

# Equilibrado intrínseco de tensión de un módulo de supercondensadores por agrupamiento óptimo utilizando algoritmos de particionado

E. Oyarbide<sup>†</sup>, C. Bernal<sup>†</sup>, P. Molina<sup>†</sup>, L.A. Jiménez<sup>††</sup> y R. Gálvez<sup>††</sup>

<sup>†</sup>Dpto. Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, [eyarbid@unizar.es](mailto:eyarbid@unizar.es)

<sup>††</sup>Epic Power Converters S.L., [ljimenez@epicpower.es](mailto:ljimenez@epicpower.es)

**Abstract-** Los supercondensadores son dispositivos de baja tensión por lo que normalmente se suelen utilizar en conjuntos serializados. Debido a las tolerancias de producción las capacidades en serie no son idénticas por lo que se emplean técnicas de equilibrado de tensión. Si el módulo va a estar sometido a ciclos de carga-descarga rápidos, los circuitos de equilibrado activos deben de ser capaces de intercambiar la potencia nominal, por lo que resultan caros. Trabajos previos han mostrado que la conexión en serie de subconjuntos de supercondensadores en paralelo minimiza la dispersión de la capacidad equivalente serializada y, por consiguiente, minimiza las diferencias de tensión entre supercondensadores, mejorando de esta forma la vida útil del módulo. Este artículo propone una estrategia de distribución de supercondensadores basada en algoritmos de particionado que consigue optimizar la dispersión de la capacidad equivalente de los submódulos formados por supercondensadores en paralelo. De esta forma se mejora la cantidad total de energía que se puede almacenar y se alarga la vida útil del módulo.

**Palabras clave:** algoritmo de particionado, almacenamiento de energía, envejecimiento, equilibrado de tensión, módulo supercondensadores

## I. INTRODUCCIÓN

Los módulos de supercondensadores ofrecen mayor densidad de potencia y capacidad de ciclado que las baterías, por lo que son la elección adecuada para aplicaciones con procesos de carga y/o descarga rápidas [1]-[6], como por ejemplo sistemas de recuperación de energía [1],[2], amortiguación de fluctuaciones en fuentes de energía [7],[8] y vehículos híbridos [4],[9].

El envejecimiento del módulo de supercondensadores es uno de los principales problemas a abordar y depende fundamentalmente de los niveles de temperatura y tensión de cada celda [10]. El envejecimiento se manifiesta con un incremento de la resistencia equivalente serie (ESR) y la reducción de la capacidad de la celda.

Los supercondensadores son dispositivos de baja tensión, normalmente por debajo de 3V, por lo que habitualmente se utilizan en composiciones serie de 50 a 200 elementos, en función de la tensión nominal requerida [11]. Como es sabido, la tolerancia en el valor real de la capacidad provoca diferentes niveles de tensión en supercondensadores conectados en serie, lo que resulta en dos efectos no deseados [12]:

- La tensión del módulo se limita a un valor por debajo de la tensión máxima teórica. Debido a ello, la energía

almacenada, que depende del cuadrado de la tensión, es muy inferior a la energía instalada.

- El peor condensador (considerando como tal la de menos capacidad) estará siempre con niveles de tensión superiores a los de los condensadores adyacentes por lo que su envejecimiento, que depende del nivel de tensión, será acelerado. El envejecimiento se manifiesta con un incremento de la resistencia equivalente serie (ESR) y un decremento de la capacidad, por lo que se dan varios fenómenos acumulativos:
  - a) Al bajar la capacidad, la tensión de la celda aumenta, por lo que el proceso de envejecimiento se acelera.
  - b) Con valores de ESR mayores, la temperatura del supercondensador aumenta más que el de los supercondensadores adyacentes, por lo que el envejecimiento también es acelerado.
  - c) Debido a los fenómenos de envejecimiento descritos, tanto la capacidad como la ESR degeneran rápidamente por lo que se repite lo descrito en los puntos a) y b), de forma que el envejecimiento se vuelve a acelerar: al final se llega a un bucle destructivo.

Como se ve, valores bajos de capacidad derivados de las tolerancias de producción llevan a una acumulación de efectos no deseados, que resultan en un envejecimiento acelerado del supercondensador implicado y, consecuentemente, en un fallo prematuro del módulo completo. Las tolerancias típicas de la capacidad de los supercondensadores se sitúan alrededor del 20%, por lo que los fabricantes de módulos no pueden despreciar este efecto y deben implementar soluciones de equilibrado de tensión.

Hay dos familias de estrategias de equilibrado de tensión, las pasivas y las activas [11]. Las redes de equilibrado pasivas se pueden construir utilizando diodos de anclaje que absorben corriente cuando la tensión de la celda correspondiente está por encima del valor límite. El problema de esta estrategia es que si el módulo no está habitualmente operando a su nivel de tensión máxima, los desequilibrios no se evitan. Este fenómeno se puede solucionar con resistencias de equilibrado, lo que implica un consumo de energía proporcional a la velocidad de equilibrado.

Por otra parte, las estrategias de equilibrado activas están basadas en convertidores DC/DC que intercambian, de forma eficiente, la energía excedente de los condensadores con más tensión a las celdas menos cargadas. Se trata de una estrategia compleja y, dependiendo de la dinámica de equilibrado (es decir, de la potencia), cara.

El problema del desequilibrio debe ser considerado especialmente en los procesos de carga, ya que en descarga no suelen generar problemas importantes. Se pueden establecer dos tipos de procesos de carga: carga rápida y carga lenta. Si la aplicación implica procesos de carga lenta a baja potencia, un sistema de equilibrado activo de baja potencia y bajo coste será la solución más eficiente y eficaz. Como ejemplos podemos citar los sistemas de descarga de pulsos de potencia [6] y los sistemas de soporte ante huecos o interrupciones breves de tensión [13], donde la energía se puede almacenar lentamente pero las descargas son abruptas.

Por otra parte, en aplicaciones de recuperación de energía como el frenado regenerativo [1],[2],[4][9] o en sistemas de pulsos de potencia ciclados [3],[5], se requiere también una velocidad de carga rápida, a alta potencia. Este sería el caso de vehículos eléctricos, ascensores, y otros. En estos casos la tensión sube rápidamente y alcanza fácilmente el nivel máximo permitido. Si se quiere evitar un subdimensionamiento de la energía almacenable, en este tipo de aplicaciones de carga y descarga rápida es conveniente el uso de sistemas de equilibrado activos de gran potencia basados en convertidores DC/DC, lo que duplica el coste, eleva la complejidad de la electrónica de potencia instalada y reduce la fiabilidad.

Este trabajo propone un método optimizado para el agrupamiento de celdas supercondensadoras en una estructura paralelo-serie, de forma que la dispersión equivalente entre las capacidades equivalentes serializadas es reducida a valores despreciables, obteniendo un equilibrado intrínseco de tensión.

## II. TOPOLOGÍA ÓPTIMA

Cualquier sistema de almacenamiento de energía debe cumplir con dos requerimientos generales: una capacidad de almacenamiento determinada (o nominal) y la habilidad de intercambiar la energía a una velocidad dada, es decir, su potencia nominal [11]. Estos dos parámetros junto con el perfil de ciclado térmico determina el número total de supercondensadores a instalar, por ejemplo  $N$ . En este punto el diseñador debe decidir la forma en la que se distribuye toda la capacidad a instalar, es decir, el número de celdas en paralelo y/o en serie. La distribución seleccionada tiene un impacto directo en la fiabilidad del módulo, en su tolerancia a fallos, y en el equilibrado de tensión, es decir, en el envejecimiento [14]. La cantidad total de energía  $W_n$  que un supercondensador puede almacenar a tensión nominal  $V_n$  es igual a

$$W_n = \frac{1}{2} C V_n^2 \quad (1)$$

Para un intercambio de potencia dado, la relación corriente/tensión sigue la bien conocida ley  $P_n = V_{\min} I_{\max}$ , por lo que cuanto más pequeña sea la tensión del módulo, mayor tendrá que ser la corriente implicada. Debido a limitaciones en la corriente máxima manejable, hay una tensión mínima por debajo de la cual no es posible intercambiar la potencia nominal, de forma que parte de la capacidad de almacenamiento de energía no se puede explotar. Habitualmente la tensión mínima se ubica

alrededor de la mitad de la tensión nominal  $V_n$ , resultando en una energía “utilizable”  $W_u$  igual a:

$$W_u = \frac{1}{2} C \left( V_n^2 - \left( \frac{V_n}{2} \right)^2 \right) = 0.75 W_n \quad (2)$$

Es decir, se dispone del 75% de la capacidad de almacenamiento instalada. Considerando la baja tensión nominal de los supercondensadores, la mayoría de los diseñadores serializan todas las celdas tratando de alcanzar niveles de tensión y corriente compatibles con los standard industriales, ver Fig. 1.a.

Todas las celdas reciben la misma carga por lo que su nivel de tensión depende de su capacidad particular.

$$v_i = \frac{Q}{C_i} \quad (3)$$

Suponiendo el “peor” caso posible en las que la capacidad de una celda es un 20% inferior, la tensión total máxima es

$$v_{\max} = \frac{Q_{\max}}{C_i} = \frac{v_n 0.8 C_n}{C_n} = 0.8 v_n \quad (4)$$

por lo que la energía utilizable máxima resulta ser

$$W'_u = \frac{1}{2} C \left( V_{\max}^2 - \left( \frac{V_n}{2} \right)^2 \right) = 0.39 W_n \quad (5)$$

Lo que significa que debido a las características iniciales en la dispersión del parámetro capacidad, la configuración “todo en serie” de la Fig. 1.a ofrece, en el peor caso, la mitad de energía utilizable que la teóricamente posible. Peor aún, la celda “mala” con el nivel superior de tensión sufre un envejecimiento más rápido, desencadenándose el bucle degenerativo de envejecimiento acelerado descrito en la sección anterior. Otro problema conocido en la configuración “todo en serie” es que, al soportar todas las celdas la misma corriente, aquellas con mayor ESR alcanzan temperaturas superiores, por lo que su envejecimiento también es acelerado en otro bucle destructivo.

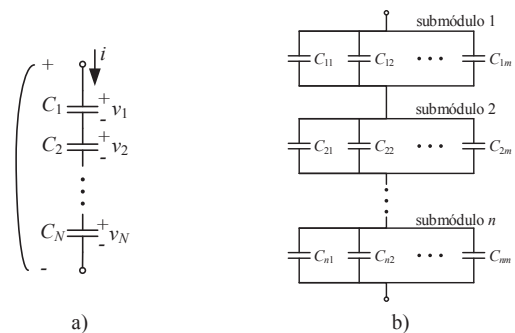


Fig. 1. Módulo de supercondensadores, a) con  $N$  celdas conectadas en serie, b) con  $N$  celdas distribuidas en paralelo y en serie [14].

En [14] se presenta un trabajo que demuestra que la distribución óptima es una combinación de  $n$  submódulos conectados en serie, siendo cada submódulo una agrupación de  $m$  celdas conectadas en paralelo, ver Fig. 1.b. Gracias a esta topología y considerando una tolerancia del valor de la capacidad por celda de  $\Delta C$ , la dispersión de la capacidad equivalente inter-módulos se reduce, estadísticamente, a

$$\Delta C_{eq} = \frac{\Delta C}{m} \quad (6)$$

Lo que significa que la diferencia entre las tensiones de los submódulos es también reducida en la misma proporción, por lo que el envejecimiento se homogeneiza. De la misma forma, las diferencias entre las ESR de las celdas paralelizadas implican diferentes corrientes en cada unidad, de forma que la capacidad con la mínima ESR recibe la máxima corriente y viceversa, lo que equilibra los calentamientos resultantes y, como consecuencia, evita el bucle destructivo de envejecimiento.

### III. AGRUPAMIENTO ÓPTIMO CON ALGORITMO DE PARTICIONADO

Existe todavía una oportunidad de mejorar los resultados, es decir, de minimizar la dispersión en los valores de las capacidades equivalentes de cada submódulo. Para alcanzar esta mejora es suficiente con responder a la siguiente pregunta: “considerando un módulo con  $n$  submódulos de  $m$  celdas en paralelo cada una, es decir, una población de  $N = n \times m$  supercondensadores, y considerando que se conoce la capacidad individual de cada celda,  $C_1 \dots$  ¿Cuál es la forma óptima de agruparlas de forma que la dispersión en la capacidad equivalente de cada submódulo es minimizada?”. El trabajo que se presenta en esta contribución responde a esta pregunta y demuestra que existe una posibilidad de mejora. La estrategia de agrupamiento óptima se basa en una fase inicial heurística seguida de una optimización recursiva basada en las estrategias de particionado [15].

#### A. Algoritmo heurístico de distribución

La Fig. 2 servirá como soporte en las explicaciones relativas al algoritmo heurístico. Se parte de una población de  $N$  celdas a agrupar

$$\bar{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\} \quad (7)$$

organizadas de mayor a menor, de forma que:

$$C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_N \quad (8)$$

Este conjunto de supercapacidades se encuentra a la izquierda de la Fig. 2. El módulo de supercondensadores resultante se ubica en el centro de la Fig. 2:  $n$  filas correspondientes a los  $n$  submódulos en serie y  $m$  columnas asociadas a los  $m$  condensadores en paralelo por cada submódulo. A la derecha de la Fig. 2 se encuentra el vector  $S$  que contiene la suma de las capacidades de cada línea (o grupo o submódulo).

La Fig. 3 muestra el diagrama de flujos del algoritmo inicial de distribución. Primero se ubican las  $n$  mayores capacidades en la primera columna. Para minimizar la dispersión, en el siguiente paso se ubica el siguiente condensador de mayor capacidad,  $C_{n+1}$ , en el grupo de suma mínima, es decir, el último grupo, ver Fig. 2. De esta forma la segunda columna se rellena con el rango de condensadores de  $C_{2n}$  a  $C_{n+1}$ . La siguiente capacidad más grande a ubicar es  $C_{2n+1}$ , y se sigue con la misma estrategia: cada capacidad a distribuir se ubica en el grupo de suma mínima, en este ejemplo el tercer grupo.

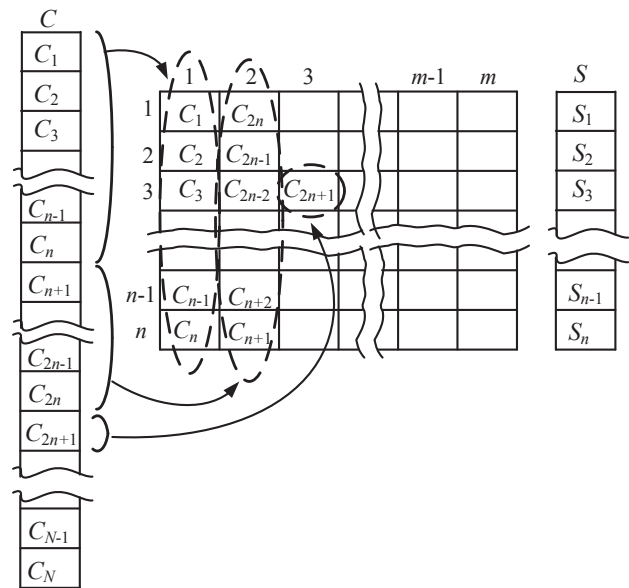


Fig. 2. Distribución heurística inicial de las capacidades

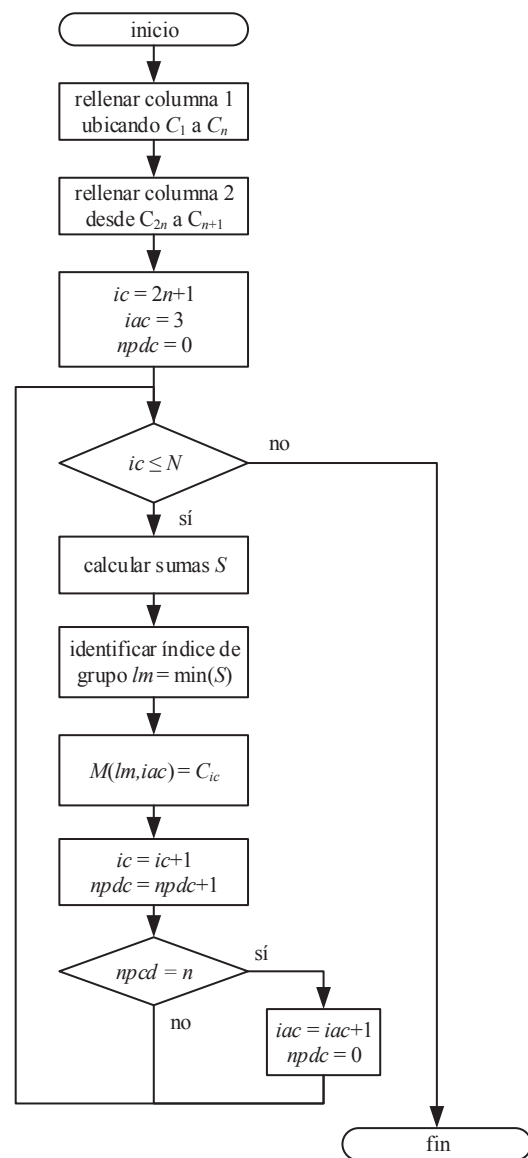


Fig. 3. Diagrama de flujos de la distribución heurística

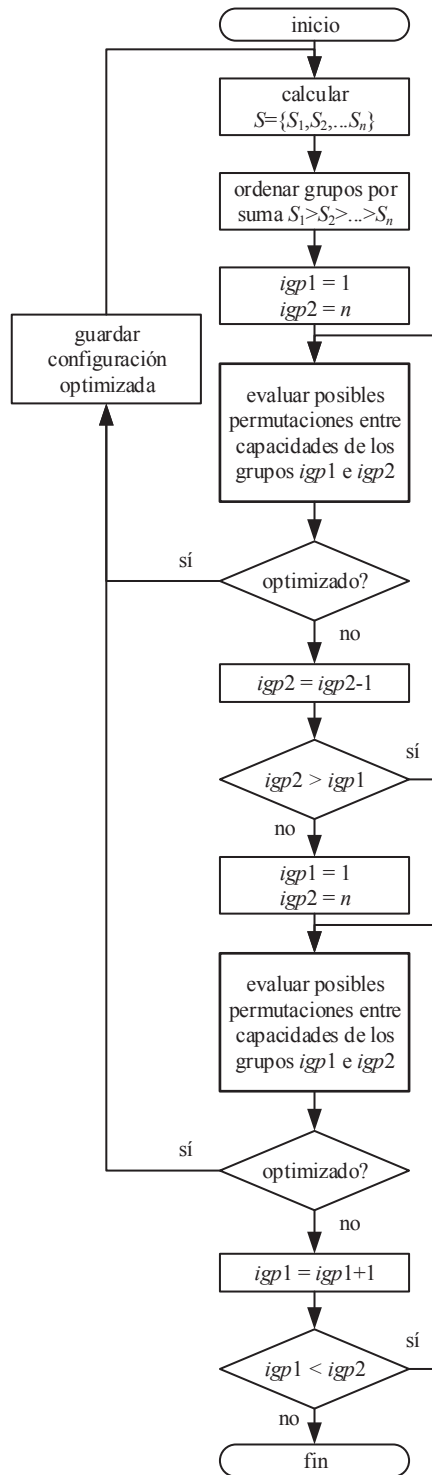


Fig. 4. Diagrama de flujos del algoritmo recursivo de distribución

### B. Optimización del agrupamiento basado en algoritmo de particionado de números

Una vez completado un primer agrupamiento preliminar, se procede a una mejora y refinamiento del mismo. El diagrama de flujo de la Fig. 4 muestra el algoritmo recursivo que permite minimizar la dispersión entre las sumas de capacidades de los condensadores de cada grupo (es decir, entre los equivalentes de cada grupo). Está basado en estrategias de particionado de números [15]. Primero se

organizan todos los grupos de mayor a menor suma. La dispersión máxima entre capacidades equivalentes se corresponde a la diferencia entre la primera y última suma. El algoritmo debe identificar una permutación de celdas que reduzca la primera suma  $S_1$  y/o que incremente la suma del último grupo,  $S_n$ . El primer bucle busca mejoras en la primera suma. El *índice del grupo a permutar 1* ( $igp1$ ) apunta permanentemente al primer grupo mientras que el *índice del grupo a permutar 2* ( $igp2$ ) recorre todos los grupos desde el último hasta el segundo.

En cada caso, cada una de las celdas del grupo 1 es permutada, una a una, con todas las celdas del grupo 2. En cada permutación se calcula las sumas resultantes  $S_1$  y  $S_2$ . Si la dispersión entre las dos nuevas sumas es menor, el algoritmo retiene la nueva configuración y activa el flag de optimización. En este momento se vuelven a calcular todas las sumas y se vuelve a iniciar el proceso interactivo.

Una vez que las interacciones con el primer grupo no ofrecen ninguna oportunidad de optimización, se revisan las permutaciones con el último grupo (suma más pequeña). Si se identifica una optimización, se retiene y, como se ha modificado la distribución, el algoritmo vuelve al principio y retoma el proceso reevaluando las permutaciones con el primer grupo. La distribución final es la que resulta cuando ha sido testeada con todas las permutaciones posibles y no se han identificado mejoras adicionales.

## IV. EJEMPLOS DE DISTRIBUCIÓN

Se va a diseñar un módulo formado por 18 submódulos en serie, siendo estos construidos por 3 capacidades en paralelo. Es decir, se dispone de una población de  $3 \times 18 = 54$  supercondensadores a distribuir en 18 grupos. El valor nominal de cada celda es de  $C_n = 350F$  con una tolerancia en producción del +20% (la capacidad siempre es mayor que la nominal). La Fig. 5 muestra la distribución normal de las capacidades a agrupar, simulada mediante la función *normrnd* del entorno de programación MATLAB.

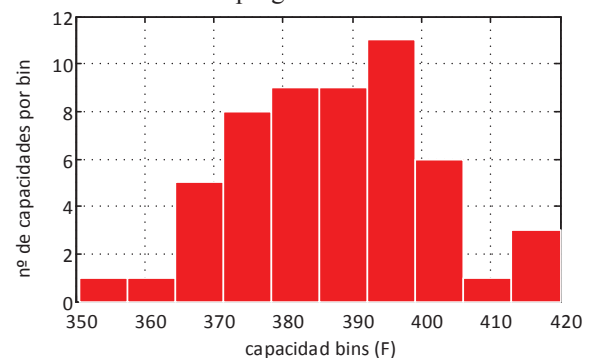


Fig. 5. Distribución normal de las capacidades a agrupar

La Fig. 6 muestra las capacidades equivalentes de cada grupo para estrategias de agrupamiento diferentes. Como se puede observar, la dispersión baja cuando se utilizan estrategias de distribución elaboradas. La Fig. 7 muestra los mismos resultados que la Fig. 6 normalizados al valor medio de los equivalentes. El agrupamiento aleatorio alcanza una dispersión del 6.8%, cercana a la predicción estadística del 6.66%, ver ecuación (6). La distribución heurística baja la dispersión al 1.36%, mientras que con el algoritmo recursivo



la dispersión cae a un despreciable 0.137%, lo que implica la serialización de submódulos prácticamente idénticos. El tiempo de ejecución del algoritmo para este ejemplo es de 80msec (Intel Core 2 Duo CPU E7500 @2.93GHz).

Como los resultados podrían depender del conjunto inicial de capacidades a distribuir, se han estudiado 100 casos con diferentes poblaciones iniciales. La Fig. 8 muestra el porcentaje de dispersión máxima para cada caso. Como se puede observar, la distribución aleatoria proporciona niveles de dispersión entre el 4% y el 10%, alrededor del valor medio estadístico del 6.6%, según previsto. La Fig. 9 ofrece una vista detallada de los resultados de los algoritmos de distribución. Con estrategias heurísticas se producen dispersiones de hasta el 2.2%, mientras que con el algoritmo recursivo propuesto en este trabajo la dispersión se sitúa siempre por debajo del 0.3%. Podemos concluir que gracias al algoritmo basado en particionado se obtienen submódulos cuasi idénticos de forma que se minimiza el problema de equilibrado de tensiones.

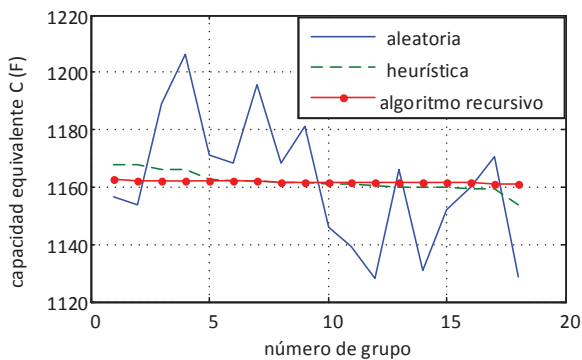


Fig. 6. Capacidades equivalentes para cada grupo en función de la estrategia de distribución

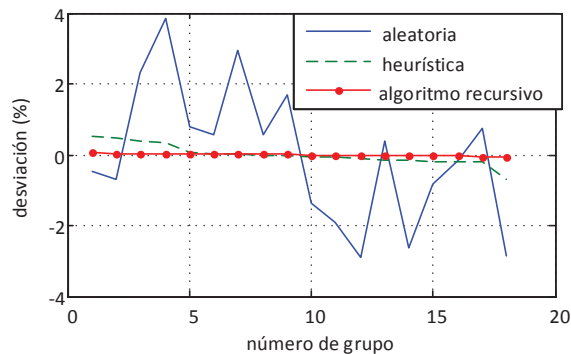


Fig. 7. Desviación porcentual de cada capacidad equivalente respecto al valor medio

## V. IMPACTO EN LA VIDA ÚTIL DEL MÓDULO

Esta sección muestra el envejecimiento esperado para tres módulos formados con el mismo conjunto de supercondensadores pero de topologías diferentes y con estrategias de distribución diferentes. Se han considerado un total de 54 supercondensadores con la distribución de parámetros de la Fig. 5. El envejecimiento se ha calculado utilizando el tiempo de envejecimiento equivalente propuesto en [16]. La temperatura ambiente se ha mantenido constante a 35°C por lo que las diferencias en temperatura

serán debidas a diferentes ESR y/o corrientes. El módulo es sometido a ciclos de  $\pm 2.5\text{kW}$ .

Primero se analiza el envejecimiento de la topología “todo en serie”  $54 \times 1$ . La Fig. 10 muestra el porcentaje de desviación de cada capacidad respecto al valor inicial. Después de 800 días de ciclado una de las capacidades ha perdido el 20% de su valor, lo que es considerado el final de vida del elemento. Esta capacidad ha sufrido el bucle destructivo mencionado en la sección 1 y, al estar en serie, condiciona la vida útil del módulo.

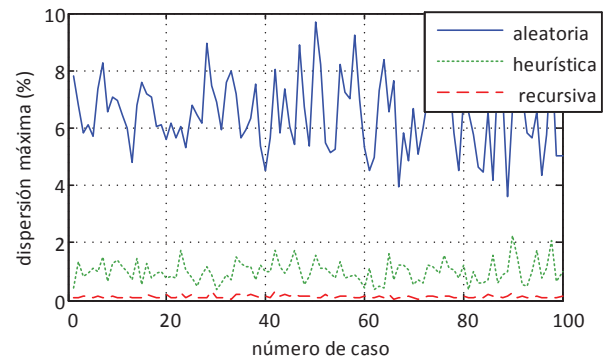


Fig. 8. Porcentaje de dispersión máxima para los casos estudiados.

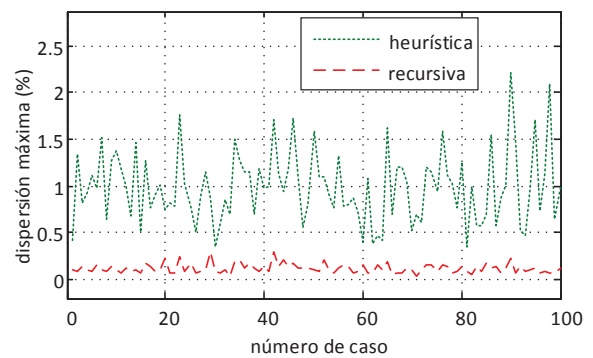


Fig. 9. Detalle de la Fig. 8

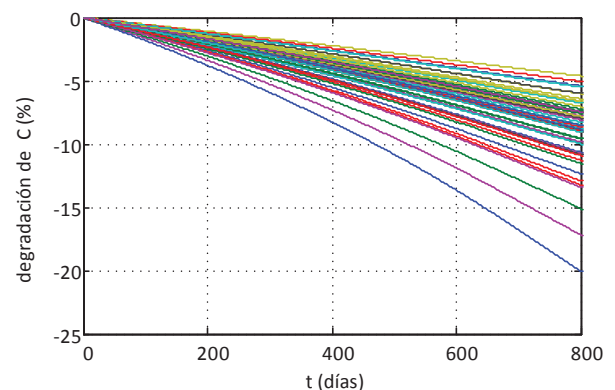


Fig. 10. Evolución de las capacidades en la topología “todo en serie”  $54 \times 1$

A continuación se estudia un módulo con 18 submódulos en serie, estando cada submódulo formado por 3 supercondensadores en paralelo, (topología  $18 \times 3$ ), ver Fig. 11. Como ya se ha constatado en la literatura [14], la minimización estadística de la dispersión entre capacidades equivalentes junto con el equilibrado de corrientes por las ramas en paralelo da lugar a un envejecimiento más

homogéneo. La peor capacidad ha sufrido una degradación del 10.2%, la mitad que en el caso todo-en-serie.

Finalmente se estudia el envejecimiento del módulo 18×3 con las celdas agrupadas utilizando el algoritmo de distribución basado en técnicas de particionado, ver Fig. 12. Gracias a la minimización en la dispersión en la capacidad, todas las celdas soportan la misma tensión por lo que su proceso de envejecimiento es equivalente y homogéneo. En este caso el envejecimiento es de sólo el 8.5%. Como se observa, la estrategia propuesta evita la aceleración del envejecimiento derivado del desequilibrio en tensión y además permite alcanzar las tensiones nominales de operación durante procesos de carga rápida, de forma que el módulo ofrece toda la energía utilizable teórica  $W_u$ .

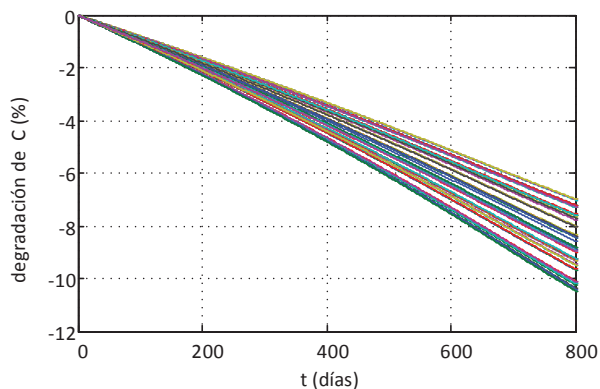


Fig. 11. Evolución de las capacidades para agrupamiento aleatorio en la topología serie-paralelo 18×3

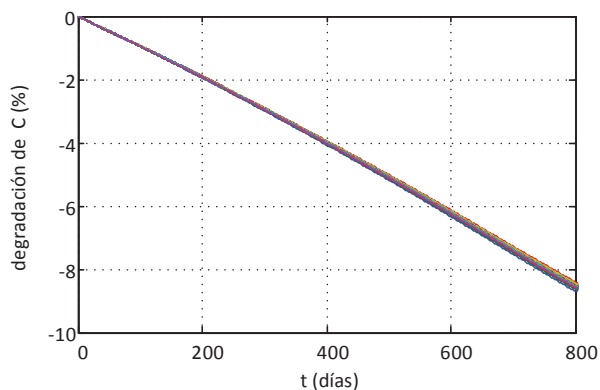


Fig. 12. Evolución de las capacidades con distribución basada en particionado y topología 18×3

## VI. CONCLUSIONES

Cuando se requiere utilizar un módulo de supercondensadores en aplicaciones con ciclados de alta potencia, los sistemas de equilibrado activos deben gestionar la potencia nominal por lo que resultan caros. Este trabajo propone un método alternativo basado en un agrupamiento inteligente de las capacidades en una estructura paralelo-serie. Gracias a algoritmos de particionado es posible construir un módulo de supercondensadores con varios submódulos en serie con una capacidad equivalente cuasi idéntica, lo que proporciona un equilibrado intrínseco de tensión. Como consecuencia es posible almacenar más energía en el mismo conjunto de supercondensadores y, adicionalmente, su vida útil se ve ampliada.

## REFERENCIAS

- [1] E. Oyarbide, I. Elizondo, A. Martinez-Iturbe, C. Bernal, J. Irisarri, Ultracapacitor-based plug & play energy-recovery system for elevator retrofit, 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 2011 Gdansk, Poland, pp: 462-467.
- [2] P. J. Grbovic, P. Delarue, P. Le Moigne, P. Bartholomeus, The ultracapacitor-based regenerative controlled electric drives with power-smoothing capability, IEEE Trans. Industrial Electronics 59 (2012) 4511-4522
- [3] d. Shin, Y. Kim, Y. Wang, N. Chang, M. Pedram, Constant-current regulator-based battery-supercapacitor hybrid architecture for high-rate pulsed load applications, J. Power Sources 205 (2012) 516-524
- [4] A. Santucci, A. Sornioti, C. Lekakou, Power Split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications, J. Power Sources 258 (2014) 395-407
- [5] I. J. Cohen, J. P. Kelley, D. A. Wetz, J. Heinzel, Evaluation of a hybrid energy storage module for pulsed power applications, IEEE Trans. on Plasma Science 42 (2014) 2948-2955
- [6] M. Ristic, Y. Gryska, J. V. McGinley, V. Yufit, Supercapacitor energy storage for magnetic resonance imaging systems, IEEE Trans. Industrial Electronics 61 (2014) 4255-4264
- [7] G.L. Park, A. I. Schäfer, B. S. Richards, Renewable energy-powered membrane technology: Supercapacitors for buffering resource fluctuations in a wind-powered membrane system for brackish water desalination, Renewable Energy 50 (2013) 126-135
- [8] B. Hredzak, V. Agelidis, G. Demetriades, Application of explicit model predictive control to a hybrid battery ultracapacitor power source, J. Power Sources 277 (2015) 84-94
- [9] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways, J. Power Sources 264 (2014) 128-139
- [10] N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. Le Moigne, Study of the ageing process of a supercapacitor module using direct method of characterization, IEEE Trans. Energy Conversion 27 (2012) 220-228
- [11] I.D. Oltean, A.M. Matoi, E. Helerea, A Supercapacitor Stack-Design and Characteristics, 2010, 12<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010, 214-219
- [12] O. Bohlen, J. Kowal, and D. U. Sauer, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors. Part II. Lifetime simulation model for dynamic applications" J. Power Sources 173 (2007) 626-632.
- [13] Z. Yin, M. Han, Y. Du, Z. Zhang, A practical approach for ride through of super capacitor energy storage based ASD system, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, May 2006, pp: 744-746
- [14] Zhang Enhui, Qi Zhiping and Wei Tongzhen, Research on combination of series and parallel with Supercapacitor Module, 2010 2<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, pp: 685-690
- [15] R. E. Korf, Multi-Way Number Partitioning, Proceedings of the Twenty-First International Jointing Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-09, Pasadena, California, 1999, USA, pp. 538-543
- [16] O. Bohlen, J. Kowal, and D. U. Sauer, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors. Part I. Experimental study and ageing model," J. Power Sources 172 (2007) 468-475.