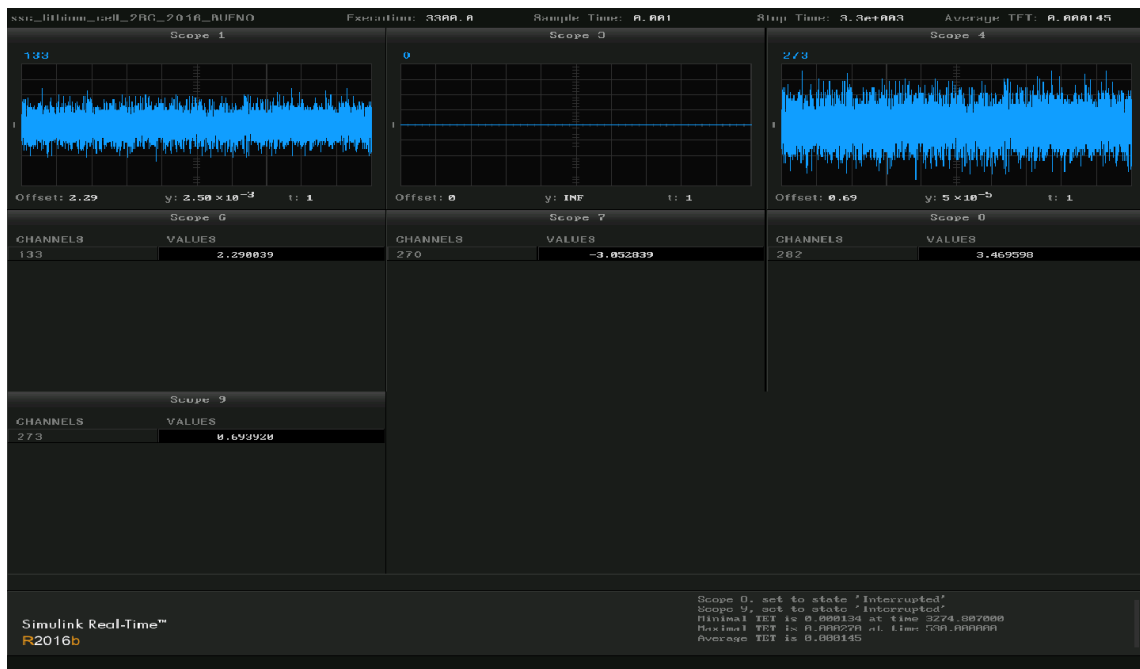


Figura 39. Circuito completo de la batería de ion de litio



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 40. Pantalla de la “Speedgoat” en la última prueba

Para hacer la comparación de las dos partes de proyecto, se conecta al circuito un software de adquisición de datos, en este caso [Hercules](#), éste funciona por puerto serial, y la “Speedgoat” contiene bloques con los que se va a poder configurar: el tiempo y el número de señales que va a recolectar en el tiempo. **Figura 41**

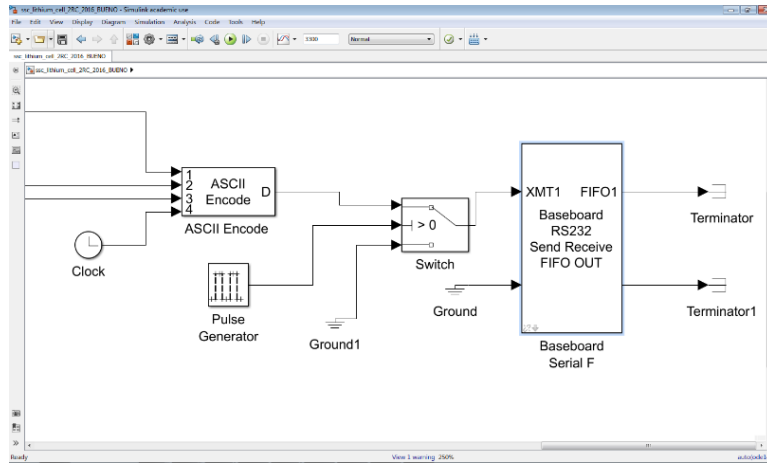
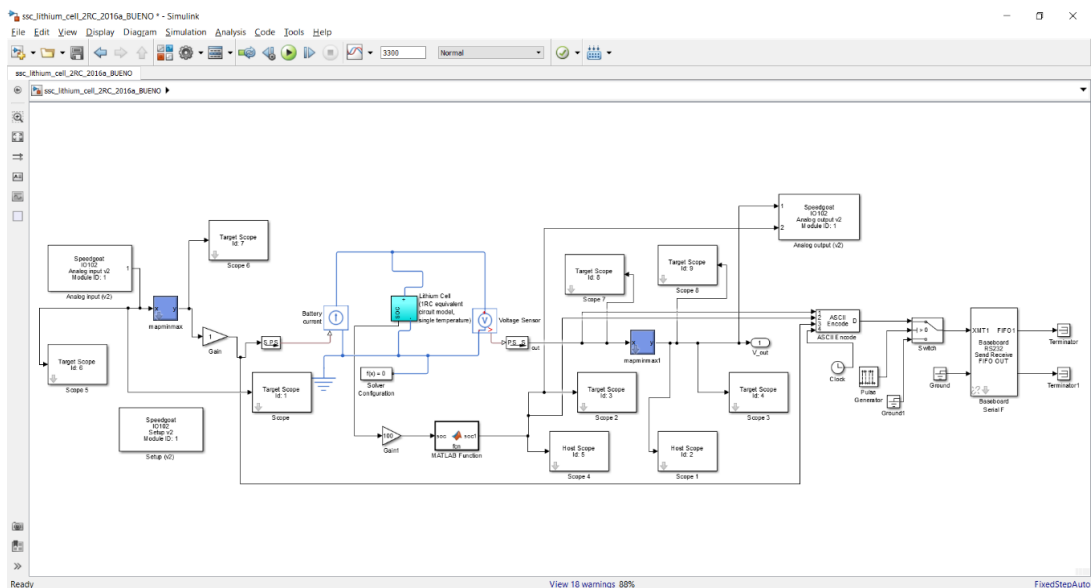


Figura 41. Bloques seriales

Sin embargo, se obtuvo un error con la adquisición, dado que al simular se desbordaba o se satura la simulación, por tanto, se conectó un generador de pulso para que cada 5.000 muestras se tomen una, quedando así el circuito completamente funcional como se ve en la siguiente **Figura 42**.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 42. Circuito que emula una batería de ion de litio completo.

Por último, se simula el circuito dos veces más, con un tiempo de simulación de 55 minutos para cada uno. Es importante aclarar que lo único que cambia entre ellos es el número de muestras y decimales en el reloj. El primero es con 10.000 muestras con un cambio en el tiempo de 10 unidades (*Figura 43 a, b y c*) y la otra es con 5.000 muestras con un cambio en el tiempo de 5 unidades (*Figura 44 a, b y c*).

Analizando las muestras, se evidencia que el resultado es similar a la primera etapa del proyecto, pero con una corriente constante. Por otro lado, el estado de carga se comporta igual en ambas etapas.

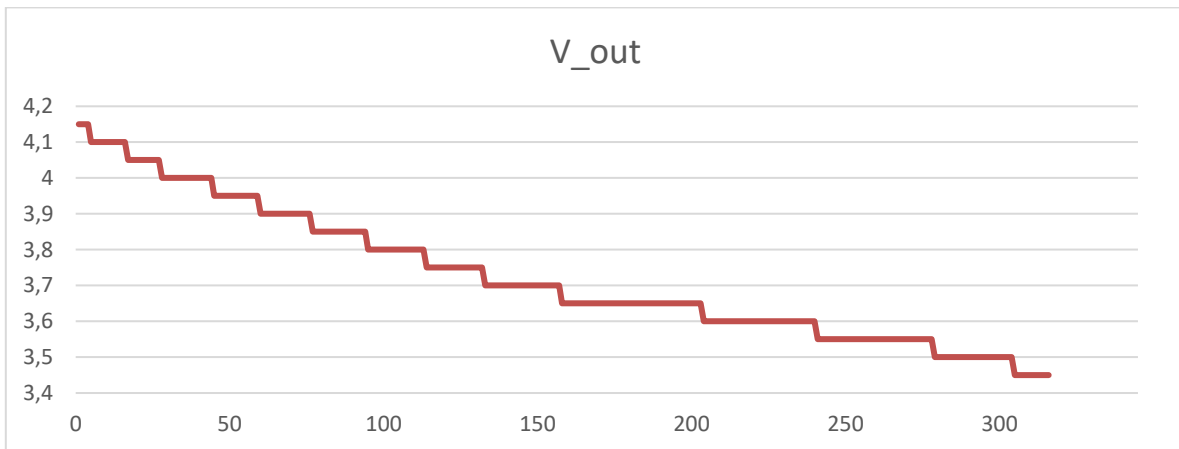


Figura 43a. Voltaje a la salida

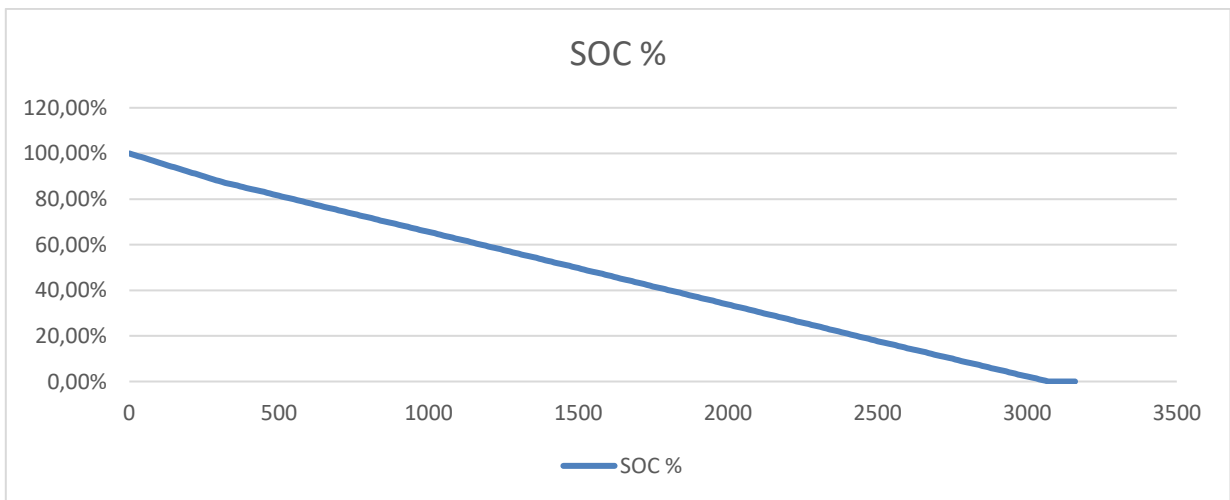


Figura 43b. Estado de carga de la batería

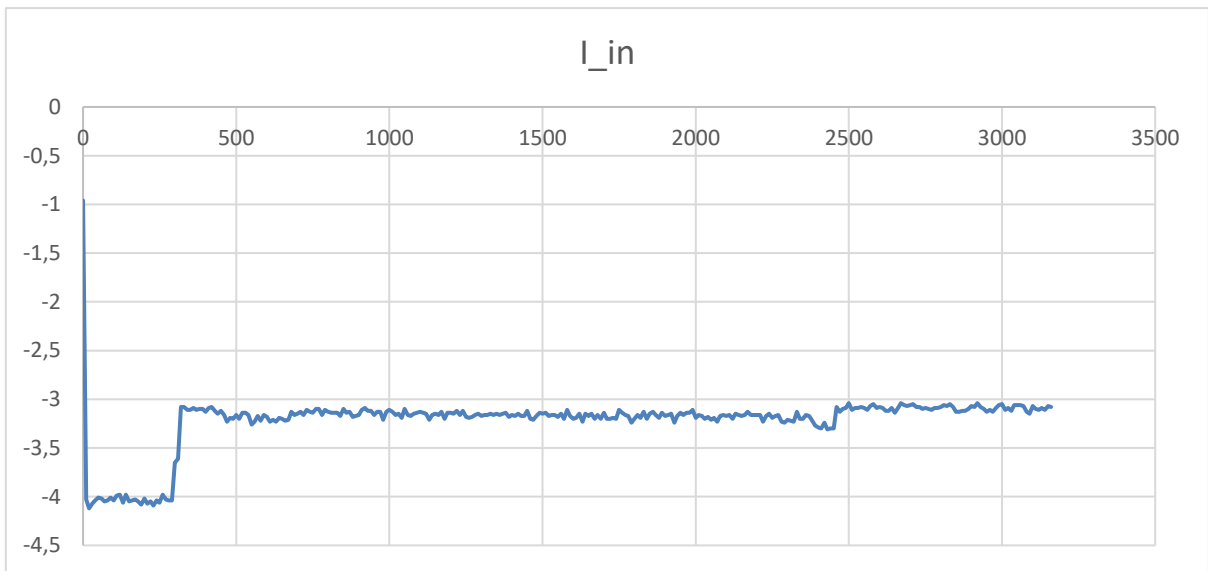


Figura 43c. Corriente de entrada

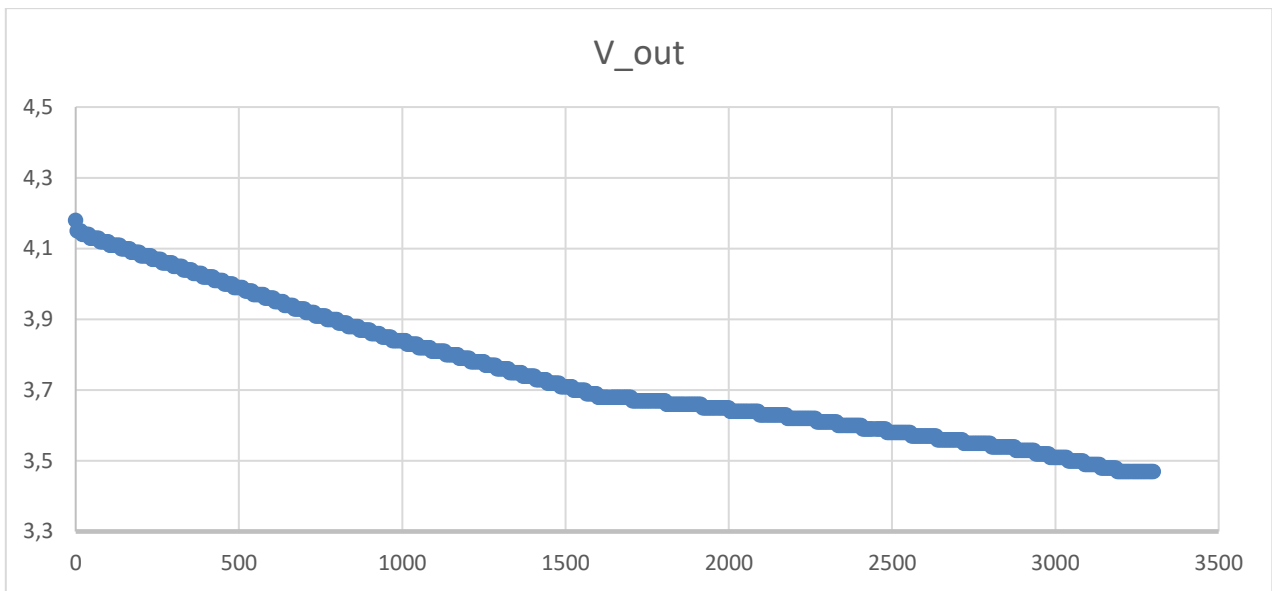


Figura 44a. Voltaje a la salida

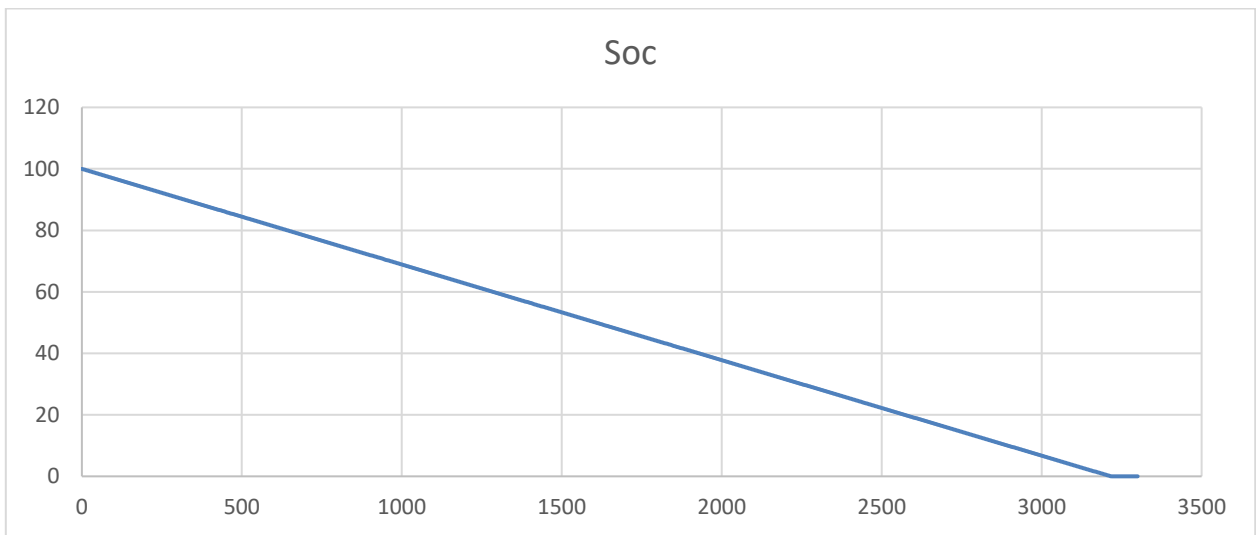


Figura 44b. Estado de carga de la batería

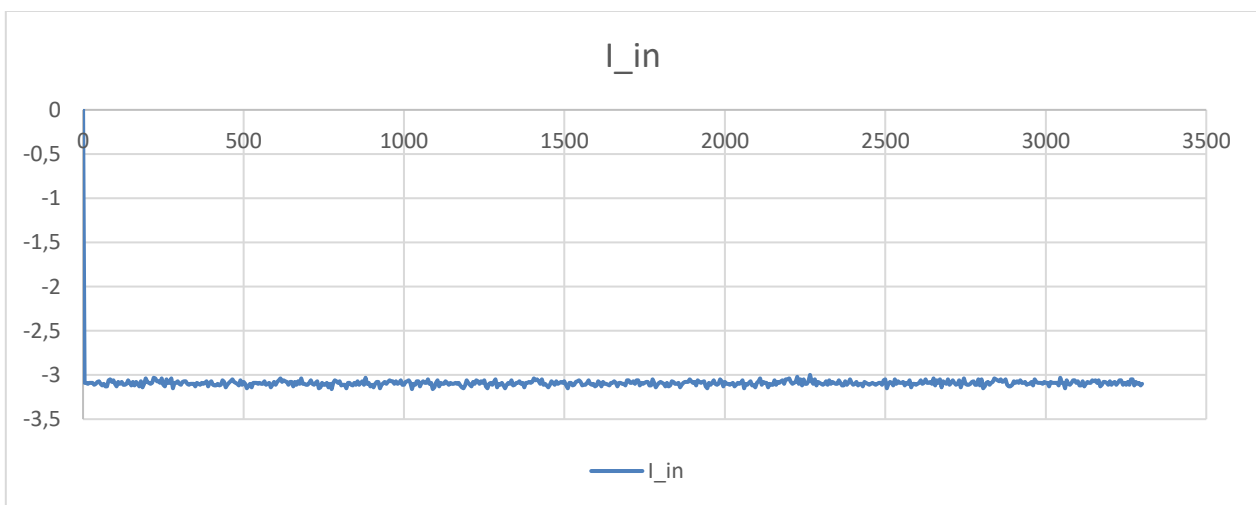


Figura 44c. Corriente de entrada

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

1. A la hora de hacer las pruebas se tienen limitaciones debido a la frecuencia de “*Speedgoat*”, ya que ésta no trabaja a altas frecuencias, además, cuando se hace la conexión con el banco de potencia no aumenta lo suficiente para visualizar la señal emitida en la simulación; por ello se deben tantear los tiempos de muestro tomando valores entre 10^{-3} y 10^{-4} , y el número de puntos en el *Scope* se modifica para aumentar la frecuencia.
2. En cuanto a la visualización de las gráficas se presenta una saturación por la velocidad del tiempo de muestreo, por tanto, las gráficas no son acordes a los datos obtenidos, sin embargo, los *Scope* numéricos muestran los cambios en las entras y salidas con respecto a los valores visualizado en el proceso de elaboración del proyecto.
3. El sistema de prueba *HIL* se puede usar de dos maneras, en la primera se puede simular el comportamiento deseado de la batería que se caracteriza, pero usando valores por fuera de las condiciones normales; en la segunda manera se puede realizar una simulación de un circuito en tiempo real de la misma batería en sus condiciones reales, para obtener un valor aproximado de su caracterización.
4. Gracias al banco de potencia es posible mantener los valores que se requieran para ingresar en el sistema de prueba, pero una vez el sistema de prueba falla se puede visualizar una alteración también en el banco de potencia.
5. EL software de adquisición de datos es importante para corroborar que el comportamiento de la simulación de la batería si concuerde con el comportamiento de la batería real. También contribuye a asegurar que los parámetros son los adecuados para experimentar y conocer los límites que esta

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

puede soportar, teniendo en cuenta las limitaciones de frecuencia del sistema de prueba *HIL*

5.2. Trabajos futuros

1. Se puede mejorar la adquisición de datos, sin necesidad de tener un software externo como se realizó en este proyecto. En el manual "*Target Machine Users Manual*" de la "*Speedgoat*" en el capítulo 8 se explica como por comandos asociados al dispositivo y archivos *.TXT* se pueden guardar los datos de las simulaciones realizadas cada vez que se inicia el bucle del sistema.
2. Se espera implementar un sistema de paneles solares que se puedan conectar a las baterías creado así un nuevo ciclo de carga y descarga de las mismas, en diferentes condiciones. Para esto es necesario cambiar el circuito de descarga desarrollado en este trabajo por uno que contemple la carga y descarga, es decir, que haga ambos procesos.

5.3. Recomendaciones

1. Explorar los diferentes modos existentes en el banco de potencia dado que en este proyecto se trabajó en el estado autónomo, maestro y modo tensión. También se recomienda intentar configurarlo para esta aplicación, por medio de su *software*.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- ALLEGRO. (20 de septiembre de 2013). *Alldatasheet*. Obtenido de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/428383/ALLEGRO/ACS712.html>
- CENER. (06 de septiembre de 2016). Obtenido de <https://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf>
- Company, T. p. (2018). *Banner the power company*. Obtenido de <https://www.bannerbatterien.com/es/Información-sobre-baterías/53-Diccionario-Banner-Capacidad>
- EM. (21 de enero de 2018). *Academia Estudio Metadatos*. Obtenido de <https://estudiometadatos.es/virtualizacion-vs-simulacion-vs-emulacion-diferencias-similitudes-ventajas-inconvenientes/>
- EnelGreenPower. (septiembre de 2020). *enelGreenPower*. Obtenido de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/almacenamiento/baterias-de-flujo>
- Etecé, E. (15 de Julio de 2021). *Concepto*. Obtenido de <https://concepto.de/bateria/>
- Executrain. (24 de septiembre de 2021). *Executrain*. Obtenido de <https://executrain.com.mx/emulacion-o-virtualizacion-que-es-que/#:~:text=Emular%20es%20lo%20que%20hacemos,su%20disposici%C3%B3n%20f%C3%ADsica%20y%20ubicaci%C3%B3n.>
- Ferdinandcinzano. (2019). *ELECTRICAL ENGINEERING*. Obtenido de <https://electronics.stackexchange.com/questions/398704/use-ac712-current-sensor-in-two-phase-electrical-system>
- Flores Gaspar, D. (17 de Julio de 2020). *Comparación de Modelos de Circuito Eléctrico Equivalente para una Batería de Ion-Litio con Validación Experimental*. Obtenido de <http://51.143.95.221/handle/TecNM/2954>
- Fontan, E. (09 de mayo de 2016). *Slideplayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/3395515/>
- Generación. (26 de mayo de 2020). *Enérgya VM*. Obtenido de <https://www.energyavm.es/baterias-de-flujo-que-son-y-como-funcionan/>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Hongwen , H., Rui, X., Hongqiang, G., & Shuchun , L. (2012). Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 113-121.
- Hw-group*. (2022). Obtenido de <https://www.hw-group.com/software/hercules-setup-utility>
- KEPCO, I. (2018). *Kepecopower*. Obtenido de <https://www.kepcopower.com/support/bop-gl-opr-r8.pdf>
- Kuratli, D. (09 de enero de 2022). *MATLAB Answers*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/matlabcentral/answers/28838-xpc-target>
- LLAMAS, L. (18 de enero de 2017). *LUIS LLAMAS*. Obtenido de sensor de corriente tanto alterna como continua, que permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor. Podemos emplear el ACS712 junto con un procesador como Arduino para medir la intensidad o potencia consumida por una carga.
- Mathworks. (mayo de 2012). Obtenido de https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/x/72256_91900v02_xPCTargetTurnkey_FactSheet_8.5x11.pdf.pdf
- MathWorks. (2022). *MathWorks*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/hardware-in-the-loop.html>
- Mcclain, S. (04 de noviembre de 2018). *techlandia*. Obtenido de https://techlandia.com/diferencias-nicd-nimh-info_398506/
- Miniguano, H. S. (10 de septiembre de 2019). *uc3m Universidad Carlos III de Madrid Biblioteca*. Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/31517>
- Mttis. (2021). *Speedgoat- Setup Guide*. Tokio. Obtenido de https://www.mttis.co.jp/wp/wp-content/uploads/2021/12/speedgoat_セットアップガイド_R2021b_beyond_v102.pdf
- Ortega, I. (28 de septiembre de 2021). *CIC energi GUNE*. Obtenido de <https://cicenergigune.com/es/blog/sistemas-gestion-termica-baterias-btms-vehiculo-electrico>
- Plett, G. L. (2015). *Battery Management Systems (Vol. 1)*. Norwood, MA: Artech House.
- Promod. (02 de octubre de 2014). Obtenido de <http://www.promod.com.tr/educationrttm.html>
- Rodríguez Cea, Á. I. (2017). *uVa*. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24673/TFM-I-648.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- S.Robins. (13 de febrero de 2012). *LaIngenieria*. Obtenido de <https://laingenieria.info/questions/340/cual-es-la-diferencia-entre-simulacion-y-emulacion>
- Shops, H. (2 de febrero de 2022). *TodoSai 2.0*. Obtenido de <https://todosai.com/blog/baterias-tipos-y-usos-b50.html>
- Speedgoat, G. (2006-2012). *IO102 I/O module*. Liebefeld.
- Speedgoat, G. (2006-2013). *Technical Reference Information and Full System Test*. Liebefeld.
- Stihl. (01 de Julio de 2021). *STIHL*. Obtenido de <https://www.stihl.es/es/guias-e-ideas-proyectos-bricolaje/mantenimiento-de-maquinas/mantenimiento-de-baterias/efecto-memoria-en-baterias#:~:text=Este%20fen%C3%B3meno%20se%20conoce%20como,con%20la%20capacidad%20total%20original>.
- Team, M. S. (09 de diciembre de 2013). *MATLAB Answers*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/matlabcentral/answers/109230-fatal-error-while-building-simulink-model-with-xpc-target-blocks>
- Voltimum. (18 de diciembre de 2019). Obtenido de <https://www.voltimum.es/noticias-del-sector-electrico/proceso-carga>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE
