

Diseño experimental de bajo coste para aprender parámetros energéticos de supercondensadores

J. Martín, V. Avila, F. Deniz, J.J. Quintana, A. Ramos^a

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

RESUMEN

En este artículo se presenta un diseño experimental de bajo coste, para entender y aprender parámetros energéticos de supercondensadores, en el que se ha utilizado un sistema embebido (Arduino Yun). Este diseño se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo Final de Grado, de un estudiante del Grado en Ingeniería Eléctrica, 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 parámetros energéticos de los supercondensadores, a estudiantes del área de la ingeniería industrial. 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 basados en los Estándares Europeos definidos, para supercondensadores, por las normas: *IEC 62391 – 1*, *IEC 62391 – 2 – 1*, *IEC 62391 – 2*, *IEC 62576*. Se muestran resultados obtenidos, a partir del diseño, siguiendo las indicaciones de algunos de los estándares mencionados. Estos ensayos se han llevado a cabo con algunos supercondensadores comerciales. Demostrando estos resultados experimentales, que el diseño experimental se puede utilizar para comprender y aprender el comportamiento energético de los supercondensadores, así como para la obtención de los parámetros, de los mismos, que son definidos en los estándares europeos.

Palabras clave: Condensadores electroquímicos de doble capa, Artefactos de aprendizaje, Almacenamiento de energía eléctrica, Sistemas embebidos, Diseños experimentales de bajo coste

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha incrementado un desarrollo significativo de los sistemas de almacenamiento de energía con supercondensadores, también llamados condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC). Estos sistemas son elementos capaces de almacenar energía eléctrica, los cuales presentan comportamiento no lineal.^{1,2} Como resultado de la importancia que están teniendo estos dispositivos se han desarrollado una serie de normas o estándares europeos. Estas normas establecen especificaciones y maneras de caracterizarlos. Entre estas normas, se podrían indicar: **Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment** (Part 1 : Generic specification) *IEC 62391 – 1*, **Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment** (Part 2-1 : Blank detail specification - Electric double-layer capacitor for power applications - Assessment level EZ) *IEC 62391 – 2 – 1*, **Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment** (Part 2 : Sectional specification - Electric double-layer capacitor for power applications) *IEC 62391 – 2*, **Electric double-layer capacitors for uses in hybrid electric vehicles** - Test methods for electrical characteristics *IEC 62576*. Las características de los supercondensadores son complementarias con las actuales sistemas de batería, por lo que pueden ser utilizados simultáneamente, baterías y supercondensadores, permitiendo de esta forma el diseño de configuraciones híbridas de almacenamiento de energía en los sistemas de energía eléctrica, con una contrastada mejora de la respuesta dinámica y del rendimiento.³⁻⁵

email: jojamaca@gmail.com, ventura10@telefonica.net, fabian.deniz@ulpgc.es
josejuan.quintana@ulpgc.es, alejandro.ramos@ulpgc.es

Como consecuencia de la importancia que los EDLC 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,⁶⁻⁹ los cuales refieren que los estudiantes refuerzan sus conocimientos a través del uso de adecuados ambientes de aprendizaje, 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.^{6,10} 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.^{7,8,11-13}

El principal objetivo de este artículo es mostrar diseño experimental de bajo coste, para ayudar a los estudiantes de ingeniería a aprender y entender los parámetros energéticos de los supercondensadores. Haciendo mención que este diseño se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo Final de Grado, de un estudiante del Grado en Ingeniería Eléctrica, que se imparte en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palma de Gran Canaria. Los mencionados parámetros son algunos de los establecidos en las normas europeas: *IEC 62391 – 1 // IEC 62391 – 2 – 1 // IEC 62576*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

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 los métodos fijados en las normas europeas para los EDLC. En esta sección se muestran los materiales y los métodos desarrollados en este trabajo.

2.1 Materiales

En la fig.1, se muestra un diagrama básico del diseño experimental. Este sistema consiste en los siguientes elementos:

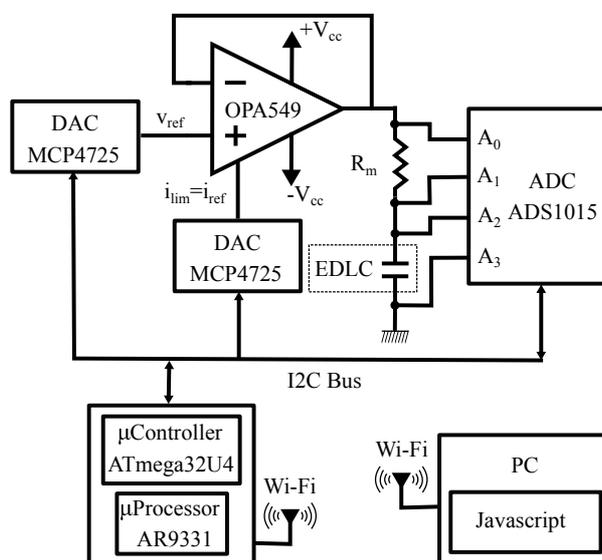


Figura 1. Diagrama básico del diseño experimental.

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. Esta es una característica importante para la implementación de los procesos de carga y descarga galvanostático, mediante el control de la corriente.
2. Una etapa de conversión analógica-digital, fig. 2, 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 $v(t)$. El circuito **ADS1115** tiene una resolución de $16Bit$, lo que determina una resolución de $3mV$ para la medición de la tensión y $30mA$ para la medición de la corriente.



Figura 2. Convertidor analógico-digital **ADS1115**.

3. Dos etapas de conversión digital-analógico, fig. 3, 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.



Figura 3. Convertidor analógico-digital **MCP4725**.

4. Un microcontrolador modelo **ATmega32U4** (*Atmel*) y un microprocesador **AR9331** (**Lilino - Linux environment**), implementado en un *sistema embebido*, el cual es llamado **Arduino Yun** (*Arduino*), fig 4. 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 WiFi**, al PC para ser guardados.

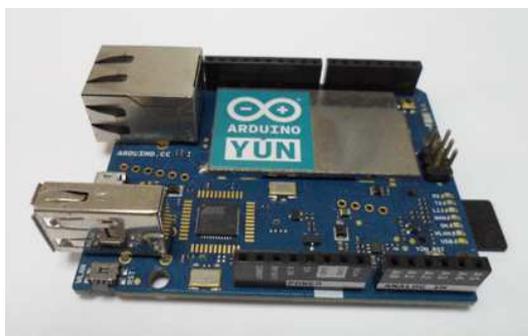


Figura 4. Arduino Yun.

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 Yun) con el PC. Processing es una aplicación flexible de código abierto, gratuita y multiplataforma. Existe diversa información en internet, para programar en esta plataforma.

Finalmente, en la fig. 5 se muestra un fotografía del sistema.

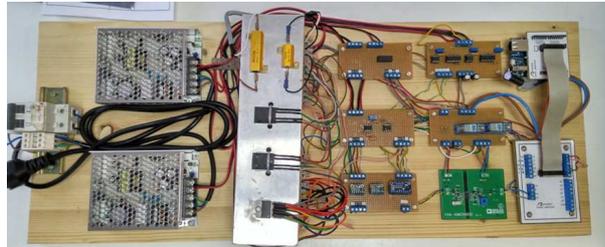


Figura 5. Fotografía del diseño experimental.

2.2 Pruebas y procedimientos de medida

En los estándares listados a continuación (*IEC 62391 – 1 // IEC 62391 – 2 – 1 // IEC 62576*), se muestran diferentes tipos de ensayos para la determinación de las propiedades de los supercondensadores. Estos ensayos pueden ser clasificados, como se muestra a continuación;

- Para la obtención de la capacidad C :
 - Métodos de descarga a corriente constante.
 - Métodos de determinación de la resistencia a corriente de carga constante.
- Para la determinación de la resistencia interna R_N :
 - Métodos AC para la resistencia.
 - Métodos DC para la resistencia.
- Para la estimación de la corriente de fuga.
- Para analizar la autodescarga.
- Para obtener la eficiencia energética.
- etc...

El diseño experimental propuesto en este artículo, aunque podría implementar la mayoría de los ensayos fijados en las normas, solo se desarrollan resultados de solo dos de ellos, para demostrar la correcta operación del sistema. A continuación, se expone una breve descripción de los ensayos implementados en este artículo, para la determinación de: la capacidad por el método de la descarga a corriente constante; y el ensayo para la obtención de la eficiencia energética.

Capacidad: para la determinación de la capacidad se plantea la utilización del método de la descarga a corriente constante. Para la aplicación de este método, se fijará un perfil de carga mostrado en la fig. 6, en la que inicialmente se realiza un proceso de carga galvanostático hasta la tensión nominal U_R , luego de de forma potenciostática, se continua cargando el supercondensador durante 30 *min*, y finalmente se descarga de forma galvanostática, con una corriente calculada según la tabla 2 indicada en el estándar europeo

IEC 62391 – 1. La capacidad se determina utilizando la expresión (1), donde U_1 y U_2 son el ochenta y cuarenta por ciento de la tensión nominal U_R , por lo que $U_1 = 0.8 \cdot U_R$ y $U_2 = 0.4 \cdot U_R$.

$$C = \frac{U_1 - U_2}{I(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

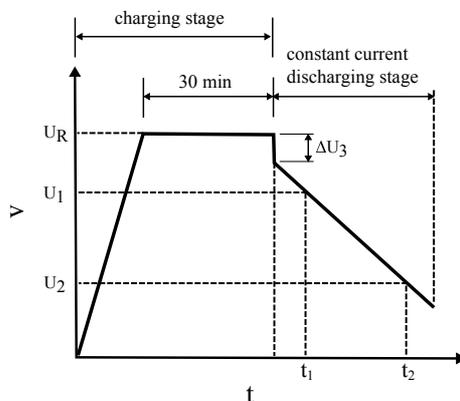


Figura 6. Procedimiento de descarga a corriente constante para la determinación de la capacidad.

Eficiencia energética: para la determinación de la eficiencia energética de los supercondensadores, se aplicará el método establecido en la sección 4.3. **Energy efficiency** del estándar europeo IEC 62576. La figura 7 muestra el perfil de operación, indicado por el mencionado estándar.

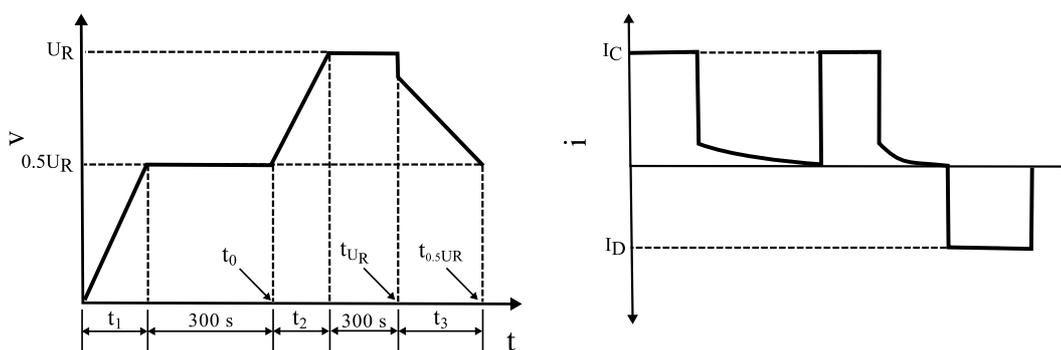


Figura 7. Perfil de carga-descarga para la determinación de la eficiencia energética.

En este método, para la determinación de la eficiencia energética, se consideran cinco etapas:

1. El ensayo comienza con el supercondensador totalmente descargado, luego se realiza una carga galvanostática hasta la mitad de la tensión nominal $0.5 \cdot U_R$, determinándose la corriente de carga según la expresión (2),

$$I_C = \frac{U_R}{40 \cdot R_N} \quad (2)$$

siendo R_N la resistencia interna nominal.

2. Luego, se lleva a cabo una carga potestostática durante 300 s.
3. En la próxima etapa, se realiza una nueva carga galvanostática, con el mismo valor para la corriente (2), hasta la tensión nominal.
4. Tras esta última carga galvanostática, se procede a otra carga potestostática, a la tensión nominal, durante 300 s.

5. En la última etapa, se realiza una descarga galvanostática hasta la mitad de la tensión nominal, con una corriente de descarga fijada según (3).

$$I_D = \frac{U_R}{38 \cdot R_N} \quad (3)$$

siendo R_N la resistencia interna.

A partir de los datos, obtenidos con la aplicación de este ensayo, se puede determinar la eficiencia energética mediante las expresiones (4), (5) y (6).

$$E_f(\%) = \frac{W_D}{W_C} \cdot 100 \quad (4)$$

$$W_D = \int_{t_{U_R}}^{t_{0.5U_R}} I_D U(t) dt \quad (5)$$

$$W_C = \int_{t_0}^{t_{U_R}} I_C U(t) dt \quad (6)$$

Los ensayos propuestos se han programado en un sistema embebido (Arduino Yun), utilizando el entorno de programación Arduino IDE. Esta última aplicación *open-source* se utilizó para escribir el código y para cargarlo al sistema embebido. Esta aplicación está implementada para Windows, Mac os X, y Linux. Existe diversa información disponible en internet, para consultas relacionada con la programación y utilización. Además, se convierte fácilmente en una plataforma utilizable por cualquier persona, sin la necesidad de un extenso conocimiento en programación de sistemas embebidos. Gracias a esta característica, el sistema embebido utilizado tiene una gran flexibilidad para el desarrollo de proyectos de similares características al propuesto en este trabajo.

3. RESULTADOS

Se han realizado una serie de ensayos basados en los estándares europeos, para un conjunto de supercondensadores de diferentes modelos y fabricantes, cuyas características básicas son mostradas en la tabla 1, además de en la figura 8.

Para tratar los datos obtenidos, en los ensayos llevados a cabo con el diseño experimental, se ha utilizado una herramienta de cálculo informática **Scilab**. Scilab es un programa open-source, paquete de cálculo numérico multiplataforma (Windows, Mac Os, Linux), con un lenguaje de programación orientado a métodos numéricos.

Tabla 1. Supercondensadores utilizados en este artículo.

EDLC	Manufacturer	Tradename	Rated-capacitance (F)	Rated-voltage (V)
1	Epcos	Ultracap	5	2.3
3	Wima	Supercap R	100	2.5
5	Maxwell	BCAP0650	650	2.7



Figura 8. Fotografía de los supercondensadores utilizados.

Las figuras 9 and 10 muestran dos ensayos de descarga a corriente constante, para el primer y el tercer supercondensador de la tabla 1. A partir de los datos obtenidos de estos ensayos, es posible determinar la capacidad, para ambos supercondensadores, mediante la expresión (1). Para el primero se determina a continuación (7):

$$C = \frac{I(t_2 - t_1)}{U_1 - U_2} = \frac{0.61 \cdot (2020.5 - 2012)}{0.8 \cdot 2.3 - 0.4 \cdot 2.3} = 5.63F \quad (7)$$

El valor de la capacidad se muestra en (7), el cual se encuentra dentro de los valores establecidos por los fabricantes $-10\%/+30\%$.

Para el tercer supercondensador (8)

$$C = \frac{I(t_2 - t_1)}{U_1 - U_2} = \frac{0.7 \cdot (6570 - 5490)}{0.8 \cdot 2.7 - 0.4 \cdot 2.7} = 700F \quad (8)$$

El valor de la capacidad se muestra en (8), el cual se encuentra dentro de los valores establecidos por los fabricantes $-10\%/+10\%$.

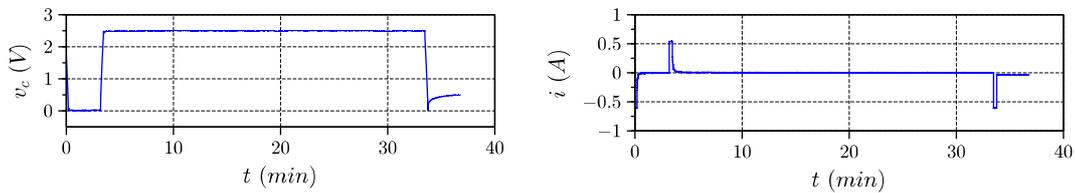


Figura 9. Método de la descarga a corriente constante, para la estimación de la capacidad. Supercondensador Epcos 5F Ultracap.

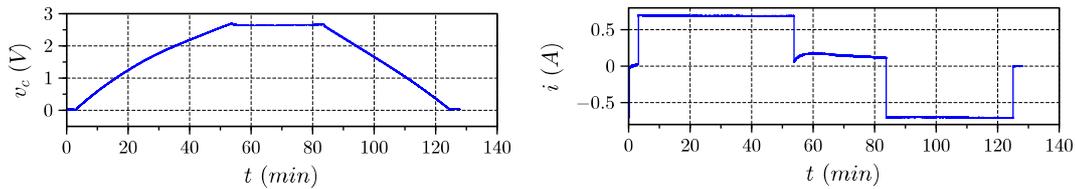


Figura 10. Método de la descarga a corriente constante, para la estimación de la capacidad. Supercondensador Maxwell 650F BCAP0650.

La figura 11 muestra el ensayo para la determinación de la eficiencia energética, para el segundo supercondensador de la tabla 1. Para este ensayo, la energía descargada tiene un valor de $W_D = 172J$, con una corriente de descarga de $I_D = U_R/40R_N = 2.5/40 \cdot 0.096 = 0.651A$ (donde la resistencia interna nominal R_N ha sido determinada experimentalmente usando lo establecido en el método del anexo D del estándar europeo IEC 62576), y la energía cargada, con una corriente $I_C = U_R/38R_N = 2.5/38 \cdot 0.096 = 0.683A$ (donde la resistencia interna nominal R_N ha sido determinada experimentalmente usando lo establecido en el método del anexo D del estándar europeo IEC 62576) $W_C = 249.4J$, determinada por las expresiones (5) y (6). Finalmente, aplicando la expresión (4), es posible obtener la eficiencia energética para el ensayo $E_f = 73.5\%$.

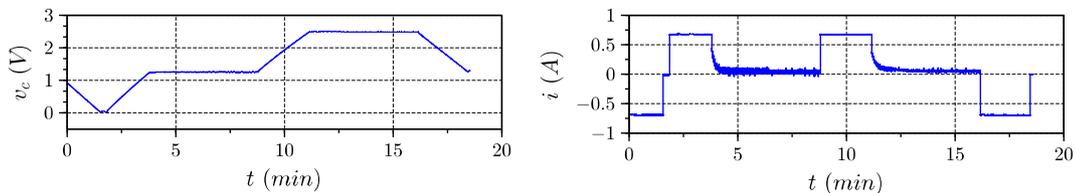


Figura 11. Método de la eficiencia energética. Supercondensador Wima 100F Supercap R.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un diseño experimental de bajo coste, para entender y aprender parámetros energéticos de supercondensadores, en el que se ha utilizado un sistema embebido (Arduino Yun). Este diseño se ha realizado a partir del desarrollo del Trabajo Final de Grado, de un estudiante del Grado en Ingeniería Eléctrica, que se imparte en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 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, definidos según los estándares oficiales para supercondensadores (*IEC 62391 – 1*, *IEC 62391 – 2 – 1*, *IEC 62391 – 2*, *IEC 62576*). De los resultados experimentales obtenidos y de los ensayos realizados, se comprueba que el diseño experimental es válido para aprender y obtener los parámetros energéticos de los 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] Quintana, J., Ramos, A., and Nuez, I., “Modeling of an edlc with fractional transfer functions using mittag-leffler equations,” *Mathematical Problems in Engineering* **2013** (2013).
- [3] Ma, T., Yang, H., and Lu, L., “Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems,” *Applied Energy* **153**, 56–62 (2015).
- [4] Chia, Y. Y., Lee, L. H., Shafiabady, N., and Isa, D., “A load predictive energy management system for supercapacitor-battery hybrid energy storage system in solar application using the support vector machine,” *Applied Energy* **137**, 588–602 (2015).
- [5] Hu, X., Johannesson, L., Murgovski, N., and Egardt, B., “Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus,” *Applied Energy* **137**, 913–924 (2015).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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.