



Estudio de Métodos de Medida para Supercondensadores

Autor: Iván Echeverría Ciaurri
Ingeniero Industrial

Director: Francisco Javier Arcega Solsona
Dr. en Ciencias Físicas

Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Programa Oficial de Posgrado en Ingeniería Eléctrica y Energética

Curso 2011-2012
Noviembre 2011

Estudio de métodos de medida para supercondensadores

Resumen

El presente trabajo consiste en un análisis mediante modelos de simulación de los distintos métodos de medida que se emplean para caracterizar supercondensadores. Con ello, partiendo de una revisión de las técnicas más empleadas y a través de un modelado de supercondensadores adecuado mediante software de simulación, se plantea estudiar la forma en que la energía estimada y los parámetros que definen el supercondensador se ven afectados por el método empleado.

La variación de resultados con los métodos de medida actuales suponen un problema a la hora de caracterizar supercondensadores. El presente trabajo está enfocado a investigar una metodología que permita establecer la forma más adecuada de llevar a cabo la medida real de un supercondensador, de manera que se obtenga una forma rápida, eficaz y rentable de caracterizar supercondensadores.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1. Contexto y motivación.....	9
1.2. Objetivos y alcance del trabajo.....	9
1.3. Estructura de la memoria.....	9
Capítulo 2. Métodos existentes para la medida de supercondensadores.....	10
2.1. Método de carga / descarga a corriente constante.....	10
2.2. Ensayo resistivo.....	11
2.3. Ensayo de ciclos de tensión.....	12
2.4. Cronoamperometría.....	12
2.5. Ciclos de potencia constante.....	12
2.6. Espectroscopía de impedancia.....	13
2.7. Ensayo de resistencia negativa.....	13
Capítulo 3. Modelo de simulación no lineal.....	15
3.1. Base teórica.....	15
3.2. Modelo en PSpice.....	16
3.3. Validación del modelo.....	16
Capítulo 4. Evaluación del método de medida.....	21
4.1. Método de carga / descarga a corriente constante.....	21
4.1.1. Variabilidad.....	21
4.1.2. Tiempo de ensayo.....	24
4.1.3. Incertidumbre de medida.....	25
4.1.4. Sencillez / coste.....	25
4.1.5. Caracterización.....	25
4.2. Método resistivo.....	26
4.2.1. Variabilidad.....	26
4.2.2. Tiempo de ensayo.....	27
4.2.3. Incertidumbre de medida.....	27
4.2.4. Sencillez / coste.....	28
4.2.5. Caracterización.....	28
4.3. Ensayo de ciclos de tensión.....	28
4.3.1. Variabilidad.....	28
4.3.2. Tiempo de ensayo.....	29
4.3.3. Incertidumbre de la medida.....	30
4.3.4. Sencillez / coste.....	31
4.3.5. Caracterización.....	31
4.4. Cronoamperometría.....	31
4.4.1. Variabilidad.....	31
4.4.2. Tiempo de ensayo.....	33
4.4.3. Incertidumbre de la medida.....	33
4.4.4. Sencillez / coste.....	33
4.4.5. Caracterización.....	33
4.5. Ensayo de ciclos de potencia.....	34
4.5.1. Variabilidad.....	34
4.5.2. Tiempo de ensayo.....	36
4.5.3. Incertidumbre de la medida.....	36
4.5.4. Sencillez / coste.....	37
4.5.5. Caracterización.....	37
4.6. Espectroscopía de impedancia.....	37
4.6.1. Variabilidad.....	37
4.6.2. Tiempo de ensayo.....	38
4.6.3. Incertidumbre de la medida.....	40
4.6.4. Sencillez / coste.....	40
4.6.5. Caracterización.....	40
4.7. Método de resistencia negativa.....	40

4.7.1. Variabilidad.....	40
4.7.2. Tiempo de ensayo.....	42
4.7.3. Incertidumbre de la medida.....	42
4.7.4. Sencillez / coste.....	43
4.7.5. Caracterización.....	43
 Capítulo 5. Comparativa de métodos de medida.....	44
5.1. Resultados de capacidad estimada.....	44
5.2. Comparación de resultados y conclusiones.....	45
5.2.1. Tabla de comparación.....	45
5.2.2. Recomendaciones extraídas.....	48
 Capítulo 6. Estudio energético.....	49
6.1. Base teórica.....	49
6.2. Ejemplo de aplicación.....	52
6.3. Conclusiones del estudio.....	54
 Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras.....	56
 Anexo A: ensayo de ajuste del modelo no lineal.....	57
Anexo B: resultados de simulación con el método de cronoamperometría.....	61
Anexo C: resultados de simulación con el método de resistencia negativa.....	67
 Bibliografía.....	73

Agradecimientos

*Quisiera dar las gracias a Dr. Francisco Arcega
por su inestimable dirección y su contribución
a la mejora continua de este trabajo.*

*A Dr. Fernando Arteche por su gran apoyo,
junto con el resto de mis compañeros del
Instituto Tecnológico de Aragón.*

*Y a Chofie, por su cariño y por estar
a mi lado en todo momento.*

Capítulo 1. Introducción

El presente capítulo muestra la motivación, alcance y objetivos del presente trabajo.

1.1. Contexto y motivación

El desarrollo de las energías renovables está unido al concepto de almacenamiento energético. Este hace referencia a la posibilidad de mantener parte de la energía no utilizada para su uso posterior, logrando así mejorar la eficiencia en la implementación de un sistema de generación. Los sistemas clásicos de almacenamiento han comprendido tanto volantes de inercia (mecánicos) como baterías (electroquímicos). Sin embargo en los últimos años ha crecido la importancia de los supercondensadores como elementos auxiliares tanto en la generación como en la distribución de energía [1][2], en el sector de la automoción [3][4], de la industria ferroviaria [5][6][7] o en gran parte de dispositivos electrónicos que se emplean hoy en día [8].

La implementación y uso correcto de un supercondensador (o un banco de supercondensadores) así como su mantenimiento pasa por un conocimiento y modelado correcto de su comportamiento. Por ello, es de gran importancia medir y caracterizar de manera precisa, correcta y rentable estos elementos.

Para ello existen diversos métodos de medida o caracterización de supercondensadores, por lo que es necesario conocer las ventajas y desventajas de cada método de cara a la elección del tipo de medida.

1.2. Objetivos y alcance del trabajo

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la variación de la estimación de los parámetros de un supercondensador con el método de medida así como la forma en que los distintos métodos de medida permiten aproximar las características de estos elementos, y determinar la forma en que la medida de supercondensadores puede efectuarse de manera más exacta, práctica y rentable. Con ello se pretende proporcionar una guía que permita elegir el método más apropiado para cada situación o aplicación. Los resultados obtenidos en este trabajo tienen como fin completar el estudio de estas metodologías para permitir realizar medidas en supercondensadores más eficaces y completas, y elegir un método de caracterización común para todos los casos.

1.3. Estructura de la memoria

El presente documento muestra el trabajo realizado comenzando en el capítulo 0 con una exposición del estado del arte y de la base teórica de los distintos métodos de medida empleados para caracterizar supercondensadores. En el capítulo 0 se presenta el modelo de simulación que se utilizará en el estudio de los distintos métodos de medida, que se empleará en el capítulo 0 para realizar un estudio de sensibilidad de cada método que permita, en el capítulo 0, comparar los distintos métodos de medida y evaluarlos en conjunto. Finalmente se propone en el capítulo 0 un método adicional que permite mejorar las prestaciones de algunos de los métodos estudiados. En el capítulo 0 se presentan las conclusiones extraídas del presente trabajo, así como las líneas futuras que pueden derivarse del mismo.

Capítulo 2. Métodos existentes para la medida de supercondensadores

El presente capítulo expone los principales métodos de medida empleados para la caracterización de supercondensadores, ofreciendo una revisión del estado del arte en este campo. Los distintos métodos tienen como objetivo común la estimación de la capacidad del condensador, si bien algunos de ellos ofrecen características adicionales como la resistencia serie equivalente, la resistencia de fuga o el comportamiento en frecuencia del supercondensador.

La capacidad de un supercondensador es un parámetro ligado a la energía que puede almacenar el supercondensador. Esta capacidad puede ser estática o dinámica dependiendo del régimen en el que trabaje el supercondensador. Por otro lado, la estimación de la resistencia serie equivalente tiene su importancia en el hecho de que dicha resistencia implica una caída de tensión en bornes en el momento en que el supercondensador se desconecta del circuito de carga. Por último la resistencia de fuga será un parámetro de gran interés en casos donde el supercondensador permanezca conectado a un circuito cerrado durante tiempos prolongados, ya existe una corriente a través de esta resistencia que tiende a descargar de forma generalmente lenta la tensión en bornes del supercondensador.

A continuación se muestra la base teórica de cada uno de los métodos que serán analizados en el presente trabajo.

2.1. Método de carga / descarga a corriente constante.

El ensayo de carga / descarga a corriente constante es un tipo de medida propuesto por la norma IEC 62391:2006, el cuál permite estimar tanto la capacidad como la resistencia serie equivalente y la resistencia de fuga. El ensayo [9] consiste en cargar el supercondensador hasta su tensión nominal, y descargarlo manteniendo la corriente de descarga constante mediante una carga variable controlada, tal como indica la Figura 1, la cuál muestra una evolución esquemática de la tensión en bornes de un supercondensador.

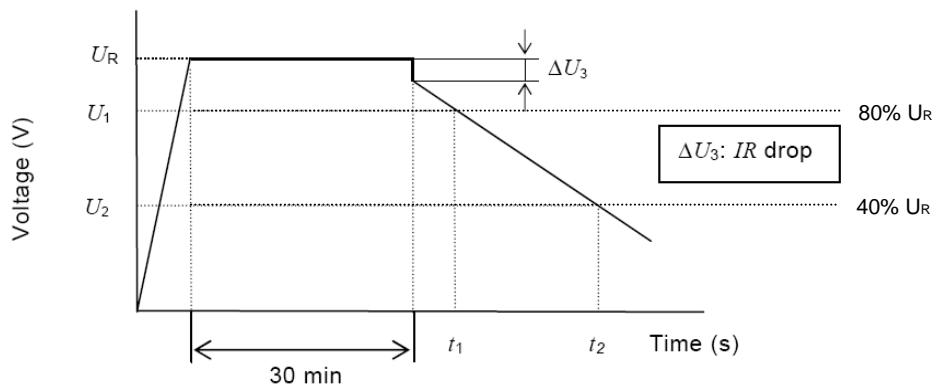


Figura 1. Ensayo de carga/descarga.

La pendiente de descarga se emplea en el cálculo de la capacidad C según la Ecuación 1.

$$C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} = I \cdot \frac{t_2 - t_1}{V_1 - V_2}$$

Ecuación 1

donde I es el valor de corriente empleado, V_1 es el valor de tensión al 80% del nominal, V_2 es el valor de tensión al 40% del nominal, y t_1 y t_2 son los instantes en los que se alcanza V_1 y V_2 respectivamente.

Los valores de intensidad y tensión aplicables al ensayo están tabulados por la norma en función de la clase de supercondensador, que depende de la aplicación (Tabla 1).

Classification	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Application	Memory backup	Energy storage	Power	Instantaneous power
Charge time	30 min	30 min	30 min	30 min
I (mA)	$1 \times C$	$0,4 \times C U_R$	$4 \times C U_R$	$40 \times C U_R$
U_1	The value to be 80 % of the charging voltage ($0,8 \times U_R$)			
U_2	The value to be 40 % of the charging voltage ($0,4 \times U_R$)			
NOTE	C is the rated capacitance in F (Farad), and U_R is the rated voltage in V (Volt).			

Tabla 1. Valores para los parámetros del ensayo de carga constante según la norma IEC 62391:2006.

De igual modo en este ensayo se puede obtener la capacidad instantánea aplicando la Ecuación 1 entre dos instantes temporales suficientemente próximos.

2.2. Ensayo resistivo

La norma IEC 62391:2006 [9] permite de forma alternativa estimar la capacidad del supercondensador conectándolo a una fuente DC a través de una resistencia R determinada como indica la Figura 2.

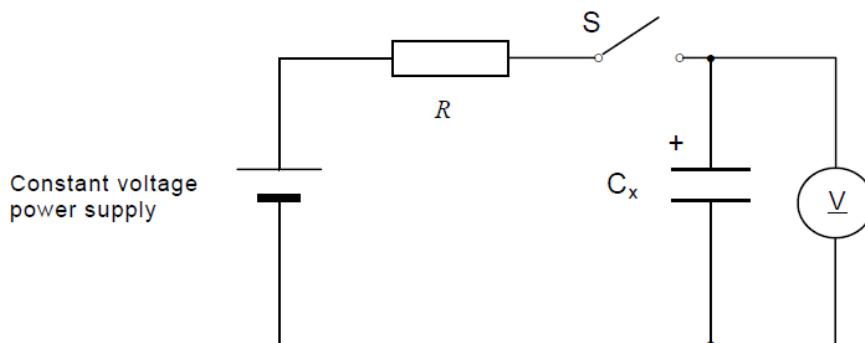


Figura 2. Ensayo resistivo

De esta manera, midiendo el tiempo τ que tarda la tensión en alcanzar el 63.2% del valor nominal partiendo desde 0 V puede estimarse la capacidad C mediante la Ecuación 2.

$$C = \frac{\tau}{R}$$

Ecuación 2

Según la norma IEC 62391:2006, el valor de R debe ajustarse para que τ se encuentre entre 60 y 102 s.

2.3. Ensayo de ciclos de tensión

El ensayo de ciclos de tensión [10][12] consiste en aplicar una señal de tensión de variación constante en bornes del supercondensador y medir la intensidad de carga y descarga. A partir de los datos de corriente y tensión medidos, se obtiene la capacidad diferencial e integral del condensador. La capacidad diferencial se calcula como el cociente entre la carga, esto es, la corriente integrada en un intervalo de tiempo suficientemente pequeño, y la variación de tensión en dicho intervalo (Ecuación 3). Por otro lado, el método define la capacidad integral como el valor de la capacidad diferencial cuando la tensión alcanza la mitad de su valor máximo de ciclo (Ecuación 4).

$$C_{diff} = \frac{\int Idt}{\Delta U} = \frac{Q}{\Delta U}$$

Ecuación 3

$$C_{int} = C_{diff} \left(\frac{U_{max}}{2} \right)$$

Ecuación 4

2.4. Cronoamperometría

Este ensayo [11] permite estimar de forma rápida la capacidad C de un supercondensador a partir de la evolución de la corriente de carga medida tras aplicar un escalón de tensión V_0 en bornes del supercondensador. La corriente se mide a través de una resistencia o shunt R, por lo que teniendo este elemento determinado, el ensayo puede proporcionar también el valor de la resistencia serie equivalente.

$$C = - \frac{V_0}{R^2 \cdot \left. \frac{dI}{dt} \right|_{t=0}}$$

Ecuación 5

Como puede observarse en la Ecuación 5, el valor de la capacidad depende directamente de la pendiente inicial de descarga de la corriente.

2.5. Ciclos de potencia constante

El ensayo de ciclos a potencia constante [12] consiste en aplicar al supercondensador una corriente variable controlada de manera que la potencia sea constante en todo momento. Cuando se alcanza un determinado nivel, se invierte la polaridad de la corriente, procediendo a descargar el supercondensador. Una vez la tensión cae por debajo de un nivel donde no puede mantenerse la potencia constante, vuelve a invertirse la polaridad y el ciclo se repite.

Tomando un ciclo de carga-descarga e integrando la corriente medida, puede representarse el cociente $\frac{Q(t)}{I(t)}$ frente a $\frac{V(t) - V_o}{I(t)}$, donde Q es la carga integrada, I el valor de corriente y V el valor de tensión todos ellos en un instante t . El valor V_o corresponde a la tensión inicial del ciclo.

La representación de la Ecuación 6 es aproximadamente lineal y su ajuste a una recta permite obtener la capacidad como la pendiente de dicha recta, a la vez que la resistencia serie equivalente R .

$$\frac{Q(t)}{I(t)} = C \cdot \frac{V(t) - V_o}{I(t)} + RC$$

Ecuación 6

2.6. Espectroscopía de impedancia

El ensayo de espectroscopía de impedancia [13][14] permite conocer la respuesta del supercondensador en el dominio de la frecuencia. Consiste en aplicar en bornes del supercondensador una señal de corriente senoidal a distintas frecuencias, y obtener para cada una el valor de impedancia Z del supercondensador. La componente imaginaria de Z permite obtener el valor de capacidad para la frecuencia f correspondiente mediante la Ecuación 7.

$$\text{Im}(Z) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \rightarrow C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{Im}(Z)}$$

Ecuación 7

2.7. Ensayo de resistencia negativa

Este método [15] consiste en medir la capacidad del supercondensador aplicando una onda cuadrada en tensión junto con una fuente DC ajustable en serie con una resistencia R_s (Figura 3). El circuito, basado en amplificador operacional, requiere el ajuste de un potenciómetro hasta que la tensión en bornes del supercondensador es igual a la tensión DC seleccionada. De esta manera se compensa la resistencia interna del supercondensador sumando al circuito en serie su valor negativo.

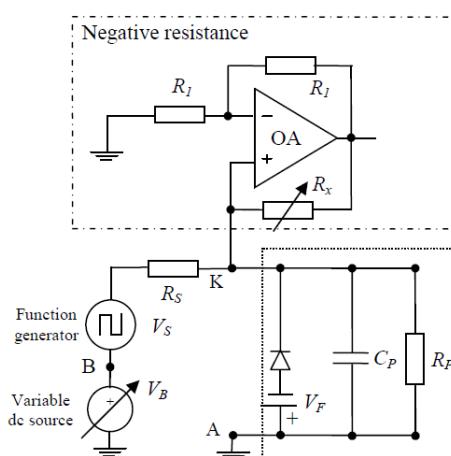


Figura 3. Ensayo de resistencia negativa.

Bajo estas condiciones, la capacidad puede estimarse como:

$$C = \frac{T_s \cdot V_s}{4 \cdot V_p \cdot R_s}$$

Ecuación 8

donde V_s y T_s son la amplitud y período respectivamente de la onda cuadrada de tensión introducida, y V_p es la amplitud del rizado de tensión obtenido en bornes del supercondensador.

(fin de página)

Capítulo 3. Modelo de simulación no lineal

Este capítulo muestra el modelo empleado en el presente estudio, desde su base teórica hasta su desarrollo y validación mediante el software PSpice 9.1.

3.1. Base teórica

El modelo de simulación expuesto está desarrollado a partir del modelo no lineal mostrado en [16] y que recoge la dependencia de la capacidad con la tensión en el supercondensador según la Ecuación 9.

$$I = C(V) \frac{dV}{dt}$$

Ecuación 9

El modelo se basa en 4 ramas de distinta constante temporal, formadas a partir de elementos capacitivos y resistivos (Figura 4).

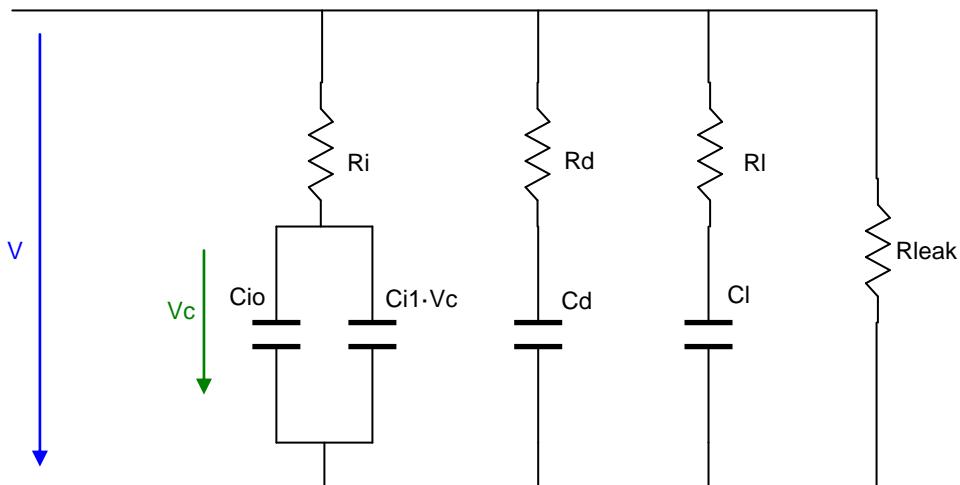


Figura 4. Esquema eléctrico de supercondensador.

La primera rama por la izquierda modela la no linealidad de la capacidad dependiente del nivel de tensión y se compone de dos condensadores en paralelo, uno de los cuales se caracteriza por ofrecer una capacidad proporcional a la tensión del mismo. Esta rama es la primera que se empieza a cargar ya que la no linealidad de la carga es un fenómeno de dinámica rápida. La resistencia Ri se identificará generalmente con la resistencia serie equivalente del supercondensador (ESR).

La segunda y tercera ramas modelan cargas de distintas dinámicas o constantes temporales (se cargan más tarde), en este caso los condensadores lineales son suficientes para reproducir estos comportamientos a más largo plazo. La última rama está formada por una resistencia y modela la corriente de fuga que se produce cuando se mantiene el supercondensador conectado a un circuito a un determinado nivel de tensión.

3.2. Modelo en PSpice

En la Figura 5 se muestra el modelo de simulación desarrollado en PSpice. La rama no lineal se construye mediante una fuente de intensidad cuyo valor de corriente se define como el producto de la tensión en bornes de la fuente y la derivada temporal de dicha tensión (Ecuación 10).

$$I = C \cdot V \frac{dV}{dt}$$

Ecuación 10

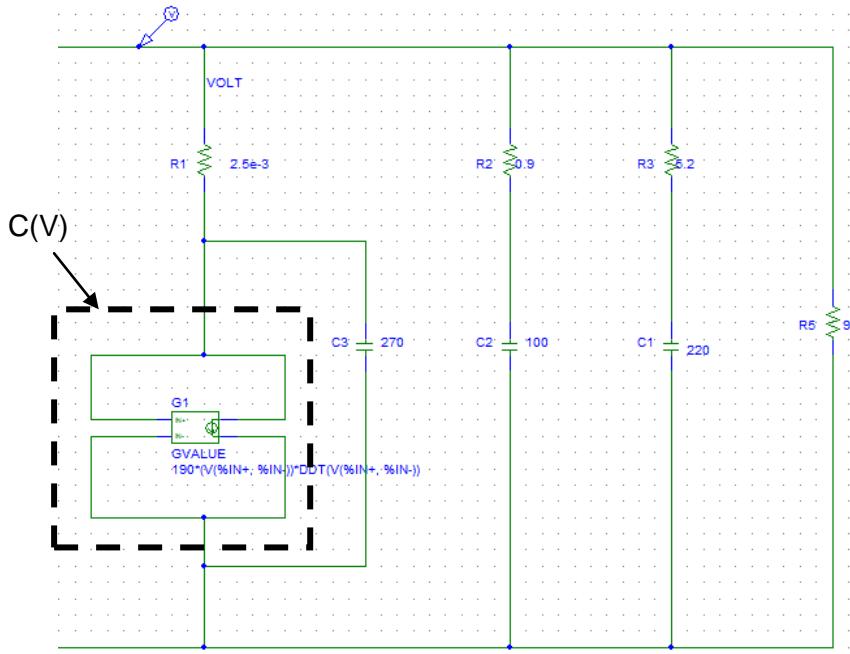


Figura 5. Modelo de simulación de supercondensador.

El ajuste del modelo consiste en definir los 8 parámetros de la Figura 4 correspondientes a las resistencias y condensadores de cada rama. La identificación de estos parámetros puede realizarse a partir de medidas experimentales mediante un ensayo [16] de carga a corriente constante, como se muestra en el anexo A.

3.3. Validación del modelo

A continuación se muestra la validación efectuada sobre el modelo empleando datos experimentales procedentes de medidas sobre supercondensadores reales. Se han empleado tres supercondensadores reales cuyas medidas de tensión en bornes se comparan con la tensión obtenida tras simular el mismo ensayo con el modelo ajustado:

- Supercondensador de 470 F [16]
- Supercondensador de 350 F [17]
- Supercondensador de 2600 F [18]

La Figura 6 muestra los datos medidos [16] (parte superior) y simulados (parte inferior) durante un ensayo de carga y descarga a 30 A.

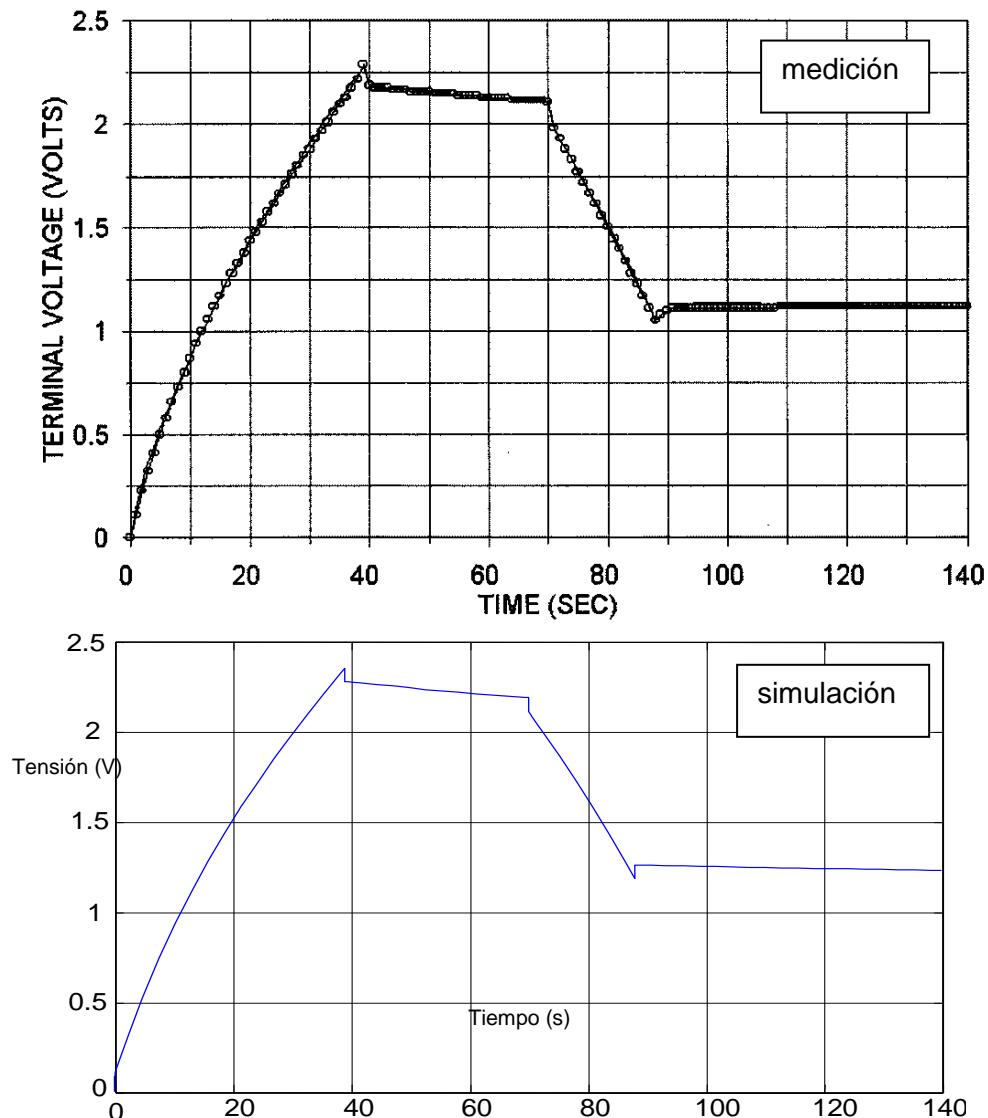


Figura 6. Tensión medida y simulada para el supercondensador 470F

La Figura 7 muestra otro ensayo sobre el supercondensador de 350F de carga a 10 A y descarga a 20 A [17] junto con el mismo ensayo simulado con el modelo ajustado.

(fin de página)

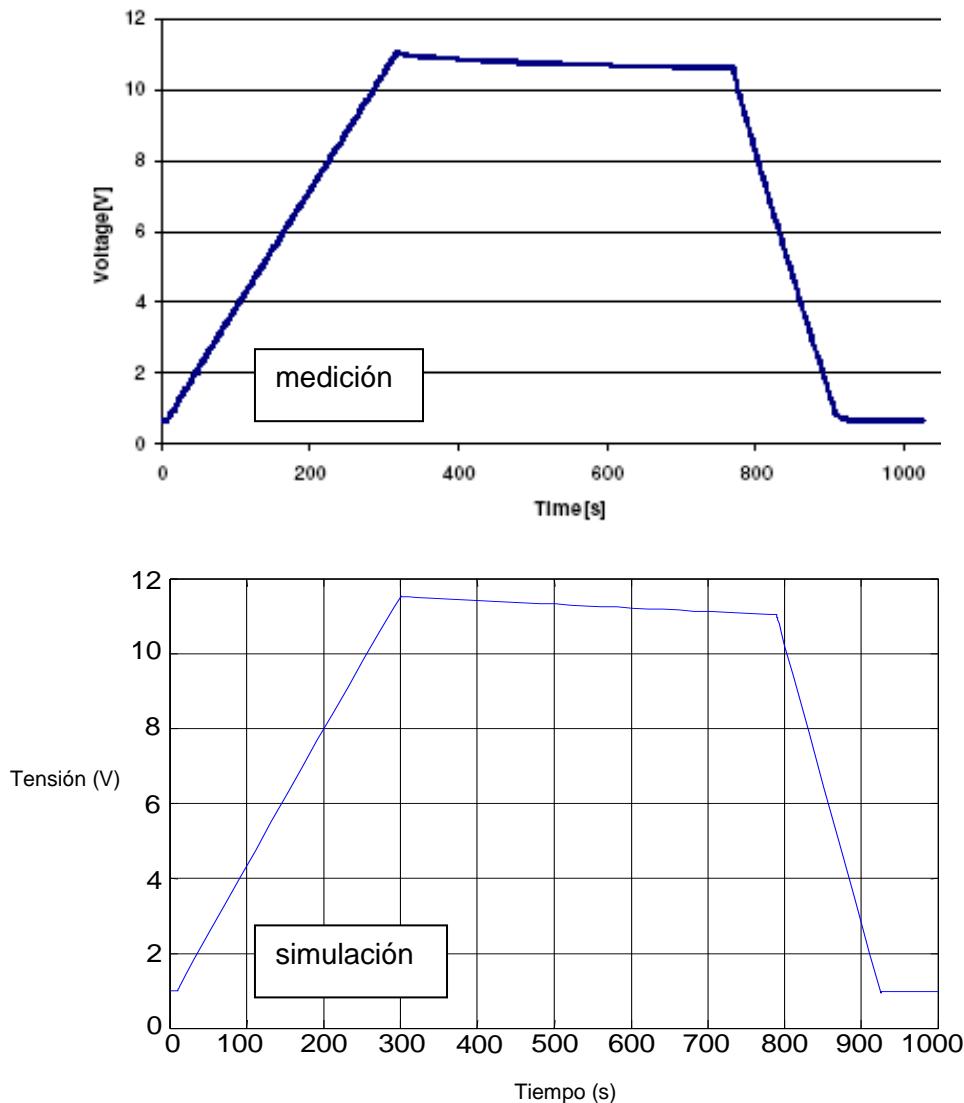


Figura 7. Tensión medida y simulada para el supercondensador 350F

La Figura 8 muestra los resultados experimentales [18] y simulados tras aplicar un pulso de corriente de descarga entre 1.2 y 6.2 segundos en bornes del supercondensador de 2600F.

(fin de página)

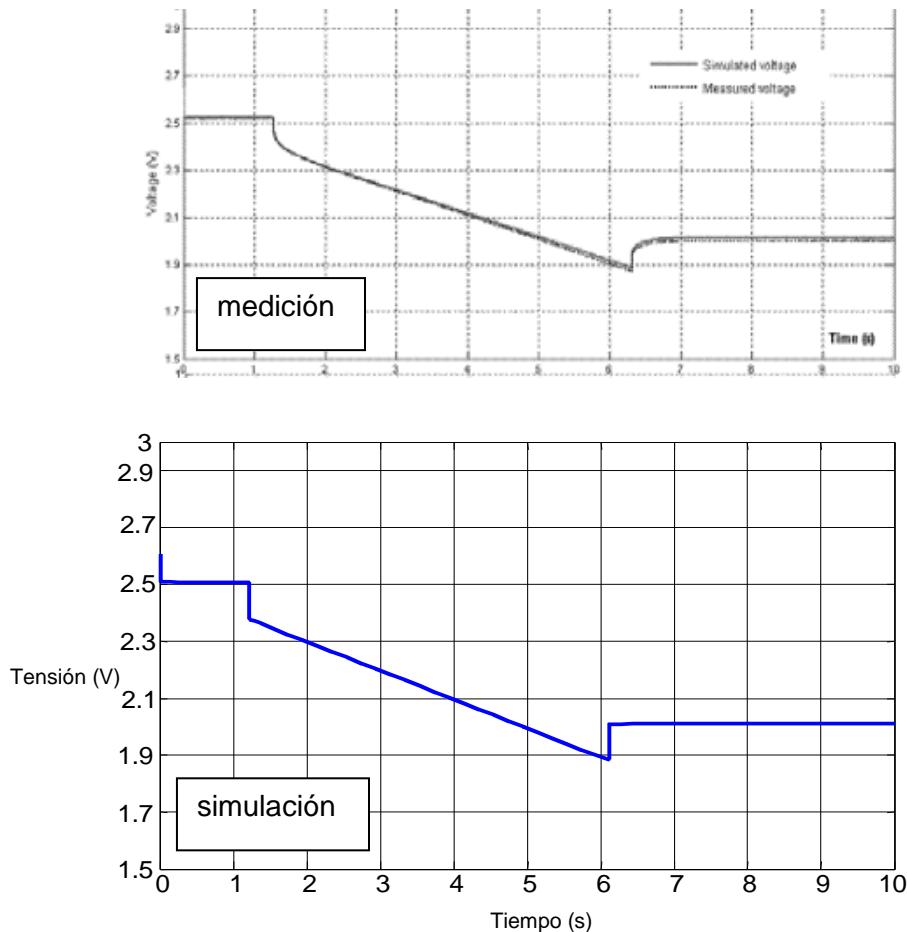


Figura 8. Tensión medida y simulada para el supercondensador 2600F

Por último, se somete el mismo modelo ajustado de supercondensador de 2600F a un ensayo donde la corriente inyectada sigue una secuencia determinada de carga y descarga con distintos perfiles. Los resultados obtenidos de forma experimental [18] y por simulación se comparan en la Figura 9.

(fin de página)

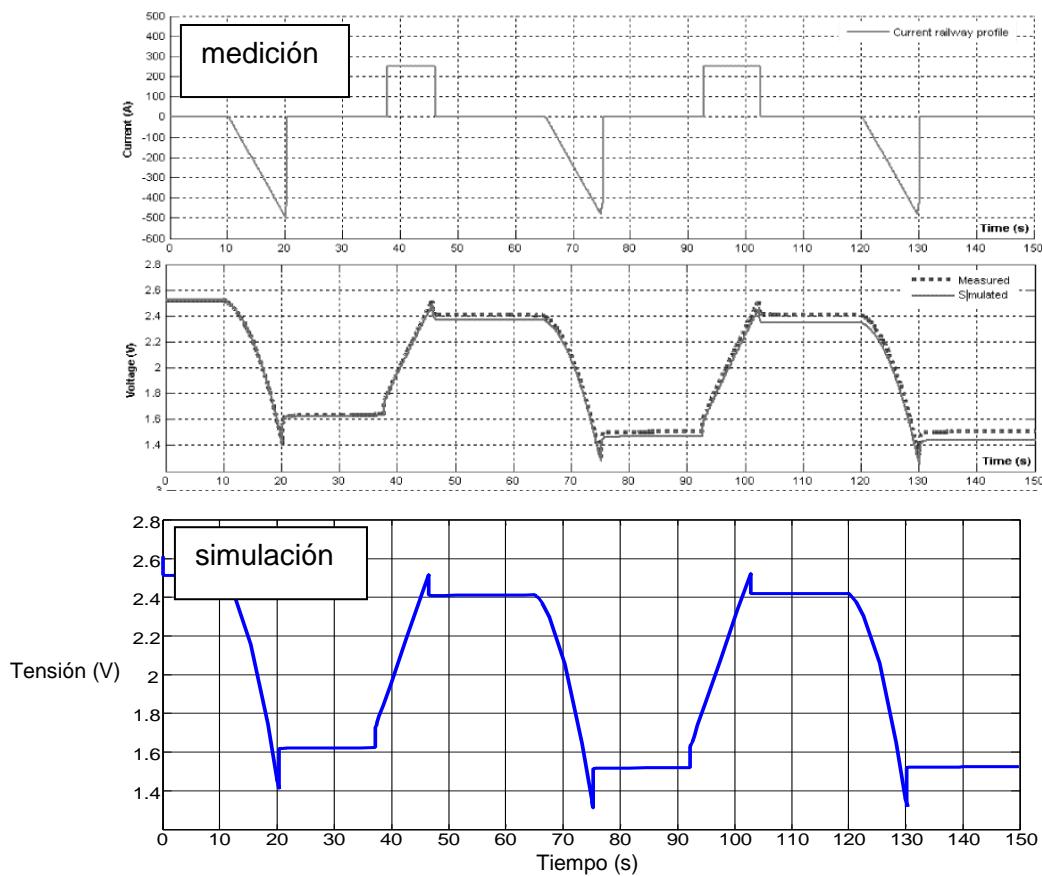


Figura 9. Tensión medida y simulada para el supercondensador 2600F

Los resultados obtenidos en todos los ensayos anteriores muestran un comportamiento del modelo de simulación empleado muy similar al comportamiento real de un supercondensador, recogido en las medidas experimentales mostradas. Se concluye de estos resultados que el modelo es suficientemente preciso para ser empleado en el estudio posterior, cuyos resultados se muestran en sucesivos capítulos.

(fin de página)

Capítulo 4. Evaluación del método de medida

Este capítulo muestra un estudio de sensibilidad realizado mediante simulación de cada método de medida variando distintos parámetros de ensayo. Se pretende con este estudio observar cómo afecta el valor de estos parámetros y en qué medida su elección puede mejorar los resultados obtenidos.

En el estudio se emplearán tres modelos de supercondensadores, de los cuales se conocen los valores nominales:

- Supercondensador de doble capa 470-F DLC [16]
 - o Capacidad nominal: 470 F.
 - o Tensión nominal: 2.3 V
- Supercondensador de doble capa 1500-F DLC [16]
 - o Capacidad nominal: 1500 F.
 - o Tensión nominal: 2.3 V
- Supercondensador de doble capa 6200-F DLC (escalado de [16])
 - o Capacidad nominal: 6200 F.
 - o Tensión nominal: 2.3 V

4.1. Método de carga / descarga a corriente constante

4.1.1. Variabilidad

En el presente método la corriente de descarga, si bien se encuentra tabulada por la norma IEC 62391:2006, constituye un parámetro de ensayo cuya influencia se muestra en la Figura 10 para el supercondensador de 470F.

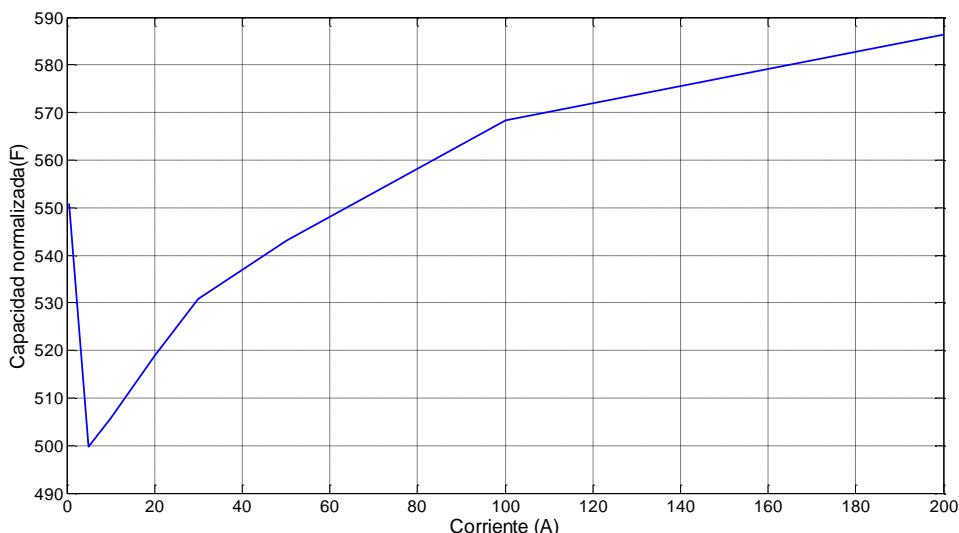


Figura 10. Capacidad normalizada frente a corriente de descarga (supercondensador 470 F)

Se observa que, a partir de un determinado valor de corriente, la capacidad normalizada aumenta. Este comportamiento se debe a que inicialmente el aumento de corriente es menor que el aumento de la pendiente de la tensión, que disminuye de forma más rápida (Figura 11). Esto da lugar a un descenso inicial de la capacidad normalizada, que se calcula como el cociente entre la corriente y la pendiente en tensión. Posteriormente, el descenso de la tensión se ralentiza, por lo que el aumento en corriente es mayor y, por tanto, la capacidad normalizada aumenta.

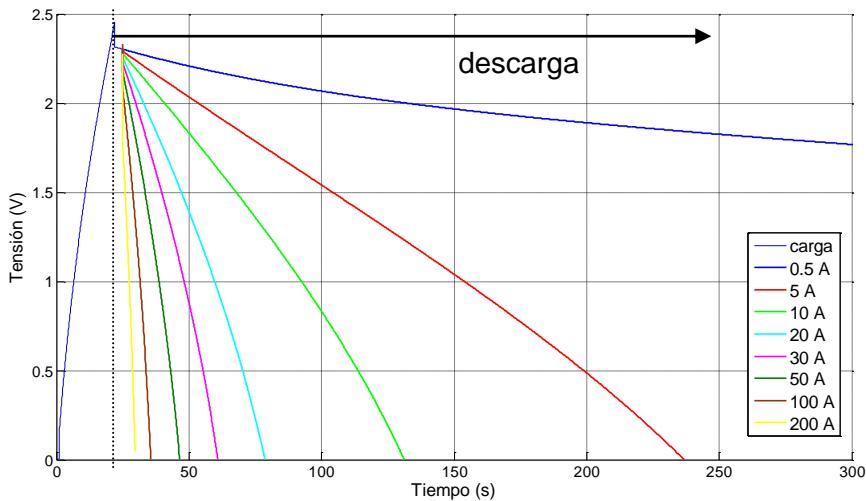


Figura 11. Tensión en bornes del supercondensador 470F durante un ensayo de carga-descarga

El cálculo de capacidad normalizada para el presente método se basa en un modelo de capacidad constante, lo cual no corresponde con el comportamiento de un supercondensador real donde es de esperar una variación de la capacidad con la tensión. Al representar la capacidad instantánea (calculada mediante la Ecuación 1 entre dos instantes temporales suficientemente próximos entre sí) puede constatarse que su comportamiento está lejos de ser constante (Figura 12), por lo que este método implica una aproximación que puede alejar la caracterización obtenida del comportamiento real del supercondensador.

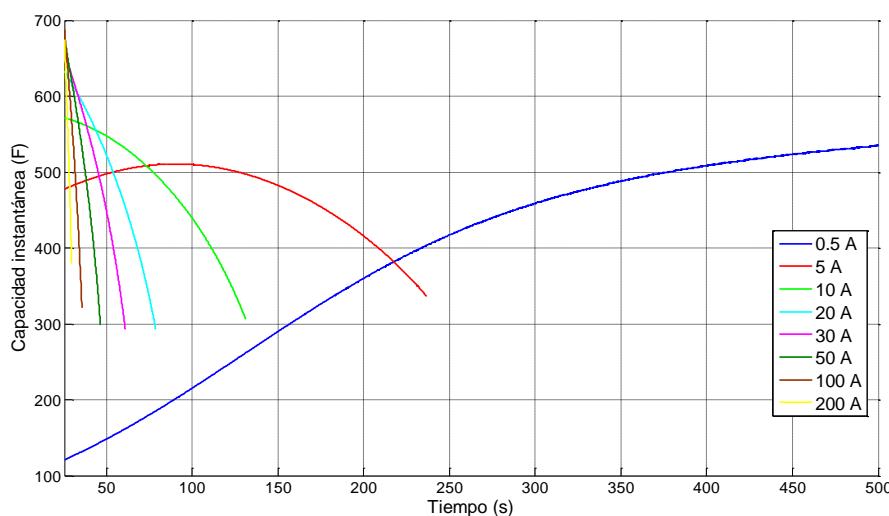


Figura 12. Capacidad instantánea durante la descarga (supercondensador 470 F).

Estos resultados se repiten al simular el ensayo en el resto de supercondensadores.

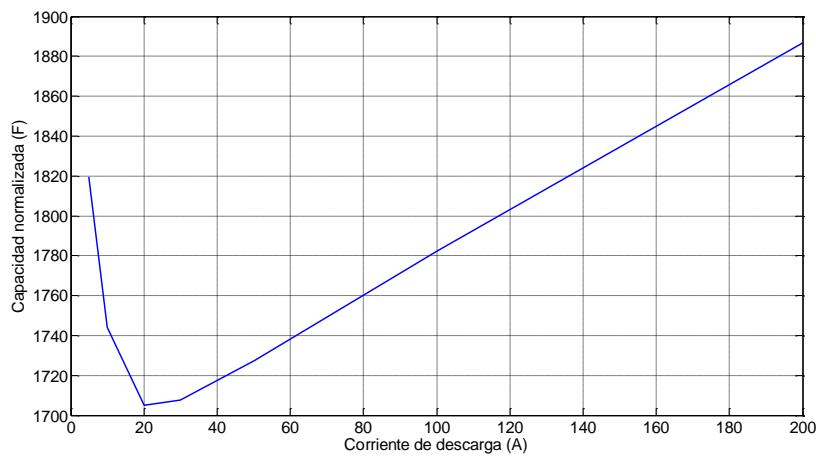


Figura 13. Capacidad normalizada frente a corriente de descarga (supercondensador 1500 F)

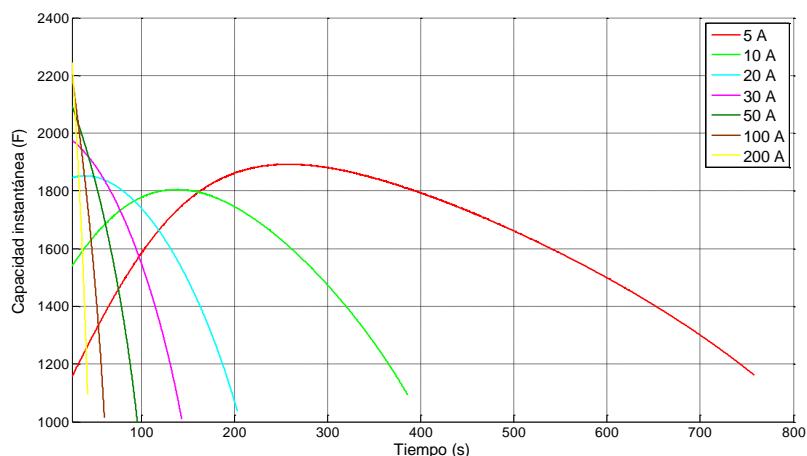


Figura 14. Capacidad instantánea durante la descarga (supercondensador 1500 F)

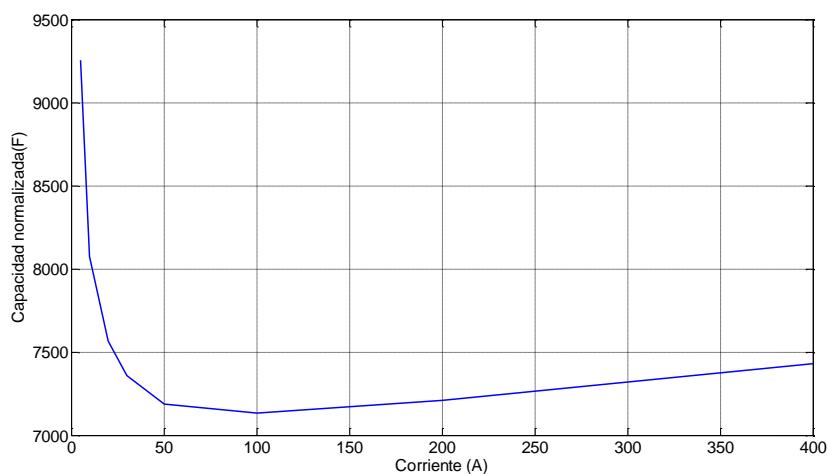


Figura 15. Capacidad normalizada frente a corriente de descarga (supercondensador 6200 F)

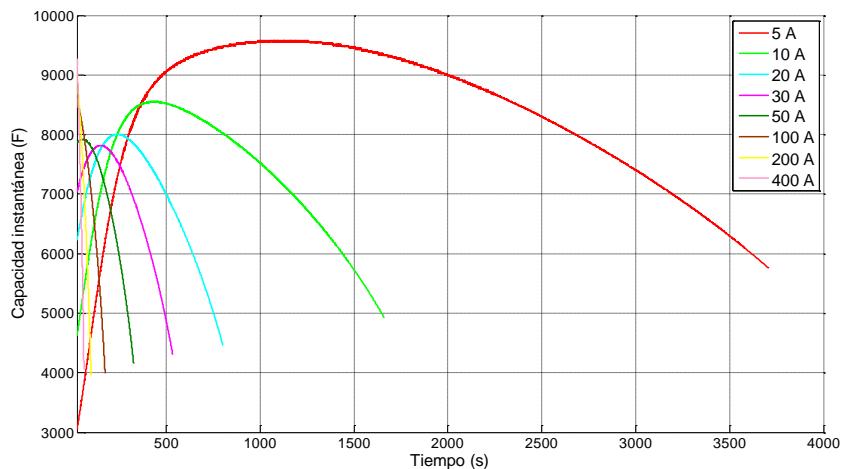


Figura 16. Capacidad instantánea durante la descarga (supercondensador 6200 F)

De los resultados anteriores se concluye que el método de carga / descarga a corriente constante presenta un impacto significativo de la intensidad en el valor de capacidad calculado. Por otro lado, los valores de capacidad normalizada son superiores a los valores nominales.

4.1.2. Tiempo de ensayo

El tiempo requerido para el ensayo depende principalmente de la corriente empleada. Dado que las corrientes propuestas por la normativa se encuentran en el orden de unos pocos amperios, el ensayo puede conducir a tiempos prolongados especialmente para supercondensadores de alta capacidad. La Figura 17 muestra el tiempo de descarga empleado en los tres supercondensadores evaluados en función de la corriente.

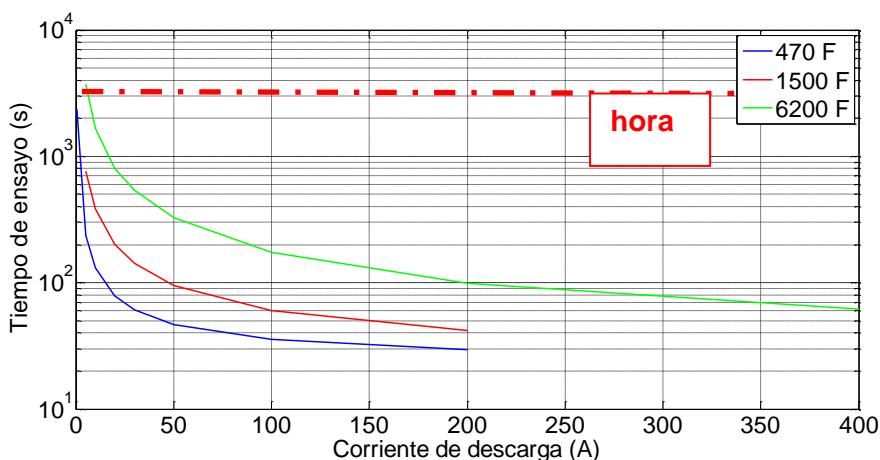


Figura 17. Tiempos de ensayo en función de la corriente de ensayo

La gráfica muestra que por debajo de 5 A los tiempos pueden ser demasiado largos para poder completar el ensayo. Esto convierte este método en un ensayo que puede requerir de largos tiempos de medida. El aumento de la corriente de descarga puede reducir significativamente los tiempos de ensayo, aunque como se ha visto esto conlleva un aumento de la capacidad estimada.

4.1.3. Incertidumbre de medida

Para la estimación de la capacidad es necesario medir corriente y tensión en bornes del supercondensador, así como el tiempo para extraer los puntos de cálculo de tensión. Por tanto, considerando la Ecuación 1, la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá las contribuciones mostradas en la Ecuación 11,

$$U^2(C) = K_I^2 \cdot U^2(I) + K_{\Delta V}^2 \cdot U^2(\Delta V) + K_{\Delta t}^2 \cdot U^2(\Delta t)$$

Ecuación 11

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(I)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de corriente, $U^2(\Delta V)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de tensión, y $U^2(\Delta t)$ representa la incertidumbre asociada a la medida del tiempo. Los distintos coeficientes K de la Ecuación 11 pueden calcularse como:

$$K_I = \frac{\partial C}{\partial I} = \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad K_{\Delta V} = \frac{\partial C}{\partial \Delta V} = -I * \frac{\Delta t}{(\Delta V)^2} \quad K_{\Delta t} = \frac{\partial C}{\partial \Delta t} = \frac{I}{\Delta V}$$

Ecuación 12

Puede observarse que, para corrientes más altas, el valor de la incertidumbre tenderá a aumentar. Por otro lado, al encontrarse el parámetro de tensión en el denominador de cada coeficiente, se deduce que la incertidumbre será menor conforme mayor sea la tensión de carga del supercondensador. De igual modo, la incertidumbre será mayor para ensayos largos donde el incremento temporal sea mayor.

4.1.4. Sencillez / coste

La realización del ensayo requerirá en la mayoría de los casos el empleo de una fuente de corriente, un voltímetro para medir la tensión en bornes del supercondensador y un elemento sobre el cuál realizar la descarga (descargador a corriente constante). A esto debe añadirse el sistema de registro que permita recoger los datos obtenidos en un ordenador, aunque en este caso el procesado para obtener la capacidad es muy simple y no es estrictamente necesario tratar los datos medidos mediante software adicional. Se trata por tanto de un ensayo sencillo y de coste medio.

4.1.5. Caracterización

El método de medida de carga / descarga a corriente constante permite estimar tanto la capacidad normalizada del supercondensador como la resistencia serie equivalente. Se trata de un ensayo sencillo que, como se ha indicado en apartados anteriores, aproxima el comportamiento del supercondensador al de un condensador de capacidad constante, lo cuál introduce siempre un cierto error. El presente método permite también obtener la capacidad instantánea, ofreciendo una representación más real del comportamiento del supercondensador.

4.2. Método resistivo

4.2.1. Variabilidad

El valor de la resistencia empleada en la Ecuación 4 viene definido por el tiempo que tarda la tensión en bornes del supercondensador en alcanzar el valor de la fuente DC a la que se conecta el supercondensador (Figura 2). La Tabla 2 muestra los resultados de capacidad estimada para distintos niveles de tensión y resistencia en los tres supercondensadores propuestos.

470 F				
	$\tau = 60 \text{ s}$		$\tau = 120 \text{ s}$	
V	R (mΩ)	C (F)	R (mΩ)	C (F)
0.5	166	361	305	393
1.5	138	433	258	465
2.3	123	487	230	521

1500 F				
	$\tau = 60 \text{ s}$		$\tau = 120 \text{ s}$	
V	R (mΩ)	C (F)	R (mΩ)	C (F)
0.5	53	1132	101	1188
1.5	44.5	1348	85	1411
2.3	39.5	1518	75	1600

6200 F				
	$\tau = 60 \text{ s}$		$\tau = 120 \text{ s}$	
V	R (mΩ)	C (F)	R (mΩ)	C (F)
0.5	13.4	4477	26.3	4562
1.5	11.2	5357	22.1	5429
2.3	9.8	6122	19.5	6153

Tabla 2. Capacidad estimada para distintos valores de tensión y resistencia

Puede observarse que el impacto de la resistencia es relativamente pequeño al comparar los valores obtenidos con la resistencia menor (60s) y la resistencia mayor (120s).

Al representar la variación de la capacidad estimada con la tensión se aprecia la dependencia lineal característica de los supercondensadores (Figura 18).

(fin de página)

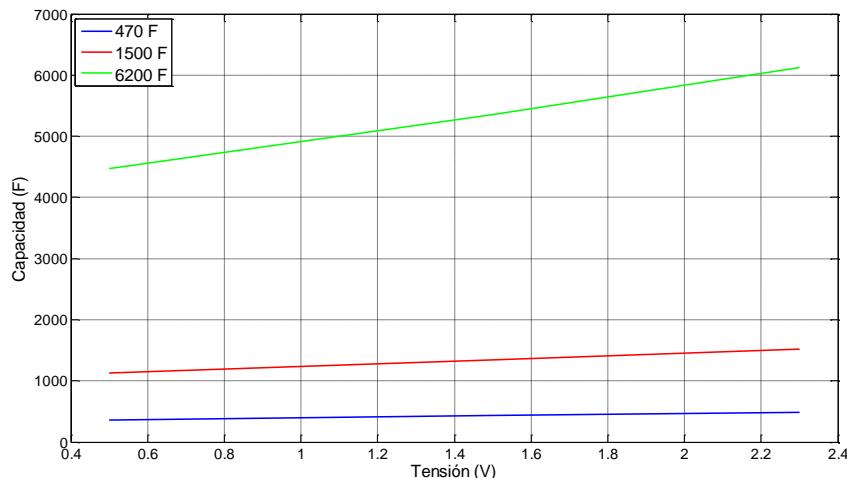


Figura 18. Variación de la capacidad con la tensión para los tres supercondensadores

Por tanto, el método aporta valores estables y cercanos a los nominales, con muy poca variación en el rango permitido a los parámetros de ensayo.

4.2.2. Tiempo de ensayo

El tiempo de ensayo se encuentra fijado por la norma IEC 62391:2006 entre 1 y 2 minutos. Aunque es un ensayo rápido, requiere de un ajuste previo de la resistencia para que la tensión alcance el valor especificado en ese tiempo de medida. Esto puede conducir a sucesivos ensayos de carga y descarga previos hasta obtener el valor de resistencia necesario, lo cual puede incrementar el tiempo de ensayo total.

4.2.3. Incertidumbre de medida

Para la estimación de la capacidad con el presente método de ensayo es necesario medir tiempo (τ) y el valor de la resistencia empleada en la Ecuación 2. Por tanto la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá principalmente las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_R^2 \cdot U^2(R) + K_\tau^2 \cdot U^2(\tau)$$

Ecuación 13

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(R)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la resistencia, y $U^2(\tau)$ representa la incertidumbre asociada a la medida del tiempo. De la Ecuación 2 se pueden obtener los coeficientes K_R y K_τ como:

$$K_R = \frac{\partial C}{\partial R} = -\frac{\tau}{R^2} \quad K_\tau = \frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{1}{R}$$

Ecuación 14

Como puede observarse, la incertidumbre es inversamente proporcional en cada coeficiente a la resistencia empleada, por lo que el uso de mayores resistencias tenderá a reducir el valor de la incertidumbre de medida. Por el contrario, a mayor tiempo τ la incertidumbre será mayor.

4.2.4. Sencillez / coste

La realización del ensayo requiere una fuente de tensión, un voltímetro y una resistencia ajustable (potenciómetro), además de un interruptor que permita cambiar la conexión en bornes del supercondensador de la fuente a la resistencia. No es estrictamente necesario el post-procesado de datos ya que la obtención de la capacidad es muy sencilla y directa. Aunque la precisión necesaria en la resistencia puede ser alta, los elementos no son a priori de elevado coste en comparación con otros métodos (no se requieren fuentes de alta corriente, y la fuente de tensión debe proporcionar valores bajos).

4.2.5. Caracterización

Al igual que otros métodos de medida, el presente ensayo permite obtener la dependencia de la capacidad con la tensión al estar el ensayo definido por el valor de la fuente empleada. Los valores de capacidad estimados son muy cercanos a los nominales aunque el método es demasiado sencillo para poder extraer más información del comportamiento del supercondensador.

4.3. **Ensayo de ciclos de tensión**

4.3.1. Variabilidad

La Figura 19 muestra la medida en que la rapidez de variación de la tensión afecta a los valores de capacidad obtenidos para el supercondensador de 470 F.

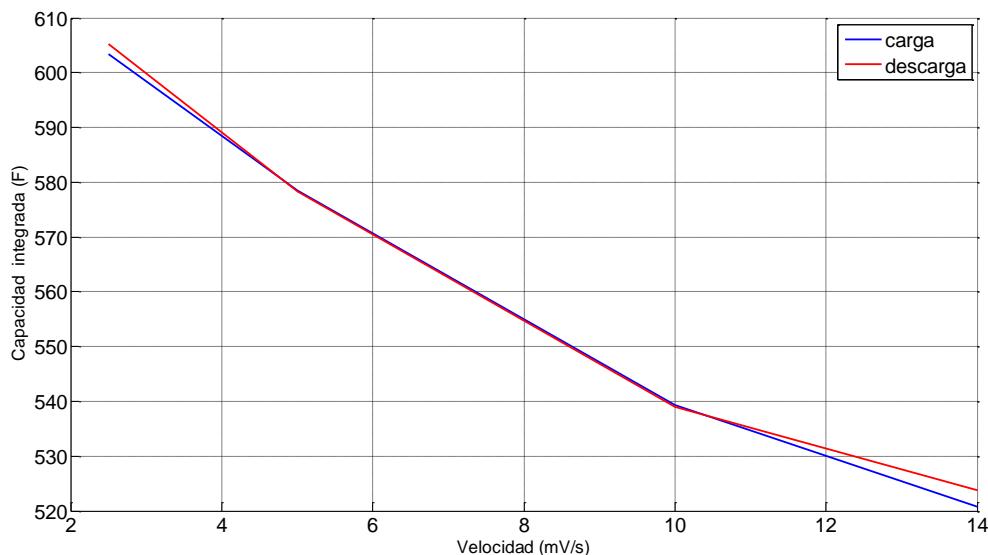


Figura 19. Capacidad integrada del SC 470F a distintas variaciones o velocidades de tensión

Se observa que la capacidad estimada decrece conforme se incrementa la velocidad de ciclo. Esta tendencia también se observa en el resto de supercondensadores (Figura 20 y Figura 21).

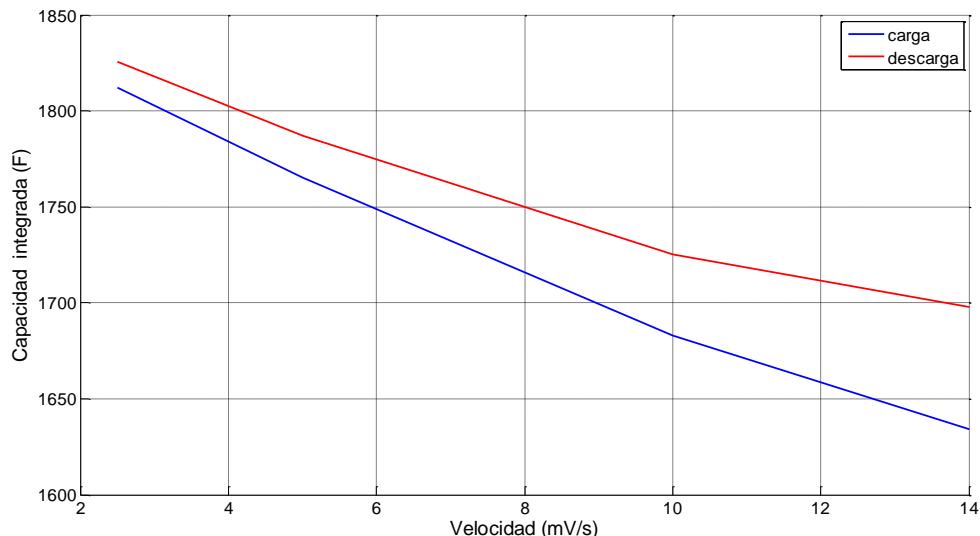


Figura 20. Capacidad integrada del SC 1500F a distintas variaciones o velocidades de tensión

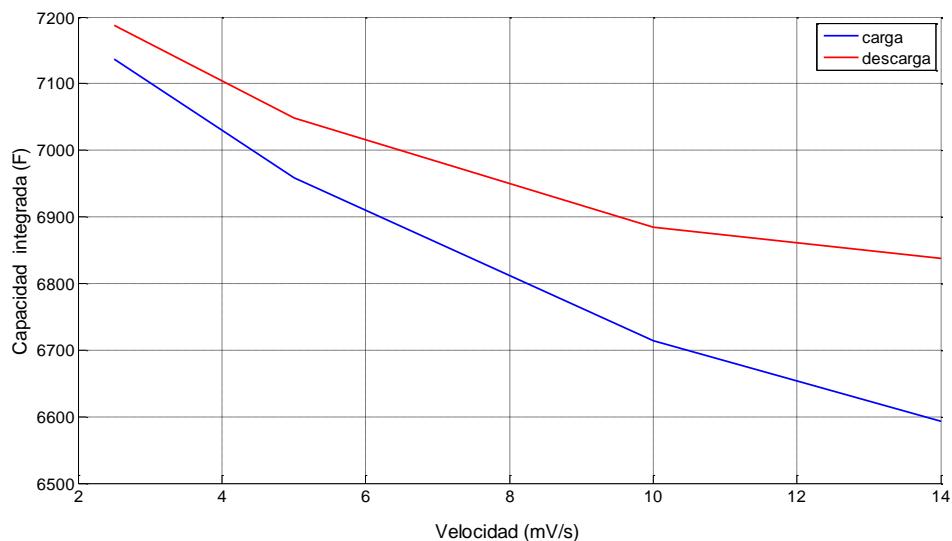


Figura 21. Capacidad integrada del SC 6200F a distintas variaciones o velocidades de tensión

Puede observarse que los valores obtenidos son en todos los casos algo superiores a los valores nominales.

Las figuras también revelan una notable diferencia entre la capacidad estimada empleando la carga y la descarga del ciclo, siendo esta diferencia mayor conforme aumenta la capacidad del supercondensador. Esto puede deberse a la asimetría que la capacidad dependiente de la tensión introduce en el ciclo. Por ello, este método resulta más adecuado para supercondensadores de bajas capacidades.

4.3.2. Tiempo de ensayo

El tiempo de ensayo es independiente de la capacidad del supercondensador ya que la propia velocidad y la tensión máxima imponen la duración de cada ciclo. Como ejemplo de tiempos que pueden ser requeridos, considerando un mínimo de 4 ciclos para los cálculos de capacidad, se muestra la Figura 22 (tomando una tensión máxima de ciclo de 2.3 V).

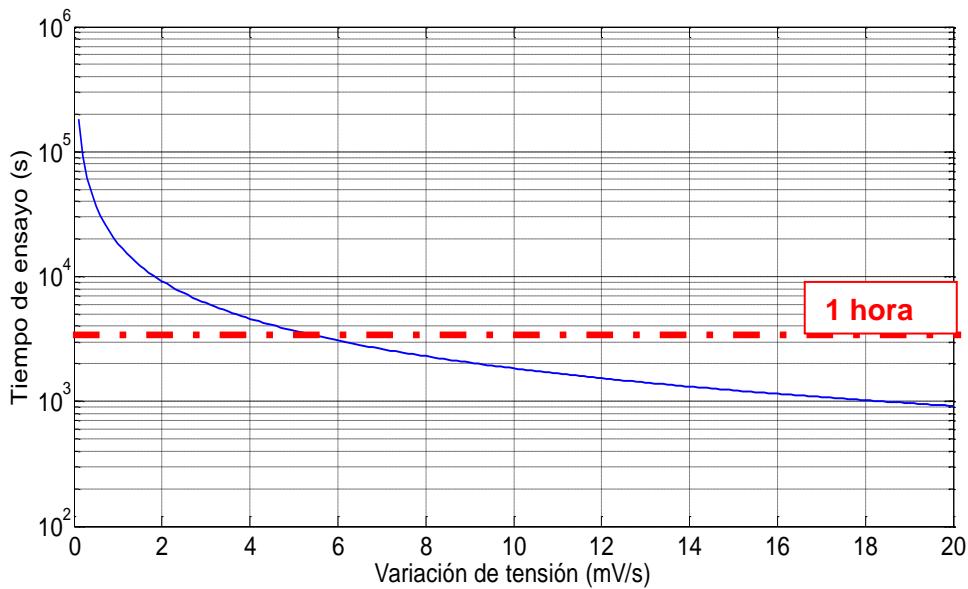


Figura 22. Tiempos de ensayo para 4 ciclos entre 0 y 2.3 V.

La gráfica muestra que para valores de variación de tensión por debajo de 5 mV/s los tiempos de ensayo aumentan por encima de una hora, por lo que es necesario velocidades mayores.

4.3.3. Incertidumbre de la medida

Para la estimación de la capacidad con el presente método de ensayo es necesario medir la corriente y el incremento de tensión en bornes del supercondensador como indica la Ecuación 3. Por tanto la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá principalmente las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_I^2 \cdot U^2(I) + K_{\Delta V}^2 \cdot U^2(\Delta V)$$

Ecuación 15

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(I)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la corriente, y $U^2(\Delta V)$ representa la incertidumbre asociada a la medida del incremento de tensión en el intervalo de tiempo calculado. A partir de la Ecuación 3 pueden obtenerse los coeficientes K como:

$$K_I = \frac{\partial C}{\partial I} = \frac{\int dt}{\Delta V} \quad K_{\Delta V} = \frac{\partial C}{\partial \Delta V} = -\frac{\int Idt}{(\Delta V)^2}$$

Ecuación 16

La expresión obtenida para cada coeficiente K indica que la tensión, al estar en el denominador, tenderá a reducir la incertidumbre conforme se empleen incrementos de tensión mayores. Por otro lado, la corriente al estar en el numerador del coeficiente $K_{\Delta V}$ contribuirá al aumento de la incertidumbre para valores de corriente mayores.

4.3.4. Sencillez / coste

La tensión aplicada en bornes del supercondensador es variable y debe seguir una consigna de velocidad constante definida, lo cual implica el empleo de fuentes de tensión más complejas y caras que en otros métodos de medida. Además, el procesamiento en este caso es más complejo, por lo que será necesario contar con un sistema de adquisición que almacene los datos de tensión y corriente durante varios ciclos para poder procesarlos posteriormente con un software de cálculo.

4.3.5. Caracterización

El ensayo de ciclos de tensión permite caracterizar el supercondensador en su totalidad ya que emplea tanto la carga como la descarga (ciclo completo). También permite conocer la función de capacidad frente a la tensión.

Por otro lado, el ensayo no permite obtener la resistencia serie equivalente, lo cual limita más la caracterización.

4.4. Cronoamperometría

4.4.1. Variabilidad

Tras realizar varias simulaciones empleando distintos niveles de tensión escalón para el supercondensador de 470F, se obtiene la gráfica de la Figura 23, donde se representa la capacidad estimada frente a la tensión escalón.

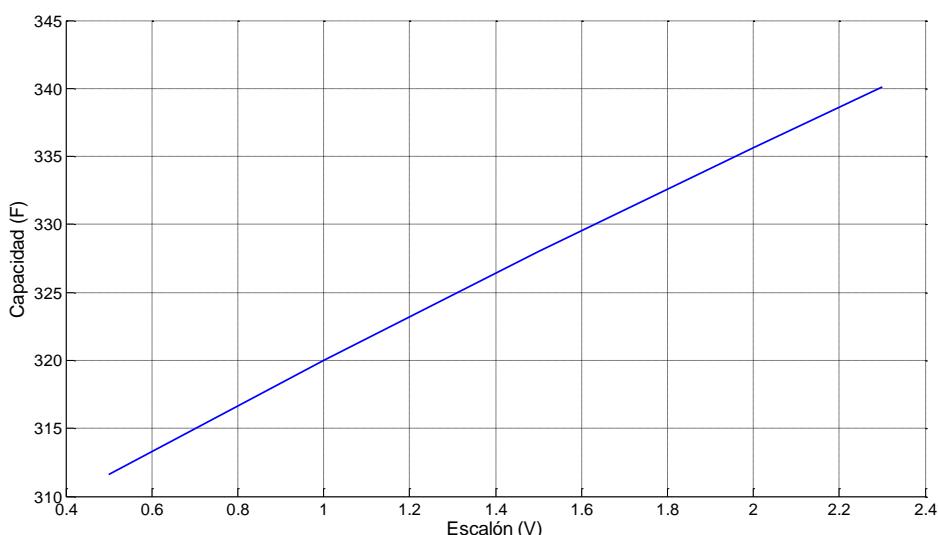


Figura 23. Capacidad integrada del SC 470F frente a tensión

De nuevo vuelve a observarse la dependencia lineal de la capacidad con la tensión, ya que en este caso el valor del escalón representaría la tensión a la cual se estima la capacidad. Es de esperar por tanto una variación lineal según el modelo de la Ecuación 10.

La influencia de la resistencia empleada para la medida de intensidad puede observarse en los resultados mostrados en la Figura 24 para el mismo supercondensador de 470F.

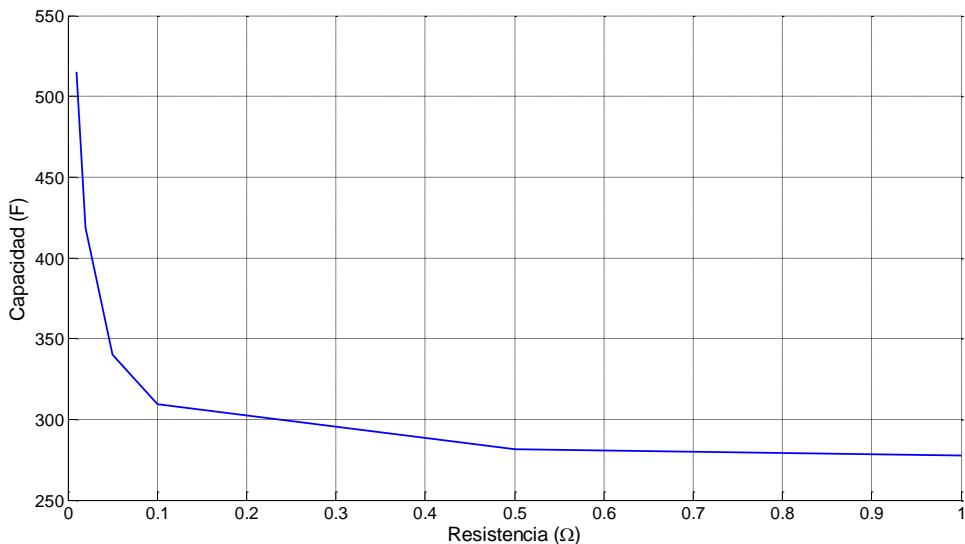


Figura 24. Capacidad integrada del SC 470F frente a resistencia

La disminución inicial observada en el valor de capacidad estimado se debe a la presencia de la resistencia en el denominador de la Ecuación 5, lo que implica que valores pequeños de resistencia darán lugar a valores más elevados de capacidad.

Conforme aumenta la resistencia el valor de capacidad se estabiliza debido a la disminución de la pendiente de la corriente en el instante inicial (Figura 25), que es cuando se calcula la capacidad, lo que tiende a compensar el aumento de la resistencia y ralentiza la disminución de la capacidad.

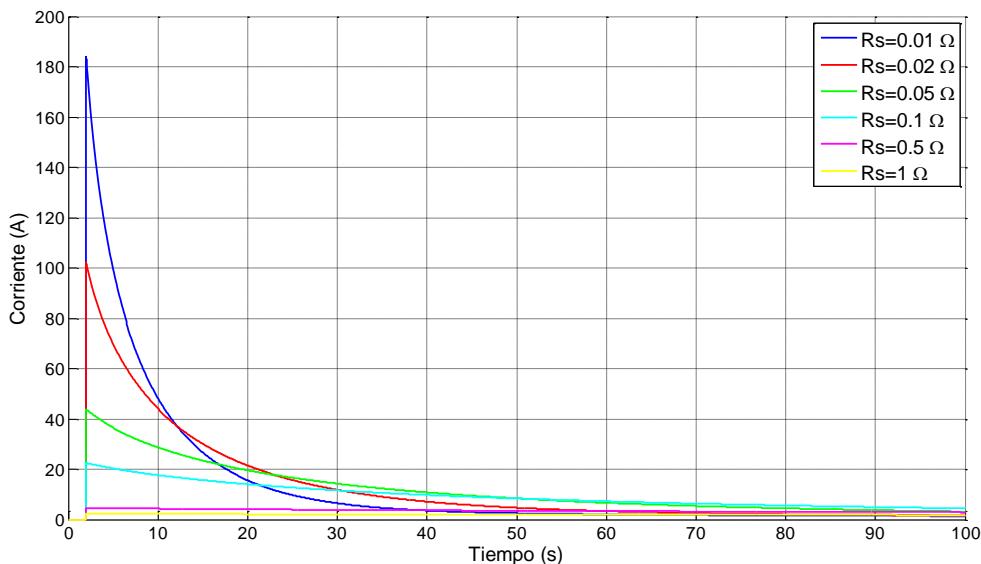


Figura 25. Corriente de carga del SC 470F tras un escalón de tensión con distintos shunt

Puede observarse que el valor de capacidad estimada se aproxima más al valor nominal para valores bajos de resistencia.

Estas conclusiones se extraen igualmente al simular el resto de supercondensadores (anexo B).

4.4.2. Tiempo de ensayo

En este método la capacidad se calcula en el instante inicial del ensayo, empleándose de 3 a 5 segundos de medida tras aplicar el escalón. Por ello, el tiempo de ensayo para este método es constante e independiente de los parámetros empleados, siendo éste un ensayo rápido y ágil.

4.4.3. Incertidumbre de la medida

Para la estimación de la capacidad es necesario medir la pendiente de la corriente en el instante inicial en bornes del supercondensador, así como la tensión escalón aplicada por la fuente y la resistencia. Por tanto la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá principalmente las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_{dl}^2 \cdot U^2(dI) + K_{V_o}^2 \cdot U^2(V_o) + K_R^2 \cdot U^2(R)$$

Ecuación 17

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(dI)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la pendiente de corriente, $U^2(V_o)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la tensión escalón, y el término $U^2(R)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la resistencia. De la Ecuación 5 pueden extraerse los coeficientes K como:

$$K_I = \frac{\partial C}{\partial dI} = \frac{V_0}{R^2 \cdot \left(\frac{dI}{dt} \Big|_{t=0} \right)^2} \quad K_{V_o} = \frac{\partial C}{\partial V_0} = -\frac{1}{R^2 \cdot \frac{dI}{dt} \Big|_{t=0}} \quad K_R = \frac{\partial C}{\partial R} = -\frac{2 \cdot V_0}{R^3 \cdot \frac{dI}{dt} \Big|_{t=0}}$$

Ecuación 18

La tensión, al encontrarse en el numerador, tenderá a aumentar la incertidumbre conforme se empleen valores de tensión mayores. En el caso de la intensidad y de la resistencia, la contribución de ambos parámetros es disminuir la incertidumbre para valores mayores.

4.4.4. Sencillez / coste

La preparación del ensayo implica la conexión a una fuente de tensión DC a través de un interruptor, o bien directamente a una fuente que permita obtener escalones de tensión constantes. El circuito también incluye una resistencia en serie con el supercondensador. Los elementos necesarios no son especialmente complejos si bien la estimación de la capacidad puede requerir el procesado de datos y, por tanto, un sistema de adquisición para obtener mayor precisión en el resultado medido. A esto hay que añadir la necesidad de un shunt de alta corriente y alta precisión para la medida de la intensidad.

Esto hace que el método de medida sea sencillo y rápido aunque el coste pueda ser algo mayor que en otros métodos de medida.

4.4.5. Caracterización

El método de medida permite obtener el valor de capacidad nominal, esto es, un valor constante asociado al estado nominal del supercondensador. No ofrece por tanto el comportamiento de la capacidad frente a la tensión (para obtenerlo sería

necesario repetir el ensayo a distintos niveles de tensión escalón y construir la función $C(V)$ a partir de los distintos valores de capacidad estimados).

Por otro lado el método permite obtener el valor de resistencia serie equivalente a partir de la resistencia serie empleada.

4.5. Ensayo de ciclos de potencia

4.5.1. Variabilidad

Los resultados mostrados en la Figura 26 presentan la forma en que la capacidad se ve afectada por la potencia escogida en los ciclos de ensayo.

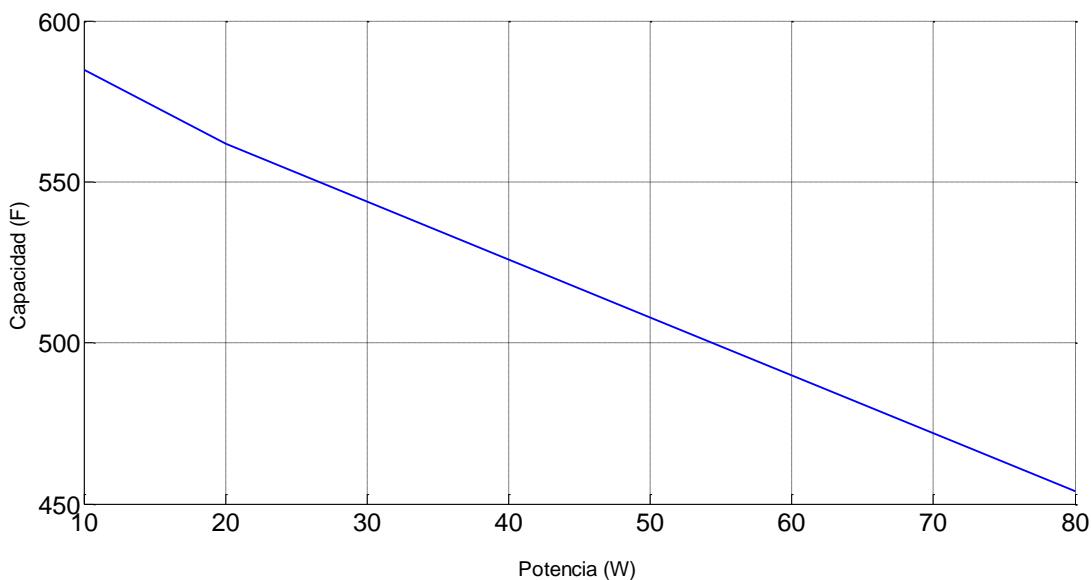


Figura 26. Capacidad estimada frente a potencia (SC 470F)

La capacidad estimada tiende a disminuir conforme se incrementa la potencia. Esto se debe a que la capacidad, de acuerdo con la Ecuación 6, depende de la carga integrada a lo largo de un ciclo. Cuanto mayor es la potencia, menor es el tiempo necesario para completar un ciclo y, por tanto, menor es el tiempo durante el cual se integra la corriente. Esto da lugar a cargas almacenadas menores y, en consecuencia, capacidades estimadas más bajas. La Figura 27 muestra un ejemplo para el supercondensador de 1500F donde se representa la corriente a lo largo de un par de ciclos para una potencia de 10W y 20W. Como puede verse, al aumentar la potencia la corriente aumenta, pero el tiempo de ciclo disminuye de forma más significativa, lo que lleva a un área integrada menor.

Para el resto de supercondensadores los efectos observados se repiten (Figura 28 y Figura 29), lo que indica que los resultados obtenidos mediante este método se ven afectados por el valor de la potencia escogida.

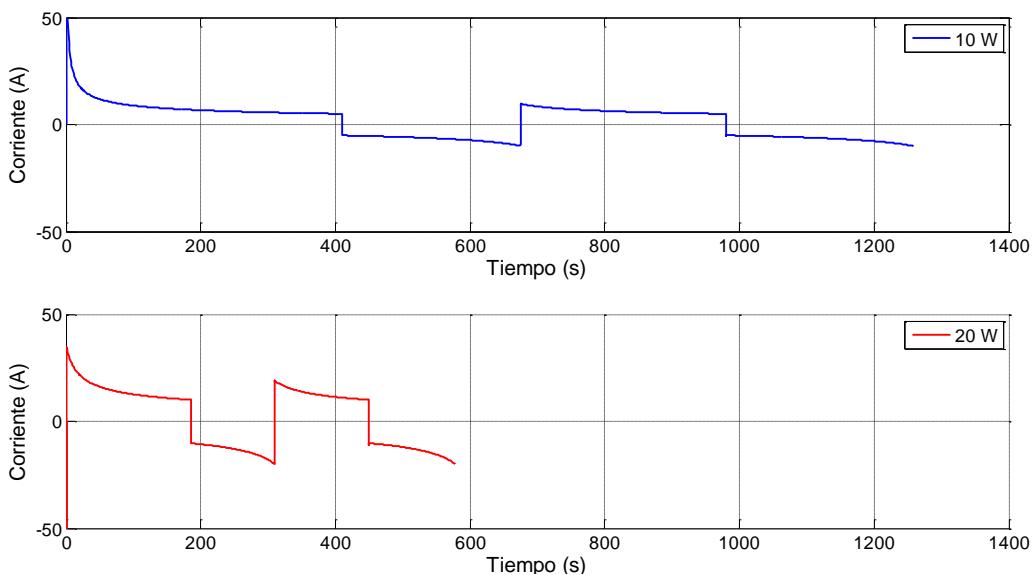


Figura 27. Corriente durante dos ciclos para el SC 1500F

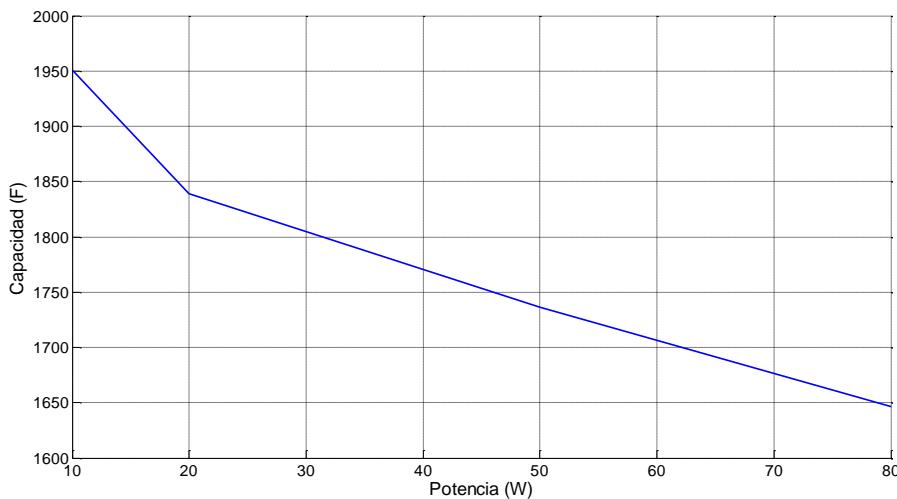


Figura 28. Capacidad estimada frente a potencia (1500F)

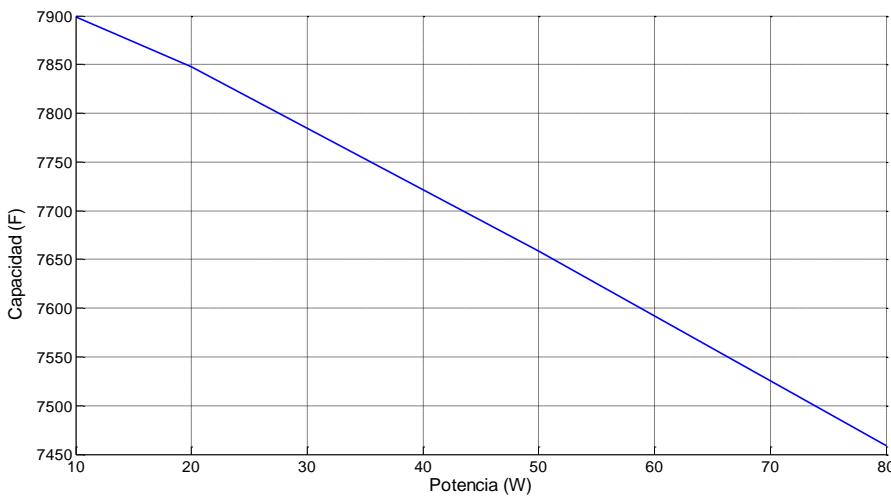


Figura 29. Capacidad estimada frente a potencia (SC 6200F)

4.5.2. Tiempo de ensayo

El tiempo de ensayo viene determinado por la potencia empleada, ya que a mayor potencia el ciclo será más rápido y, por tanto, el tiempo de medida será menor. Como se ha observado en los resultados anteriores, un aumento de la potencia tiende a mejorar el valor de capacidad estimado, por lo que el tiempo de medida puede acortarse siempre que la potencia no alcance niveles que superen las condiciones máximas del supercondensador. A continuación en la Figura 30 se muestra el tiempo de ensayo en función de la potencia empleada para los tres supercondensadores.

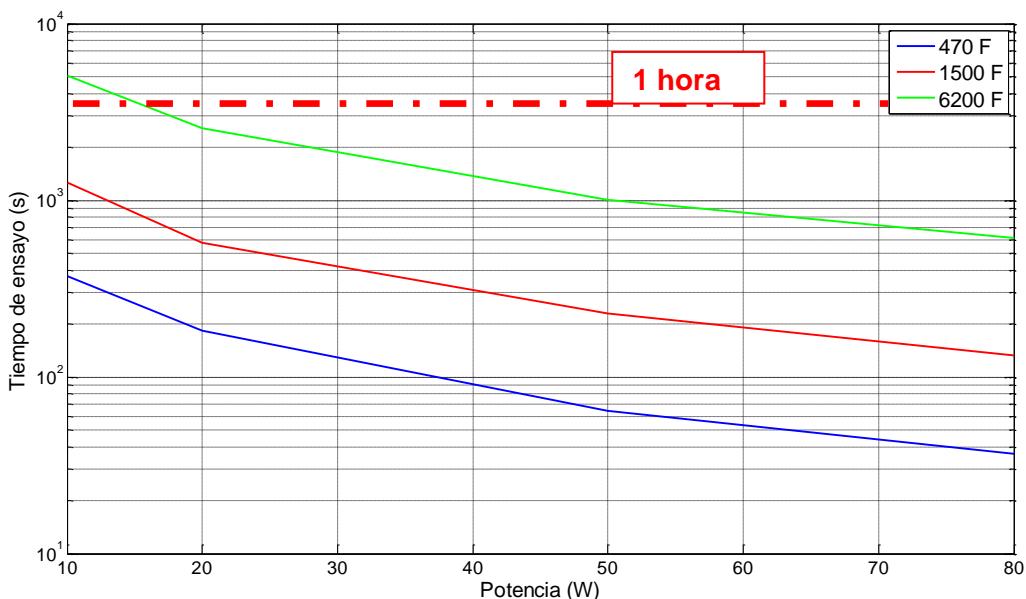


Figura 30. Tiempos de ensayo con ciclos de potencia

Los tiempos de ensayo dependen en gran medida del supercondensador, siendo para las capacidades más elevadas del orden de varios minutos para valores mayores de potencia. Esto convierte al método en un ensayo de velocidad media en comparación con otros métodos de medida.

4.5.3. Incertidumbre de la medida

Para la estimación de la capacidad con el presente método de ensayo es necesario medir la tensión en bornes del supercondensador, así como la corriente aplicada por la fuente. Por tanto la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá principalmente las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_I^2 U^2(I) + K_V^2 U^2(V)$$

Ecuación 19

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(I)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la corriente, y $U^2(V)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la tensión. En este caso los valores de los coeficientes no pueden obtenerse directamente al no existir una expresión analítica de la capacidad en función de los parámetros medidos (la capacidad se obtiene a través de un ajuste lineal).

4.5.4. Sencillez / coste

Mantener la potencia constante requiere una fuente de corriente controlada, lo que incrementa la complejidad del ensayo y la necesidad de equipo de mayor precisión. Además, el post-procesado de la señal para obtener la estimación de la capacidad implica un tratamiento de todos los datos registrados durante los ciclos completos para poder ajustar estos datos a la recta que proporciona el valor de capacidad. Esto requiere por tanto un sistema de adquisición conectado al circuito de medida, aumentando el coste del ensayo.

4.5.5. Caracterización

El método realiza ciclos completos de carga y descarga, por lo que la caracterización del supercondensador es completa y proporciona una estimación del comportamiento de la capacidad frente a la tensión del supercondensador. El método permite igualmente obtener la resistencia serie equivalente a partir de los datos ajustados, por lo que el método de medida es más completo desde el punto de vista de la caracterización del supercondensador frente a otros métodos.

4.6. Espectroscopía de impedancia

4.6.1. Variabilidad

Mientras los métodos presentados muestran una caracterización de la capacidad en función de la tensión empleada, otros métodos como el basado en espectroscopía de impedancia ofrecen la posibilidad de caracterizar la respuesta de la capacidad en el dominio frecuencial. La Figura 31 muestra resultados obtenidos al aplicar el método al supercondensador de 470F para varias frecuencias.

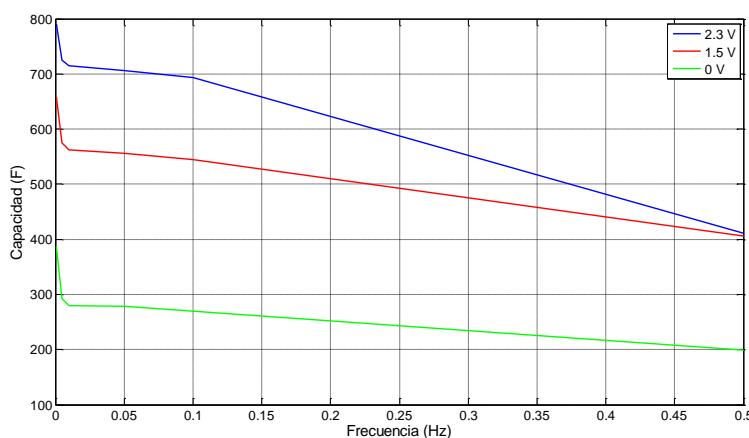


Figura 31. Capacidad estimada por espectroscopía de impedancia para varias frecuencias (SC 470F)

Puede observarse que la capacidad estimada a distintas tensiones de trabajo tiende a disminuir conforme aumenta la frecuencia, siendo estos valores de capacidad notablemente superiores a los valores nominales (470F a 2.3V).

Los resultados para los supercondensadores de 1500F y 6200F presentan conclusiones similares, si bien la variación de la capacidad con la frecuencia es menor.

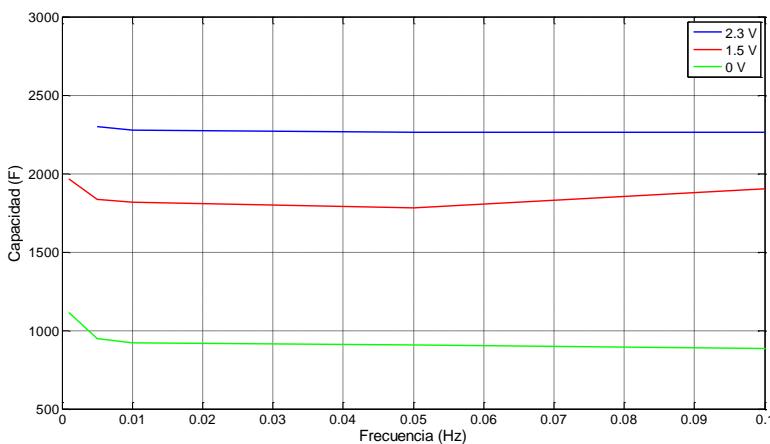


Figura 32. Capacidad estimada por espectroscopía de impedancia para varias frecuencias (SC 1500F)

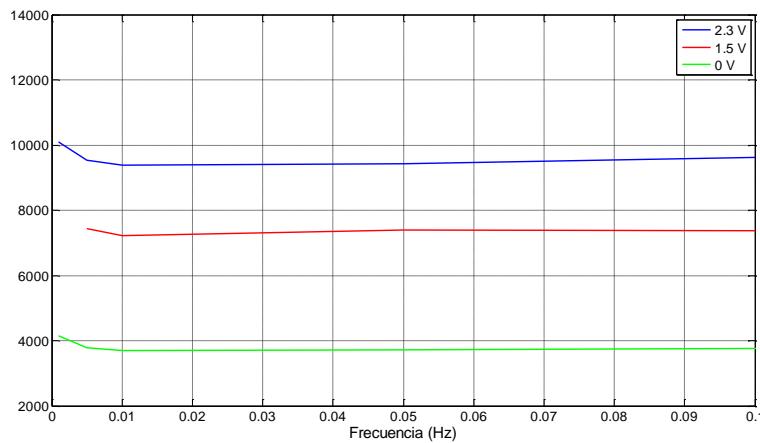


Figura 33. Capacidad estimada por espectroscopía de impedancia para varias frecuencias (SC 6200F)

Se aprecia que los valores estimados por este método son muy altos y se alejan considerablemente de los valores nominales a 2.3 V.

4.6.2. Tiempo de ensayo

El tiempo de ensayo viene determinado por el tiempo que tarda la señal en estabilizarse, de manera que el valor medio de la tensión en bornes del supercondensador se mantiene constante, ya que los valores de capacidad deben calcularse en régimen permanente.

La Figura 34 muestra el valor de capacidad calculado en cada instante desde el inicio del ensayo, en relación con su valor en permanente para distintas frecuencias (amplitud 0.1 A), tomando como modelo el supercondensador de 470F.

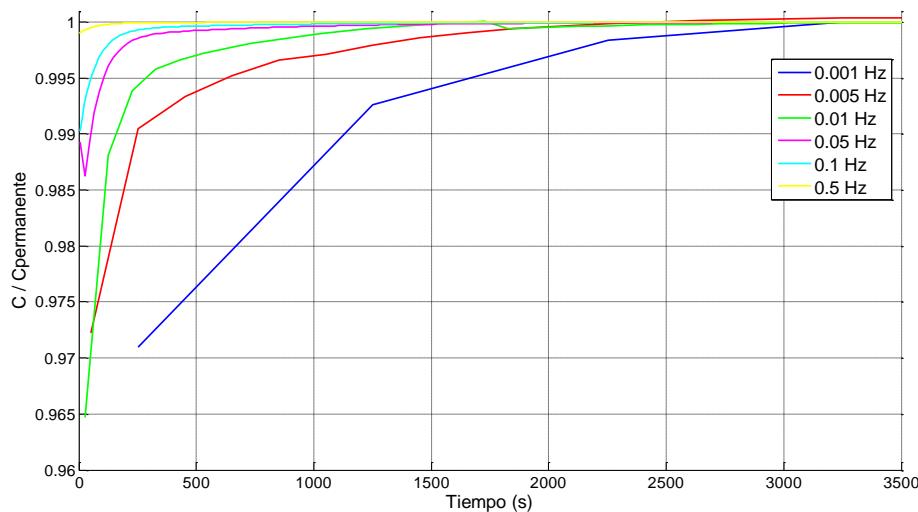


Figura 34. Estabilización de la capacidad a lo largo de un ensayo (SC 470F)

Se observa que al disminuir la frecuencia, el ensayo puede requerir hasta casi una hora.

La Figura 35 muestra los resultados para una misma frecuencia (0.005 Hz) y variando la amplitud de la intensidad introducida, para el SC 470F, con el objetivo de ver si aumentando la amplitud se pueden reducir los tiempos de ensayo.

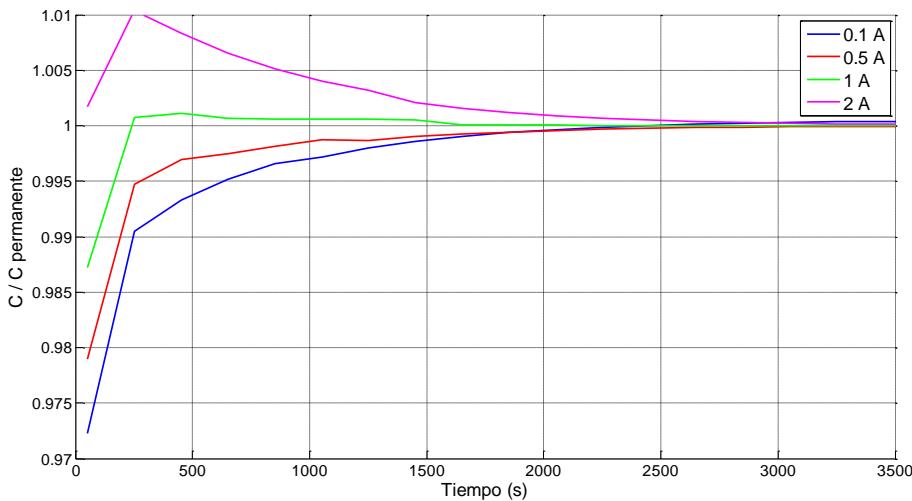


Figura 35. Estabilización de la capacidad máxima a lo largo de un ensayo (SC 470F)

Las figuras muestran que aumentar la amplitud de 0.1 A a 1 A conlleva una reducción del tiempo de ensayo de hasta un 80 %. No obstante, empleando una amplitud mayor de 2 A se observa una sobreoscilación que conlleva un aumento del tiempo de respuesta. Por tanto un aumento de amplitud en este caso no implica necesariamente una reducción del tiempo de ensayo.

4.6.3. Incertidumbre de la medida

Para la estimación de la capacidad con el presente método de ensayo es necesario medir la componente imaginaria de la impedancia Z en bornes del supercondensador, así como la frecuencia de la señal de corriente inyectada. Por tanto la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá principalmente las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_z^2 \cdot U^2(Z) + K_f^2 \cdot U^2(f)$$

Ecuación 20

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(Z)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la impedancia, y $U^2(f)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la frecuencia. A partir de la Ecuación 7 pueden obtenerse los coeficientes K como:

$$K_z = \frac{\partial C}{\partial Z} = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\text{Im}(Z))^2} \quad K_f = \frac{\partial C}{\partial f} = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \text{Im}(Z)}$$

Ecuación 21

Las expresiones obtenidas indican que a mayores valores de impedancia y frecuencia, la incertidumbre tenderá a disminuir. El valor de la frecuencia en este caso viene definida por la fuente empleada, por lo que la principal contribución a la incertidumbre provendrá de la medida de la impedancia.

4.6.4. Sencillez / coste

El método empleado requiere una fuente de corriente en alterna de frecuencia controlable, por lo que la complejidad en este caso es mayor que en otros métodos de medida que trabajan en continua. A esto hay que añadir un sistema de adquisición suficientemente preciso y con la capacidad de muestreo suficiente para poder almacenar las señales de corriente y tensión necesarias para el post-procesado. Por ello el presente método es más complejo y costoso que otros ya analizados.

4.6.5. Caracterización

El método de medida basado en espectroscopia de impedancia permite estimar la capacidad del supercondensador en el rango frecuencial. El procesado de la señal también permite obtener el valor de la resistencia serie equivalente, convirtiendo el ensayo en un método de medida completo que recoge una mayor información del comportamiento del supercondensador respecto a otros métodos de medida.

4.7. **Método de resistencia negativa**

4.7.1. Variabilidad

Como ya se vio en el apartado 2.7, el ensayo de resistencia negativa requiere ajustar parámetros como la resistencia a través de la cuál se aplica la señal en tensión, el período de la señal empleada o la amplitud de dicha señal.

La Figura 36 muestra los resultados obtenidos tras estimar la capacidad para varios valores de período de la señal (o frecuencia), y de la amplitud de la onda de tensión aplicada para el supercondensador de 470F.

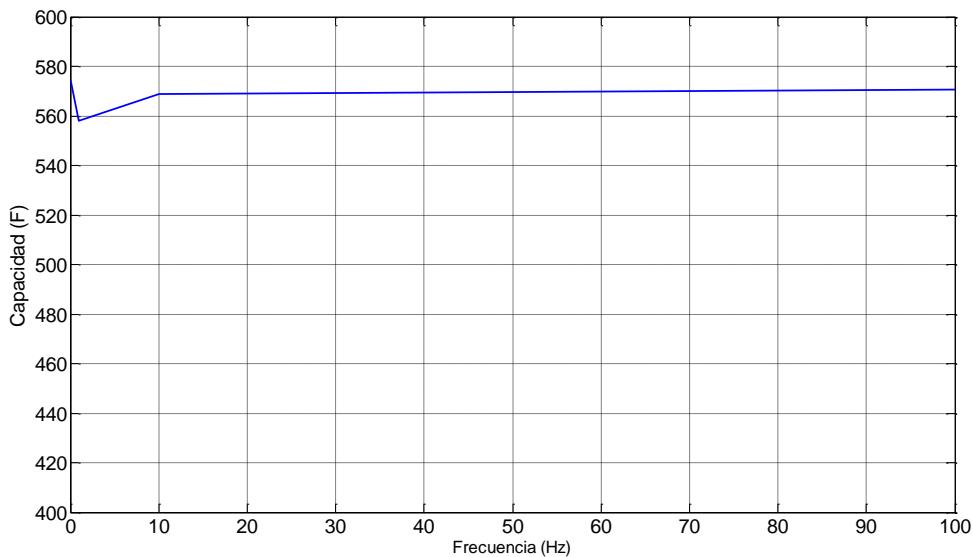


Figura 36. Variación de la capacidad con la frecuencia (SC 470F)

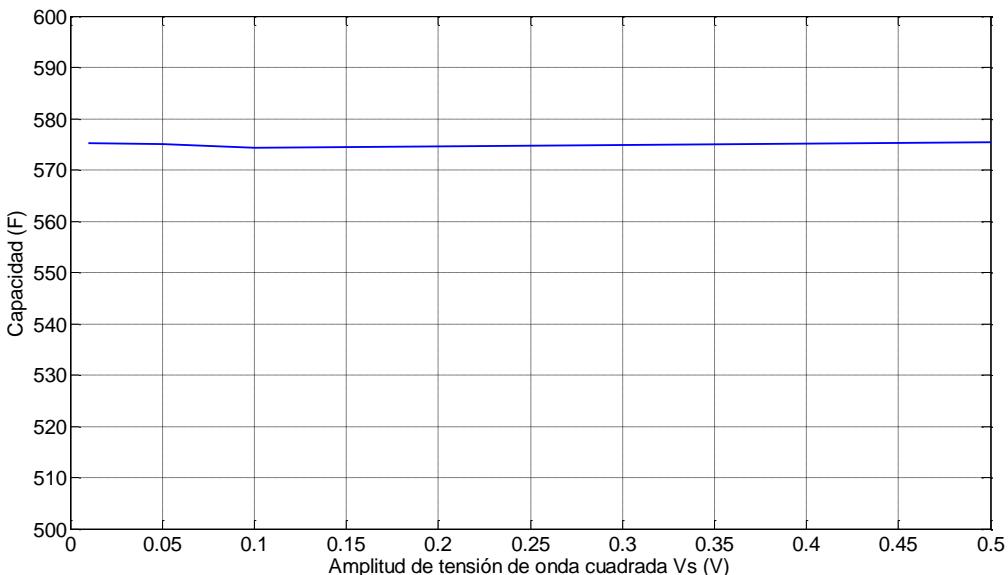


Figura 37. Variación de la capacidad con la tensión Vs (SC 470F)

Los resultados no revelan una variación significativa de la capacidad con la frecuencia ni la amplitud de la tensión aplicada, por tanto estos dos parámetros pueden escogerse en el rango seleccionado sin que la medida se vea afectada de manera significativa (debe tenerse en cuenta que la amplitud debe ser suficientemente pequeña para que la tensión de rizado con la que se estima la capacidad no sea demasiado grande y altere el valor de la estimación).

A diferencia de los parámetros anteriores, la resistencia que se conecta en serie con el supercondensador sí tiene un efecto importante en la capacidad estimada, como revelan los resultados mostrados en la Figura 38, obtenidos para el supercondensador de 1500F.

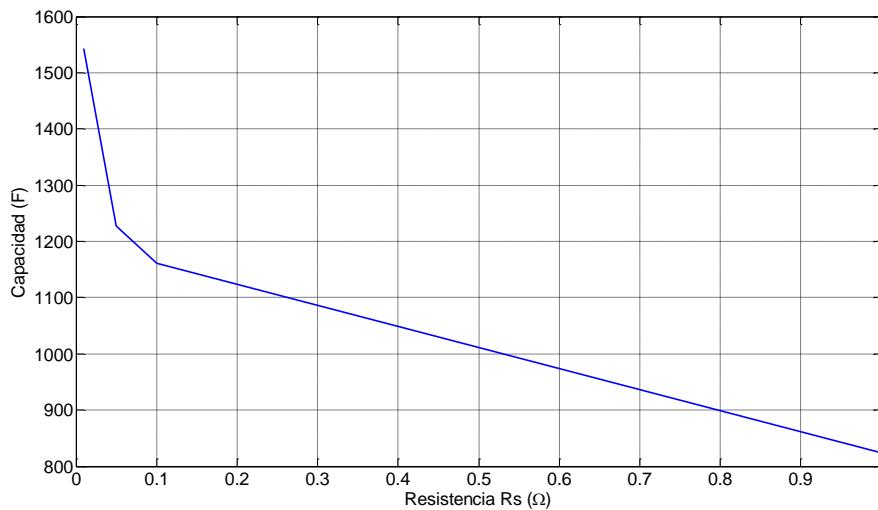


Figura 38. Variación de la capacidad con la resistencia (SC 1500F)

En efecto, el aumento de resistencia conlleva una disminución de la corriente I_s introducida en el supercondensador (la amplitud V_s se mantiene constante en cada caso). Como muestra la Ecuación 8, esta disminución de I_s daría lugar a valores de capacidad más pequeños. Aunque el valor de rizado V_p en el denominador también disminuye al bajar I_s , esta disminución es menor al estar fijada la tensión que se aplica en bornes del supercondensador (tanto V_{dc} como V_s no cambian en cada caso).

Estos resultados se repiten para el resto de supercondensadores (anexo C), por lo que puede concluirse que en el presente ensayo la elección de la resistencia muestra un impacto más significativo en la estimación de la capacidad obtenida y en la incertidumbre.

4.7.2. Tiempo de ensayo

El presente método implica realizar ciclos de amplitud muy pequeña a frecuencias fijas, por lo que tiempo de ensayo es relativamente corto ya que no requiere esperar a que la tensión en bornes del supercondensador alcance un valor determinado. El tiempo de ensayo vendrá determinado en mayor medida por el tiempo de carga del supercondensador a la tensión DC escogida.

Debe tenerse en cuenta que, previo al inicio del ensayo, es preciso ajustar el potenciómetro del circuito basado en amplificador operacional, lo que implicará un tiempo adicional.

4.7.3. Incertidumbre de la medida

Como muestra la Ecuación 8, para la estimación de la capacidad con el presente método de ensayo es necesario medir la amplitud del rizado de tensión en bornes del supercondensador, la amplitud y período de la tensión aplicada por la fuente V_s , y la resistencia R empleada. Por ello, la incertidumbre de la medida de capacidad contendrá las siguientes contribuciones:

$$U^2(C) = K_{V_s}^2 \cdot U^2(V_s) + K_{V_p}^2 \cdot U^2(V_p) + K_R^2 \cdot U^2(R) + K_t^2 \cdot U^2(t)$$

Ecuación 22

donde el término $U^2(C)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de capacidad, $U^2(V_s)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la tensión de onda cuadrada, $U^2(V_p)$ representa la incertidumbre asociada a la medida del rizado de tensión, $U^2(R)$ representa la incertidumbre asociada a la medida de la resistencia, y $U^2(t)$ representa la incertidumbre asociada a la medida del período de la señal empleada. Los coeficientes K de la Ecuación 22 pueden obtenerse a partir de la Ecuación 8 como:

$$K_{V_s} = \frac{\partial C}{\partial V_s} = \frac{T_s}{4 \cdot V_p \cdot R} \quad K_{V_p} = \frac{\partial C}{\partial V_p} = -\frac{T_s \cdot V_s}{4 \cdot (V_p)^2 \cdot R}$$

$$K_R = \frac{\partial C}{\partial R} = -\frac{T_s \cdot V_s}{4 \cdot V_p \cdot (R)^2} \quad K_t = \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{V_s}{4 \cdot V_p \cdot R}$$

Ecuación 23

Se puede observar que el período y la amplitud de la tensión V_s tienden a incrementar de igual forma la incertidumbre conforme toman valores mayores. En cambio, valores mayores de rizado de tensión y resistencia contribuirán a disminuir la incertidumbre en mayor medida al encontrarse estos parámetros elevados al cuadrado en el denominador.

El valor de la amplitud y período de tensión empleados en la estimación de la capacidad vienen definidos por la fuente de corriente empleada, mientras que el valor de rizado de tensión se debe medir en bornes del supercondensador mediante un voltímetro o multímetro y, por tanto, introducirá una incertidumbre mayor en la medida.

4.7.4. Sencillez / coste

Como se describió en el capítulo 0, este método de medida se basa en la cancelación de la resistencia de fuga del supercondensador mediante un circuito basado en amplificador operacional. Por ello la complejidad del ensayo en cuanto a instrumentación es mayor que en otros métodos de medida. El procesado de los datos no obstante es sencillo y puede realizarse mediante un osciloscopio donde sea posible medir el valor de rizado de la tensión en bornes del supercondensador, no siendo estrictamente necesario el empleo de sistemas de adquisición, reduciendo el coste en este apartado.

4.7.5. Caracterización

El método de medida permite estimar la capacidad del supercondensador a una determinada tensión, por lo que es preciso repetir el ensayo a distintos niveles de tensión para obtener la curva de capacidad frente a tensión. A diferencia de otros métodos, también permite obtener el valor de la resistencia de fuga mediante el ajuste del circuito basado en amplificado operacional. No permite obtener el valor de la resistencia serie equivalente, por lo que la caracterización ofrecida por el método está más limitada que en otros métodos de medida, haciendo este ensayo más adecuado para estimaciones de la capacidad nominal.

(fin de página)

Capítulo 5. Comparativa de métodos de medida

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar una comparación entre los resultados obtenidos tras simular cada uno de los métodos de medida presentados en capítulos anteriores.

5.1. Resultados de capacidad estimada

La Tabla 3 muestra los valores de capacidad estimados con cada método de medida simulado empleando cada uno de los tres modelos de supercondensador.

	C(F)	C(F)	C(F)
<i>Valores nominales</i>	470	1500	6200
<i>Valores estimados</i>			
1. Carga/descarga a corriente cte	582	1740	7200
2. Ensayo resistivo	487	1518	6122
3. Ciclos de tensión (14 mV/s)	520	1635	6599
4. Cronoamperometría	515	1200	4075
5. Ciclos de potencia (80W)	454	1649	7460
6. Espectroscopía de impedancia	693	2265	9629
7. Resistencia negativa	570	1545	5121

Tabla 3. Tabla de valores de capacidad obtenidos en simulación con distintos métodos de medida para tres supercondensadores

La Figura 39 muestra los resultados de la Tabla 3 de forma gráfica respecto a los valores nominales.

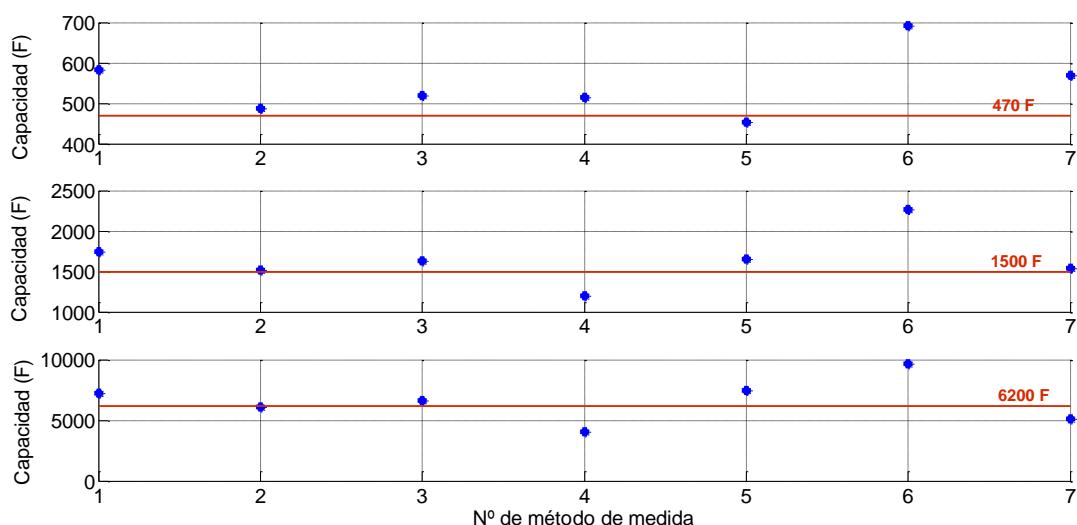


Figura 39. Valores de capacidad estimados con los distintos métodos de medida

Puede observarse una dispersión significativa en el valor arrojado por cada método de medida. Al comparar cada estimación con el valor nominal, se observa que el método de ensayo resistivo (2) proporciona valores más cercanos al nominal, mientras que el método de espectroscopía de impedancia es el que produce valores

más alejados. Hay que resaltar que el valor nominal es el valor de capacidad ofrecido por las especificaciones del fabricante obtenido en las referencias asociadas bajo condiciones nominales de funcionamiento. Cabe por tanto la posibilidad de que un método de medida se lleve a cabo en condiciones diferentes de las nominales y, por tanto, se obtenga una desviación mayor del valor obtenido. Por otro lado, cada método realiza la caracterización en base al modelo en que está basado (algunos métodos realizan la medida basándose en un modelo lineal de capacidad, mientras que otros se apoyan en su respuesta en frecuencia). Por tanto, la elección del método de medida así como las condiciones del mismo resulta de especial importancia en la caracterización del supercondensador.

El siguiente capítulo tratará sobre cada uno de los métodos de medida evaluados, las condiciones y parámetros a tener en cuenta, el modo en que estos afectan al valor de capacidad obtenido así como las condiciones recomendadas para su elección e implementación.

5.2. Comparación de resultados y conclusiones

En este apartado se recogen las conclusiones obtenidas por el estudio de sensibilidad expuesto en el capítulo 0 para los distintos métodos de medida. Se pretende con ello obtener una visión conjunta de las ventajas y desventajas de los distintos métodos, con el fin de ofrecer una valoración de los métodos que ayude en la elección del método más adecuado a las necesidades del usuario para la medida y caracterización de supercondensadores.

5.2.1. Tabla de comparación

La Tabla 4 muestra una valoración de los métodos de medida analizados, atendiendo a cada uno de los apartados estudiados en los puntos anteriores según las definiciones siguientes:

- **RESULTADOS:** se valora la medida en que los valores de capacidad obtenidos se aproximan a los valores esperados o valores nominales aportados por el fabricante. No obstante, debe tenerse en cuenta que una diferencia entre los valores estimados y los aportados por un fabricante no es necesariamente un aspecto negativo ya que depende de la forma en que el fabricante haya realizado la caracterización.
- **VARIABILIDAD:** se valora la medida en que la estimación de capacidad obtenida no se ve afectada por los valores de los distintos parámetros que puedan emplearse en el ensayo.
- **TIEMPO:** se valora la rapidez con que puede realizarse la medida.
- **INCERTIDUMBRE:** se valora la forma en que la estimación no implique mayor incertidumbre debido a la medida de distintas magnitudes, o bien la menor necesidad de emplear instrumentos de mayor precisión.
- **SENCILLEZ:** se valora la sencillez con que puede realizarse el ensayo, tanto desde el punto de vista de instrumentación como desde el punto de vista de procesamiento necesario para obtener la estimación de capacidad.
- **COSTE:** se valora el coste asociado a los instrumentos necesarios para realizar el ensayo, siendo mejor el método que requiera un coste menor.

- CARACTERIZACIÓN: se valora la información que el método permite reunir sobre el comportamiento del supercondensador, así como la forma en que el modelo empleado por el método de medida puede ser representativo del comportamiento de un supercondensador real.

(fin de página)

MÉTODO	RESULTADOS	VARIABILIDAD	TIEMPO	INCERTIDUMBRE	SENCILLEZ	COSTE	CARACTERIZACIÓN	VALORACIÓN GLOBAL
Carga/descarga I cte	👍👍	👍	👍	👍👍👍	👍	👍👍	👍	21
Método resistivo	👍👍👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	25
Ciclos de tensión	👍👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	14
Chronoamperometría	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	19
Ciclos de potencia	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	16
Espectroscopia	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	14
Resistencia negativa	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	19

Tabla 4. Tabla comparativa de los distintos métodos de medida

5.2.2. Recomendaciones extraídas

A raíz de los resultados obtenidos y reflejados de manera cualitativa en la Tabla 4, se pueden extraer diversas conclusiones y recomendaciones en cuanto a la idoneidad de un método para unas necesidades determinadas.

Puede observarse cómo los resultados más próximos a los valores nominales se obtienen mediante el método resistivo, un método que también es sencillo y de bajo coste, o el método basado en ciclos de tensión, aunque este último tiene la desventaja de ser un método más complejo de mayor variabilidad y coste, además de necesitar tiempos más largos.

Por otro lado, si se busca un método rápido y sencillo, el ensayo de cronoamperometría se presenta como el más indicado, si bien el método requerirá instrumentos de mayor precisión.

En casos donde se busque una caracterización más completa y un análisis más profundo del comportamiento del supercondensador, los métodos basados en ciclos de potencia o espectroscopía de impedancia pueden aportar más posibilidades, en especial el primero ya que muestra valores más próximos a los nominales.

La elección del método de medida también se verá condicionada por el tipo de supercondensador o la capacidad del mismo, ya que para supercondensadores pequeños algunos ensayos como el basado en carga y descarga a corriente constante podría ofrecer una forma sencilla y flexible de estimar la capacidad sin prolongar el tiempo de ensayo a tiempos demasiado largos. En casos donde la capacidad del supercondensador sea mayor, es más recomendable acudir a métodos donde la estimación se realice en los primeros instantes y, por tanto, los tiempos de ensayo sean más cortos.

(fin de página)

Capítulo 6. Estudio energético

A partir de los resultados obtenidos en capítulos anteriores, se propone un método adicional que aporta algunas ventajas sobre los métodos observados, como una optimización de los tiempos de ensayo, simplicidad en la realización de la medida y la obtención de valores estimados más próximos a los nominales. Para ello se realiza un estudio basado en la energía almacenada por el supercondensador.

6.1. Base teórica

El método propuesto se basa en la energía almacenada E en la rama de dinámica rápida de un supercondensador. La energía en cada rama, según la Figura 4, puede aproximarse [16] mediante:

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot C_{io} \cdot V^2 + \frac{1}{3} \cdot C_{il} \cdot V^3$$

Ecuación 24

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot V^2$$

Ecuación 25

$$E_3 = \frac{1}{2} \cdot C_{cl} \cdot V^2$$

Ecuación 26

donde V es la tensión a la que se encuentra cargado el supercondensador, C_{io} y C_{il} son parámetros que representan las capacidades de la rama de dinámica rápida del supercondensador, mientras C_d y C_{cl} son las capacidades de las ramas de dinámica más lenta. Estas ramas generalmente poseen resistencias mayores debido a las cuales la carga es mucho menor que en la rama primera, por lo que en tiempos cortos de ensayo la tensión en estas ramas es muy pequeña, y en consecuencia su energía. Por ello en el presente estudio se considerará únicamente la primera rama de dinámica rápida como aproximación de la energía almacenada por el supercondensador.

La energía inicial disponible en el supercondensador al iniciarse la descarga se distribuye principalmente entre la energía liberada a través de la corriente de descarga en bornes del supercondensador, y la energía disipada en la resistencia interna equivalente (Figura 40). La Figura 41 muestra la energía útil (verde) obtenida en bornes de un supercondensador (simulación para el modelo de 470F), en una descarga de 2.3V hasta 0V, la energía disipada por la resistencia interna equivalente (rojo), así como la suma de las dos anteriores (azul). Como puede apreciarse, la energía que se extrae en bornes del supercondensador es menor conforme aumenta la corriente de descarga, ya que al aumentar la corriente aumenta la caída de tensión en la resistencia interna R .

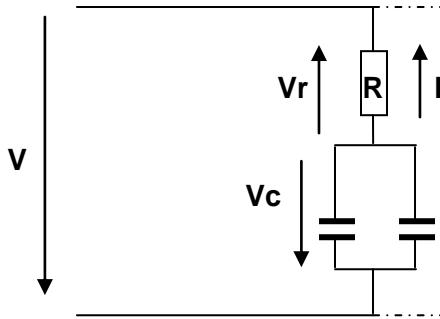


Figura 40. Esquema de la rama de dinámica rápida de un supercondensador.

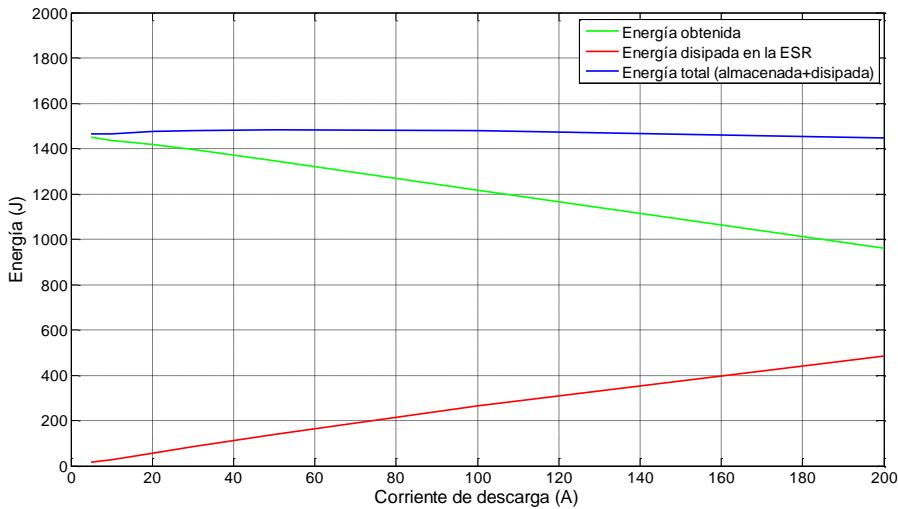


Figura 41. Energías de un supercondensador 470F (descarga de 2.3 a 0 V).

De esta manera, debe tenerse en cuenta el valor de esta resistencia R para poder estimar la energía almacenada ($V_c^* I$) a partir de la potencia medida en bornes del supercondensador ($V^* I$). Así, según la Figura 40, la energía que se puede extraer E_c puede estimarse como:

$$\begin{aligned}
 V &= V_c - V_r \Rightarrow V_c = V + V_r = V + I \cdot R \Rightarrow \\
 &\Rightarrow P_c = V_c \cdot I = V \cdot I + I^2 \cdot R \Rightarrow \\
 &\Rightarrow E_c = \int P_c = \int V \cdot I + \int I^2 \cdot R \cong \int V \cdot I + I^2 \cdot R \cdot t_c
 \end{aligned}$$

Ecuación 27

Esta estimación supone asumir que la corriente I que fluye por la primera rama del supercondensador es constante y sale en su totalidad por los bornes. Sin embargo, la simulación muestra que parte puede fluir al resto de ramas del supercondensador en lo que se denomina *corriente de transferencia interna*, que obedece a un ajuste de la carga del supercondensador. No obstante, esta corriente no es medible y para corrientes altas el valor de esta corriente de transferencia es muy pequeño en comparación con la corriente de descarga (Figura 42) y, por tanto, su efecto en la estimación final no es significativo.

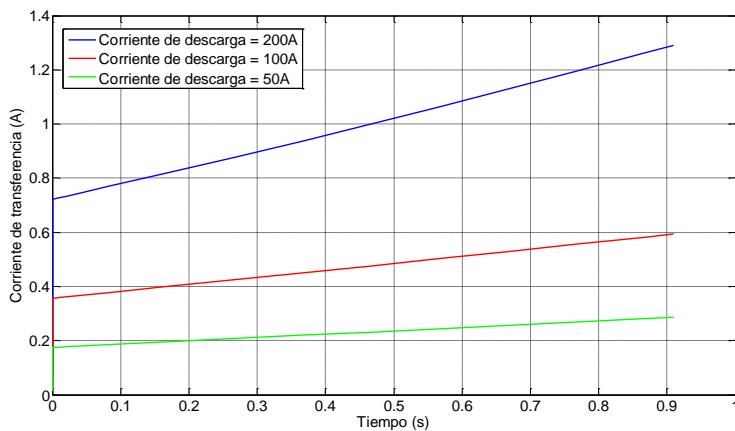


Figura 42. Corriente interna de transferencia.

Por tanto, la estimación de la energía extraída al pasar de una tensión V_1 a una tensión V_2 puede estimarse mediante el valor de tensión medido en bornes del supercondensador y la corriente de descarga impuesta por el ensayo (Ecuación 28).

$$E_{12} = \int_{V_1}^{V_2} I \cdot V + I^2 \cdot R \cdot t_{12}$$

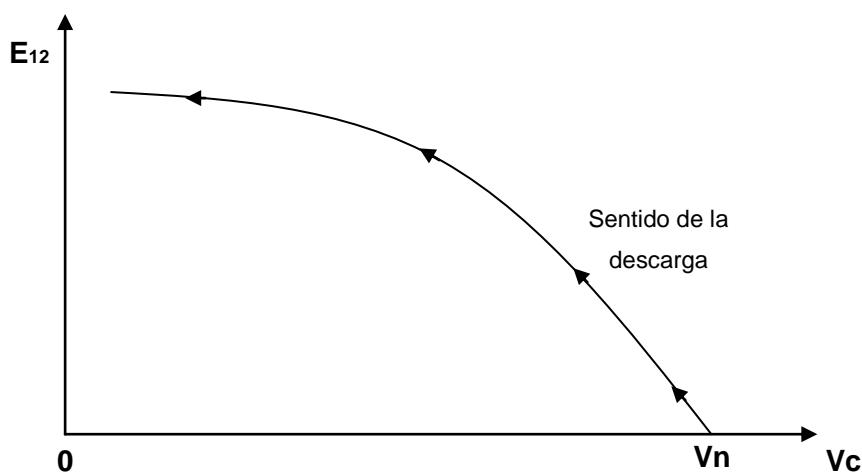
Ecuación 28

La resistencia interna equivalente R puede obtenerse fácilmente a través de la caída de tensión medida en bornes del supercondensador al terminar la carga una vez se ha alcanzado la tensión nominal (Ecuación 29).

$$R = \frac{\Delta V}{I_{c \arg a}}$$

Ecuación 29

Si en la Ecuación 28 se fija V_1 = tensión nominal V_n (inicio de descarga), y $V_2 = V_c$, empleando dicha ecuación para cada valor de V_c estimado durante la descarga puede representarse una curva de energía extraída frente a la tensión V_c , similar a la mostrada en la Figura 43.

Figura 43. Curva tipo de energía extraída durante la descarga desde tensión nominal V_n .

La curva mostrada en la Figura 43 obedecería a la Ecuación 30 (obtenida a partir de la Ecuación 25).

$$E_{12} = \left(\frac{1}{2} C_{io} \cdot V_n^2 + \frac{1}{3} C_{il} \cdot V_n^3 \right) - \left(\frac{1}{2} C_{io} \cdot V_c^2 + \frac{1}{3} C_{il} \cdot V_c^3 \right) = \frac{1}{2} C_{io} \cdot (V_n^2 - V_c^2) + \frac{1}{3} C_{il} \cdot (V_n^3 - V_c^3)$$

Ecuación 30

la cual puede ajustarse a una ecuación cúbica del tipo $f(V_c) = A + B \cdot V_c^2 + C \cdot V_c^3$ donde los coeficientes obtenidos del ajuste permiten conocer los coeficientes C_{io} y C_{il} mediante la Ecuación 31.

$$C_{io} = -2 * B \quad C_{il} = -3 * C$$

Ecuación 31

La suma de ambos coeficientes puede emplearse como valor de la capacidad representativa del supercondensador.

$$C = C_{io} + C_{il}$$

Ecuación 32

6.2. Ejemplo de aplicación

En este apartado se muestra el método anterior aplicado al supercondensador de 470F a través del modelo de simulación empleado en los estudios anteriores. Para ello se simula una carga de 0 V a 2.3 V, y la posterior descarga hasta 0 V.

Con una corriente de carga a 40 A se obtiene una caída de 0.1 V en la tensión en bornes del supercondensador, por lo que la resistencia interna equivalente se estima como:

$$R = \frac{0.1V}{40A} = 2.5 \text{ m}\Omega$$

Ecuación 33

que corresponde con el valor del modelo.

A continuación se procede a realizar distintas descargas desde 2.3 V (tensión nominal), empleando corrientes de descarga de 5, 10, 20, 30, 50, 100 y 200 A, con el objetivo de observar la variación del valor estimado C en función de la corriente. La Figura 44 muestra la evolución de la tensión medida en bornes del supercondensador para cada descarga efectuada.

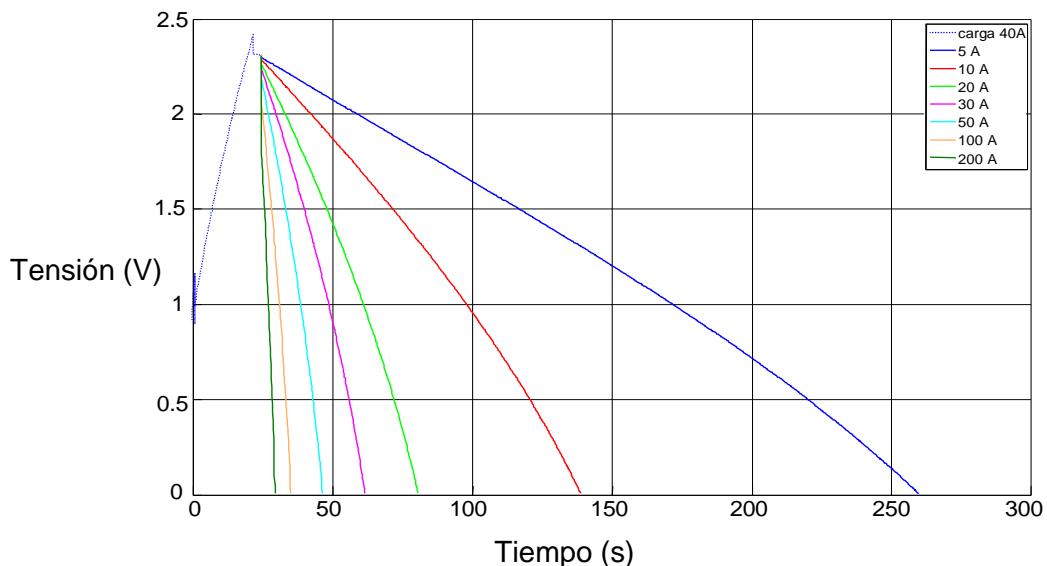


Figura 44. Tensión en bornes del supercondensador para distintas descargas.

La Figura 45 representa la energía extraída a partir de la Ecuación 28 frente a la tensión V_c .

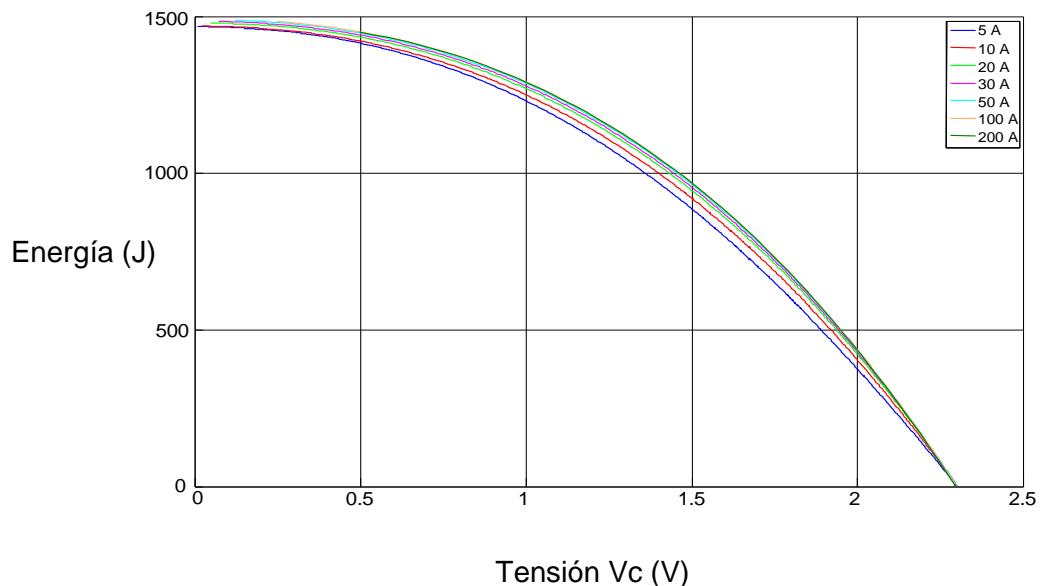


Figura 45. Energía extraída para cada descarga.

Ajustando cada curva a una función cúbica, se obtienen los distintos coeficientes B, C y, con ello, los valores de capacidad estimada de la Tabla 5.

Corriente (A)	coef B	coef C	Capacidad estimada (F)
5	288.36	7.16	598.21
10	213.17	33.30	526.26
20	173.82	48.17	492.17
30	161.06	53.28	481.99
50	150.87	57.47	474.16
100	143.24	60.68	468.53
200	138.34	62.56	464.40

Tabla 5. Valores de capacidad estimados con cada descarga para el supercondensador 470F.

Los resultados muestran que a partir de 50 A los valores se aproximan al valor nominal de 470 F.

A continuación se repiten los cálculos para los otros dos supercondensadores bajo estudio (1500F y 6200F) para las distintas corrientes de descarga.

Corriente (A)	coef B	coef C	Capacidad estimada (F)
5	1237.6	60.0011	2655.2
10	1002.6	7.3062	2027.2
20	752.21	87.2215	1766.1
30	649.56	123.04	1668.3
50	566.48	154.14	1595.4
100	506.99	178.26	1548.8
200	478.46	190.55	1528.6

Tabla 6. Valores de capacidad estimados con cada descarga para el supercondensador 1500F.

Corriente (A)	coef B	coef C	Capacidad estimada (F)
5	6382.8	466.14	14164.02
10	5111.8	199.37	10821.73
20	4303.9	1.09	8611.09
30	3745.8	160.51	7973.13
50	3060.1	374.36	7243.28
100	2420.2	595.84	6627.92
200	2106.2	719.01	6369.43

Tabla 7. Valores de capacidad estimados con cada descarga para el supercondensador 6200F.

En ambos casos las estimaciones más próximas al valor nominal se obtienen para las corrientes más altas (200 A), debido en gran parte a la corriente de transferencia interna que aleja los valores de energía reales de los estimados.

6.3. Conclusiones del estudio

Los resultados obtenidos han mostrado que la medición de la energía almacenada por un supercondensador depende de la corriente empleada, debido a la resistencia serie equivalente del supercondensador y a la distribución de carga que el supercondensador experimenta internamente.

El método presentado puede reducir los tiempos de ensayo de los métodos basados en carga/descarga a corriente constante presentados en capítulos anteriores, ya que permite aumentar la corriente sin que el valor de capacidad estimado se aleje del valor nominal. Emplear corrientes más elevadas, además de mejorar la estimación permite reducir el efecto de la corriente de transferencia. De hecho, la distribución de carga debido a esta corriente hace que en otros métodos de ensayo sea recomendable esperar un tiempo tras finalizar la carga antes de iniciar la descarga (la norma IEC 62391:2006 establece 30 min.). En este caso al aumentar la corriente de descarga, el efecto de la corriente interna de transferencia es menor, por lo que no es necesario esperar entre carga y descarga. La Figura 46 muestra valores de capacidad obtenidos a partir de dos descargas, la primera realizada inmediatamente después de finalizar la carga, y la segunda realizada tras esperar 30 min.

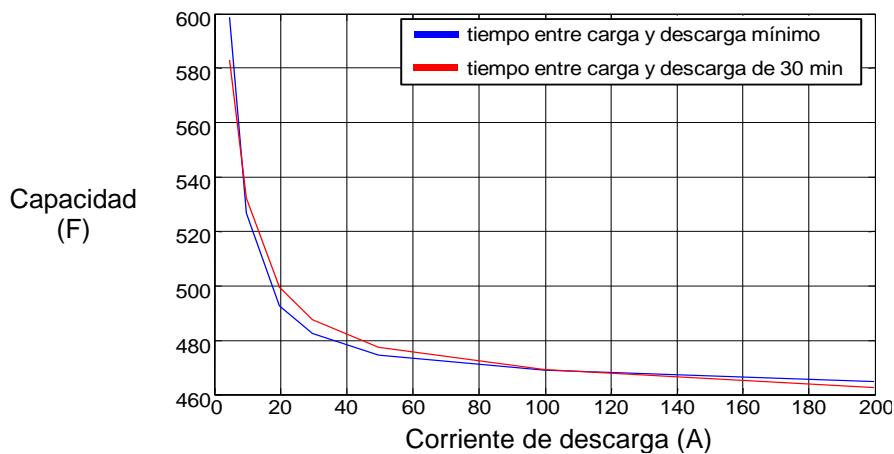


Figura 46. Capacidad estimada para distintas corrientes de descarga.

Al comparar ambos casos se observa que para corrientes de descarga altas los valores son similares en un caso y en otro.

(fin de página)

Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras

Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto las distintas características de cada método, que en cada caso han llevado a la estimación de valores para la capacidad con una dispersión significativa. Cada método de medida ha mostrado la necesidad de definir ciertos parámetros que, si bien en algunos casos se encuentran ya tabulados, en otros el parámetro constituye un aspecto a ajustar.

La evaluación de los distintos métodos de medida ha revelado que mientras unos métodos presentan más ventajas en términos de rapidez y flexibilidad, otros aportan más información o presentan valores más estables. Una evaluación global muestra que el método de cronoamperometría y el método resistivo son más indicados para la medida, por sus buenas prestaciones en cuanto a la estimación obtenida, estabilidad de resultados, tiempo requerido o sencillez, mientras que el estudio ha mostrado otros métodos como los basados en cargas y descargas a intensidad constante menos adecuados por el largo tiempo que pueden requerir.

Con el objetivo de mejorar las prestaciones de los métodos basados en descarga a intensidad constante, se ha propuesto una variante basada en un estudio energético. Esta propuesta ha presentado mejores resultados a intensidades altas, lo cuál permitiría realizar estimaciones en menores tiempos de ensayo. Aunque este método requiere un procesado más complejo y un sistema de adquisición que permita registrar los datos medidos, las estimaciones obtenidas a altas corrientes de descarga son próximas a los valores nominales por lo que puede suponer una alternativa a la medida especialmente en supercondensadores de gran capacidad donde el uso de corrientes de descarga pequeñas hace inviable el ensayo debido al excesivo tiempo requerido.

Finalmente, el estudio realizado ha mostrado que la caracterización de un supercondensador resulta incompleta cuando se realiza únicamente mediante un valor de capacidad o valor nominal, debido a la dependencia de ésta con la tensión. Una forma de recoger el comportamiento de un supercondensador es ajustar su modelo de la forma expuesta en este estudio, lo cuál puede ser de gran interés en aquellos casos donde el usuario no sólo necesite un valor nominal de capacidad, sino también una forma de poder estudiar su comportamiento en distintas condiciones. Esta es la alternativa que siempre proporcionará mejores resultados de cara a la medida y caracterización de supercondensadores.

El estudio también permite desarrollar líneas futuras como la normalización del ensayo de ciclos de tensión, de manera que de forma análoga al ensayo de carga y descarga a corriente constante, exista un documento donde queden definidas y especificadas las características y parámetros de la medida a realizar con este método de ensayo.

Otros estudios como el análisis de la influencia de la temperatura en el valor medido pueden arrojar resultados interesantes, así como el estudio de la distribución de las cargas a nivel interno dentro del supercondensador entre las distintas ramas.

ANEXO A. ENSAYO DE AJUSTE DEL MODELO NO LINEAL

A.1. Objetivo

Mostrar el ensayo [16] y las ecuaciones empleadas para el ajuste de los parámetros del modelo no lineal.

A.2. Ensayo de ajuste de parámetros

La Figura A.1 muestra la evolución del ensayo en corriente y en tensión en bornes del supercondensador. En la figura se muestran los sucesivos instantes temporales empleados en la identificación de los parámetros, mostrados en las ecuaciones (Ecuación A.1-Ecuación A.10).

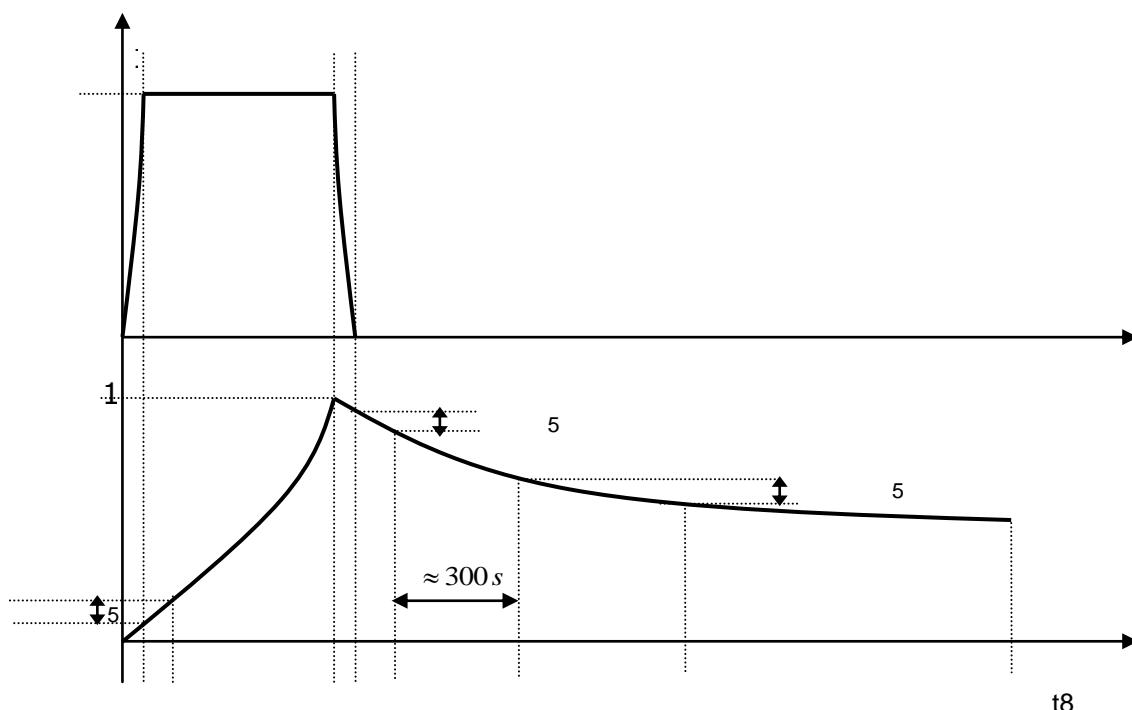


Figura A.1. Ensayo para la identificación experimental de parámetros del modelo no lineal.

Los parámetros de la primera rama se pueden obtener como:

$$R_i = \frac{V(t_1)}{I_{ch}}$$

Ecuación A.1

$$C_{i0} = I_{ch} \cdot \frac{t_2 - t_1}{V(t_2) - V(t_1)}$$

Ecuación A.2

$$C_{i1} = \frac{2}{V(t_4)} \left(\frac{I_{ch} \cdot (t_4 - t_1)}{V(t_4)} - C_{i0} \right)$$

Ecuación A.3

Los intervalos 0-t₁ y t₃-t₄ corresponden a los tiempos de subida y bajada del pulso de corriente (normalmente se puede tomar 20 ms), a la vez que los intervalos t₁-t₂ y t₄-t₅ corresponden al tiempo en que la tensión en el supercondensador varía un determinado valor suficientemente pequeño (se suele tomar 50 mV).

En el caso de la segunda rama, los parámetros se calculan como:

$$R_d = \frac{V(t_4) - (V(t_4) - V(t_5))/2}{C_{diff} \cdot (V(t_4) - V(t_5))} \cdot (t_5 - t_4)$$

Ecuación A.4

con

$$C_{diff} = C_{i0} + C_{i1} \cdot (V(t_4) - (V(t_4) - V(t_5))/2)$$

Ecuación A.5

$$C_d = \frac{Q_{tot}}{V(t_6)} - \left(C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \cdot V(t_6) \right)$$

Ecuación A.6

donde la carga total puede obtenerse como

$$Q_{tot} = I_{ch} \cdot (t_4 - t_1)$$

Ecuación A.7

El intervalo t₅-t₆ corresponde a la constante temporal 3·R_d·C_d, la cual puede estimarse como 300s [16].

La rama de dinámica más lenta puede identificarse como:

$$R_l = \frac{V(t_6) - (V(t_6) - V(t_7))/2}{C_{diff} \cdot (V(t_6) - V(t_7))} \cdot (t_7 - t_6)$$

Ecuación A.8

$$C_l = \frac{Q_{tot}}{V(t_8)} - \left(C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \cdot V(t_8) \right)$$

Ecuación A.9

con

$$Q_{tot} = I_{ch} \cdot (t_4 - t_1)$$

Ecuación A.10

Al tratarse de la dinámica más lenta del supercondensador, el instante t_8 se escoge al cabo de un tiempo suficientemente largo (30 min).

(fin de página)

ANEXO B. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL MÉTODO DE CRONOAMPEROMETRÍA

B.1. Objetivo

Valores de capacidad estimada mediante el método de cronoamperometría, variando distintos parámetros de ensayo.

B.2. Supercondensadores a estudio

En este estudio se han tomado los siguientes tres supercondensadores:

- SC 470 F (2.3 V de tensión nominal) [16]
- SC 1500 F (2.3 V de tensión nominal) [16]
- SC 6200 F (2.3 V de tensión nominal) (escalado de [16])

A continuación se muestran los resultados obtenidos al estimar la capacidad de cada SC con el presente método de medida mediante simulaciones con cada uno de los tres supercondensadores.

B.3. Resultados de simulación

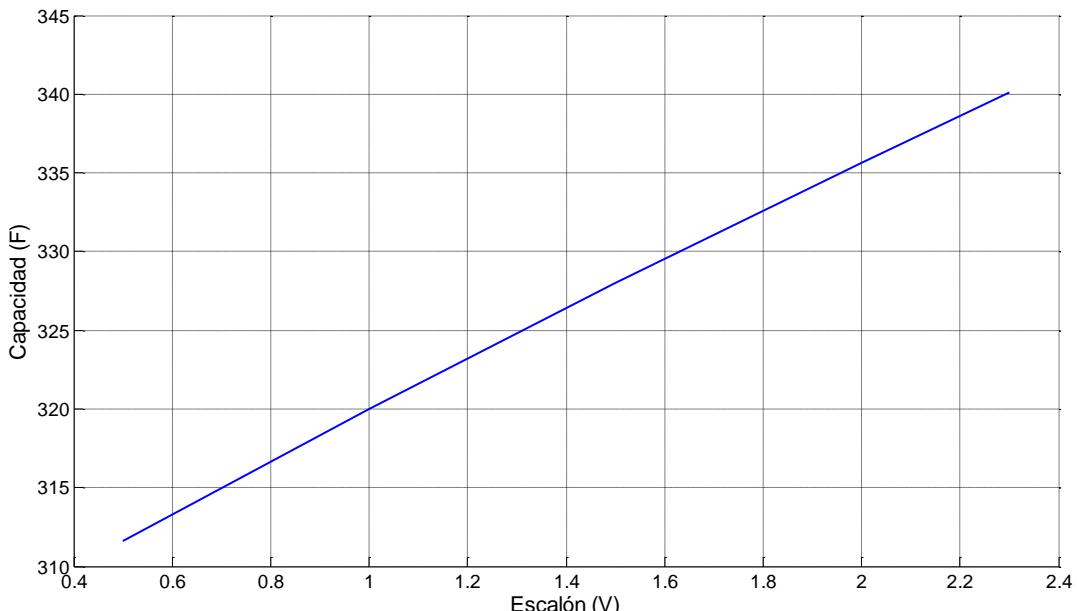


Figura B.1. Capacidad del SC 470F en función de la tensión escalón

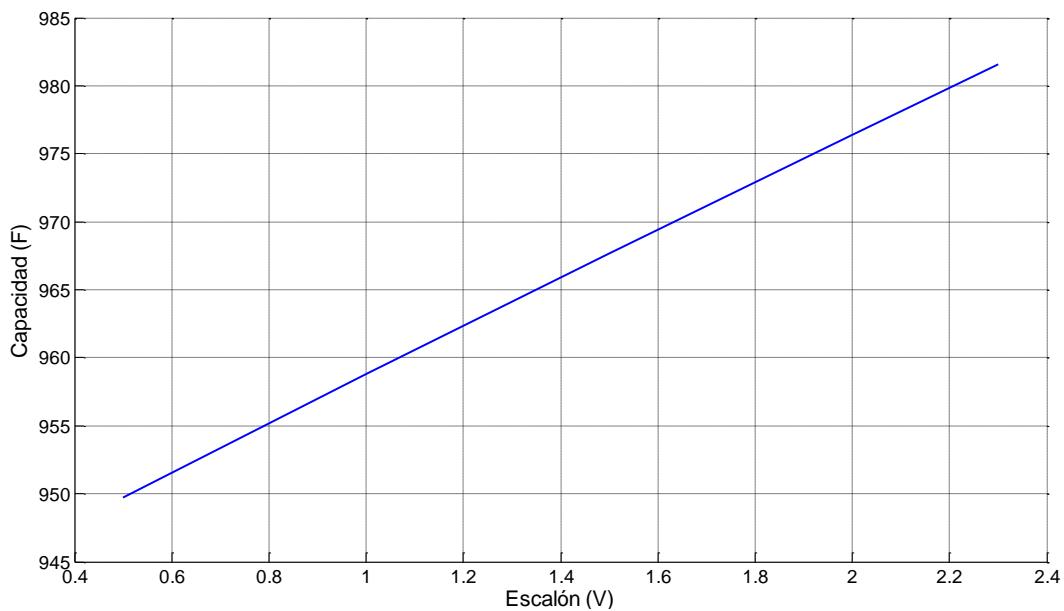


Figura B.2. Capacidad del SC 1500F en función de la tensión escalón

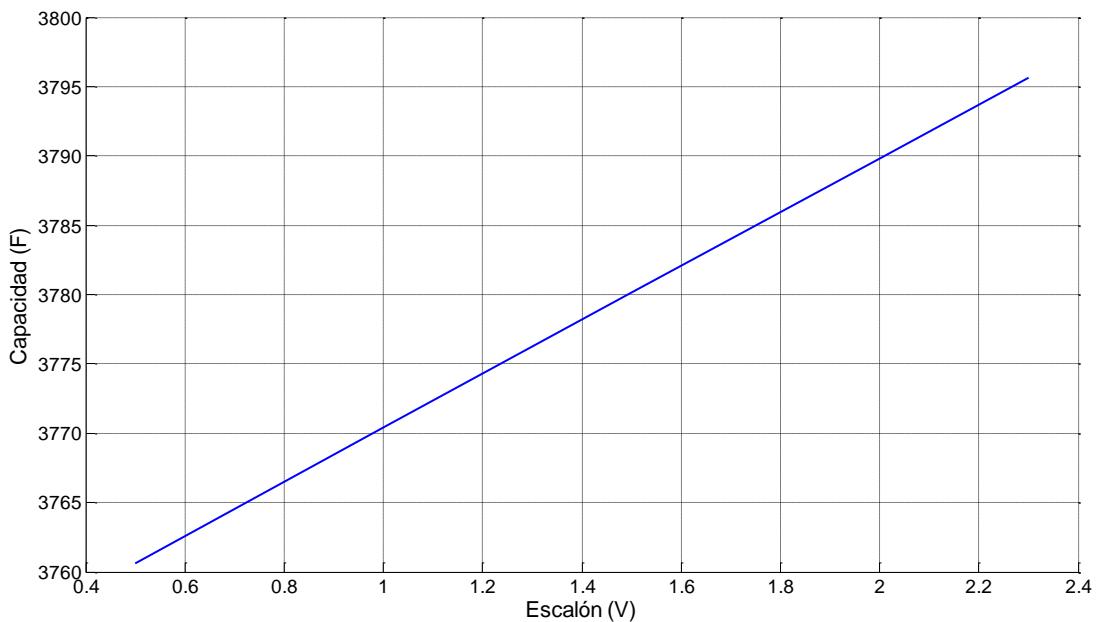


Figura B.3. Capacidad del SC 6200F en función de la tensión escalón

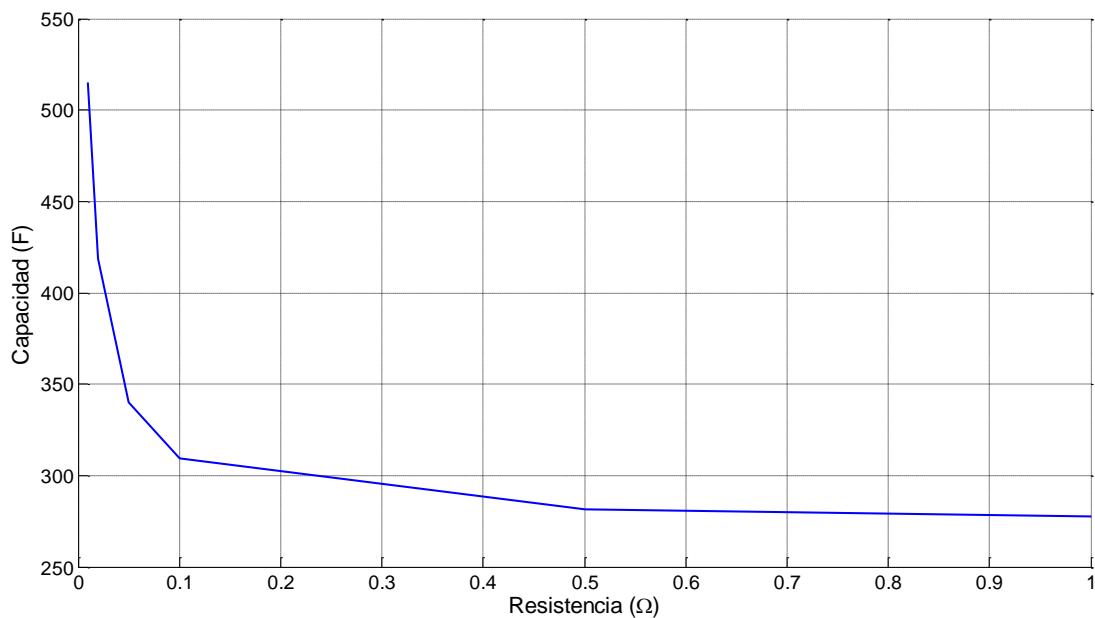


Figura B.4. Capacidad del SC 470F en función de la resistencia

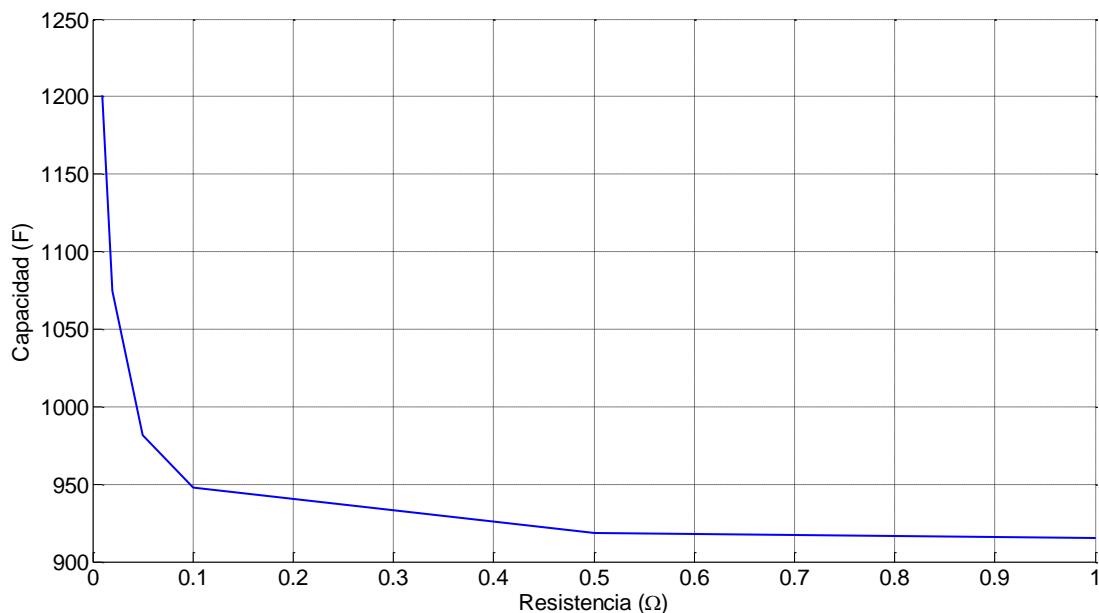


Figura B.5. Capacidad del SC 1500F en función de la resistencia

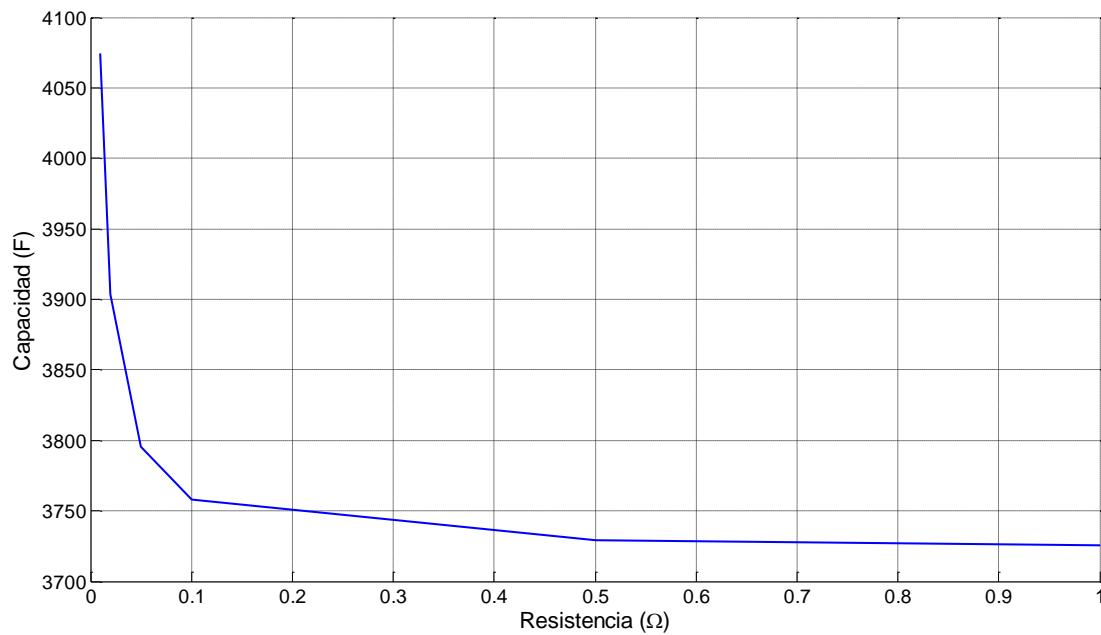


Figura B.6. Capacidad del SC 6200F en función de la resistencia

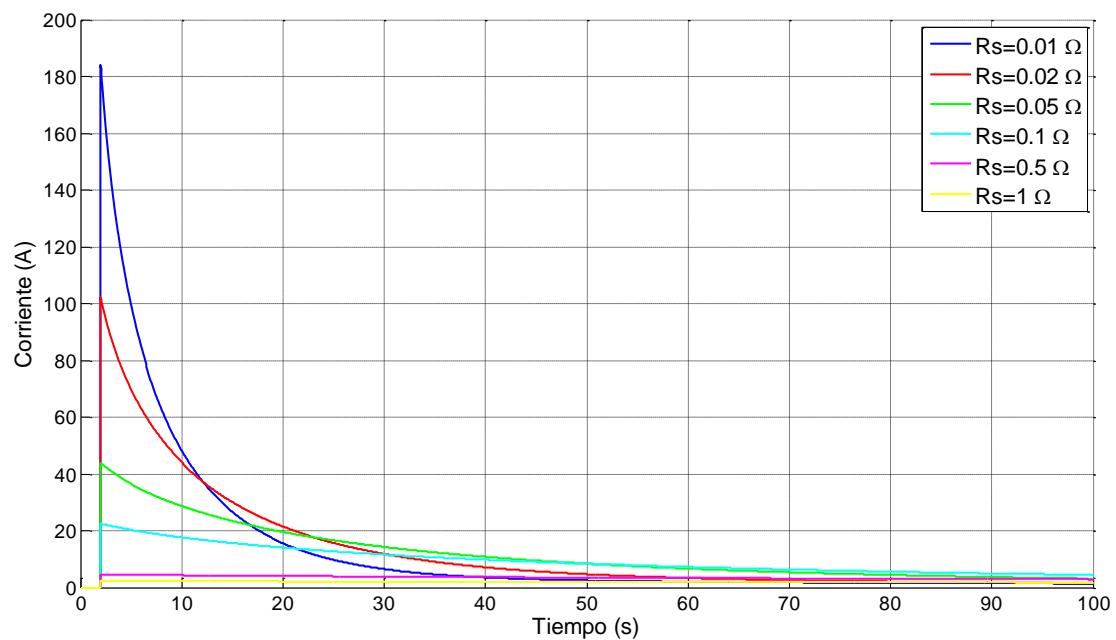


Figura B.7. Corriente de carga del SC 470F tras un escalón de tensión

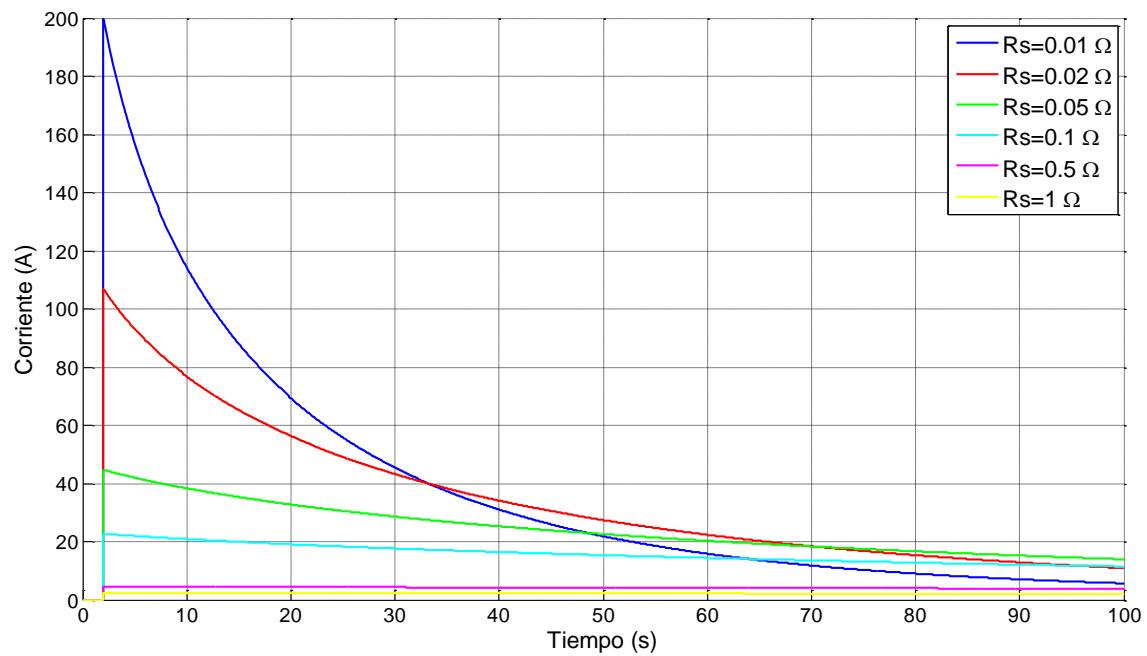


Figura B.8. Corriente de carga del SC 1500F tras un escalón de tensión

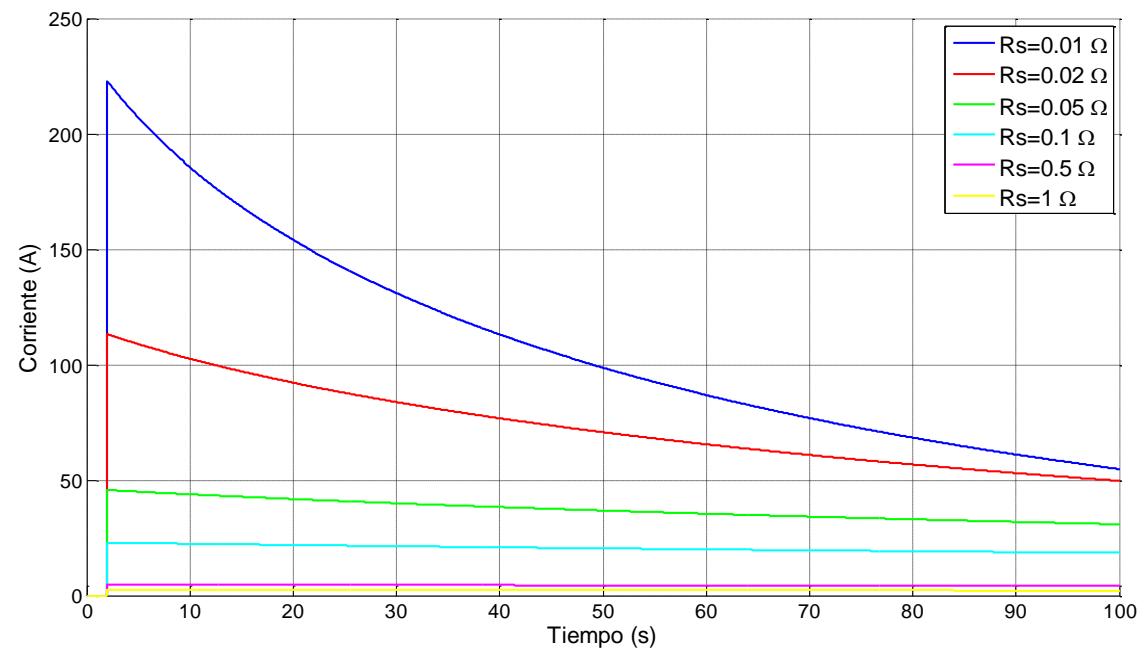


Figura B.9. Corriente de carga del SC 6200F tras un escalón de tensión

ANEXO C. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL MÉTODO DE RESISTENCIA NEGATIVA

C.1. Objetivo

Valores de capacidad estimada mediante el método de resistencia negativa, variando distintos parámetros de ensayo

C.2. Supercondensadores a estudio

En este estudio se han tomado los siguientes tres supercondensadores:

- SC 470 F (2.3 V de tensión nominal) [16]
- SC 1500 F (2.3 V de tensión nominal) [16]
- SC 6200 F (2.3 V de tensión nominal) (escalado de [16])

A continuación se muestran los resultados obtenidos al estimar la capacidad de cada SC con el presente método de medida mediante simulaciones con cada uno de los tres supercondensadores.

C.3. Resultados de simulación

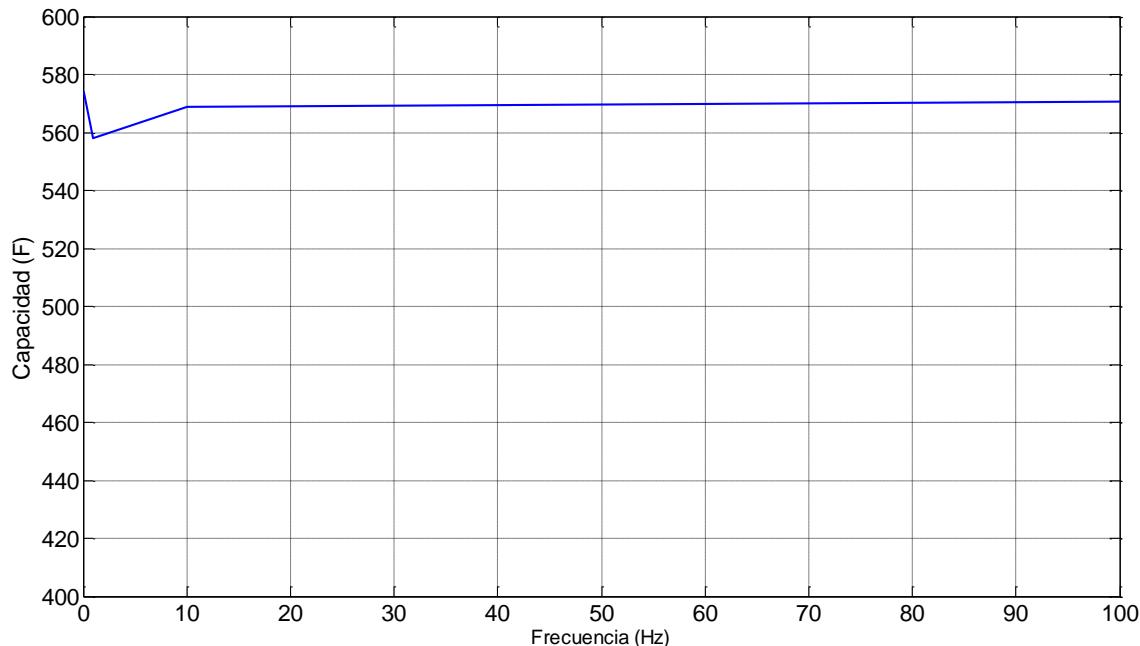


Figura C.1. Variación de la capacidad con el período T_s en el SC 470F

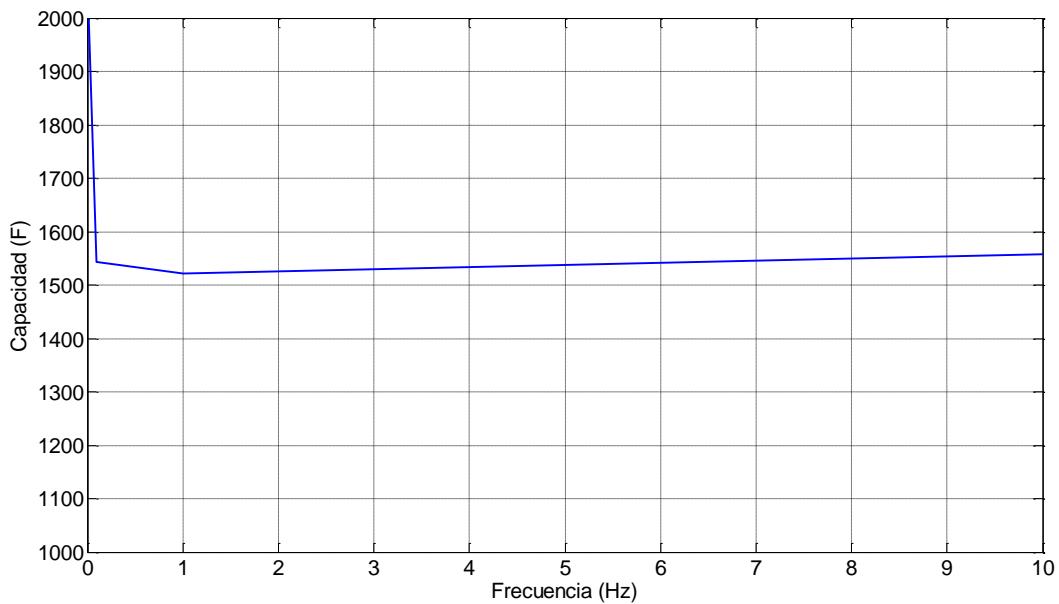


Figura C.2. Variación de la capacidad con el período Ts en el SC 1500F

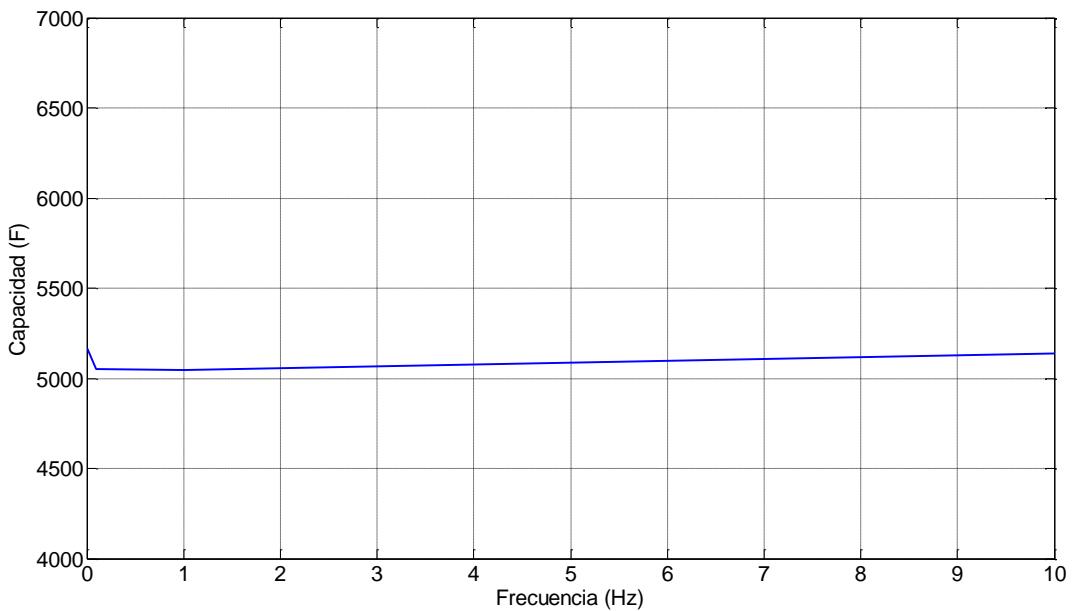


Figura C.3. Variación de la capacidad con el período Ts en el SC 6200F

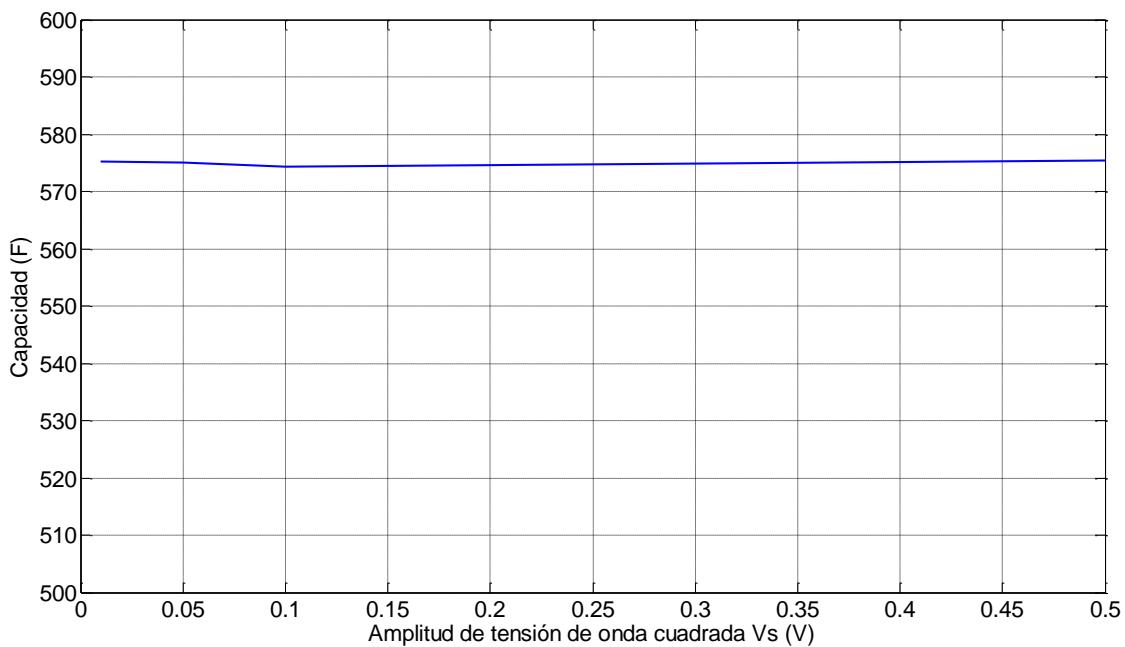


Figura C.4. Variación de la capacidad con la tensión Vs en el SC 470F

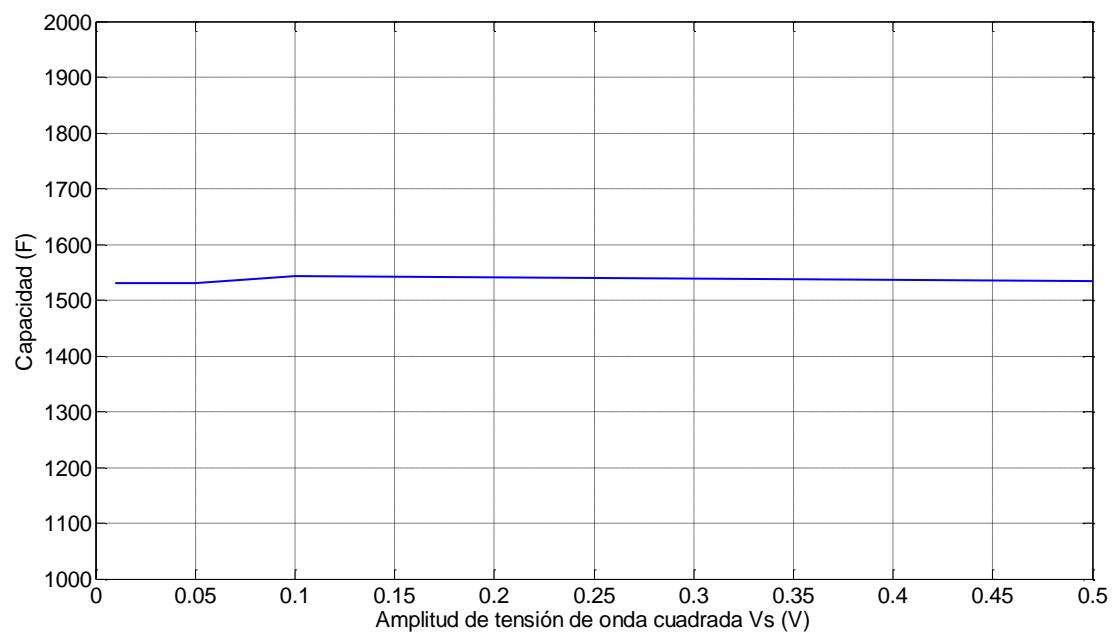


Figura C.5. Variación de la capacidad con la tensión Vs en el SC 1500F

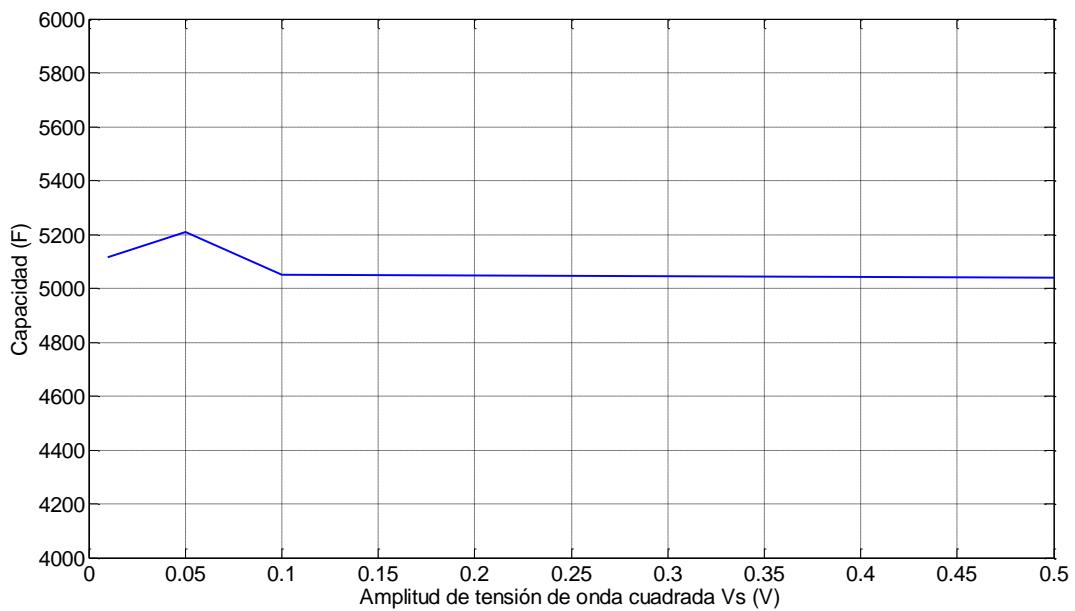


Figura C.6. Variación de la capacidad con la tensión V_s en el SC 6200F

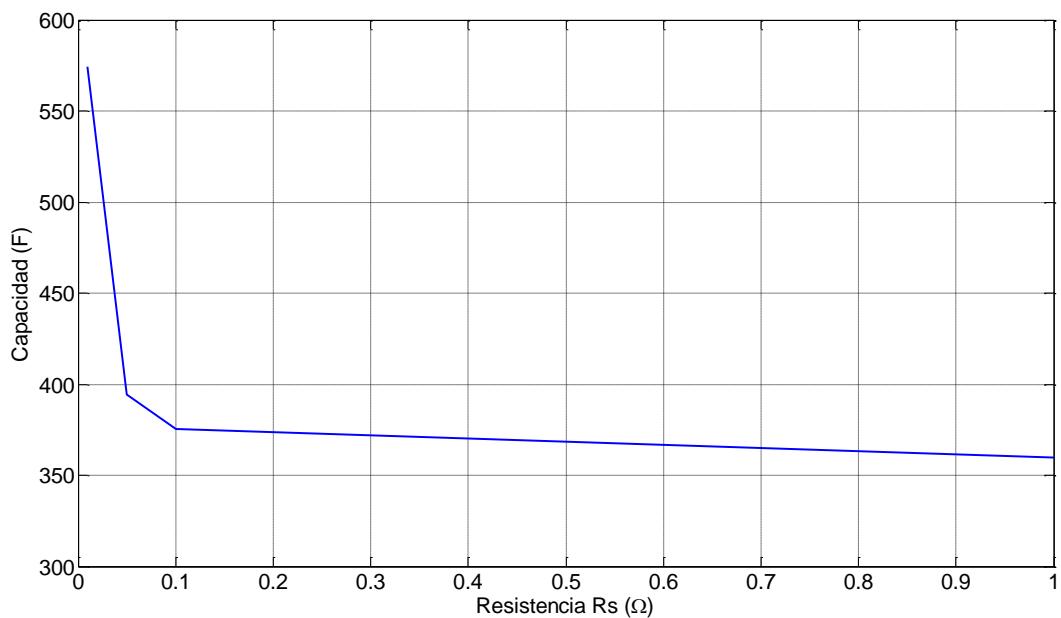


Figura C.7. Variación de la capacidad con la resistencia en el SC 470F

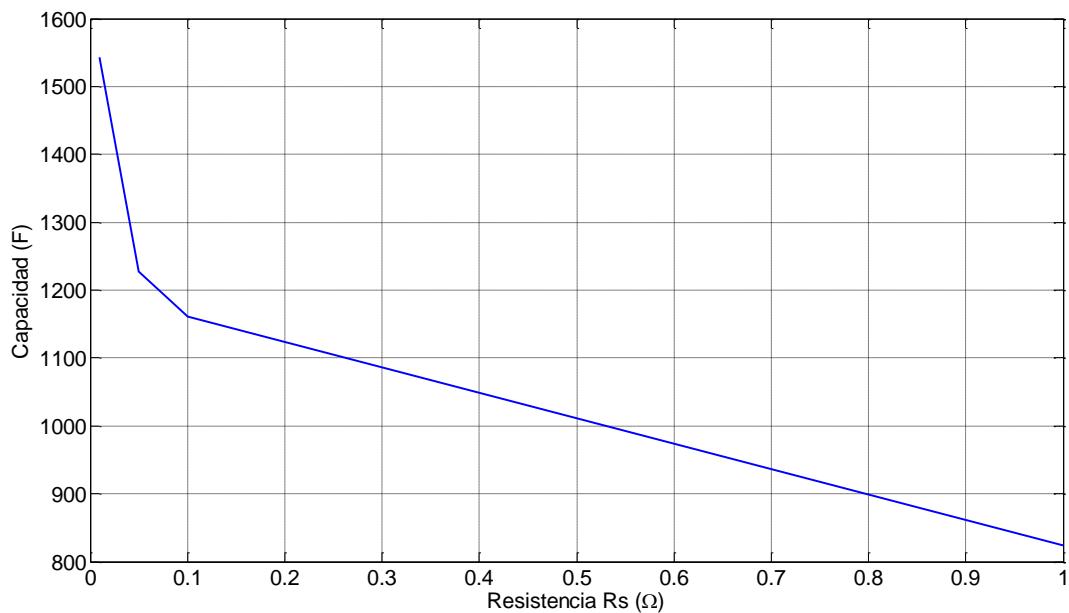


Figura C.8. Variación de la capacidad con la resistencia en el SC 1500F

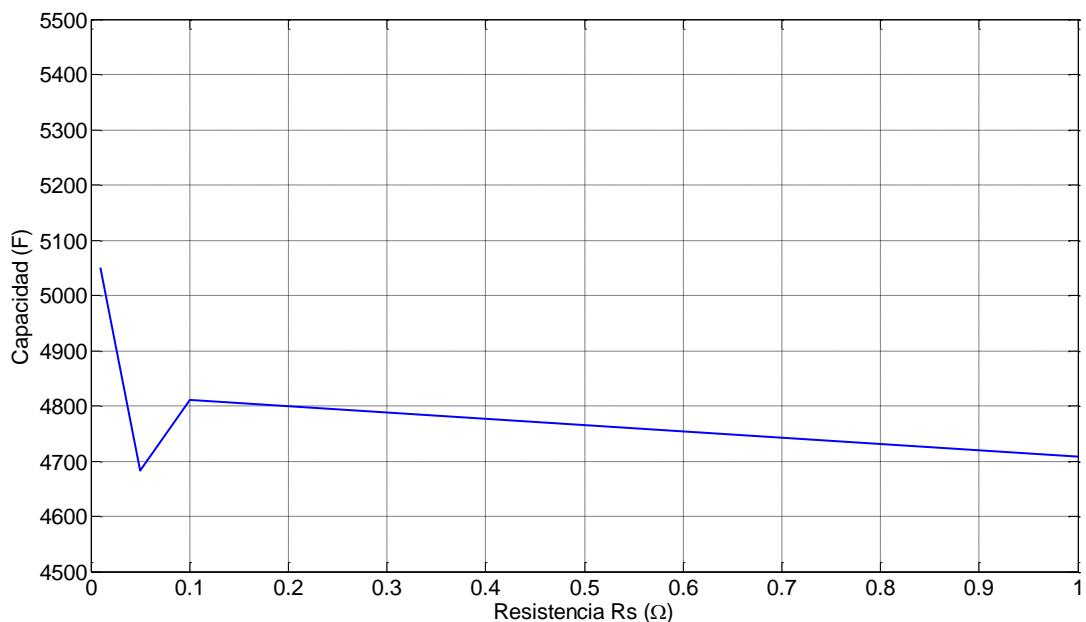


Figura C.9. Variación de la capacidad con la resistencia en el SC 6200F

Bibliografía

- [1] C. Alippi, C. Galper, "Energy storage mechanisms in low power embedded systems: twin batteries and supercapacitors", Wireless VITAE'09, Aalborg, Dinamarca, 2009, pag. 31-35.
- [2] X. Gao, S. Wang, T. Wei, "Energy Management Method of Supercapacitors Storage System for UPS Applications", IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Chengdu, China, 2009, pag. 68-72.
- [3] A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, BOOSTCAP® Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications, Second International Advanced Automotive Battery Conference (AABC), Las Vegas, Nevada, 2002.
- [4] A. Chu, P. Braatz, "Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles", I. Initial characterization. Journal of Power Sources 112, 2002, pag. 236–246.
- [5] M. Chymera, A. Renfrew, M. Barnes, "Energy Storage Devices in Railway Systems", Seminar on Innovation in the Railways: Evolution or Revolution?, Austin Court, Birmingham, UK, 2006.
- [6] M. Steiner, M. Klohr, S. Pagiela, "Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles", European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Dinamarca, 2007, pag. 1-10.
- [7] P. Barrade, B. Destraz, A. Rufer, "Hybrid vehicle in railways applications: supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives", IEEE-VPP 04 : Vehicular Power and Propulsion Symposium, Paris, Francia, 2004.
- [8] L. Ma, Y. Yang, "Solid-state supercapacitors for electronic device applications", Applied Physics Letters 87, 2005, nº 12.
- [9] IEC 62391 "Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment – Parts 1 and 2". First edition 2006-04.
- [10] M. Bärtsch, J.-C. Sauter R. Kötz, "Testing of Supercapacitors at PSI", PSI Scientific Report 2000 Volume V, 2001, pag. 78-80.
- [11] P. Kurzweil, B. Frenzel, R. Gallay, "Capacitance Characterization Methods and Ageing Behaviour of Supercapacitors", 15th International Seminar On Double Layer Capacitors, Deerfield Beach, FL., U.S.A., 2005.
- [12] P. J. Mahon, G. L. Paul, S. M. Keshishian, A. M. Vassallo, "Measurement and modelling of the high-power performance of carbon-based supercapacitors", Journal of Power Sources 91, 2000, pag. 68–76.
- [13] A. M. Puşcas, M. Carp, P. Borza, I. Szekely, "Measurement Considerations on Some Parameters of Supercapacitors", Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering 1, 2009, pag. 65-75.

- [14] Sang-Hyun Kim, Woojin Choi, "A Method for Performance Evaluation and Optimal Sizing of the Supercapacitor Module by the Electrochemical Impedance Spectroscopy", 31st International Telecommunications Energy Conference INTELEC, Incheon, Corea del Sur, 2009, pag. 1-6.
- [15] C.R. Jeevandoss, M. Kumaravel, V. Jagadeesh Kumar, "A Novel Method for the Measurement of the C-V Characteristic of a Solar Photovoltaic Cell", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Austin, TX, USA, 2010, pag. 371-374.
- [16] L. Zubieta, R. Bonert, "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 36, No. 1, January/February 2000, pag. 199-205.
- [17] C. Farcas, D. Petreus, I. Ciocan, N. Palaghita, "Modeling and Simulation of Supercapacitors", SIITME2009 – 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages, Gyula, Hungría, 2009, pag.195-200.
- [18] A. Hammar, R. Lallemand, G. Coquery, J. Chabas, P. Venet, G. Rojat, "Assessment of electrothermal model of supercapacitors for railway applications", European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2005, Dresden, Alemania, 2005, pag. 8.