

SIMULACIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA.

JUAN DANIEL GALINDO RAMÍREZ
OSCAR OLARTE ORTIZ

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

2018

SIMULACIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA.

JUAN DANIEL GALINDO RAMIREZ
OSCAR OLARTE ORTIZ

Trabajo de grado para optar al 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
2018

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Mercy Ortiz Amado, mi ángel, mi todo, sin ti nada sería posible, a mi tía y hermana, Marinella Ortiz Amado, por su apoyo incondicional y gran corazón, a mi hijo Samuel David Olarte Silva, por ti y para ti, y a todas aquellas personas que hicieron posible este logro, familia, amigos, compañeros, profesores y demás.

Oscar Olarte Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de formarme profesionalmente, por la sabiduría que me brindó para solucionar los diferentes problemas y dificultades que se me presentaron a lo largo de la carrera.

Quiero expresar mi agradecimiento al profesor Javier Solano por darme la oportunidad de realizar este trabajo de grado, por su paciencia y apoyo durante la ejecución de éste.

Agradezco mi madre Ana Inés Cala por el infinito amor y paciencia, a mi hermana Ivonne Lorena por su constante apoyo a lo largo de mi carrera y a mi familia en general por su apoyo emocional.

Gracias a aquellos amigos con los que comparto una gran amistad desde el colegio. A mis amigos los Masters por estar siempre presentes cuando más los necesitaba en aquellos momentos de mayor estrés. A mis amigos de la sede Barrancabermeja por todas las experiencias vividas a lo largo de la carrera y a aquellos que conocí en la E3T con los que compartí experiencias académicas y emocionales.

Juan Daniel Galindo Ramírez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. JUSTIFICACIÓN, MOTIVACIÓN O PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo general.....	17
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.2 ALCANCE.....	18
2. SUPERCONDENSADORES.....	19
2.1 TECNOLOGÍA DEL SUPERCONDENSADOR.	20
2.2 APLICACIONES	22
3. MODELOS ELÉCTRICOS DEL SUPERCONDENSADOR	24
3.1 MODELO RC	24
3.2 MODELO PROPUESTO POR RAFIK.....	25
3.3 MODELO DEL SUPERCONDENSADOR PROPUESTO POR ZUBIETA.....	26
3.4 MODELO DE ZUBIETA SIMPLIFICADO	27
3.5 MODELO SELECCIONADO	28
4. SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES....	29
4.1 ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	29
4.2 ALGORITMO GENÉTICO.....	31
4.2.1 Implementación.	31
4.3 LA FUNCIÓN FMINCON	32
4.3.1 Sintaxis.	33
4.3.2 Implementación.	33

4.4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO POR SIMULACIÓN.....	34
5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	36
5.1 DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	36
5.2 PRUEBAS DE LABORATORIO	38
5.3 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 5F.	39
5.4 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 25F.	42
5.5 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 100F.	45
5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
6. CONCLUSIONES	48
7. RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación de las características típicas del condensador electrolítico, supercondensador y batería.	21
Tabla 2. Parámetros obtenidos con los métodos iterativos.	34

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Ragone.....	20
Figura 2. Representación esquemática de un supercondensador.....	21
Figura 3. Detalles constructivos de un supercondensador.....	22
Figura 4. Modelo RC del supercondensador.....	24
Figura 5. Grafica de tensión vs tiempo experimental y del modelo RC.....	25
Figura 6. Modelo eléctrico del supercondensador propuesto por Rafik.....	25
Figura 7. Modelo propuesto por Zubieta.....	26
Figura 8. Modelo eléctrico equivalente del supercondensador de Zubieta simplificado.....	27
Figura 9. Algoritmo de identificación de parámetros.....	30
Figura 10. Resultados obtenidos.....	34
Figura 11. Circuito montaje experimental.....	37
Figura 12. Montaje experimental.....	39
Figura 13. Modelo equivalente para el supercondensador de 5F.....	40
Figura 14. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 5F.....	40
Figura 15. Modelo equivalente para el supercondensador de 25F.....	42
Figura 16. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 25F.....	43
Figura 17. Modelo equivalente para el supercondensador de 100F.....	45
Figura 18. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 100F.....	46

LISTA DE ANEXOS

“Ver Anexos adjuntos al CD”

Anexo A Simulación del modelo de Zubieta simplificado.

Anexo B. Algoritmo genético.

Anexo C. Fmincon.

Anexo D. Código de adquisición del Arduino.

Anexo E Media móvil para el filtrado de la tensión en el supercondensador.

Anexo F. Equipos y pruebas realizadas.

Anexo G. Pruebas SC

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA.*

AUTORES: JUAN DANIEL GALINDO RAMÍREZ, OSCAR OLARTE ORTIZ.**

PALABRAS CLAVES: SUPERCONDENSADOR, MATLAB, F, ALGORITMOS GENÉTICOS, ARDUINO, CARGA Y DESCARGA

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se diseña, construye y valida un sistema que permite caracterizar supercondensadores de baja potencia. Dicha caracterización se basa en identificar los elementos pasivos del circuito equivalente del supercondensador propuesto por Luis Zubieta en la referencia [9] y desarrollado en la referencia [1] por nuestro director de proyecto.

Inicialmente se analiza el circuito equivalente, identificando los diferentes parámetros que componen este modelo. Usando el software Matlab se diseña un algoritmo de identificación de parámetros el cual tiene como datos de entrada los vectores de tensión y corriente experimentales. Estos datos se obtienen al realizar pruebas en el laboratorio (carga y descarga del supercondensador), la adquisición de éstos se logra mediante el hardware y software Arduino, también se utiliza el complemento de software Parallax Data Acquisition Tool (PLX-DAQ), herramienta para la adquisición e impresión de datos en tiempo real del microcontrolador Parallax para Microsoft Excel.

Para validar el algoritmo se impone la corriente experimental en el modelo, se hace la simulación de la tensión y se encuentra la mínima diferencia con la tensión experimental aplicando métodos iterativos, minimizando el error mediante la función objetivo error cuadrático medio. Cuando la diferencia entre la tensión de simulación y la obtenida en el laboratorio es menor a la tolerancia fijada en el algoritmo, se acaban las iteraciones y se obtienen los valores de los elementos pasivos del circuito eléctrico que representa el comportamiento del supercondensador, cumpliendo con el objetivo principal de este proyecto.

* Trabajo de grado.

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

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION AND ASSEMBLY OF A SYSTEM FOR CHARACTERIZATION OF LOW POWER SUPERCAPACITORS.*

AUTHORS: JUAN DANIEL GALINDO RAMIREZ, OSCAR OLARTE ORTIZ.**

KEYWORDS: SUPERCAPACITORS, MATLAB, GENETIC ALGORITHMS, ARDUINO, CHARGE AND DISCHARGE.

DESCRIPTION:

In this final project for graduation will design a system that will characterize supercapacitors of low power. The characterization is based on finding the passive elements of the equivalent circuit of the supercapacitor proposed by Zubieta.

Initially, the equivalent circuit will be analyzed, identifying the different parameters that make up this model. Using the MatLab program, a parameter identification algorithm will be designed which will have the experimental voltage and current vectors as input data. These data are obtained when testing in the laboratory (charge and discharge of the supercapacitor), the acquisition of these is achieved through the Arduino hardware and software. The Parallax Data Acquisition Tool (PLX-DAQ) software add-on is also used, a tool for the acquisition and printing of real-time data from the Parallax microcontroller for Microsoft Excel.

To validate the algorithm, the experimental current in the model is imposed, the simulation of the voltage is made and the minimum difference is found with the experimental voltage, applying iterative methods, minimizing the error between both by means of the objective function square root error. When the difference between the simulation voltage and that obtained in the laboratory is less than the tolerance set in the algorithm, the iterations are finished and the values of the passive elements of the electric circuit representing the behavior of the supercapacitor are obtained, complying with the main objective of this project.

* Final project for graduation.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronic and Telecommunication. Director Javier Enrique Solano Martínez Electrical Engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

Supercondensadores, ultracondensadores y condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC) son nombres comúnmente utilizados para esta clase de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía. Este dispositivo es ideal para almacenar y liberar energía rápidamente. El término “supercondensador” se adopta en este documento.

Los supercondensadores se presentan como una alternativa energética, técnica y económicamente viable en aplicaciones de gran potencia y de movilidad eléctrica. Para integrar este dispositivo a estas aplicaciones es necesario conocer su funcionamiento y tener a disposición modelos eléctricos que permitan simular el comportamiento real de este dispositivo¹. Con este propósito se diseña un sistema que permite caracterizar el modelo eléctrico seleccionado para representar el supercondensador, mediante un algoritmo de identificación de parámetros.

En el capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema y los objetivos del trabajo de grado. El capítulo 2 corresponde a los conceptos básicos de los supercondensadores, exponiendo sus aspectos constructivos, especificaciones eléctricas y aplicaciones en el sector eléctrico. En el capítulo 3 se realiza la revisión de los diferentes modelos de supercondensadores propuestos en la literatura y se expone las razones por las cuales se escogió el modelo propuesto por Luis Zubieta²

En el capítulo 4 se presenta el algoritmo de identificación de parámetros, los métodos iterativos: algoritmo genético y la función fmincon. Se validan los resultados del algoritmo genético a través de la función fmincon, comparando los

¹“Sistemas electroquímicos y nanotecnología para el almacenamiento de energía limpia”; Bisquert, J. <http://www.enerize.com/superCap.php>

² G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

resultamos obtenidos por simulación. En el capítulo 5 se diseñan el montaje experimental junto con las pruebas de laboratorio realizadas y se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los supercondensadores en estudio, se realiza el análisis de resultados y por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

1. JUSTIFICACIÓN, MOTIVACIÓN O PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Los supercondensadores se presentan como una alternativa energética, técnica y económica viable en aplicaciones de gran potencia y de movilidad eléctrica. Para integrar este dispositivo a estas aplicaciones es necesario conocer su funcionamiento y tener a disposición modelos que permitan simular el comportamiento real de este dispositivo debido a que la información entregada por los fabricantes no alcanza a representar su operación³. Con este propósito se diseña un sistema que permita caracterizar los elementos del circuito eléctrico seleccionado, mediante un algoritmo de identificación de parámetros.

Disponer con una herramienta que permita la descripción, utilización, caracterización e investigación del supercondensador de baja potencia es importante debido a la proliferación, importancia actual y potencial futuro que poseen en almacenamiento y empalmes con energías renovables; por ende, es importante para el grupo GISEL contar con un sistema que permita caracterizar estos dispositivos mediante pruebas de laboratorio (carga y descarga del supercondensador).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general. Simular y realizar el montaje de un sistema para la caracterización de supercondensadores de baja potencia.

³ "Sistemas electroquímicos y nanotecnología para el almacenamiento de energía limpia"; Bisquert, J. <http://www.enerize.com/superCap.php>

1.1.2 Objetivos específicos

- Implementar el algoritmo de identificación de parámetros de supercondensadores presentado en la referencia⁴ utilizando datos experimentales (tensión, corriente), para determinar su validez.
- Diseñar e implementar pruebas de laboratorio (carga y descarga) para la identificación de parámetros del supercondensador de baja potencia.

1.2 ALCANCE

El propósito de este proyecto de investigación es diseñar un sistema que permita caracterizar supercondensadores de baja potencia. Con esta caracterización se busca determinar los valores de los elementos pasivos del circuito eléctrico que representa su comportamiento ante diferentes condiciones de operación.

Se utilizan algunos de los modelos eléctricos del supercondensadores propuestos en la literatura y se selecciona un circuito equivalente que represente el comportamiento del dispositivo (gráficas de tensión y corrientes vs tiempo). Para validar las características del circuito equivalente seleccionado, se comparará la tensión experimental y de simulación por medio de la imposición de la corriente experimental en el modelo, caracterizando los parámetros que lo conforman encontrando la mínima diferencia existente.

⁴ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

2. SUPERCONDENSADORES

Las características más importantes que definen un supercondensador son la capacitancia, tensión máxima, corriente nominal, resistencia serie (ESR DC) corriente máxima, energía específica y la potencia específica. A continuación, se definen brevemente estos conceptos, los cuales son importantes para entender el funcionamiento del supercondensador y las diferencias que tiene con otros dispositivos como capacitores tradicionales y baterías.

- **Capacitancia:** Es la cantidad de carga que un supercondensador puede acumular para un rango definido de tensión, se expresa en faradios (F).
- **Tensión máxima o nominal:** Es la máxima tensión en la que puede operar el supercondensador de forma segura, se expresa en voltios (V).
- **Corriente nominal:** Es la corriente a la cual se diseña el dispositivo para trabajar en condiciones de estado permanente, se expresa en Amperios(A).
- **Resistencia serie (ESR DC):** corresponde a la resistencia serie equivalente que se asocia al electrolito, electrodos, terminales, etc.
- **Corriente máxima:** Es la máxima corriente pico que se puede obtener en 1 s en condiciones especiales de temperatura y tensión, se expresa en Amperios (A).
- **Energía específica:** Representa la energía que puede suministrar un elemento en relación con su masa. Se expresa en (Wh/kg).
- **Potencia específica:** Corresponde a la potencia que puede suministrar un elemento en relación con su masa. Se expresa en (W/kg).

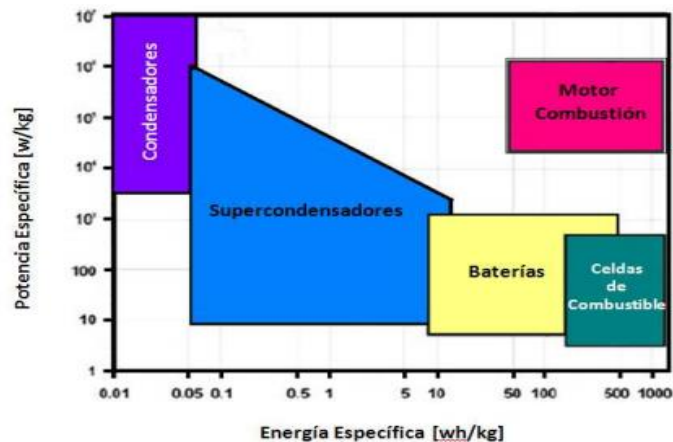
Las características anteriores son suministradas por el fabricante del dispositivo en su hoja de datos.

2.1 TECNOLOGÍA DEL SUPERCONDENSADOR.

En comparación con los condensadores convencionales, la energía específica de los supercondensadores es significativamente mayor (de ahí el prefijo 'super'). Los supercondensadores también tienen una potencia específica más alta que la mayoría de las baterías, pero su energía específica es menor. A través del diseño de celda apropiado, tanto la energía específica como los rangos de potencia específica para el supercondensador pueden cubrir varios órdenes de magnitud y esto los hace versátiles como un suministro de energía independiente, o en combinación con baterías como un sistema híbrido⁵.

Esta combinación única de capacidad de alta potencia y buena energía específica permite que los supercondensadores ocupen una posición funcional entre las baterías y los condensadores convencionales como se muestra en el diagrama de Ragone (Figura 1). En la tabla 1 se comparan los supercondensadores, condensadores electrolíticos y baterías de una forma más detallada.

Figura 1. Diagrama de Ragone.



Fuente: Tomado Kötzt, R., Carlem ⁶

⁵ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

⁶ Kötzt, R., Carlem, M., "Principles and applications of electrochemical capacitors"; Electrochemical Acta, 2000, 45, 2483.

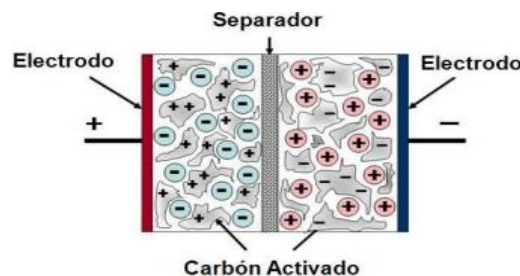
Tabla 1. Comparación de las características típicas del condensador electrolítico, supercondensador y batería.

Característica	Condensador electrolítico	Supercondensador	Batería
Energía específica (Wh/kg)	<0.1	1-10	10-100
Potencia específica (W/kg)	>>10000	500-10000	<1000
Tiempo de descarga	10^{-6} a 10^{-3} s	seg a min	0.3-3 h
Tiempo de carga	10^{-6} a 10^{-3} s	seg a min	1-5 h
Eficiencia (%)	~100	85-98	70-85

Fuente: Modificado de A.F. Burke, T.C. Murphy ⁷

El supercondensador se beneficia del principio de capacitancia de doble capa, esto permite aumentar la capacitancia al reducir la distancia entre los electrodos y aumentar la superficie de los electrodos activos. Está constituido por dos electrodos de iones fijos, uno positivo con deficiencia de electrones y otro negativo como consecuencia de un exceso de electrones, como se muestra en la figura 2. El valor de capacitancia del supercondensador es varios órdenes mayor que en condensadores eléctricos convencionales. Sin embargo, el uso de un electrolito para aumentar la capacitancia también tiene una consecuencia no deseada: el voltaje máximo en el supercondensador es muy reducido (limitado a alrededor de 2.7 [V])⁸. Para aumentar la tensión del terminal, es necesario conectar varios supercondensadores en serie.

Figura 2. Representación esquemática de un supercondensador.



Tomado de Bisquert, J. ⁹

⁷ A.F. Burke, T.C. Murphy, Materials for Electrochemical Energy Storage and Conversion—Batteries, Capacitors and Fuel Cells: Symposium Held, April 17–20, 1995, San Francisco, CA, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 1995, p. 375.

⁸ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

⁹ "Sistemas electroquímicos y nanotecnología para el almacenamiento de energía limpia"; Bisquert, J. <http://www.enerize.com/superCap.php>

El comportamiento del supercondensador no sólo depende de la tensión aplicada, sino que está sujeto a muchos factores los cuales son explicados en el artículo publicado por Pandolfo Hollenkamp titulado “*Carbon properties and their role in supercapacitors*”¹⁰. En la figura 3 se muestran las partes del supercondensador.

Figura 3. Detalles constructivos de un supercondensador.



Fuente: Tomado de Eva Clara Pérez Lobo¹¹

2.2 APLICACIONES

Debido a su proceso de almacenamiento de carga altamente reversible, los supercondensadores tienen ciclos de vida más largos y pueden cargarse y descargarse rápidamente a densidades de potencia superiores a 1 kW/kg¹². Estas características han generado un gran interés en la aplicación de supercondensadores para una amplia y creciente gama de aplicaciones que

¹⁰ A. G. Pandolfo, A. F. Hollenkamp. (2006) Carbon properties and their role in supercapacitors, J. Power Sources, 157, 11.

¹¹ Eva Clara Pérez Lobo ESTUDIO DE LOS SUPERCONDENSADORES Y SU VIABILIDAD COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS, Dpto. de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla- Sevilla, 2016.

¹² A. G. Pandolfo, A. F. Hollenkamp. Carbon properties and their role in supercapacitors, J. Power Sources, 157, 11. 2006

incluyen: productos electrónicos de consumo, plantas de generación fotovoltaica y eólica, vehículos eléctricos híbridos y administración de energía industrial.

Como sistema de almacenamiento en plantas de generación fotovoltaica pueden permitir que éstas se comporten como fuentes de potencia constante, al menos durante intervalos cortos de tiempo, lo que podría redundar en una mejor gestión de la red eléctrica¹³. Además, los supercondensadores podrían implantarse fácilmente en los sistemas actuales, ya que almacenan directamente la energía en forma eléctrica y podrían sustituir a los condensadores convencionales que se emplean en los sistemas de inyección de potencia.

Estas son algunas aplicaciones de los supercondensadores tomadas de la referencia¹⁴.

- Transporte eléctrico: Autobuses eléctricos, arranque de grupo de vehículos pesados (automóviles, camiones, maquinaria pesada y sistemas marítimos), reutilización de la energía en sistemas de frenado y asistencia en picos de consumo.
- Sistemas de potencia (generación y redes eléctricas): Actuación del paso de pala en turbinas eólicas, sistema de seguimiento en parques solares y fotovoltaicos, regulación de tensión y frecuencia, compensación de oscilaciones en renovables, reserva rodante en generación y micro redes.
- Física básica: Reactores de fusión y aceleradores de partícula (aportes grandes de potencia sin afectar la red y recuperación de la energía aportada en los imanes).
- Aplicaciones industriales: Actuadores de emergencia de las puertas del Airbus A380, grúas y elevadores, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) e hibridación con baterías.

¹³ M.A. Guerrero, E. Romero, M. Milanés, V. Miñambres, E. González "Aplicación de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Supercondensadores en Plantas de Generación Fotovoltaica", Sistemas Eléctricos y Electrónicos de Potencia (PE&ES), Escuela de Ingeniería Industriales, Universidad de Extremadura, Badajoz, España.

¹⁴ Marcos Lafoz Pastor "Supercondensadores: estado del arte, aplicaciones y retos tecnológicos" Unidad de Sistemas Eléctricos de Potencia, División de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Tecnología, Ciemat, Madrid, España. 2018

3. MODELOS ELÉCTRICOS DEL SUPERCONDENSADOR

Para integrar los supercondensadores a sus diferentes aplicaciones en el sector eléctrico es necesario conocer su funcionamiento y tener a disposición modelos que permitan simular el comportamiento real de este dispositivo. En este capítulo se presentan algunos de los modelos presentados en la literatura.

3.1 MODELO RC

Está conformado por un capacitor C y una resistencia serie equivalente (ESR_{dc}) como se muestra en la figura 4. Las especificaciones dadas en las hojas de datos de los fabricantes solo permiten utilizar este modelo.

A pesar de conocer los parámetros de su circuito gracias a la información suministrada por el fabricante, el modelo RC no representa los resultados experimentales de una forma adecuada como podemos ver en la figura 5, por lo tanto, es necesario encontrar un modelo que represente el comportamiento del supercondensador con una mayor exactitud.

Figura 4. Modelo RC del supercondensador.

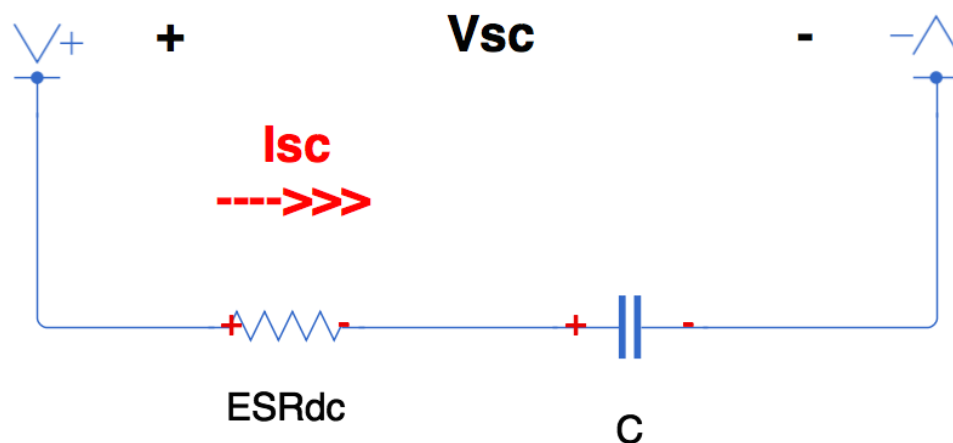
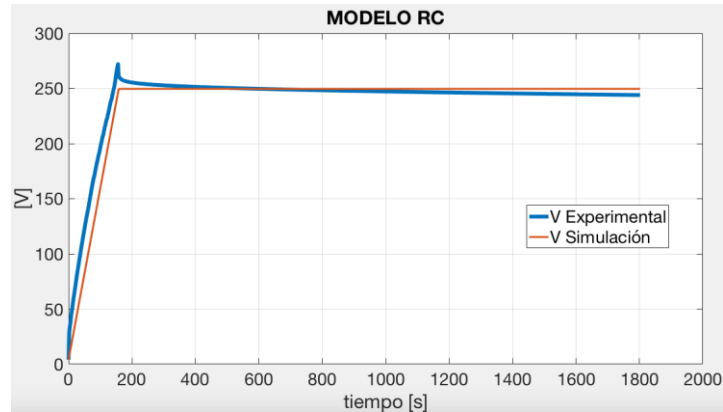


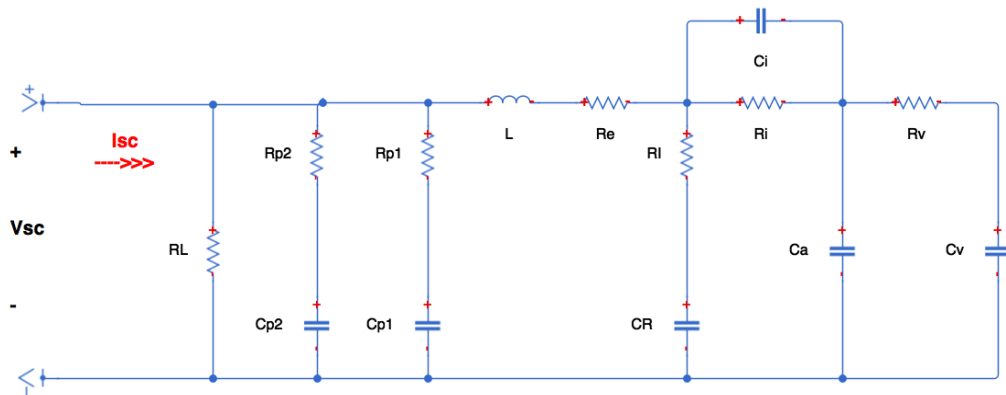
Figura 5. Grafica de tensión vs tiempo experimental y del modelo RC.



3.2 MODELO PROPUESTO POR RAFIK.

Este modelo presenta la dependencia de tensión, frecuencia y temperatura en el supercondensador, por medio de los elementos RLC que se muestran en la figura 6. Las características de este modelo eléctrico del supercondensador son explicadas en el artículo publicado por F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, y A. Berthon titulado *“Thermal and oltaje supercapacitor characterization and modeling”*¹⁵.

Figura 6. Modelo eléctrico del supercondensador propuesto por Rafik.



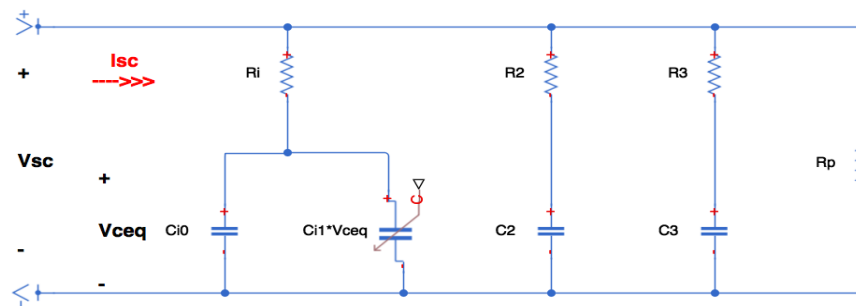
¹⁵ F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. Journal of power sources, Vol. 165, No. 2, pp. 928-934, 2007.

Para los supercondensadores que se caracterizaron, no se tuvieron en cuenta la incidencia de la temperatura ambiente a la hora de hacer la prueba de laboratorio, estas pruebas se realizaron a condiciones de baja frecuencia, por lo tanto, el elemento inductivo (L) en el circuito, el cual representa las altas frecuencias, no será necesario. A pesar de modelar los diferentes factores que afectan el funcionamiento del supercondensador (tensión, temperatura y frecuencia), las variaciones de temperatura y frecuencia se consideran insignificantes, por esta razón no se usará el modelo propuesto por Rafik.

3.3 MODELO DEL SUPERCONDENSADOR PROPUESTO POR ZUBIETA.

El modelo de Luis Zubieta con elementos pasivos se basa en el comportamiento electroquímico del supercondensador similar al del condensador electrolítico, pero teniendo en cuenta el fenómeno de redistribución de carga interna. En la rama principal se representa la acumulación de energía y la rama secundaria la redistribución de carga y auto descarga. El circuito equivalente se muestra en la figura 7.

Figura 7. Modelo propuesto por Zubieta.



Luis Zubieta¹⁶ propone un modelo de circuito con tres constantes de tiempo RC distintas que cubren el rango de tiempo deseado (30 minutos). La primera rama o

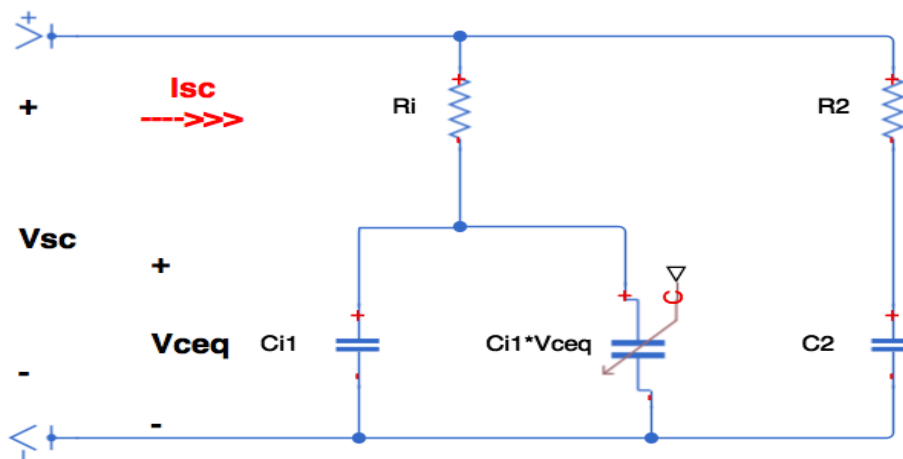
¹⁶ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

la rama inmediata, con los elementos R_i, C_{i0} y el condensador que modela la dependencia de la tensión C_{i1} (en F / V), representa el comportamiento del supercondensador en el intervalo de tiempo de segundos en respuesta a una acción de carga. La segunda rama o retardada, con parámetros R_2 y C_2 representa el comportamiento el comportamiento del supercondensador en el intervalo de tiempo de pocos minutos. Finalmente, la tercera o rama de largo plazo, con parámetros R_3 y C_3 determina el comportamiento para tiempos superiores a 10 min.

3.4 MODELO DE ZUBIETA SIMPLIFICADO

El modelo de Zubieta simplificado se presenta como una alternativa para modelar el supercondensador con un circuito más sencillo, reduciendo las ramas secundarias en una sola rama (hipótesis de bajas frecuencias). El circuito equivalente de Zubieta simplificado se ilustra en la figura 8. Este modelo se trabaja en¹⁷.

Figura 8. Modelo eléctrico equivalente del supercondensador de Zubieta simplificado.



¹⁷ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

3.5 MODELO SELECCIONADO

Inicialmente se trabajó con el modelo de Zubieta simplificado¹⁸, sin embargo se presentaron algunas discrepancias a la hora de desarrollar este modelo. Por tal motivo se seleccionó el modelo propuesto originalmente por Luis Zubieta¹⁹ ya que representaba de una mejor manera el comportamiento del supercondensador. Aunque el costo computacional de usar el modelo de Zubieta es ligeramente mayor, esto se compensa con la capacidad de entregar resultados que permiten lograr el objetivo inicial de representar el comportamiento real del supercondensador de la mejor manera.

¹⁸ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

¹⁹ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

4. SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES.

Teniendo el modelo matemático del supercondensador, se necesitan mecanismos y herramientas computacionales que permitan identificar los parámetros que lo conforman. Este capítulo presenta la metodología necesaria de la siguiente manera:

En la sección 4.1 se introduce el algoritmo de identificación de parámetros tomados de²⁰, con el cual, mediante una serie de condiciones, requerimientos experimentales y una herramienta computacional iterativa, logra caracterizar supercondensadores.

En la sección 4.2 se desarrolla un algoritmo genético de nuestra autoría como herramienta computacional y en la sección 4.3 se implementa la función de optimización (fmincon) con el mismo fin de minimizar de la función objetivo.

Y en la sección 4.4 se hace una comparación y validación de los resultados del algoritmo genético frente a los resultados encontrados por la función de optimización fmincon.

4.1 ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

En la figura 9 se muestra el algoritmo de identificación de parámetros²¹ ejecutado en el presente proyecto. Junto con el modelo matemático del supercondensador, valores experimentales de tensión y corriente, la definición de condiciones iniciales y un proceso iterativo, se hace la búsqueda de los parámetros a caracterizar.

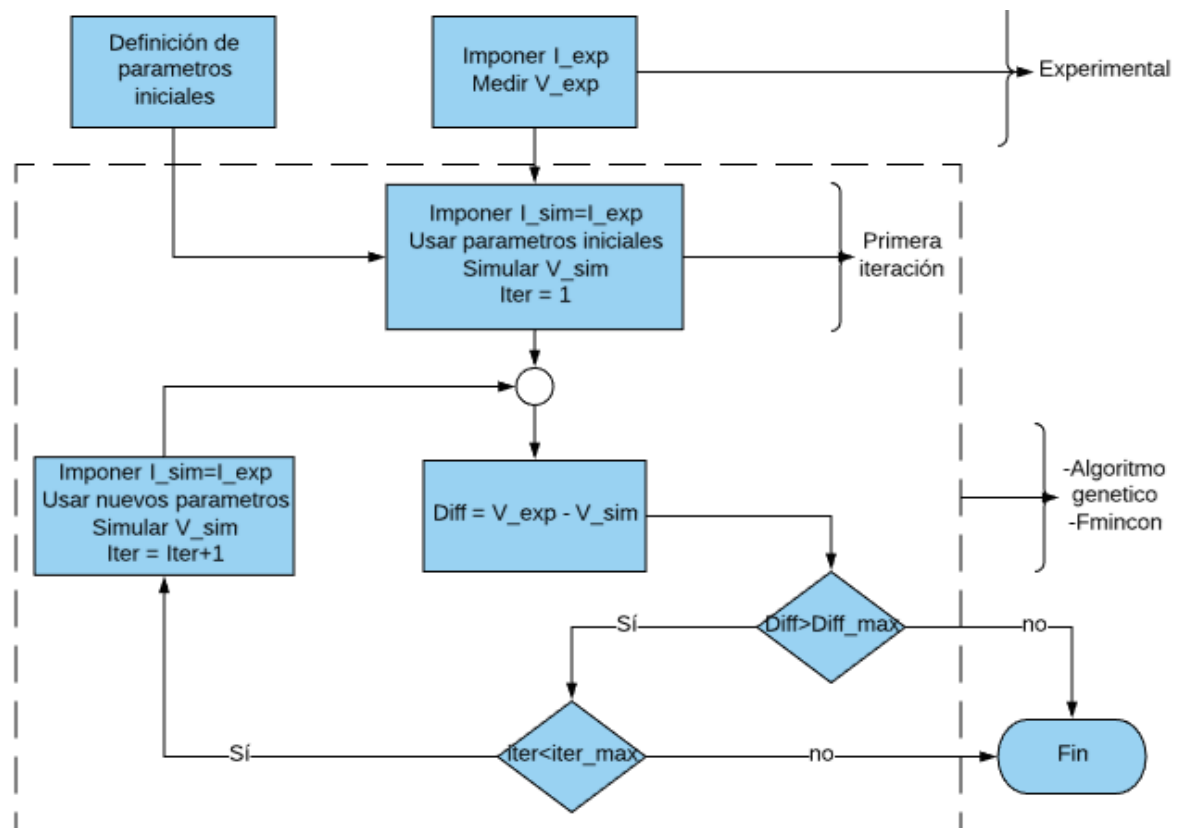
²⁰ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

²¹ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

El proceso iterativo es realizado por el algoritmo genético y la función fmincon mediante la simulación de la tensión en el supercondensador, imponiendo la corriente experimental en el modelo y con la ayuda de la función objetivo: error cuadrático medio, se busca la mínima diferencia entre la tensión experimental y la tensión de simulación, caracterizando los parámetros del modelo que mejor se adapte al seguimiento de la tensión en el rango de las condiciones iniciales seleccionado. Si los resultados no cumplen con el error de truncamiento, se deben replantear las condiciones iniciales y volver a iniciar el proceso.

Los valores experimentales necesarios son obtenidos a través de pruebas de laboratorio: carga y descarga de supercondensadores, contempladas en el siguiente capítulo.

Figura 9. Algoritmo de identificación de parámetros



4.2 ALGORITMO GENÉTICO

A la imitación del encadenamiento de instrucciones que describe la manera de resolver problemas de búsqueda y optimización se les llaman algoritmos genéticos (AG). Adoptan este apellido debido a su fundamentación basada en el proceso genético de la evolución biológica acorde con la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, principios los cuales fueron postulados por Charles Robert Darwin en 1859.

En 1975 John Henry Holland establece los rudimentos de los algoritmos genéticos como funciones matemáticas en rutinas de software, tomando como entrada conjuntos de valores numéricos aleatorios que las satisfagan y retornando como salida una clasificación seleccionada de dichos valores según su eficiencia.

Las posibles soluciones del problema se representan mediante un conjunto de parámetros (genes), agrupados forman una cadena de genes (cromosoma) generalmente binarios debido a sus primeras aplicaciones, pero que no restringen su uso a valores reales.

En biología, un cromosoma particular se denomina fenotipo, el cual constituye un organismo designado como genotipo. La adaptación de un gen depende de la evaluación del genotipo mediante una función que asigna un número real que refleja el nivel de eficiencia que cumple.

4.2.1 Implementación. La concepción del algoritmo genético se realiza bajo las siguientes instrucciones:

1. Generar tres subpoblaciones de cromosomas o fenotipos (combinaciones de los genes R_i , C_i0 , C_i1 , C_2 , R_2 , C_2 , R_3 , R_p) aleatoriamente con las condiciones iniciales pertinentes.

2. Mediante el genotipo (modelo de Zubieta²²) y la función de adaptación (error cuadrático medio) se evalúan y clasifican los fenotipos según su eficiencia.
3. Aplicando elitismo y selección proporcional a la aptitud se eligen en cada subpoblación los fenotipos más fuertes para tener la oportunidad de reproducirse.
4. Se adjudican dos operadores de cruce por subpoblación, el primero selecciona dos progenitores dando como resultado un hijo con información genética de ambos seleccionada aleatoriamente y el segundo toma los genes individualmente de los fenotipos más fuertes y los muta caóticamente en fenotipos recombinados agregando mayor riqueza genética.
5. Adicionalmente se atribuye el mismo proceso reproducción entre subpoblaciones implementando el modelo de islas con comunicación en red.
6. A continuación, se agrupan los fenotipos más fuertes de las subpoblaciones junto con sus hijos y fenotipos mutados en cada una de las etapas de reproducción.
7. La población agrupada es evaluada nuevamente, seleccionada, cruzada y recombinada para crear una tercera generación, la cual es añadida al mismo grupo progenitor obteniendo la población final del proceso.
8. La población final es evaluada seleccionando el fenotipo más eficiente de la iteración con un error de truncamiento dado, si este no cumple con lo esperado se lanza nuevamente todo el proceso.

4.3 LA FUNCIÓN FMINCON

Es una función de optimización perteneciente al toolbox de optimización del software MatLab, que logra minimizar o maximizar una función multivariable con restricciones lineales y no lineales denominada comúnmente ‘función objetivo’.

²² G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

Fmincon debe poseer una estimación inicial de la función objetivo para lograr encontrar un mínimo escalar de las variables en búsqueda, a esto se le conoce como programación no lineal.

4.3.1 Sintaxis. A continuación, se hace una breve descripción de los parámetros de entrada y salida para el uso de la función fmincon.

$X = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b)$: Evalúa el valor inicial x_0 para la función descrita en fun , encontrando un mínimo de x sujeto a las desigualdades lineales $Ax \leq b$. x_0 puede ser escalar, vector o matriz.

$X = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, A_{\text{eq}}, b_{\text{eq}}, lb, ub, \text{options})$: Se definen los límites inferior (lb) y superior (ub) para acotar la solución sobre la variable de diseño en x . Se introduce las igualdades lineales y en caso de que no existan se colocará $A_{\text{eq}} = []$ y $b_{\text{eq}} = []$.

Options: Es una estructura que proporciona a las funciones opciones adicionales para el proceso de optimización. Los valores por defecto pueden cambiarse usando la función de MatLab 'optimset'.

4.3.2 Implementación. A partir del modelo matemático del supercondensador de Zubieta²³, se define la función objetivo 'error cuadrático medio' como fun en la sintaxis presentada. Dicha función es evaluada en todos los valores acotados por los límites impuestos ($lb-ub$) que serán el doble y la mitad de los valores iniciales seleccionados (x_0), encontrando la combinación de valores más eficiente para el seguimiento de la tensión experimental del supercondensador a partir de la corriente experimental en el mismo elemento. La parametrización no posee igualdades o desigualdades lineales para su convergencia.

²³ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

4.4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO POR SIMULACIÓN.

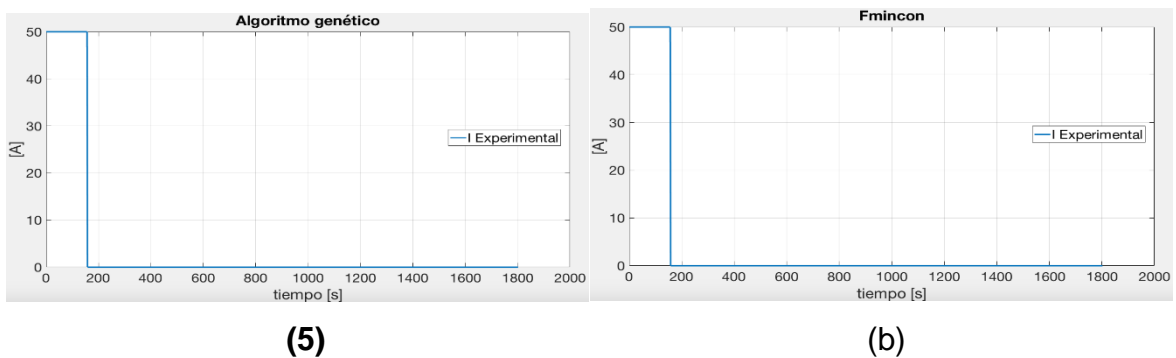
Implementados ambos métodos iterativos, se lleva a cabo una caracterización con valores experimentales suministrados de²⁴, con el fin de corroborar el funcionamiento y validar los resultados del algoritmo genético (anexo B) con los obtenidos con la función fmincon (anexo C). En la tabla 2 se encuentran la comparación de los valores obtenidos:

Tabla 2. Parámetros obtenidos con los métodos iterativos.

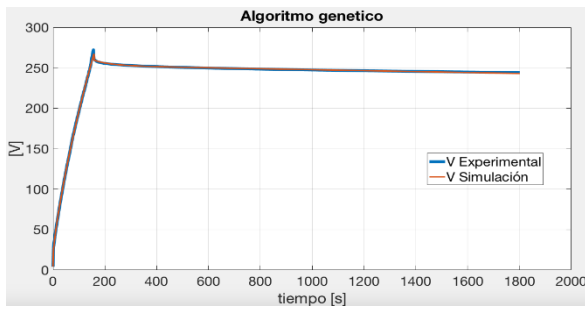
PARÁMETROS OBTENIDOS								
	Ri[Ω]	Ci1[$\frac{F}{V}$]	Ci0[F]	R2[Ω]	C2[F]	R2[Ω]	C2[F]	Rp[Ω]
Algoritmo genético	0.2061	0.0863	7.6310	1.3753	11.4250	85.7050	2.2461	1047.5734
Fmincon	0.2180	0.0800	8.2040	1.5032	11.8730	99.1640	1.7680	1352.2000

En la figura 10, (a) y (b) son los perfiles de corriente experimental utilizados en el algoritmo genético y fmincon. (c) y (d) son las tensiones experimentales y de simulación con los parámetros encontrados en la tabla 2 respectivamente.

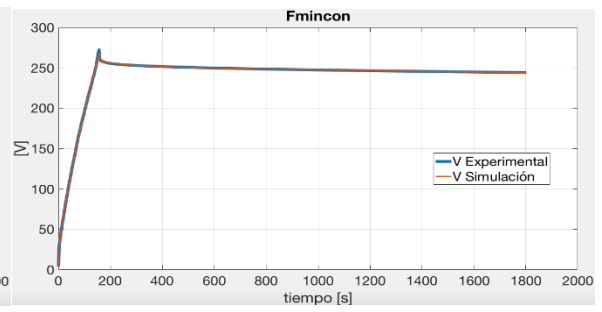
Figura 10. Resultados obtenidos.



²⁴ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.



€



(d)

Por ambos métodos iterativos llegamos a soluciones similares, demostrando la capacidad del algoritmo genético de igualar el rango de solución de la función fmincon, validando y verificando su funcionamiento.

5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la ejecución del algoritmo de identificación de parámetros presentado en el capítulo anterior, son necesarios valores experimentales de tensión y corriente en el supercondensador de estudio para hacer su respectiva caracterización. En este capítulo abordaremos este tema de la siguiente forma:

En la sección 5.1 se diseña el montaje experimental para obtener los valores de tensión y corriente en el supercondensador, y se dan a conocer los requerimientos técnicos.

En la sección 5.2 se definen las pruebas de laboratorio realizadas y los elementos utilizados.

En la sección 5.3 se presentan los resultados obtenidos para el supercondensador de 5F.

En la sección 5.4 se presentan los resultados obtenidos para el supercondensador de 25F.

En la sección 5.5 se presentan los resultados obtenidos para el supercondensador de 100F.

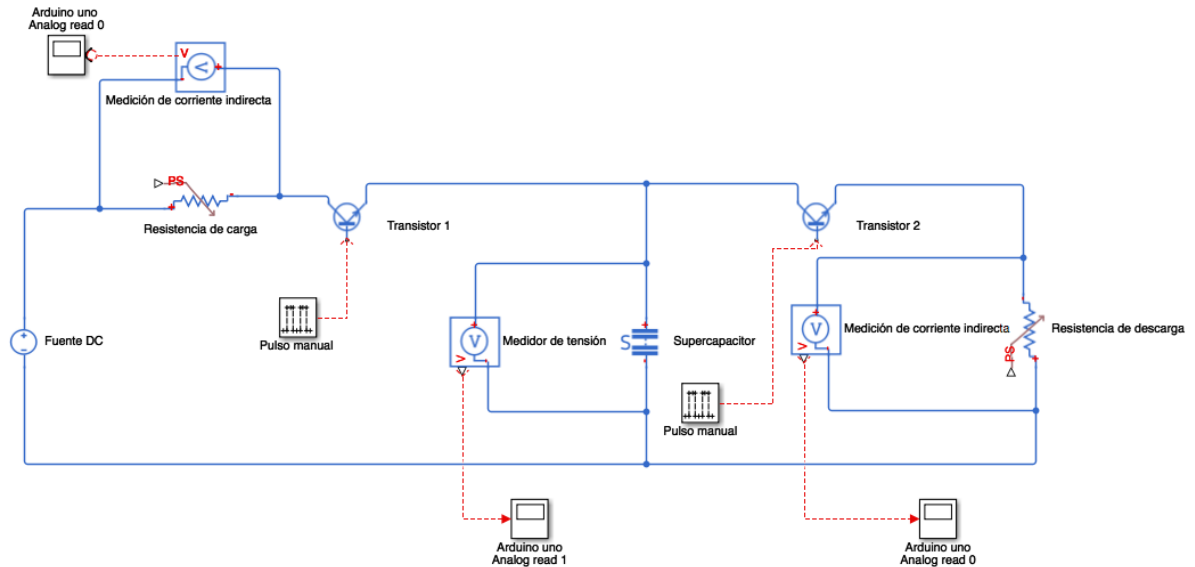
Finalmente, en la sección 5.6 se hace una discusión de los resultados obtenidos.

5.1 DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Por medio del circuito mostrado en la figura 11, se harán las pruebas de carga y descarga del supercondensador con una fuente de tensión DC y unas resistencia

que permite medir de forma indirecta la corriente en el circuito. La descarga se hace con una carga constante (resistencia), los transistores permiten la conexión – desconexión de alimentación y carga de forma eficiente para disminuir errores de conmutación en la medición.

Figura 11. Circuito montaje experimental.



La adquisición de datos se hace mediante el hardware y software ‘arduino uno’ con el código presente en el anexo D. La placa arduino contiene un convertidor analógico a digital de 6 canales que mapea voltajes de entrada entre 0 y 5 voltios en valores enteros entre 0 y 1023. Esto produce una resolución entre las lecturas de: 5 voltios / 1024 unidades o, .0049 voltios (4.9 mV) por unidad. La velocidad máxima de lectura declarada por el fabricante es de 100 microsegundos (100 us).

También se utiliza el complemento de software Parallax Data Acquisition Tool (PLX-DAQ), herramienta para la adquisición de datos del microcontrolador Parallax para Microsoft Excel. Junto con el arduino y el puerto serie del PC, imprimen las lecturas realizadas en una hoja de cálculo según las especificaciones y limitaciones del

sensor de la placa. La velocidad de lectura e impresión de datos es fijada a cien milisegundos (100 ms) para lograr una captación detallada de los transitorios.

Las señales obtenidas de tensión experimental en el supercondensador son procesadas mediante una media móvil central (filtro pasa bajas) implementada en MatLab. Los datos pertenecientes a tensión, corriente y tiempo experimentales son almacenados en formato .mat para su respectivo uso en el algoritmo genético y la función fmincon. (Anexo E).

5.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas diseñadas fueron basadas en la idea de emular los distintos escenarios de operación a los que son sometidos los supercondensadores en la actualidad, más precisamente a su aplicación en vehículos híbridos. Partiendo de esta premisa se hicieron 6 pruebas en el laboratorio:

Prueba 1: Carga a tensión nominal – auto descarga por 3600 segundos.

Prueba 2: Carga a tensión nominal – descarga total con carga constante en un ciclo.

Prueba 3: Carga a tensión nominal – descarga total con la mitad de la carga de la prueba anterior, en un ciclo.

Prueba 4: carga – descarga con carga constante ciclo combinado ascendente.

Prueba 5: carga – descarga con carga constante ciclo combinado descendente.

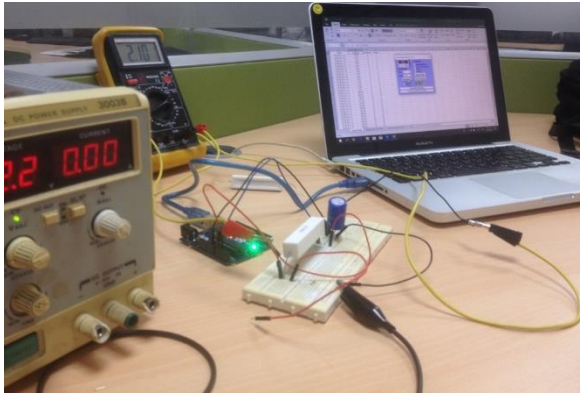
Prueba 6: carga – descarga con carga constante ciclo combinado constante.

Los detalles del equipo, de las pruebas y referencias de los elementos utilizados podrán ser consultados en el anexo F.

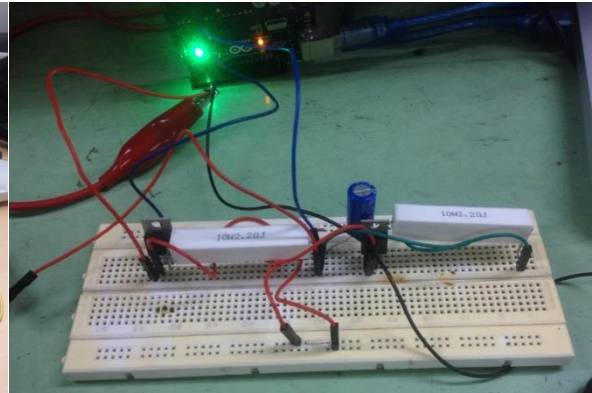
Los montajes experimentales para la realización de las pruebas son presentados en la figura 12, (a) modulo completo de adquisición, (b) montaje experimental

supercondensador 5F, (c) montaje experimental supercondensador 25F, (d) Montaje supercondensador 100F.

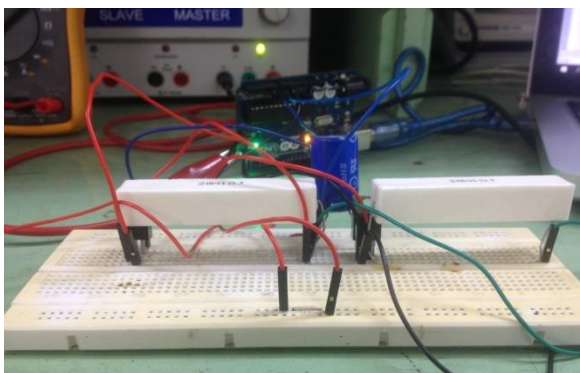
Figura 12. Montaje experimental



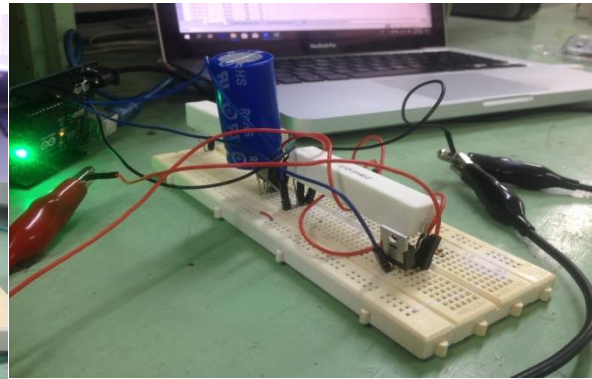
(5)



(b)



(c)

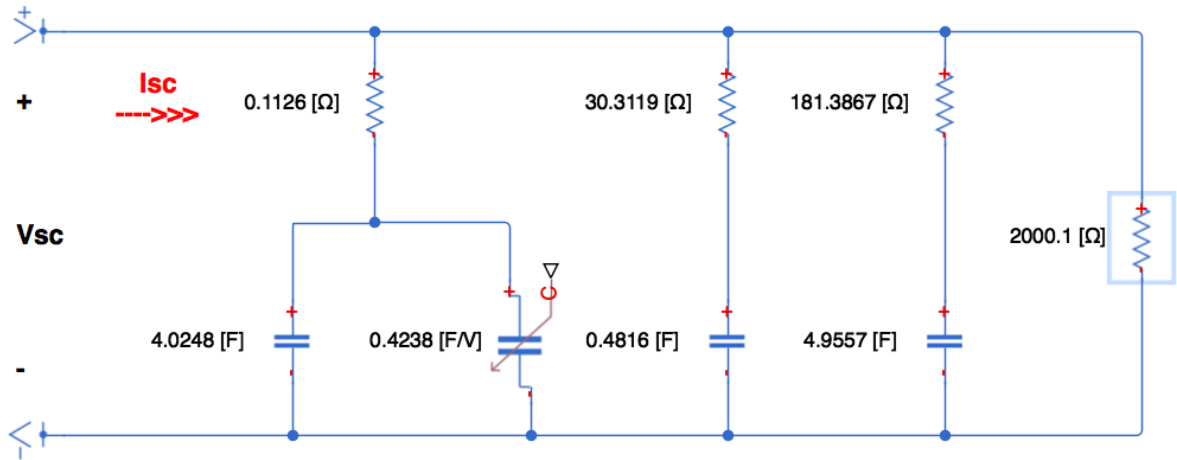


(d)

5.3 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 5F.

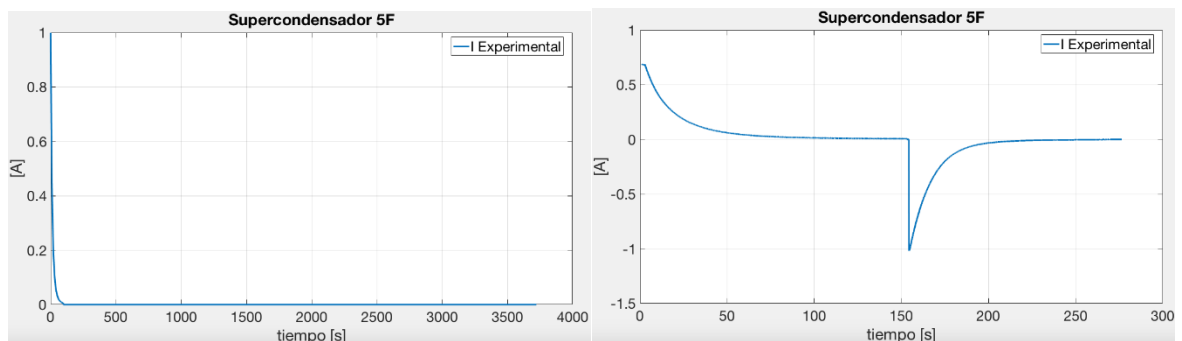
Se aplican las 6 pruebas diseñadas al supercondensador de 5F, adquiriendo los valores experimentales de tensión y corriente en cada una de las pruebas realizadas. Los datos obtenidos son procesados y llevados a la función `fmincon` para ser caracterizados bajo el modelo completo de Zubieta [9] con un error de búsqueda inferior a 10^{-6} . Los resultados son sometidos a un promedio aritmético obteniendo el circuito equivalente mostrado en la figura 13.

Figura 13. Modelo equivalente para el supercondensador de 5F.



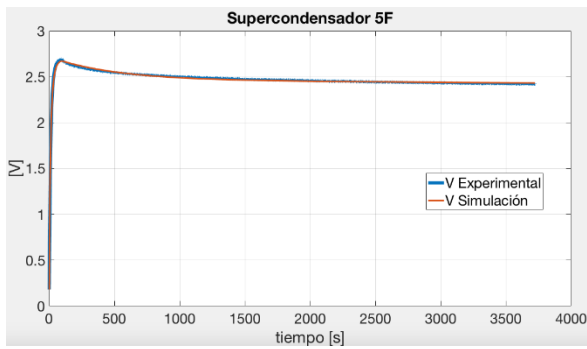
La figura 14 expone los perfiles experimentales de corriente y de tensión junto con la simulación de la tensión a partir de los parámetros encontrados en cada prueba realizada. (a) corriente experimental prueba 1, (b) corriente experimental prueba 2, (c) tensión experimental y de simulación prueba 1, (d) tensión experimental y de simulación prueba 2, (e) corriente experimental prueba 3, (f) corriente experimental prueba 4, (g) tensión experimental y de simulación prueba 3, (h) tensión experimental y de simulación prueba 4, (i) corriente experimental prueba 5, (j) corriente experimental prueba 6, (k) tensión experimental y de simulación prueba 5, (l) tensión experimental y de simulación prueba 5.

Figura 14. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 5F.

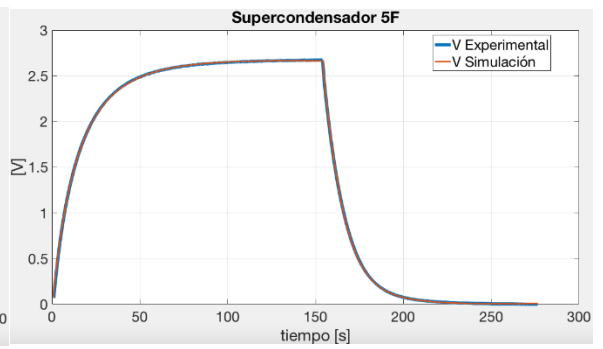


(5)

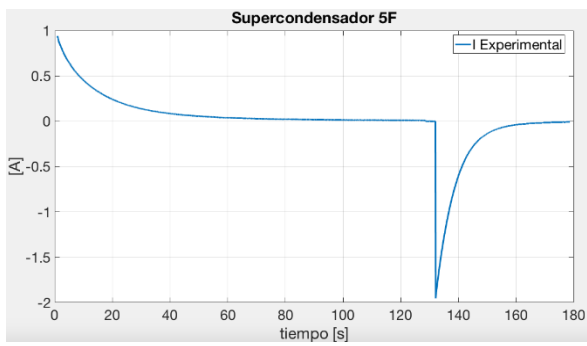
(b)



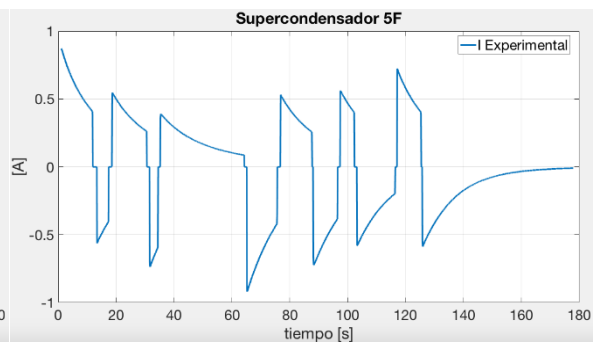
€



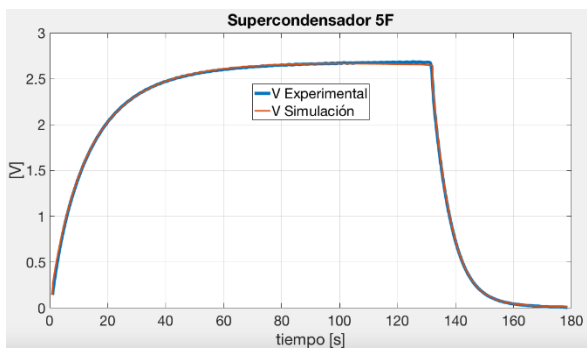
(d)



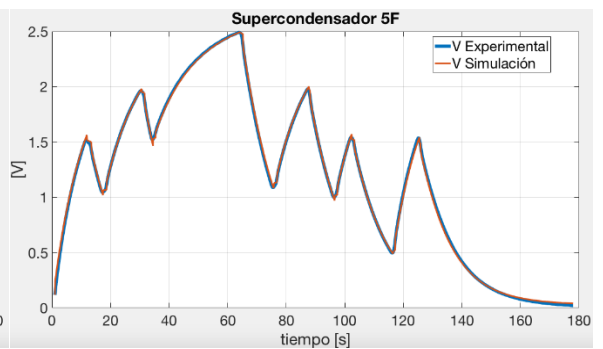
€



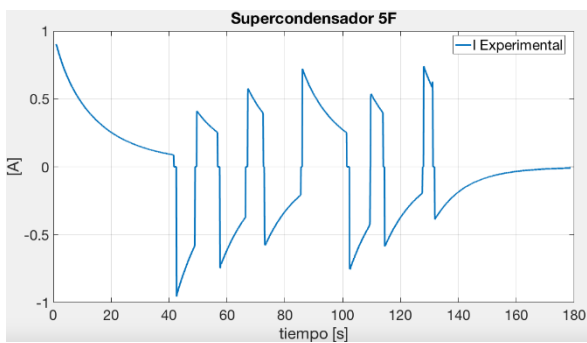
(f)



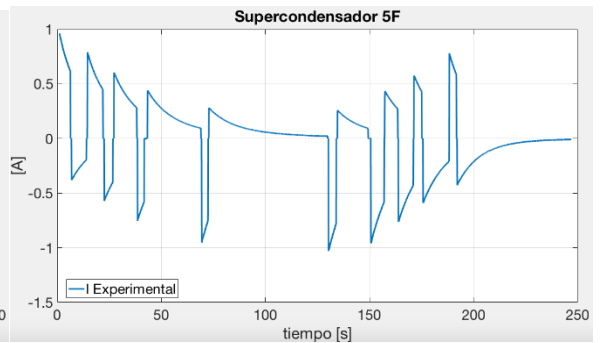
(g)



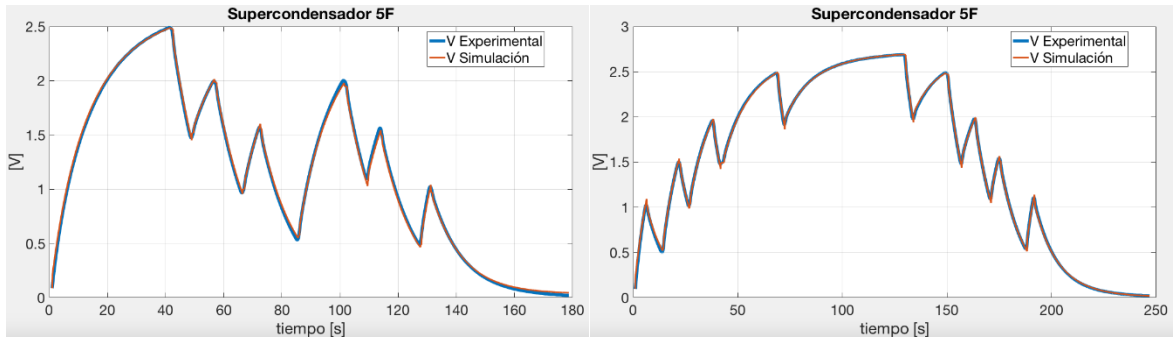
(h)



(5)



(j)



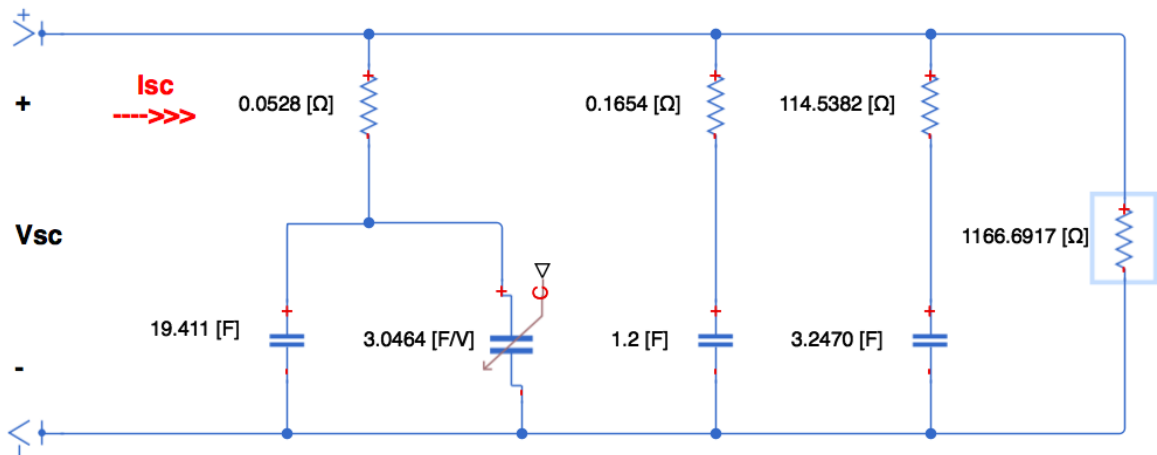
(k)

(l)

5.4 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 25F.

Se aplican las 6 pruebas diseñadas al supercondensador de 25F, adquiriendo los valores experimentales de tensión y corriente en cada una de las pruebas realizadas. Los datos obtenidos son procesados y llevados a la función `fmincon` para ser caracterizados bajo el modelo completo de Zubieta²⁵ con un error de búsqueda inferior a 10^{-6} . Los resultados son sometidos a un promedio aritmético obteniendo el circuito equivalente mostrado en la figura 15.

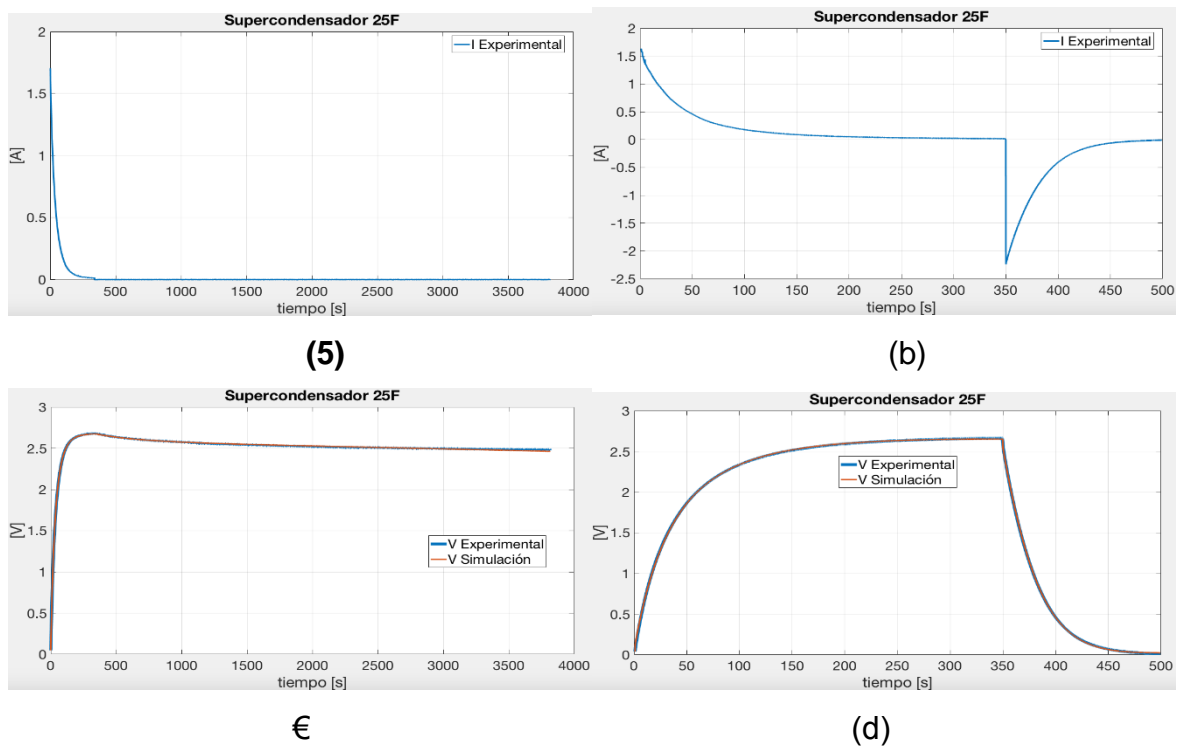
Figura 15. Modelo equivalente para el supercondensador de 25F.

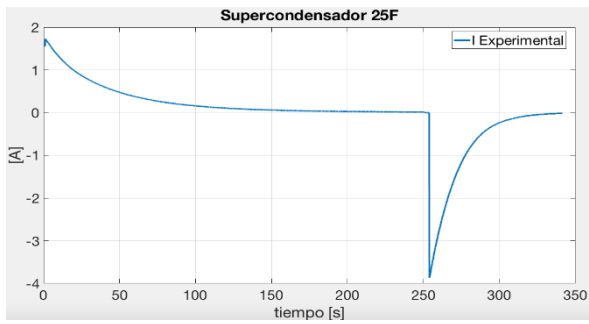


²⁵ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

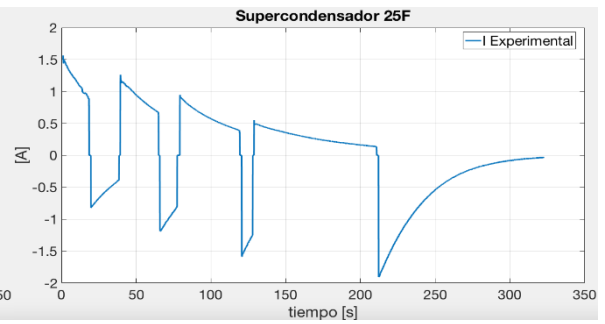
La figura 16 expone los perfiles experimentales de corriente y de tensión junto con la simulación de la tensión a partir de los parámetros encontrados en cada prueba realizada. (a) corriente experimental prueba 1, (b) corriente experimental prueba 2, (c) tensión experimental y de simulación prueba 1, (d) tensión experimental y de simulación prueba 2, (e) corriente experimental prueba 3, (f) corriente experimental prueba 4, (g) tensión experimental y de simulación prueba 3, (h) tensión experimental y de simulación prueba 4, (i) corriente experimental prueba 5, (j) corriente experimental prueba 6, (k) tensión experimental y de simulación prueba 5, (l) tensión experimental y de simulación prueba 5.

Figura 16. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 25F.

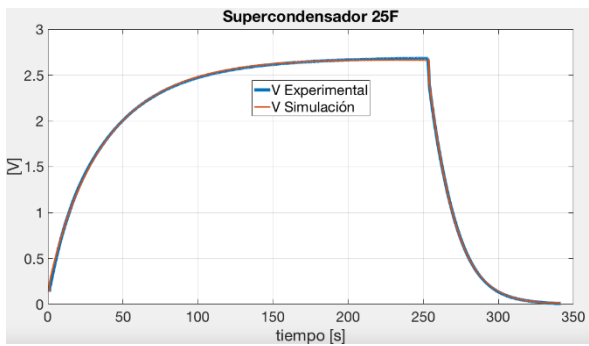




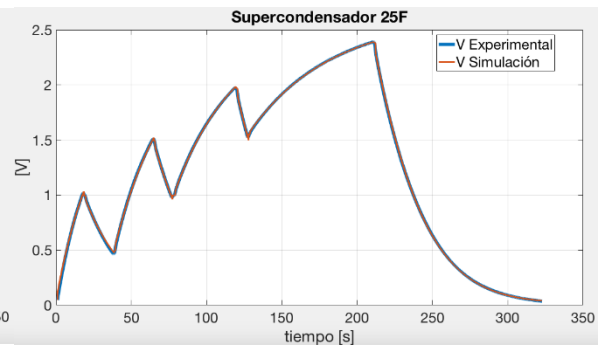
€



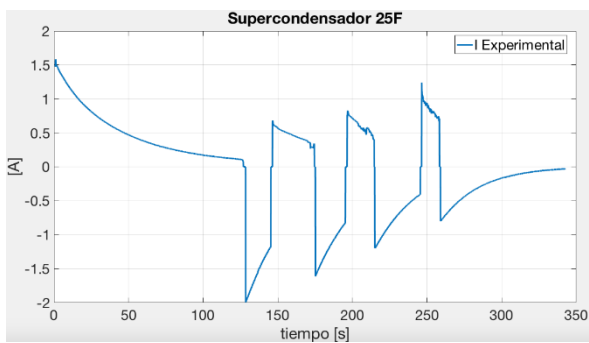
(f)



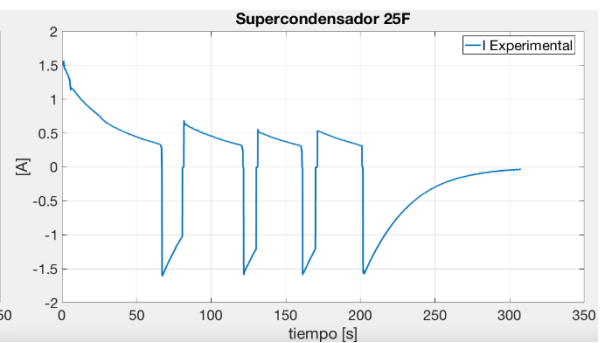
(g)



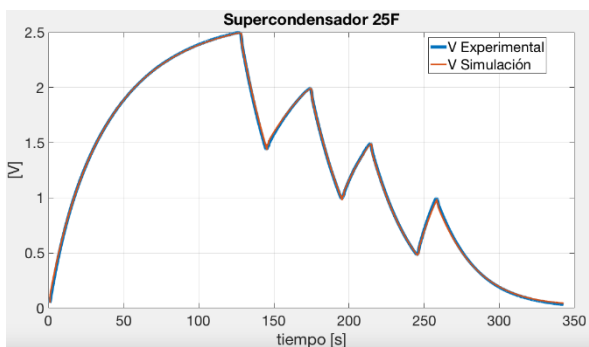
(h)



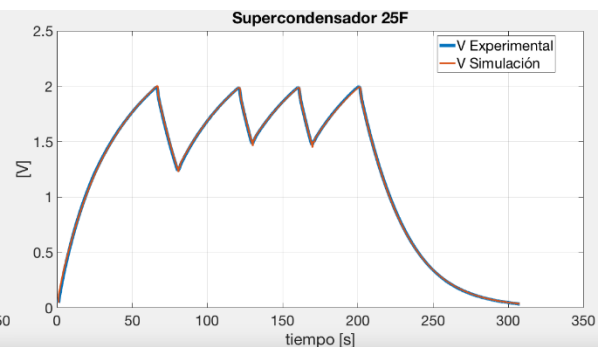
(5)



(j)



(k)

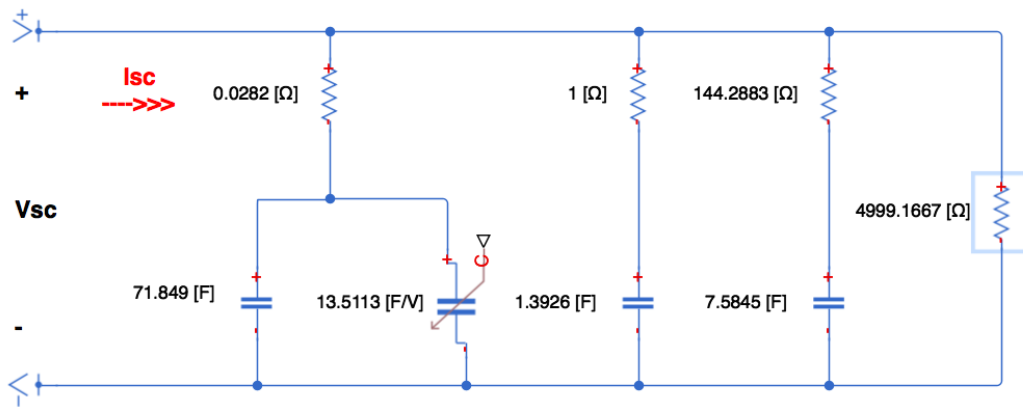


(l)

5.5 RESULTADOS SUPERCONDENSADOR 100F.

Se aplican las 6 pruebas diseñadas al supercondensador de 100F, adquiriendo los valores experimentales de tensión y corriente en cada una de las pruebas realizadas. Los datos obtenidos son procesados y llevados a la función fmincon para ser caracterizados bajo el modelo completo de Zubieta²⁶ con un error de búsqueda inferior a 10^{-6} . Los resultados son sometidos a un promedio aritmético obteniendo el circuito equivalente mostrado en la figura 17.

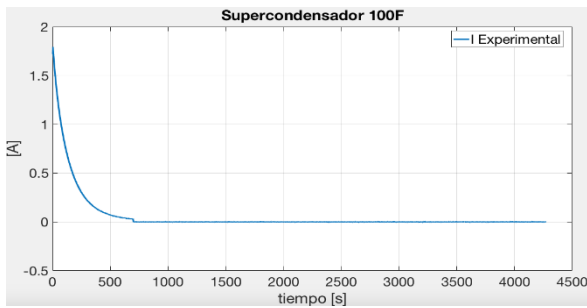
Figura 17. Modelo equivalente para el supercondensador de 100F.



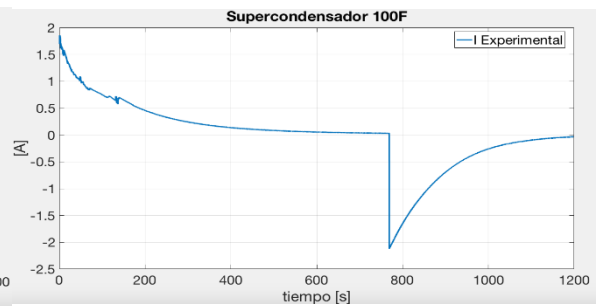
La figura 18 expone los perfiles experimentales de corriente y de tensión junto con la simulación de la tensión a partir de los parámetros encontrados en cada prueba realizada. (a) corriente experimental prueba 1, (b) corriente experimental prueba 2, (c) tensión experimental y de simulación prueba 1, (d) tensión experimental y de simulación prueba 2, (e) corriente experimental prueba 3, (f) corriente experimental prueba 4, (g) tensión experimental y de simulación prueba 3, (h) tensión experimental y de simulación prueba 4, (i) corriente experimental prueba 5, (j) corriente experimental prueba 6, (k) tensión experimental y de simulación prueba 5, (l) tensión experimental y de simulación prueba 5.

²⁶ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

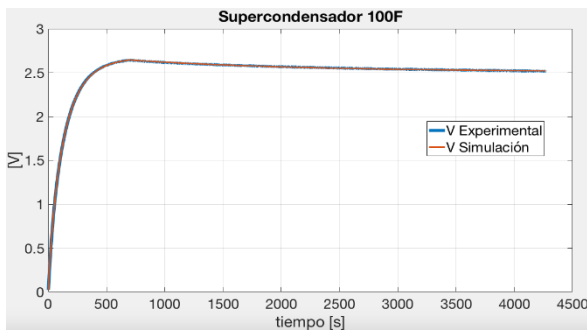
Figura 18. Corrientes experimentales y tensiones experimentales y de simulación para el supercondensador de 100F.



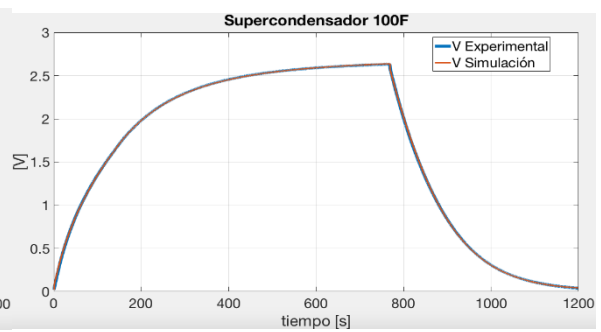
(5)



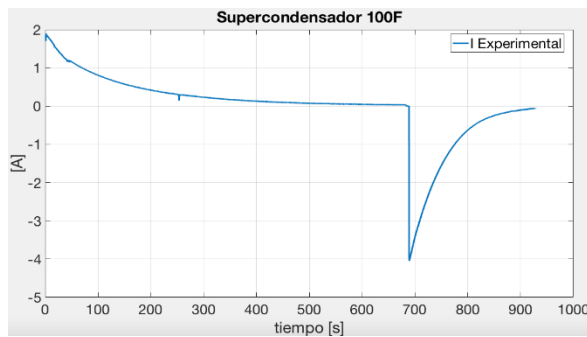
(b)



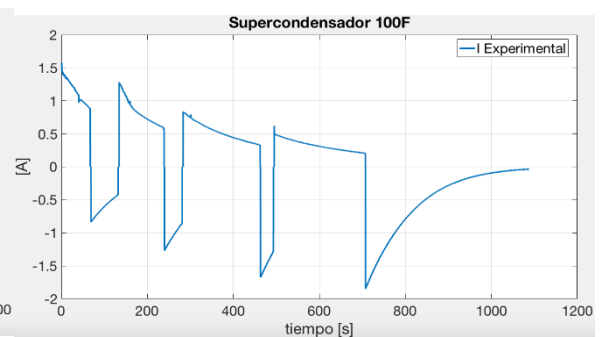
€



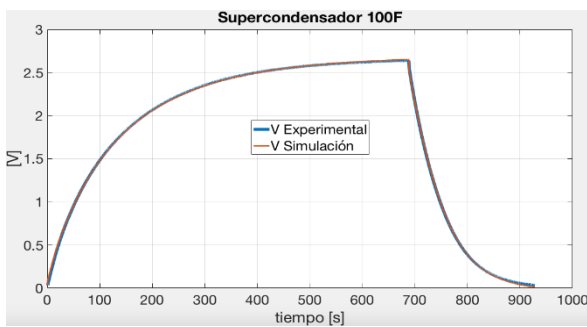
(d)



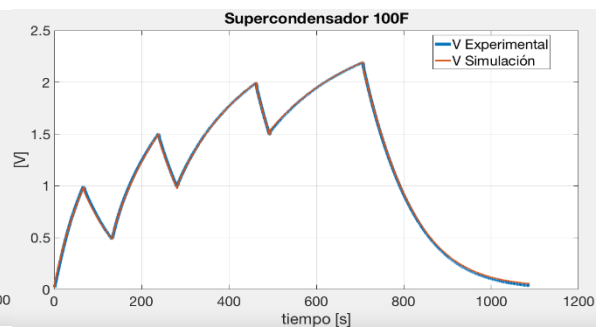
€



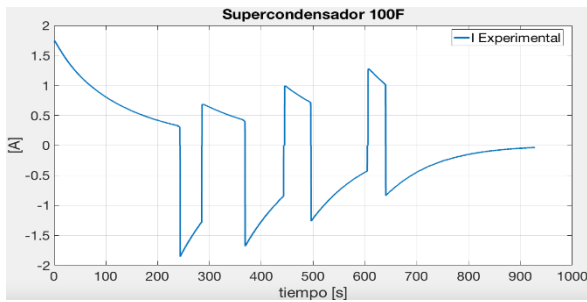
(f)



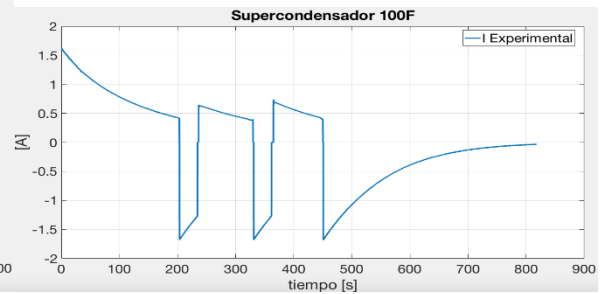
(g)



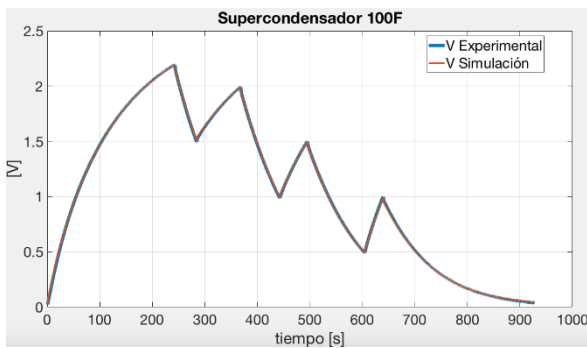
(h)



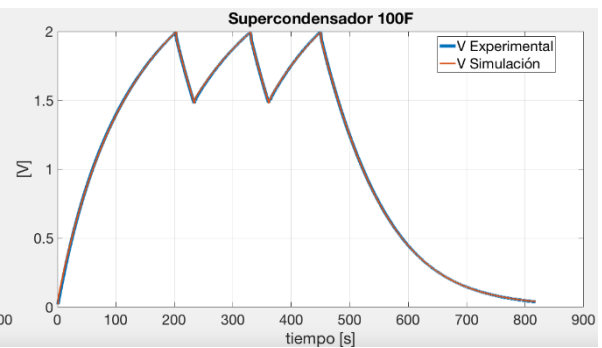
(5)



(j)



(k)



(l)

5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Existe una pequeña divergencia entre las capacitancias caracterizadas según la tensión impuesta en las pruebas diseñadas, se opta por utilizar la tensión nominal establecida por el fabricante en su hoja de datos. Se debe acotar el margen de solución en el método iterativo, debido a las múltiples soluciones que igualan las magnitudes de las constantes de tiempos (τ) de las ramas RC del modelo. Al realizar la caracterización con el modelo completo de Zubieta²⁷, el rango de discrepancias entre parámetros es mínimo. A medida que se aumenten las ramas en el modelo, se estima que el rango de solución de los parámetros será direccionado a un único valor. Se atribuye a la instrumentación, adquisición, conversión y filtrado de datos como las fuentes de error.

²⁷ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

6. CONCLUSIONES

- A través de los modelos matemáticos del supercondensador y su respectiva simulación, se corrobora la capacidad de describir los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en su operación y funcionamiento.
- Con la adopción e implementación del algoritmo de identificación de parámetros²⁸ y el modelo completo de Zubieta²⁹, se desarrolla un sistema de caracterización de supercondensadores de baja potencia sencillo, económico y capaz de encontrar un modelo equivalente para ciclos combinados de carga y descarga (pruebas de laboratorio) emulando condiciones de uso cotidiano.
- El algoritmo genético desarrollado es una herramienta de búsqueda capaz de encontrar resultados similares a los de la función de optimización fmincon. Por tal razón se cuenta con un método iterativo propio sin dependencia a un toolbox pago del software MatLab.
- Al utilizar más ramas en los modelos matemáticos del supercondensador, se minimiza el error entre la tensión experimental y de simulación, motivo por el cual los parámetros caracterizados reducen su rango de solución a un único valor, aunque aumenta la complejidad en la determinación de los valores iniciales y los límites de búsqueda.

²⁸ J. Solano, D. Hissel, Senior Member IEEE, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

²⁹ G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar las pruebas de laboratorio, carga y descarga de SC con una fuente de corriente constante.
- Al implementar los transistores, la tensión de operación en la base de los mismos, debe ser la utilizada en instrumentación electrónica alrededor de 15 V o mayor para reducir la resistencia interna que presenta en su funcionamiento, reduciendo los errores agregados en la conversión de datos experimentales.
- Utilizar sensores de corriente (INA por ejemplo) para la adquisición de dicha variable y no una resistencia de carga, para no limitar la corriente del supercondensador a un valor inicial dado, disminuyendo los tiempos en los procesos de carga del SC.
- Se sugiere utilizar un convertidor analógico – digital con más resolución para la adquisición de los datos experimentales.
- Automatizar la conexión y desconexión de la alimentación y resistencia de carga en el montaje experimental para disminuir los errores en conmutación de los ciclos combinados.

BIBLIOGRAFÍA

A.F. Burke, T.C. Murphy, *Materials for Electrochemical Energy Storage and Conversion—Batteries, Capacitors and Fuel Cells: Symposium Held, April 17–20, 1995, San Francisco, CA, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 1995, p. 375.*

Cabezas, J.D. Paez, *Matlab Toolbox de optimización Aplicaciones en ciencias económicas, Unidad de Informática y Comunicaciones, Facultad de Ciencias Económicas Universidad, Nacional de Colombia Bogotá DC, 2010-II.*

D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison Wesley, 1989.

Eva Clara Pérez Lobo, *Estudio de los supercondensadores y su viabilidad como sistema de almacenamiento energético en instalaciones fotovoltaicas, Dpto. de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla- Sevilla, 2016.*

F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *Journal of power sources*, Vol. 165, No. 2, pp. 928-934, 2007.

G. L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 36, No. 1, pp. 199205, 2000.

Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,* Addison Wesley, NY, 1989.

Guadalupe Vizcaíno, Automatización del proceso de diseño de un circuito electrónico con la herramienta MATLAB y el simulador de circuitos Spectre, Departamento de teoría de la señal y comunicaciones, Escuela superior de ingenieros, Universidad de Sevilla, 2006.

J. Solano, D. Hissel, *Senior Member IEEE*, and M-C. Péra, Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles, University of Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France.

Sandra Patricia Castaño Solís, “Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía. Aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio”, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Leganés, 2014.