

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN INTEGRAL DE UN BANCO DE SUPERCAPACITORES: DEL MODELADO A LA ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE CARGA

P. Fornaro, P. Battaiotto, P. Puleston, D. Riva, J. Moré, J. Talpone.

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales LEICI – UNLP-CONICET. 48 y 116 s/n, La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.  
e-mail: [pedro.fornaro@ing.unlp.edu.ar](mailto:pedro.fornaro@ing.unlp.edu.ar)

### 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo, enmarcado en la línea de investigación de **módulos de almacenamiento de energía no convencionales** (MANC), se presenta el diseño y la construcción de un banco de **supercapacitores** (SC), junto con un diseño preliminar de un sistema de observación para el estado de carga (SOC por sus siglas en inglés) utilizando un diferenciador por modo deslizante acoplado con un estimador paramétrico.

Hoy en día, numerosos estudios han demostrado la limitación práctica que poseen las energías renovables en cuanto al almacenamiento de energía. Esto último resalta la importancia de los MANC, en un marco de creciente utilización de sistemas híbridos tanto a pequeña como a gran escala, sobre todo debido a su capacidad de manejar grandes niveles de potencia. En particular, la versatilidad de los SC y baterías de Ión-Litio para poder funcionar como módulos de almacenamiento o buffers en un mismo sistema híbrido y su excelente performance en términos de eficiencia, vida útil y densidad de potencia, los convierte en elementos de sumo interés para la comunidad científico-tecnológica en el desarrollo de vehículos eléctricos y sistemas híbridos de energía renovables.

Actualmente, los SC son un foco de interés principalmente debido a su gran densidad de potencia, aunque como principal desventaja puede señalarse que estos dispositivos no



Figura 1. Banco de SC en etapa de construcción.

poseen grandes niveles de densidad de energía y suele ser necesario utilizar los SC junto con otras fuentes de almacenamiento, como baterías de Ión-Litio, o esquemas de almacenamiento basados en hidrógeno [4]. Mas aún, para poder emplear SC en un sistema híbrido es necesario un agrupamiento en serie o serie-paralelo de SC. Estos arreglos son conocidos como 'Banco de SC' o 'Pila de SC'.

Para conservar la vida útil de los SC de un banco, es necesario incorporar un sistema de balanceo, que se encargue de mantener igualadas las tensiones de cada SC, asegurando que el banco se mantenga balanceado independientemente de la variabilidad de los parámetros internos de cada dispositivo.

También adquiere gran relevancia incorporar técnicas de observación y estimación para el banco de SC, con el objetivo de extraer información de los parámetros internos del mismo, y así mejorar la eficiencia de operación del banco, y del sistema híbrido donde se lo utilice. Emplear técnicas de observación y estimación permite conocer el SOC y predecir la vida útil del banco a través del estado de salud (SOH), obtenidos indirectamente mediante la estimación de las capacidades y resistencias de pérdidas a partir de modelos eléctricos

equivalentes. Consecuentemente, adquieren gran relevancia el modelado y la identificación del banco de SC, para lograr una adecuada regulación y control al integrarlo en sistemas de mayor energía.

Por último, para resguardar la seguridad del usuario/a, se incorporan módulos externos de monitoreo y protección, los cuales poseen la finalidad de supervisar las variables eléctricas del banco (tensión, corriente y temperatura) con el objetivo de desconectar al banco de su alimentación o descargarlo, según sea pertinente preservando simultáneamente la integridad del mismo.

## 2. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE SC

Se construyó un banco de supercapacitores, utilizando SC de doble capa electrostática (ESDL-SC). El mismo fue confeccionado con 20 elementos, de forma de alcanzar una capacidad nominal de 80 [F] y una tensión nominal de funcionamiento del banco de 27 [V]. Este valor de tensión se consiguió a partir de colocar en serie 10 SC EATON "Powerstore XV Series" de 400 [F] y 2.7 [V] nominales. El modelo de SC es de doble capa de carbono, con electrolito de aerogel de base acuosa. La forma en que los SC fueron ordenados puede observarse en la Figura 2.

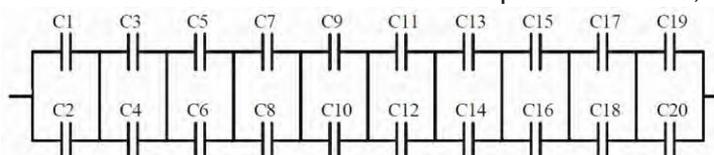


Figura 2. Disposición de los SC en el banco construido.

Además, se integraron:

- Un novedoso sistema de balanceo de tensiones de celda, basado en transistores MOSFET, el cual guarda una adecuada relación de compromiso entre la energía disipada para el balanceo y la velocidad del método de balanceo.

- Un módulo de seguridad basado en FPGA, encargado de supervisar el funcionamiento a partir de medidas de tensión, corriente y temperatura.

### 2.1. Diseño del método de balanceo

Se empleó un sistema de balanceo que utiliza transistores MOSFET autopolarizados, calibrados específicamente para ser utilizados para el balanceo de SC. Al utilizar este tipo de conexión (Figura 3), los MOSFET presentan un valor de resistencia de salida exponencialmente decreciente con el aumento de tensión en bornes, lo que tiende a mantener balanceados los SC. El esquemático de conexión entre las llaves y los SC puede observarse en la Figura 4, donde los MOSFET fueron reemplazados por una resistencia variable.

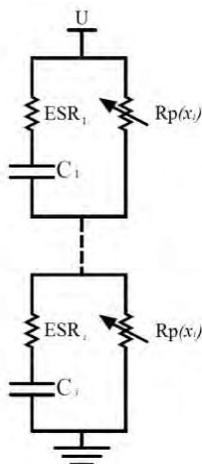


Figura 4. Esquemático de conexión entre las llaves y los supercapacitores.

Este método es sumamente sencillo de implementar por lo que es ventajoso respecto a métodos que emplean amplificadores operacionales o diferentes circuitos de disparo. Para tensiones menores a la tensión de diseño es sumamente eficiente, dado su bajo consumo de corriente. Además, gracias a que las resistencias son variables, la velocidad de este sistema de balanceo es mucho mayor que la de cualquier otro método que utilice resistencias de valor fijo.

A partir de los resultados de las simulaciones y de un análisis de las hojas de datos de una serie de transistores MOSFET ALD (específicamente diseñados para bancos de SC), se eligieron las llaves apropiadas para este banco (ALD910024). Luego se diseñó el PCB para montar los 20 SC acorde a la Figura 2. Dado que los niveles de corriente nominales son de 440 [A] máximos durante un segundo y 52 [A] nominales de corriente continua, es que se diseñó con un espesor de las pistas de cobre de 105 [ $\mu\text{m}$ ] para toda la placa acorde a la norma internacional IPC2221A.

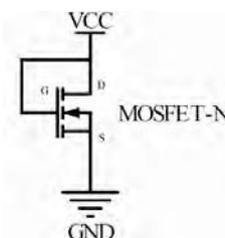


Figura 3. Modo de conexión de los transistores.

## 2.2 Módulo de monitoreo y protección

Además del sistema de balanceo por celda, se le agregó al banco de supercapacitores una serie de sensores con el propósito de monitorear la tensión, corriente y temperatura del mismo. El sistema de medición de tensión está diseñado a partir del integrado HCPL-788J, un amplificador de tensión aislado. El dispositivo utilizado para medir las corrientes de carga y descarga es un sensor de Efecto Hall, el CSNF161 de Honeywell. Por último, se instalaron en el banco 2 sensores analógicos LM35DZ, para obtener mediciones de temperatura. Para utilizar las mediciones de los sensores mencionados, se construyó un módulo de seguridad basado en FPGA. El kit utilizado es el DE0-NANO de Altera, y fue programado en VHDL.

Las cotas programables que el módulo de seguridad supervisa son:

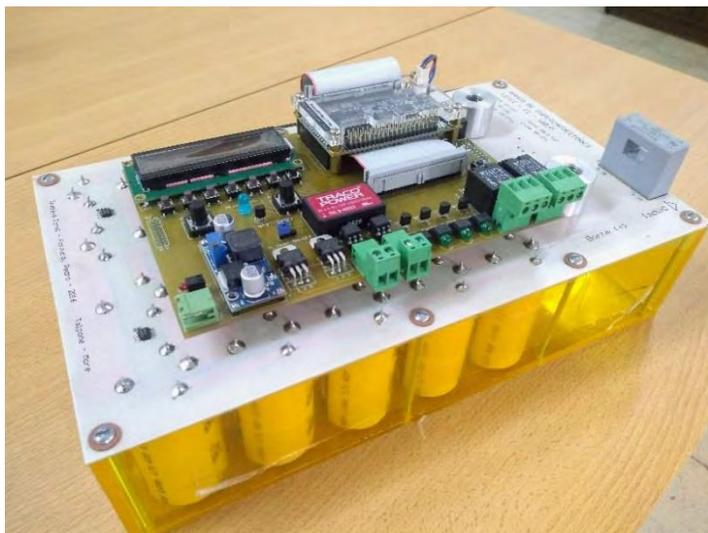


Figura 5. Banco de SC junto con el módulo de seguridad y la electrónica asociada.

- 1) Tensión en bornes: La protección programada se encarga de evitar que el banco continúe cargándose cuando se alcance la tensión indicada. Por defecto se setea una tensión de 28 [V].
- 2) Corriente: la protección se encarga de desconectar el convertidor del banco en casos de sobrepasar el valor preestablecido. Por defecto, el módulo actúa cuando se superan los  $\pm 16,67$  [A].
- 3) Temperatura entre SC: La protección abre el banco para evitar que continúen circulando corrientes, las cuales son las principales causantes de la elevación de temperatura. Se setean por defecto los

límites de temperatura de los SC indicados por el fabricante:  $-40$  [°C] la temperatura inferior, y  $70$  [°C] la temperatura superior.

## 3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL BANCO DE SC

### 3.1. Modelo del banco de SC

Validar un modelo con sus parámetros bien estimados permite, no sólo disponer de una potente herramienta de simulación y análisis, sino también disponer de estimaciones del SOC y del SOH, lo cual es vital a la hora de emplear un banco de SC en un sistema híbrido de mayor potencia. El SOC y el SOH pueden ser obtenidos indirectamente a partir de los valores de las capacidades y resistencias del modelo eléctrico empleado.

Dado que las únicas medidas de tensión y de corriente disponibles son las de los bornes de conexión, la identificación se realiza sobre un modelo simplificado del banco, el cual puede observarse en la Figura 6. El mismo posee dos ramas capacitivas con distintas constantes de tiempo, y una resistencia de pérdidas.

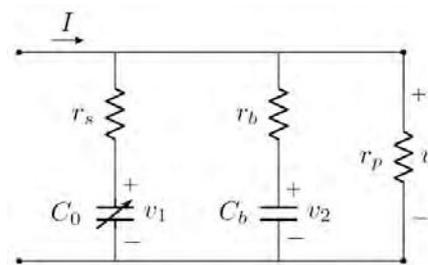


Figura 6. Modelo eléctrico del banco de SC.

### 3.2 Diseño del diferenciador por sliding

Los diferenciadores por modo deslizante son algoritmos que permiten estimar una función y sucesivas derivadas de la misma. En este trabajo se empleó un diferenciador de tercer orden para estimar la tensión del banco  $y(t)$  y sucesivas derivadas de la misma.

Puede verificarse que, si las corrientes de alimentación del banco y sus derivadas son Lipschitz, entonces estarán dadas las condiciones de convergencia del algoritmo, y será posible obtener la tensión del banco y sus derivadas, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= -\lambda_3 L^{\frac{1}{3}} |z_1 - y(t)|^{\frac{2}{3}} \text{sign}(z_1 - y(t)) + z_2 \\ \dot{z}_2 &= -\lambda_2 L^{\frac{1}{2}} |z_1 - y(t)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(z_2 - \dot{z}_1) + z_3 \\ \dot{z}_3 &= -\lambda_1 L \text{sign}(z_3 - \dot{z}_2)\end{aligned}$$

donde  $z_1$ ,  $z_2$  y  $z_3$  representan las estimaciones de la salida, y la primer y segunda derivada respectivamente;  $y(t)$  es la tensión medida en bornes del banco;  $\lambda_i$  y  $L$  son parámetros de diseño que deben ser apropiadamente elegidos.

### 3.3. Diseño del estimador de parámetros

Se diseña un estimador para obtener valores aproximados de los parámetros del modelo utilizado. En este caso, se utiliza un algoritmo de minimización de cuadrados, el cual puede describirse con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\widehat{\Delta\theta} &= -\Gamma(t)\varphi(t)[\varphi^T(t)\widehat{\theta}(t) - z_2(t)] \\ \dot{\Gamma}(t) &= -\Gamma(t)\varphi(t)\varphi^T(t)\Gamma(t)\end{aligned}$$

donde  $\varphi(t)$  es un vector de funciones del sistema, como estados, acciones de control y derivadas de la misma;  $\widehat{\theta}$  es el vector de parámetros estimados; y  $\Gamma(t)$  es una ecuación auxiliar.

Para diseñar el estimador, se parte de una ecuación lineal en los parámetros. Para el modelo presupuesto, puede utilizarse la segunda derivada de la salida obtenida mediante el diferenciador por modo deslizante, ya que esta última puede escribirse como:  $z_2 = \theta^T \varphi(t)$ . Para asegurar la convergencia del estimador paramétrico debe verificarse la condición de excitación persistente, la cual se define cómo:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} \varphi(t)\varphi^T(t)dt \geq \alpha I$$

y la cual puede verificarse que se cumple para el modelo propuesto.

## 4. SIMULACIONES Y MEDICIONES EXPERIMENTALES

### 4.1. Curvas experimentales del del sistema de balanceo.

Una vez construido el banco se realizaron mediciones y distintos relevamientos de parámetros característicos del banco. A continuación, se exponen las curvas relevadas para verificar el método de balanceo diseñado.

Debido a que no se disponía de elementos para medir simultáneamente las tensiones de cada celda del banco de SC, es que sólo se midieron los desbalances a lo largo del tiempo mientras el banco se cargaba lentamente. El procedimiento utilizado para relevar los datos fue el siguiente:

1. Se cargó el banco con corrientes constantes hasta que en alguna de las celdas se detectó una tensión cercana al valor nominal.

2. A partir de este punto se disminuyó la corriente de carga para evitar que se presenten sobrepicos de tensión en las celdas, y que estas permanezcan dentro del rango de tensiones recomendado por el fabricante, es decir, tensiones menores a 2.85 [V].

3. Se midieron las tensiones de celda durante todo el procedimiento de carga, a lo largo de instantes no igualmente espaciados de tiempo, con el objeto de corroborar el funcionamiento del sistema de balanceo. Los resultados obtenidos pueden verse en la Figura 7, en la cual se observan los valores de tensión de cada celda en 14 instantes diferentes a lo largo del proceso de carga.

Cabe destacar que el sobrepico de tensión que puedan presentar las celdas del banco, dependerá del método de carga que se utilice, y del estado de carga inicial de los SC. El peor caso se da cuando los SC se encuentran inicialmente descargados, y el método de balanceo fue diseñado para balancear lentamente los SC, y no para evitar sobrepicos abruptos cuando se parte de un estado de carga muy lejano al nominal.

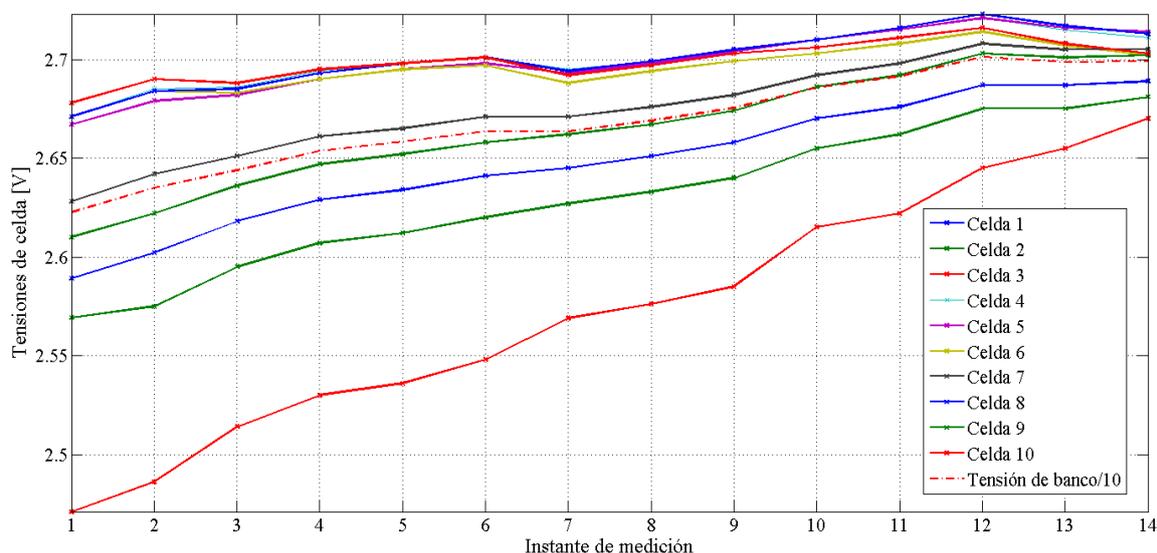


Figura 7. Tensiones de celda medidas.

#### 4.2. Simulación del estimador de parámetros del banco

Las simulaciones realizadas fueron obtenidas utilizando el entorno Simulink de Matlab, en el cual se implementó:

- El modelo para el banco de SC (Figura 6) para el cual se utilizaron los datos nominales brindados por el fabricante. Para el mismo también se asume que la resistencia de pérdidas posee un valor muy elevado.
- El diferenciador por modo deslizante diseñado en la sección 3.2, para estimar la segunda derivada de la tensión del banco.
- Las ecuaciones dinámicas del estimador de parámetros.

El banco fue excitado con una corriente continua y 4 funciones senoidales de variadas amplitudes y frecuencias, alrededor de las ubicaciones esperadas de los polos y ceros de la planta nominal. Pueden observarse en la Figura 8 los parámetros estimados normalizados, los cuales se encuentran normalizados por sus valores reales con fines explicativos. De esta forma es sencillo observar cómo 3 de los parámetros estimados convergen rápidamente mientras la convergencia de 2 de ellos es mucho más lenta.

### 5. CONCLUSIONES

Logró construirse íntegramente un banco de SC funcional y apto para ser integrado como módulo de almacenamiento de energía en sistemas híbridos con diferentes topologías.

Por un lado, se verificó que el sistema de balanceo implementado es sumamente eficiente, ya que la variación exponencial de resistencia de los MOSFET hace despreciable la corriente de fuga para niveles de tensión por debajo del nominal, y sólo aumentan los valores de corrientes de fuga al aproximarse a la tensión máxima. Por otro lado, el sobrepico de tensión en las celdas también depende del estado de carga de los SC: cuando se parte de un valor de estado de carga más cercano al nominal, entonces el sobrepico de tensión será menor.

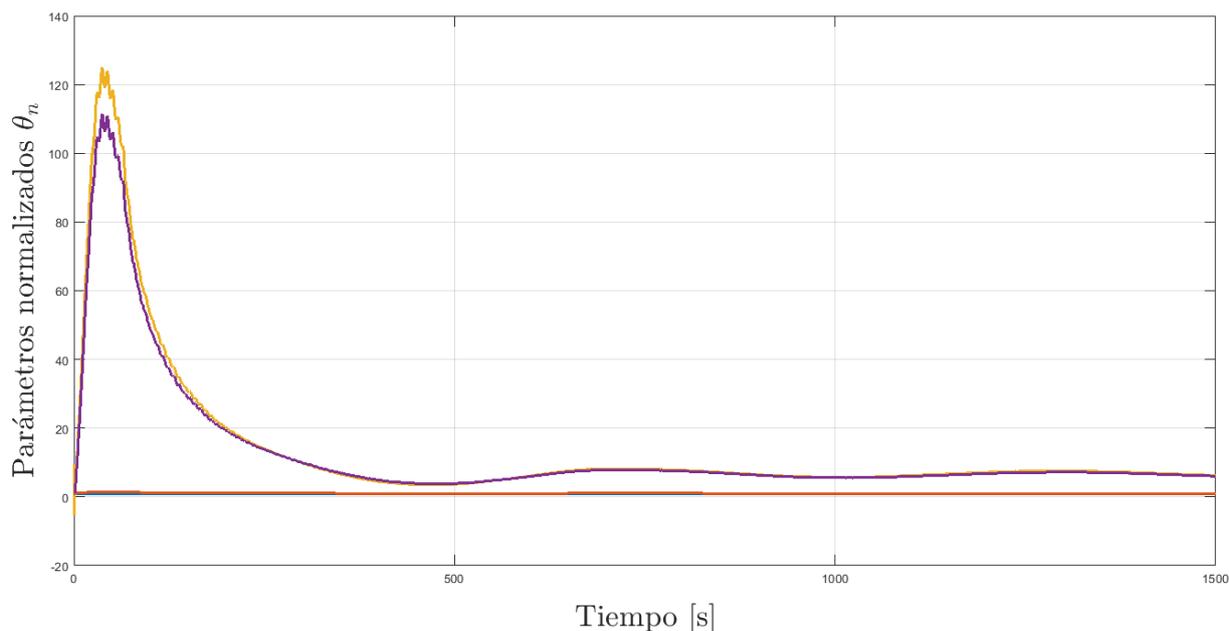


Figura 8. Convergencia de los parámetros normalizados.

El estimador de parámetros del modelo, evaluado in-silico permitirá realizar aproximaciones para un cálculo del SOC. Se demostró que la convergencia de la estimación de los parámetros es asintótica, y su principal fortaleza radica en la permanente actualización de variables. Sin embargo, es importante apuntar hacia mejoras que se concentren primordialmente en acelerar la velocidad de convergencia del método empleado, para poder extraer información acerca de los parámetros más rápidamente.

Como trabajo a futuro se proyecta la implementación del estimador del SOC (en DSP/FPGA) y la evaluación experimental del banco de SC en un sistema híbrido funcional.

## REFERENCIAS

- [1] I. San Martín, A. Ursúa, P. Sanchis, "Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis modelling and experimental validation," *International journal of hydrogen energy*, Vol 38, 2013.
- [2] S. M. Lukic, S. G. Wirasingha, F. Rodriguez, J. Cao, A. Emadi, "power management of an ultracapacitor/battery hybrid energy storage system on a hybrid electric vehicle," 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.
- [3] A. B. Cultura II, Z. M. Salameh, "Modelling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application," *International conference on computer information systems and industrial applications*, 2015.
- [4] P. Barrade, A. Rufer, "Current capability and power density of supercapacitors: considerations on energy efficiency," *EPE 2003, Toulouse, France 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE Journal*, Enero de 2003.
- [5] V. Musolino, L. Piegari, E. Tironi, "New full-frequency-range supercapacitor model with easy identification procedure," *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol 60, 2013.
- [6] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, "Sliding mode control and observation," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Eds. Springer Science and Business Media New York, 2014.
- [7] A. Belhani, N. K. M'Sirdi, A. Naamane, "Adaptive sliding mode observer for estimation of state of charge," *Energy Procedia*, Vol 42, 2013, pp 377–386, [The Mediterranean green energy forum, 2013].
- [8] C. Edwards, S. K. Spurgeon, "Onn the development of discontinuous observers," *International journal of control*, 59:5, pp 1211–1229, Marzo de 2007.