

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR THE CHARACTERIZATION OF LOW POWER SUPERCAPACITORS

DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA

Oscar Olarte, Ingrid J. Moreno, Franky Y. Cely, Alonso de Jesús Retamoso, Fabio A. González
oolarte@correo.uts.edu.co, ijmoreno@correo.uts.edu.co, fcely@correo.uts.edu.co,
alonsoretamoso@correo.uts.edu.co, fagonzalez@correo.uts.edu.co.

Abstract—Supercapacitors are presented as a viable energy, technical, and economic alternative in electrical energy storage and supply applications. This non-linear electrochemical device needs specific electrical models to represent its real behavior. Only one resistance value and one capacitance value are found in the data sheets provided by the supercapacitor manufacturers, which do not allow any of these electrical models to be conceived. This work presents the simulation and assembly of a simple, economical, efficient, and easy to implement system to characterize low power supercapacitors. Said characterization is based on parameterizing the passive elements of a selected supercapacitor model. An algorithm for the identification of parameters implemented in Matlab is proposed, which is based on iterative methods and laboratory tests (charge and discharge of the supercapacitor). The conception of a genetic algorithm of our authorship is also proposed as one of the iterative solution methods. The results obtained are satisfactory, and a successful experimental model for each supercapacitor under study was obtained.

Index Terms— Simulation and assembly, parameterizing, Matlab, tests laboratory, genetic algorithms.

Resumen— Los supercondensadores se presentan como una alternativa energética, técnica y económica viable en aplicaciones de almacenamiento y suministro de energía eléctrica. Este dispositivo electroquímico no lineal necesita de modelos eléctricos específicos que representen su comportamiento real. En las hojas de datos de los supercondensadores suministran valores de resistencia y capacitancia que no permiten concebir un modelo eléctrico adecuado. El presente escrito muestra la simulación y montaje de un sistema de caracterización de supercondensadores de baja potencia. Dicha caracterización parametriza los elementos pasivos del modelo de supercondensador. Se propone un algoritmo de identificación de parámetros en Matlab, con fundamento en métodos iterativos y pruebas de laboratorio (carga y descarga del supercondensador), también se propone la creación de un algoritmo genético como uno de los métodos iterativos de solución. Los resultados obtenidos son satisfactorios lográndose un modelo experimental acertado para cada supercondensador de estudio.

Palabras claves— Simulación y montaje, parametrización, Matlab, pruebas experimentales, algoritmos genéticos.

I. INTRODUCCIÓN

Los supercondensadores son una alternativa energética, técnica y económica viable en aplicaciones de alta potencia, movilidad eléctrica, empalmes con energías

renovables, gestión y calidad de la energía, entre otras. Para integrar el dispositivo en dichas aplicaciones e investigar su implementación en otras áreas de la ingeniería eléctrica, es necesario disponer de modelos eléctricos que simulen el comportamiento real del dispositivo no lineal.

En la literatura existen modelos eléctricos que representan al supercondensador, pero su uso es muy limitado por la escasa información suministrada en las hojas de datos de los fabricantes. Se desarrolla un sistema que caracteriza el modelo del supercondensador propuesto por Luis Zubieta [1] con un algoritmo de identificación de parámetros, implementado en Matlab con base en métodos iterativos y pruebas de laboratorio (ciclos de carga y descarga del supercondensador).

Mediante el montaje experimental propuesto, se adquieren datos experimentales para alimentar el algoritmo de identificación de parámetros, logrando la caracterización del supercondensador seleccionado. El proceso iterativo y la validación se realizan con un algoritmo genético y una función de optimización del software Matlab.

El desarrollo de este artículo se llevará a cabo en 4 secciones; en la sección 2 se exponen las características más importantes del supercondensador, sus aplicaciones y sus modelos circuitales más relevantes. En la sección 3 se presenta el algoritmo de identificación de parámetros y los métodos iterativos implementados para su validación. En la sección 4 se muestra la metodología, las pruebas aplicadas y el medio de adquisición experimental junto con los resultados obtenidos, y finalmente en la sección 5 se da la discusión de resultados y las conclusiones del trabajo realizado.

II. SUPERCONDENSADORES

En comparación con los condensadores convencionales, la energía que se almacena en los supercondensadores es significativamente mayor (de ahí el prefijo 'super'). Los supercondensadores tienen la capacidad de entregar la carga almacenada con mayor rapidez que la mayoría de las baterías, pero su capacidad de almacenamiento de energía es menor en comparación con estas. Lo anterior hace que los supercondensadores sean un medio de suministro de energía versátil e independiente y en combinación con baterías se convierten en un sistema híbrido que tiene la capacidad de

almacenar mayor cantidad de carga y entregarla de manera rápida.

El supercondensador es un dispositivo electroquímico que se beneficia del principio de capacitancia de doble capa, esto permite aumentar la capacitancia al reducir la distancia y aumentar la superficie de los electrodos por medio del carbón activado [2]. En la representación esquemática del supercondensador presentado en la figura 1, se muestra su constitución interna. Su construcción se concibe por medio de dos electrodos de iones fijos, uno positivo con deficiencia de electrones y otro negativo como consecuencia de un exceso de electrones. El uso de un electrolito para aumentar la capacitancia y la inserción de un separador de cargas, tiene una consecuencia no deseada: la tensión máxima en el supercondensador es muy reducida (limitada a alrededor de 2.7 [V]) [3].

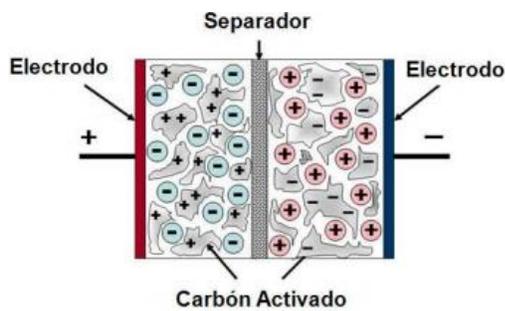


Fig. 1. Representación esquemática de un supercondensador. Fuente: [4]

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/kg [5]. Estas características han generado un gran interés en la aplicación de supercondensadores para una amplia y creciente gama de aplicaciones que incluyen: productos electrónicos de consumo, plantas de generación fotovoltaica y eólica, vehículos eléctricos híbridos y gestión de energía industrial [6].

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 [7]. 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. A continuación, se presentan algunas aplicaciones específicas de los supercondensadores en la industria y la ciencia [8] [9] [10].

Transporte eléctrico: 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 sistemas de energías renovables, reserva rodante en generación y

microrredes.

Física básica: Reactores de fusión y aceleradores de partículas (aportes grandes de potencia sin afectar la red).

Aplicaciones industriales: Actuadores de emergencia de las puertas del Airbus A380, grúas y elevadores, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) e hibridación con baterías.

A. Modelo RC

Dentro de los modelos propuestos en la literatura para representar el comportamiento del supercondensador, el más sencillo, pero menos eficiente es el modelo RC. Este modelo, compuesto por un capacitor C y una resistencia en serie equivalente (ESR_{dc}) [11], se muestra en la figura 3. El modelo RC no representa los resultados experimentales de una forma adecuada como se observa en la figura 4.

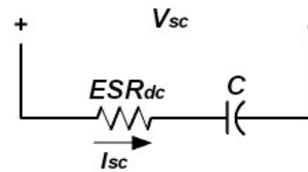


Fig. 3. Modelo RC

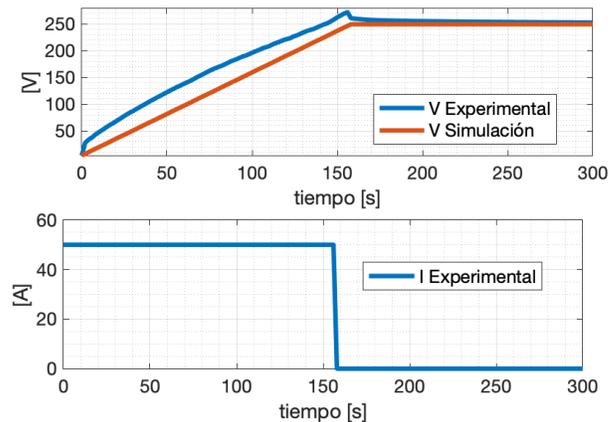


Fig. 4. Simulación modelo RC.

B. Modelo propuesto por Zubieta

El modelo de Luis Zubieta con elementos pasivos, presentado en la figura 5, se basa en el comportamiento electroquímico del supercondensador, similar al de un condensador electrolítico, pero teniendo en cuenta el fenómeno de redistribución de carga interna.

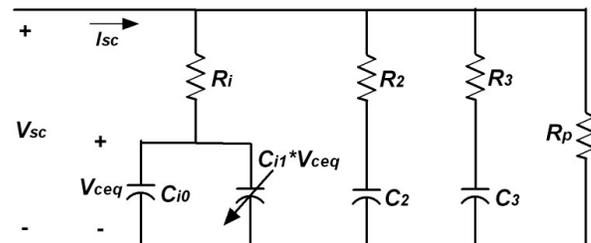


Fig. 5. Modelo propuesto por Zubieta.

Zubieta propone un modelo de circuito del supercondensador con tres constantes de tiempo RC distintas que cubren un rango deseado en su modelamiento (30 minutos). La rama principal o la rama inmediata, compuesta por los elementos R_i , C_{i0} y el condensador variable 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 rama retardada, con parámetros R_2 y C_2 , representa la redistribución de carga interna y el comportamiento del supercondensador en el intervalo de tiempo menores a 10 minutos. Finalmente, la tercera rama, o rama de largo plazo, con parámetros R_3 y C_3 , determina el comportamiento para tiempos superiores a 10 min. R_p es una resistencia de fuga en paralelo a los terminales, para representar la propiedad de auto descarga.

Existen otros modelos del supercondensador propuestos en la literatura que presentan dependencia a la frecuencia y a la temperatura, pero estos modelos poseen pruebas de laboratorio específicas, complejas y costosas para su reproducción y la incidencia de estas nuevas variables contempladas en los modelos son insignificantes en el comportamiento del supercondensador [11], por lo tanto, no se contemplan en este trabajo.

III. ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Teniendo un modelo que representa de forma adecuada el comportamiento del supercondensador, se necesitan mecanismos y herramientas computacionales que permitan identificar los parámetros que lo conforman.

En la figura 6 se muestra un algoritmo de identificación de parámetros que utiliza un proceso iterativo realizado por un algoritmo genético desarrollado como parte del trabajo y la función de optimización *fmincon* del software Matlab como método de validación y comprobación. Mediante la definición de los valores iniciales de los parámetros buscados y su rango de búsqueda se hace la simulación de la tensión en el supercondensador utilizando como dato de entrada la corriente experimental en el modelo de Zubieta y con la ayuda de la función objetivo, error cuadrático medio, se busca la diferencia mínima entre las tensiones experimental y de simulación, caracterizando los parámetros del modelo que mejor se adapte al seguimiento del voltaje en el rango seleccionado para las condiciones iniciales. Si los resultados no cumplen con el error de truncamiento, se replantean las condiciones iniciales y se reinicia el proceso.

A. Algoritmo genético

A la imitación del encadenamiento de instrucciones que

describe la manera de resolver problemas de búsqueda y optimización se les denomina algoritmos genéticos (AG) que toman esta denominación debido a su fundamentación basada en el proceso genético de la evolución biológica de acuerdo con la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, principios postulados por Charles Robert Darwin en 1859.

La estructura del algoritmo genético [12] se plantea bajo las siguientes instrucciones:

1. Generar subpoblaciones de cromosomas o fenotipos (combinaciones de los genes $R_i, C_{i0}, C_{i1}, C_2, R_2, C_3, R_3, R_p$) aleatoriamente con las condiciones iniciales pertinentes.
2. Mediante el genotipo (modelo de Zubieta 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 de reproducción entre subpoblaciones implementando el modelo de islas con comunicación en red.
6. 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 reinicia el proceso.

B. Función *fmincon*

Es una función de optimización perteneciente a la toolbox de optimización del software Matlab, que minimiza o maximiza una función multivariable con restricciones lineales y no lineales denominada función objetivo.

Fmincon debe contar con una estimación inicial de la función objetivo para encontrar un mínimo escalar de las variables en búsqueda, a esto se le conoce como programación no lineal [13] [14].

A partir del modelo matemático del supercondensador de Zubieta, se define la función objetivo error cuadrático

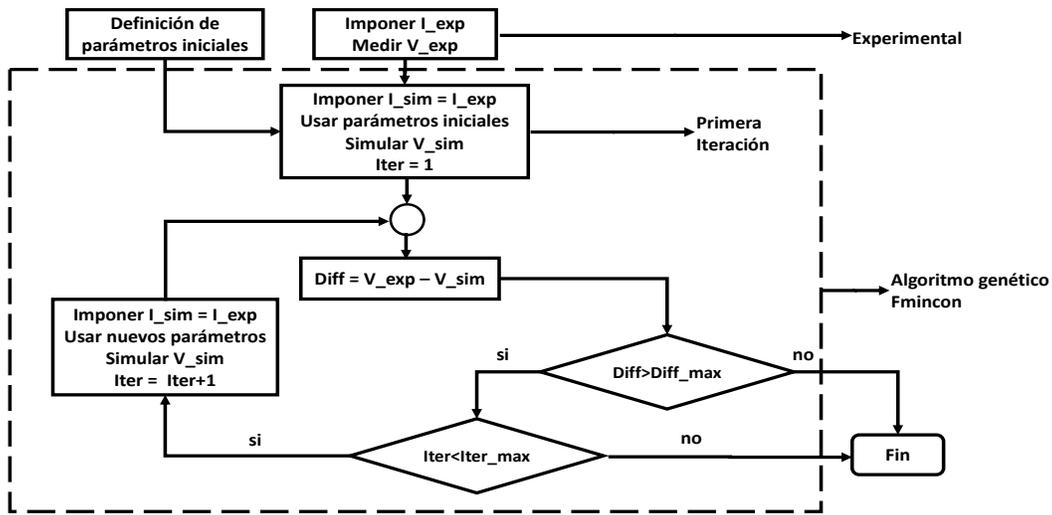


Fig. 6. Algoritmo de identificación de parámetros. Fuente: [3]

medio. Dicha función se evalúa en todos los valores acotados por los límites impuestos que serán el doble y la mitad de los valores iniciales seleccionados encontrando la combinación 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.

IV. METODOLOGIA Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se muestran la metodología aplicada para la caracterización de supercondensadores y los resultados obtenidos. En el literal A, se presenta el montaje experimental diseñado para la adquisición de los datos de tensión y corriente necesarios para la ejecución del algoritmo. En el literal B, se indican las pruebas planteadas y ejecutadas para cada uno de los supercondensadores de estudio. En el literal C, se muestran los resultados y las caracterizaciones obtenidas.

A. Diseño del montaje experimental

Por medio del circuito propuesto en la figura 7 y el montaje presentado en la figura 8, se realizan las pruebas de carga y descarga del supercondensador con una fuente de tensión DC y unas resistencias que permiten medir de forma indirecta la corriente en las pruebas de laboratorio.

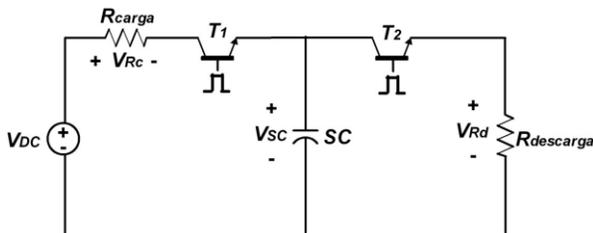


Fig. 7. Montaje experimental circuital.

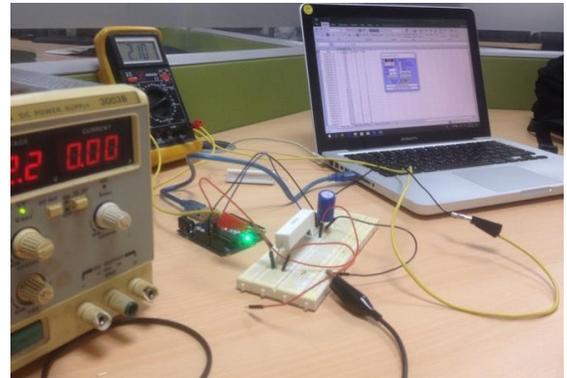


Fig. 8. Montaje experimental.

B. Pruebas de laboratorio

Las 6 pruebas de laboratorio que se definen a continuación fueron diseñadas para emular los distintos escenarios de operación a los que podrían ser sometidos los supercondensadores en su aplicación para vehículos híbridos. En estos escenarios, la descarga se lleva a cabo por aceleración o entrega de energía al sistema y la carga se obtiene por medio de la fuente principal o por frenado regenerativo.

Prueba 1: Carga y descarga del supercondensador con carga constante en ciclo combinado ascendente hasta tensión nominal y descendente en intervalos de uso hasta tensión cero.

Prueba 2: Carga y descarga del supercondensador con carga constante en ciclo combinado descendente, se lleva inicialmente a tensión nominal y se descarga por intervalos bidireccionales hasta tensión nula.

Prueba 3: Carga y descarga del supercondensador con carga constante en ciclo de carga del doble de la descarga hasta alcanzar tensión nominal e inversamente proporcional hasta alcanzar tensión cero respectivamente.

Prueba 4: Carga del supercondensador hasta tensión nominal y auto descarga por 3600 segundos.

Prueba 5: Carga del supercondensador hasta tensión nominal y descarga total con la misma carga en un ciclo.

Prueba 6: Carga del supercondensador hasta tensión nominal y descarga total con la mitad de la carga inicial en un ciclo.

C. Resultados experimentales

Se aplicaron 6 pruebas de laboratorio a los supercondensadores, adquiriendo datos experimentales de voltaje y corriente. Los registros de las pruebas se procesaron mediante el uso de métodos iterativos, como el algoritmo de identificación de parámetros, para caracterizar los supercondensadores con el modelo de Zubieta, logrando un error inferior a 10^{-6} [V]. En la tabla 1 se presentan los resultados para dos supercondensadores de la marca Maxwell con capacitancias nominales de 5F y 100F.

Parámetro	5F	100F
R_i	0.1126 [Ω]	0.0282 [Ω]
C_{i0}	4.0248 [F]	71.849 [F]
C_{i1}	0.4238 [F/V]	13.5113 [F/V]
R_2	30.3119 [Ω]	1 [Ω]
C_2	0.4816 [F]	1.3926 [F]
R_3	181.3867 [Ω]	144.2883 [Ω]
C_3	4.9557 [F]	7.5845 [F]
R_p	2000.1 [Ω]	4999.1667 [Ω]

Tabla 1. Parámetros de los SC obtenidos.

En las figuras 9 a 14 se muestran los perfiles experimentales de corriente y tensión junto con la simulación del voltaje a partir de los parámetros encontrados en las pruebas ejecutadas.

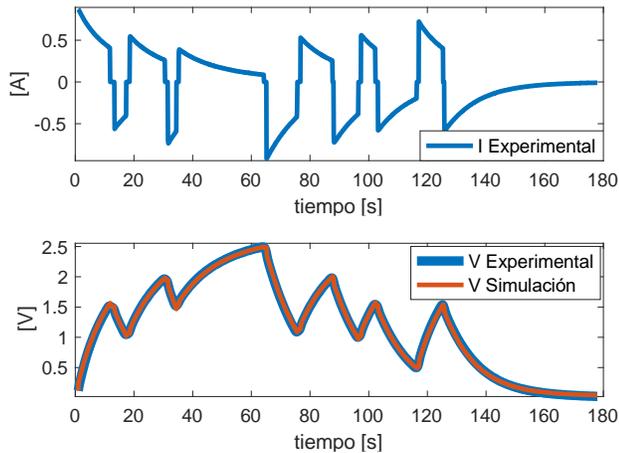


Fig. 9. Resultados prueba 1.

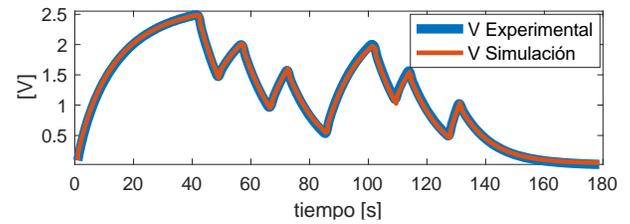
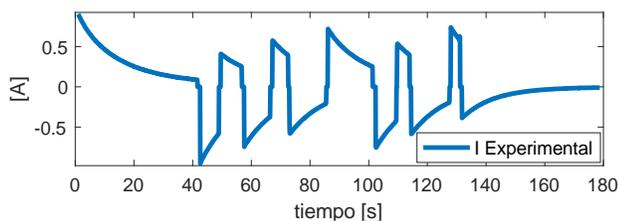


Fig. 10. Resultados prueba 2.

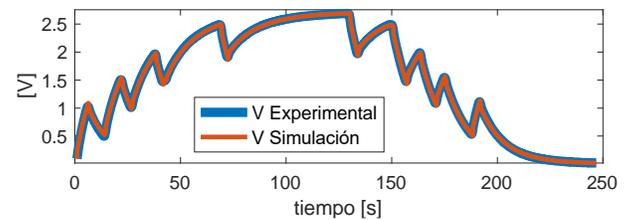
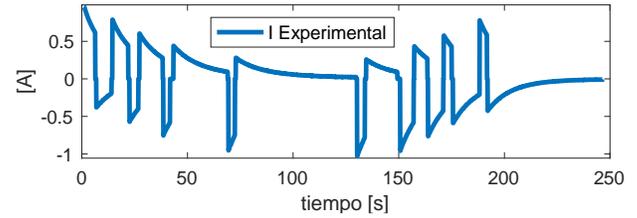


Fig. 11. Resultados prueba 3.

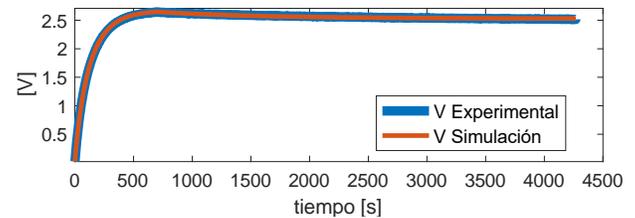
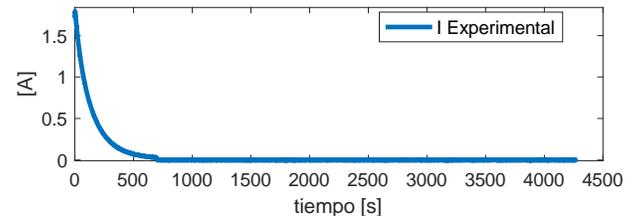
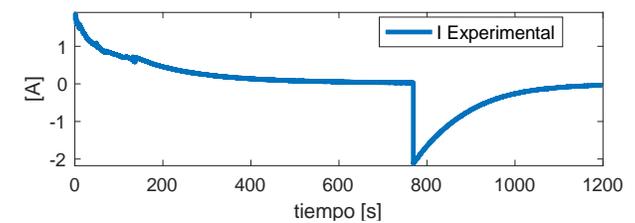


Fig. 12. Resultados prueba 4.



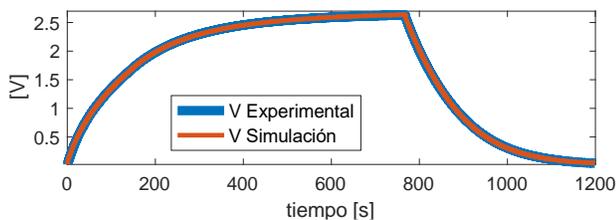


Fig. 13. Resultados prueba 5.

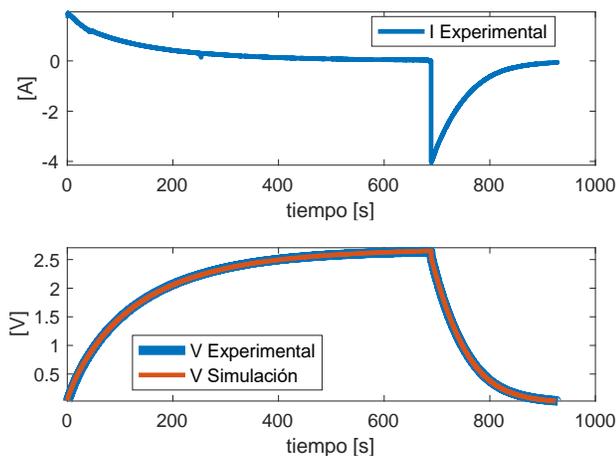


Fig. 14. Resultados prueba 6.

V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La simulación y los datos experimentales corroboran el modelo matemático del supercondensador propuesto por Zubieta, demostrando su capacidad para describir los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en su operación y funcionamiento.

Con el algoritmo de identificación de parámetros en conjunto con el modelo de Zubieta, se desarrolla un sistema de caracterización de supercondensadores de baja potencia capaz de encontrar un modelo equivalente para ciclos combinados de carga y descarga (pruebas de laboratorio) emulando condiciones nominales de uso.

Para la caracterización de arreglos de supercondensadores, donde se aumente su capacidad de tensión nominal, se puede extrapolar el sistema desarrollado cambiando la forma de adquirir los datos a través de cualquier software o dispositivo de muestreo que permita la captación y medición de los niveles de tensión requeridos. Aunque este trabajo se centró en procedimientos para supercondensadores de baja potencia, la adquisición de datos se vio afectada por el ruido presente en el circuito de prueba utilizado. Resolver este problema implica una inversión significativa en tarjetas de adquisición de datos especializadas. Por lo tanto, se propuso un circuito de adquisición de datos empleando las entradas analógicas de la tarjeta de prototipado rápido Arduino uno como una solución eficiente y de bajo costo.

El algoritmo genético desarrollado es una herramienta de búsqueda capaz de encontrar resultados similares a los de la función de optimización *fmincon*. Cabe resaltar que los

tiempos de solución difieren considerablemente, pero se cuenta con una herramienta que se puede implementar en cualquier software numérico sin la dependencia de una función o librería de software paga.

REFERENCIAS

- [1] 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. DOI: 10.1109/IAS.1998.730292
- [2] 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.
- [3] J. Solano, D. Hissel, and M. C. Pera, “Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles,” *2013 9th IEEE Veh. Power Propuls. Conf. IEEE VPPC 2013*, pp. 214–217, 2013. DOI: 10.1109/VPPC.2013.6671692
- [4] “Sistemas electroquímicos y nanotecnología para el almacenamiento de energía limpia”; Bisquert, J. <http://www.enerize.com/superCap.php>
- [5] A. G. Pandolfo and A. F. Hollenkamp, “Carbon properties and their role in supercapacitors,” *J. Power Sources*, vol. 157, no. 1, pp. 11–27, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.065>
- [6] 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.
- [7] M. A. Guerrero, E. Romero, M. Milanés, V. Miñambres, and E. González, “Aplicación de sistemas de almacenamiento de energía con supercondensadores en plantas de generación fotovoltaica,” *Semin. Anu. Automática, Electrónica Ind. e Instrumentación*, pp. 1–6, 2009.
- [8] M. Lafoz, “Supercondensadores: Estado Del Arte, Aplicaciones Y Retos Tecnológicos,” 2018.
- [9] 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.
- [10] Kötzer, R., Carlem, M., “Principles and applications of electrochemical capacitors”; *Electrochemical Acta*, 2000, 45, 2483. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00354-6)
- [11] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.021>

- [12] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley, 1989. Goldberg, D., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, NY, 1989.
- [13] 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.
- [14] I. 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.