

Diseño experimental para el aprendizaje de la identificación de sistemas con modelos fraccionales. Una aplicación con supercondensadores

V. Avila, J.J. Quintana, I. Nuez, A. Ramos^a

^a Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numericas en Ingeniería, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Campus Universitario de Tafira. Spain.

RESUMEN

En este artículo se presenta un diseño experimental para el aprendizaje de la identificación de sistemas con modelos fraccionales, en el que se ha utilizado un sistema embebido (Arduino Nano). Este diseño se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo Final de Máster, de un estudiante del Máster en Tecnologías Industriales, que se imparte en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. El objetivo del fruto de este trabajo es la asistencia en tareas de aprendizaje y comprensión de los modelos fraccionales, y más concretamente a los supercondensadores, a los estudiantes del máster mencionado, así como a doctorandos en el área de ingenierías. Además, este diseño se caracteriza principalmente por su versatilidad, a la hora de plantear diferentes situaciones, y por la utilización de herramientas libres y de código abierto; tanto en lo referente a las aplicaciones informáticas, como en los componentes y elementos utilizados. Este último aspecto resulta ser una característica importante, pues permitirá modificar el diseño, de forma económica, en función de las necesidades futuras, por los estudiantes o por los docentes. Se han implementado una serie de ensayos fundamentados en la obtención de modelos fraccionales. Se muestran resultados obtenidos, a partir del diseño, siguiendo las indicaciones de las referencias bibliográficas especializadas en este tema. Se proponen nuevos modelos matemáticos para la dinámica de los supercondensadores, presentando un aceptable ajuste.

Palabras clave: Condensadores electroquímicos de doble capa, Artefactos de aprendizaje, Almacenamiento de energía eléctrica, Sistemas embebidos, modelos fraccionales

1. INTRODUCCIÓN

El condensador electroquímico es una tecnología que ha surgido con el potencial de mejorar los sistemas de almacenamiento de energía.^{1,2} Se comportan de una forma semejante a los condensadores convencionales, pero poseen una mayor superficie de contacto en los electrodos, lo cual implica capacidades superiores. Los condensadores electroquímicos tienen típicamente densidades energéticas del orden de 300 veces superiores a los condensadores convencionales y dos décimas partes de las baterías de menor densidad energética. Sin embargo, sus densidades de potencia son 10 veces superiores que la mayoría de las baterías. Gracias a sus densidades energéticas y de potencia, unido a la reducida resistencia serie asociada se presentan como elementos intermedios entre las baterías y los condensadores convencionales.¹ Los condensadores electroquímicos son también conocidos como supercondensadores o ultracondensadores. La energía es almacenada mediante la polarización de una solución electrolítica, aunque es un dispositivo electroquímico en el que prácticamente no se producen reacciones químicas en su mecanismo de almacenamiento de energía. Este mecanismo es altamente reversible, permitiendo que el condensador electroquímico se pueda cargar y descargar cientos de miles de veces. Los condensadores electroquímicos son utilizados en aplicaciones de automoción, para vehículos eléctricos e híbridos como sistemas de almacenamiento de energía suplementario,³ sistemas híbridos de energía,⁴ reproductores de *DVD*, ordenadores y otros equipos electrónicos. Los condensadores electroquímicos son elementos que tienen un comportamiento no lineal, y además poseen una característica diferente para los procesos de carga y de descarga. Resulta importante obtener modelos precisos para los condensadores electroquímicos, debido a que eso redundaría en la consecución de

email: ventura10@telefonica.net, josejuan.quintana@ulpgc.es,
ignacio.nuez@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es

elevadas eficiencias, en su utilización en diferentes aplicaciones industriales. Como consecuencia de la importancia que los EDLC (condensadores electroquímicos de doble capa) están tomando, en el campo de la energía eléctrica, es posible indicar que resultaría interesante que fuese estudiada en los grados universitarios de ingenierías. Para lo cual, sería necesario diseñar una serie de estrategias de aprendizaje, las cuales ayuden a los estudiantes a aprender y entender los parámetros energéticos relacionados con los EDLC, así como su comportamiento ante diversas situaciones de operación, con respecto a los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Estas estrategias de aprendizaje podría estar basadas en el uso de artefactos o diseños experimentales, de laboratorio, diseñados para el estudio y análisis de los EDLC. Esta última propuesta educacional está basada en las teorías de aprendizaje psicológicas expuestas en diversos trabajos,⁵⁻⁸ los cuales refieren que los estudiantes refuerzan sus conocimientos a través del uso de ambientes de aprendizaje adecuados, y además a través de la construcción y uso de artefactos diseñados, para tal menester. En el caso de los EDLC, los artefactos pueden reproducir situaciones de operación real, tales como las establecidas en los estándares europeos propuestos para los EDLC, de esta forma se pueden conseguir adecuados ambientes experimentales en línea con la aproximación constructivista, para aprender a través de técnicas activas.^{5,9} Estos artefactos pueden ser planteados en forma de prototipos, en los que es posible usar sistemas embebidos de bajo coste, permitiendo una considerable versatilidad en el diseño de experimentos, tal y como se refleja en diversos trabajos publicados en este sentido.^{6,7,10-12}

El principal objetivo de este artículo es mostrar un diseño experimental de bajo coste, para ayudar a los estudiantes de máster de investigación y doctorado a introducirse en la metodología científica, mediante la identificación de supercondensadores, con un equipo diseñado para tal menester. Haciendo mención que este trabajo se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo Final de Máster, de un estudiante del Máster en Tecnologías Industriales, que se imparte en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDENSADORES ELECTROQUÍMICOS

Un condensador electroquímico tiene dos electrodos porosos, no reactivos, que están inmersos en un electrólito, con un separador entre los electrodos que permite el movimiento de los iones, a través de él. La energía es almacenada en forma de cargas separadas en la doble capa electroquímica, formada en el interfase. El espesor de la doble capa depende de la concentración del electrólito y en el tamaño de los iones. Por otro lado, los electrodos son fabricados con materiales porosos con una elevada superficie, siendo el tamaño de estos poros del orden de nanómetros, obteniéndose superficies específicas entre $500 - 2000 \frac{m^2}{g}$ y capacidades específicas usando electrodos de carbono de $75 - 175 F/g$ para electrólitos acuosos y $40 - 100 F/g$ usando electrólitos orgánicos.^{1,2}

3. CARACTERÍSTICA DINÁMICA DE LOS CONDENSADORES ELECTROQUÍMICOS

La figura 1 muestra resultados experimentales de la evolución de la tensión de un condensador electroquímico (Panasonic 50F), cuando se le aplica una corriente constante (en la parte superior corriente de carga, $i_{carga} = 3A$, y en la inferior corriente de descarga, $i_{descarga} = -3A$). Se puede apreciar que la respuesta a la corriente constante no es lineal, como se podría esperar para un condensador. Este comportamiento no lineal se puede observar en la variación no proporcional de la tensión con respecto a la integral de la corriente. También es importante resaltar que; el comportamiento del condensador electroquímico para la carga es distinto para la carga que para la descarga.

Para varias aplicaciones industriales se han utilizado una extensa variedad de modelos dinámicos para los condensadores electroquímicos, entre los que se puede comentar; modelos simples RC basados en circuitos con una resistencia serie equivalente y un condensador ideal, modelos compuestos por redes RC de resistencias y condensadores, y finalmente modelos basados en capacitancias variables (dependientes de la tensión $C(v(t))$), las cuales implican ecuaciones diferenciales con coeficientes variables.

En este artículo como una alternativa a los modelos mencionados, se propone uno basado en la integral de orden no entero o fraccional, con la que se consigue un ajuste de los datos bastante aceptable, en relación al número de parámetros utilizados en el modelo. Además se muestra una interpretación del efecto del uso de la integración fraccionada, para el comportamiento del condensador electroquímico cuando es cargado o descargado con una corriente constante, mediante el uso de la definición de integral de Riemann-Liouville.

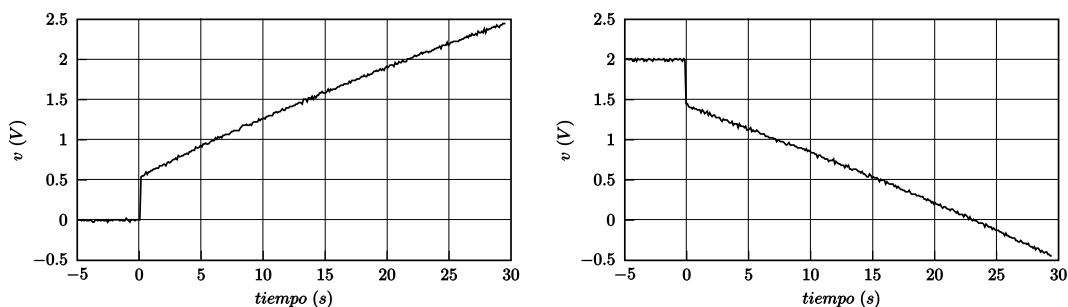


Figura 1. Comportamiento del condensador electroquímico para las operaciones de carga y descarga

3.1 Modelo fraccionado

A partir de lo observado en la figura 1, y de la respuesta típica del modelo simple de condensador RC , se puede establecer que el comportamiento del condensador electroquímico ante una corriente constante es no lineal y diferente a la del modelo convencional. A partir del análisis de la citada figura, se puede considerar que en la respuesta del condensador electroquímico se satisface la siguiente expresión

$$\Delta v(t) = R i(t) + \Delta v_c(t) \quad (1)$$

donde el comportamiento de $\Delta v_c(t)$ es diferente para las operaciones de carga y de descarga, no presentando una relación lineal con respecto a la integral de la corriente $i(t)$. Por lo que se pueden considerar las siguientes expresiones para las operaciones de carga y de descarga;

$$v(t) = v(0) + R_\alpha i(t) + \Delta v_{c\alpha}(t), \quad i(t) > 0 \quad (2)$$

$$v(t) = v(0) + R_\beta i(t) + \Delta v_{c\beta}(t), \quad i(t) < 0 \quad (3)$$

En las expresiones (2) y (3), los parámetros R_α y R_β son resistencias serie equivalentes. Por otro lado los términos $\Delta v_{c\alpha}(t)$ y $\Delta v_{c\beta}(t)$ están relacionados con la variación de la carga eléctrica almacenada, y por ello con la corriente $i(t)$. Estos términos presentan una relación lineal, para el caso del modelo convencional (RC), debido a que un almacenamiento uniforme de la carga eléctrica en el condensador provoca una variación uniforme en la variación de la tensión en el mismo. Pero para el caso del condensador electroquímico el almacenamiento de la carga eléctrica y la variación de la tensión no son uniformes, en otras palabras, idénticas cantidades de carga eléctrica no provocan la misma variación de tensión. En este artículo se propone la utilización de la integral de orden no entero de la corriente ($i(t)$), para asociarla con el comportamiento no uniforme de la variación de la tensión con respecto a una corriente constante. Por lo que a continuación se muestra la siguiente relación lineal, gracias al uso de la integral de orden no entero;

$$\Delta v_{c\alpha}(t) = \frac{\Delta q_\alpha(t)}{C_\alpha} = \frac{{}_0I_t^\alpha i(t)}{C_\alpha} \quad (4)$$

$$\Delta v_{c\beta}(t) = \frac{\Delta q_\beta(t)}{C_\beta} = \frac{{}_0I_t^\beta i(t)}{C_\beta} \quad (5)$$

donde C_α y C_β son constantes.

Usando la integral de orden no entero, las expresiones (2) y (3) quedan de la siguiente manera;

$$v(t) = v(0) + R_\alpha i(t) + \frac{1}{C_\alpha} i^{(-\alpha)}(t), \quad i(t) > 0 \quad (6)$$

$$v(t) = v(0) + R_\beta i(t) + \frac{1}{C_\beta} i^{(-\beta)}(t), \quad i(t) < 0 \quad (7)$$

Mediante la utilización de la integral de orden no entero ha sido posible la obtención de una ecuación de orden no entero, con coeficientes constantes ($R_\alpha, \frac{1}{C_\alpha}, R_\beta, \frac{1}{C_\beta}$), la cual tiene en cuenta el comportamiento ante la carga

y la descarga del condensador electroquímico. Teniendo en cuenta que la integral fraccionada de una constante es,¹³

$${}_0I_t^\alpha C = \frac{C}{\Gamma(1+\alpha)} t^\alpha \quad (8)$$

es posible resolver las expresiones (6) y (7) de la siguiente forma;

- Para una corriente constante mayor que cero ($i(t) = i > 0$);

$$v(t) = v(0) + R_\alpha i(t) + \frac{1}{C_\alpha} \frac{i}{\Gamma(1+\alpha)} t^\alpha, \quad i(t) > 0 \quad (9)$$

- Para una corriente constante menor que cero ($i(t) = i < 0$);

$$v(t) = v(0) + R_\beta i(t) + \frac{1}{C_\beta} \frac{i}{\Gamma(1+\beta)} t^\beta, \quad i(t) < 0 \quad (10)$$

Se puede utilizar la definición de integral de orden no entera de Riemann-Liouville, para entender como se obtiene la relación lineal mediante la utilización de la integral de orden no entero. La integral de orden no entero de la corriente, mediante la definición de Riemann-Liouville, se expone a continuación;

$${}_0I_t^\alpha i(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t i(\tau)(t-\tau)^{(\alpha-1)} d\tau, \quad t > 0, \alpha \in \mathbb{R}^+ \quad (11)$$

La integral de Riemann-Liouville resulta ser una convolución, que por si misma no ofrece mucha información acerca del comportamiento del condensador electroquímico, pero si es aplicada una transformación en la escala temporal tal como la siguiente;¹⁴

$$g_t(\tau) = \frac{1}{\Gamma(\alpha+1)} [t^\alpha - (t-\tau)^\alpha] \quad (12)$$

es posible llegar a la siguiente integral;

$${}_0I_t^\alpha i(t) = \int_0^t i(\tau) dg_t(\tau) \quad (13)$$

Para resumir todo lo que se ha expuesto hasta el momento, es posible decir que mediante la utilización de la integral de orden no entero se ha presentado un modelo que puede aportar ajustes a datos reales con reducido error, con un número pequeño de parámetros. Para la carga y la descarga a corriente constante.

4. MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN TEMPORAL

En este artículo para la determinación de los parámetros del condensador electroquímico ($R_\alpha, C_\alpha, R_\beta, C_{beta}$), se ha seguido el procedimiento desarrollado en el artículo.¹⁵ Para llevar a cabo la identificación se ha hecho uso de la aproximación de Grünwald-Letnikov, para la derivada de orden no entero,¹³ para con ello obtener una solución numérica de la integral fraccional (6) y (7), usando la siguiente expresión:

$${}_0I_t^\alpha f(t) \approx h^\alpha \sum_{j=0}^k b_j f(kh - jh) \quad (14)$$

$$b_j = (-1)^j \binom{-\alpha}{j} \quad (15)$$

donde $\binom{-\alpha}{j}$ es un coeficiente binomial. Para determinar los coeficientes b_j , se propone utilizar la siguiente aproximación;¹³

$$b_j = \left(1 - \frac{1-\alpha}{j}\right) b_{j-1}, \text{ for } j = 1, 2, 3, \dots N; \quad b_0 = 1 \quad (16)$$

A continuación se muestra la aproximación numérica de la ecuación (6), con un tiempo discreto t_m ($m = 2, 3, \dots$),

$$\Delta v_m = R_\alpha i_m + \frac{1}{C_\alpha} i_m^{(-\alpha)} \quad (17)$$

sólo se muestra la operación de carga, debido a que la aproximación numérica es idéntica para el caso de la operación de descarga. Aplicando la aproximación de Grünwald-Letnikov se obtiene;

$$\Delta v_m = R_\alpha i_m + \frac{1}{C_\alpha} h^\alpha \sum_{j=0}^m b_j i_{m-j} \quad (18)$$

Para conseguir la identificación con el modelo fraccionado se ha utilizado el siguiente funcional

$$E(\bar{a}) = \int_0^T [a_1 i^{(-\alpha)}(t) + a_0 i(t) - \Delta v(t)]^2 dt \approx \min \quad (19)$$

Con este funcional se puede determinar los coeficientes de la ecuación, a partir de los datos experimentales ($i(t)$, $v(t)$). La condición necesaria para obtener el mínimo de este funcional es

$$\frac{\partial E(\bar{a})}{\partial \bar{a}} = 0 \quad (20)$$

Si las funciones continuas $\Delta v(t)$, $i(t)$, son sustituidas por sus equivalentes discretas. Y las integrales son sustituidas por sumatorias, para el intervalo de tiempo de operación, queda;

$$\begin{aligned} a_1 \sum_{m=0}^M (i_m^{(-\alpha)})^2 + a_0 \sum_{m=0}^M i_m i_m^{(-\alpha)} &= \sum_{m=0}^M \Delta v_m i_m^{(-\alpha)} \\ a_1 \sum_{m=0}^M i_m^{(-\alpha)} i_m + a_0 \sum_{m=0}^M i_m^2 &= \sum_{m=0}^M \Delta v_m i_m \end{aligned} \quad (21)$$

A partir del sistema de ecuaciones (21) se pueden determinar los parámetros \bar{a} , pero para obtener estos parámetros y además el orden no entero de la integral α , se debe de realizar un proceso iterativo de cálculo. Esto es debido a que el sistema de ecuaciones (21) es no lineal. Este método iterativo se muestra desarrollado en el artículo.¹⁵

5. MATERIALES

Para validar la viabilidad del diseño experimental propuesto, se requiere llevar a cabo tal diseño, así como un conjunto de pruebas de laboratorio, basadas en el marco teórico expuesto en este artículo para los supercondensadores. En esta sección se muestran los materiales utilizados en este trabajo.

5.1 Materiales

En la fig.2, se muestra un diagrama básico del diseño experimental. Este sistema consiste en los siguientes elementos:

1. Un amplificador operacional **OPA549** (*Texas Instruments*). Este amplificador operacional puede proveer una corriente nominal de 8A, además tiene una entrada especial (i_{lim}) para limitar la corriente de salida del amplificador.
2. Una etapa de conversión analógica-digital, basada en el convertidor de precisión **ADS1115** (*Texas Instruments*), el cual está montado en una placa de *Adafruit Industries*. Esta etapa tiene dos canales analógicos en modo diferencial, para la medición de: la corriente de carga-descarga y la tensión del supercondensador. La corriente $i(t)$ es medida a partir de la tensión de una resistencia dispuesta en serie con el supercondensador $R_m = 0.1\Omega$, y la tensión se mide directamente $v(t)$.

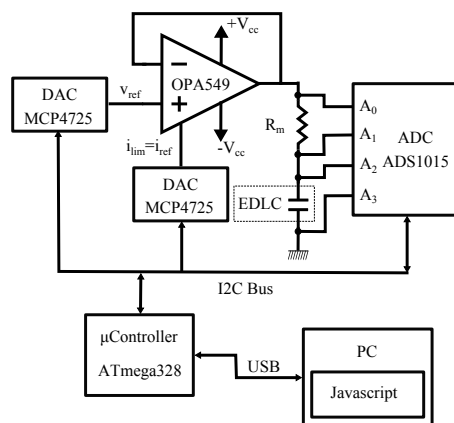


Figura 2. Diagrama básico del diseño experimental.

3. Dos etapas de conversión digital-analógico, basadas en **MCP4725** (MICROCHIP) con una resolución de 12Bit , las cuales están montadas en una placa de *Adafruit Industries*. Estas etapas son utilizadas para el control de los procesos de carga-descarga del EDLC, para ajustar las referencias de tensión e intensidad de corriente.
4. Un microcontrolador modelo **ATmega328** (*Atmel*), implementado en un *sistema embebido*, el cual es llamado **Arduino Nano** (*Arduino*). Este microcontrolador es el responsable del control de los procesos de carga y descarga galvanostático, así como de la captura de datos y de su envío, **via USB**, al PC para ser guardados.
5. Un PC, que es el responsable de controlar y configurar el microcontrolador para los ensayos diseñados, así como del almacenamiento de los datos capturados, obtenidos de las mediciones. Esto se logra por medio de un programa implementado en lenguaje javascript, bajo el entorno **Processing** *Processing Foundation*. Este programa es un interface para comunicarse y controlar el sistema embebido (Arduino Nano) con el PC. Processing es una aplicación flexible de código abierto, gratuita y multiplataforma.

6. RESULTADOS

A continuación se presentan los ensayos realizados al condensador electroquímico, con las siguientes características; **Panasonic 50F**. La figura 3 muestra los resultados de carga, aplicando una corriente constante de $3A$. En la curva superior de la figura 3 se muestra la respuesta real del condensador electroquímico en una escala de tiempo convencional τ , así como los resultados a partir del modelo fraccionado. Los valores de los parámetros para este condensador se muestra en la tabla 1, los cuales han sido obtenidos a partir del proceso de identificación. A partir de estos parámetros, se presenta la siguiente expresión obtenida a partir de (9);

$$v(t) = 0 + 0.1661 \cdot 3 + \frac{1}{29.6736} \frac{3}{\Gamma(1+0.8575)} t^{0.8575} = 0.4983 + 0.1067 t^{0.8575} \quad (22)$$

Los resultados del modelo fraccional, expresión (22), están trazados en la figura 3 junto con los resultados experimentales.

En la curva inferior de la de la figura 3, se muestra la respuesta experimental con una escala tiempo transformada $g_t(\tau)$, determinada a partir de la identificación.

Tabla 1. Parámetros de la operación de carga

R_α	C_α	α	<i>error</i>
0.1661	29.6736	0.8575	0.00009

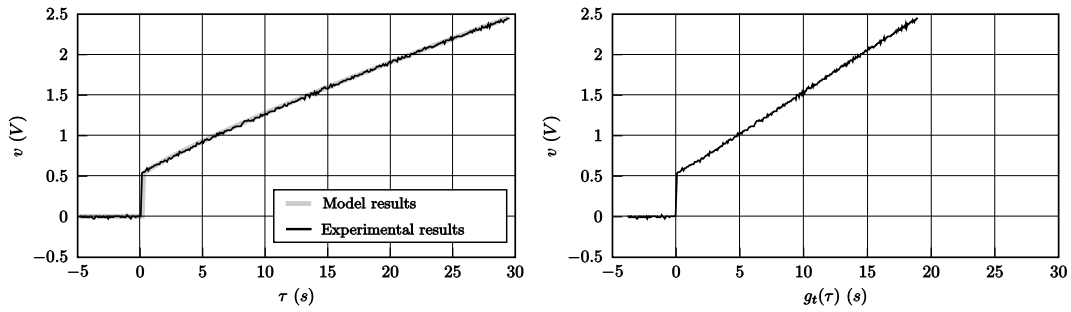


Figura 3. Operación de carga, escala de tiempo convencional τ versus escala transformada $g_t(\tau)$

En la figura 4 se muestran los resultados de descarga, aplicando una corriente constante de $-3A$. En las curvas superiores de la figura 4 se muestra la respuesta real del condensador en la escala de tiempo convencional τ , así como los resultados del modelo fraccionado. Los valores de los parámetros para este proceso de descarga se presentan en la tabla 2. A partir de estos parámetros, se muestra la siguiente expresión obtenida a partir de (10);

$$v(t) = 2 - 0.1997 \cdot 3 - \frac{1}{64.9350} \frac{3}{\Gamma(1+1.0975)} t^{1.0975} = 2 - 0.5991 - 0.0442 t^{1.0975} \quad (23)$$

Los resultados del modelo fraccionado, expresión (23), son trazados en la figura 4 junto con los resultados experimentales.

En la curva inferior de la figura 4 se muestra la respuesta real con una escala de tiempo transformada $g_t(\tau)$.

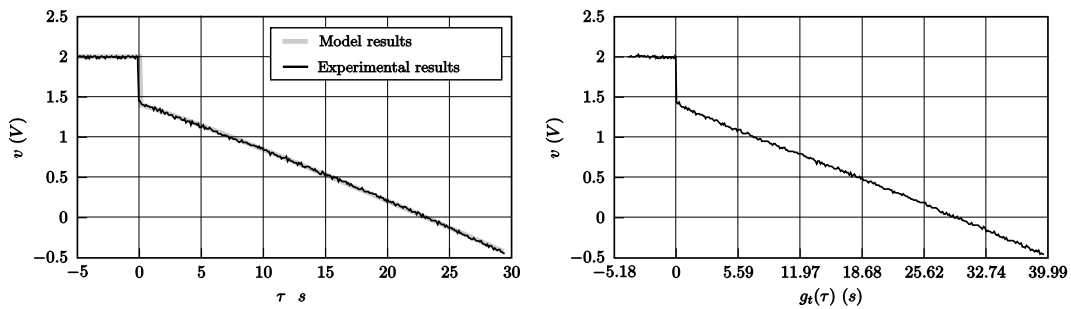


Figura 4. Operación de descarga, escala de tiempo convencional τ versus escala transformada $g_t(\tau)$

Tabla 2. Parámetros para la operación de descarga

R_β	C_β	β	<i>error</i>
0.1997	64.9350	1.0975	0.00024

A partir de los resultados de las tablas 1 y 2 se puede apreciar que el error del ajuste de los datos es muy reducido, debido a que el modelo obtenido a partir de los parámetros coincide prácticamente con los datos experimentales, figuras 3 y 4.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un diseño experimental de bajo coste, para ayudar a los estudiantes de máster de investigación y doctorado a introducirse en la metodología científica, mediante la identificación, con modelos fraccionales, de supercondensadores, en el que se ha utilizado un sistema embebido (Arduino Nano). Además, este diseño está basado en la utilización de aplicaciones informáticas de código abierto, así como por dispositivos de libre utilización y modificación. Estas últimas características hacen que los estudiantes puedan modificar

fácilmente el diseño presentado. Se han implementado una serie de ensayos, para probar la viabilidad técnica y pedagógica de la propuesta, establecidos en los artículos científicos del área de modelado fraccional y de supercondensadores. De los resultados experimentales obtenidos, de los ensayos realizados, se comprueba que el diseño experimental es válido para aprender y obtener modelos matemáticos fraccionales de supercondensadores. Finalmente, es posible indicar que el diseño experimental propuesto tiene un bajo coste, gracias a que los diferentes dispositivos utilizados son de reducido coste y con un gran potencial, asociado a la flexibilidad que aportan en el diseño para otras operaciones, tanto desde el punto de vista de los dispositivos físicos, como desde el punto de vista de las aplicaciones informáticas.

REFERENCIAS

- [1] Conway, B., [*Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*], Kluwer Academic/Plenum, New York, 1st ed. (1999).
- [2] Burke, A., “Ultracapacitors: why, how, and where is the technology,” *Journal of Power Sources* **91**, 37–50 (2001).
- [3] Lhomme, W., Delarue, P., Barrade, P., Bouscayrol, A., and Rufer, A., “Design and control of a supercapacitor storage system for traction applications,” in [*Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*], 2013–2020, IEEE (2005).
- [4] Abbey, C. and Joos, G., “Supercapacitor energy storage for wind energy applications,” *IEEE Transactions on Industrial Applications* **43**, 769–776 (2007).
- [5] Mekic, E., Djokic, I., Zejnelagic, S., and Matovic, A., “Constructive approach in teaching of voip in line with good laboratory and manufacturing practice,” *Computer Applications in Engineering Education*, n/a–n/a (2015).
- [6] Garcia, I. and Cano, E. M., “Designing and implementing a constructionist approach for improving the teaching-learning process in the embedded systems and wireless communications areas,” *Computer Applications in Engineering Education* **22**(3), 481–493 (2014).
- [7] Cano, E. M., Ruiz, J. G., and Garcia, I. A., “Integrating a learning constructionist environment and the instructional design approach into the definition of a basic course for embedded systems design,” *Computer Applications in Engineering Education* **23**(1), 36–53 (2015).
- [8] Sorathia, K. and Servidio, R., “Learning and experience: Teaching tangible interaction and edutainment,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **64**, 265 – 274 (2012). 12 th International Educational Technology Conference - {IETC} 2012.
- [9] Smith, R. C., Iversen, O. S., and Hjorth, M., “Design thinking for digital fabrication in education,” *International Journal of Child-Computer Interaction* **5**, 20 – 28 (2015). Digital Fabrication in Education.
- [10] Corbellini, S. and Vallan, A., “Arduino-based portable system for bioelectrical impedance measurement,” in [*Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2014 IEEE International Symposium on*], 1–5 (June 2014).
- [11] Pawar, P. A., “Heart rate monitoring system using ir base sensor amp; arduino uno,” in [*IT in Business, Industry and Government (CSIBIG), 2014 Conference on*], 1–3 (March 2014).
- [12] Gandra, M., Seabra, R., and Lima, F. P., “A low-cost, versatile data logging system for ecological applications,” *Limnology and Oceanography: Methods* **13**(3), 115–126 (2015). e10012.
- [13] Podlubny, I., [*Fractional differential equations*], Academic Press, San Diego, 1st ed. (1999).
- [14] Podlubny, I., “Geometric and physical interpretation of fractional integration and fractional differentiation,” *International Journal for Theory and Applications, Fractional Calculus and Applied Analysis* **5**, 367–386 (2002).
- [15] Dorcak, L., Lesko, V., and Kostial, I., “Identification of fractional-order dynamical systems,” in [*12th International Conference on Process Control and Simulation ASRTP'96*], 62–68 (1996).