



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza

---

**Sistema de ensayo y caracterización de  
supercondensadores.  
Estudio de supercondensadores sometidos a  
radiación ionizante.**

---

*Máster en Ingeniería Electrónica*

*Curso 2012-2013  
Noviembre 2013*

**Autor: Álvaro Pradas Luengo**

**Director: Abelardo Martínez Iturbe**

**Codirector: Fernando José Arteche González**

## **RESUMEN**

### **Sistema de ensayo y caracterización de supercondensadores. Estudio de supercondensadores sometidos a radiación ionizante.**

En la actualidad, en los sistemas eléctricos de potencia se está empezando a implantar cada vez más el uso de supercondensadores con el fin de poder mejorar la gestión energética y así lograr optimizar el consumo energético de estos sistemas. En algunas aplicaciones se están utilizando como sustituto o complemento de baterías (sistemas híbridos baterías-supercondensadores). Los supercondensadores son condensadores electroquímicos de elevada capacidad cuyo valor puede llegar a más de varios miles de Faradios. Las principales ventajas sobre las baterías comunes son las siguientes: pueden manejar corrientes mucho más elevadas, son más eficientes, tienen una vida útil mucho mayor, reducido mantenimiento y la facilidad para monitorizar su carga.

Debido a su reciente utilización no se tiene gran conocimiento sobre el funcionamiento de estos dispositivos en distintos entornos, su vida útil, degradación, etc. En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se propone el diseño de un sistema para caracterización de supercondensadores que deberá determinar de forma precisa sus parámetros principales: capacidad y resistencia serie equivalente (ESR) y su degradación a lo largo del tiempo. El núcleo del sistema será un convertidor electrónico de potencia que permitirá cargar y descargar en corriente continua los supercondensadores sometidos a ensayo. El sistema será totalmente configurable en cuanto a niveles de corriente, niveles de tensión y tiempo de ensayo y deberá poder operar de forma autónoma.

Los problemas que se abordan en este TFM son principalmente:

- El diseño completo de un convertidor electrónico que permita corrientes de carga/descarga de hasta 50A, con un rizado de corriente muy bajo.
- El diseño del control tanto del convertidor como del sistema global por medio de un microcontrolador.
- Diseño de un sistema preciso de medición de tensión, corriente y temperatura, y monitorización en tiempo real.
- Validación del sistema con pruebas experimentales.

A fin de poder demostrar las capacidades del sistema diseñado, se va a realizar la caracterización de supercondensadores sometidos a radiación ionizante. Para lo cual se procederá a determinar los principales parámetros de un supercondensador antes y después de haberse sometido a una determinada dosis de radiación ionizante (electrones). Estos estudios forman parte de los análisis previos del proyecto del futuro acelerador de partículas lineal, "International Linear Collider" (ILC) [21] y han sido financiados parcialmente a través del proyecto del Plan Nacional de Investigación FPA – 2010 – 22163. "DET4HEP: I+D en detectores para futuros Colisionadores". Igualmente parte de este trabajo se ha realizado en colaboración con el Instituto de Microelectronica de Barcelona (IMB-CNM-CSIC), Instituto de Física de Cantabria (IFCA) y la universidad de Bonn.

## ÍNDICE

<b>1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
1.1- INTRODUCCIÓN.....	3
1.2- OBJETIVOS DEL TFM.....	3
1.3- SUPERCONDENSADORES. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES .....	4
1.4- CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES.....	6
<b>2- DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>8</b>
2.1- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES INICIALES .....	8
2.2- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.....	9
2.3- CONVERTIDOR DC/DC .....	10
<b>3- MODELADO Y CONTROL DEL CONVERTIDOR .....</b>	<b>12</b>
3.1- MODELADO DEL CONVERTIDOR .....	12
3.2- CÁLCULO Y AJUSTE DE COMPENSADORES .....	13
3.3- SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR REGULADO EN PSIM.....	16
<b>4- PROTOTIPO .....</b>	<b>18</b>
4.1- ESQUEMA Y PCB .....	18
4.2- PLACA DE CONTROL.....	21
4.3- PRUEBAS FUNCIONALES .....	23
4.3.1- Medidas experimentales con osciloscopio .....	23
4.3.2- Medida de un supercondensador .....	25
<b>5- ESTUDIO DE SUPERCONDENSADORES SOMETIDOS A RADIACIÓN IONIZANTE.....</b>	<b>28</b>
5.3. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS .....	28
5.1.1- Selección de muestras .....	28
5.1.2- Medidas antes de ser irradiados.....	29
5.1.3- Irradiación de supercondensadores .....	29
5.1.4- Medidas después de ser irradiados.....	30
5.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	30
<b>6- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>35</b>
<b>ANEXO A. MODELADO DEL CONVERTIDOR.....</b>	<b>37</b>
A1- BUCK (CARGA DE SUPERCONDENSADOR) .....	37
A2- BOOST (DESCARGA DE SUPERCONDENSADOR) .....	39
<b>ANEXO B. SOFTWARE DE CONTROL, MONITORIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS .....</b>	<b>42</b>
B1- PROGRAMACIÓN DEL CONTROL .....	42
B2- INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN Y VISUALIZACIÓN .....	45
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>47</b>

# **1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## **1.1- Introducción**

Las tendencias actuales de búsqueda de una eficiencia energética cada vez mayor van directamente asociadas al concepto de almacenamiento energético: Energías renovables, sistemas regenerativos, sistemas pulsados, etc. 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 en distintos sectores: generación y distribución de energía [1][2], sector de automoción [3][4], transporte, industria ferroviaria [5][6][7] y dispositivos electrónicos de carácter general.

De esta creciente implantación surge la necesidad de conocer con precisión las características de los supercondensadores, estudiar cómo se comportan en distintos entornos, conocer los mecanismos de degradación, vida útil, etc.

En base a esta necesidad surgen numerosos estudios, técnicas y métodos para la caracterización de supercondensadores [12]. Estos estudios tratan de determinar las características principales de un supercondensador (principalmente: Capacidad, resistencia serie equivalente (ESR) y corriente de fuga (autodescarga)) de la manera más simple, precisa y fiable posible. Entre todos estos métodos, existe uno que ha sido normalizado según la norma IEC 62391:2006 [13], y que por tanto cobra especial importancia.

En los últimos años se han desarrollado bancos de prueba para la caracterización de supercondensadores basados tanto en el método normalizado [8], como en otros no normalizados. Sin embargo estos bancos de ensayo van en su mayor parte dirigidos a aplicaciones de alta potencia (automoción, ferroviaria, energías renovables, etc.) y por tanto se aplican principalmente a supercondensadores de elevada capacidad.

## **1.2- Objetivos del TFM**

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es el diseño de un sistema para caracterización de supercondensadores que deberá determinar de forma precisa sus parámetros principales: capacidad y resistencia serie equivalente (ESR), realizando medición de temperatura. Y además será capaz de realizar ensayos cíclicos de forma autónoma para la realización de estudios de degradación.

Su características diferenciadoras serán que deberá ser un sistema portátil, y que su rango de ensayo le permita caracterizar con precisión supercondensadores de prácticamente cualquier capacidad.

Este sistema pretende ser utilizado para estudiar cómo se ven afectadas estas características en distintos entornos y condiciones de trabajo. Como segunda parte del TFM, se pretende utilizar el

sistema para estudiar la degradación de supercondensadores sometidos a radiación ionizante generada en un acelerador de partículas. Estos estudios forman parte de los análisis previos del proyecto del futuro acelerador de partículas lineal (ILC) [21], y tienen como objetivo estudiar la viabilidad de la utilización de supercondensadores en las fuentes de alimentación de los detectores del acelerador.

### 1.3- Supercondensadores. Características y propiedades

Los super-condensadores son condensadores electroquímicos de elevada capacidad cuyo valor puede llegar a varios miles de Faradios. Gracias a esta elevada capacidad, en la actualidad los supercondensadores se están utilizando como sistemas de almacenamiento de energía eficientes y de gran fiabilidad. Existen de varios tipos, aunque los más conocidos y comercializados son los EDLC (*Electric Double Layer Capacitor*). En la siguiente figura se muestra la estructura y composición interna de este tipo de supercondensadores:

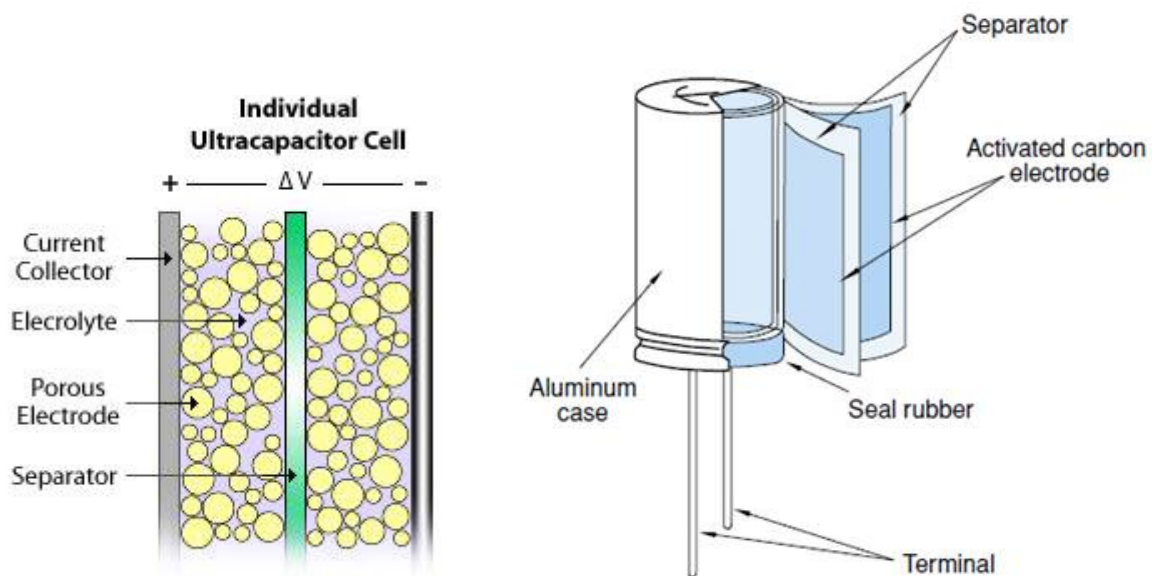


Fig. 1: Estructura y composición de un supercondensador [9]

A continuación se explican las principales características los supercondensadores y sus diferencias con otros dispositivos de almacenamiento comunes:

- **Almacenamiento energético (densidad energética).** Comparado con condensadores electrolíticos convencionales, los supercondensadores pueden llegar a tener una densidad energética varios órdenes de magnitud mayor. Por contra, actualmente esta densidad energética es mucho menor que la obtenida por baterías convencionales.
- **Gran densidad de potencia.** Este parámetro hace referencia a la potencia que un dispositivo es capaz de entregar/recibir por unidad de volumen. La densidad de potencia es uno de los

puntos fuertes de los supercondensadores siendo típicamente de unos 10kW/kg. Este valor es más de un orden de magnitud mayor al de las baterías de ion litio.

- **Muy baja Resistencia Serie Equivalente (ESR).** Comparados con baterías, la resistencia interna de los EDLC es mucho menor, lo que les permite trabajar con corrientes muy altas con una elevada eficiencia energética.
- **Carga y descarga muy rápida.** Gracias a las características anteriores y a que el mecanismo de almacenamiento de los supercondensadores no es por efecto de una reacción química, pueden manejar elevadas corrientes y con una eficiencia prácticamente igual tanto en carga como en descarga.
- **Energía pulsada.** Los supercondensadores son capaces de trabajar de forma pulsada, manejando elevados picos de potencia sin sufrir efectos de degradación. Las baterías en general ven reducida su vida útil trabajando de esta forma.
- **Vida útil.** Según los fabricantes de supercondensadores, la vida útil de éstos se puede estimar en alrededor de 1 millón de ciclos de carga/descarga, mientras que la de las baterías de ion litio es de unos 1000 ciclos aproximadamente.
- **Voltaje por celda.** Típicamente los EDLC tienen un voltaje máximo por celda de unos 2,7V, por lo que en función de la aplicación, es necesaria la conexión de varias celdas en serie para obtener un voltaje superior adecuado.  
Los supercondensadores pueden trabajar en todo el rango de voltaje hasta su tensión máxima, permitiendo mejor adaptación que las baterías a sistemas que funcionen a distintos voltajes. Además, esto permite que puedan ser totalmente descargados sin sufrir degradación alguna, mejorando la seguridad en el almacenaje. Las baterías sin embargo, pueden sufrir daños irreversibles si se descargan excesivamente.
- **Equilibrado de celdas.** Por la característica anterior, y debido a las tolerancias de los supercondensadores, surge la necesidad de balancear las tensiones cuando existe una conexión en serie. La no aplicación de un circuito de equilibrado adecuado puede llevar a que algunas celdas estén trabajando en sobre-carga fuera de las especificaciones recomendadas, mientras que otras estarán muy por debajo de estas, provocando así una rápida degradación de las primeras.
- **Facilidad para determinar el estado de carga.** La carga y descarga es prácticamente lineal, y por tanto el estado de carga (SOC) se obtiene directamente a través de la medición del voltaje en un determinado momento.

- **Amplo rango de temperatura de funcionamiento.** Típicamente los fabricantes establecen un rango de trabajo de entre -40 y 65°C tanto en carga como descarga. Este rango es mucho mayor que el de las baterías de litio, sobre todo a bajas temperaturas (según datos de fabricantes, -20 a 60°C en descarga y de 0 a 45°C en carga aproximadamente).

A continuación se muestra una tabla resumen de estos sistemas de almacenamiento:

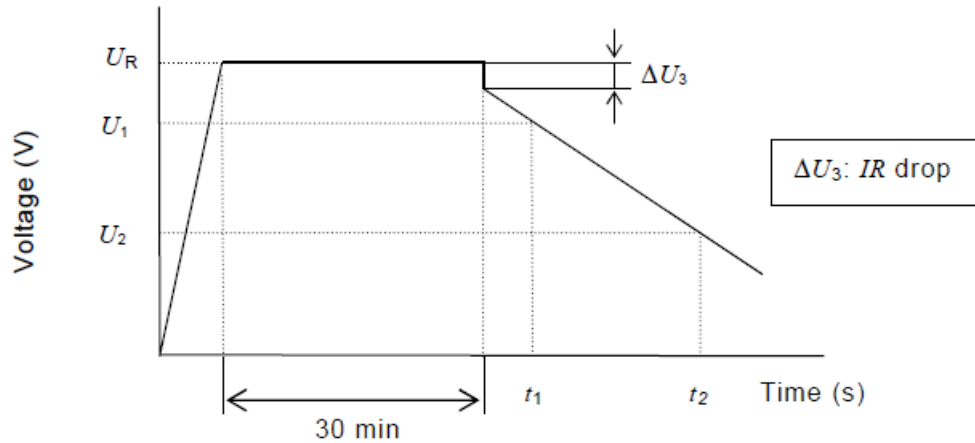
**Tabla I:** Comparativa de sistemas de almacenamiento [10]

Parámetros	Condensador Electrostático	Supercondensador	Batería
Tiempo de descarga	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ seg	1~30 seg	0.3~3 hrs
Tiempo de carga	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ seg	1~30 seg	1~5 hrs
Densidad de energía (Wh/kg)	< 0.1	1~10	20~100
Densidad de potencia (W/kg)	< 10,000	10,000	50~200
Eficiencia carga/descarga	~ 1.0	~0.95	0.7~0.85
Ciclos de vida útil	~ infinitos	> 500,000	500~2,000

### 1.4- Caracterización de supercondensadores

La implementación y uso correcto de un supercondensador (o un banco de supercondensadores) así como su mantenimiento, pasa por un preciso conocimiento de sus características y su comportamiento en distintos entornos. Para ello, se han desarrollado diversos métodos de medida o caracterización [11][12]. Los principales métodos de caracterización se pueden resumir en los siguientes: método de carga / descarga a corriente constante, método resistivo, ensayo de ciclos de tensión, cronoamperometría, ensayo de ciclos a potencia constante, espectroscopia de impedancia y método de resistencia negativa.

Cada uno de estos métodos define una serie de pautas para realizar la medida de la capacidad y la resistencia equivalente serie de un supercondensador. Este TFM se va a centrar en el método de carga/descarga a corriente constante, que es el definido por la norma IEC 62391:2006 [13].



**Fig. 2:** Voltaje en terminales del supercondensador durante el ensayo

En la figura anterior se define el ensayo de corriente constante. Se muestra el perfil del voltaje en los terminales del supercondensador durante el ensayo.

El proceso de medida siguiendo la curva de la Fig. 2 es el siguiente:

- 1- El supercondensador se carga a corriente constante hasta su tensión nominal  $U_R$ , por lo que la tensión durante la carga será una recta de pendiente constante.
- 2- Se mantiene el condensador cargado durante 30 minutos para determinar su auto-descarga (resistencia de fuga).
- 3- Se inicia la descarga a corriente constante  $I^*$ . Se mide la variación de tensión  $U_3$  para determinar la ESR:  $ESR(\Omega) = \frac{\Delta U_3}{I}$
- 4- Durante la descarga se mide el tiempo que tarda en pasar del voltaje  $U_1^*$  al voltaje  $U_2^*$ . Se

determina la capacidad en descarga:  $C \frac{dV}{dt} = I \Rightarrow C(F) = \frac{I \times (t_2 - t_1)}{(U_1 - U_2)}$

\* Los voltajes de medida  $U_1$  y  $U_2$ , y la corriente de ensayo  $I$ , están definidos por la norma en función de la capacidad del condensador, su voltaje nominal y su clase (la clase se establece en función del tipo de aplicación). Ver Tabla II:

**Tabla II:** Parámetros de ensayo según la norma IEC 62391:2006.

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)	$1 \times C$	$0,4 \times CU_R$	$4 \times CU_R$	$40 \times CU_R$
$U_1$	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).			



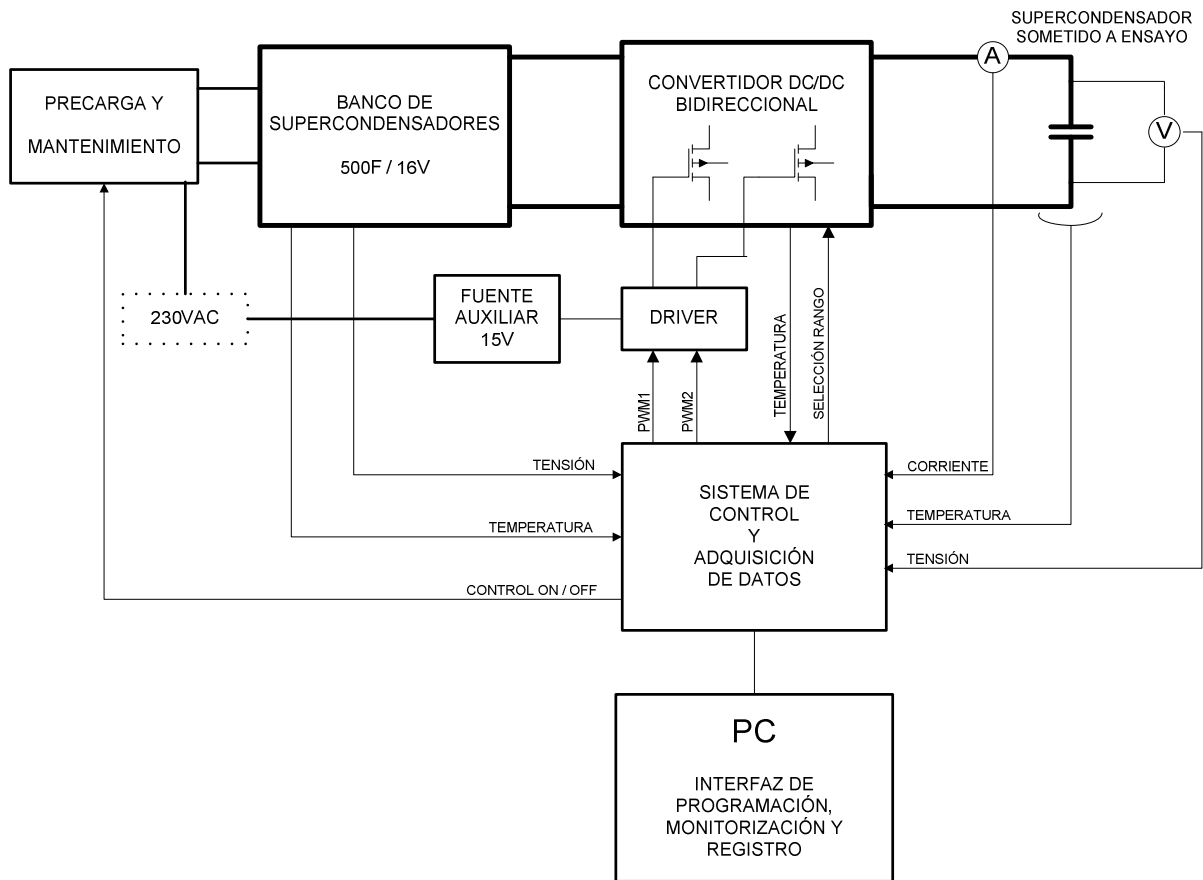
## **2- DISEÑO DEL SISTEMA**

### **2.1- Características y especificaciones iniciales**

Inicialmente se definieron unas características y capacidades esenciales que debería cumplir el sistema, y son las siguientes:

- Los parámetros de ensayo serán totalmente configurables a través de un interface visual: Tiempo y número de ciclos, corriente en carga y en descarga, tensiones de ensayo, tiempo de parada entre ciclos, etc.
- Una vez configurado, el sistema será capaz de realizar ciclos de carga y descarga a corriente constante de forma autónoma, registrando en todo momento la información obtenida durante el ensayo (tensión, corriente y temperatura).
- Rangos de medida con tolerancia  $\leq 5\%$ :
  - o Capacidad de 0,1F a 10000F
  - o ESR mínima de 0,1m $\Omega$
- Capacidades del sistema:
  - o Corriente máxima de ensayo = 50A
  - o Rango de corriente desde 0,1 hasta 50A
  - o Tensión máxima de salida = 5V

## 2.2- Diagrama de bloques del sistema



**Fig. 3:** Diagrama de bloques del sistema

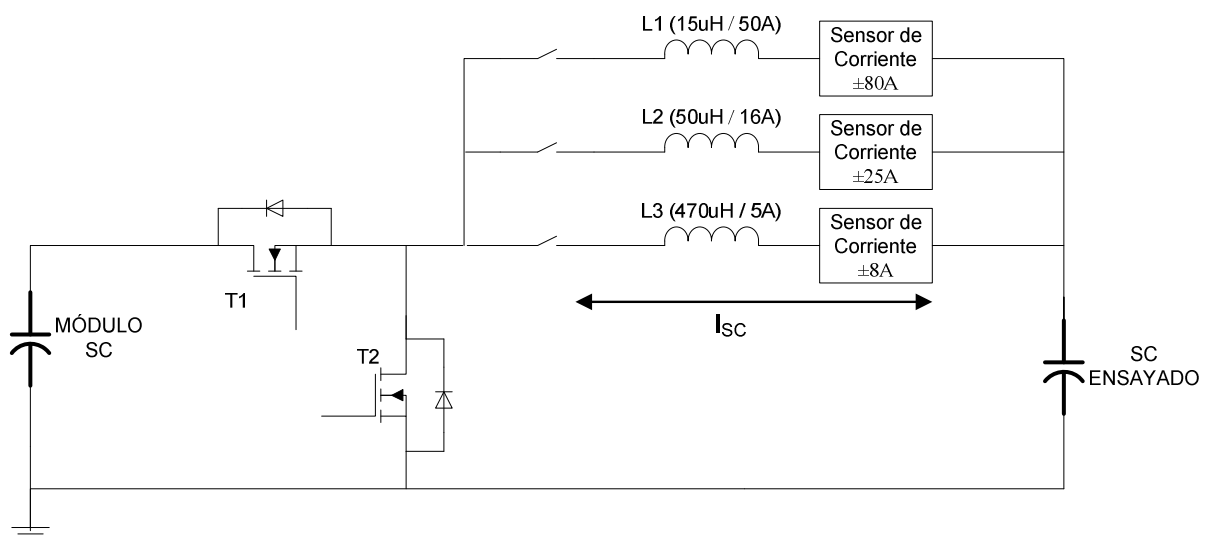
En la Fig. 3 se puede ver el esquema de bloques general del sistema de caracterización de supercondensadores. A continuación se explica cada uno de los componentes con mayor detalle:

- **Convertidor DC / DC:** Es el núcleo del sistema de caracterización. Se trata de un convertidor bidireccional controlado en corriente, y que por tanto permite realizar tanto la carga como la descarga a corriente constante del supercondensador sometido a ensayo.
- **Banco de supercondensadores:** Actúa como buffer energético del sistema. Entrega energía durante la carga del supercondensador ensayado, y la absorbe durante la descarga. De esta forma, durante un ensayo la energía fluye de un lado a otro del convertidor, necesitando únicamente compensar las pérdidas del sistema.
- **Sistema de precarga y mantenimiento:** Circuito electrónico que realiza la precarga inicial del banco de supercondensadores, y además mantiene el voltaje de estos dentro de los rangos de tensión determinados durante la ejecución de un ensayo. Este sistema es de relativamente baja potencia, ya que únicamente deberá compensar las pérdidas del sistema.

- **Fuente auxiliar 15V:** Se trata de una fuente de baja potencia de 15V, utilizada para alimentar el driver de los transistores, los sensores de corriente, relés, circuitos de protección, etc.
- Tanto el sistema de precarga como la fuente auxiliar se alimentan directamente de la red eléctrica a 230V.
- **Sistema de control y adquisición de datos:** Este sistema se compone de una placa de prueba con un microcontrolador C2000 de Texas Instruments. El microcontrolador se encarga de muestrear todas las señales del sistema (Fig. 3), realizar el control del convertidor de potencia y el control del sistema completo. A través de un puerto USB se comunica con un PC para transferir en tiempo real las señales medidas.

### 2.3- Convertidor DC/DC

Para obtener un bajo rizado de corriente en todo el rango establecido, y que la medida sea lo más precisa posible, se realiza un diseño en tres ramas independientes de salida. Sólo una de las ramas estará en funcionamiento en cada momento, y cada una de ellas estará optimizada para un determinado rango de corriente. El esquema simplificado quedaría tal como se ve en la siguiente figura:



**Fig. 4:** Esquema de convertidor DC/DC

Se establecen 3 rangos de corriente distribuidos uniformemente: [16 - 50A], [5 - 16A] y [0.5 - 5A].

En cada una de las ramas se calcula la inductancia necesaria para obtener un rizado de corriente menor del 5% en todo el rango de ensayo. El caso más desfavorable para el cálculo será para el caso de nivel de corriente más bajo para el que se va a utilizar cada una de las ramas (rama 50A -> 17A, rama 16A -> 6A y rama 5A -> 0,5A)

Conforme al esquema de la Fig. , el rizado de corriente máximo vendrá determinado por la inductancia, la frecuencia de conmutación y la tensión a la que se encuentre el supercondensador ensayado. El rizado de corriente máximo se dará en el caso en que la tensión del condensador sea máxima (~2.7V), y la tensión del módulo de alimentación sea también máxima (~16V). En este caso el tiempo de conducción de T2 será muy alto (se supone próximo al periodo completo de conmutación de 5µs):

Suponiendo inicialmente la siguiente configuración:

- Frecuencia de conmutación: 200kHz.
- Vmax Supercondensador: 2,7V.

$$L \frac{di}{dt} = V_{sc} \Rightarrow L = V_{sc} \frac{\Delta t}{\Delta i}$$

Rama 50A:

$$L_1 \geq V_{sc} \frac{\Delta t}{\Delta i} = 2.7V \frac{5\mu s}{0.05 \times 17} \approx 15\mu H$$

Rama 16A:

$$L_2 \geq V_{sc} \frac{\Delta t}{\Delta i} = 2.7V \frac{5\mu s}{0.05 \times 5} \approx 54\mu H$$

Rama 5A:

$$L_3 \geq V_{sc} \frac{\Delta t}{\Delta i} = 2.7V \frac{5\mu s}{0.05 \times 0.5} \approx 540\mu H$$

### Componentes principales del convertidor DC/DC:

- **Low Rds MOSFET:** International Rectifier IRF AUIRF2804 (TO-220)
  - o Rds típica = 1.5mΩ
  - o Id máx = 195A
  - o Vds máx = 40V
- **Driver MOSFET:** Fairchild FAN7392MX dual driver para MOSFET en configuración semipuente.
- **Relés de selección de rama:** Se utilizan relés de automoción ya que encajan perfectamente con las características del sistema: alta corriente y tensión reducida (<24V).
  - o Rama 50A: Relé DURAKOOL - DG85C (80A máx)
  - o Rama 5A y 16A: Relé compacto DURAKOOL - DG20 (30A máx)

- **Sensores de corriente:** Se utilizan sensores de corriente de efecto Hall con alimentación unipolar de +5V.
  - o Rama 50A: Sensor LEM CAS25-NP (Rango de medida  $\pm 85A$ , sensibilidad 25mV/A, precisión de 0,8%)
  - o Rama 16A: Sensor LEM LTS6-NP (Rango de medida  $\pm 19.2A$ , sensibilidad 104,16mV/A, precisión de 0,2%)
  - o Rama 5A: Sensor LEM LTS6-NP 3 vueltas (Rango de medida  $\pm 6.4A$ , sensibilidad 312,48mV/A, precisión de 0,2%)
  
- **Módulo de supercondensadores:** Módulo Maxwell BMOD0500P016B01 de 500F / 16V. Se elige este módulo para que trabajando entre 8V y 15V sea capaz de almacenar la suficiente energía para realizar la carga completa del supercondensador de mayor tamaño que se vaya a ensayar (en principio la celda de mayor capacidad comercial fabricada es de unos 6200F).
  - o Energía almacenada módulo =  $E = \frac{(15^2 - 8^2) \times 500}{2} \approx 40kJ$
  - o Energía de supercondensador (entre 0.8 y 2.7V) =  $E = \frac{(2.7^2 - 0.8^2) \times 6200}{2} \approx 20kJ$

Con este margen se asegura que el módulo va a ser capaz de almacenar la energía para la realización de ciclos completos. Y se mantiene un margen de seguridad para compensar las pérdidas del convertidor y las tolerancias y degradación del módulo de supercondensadores.

### 3- MODELADO Y CONTROL DEL CONVERTIDOR

#### 3.1- Modelado del convertidor

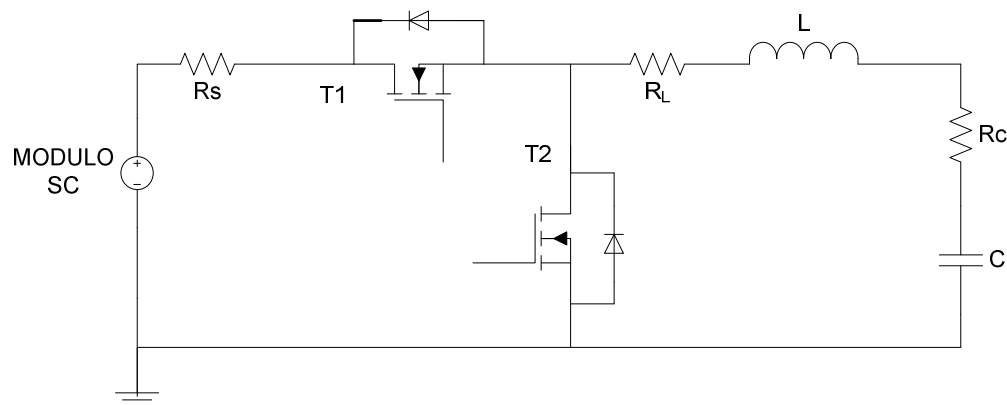


Fig. 5: Esquema del convertidor con componentes parásitos

En la Fig. 5 se muestra el modelo del convertidor incluyendo los componentes parásitos:

- $R_s$ : Resistencia equivalente del módulo de supercondensadores ( $ESR + R_{\text{cableado}}$ )
- T1 y T2: Incluyendo resistencia en conducción de los MOSFET ( $R_{ds_{ON}}$ )
- $R_L$ : ESR de la inductancia
- $R_C$ : Resistencia equivalente del supercondensador sometido a ensayo ( $ESR + R_{\text{cableado}}$ )

Dependiendo del modo de funcionamiento, carga o descarga del supercondensador, el convertidor se comportará como un reductor (“Buck”) o como un elevador (“Boost”), con la salvedad de que el parámetro que se quiere regular es siempre el mismo (corriente por el supercondensador).

A continuación se va a estudiar el modelado y control de cada uno de los dos modos de funcionamiento por separado. Se va a calcular la función de transferencia  $G_{id}(s)$  del modelo promediado de pequeña señal en modo de conducción continua, entre la señal de control  $d(s)$  y la corriente de salida  $i(s)$ , para posteriormente obtener el compensador más adecuado para esta aplicación.

En el anexo A se desarrolla en detalle del modelo del convertidor con el cual se obtiene la función de transferencia de pequeña señal:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{sV_{DC}}{s^2LC + sCR_p + 1}$$

### 3.2- Cálculo y ajuste de compensadores

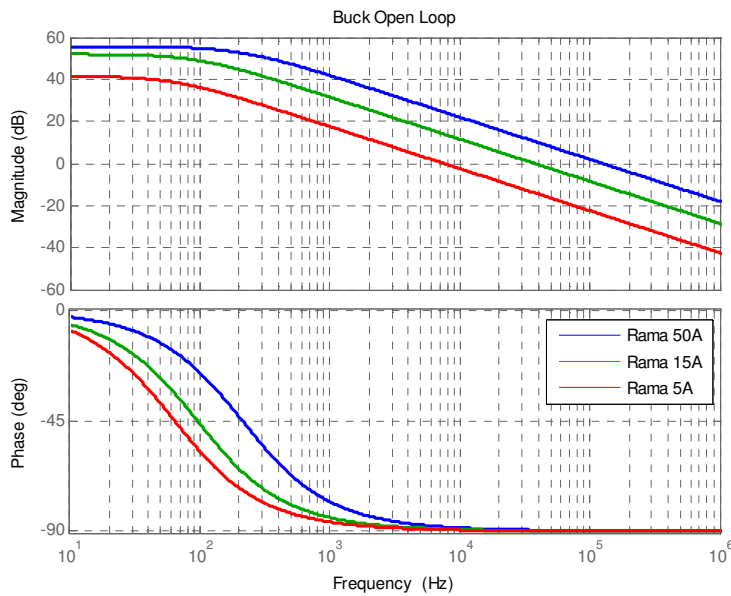
A partir de las funciones de transferencia obtenidas y los valores concretos de los componentes de cada rama, se van a calcular los compensadores del control del convertidor.

**Tabla III:** Valores de componentes utilizados para el cálculo del regulador

	Rama 50A	Rama 15A	Rama 5A
Vdc	12 V	12 V	12 V
L	15 $\mu$ H	50 $\mu$ H	250 $\mu$ H
C	1000 F	100F	10 F
Rp	0.02 $\Omega$	0.03 $\Omega$	0.1 $\Omega$

En la Tabla III se indican los valores seleccionados para realizar el cálculo del controlador. Se utilizan inicialmente valores típicos de cada rango de medida.

A continuación, en la Fig. 6 se muestra el diagrama de Bode en lazo abierto obtenido con Matlab:



**Fig. 6:** Diagrama de Bode en lazo abierto

Se calculan los compensadores individualmente para cada una de las ramas. Se establecen como parámetros:

- BW = 3kHz. Se establece un ancho de banda no muy elevado para que el sistema sea más inmune y estable. Se necesita que la corriente esté estabilizada en un máximo de 2 ms tras el arranque, por lo que este ancho de banda será suficiente.
- MF > 75°. Se obtendrá un sistema muy estable y con muy baja sobre-oscilación.

**Compensadores:**

Se obtienen calculan y ajustan con la herramienta “Sisotool” de Matlab:

Rama 50A:

$$C(s) = 170 \times \frac{(1 + 0.00014s)}{s}$$

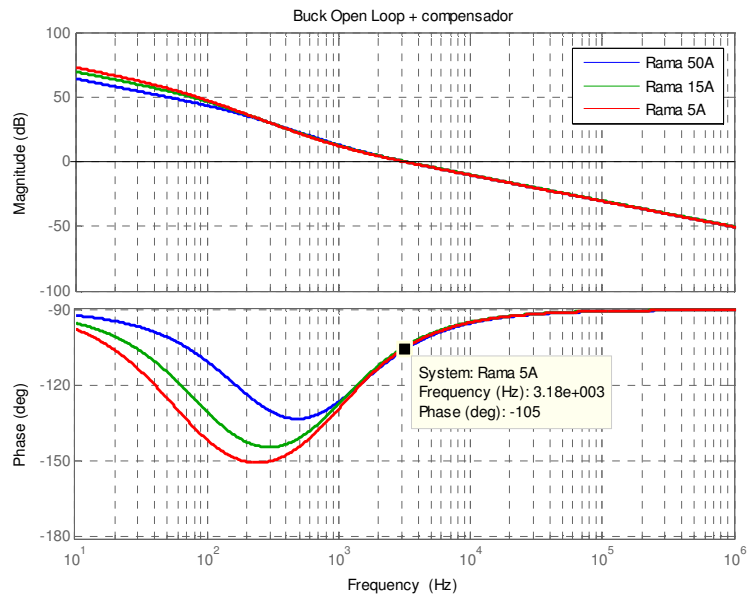
Rama 15A:

$$C(s) = 480 \times \frac{(1 + 0.00017s)}{s}$$

Rama 5A:

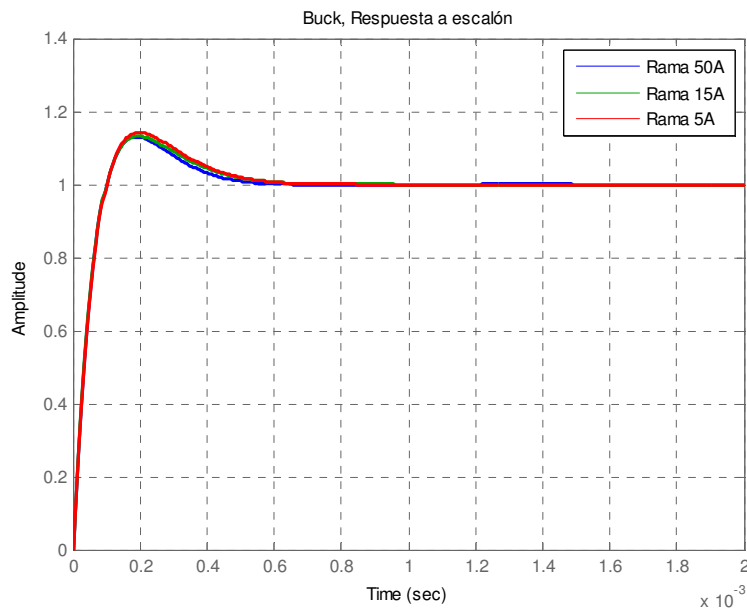
$$C(s) = 2318 \times \frac{(1 + 0.00017s)}{s}$$

A continuación se muestra el diagrama de Bode del sistema compensado en lazo abierto:



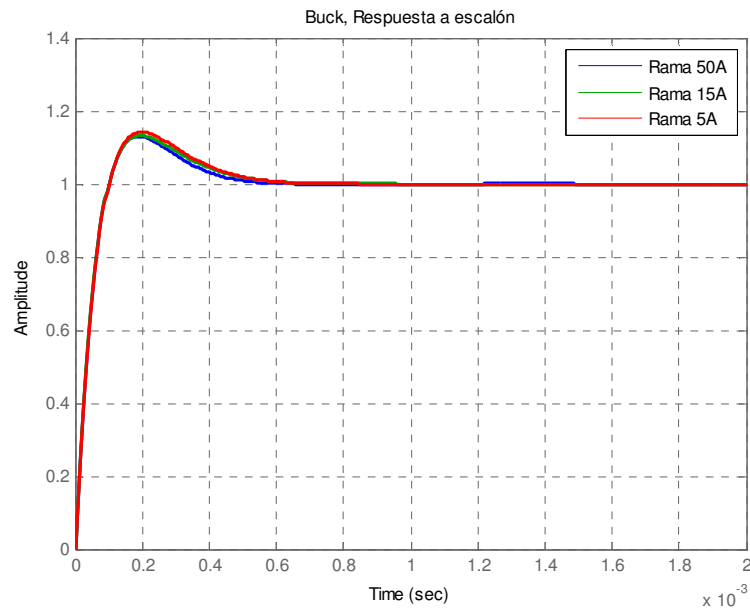
**Fig. 7:** Diagrama de Bode. Sistema compensado en lazo abierto

En la Fig. 7 se puede observar que tras aplicar el compensador a cada una de las ramas, la respuesta en frecuencia de cada una de ellas es muy similar. Se ha conseguido que independientemente de la rama seleccionada, se obtenga un ancho de banda de 3kHz en el control y un margen de fase de aproximadamente 75°.



**Fig. 8:** Respuesta temporal en Matlab. Respuesta a un escalón



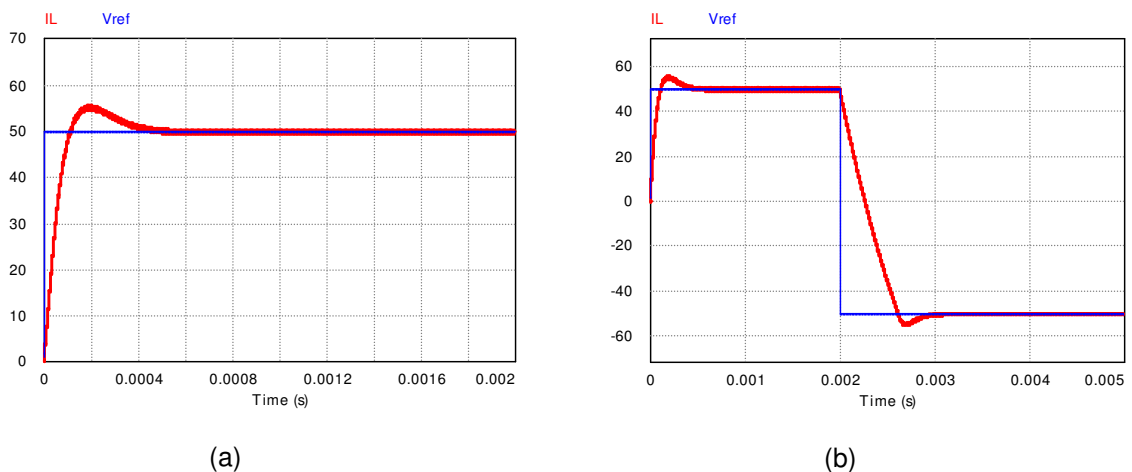


Como se observa en la

Fig. 8, la respuesta transitoria de cada una de las ramas es muy similar una vez aplicado el compensador.

### 3.3- Simulación del convertidor regulado en PSIM

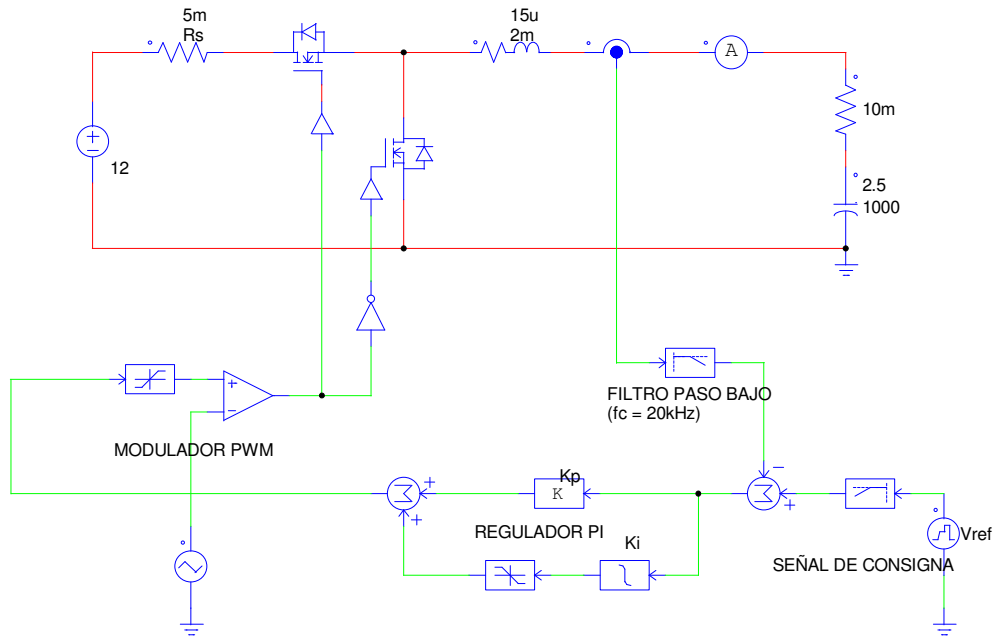
Para asegurar el correcto funcionamiento del controlador calculado, se realiza la simulación del modelo conmutado con el software de simulación de circuitos PSIM.



**Fig. 9:** Respuesta temporal de la rama de 50A en Psim. (a) Respuesta a un escalón de carga. (b) Respuesta a escalón de carga y de descarga.

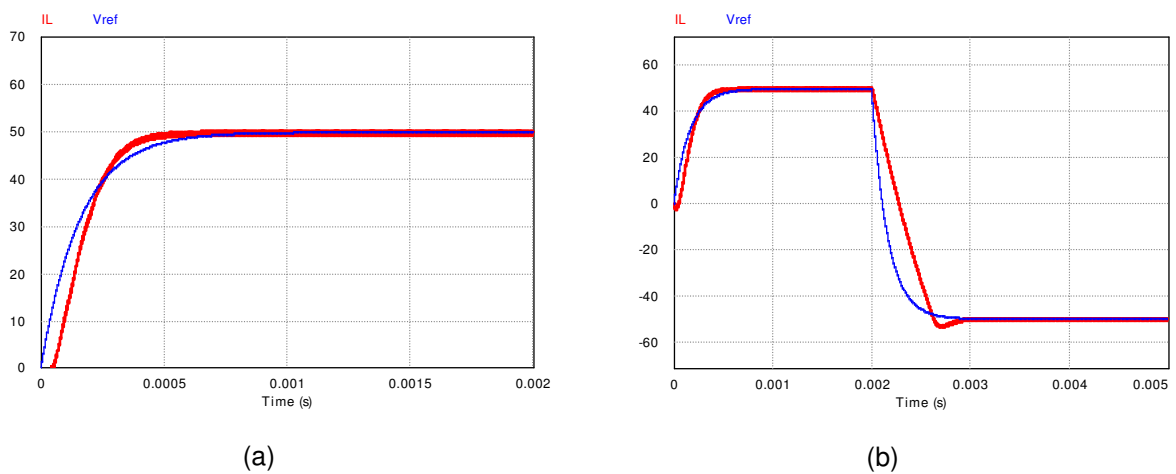
En la figura anterior se puede observar la respuesta temporal obtenida con Psim. Se trata de la respuesta de la corriente por el supercondensador a un escalón de 50A en el control.

El circuito que se ha implementado se muestra en la Fig. 10:



**Fig. 10:** Esquema del convertidor para simulación en Psim.

El circuito implementado es el convertidor bidireccional síncrono que se desea diseñar incluyendo valores típicos de los componentes parásitos. La señal a controlar es la corriente a la salida. Se mide con un sensor de corriente y se le aplica un filtro paso bajo de 20kHz ( $f_{sw}/10$ ) para que la señal realimentada tenga el menor rizado posible, y con una frecuencia de corte lo suficientemente alta como para no afectar negativamente al control. Se obtiene el error restándole la medida a la señal de consigna. Después se aplica el regulador PI con los parámetros calculados en el apartado anterior, y la señal de referencia generada se lleva al comparador del modulador PWM que genera las dos señales complementarias para los dos MOSFETs.



**Fig. 11:** Respuesta temporal de la rama de 50A en Psim (Señal de control amortiguada). (a) Respuesta a un escalón de carga. (b) Respuesta a escalón de carga y de descarga.

Para atenuar la sobre-oscilación observada en los transitorios, se aplica un filtro paso bajo ( $f_c=1\text{kHz}$ ) a la señal de referencia para evitar cambios bruscos y que por tanto el transitorio se produzca de forma más suave. Como se puede ver en la Fig. 11, las sobreoscilaciones han sido prácticamente eliminadas.

## 4- PROTOTIPO

### 4.1- Esquema y PCB

El esquema está dividido en dos partes para facilitar su lectura y comprensión. Además, para simplificar el esquema, se han omitido las fuentes de alimentación auxiliares y circuitos de detección de sobretensiones. Ver siguiente figura:

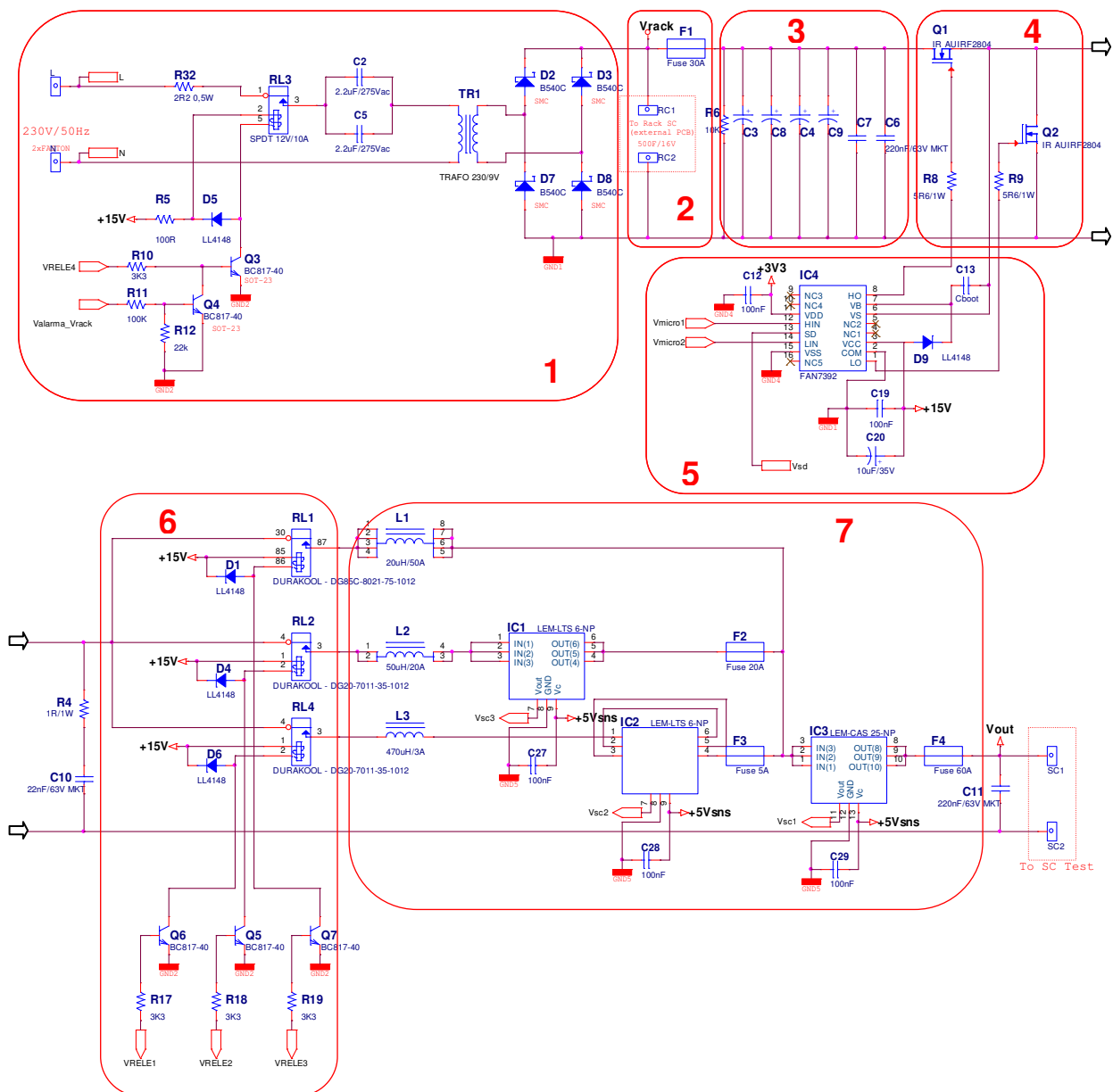


Fig. 12: Esquema para prototipo del sistema de caracterización de supercondensadores.

En rojo se resaltan los bloques principales del sistema:

- 1- Circuito de precarga y mantenimiento de carga del módulo de supercondensadores. La activación de este circuito se realiza a través de un relé.
- 2- Conexión del módulo de supercondensadores y fusible.
- 3- Conjunto de condensadores de desacoplo justo antes de los transistores.
- 4- Transistores MOSFET de baja resistencia de conducción.
- 5- Circuito que integra el driver de disparo de los dos transistores.
- 6- Relés de selección de rama.
- 7- Se observan las 3 ramas diseñadas para distintos rangos de corriente. Cada rama consta de: relé de selección, inductancia de filtrado, sensor de corriente de efecto Hall y fusible de protección. Las 3 ramas se unen a la salida donde se conectará el supercondensador que se vaya a ensayar.

A continuación se muestra el plano de serigrafía de la PCB y se indican los componentes marcados en el esquema anterior con la misma numeración:

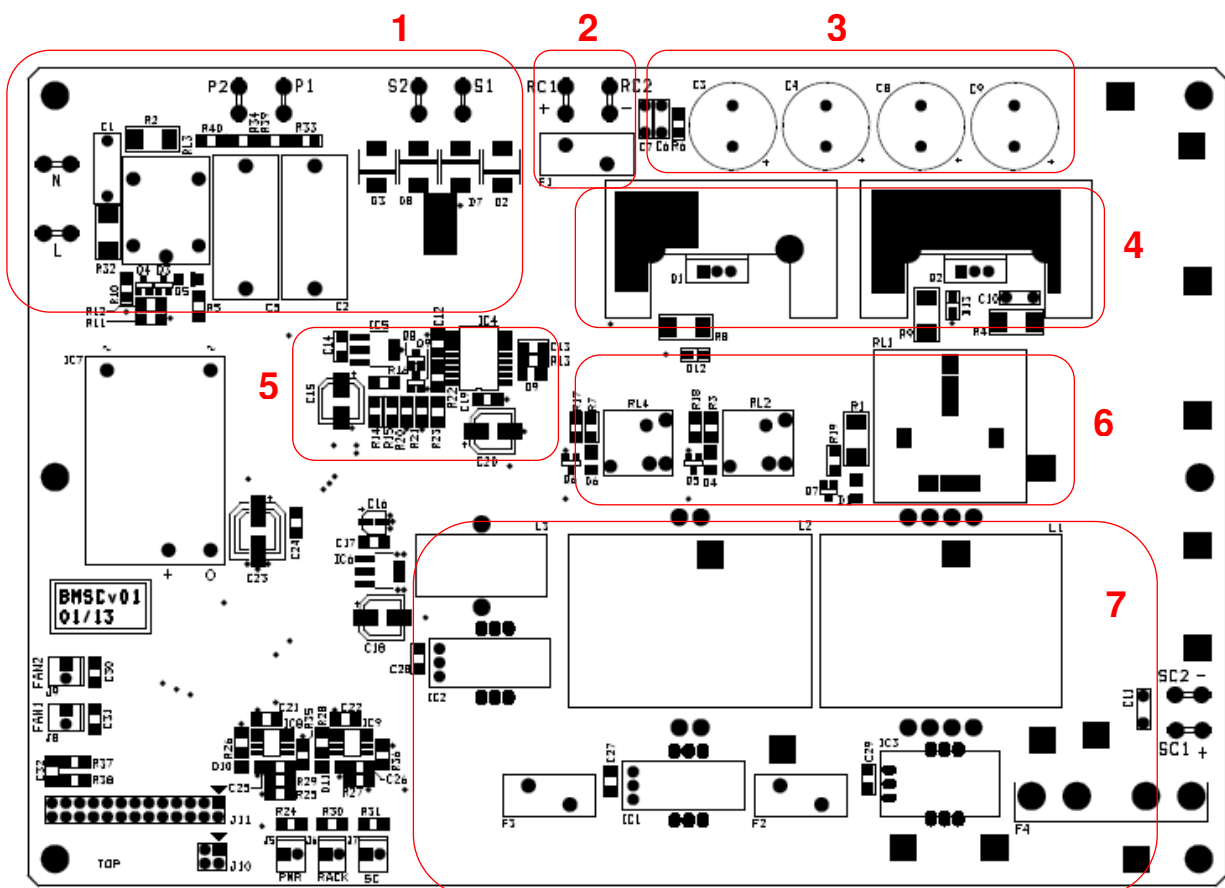


Fig. 13: Plano de serigrafía de la PCB.

En la siguiente figura se muestra la fotografía del prototipo finalizado y totalmente funcional. Del mismo modo se explican cada una de partes más importantes:

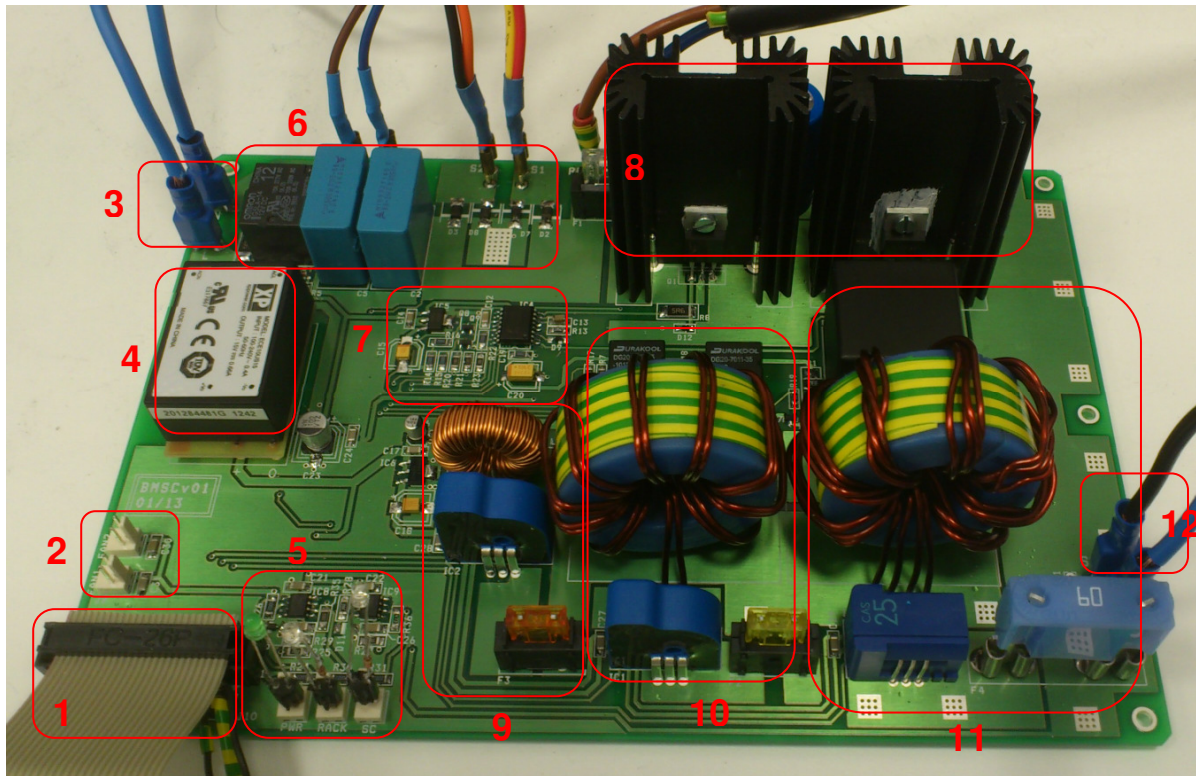


Fig. 14: Fotografía de prototipo funcional.

- 1- Conexión entre placa de control y placa de potencia. Banda plana con señales analógicas y señales digitales lentas. Conector de 4 pines separado para señales PWM.
- 2- Conectores a 15V para conexión de ventilación forzada.
- 3- Conexión de alimentación a red de 230V.
- 4- Fuente auxiliar de 15V/10W alimentada a 230V.
- 5- LEDs de indicación de estado del sistema y comparadores para activar alarmas por sobretensión.
- 6- Circuito de precarga y de mantenimiento de carga de módulo de supercondensadores.
- 7- Driver para disparo de los transistores.
- 8- Transistores MOSFET (encapsulado TO-220) con su disipador. Detrás de los disipadores se encuentra la conexión del módulo de supercondensadores, el fusible de entrada y los condensadores de desacoplo.
- 9- Rama de corriente baja (5A). Incluye de arriba abajo: relé (lo tapa parcialmente la bobina del recuadro 10) bobina, sensor de corriente (azul) y fusible de 8A (naranja).
- 10- Rama de media corriente (16A). Incluye de arriba abajo: relé (detrás de la bobina), bobina, sensor de corriente (azul) y fusible de 20A (amarillo).
- 11- Rama de corriente alta (50A). Incluye de arriba abajo: relé, bobina, sensor de corriente (azul) y fusible de 60A (azul claro).
- 12- Conector del supercondensador sometido a ensayo.

## 4.2- Placa de control

Para el control y monitorización del sistema, se ha utilizado una placa de desarrollo de Texas Instruments: "Texas Instruments Experimenter Kit TMS320C2000" con DSP Delfino F28335.

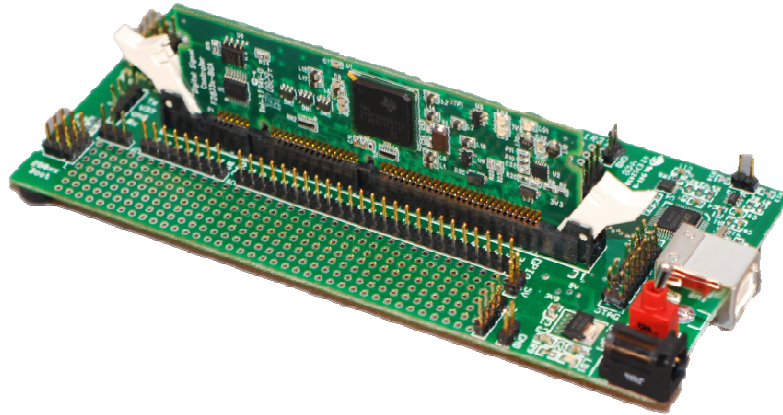


Fig. 15: Placa de desarrollo de Texas Instruments.

Como se observa en la Fig. 15, esta placa incluye un pequeño espacio para soldar componentes si fuera necesario (conectores, filtros, divisores de tensión, etc.).

El microcontrolador posee dos puertos de entradas analógicas de 8 canales de 12bits cada uno y 48 pines accesibles de entradas/salidas digitales totalmente configurables.

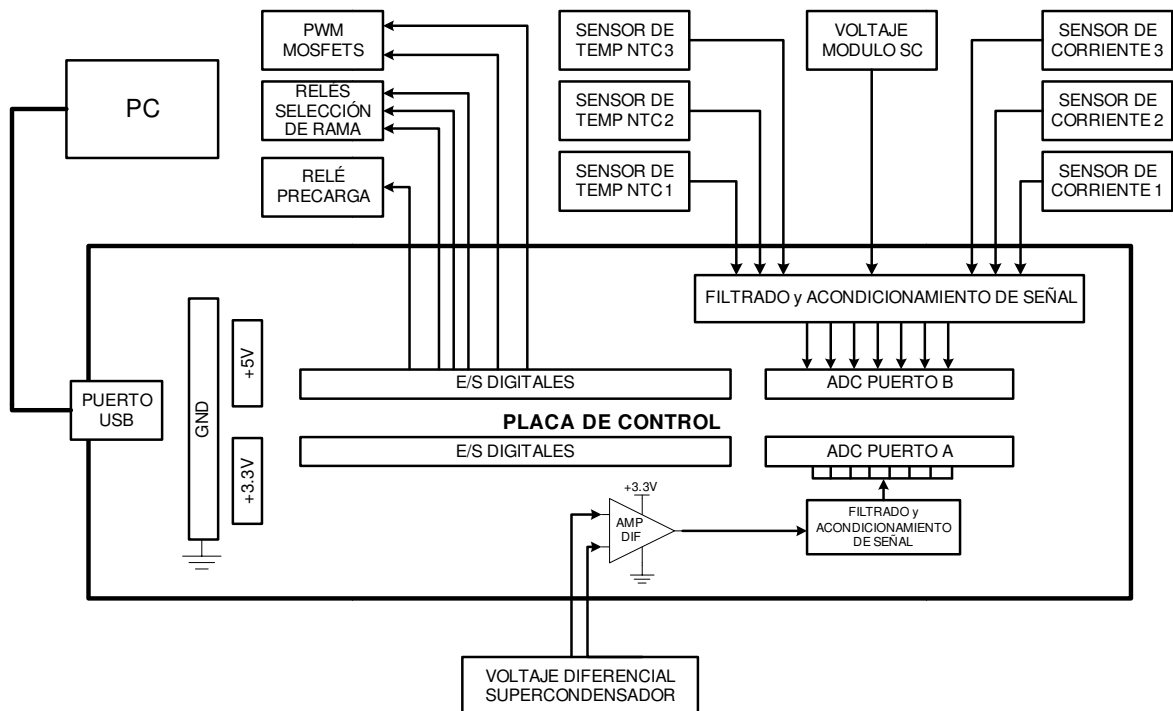


Fig. 16: Esquema de conexionado de placa de control.

En la Fig. 16 se muestra el esquema del conexionado de la placa de control. A continuación se describen los puntos principales:

- **Filtrado y acondicionamiento de señal:** todas las entradas analógicas se conectan a través de un filtro paso bajo RC con una frecuencia de corte acorde a la señal medida. Las señales de los sensores de corriente además se escalan con un divisor resistivo de 5V a 3V (ganancia 3/5). Los termistores NTC se conectan además con una resistencia de “pull-up” a 3V.
- **Amplificador diferencial (Amp Dif):** Para que la medida de tensión sea exacta y no se vea afectada por las caídas de tensión en el cableado, se realiza una medida de tensión del supercondensador con un amplificador diferencial. Para la medida de tensión se utilizan los 8 canales del puerto A en paralelo y así obtener mayor precisión promediando las 8 medidas. Este método de multi-muestreo sumado a la realización de un “ovesampling” y aplicando un filtrado digital, se utiliza para superar la limitación de la cuantización de los 12bits que posee el conversor A/D y obtener mayor precisión en las medidas [17] [18].
- **Conexión PC:** La placa se conecta a un PC a través de un puerto USB. La programación, adquisición de datos y visualización se realiza a través del software Vissim de Visual Solutions (software de programación gráfica similar a Simulink)

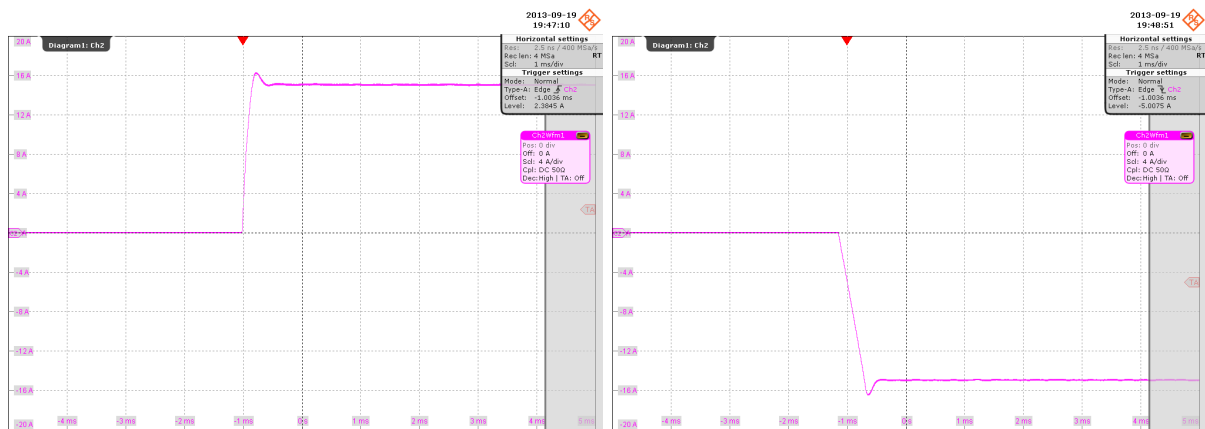
### 4.3- Pruebas Funcionales

#### 4.3.1- Medidas experimentales con osciloscopio

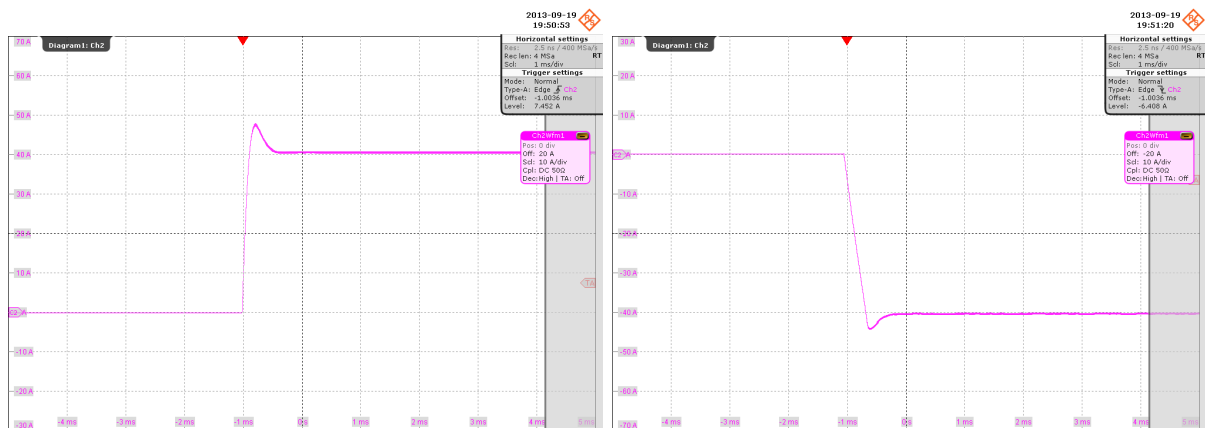
Inicialmente se realizan medidas experimentales con osciloscopio para verificar la correcta regulación de la corriente en cada una de las ramas, y verificar que los transitorios de arranque son coherentes con los cálculos anteriormente realizados.

Los equipos utilizados para la medida son los siguientes: osciloscopio Rohde & Schwarz RTO y sonda de corriente de efecto Hall Tektronix TCP303 (medida de corriente en DC hasta 150A y ancho de banda de 15MHz).

En las siguientes figuras se muestran los resultados:

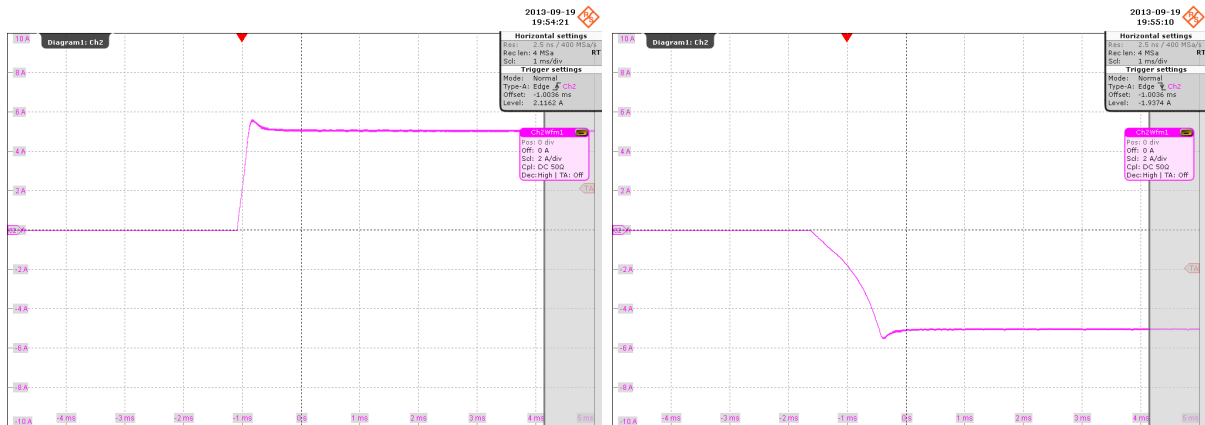


**Fig. 17:** Medida experimental con Osciloscopio. Respuesta a escalón de 15A en carga y en descarga (Rama 16A). Escala eje Y: 4A/div. Escala eje X: 1ms/div.



**Fig. 18:** Medida experimental con Osciloscopio. Respuesta a escalón de 40A en carga y en descarga (Rama 50A). Escala eje Y: 10A/div. Escala eje X: 1ms/div.





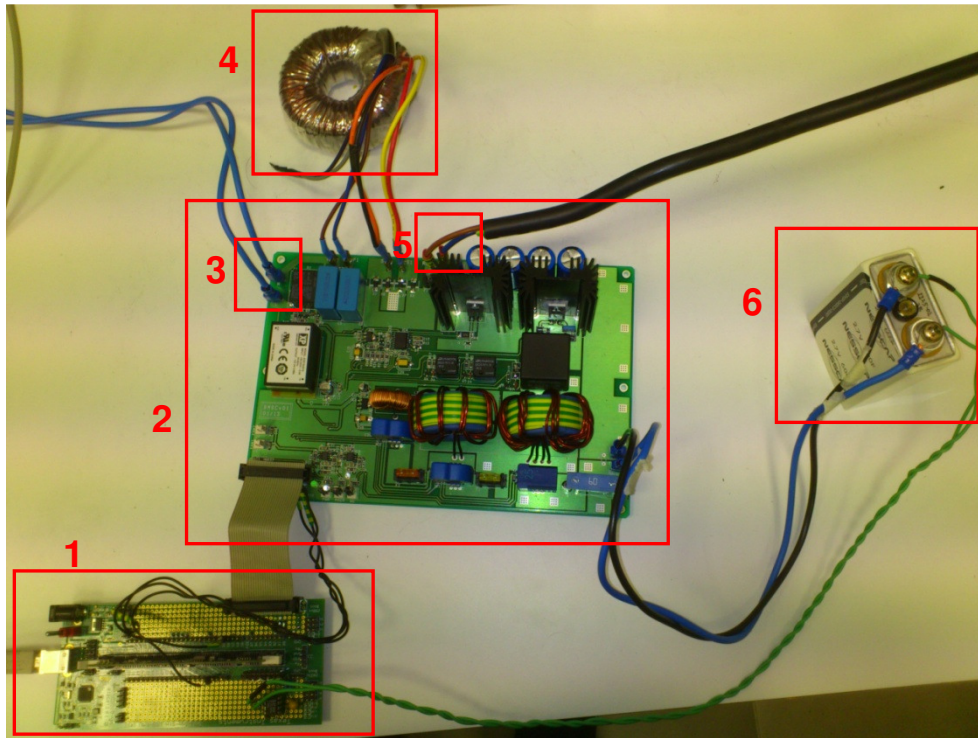
**Fig. 19:** Medida experimental con Osciloscopio. Respuesta a escalón de 5A en carga y en descarga (Rama 5A). Escala eje Y: 2A/div. Escala eje X: 1ms/div.

Se puede observar que en todos los casos (en todas las ramas) la regulación de la corriente es correcta y el transitorio con una pequeña sobre-oscilación se ajusta perfectamente a la respuesta observada en el modelo de simulación. También se observa perfectamente que en estos casos de medida no está implementado todavía el filtrado de la señal de referencia, y por tanto se genera un leve sobreoscilación.

En la rama de menor corriente, se ve que el transitorio de descarga es más lento que en las demás. Esto es debido a la limitación que genera en la dinámica del sistema el hecho de que la inductancia sea mucho mayor que en los otros casos.

#### 4.3.2- Medida de un supercondensador

Para realizar estas pruebas funcionales, se toma como muestra un pequeño supercondensador de 10F del fabricante Nesscap (modelo ESHSR-0010C0-002R7). En la fotografía de la Fig. 20 se muestra como queda un ejemplo del montaje del sistema.



**Fig. 20:** Fotografía del sistema en funcionamiento

En la imagen se muestran los siguientes componentes numerados:

- 1- Placa de control (placa de Texas Instruments).
- 2- Placa del convertidor de potencia.
- 3- Conexión de alimentación de 230V.
- 4- Transformador de baja frecuencia correspondiente al sistema de mantenimiento de carga del módulo de supercondensadores.
- 5- Conexión del módulo de supercondensadores Maxwell que queda fuera de la imagen.
- 6- Supercondensador sometido a ensayo, conectado a la placa de potencia y a la placa de control con cableado independiente, para realizar medida de tensión diferencial (el caso de la foto no se corresponde con el supercondensador de 10F del test descrito).

Para verificar la funcionalidad del sistema, se configura un ensayo a 3.5A con una duración de 500 segundos. No se realiza un ensayo normalizado, ya que el objetivo de esta medida es únicamente la verificación del correcto funcionamiento y medida del sistema.

Las características que da el fabricante sobre este supercondensador son las siguientes:

- **Capacidad:** 10F -10/+20%, medida en descarga a corriente constante y a 25°C.
- **DC ESR:** menor que 34mΩ.
- **Voltaje nominal:** 2.7V.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de las medidas experimentales realizadas:

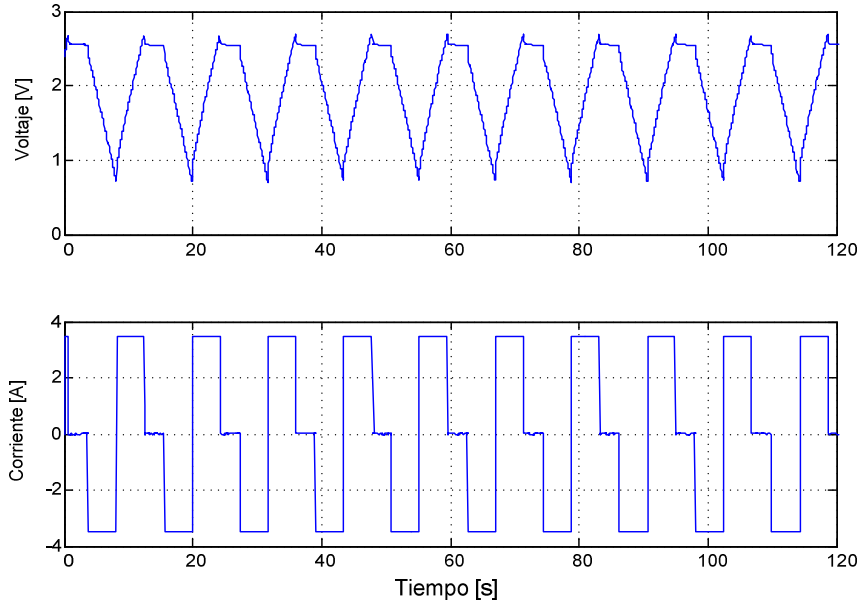


Fig. 21: Registro de medidas de tensión y corriente durante el ensayo.

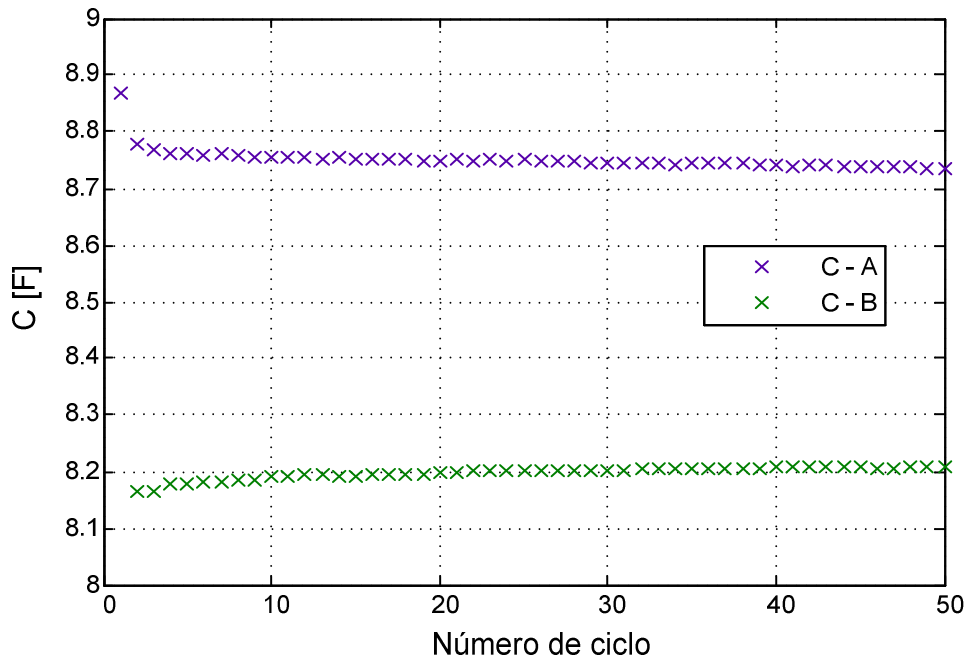


Fig. 22: Registro de medida de capacidad (A: en descarga, B: en carga).

En la Fig. 21 se puede ver la evolución de la tensión durante los ciclos de carga y descarga, y se aprecian los saltos de tensión debidos a la ESR tanto en el arranque como en la parada. En la gráfica

de corriente se pueden ver perfectamente los 3 estados de corriente que se ejecutan durante el ensayo: carga a 3.5A, parada y descarga a 3.5A.

En la Fig. 22 se puede observar que la capacidad en descarga se encuentra entre 8.7F y 8.8F, lo que dejaría al componente fuera de las especificaciones del fabricante. Este hecho puede ser debido a que el fabricante no especifica las condiciones exactas en las que mide sus componentes, como por ejemplo la corriente de ensayo, y por tanto no se puede hacer una comparación precisa directa con nuestros resultados.

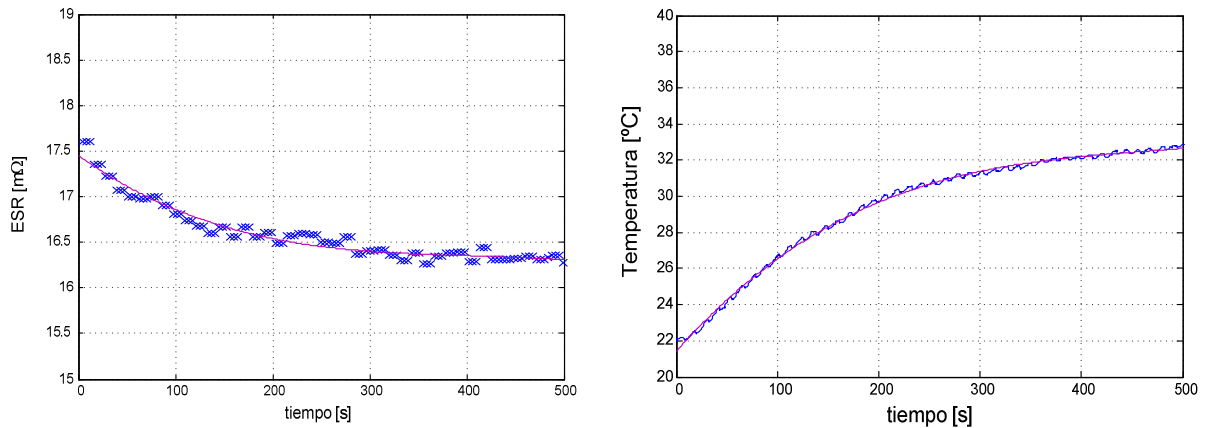


Fig. 23: Medida de resistencia serie y temperatura del supercondensador.

En la primera gráfica de la Fig. 23 se observa la fuerte dependencia existente de la resistencia interna del condensador con la temperatura. La resistencia desciende con el aumento la temperatura. Con esta medida se verifica el correcto funcionamiento del sistema de medida, ya que este es un efecto conocido en los supercondensadores EDLC.

Ver como ejemplo la siguiente figura del fabricante Maxwell:

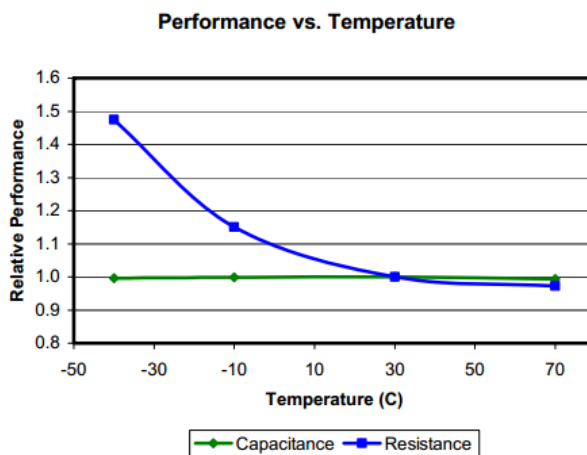


Fig. 24: Gráfico de la dependencia de la resistencia y capacidad con la temperatura (valores relativos a referencia tomada a 25°C) [16].

## **5- ESTUDIO DE SUPERCONDENSADORES SOMETIDOS A RADIACIÓN IONIZANTE**

### **5.3. Introducción y descripción de las pruebas**

Como ya se ha comentado en la introducción, estas pruebas tienen como objetivo estudiar la viabilidad de la utilización de supercondensadores en las fuentes de alimentación de los detectores del futuro acelerador de partículas lineal ILC (“International Lineal Colider”). El proceso de estudio se detalla en los siguientes sub-apartados:

#### **5.1.1- Selección de muestras**

Se seleccionan varias muestras de distintos fabricantes para la realización del estudio sobre componentes de distintas características. En concreto se seleccionan 5 muestras de capacidades entre 10F y 25F de fabricantes reconocidos (se seleccionan estas capacidades porque están el orden de las que teóricamente se utilizarán en el sistema de alimentación real):

- Muestras 1 y 2: Maxwell de 25F ( $V_R = 2.7V$ ).
- Muestra 3: Maxwell de 10F ( $V_R = 2.7V$ ).
- Muestra 4: Nesscap de 10F ( $V_R = 2.7V$ ).
- Muestra 5: Panasonic de 10F ( $V_R = 2.5V$ ).

En la siguiente fotografía se muestran los condensadores objetos del estudio antes de ser enviados a radiar.



**Fig. 25:** Supercondensadores objeto de estudio.



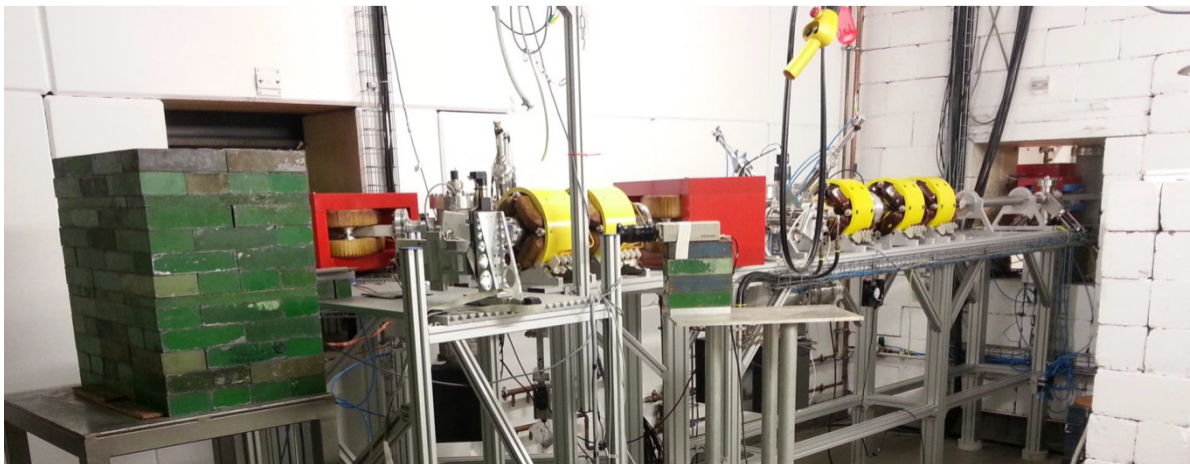
### 5.1.2- Medidas antes de ser irradiados

Con el sistema de caracterización diseñado se realizan las medidas a distintos niveles de corriente de las muestras seleccionadas, realizando ciclos de carga/descarga durante 10 minutos. Las corrientes de ensayo serán las siguientes:

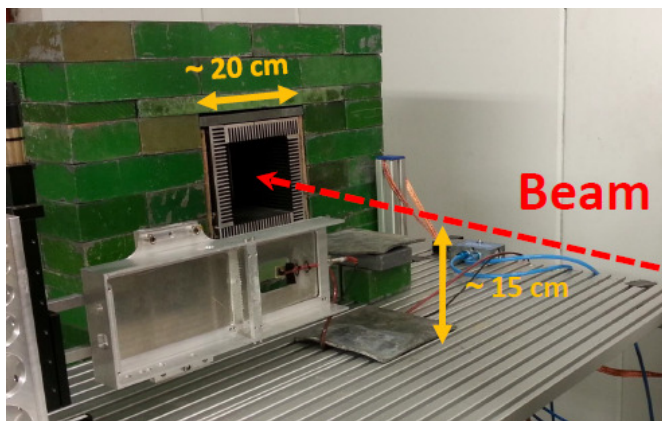
- Nivel 1: Corriente normalizada para clase 3 (ver figura 4).  $I_1 = 4 \cdot C \cdot V_R$
- Nivel 2: Corriente normalizada para clase 4.  $I_2 = 40 \cdot C \cdot V_R$
- Nivel 3: Corriente nominal especificada por el fabricante.
- Nivel 4: Corriente de pico máxima especificada por el fabricante.

### 5.1.3- Irradiación de supercondensadores

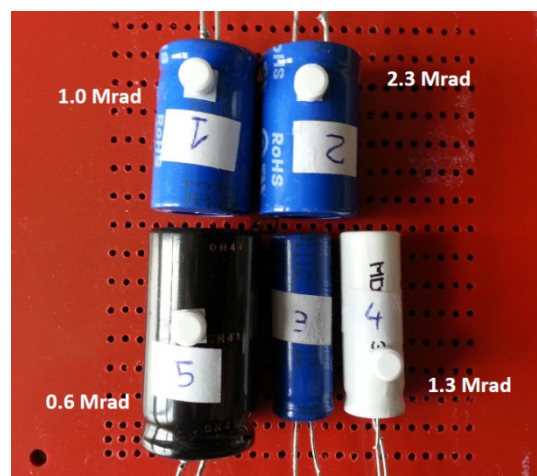
Los supercondensadores son sometidos a unas determinadas dosis de radiación. Concretamente fueron sometidos a un test de radiación en el acelerador de partículas “Electron Strecher Accelerator” (ELSA, Bonn).



(a)



(b)



(c)

**Fig. 26:** (a) y (b) Instalaciones del ELSA. (c) Medida de dosis recibida.

En la figura anterior se pueden ver dos fotografías (a) y (b) de las instalaciones del acelerador de partículas ELSA donde han sido irradiados los supercondensador sometidos a estudio. La fotografía (b) muestra el objetivo donde impacta el haz de electrones del acelerador, que será el punto donde se colocan los elementos sometidos al test (en este caso los supercondensadores). En la fotografía (c) se muestra la colocación de los supercondensadores durante el test de radiación y la dosis medida que ha recibido cada uno de ellos.

Los parámetros del test de radiación facilitados por los técnicos del ELSA se muestran a continuación:

- Radiación de electrones a 20 MeV (Mega electrón Voltios)
  - Punto del haz radiado: 3x3 cm<sup>2</sup>
  - 4 horas de radiación.
  - Dosis total de radiación: 0.6 Mrad -2.3 Mrad\*
- \*Mrad = millones de rads (unidad de radiación)

#### **5.1.4- Medidas después de ser irradiados**

Se vuelven a realizar las mismas medidas que en el punto 5.1.2 para comparar con las primeras y observar los posibles efectos de degradación.

### **5.4. Resultados Experimentales**

El estudio ha sido llevado a cabo sobre las 5 muestras seleccionadas inicialmente, pudiendo obtener información y medidas de cada una de ellas. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las muestras para los casos de nivel 2 y 3 de corriente.

Las gráficas azuladas corresponden a las medidas antes de haber sido irradiado y las rojas a las medidas de después de recibir la dosis radiación. En el caso de medida de capacidad donde se observan 4 curvas por gráfica, las curvas roja y azul son medidas realizadas en ciclos de descarga, y la morada y la naranja son medidas en ciclo de carga.

Ver las siguientes figuras:

Muestra 1 (Maxwell 25F):

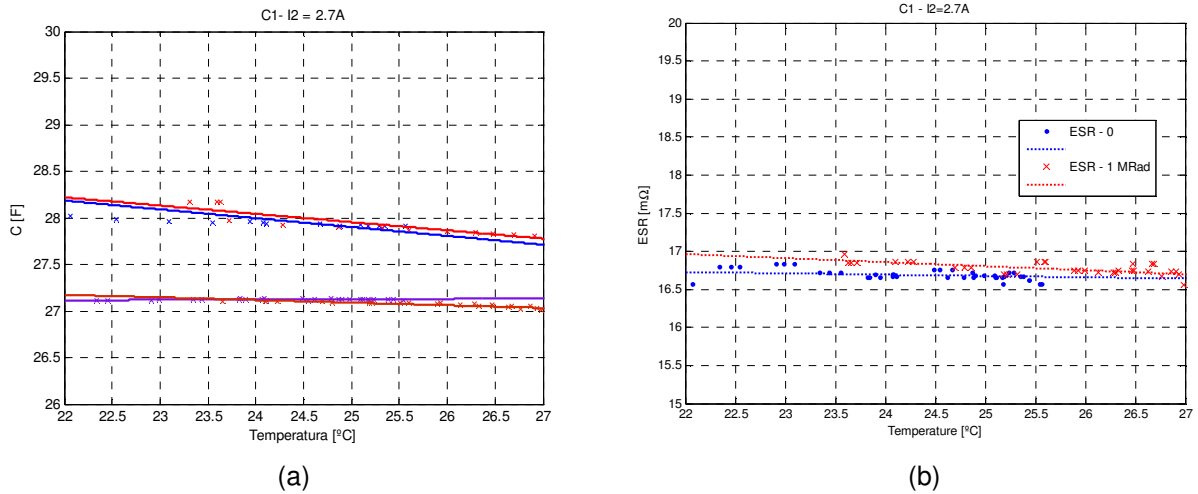


Fig. 27: Medidas realizadas a la muestra 1 a 2.7A. (a) Capacidad frente a Tª. (b) ESR frente a Tª.

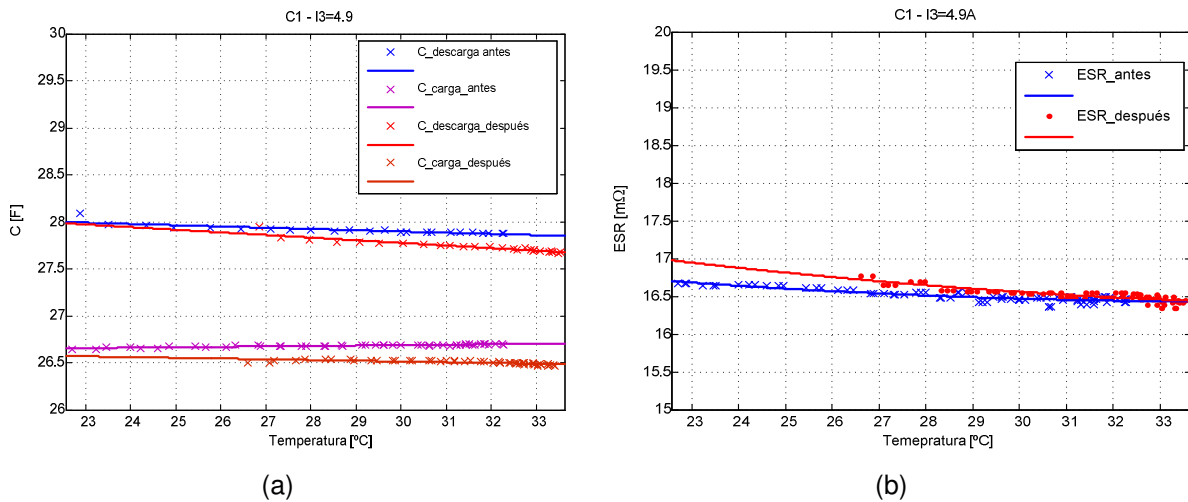


Fig. 28: Medidas realizadas a la muestra 1 a 4.9A. (a) Capacidad frente a Tª. (b) ESR frente a Tª.

En la medida de capacidad se observan variaciones máximas entre el antes y el después de unos 0.2F en el caso de ensayo a 4.9A y de 0.1F en el caso de 2.7A. Estas variaciones son menores del 1% en el primer caso y del 0.5% en el segundo, y por tanto se supondrán despreciables ya que es perfectamente asumible que entren dentro de la incertidumbre del sistema de medida.

El resultado en la medida de la ESR es similar al caso de la capacidad, con variaciones observadas de alrededor del 1%, que a todos los efectos se pueden considerar despreciables.



Muestra 3 (Maxwell 10F):

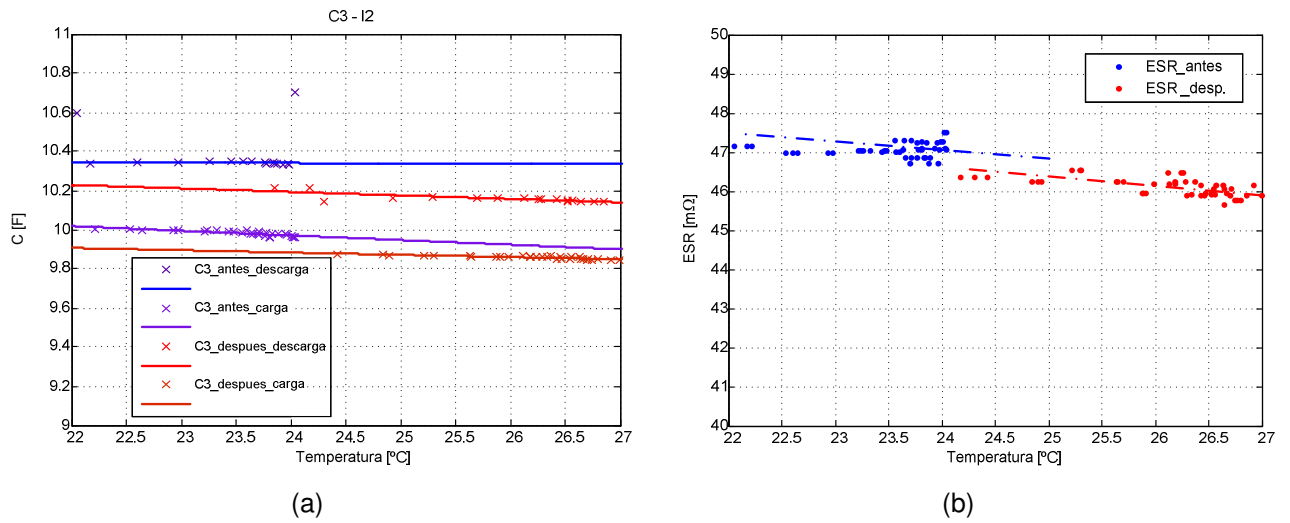


Fig. 29: Medidas realizadas a la muestra 3 a 1A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

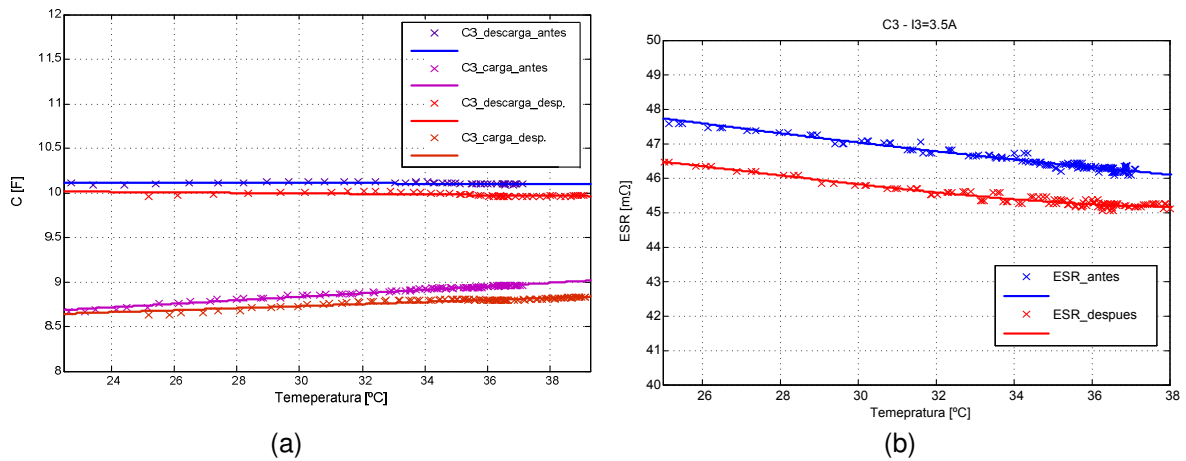


Fig. 30: Medidas realizadas a la muestra 3 a 3.5A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

En la medida de capacidad se observan disminuciones máximas de ésta entre el antes y el después de unos 0.2F en los dos casos de ensayo. Estas variaciones son de alrededor del 2%. Son ligeramente superiores a las producidas en la muestra anterior, pero siguen siendo muy bajas y asumible que entren dentro de la incertidumbre del sistema de medida.

El resultado en la medida de la ESR es similar al caso de la capacidad, con variaciones observadas de alrededor del 2% ( $1m\Omega$ ).

Muestra 4 (Nesscap 10F):

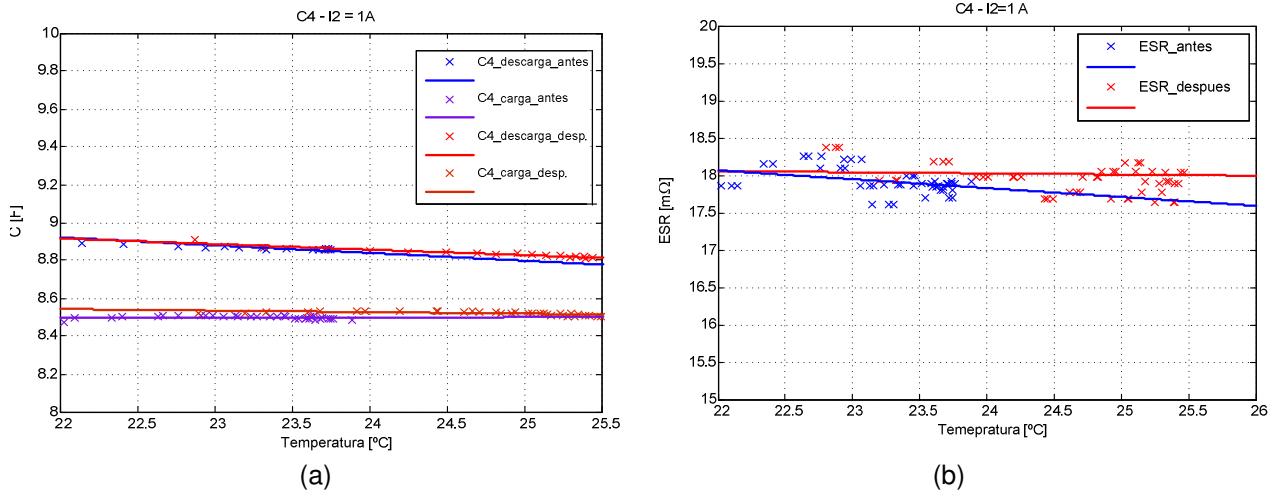


Fig. 31: Medidas realizadas a la muestra 4 a 1A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

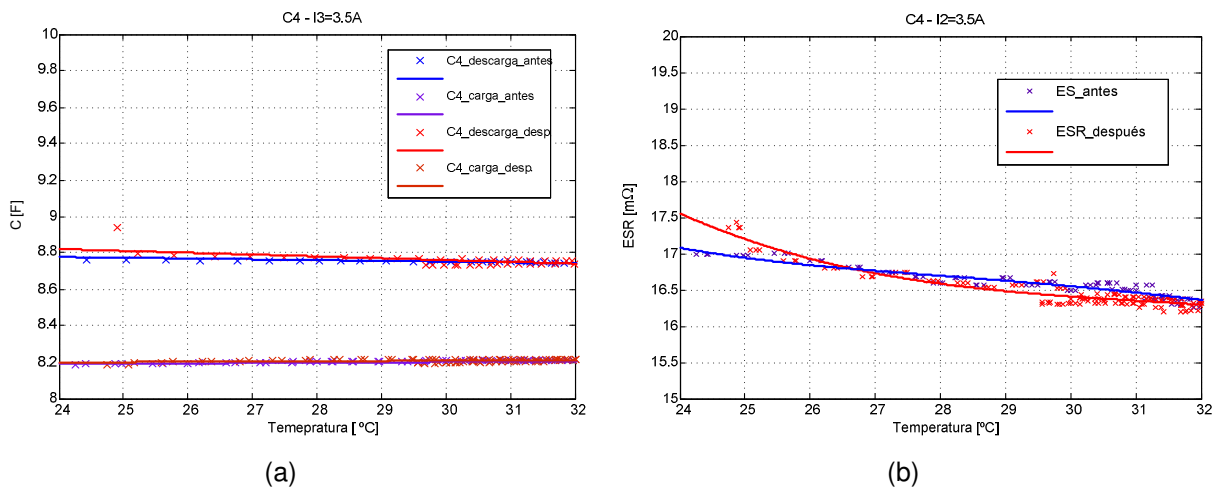


Fig. 32: Medidas realizadas a la muestra 4 a 3.5A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

En la medida de capacidad se observa que los casos de antes y después están prácticamente solapados para los dos niveles de corriente. Estas variaciones son menores del 1%, y por tanto se supondrán despreciables ya que es perfectamente asumible que entren dentro de la incertidumbre del sistema de medida.

En el caso de la medida de la ESR, las variaciones observadas máximas son de alrededor del 2%, que una vez más se pueden considerar despreciables.

Muestra 5 (Panasonic 10F):

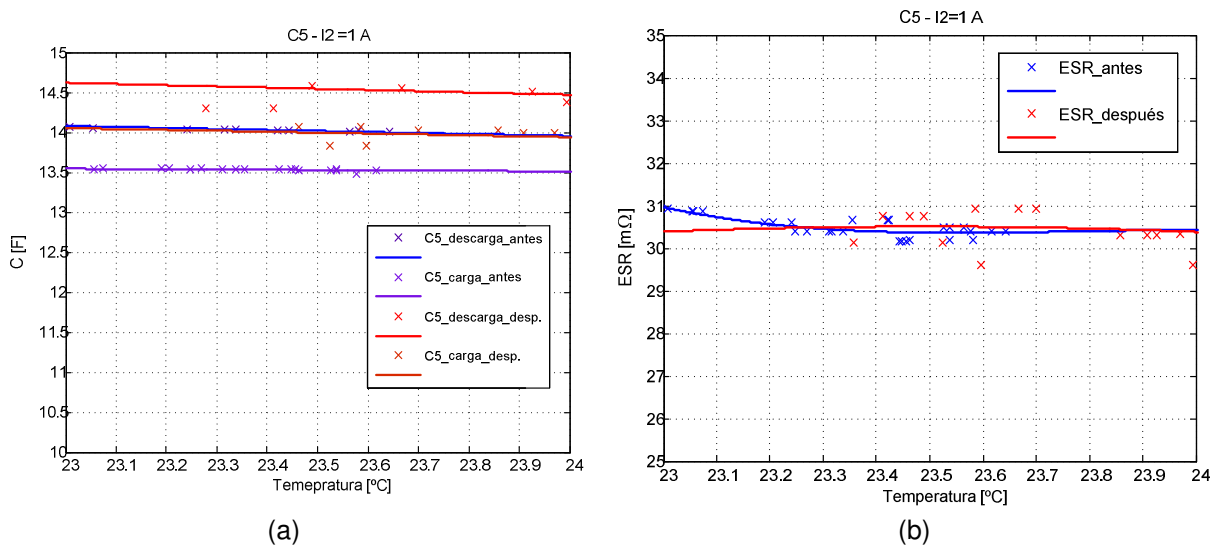


Fig. 33: Medidas realizadas a la muestra 5 a 1A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

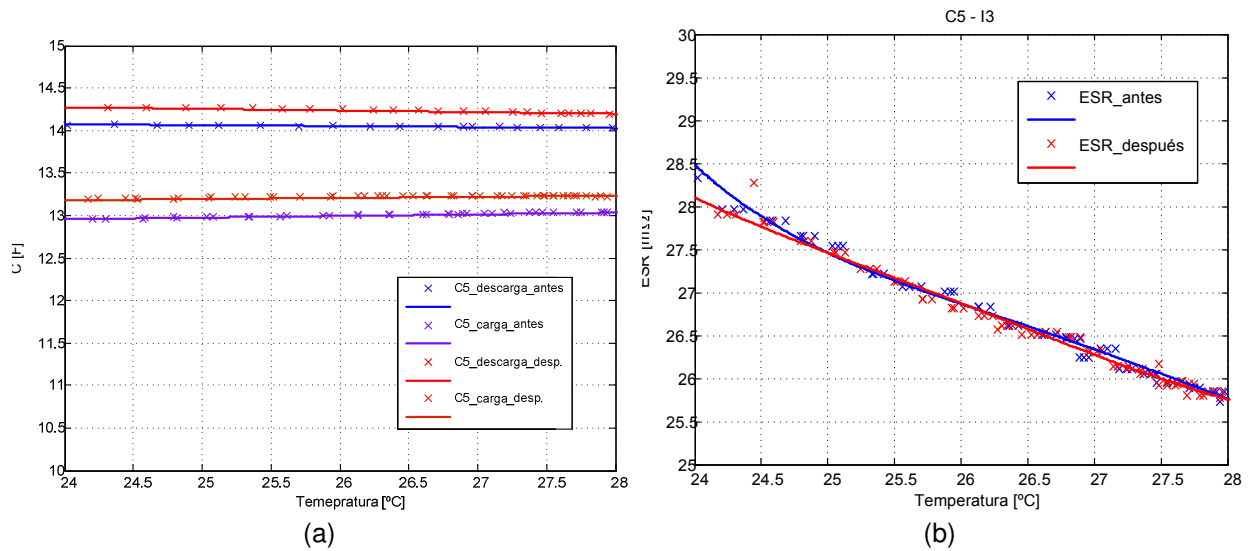


Fig. 34: Medidas realizadas a la muestra 5 a 3.5A. (a) Capacidad frente a  $T^a$ . (b) ESR frente a  $T^a$ .

En las mediciones de capacidad se observan variaciones máximas entre el 2 y el 3%. Estas variaciones son se supondrán despreciables ya que es asumible que entren dentro de la incertidumbre del sistema de medida.

El resultado en la medida de la ESR el resultado de antes y después es prácticamente idéntico.

## **6- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

Se ha realizado el diseño y construcción de un sistema para la caracterización de supercondensadores, incluyendo sus tres partes principales: electrónica de potencia, sistema de control y sistema de adquisición y medida.

El sistema diseñado es un sistema portátil que realiza la medición de las características de un supercondensador (Capacidad y ESR) registrando la temperatura del mismo, ya que estos parámetros son muy dependientes de ella. Además es capaz de realizar ensayos cíclicos de forma autónoma para su utilización en estudios de degradación.

Se ha fabricado un prototipo totalmente funcional que ha sido verificado con medidas experimentales.

Se ha realizado un estudio de supercondensadores sometidos a radiación ionizante. Se trata de una primera serie de test de radiación con el objetivo de validar su posible aplicación en entornos radiactivos.

Se ha utilizado el sistema diseñado para realizar la medida de los parámetros de los supercondensadores (C, ESR y  $T^a$ ) a corriente constante, con niveles normalizados y con corrientes nominal y máxima de cada fabricante.

Este estudio ha servido para determinar que los supercondensadores ensayados son tolerantes a la radiación de electrones con unas dosis comprendidas entre 1 y 2.3 Megarads, ya que no se han encontrado diferencias apreciables en sus características tras ser sometidos a radiación. Por tanto, por ahora no se ha encontrado ninguna limitación de uso de estos dispositivos en este tipo de entornos.

Tanto el sistema de caracterización como el estudio de supercondensadores sometidos a radiación, han sido presentados en dos congresos internacionales relacionados con aceleradores de partículas [19] [20].

En la realización de todo este trabajo se han aplicado técnicas de modelado y control de convertidores electrónicos de potencia, control digital, diseño de componentes magnéticos, técnicas de diseño de PCB, técnicas adquisición de datos y tratamiento de señal, etc. Además de la utilización de herramientas de simulación y programación: Matlab/Simulink (desarrollo del modelo del convertidor de potencia y cálculo y ajuste del controlador), Pspice, Psim (simulación del convertidor de potencia para verificación y ajuste de parámetros de diseño) y Vissim (programación del control del convertidor que se ha diseñado utilizando las herramientas anteriores, además de la programación de la máquina de estados del sistema completo, creación de un interfaz visual de comunicación con el usuario, monitorización y adquisición de datos).

Líneas Futuras:

Ya están planificados estudios más exhaustivos, con otros tipos de radiaciones y mayores dosis, que sumados al estudio inicial ya realizado, servirán para validar la utilización de estos dispositivos en el acelerador de partículas lineal, ILC.

Se plantea la realización de otros ensayos de comportamiento y degradación en cámara climática (temperatura y humedad controladas).

Se plantea la posible adaptación del sistema para realizar otro tipo de ensayos que no sean cíclicos a corriente constante, como por ejemplo ensayos a potencia constante.

Se plantea la utilización del sistema para la realización de estudios de degradación sobre otros dispositivos de almacenamiento de alta capacidad (baterías de litio, etc.)

## ANEXO A. MODELADO DEL CONVERTIDOR

A partir del esquema del convertidor mostrado en la Fig. 4, se va a calcular la función de transferencia  $G_{id}(s)$  para los dos modos de funcionamiento del convertidor.

### A1- Buck (Carga de supercondensador)

Para obtener la función de transferencia del modelo promediado de pequeña señal se utilizarán las ecuaciones de estado del sistema. Se obtienen las ecuaciones de estado para cada uno de los modos de funcionamiento del convertidor y se calculan las matrices de estado promediadas durante un ciclo de conmutación. Posteriormente se le aplicará una perturbación respecto al punto de operación para obtener la función de transferencia de pequeña señal [14] [15].

#### ESTADO1: T1 ON / T2 OFF

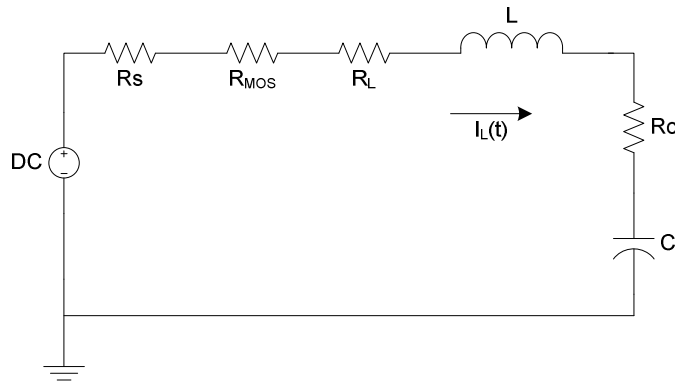


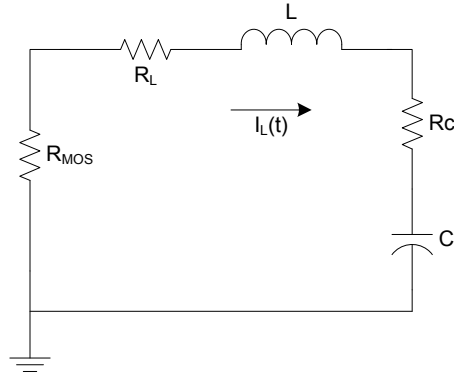
Fig. 35: Circuito equivalente para T1 ON y T2 OFF

Ecuaciones de estado:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{DC} - (R_S + R_{MOS} + R_L + R_C) \cdot i_L(t) - v_C(t) \\ C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_L(t) \end{cases} \quad (R_{ON} = R_S + R_{MOS} + R_L + R_C)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ON}}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{DC}$$

**ESTADO2: T2 ON / T1 OFF**



**Fig. 36:** Circuito equivalente para T2 ON y T1 OFF

Ecuaciones de estado:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = -(R_{MOS} + R_L + R_C) \cdot i_L(t) - v_C(t) \\ C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_L(t) \end{cases} \quad (R_{OFF} = R_{MOS} + R_L + R_C)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{OFF}}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix}$$

**MODELO PROMEDIADO:**

Se promedian las ecuaciones anteriores durante un ciclo de conmutación. El estado1 durante  $t=D$  y el estado2 durante  $t=(1-D)=D'$ , siendo por tanto un ciclo completo  $t=1$ .

$$\begin{aligned} & (R_{OFF} + R_{ON} = R_P \approx 2R_{ON} \approx 2R_{OFF}) \qquad (d(t) + d'(t) = 1) \\ & \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ A = d(t)A_1 + d'(t)A_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{d(t)}{L}R_{ON} - \frac{d'(t)}{L}R_{OFF} & -\frac{d(t)}{L} - \frac{d'(t)}{L} \\ \frac{d(t)+d'(t)}{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_P(d(t)+d'(t)) & -\frac{d(t)+d'(t)}{L} \\ \frac{d(t)+d'(t)}{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_P & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \\ b = d(t)b_1 + d'(t)b_2 &= \begin{bmatrix} d(t)/L \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_P & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d(t)/L \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{DC}$$

Se aplican perturbaciones de pequeña señal:

$$\begin{cases} d(t) = D + \hat{d}(t) \\ v_C(t) = V_C + \hat{v}_C(t) \\ i_L(t) = I_L + \hat{i}_L(t) \end{cases}$$

Ecuaciones promediadas de pequeña señal:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot i_L(t) - \frac{1}{L} \cdot v_C(t) + \frac{d(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \cdot i_L(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot (I_L + \hat{i}_L(t)) - \frac{1}{L} \cdot (V_C + \hat{v}_C(t)) + \frac{D + \hat{d}(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \cdot (I_L + \hat{i}_L(t)) \end{cases}$$

Se eliminan las constantes o valores estacionarios:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(t) - \frac{1}{L} \cdot \hat{v}_C(t) + \frac{\hat{d}(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \cdot \hat{i}_L(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(t) - \frac{1}{LC} \cdot \int \hat{i}_L(t) + \frac{\hat{d}(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \cdot \hat{i}_L(t) \end{cases}$$

Aplicando la transformada de Laplace:

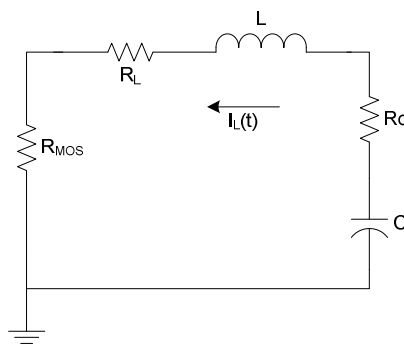
$$s \cdot \hat{i}_L(s) = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(s) - \frac{1}{LC} \cdot \frac{\hat{i}_L(s)}{s} + \frac{\hat{d}(s)}{L} V_{DC} \Rightarrow (s^2 LC + sCR_p + 1) \cdot \hat{i}_L(s) = sV_{DC} \cdot \hat{d}(s)$$

Función de transferencia control - corriente de salida:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{sV_{DC}}{s^2 LC + sCR_p + 1}$$

## A2- Boost (Descarga de supercondensador)

**ESTADO1: T2 ON / T1 OFF**



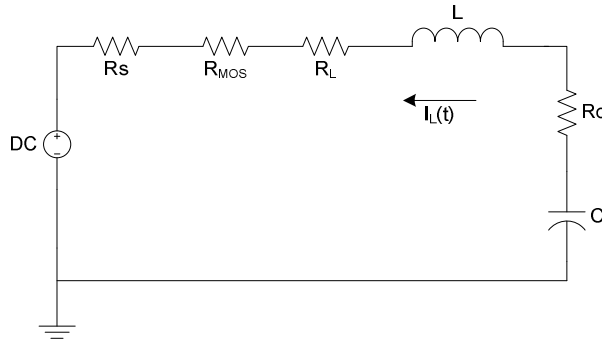
**Fig. 37:** Circuito equivalente para T2 ON y T1 OFF

Ecuaciones de estado:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_C(t) - (R_{MOS} + R_L + R_C) \cdot i_L(t) \\ C \frac{dv_C(t)}{dt} = -i_L(t) \end{cases} \quad (R_{ON} = R_{MOS} + R_L + R_C)$$



$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{ON} & 1 \\ L & L \\ -1 & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix}$$

**ESTADO2: T1 ON / T2 OFF**

**Fig. 38:** Circuito equivalente para T1 ON y T2 OFF

Ecuaciones de estado:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_C(t) - V_{DC} - (R_S + R_{MOS} + R_L + R_C) \cdot i_L(t) \\ C \frac{dv_C(t)}{dt} = -i_L(t) \end{cases} \quad (R_{OFF} = R_S + R_{MOS} + R_L + R_C)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{OFF} & 1 \\ L & L \\ -1 & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{DC}$$

**MODELO PROMEDIADO:**

Se considera que T2 conduce durante el tiempo D y T1 conduce en el tiempo D'.

$$\begin{aligned} & (R_{OFF} + R_{ON} = R_p \approx 2R_{ON} \approx 2R_{OFF}) & (d(t) + d'(t) = 1) \\ & \downarrow & \downarrow \\ A = d(t)A_1 + d'(t)A_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{d(t)}{L}R_{ON} - \frac{d'(t)}{L}R_{OFF} & \frac{d(t)}{L} + \frac{d'(t)}{L} \\ -\frac{d(t)+d'(t)}{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_p(d(t)+d'(t)) & \frac{d(t)+d'(t)}{L} \\ -\frac{d(t)+d'(t)}{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_p & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \\ b = d(t)b_1 + d'(t)b_2 &= \begin{bmatrix} -d'(t)/L \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}R_p & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -d'(t)/L \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{DC}$$

Se aplican perturbaciones de pequeña señal:

$$\begin{cases} d(t) = D + \hat{d}(t) \\ v_C(t) = V_C + \hat{v}_C(t) \\ i_L(t) = I_L + \hat{i}_L(t) \end{cases}$$

Ecuaciones promediadas de pequeña señal:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot i_L(t) + \frac{1}{L} \cdot v_C(t) - \frac{d'(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(-\frac{1}{C}\right) \cdot i_L(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot (I_L + \hat{i}_L(t)) + \frac{1}{L} \cdot (V_C + \hat{v}_C(t)) - \frac{D' + \hat{d}'(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(-\frac{1}{C}\right) \cdot (I_L + \hat{i}_L(t)) \end{cases}$$

Se eliminan las constantes o valores estacionarios:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(t) + \frac{1}{L} \cdot \hat{v}_C(t) - \frac{1 - \hat{d}(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(-\frac{1}{C}\right) \cdot \hat{i}_L(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(t) + \frac{1}{LC} \cdot \int \hat{i}_L(t) - \frac{\hat{d}(t)}{L} V_{DC} \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \left(-\frac{1}{C}\right) \cdot \hat{i}_L(t) \end{cases}$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$s \cdot \hat{i}_L(s) = \left(-\frac{R_p}{L}\right) \cdot \hat{i}_L(s) + \frac{1}{LC} \cdot \frac{\hat{i}_L(s)}{s} + \frac{\hat{d}(s)}{L} V_{DC} \Rightarrow (s^2 LC + sCR_p + 1) \cdot \hat{i}_L(s) = sV_{DC} \cdot \hat{d}(s)$$

Función de transferencia control - corriente de salida:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{sV_{DC}}{s^2 LC + sCR_p + 1}$$

La función de transferencia obtenida es la misma que en el caso del modo reductor. Esto es debido a que la señal a controlar ( $i_L$ ) es la misma en todo momento. De esta forma se simplificarán los cálculos del controlador.

## ANEXO B. SOFTWARE DE CONTROL, MONITORIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la realización de esta parte se ha utilizado el software "Vissim", que está recomendado por Texas Instruments para utilizar en conjunto con algunos de sus sistemas de desarrollo.

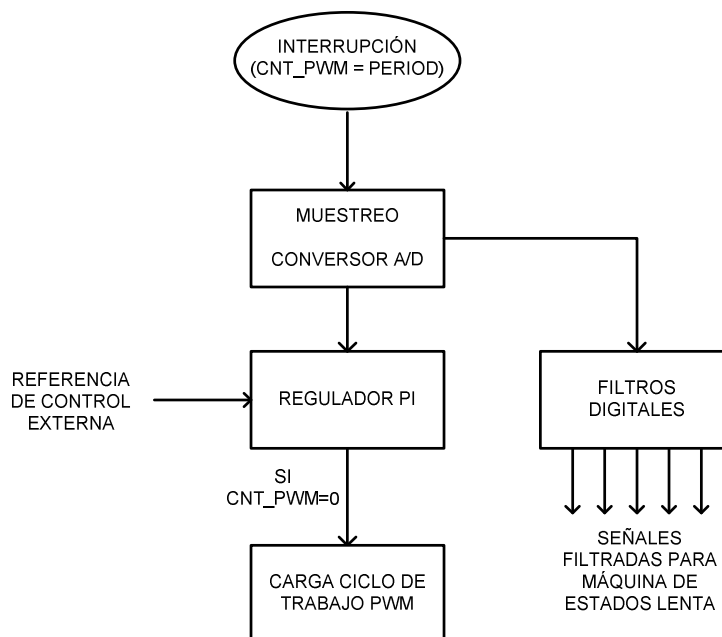
Vissim es básicamente un software de programación/simulación gráfica similar a Simulink, y que permite generar código C compilable para los microcontroladores de Texas Instruments, y descargarlo directamente sobre la placa de desarrollo. Además permite la comunicación en tiempo real con el microcontrolador programado, para la verificación y monitorización del sistema, y para la adquisición de datos desde un PC.

El software que se ha programado se divide en dos partes (dos ficheros distintos) claramente diferenciadas: una parte de programación del microcontrolador (control del convertidor de potencia y control del sistema de caracterización en general) y otra parte que integra en un interfaz la configuración, monitorización y adquisición de datos del sistema.

### B1- Programación del control

La parte de programación del control posee a su vez otras dos partes diferenciadas: El lazo de control del convertidor DC/DC (lazo rápido) y el lazo de control del sistema global (máquina de estados, lazo lento).

#### Lazo de control rápido:



**Fig. 39:** Lazo de control rápido (muestreo ADC y control convertidor DC/DC)

En la figura anterior se puede ver la secuencia de tareas que se realizan en el lazo rápido. Esta parte del control va sincronizada con la señal triangular del generador PWM.

- 1- Cuando el contador del PWM llega a su valor máximo (“period”) se activa una interrupción donde se ejecuta este código.
- 2- Se muestrean todas las entradas analógicas configuradas.
- 3- En paralelo, se calcula el nuevo ciclo de trabajo con un regulador PI y se aplican filtros digitales a las señales de corriente y tensión del supercondensador.
- 4- Cuando el contador del PWM llega vuelve a cero se cargan los nuevos valores de ciclo de trabajo calculados.
- 5- Se entra en espera hasta nueva interrupción para iniciar de nuevo la secuencia de control.

Lazo de control lento:

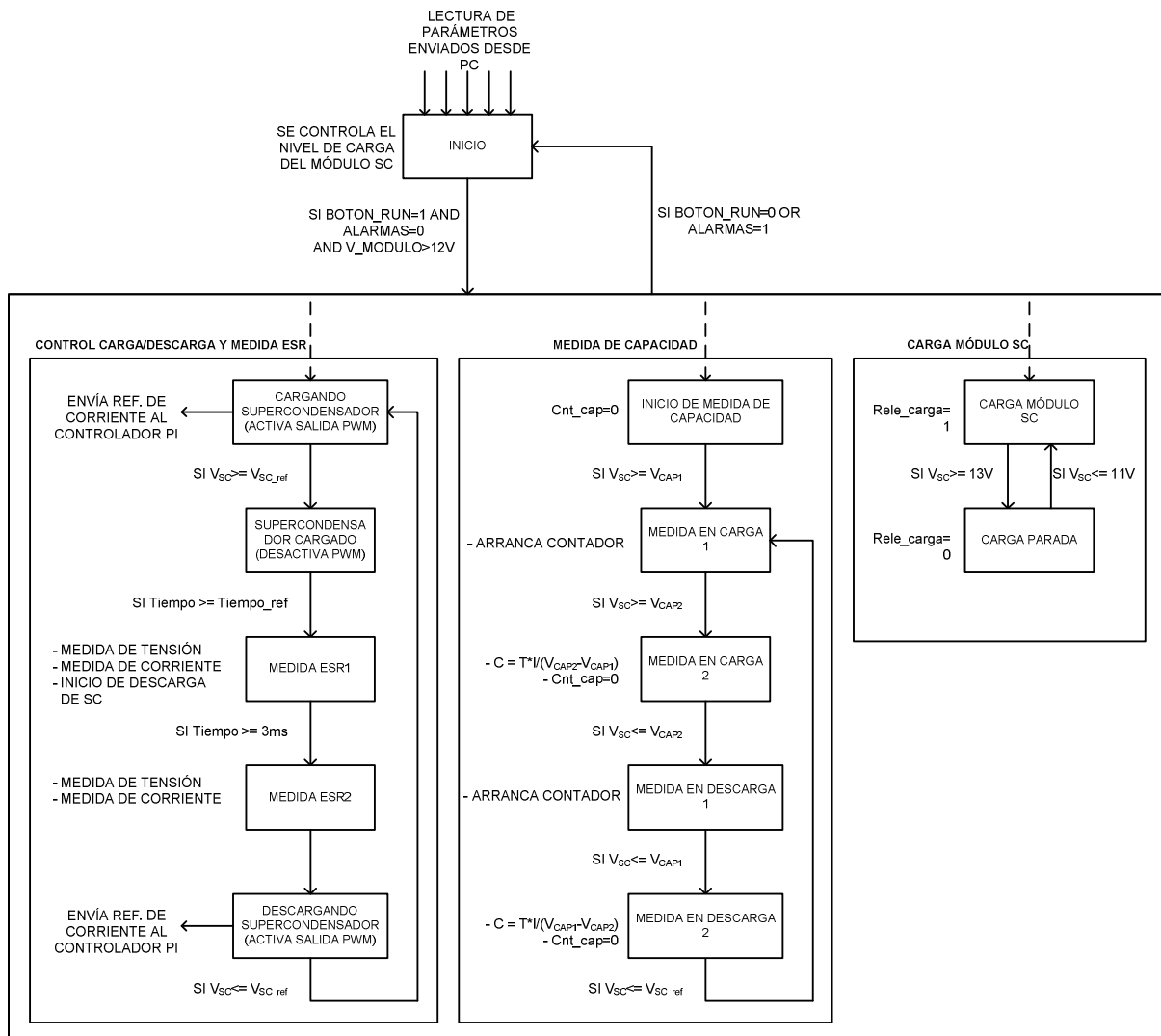


Fig. 40: Lazo de control lento

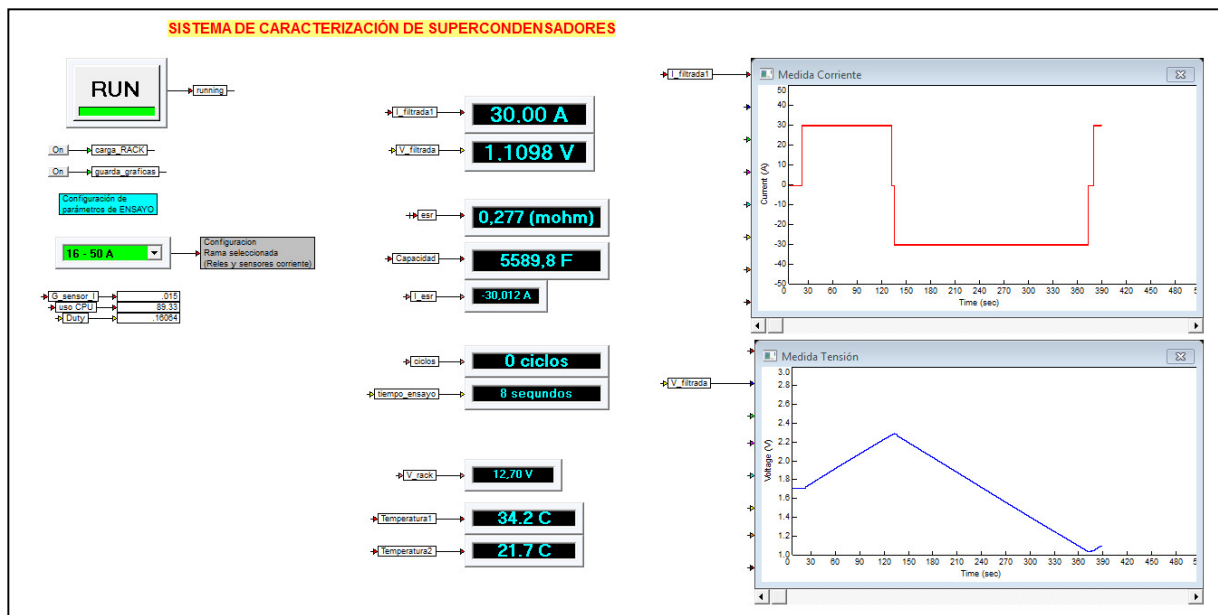
El lazo de control lento se ejecuta a una frecuencia de 5kHz. Funciona mucho más lento porque es el que más tareas realiza y porque no existe necesidad de ejecutarse a mayor velocidad. Realiza las siguientes tareas:

- **Inicio:** Lee los parámetros de configuración que se le indiquen en la pantalla de visualización del PC, y mantiene la carga del módulo de supercondensadores por encima de 11V. Cuando recibe la señal del botón "RUN" del interfaz PC, se arranca el ensayo en el que se ejecutan 3 tareas en paralelo.  
Se volverá al estado de inicio en cualquier momento que se desactive el botón "RUN" o se active alguna de las alarmas. Estas alarmas incluyen: sobretensiones en supercondensador ensayado y en módulo SC, y sobret temperatura en la electrónica del convertidor o en el supercondensador.
- **Control carga/descarga y medida ESR:** esta es la tarea principal en el bloque de ensayo:
  - o Cargando supercondensador: Carga el valor de corriente de ensayo en la variable de referencia y activa las salidas del modulador PWM. Cuando alcanza la tensión máxima de ensayo que se ha configurado, pasa al siguiente estado.
  - o Supercondensador cargado: Desactiva las salidas PWM y permanece en este estado durante el tiempo de parada que se haya configurado.
  - o Medida ESR1: Realiza la medida de tensión y corriente en parado (se mide el cero de la corriente porque puede existir alguna pequeña desviación u "offset"). Seguidamente se carga el valor de corriente de descarga en la variable de referencia y activa las salidas PWM nuevamente. Cuando pasan 3ms se salta al siguiente estado.
  - o Medida ESR2: Realiza la medida de tensión y corriente 3ms después del arranque de la descarga. Se calcula el valor de la ESR: 
$$ESR(\Omega) = \frac{V_{ESR1} - V_{ESR2}}{I_{ESR1} - I_{ESR2}}$$
  - o Descargando supercondensador. Se mantiene en estado de descarga hasta que se alcanza la tensión mínima de ensayo que se haya configurado, y vuelve al estado de carga.
- **Medida de capacidad:** En esta tarea se miden los tiempos de carga entre las tensiones de medida de capacidad que se hayan configurado para obtener el valor de capacidad ( $V_{cap1}$  y  $V_{cap2}$  son por norma  $0.4 \cdot V_{nominal}$  y  $0.8 \cdot V_{nominal}$ ),
  - o Inicio de medida de capacidad: Cuando se supera la tensión  $V_{cap1}$  (tensión baja de medida) se pasa al siguiente estado.
  - o Medida en Carga 1: Se activa contador para medir el tiempo de carga. Cuando se supera la tensión  $V_{cap2}$  (tensión alta de medida) se pasa al siguiente estado.

- o Medida en Carga 2: Se guarda el valor del contador y se calcula la capacidad en carga de la siguiente forma:  $C = \frac{dV}{dt} = I \Rightarrow C = \frac{I_{CARGA}}{t_{CARGA} \times (V_{cap2} - V_{cap1})}$
  - o Posteriormente se realiza la misma secuencia pero en descarga, y se vuelve a iniciar el ciclo.
- **Carga módulo SC:** En esta tarea se mantiene la carga del módulo de supercondensadores por encima de 11V. Si se detecta que la tensión es inferior a 11V, se activa el relé que conecta el circuito de carga. Si la tensión supera los 13V, se desactiva.

## B2- Interfaz de configuración y visualización

En la figura 36 se muestra el interfaz utilizado para realizar la configuración del sistema, monitorización y adquisición de datos. Los datos de la figura corresponden a una medida experimental.



**Fig. 41:** Interfaz de configuración, monitorización y adquisición de datos. (Datos medidos correspondientes a supercondensador Nesscap 6200F)

Controles (parte izquierda de la imagen):

- **Botón “RUN”:** envía orden de iniciar el ensayo.

- **“Carga\_RACK”**: habilita la carga del módulo de supercondensadores antes de comenzar el ensayo.
- **“guarda\_gráficas”**: habilita el guardado de los datos en el PC (ciclos de tensión, corriente y temperaturas, y las medidas de capacidad y ESR de cada unos de los ciclos)
- **Bloque “Configuración de parámetros de ensayo”**: en este bloque se configuran los distintos parámetros de ensayo:
  - o Número de ciclos y tiempo de ensayo.
  - o Niveles de tensión máxima y mínima.
  - o Corriente en carga y descarga.
  - o Tiempo de parada tras la carga.
  - o Tensiones de referencia para medida de capacidad.
- **Bloque “Selección de rama” (color verde)**: en este menú desplegable se selecciona el rango de corrientes del ensayo que se va a realizar. En función del rango elegido, se seleccionará la rama que le corresponda y se cargarán los valores del controlador (ganancias proporcional e integral) adecuados para esa rama.

Indicadores digitales (parte central de la imagen): Por orden de arriba hacia abajo se muestran las siguientes medidas:

- Corriente actual por el supercondensador.
- Tensión del supercondensador.
- Última medida de ESR.
- Última medida de capacidad.
- Corriente medida en la última medida de ESR (este valor se utiliza para verificar que el convertidor está respondiendo bien al transitorio de arranque).
- Número de ciclos de carga/descarga realizados
- Tiempo de ensayo transcurrido
- Tensión del módulo de supercondensadores
- Sensor de temperatura 1 (sensor conectado al supercondensador ensayado)
- Sensor de temperatura 2 (sensor de medida de temperatura ambiente)

Gráficas (parte derecha): Muestran en tiempo real la evolución de la corriente y la tensión de ensayo.

**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, BOOSTCAPÒ 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] N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. LeMoigne, "Modeling and Characterizing Supercapacitors Using an Online Method", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 12, Year 2010, pag. 3980-3990.
- [9] Sitio web de Tecategroup, distribuidor especializado en supercondensadores: <https://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracapacitor-FAQ.php>
- [10] Sitio web de Nesscap, fabricante de supercondensadores: <http://www.nesscap.com/product/overview.jsp>



- [11] 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.
- [12] I. Echeverría, F.J. Arcega, F. Arteche, "Estudio de métodos para medida de supercondensadores", Trabajo Fin de Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética, EINA, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2011.
- [13] Norma IEC 62391:2006. Fixed electric double-layer capacitors for use in electronic equipment.
- [14] Chun T. Rim, Gyu B. Joung, and Gyu H. Cho," Practical Switch Based State-Space Modeling of DC-DC Converters with All Parasitics," IEEE Trans. on power electronics, vol. 6 No. 4 October 1991.
- [15] R. W. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of power electronics", Second edition, Kluwer, 2001. (Cap 7, AC Equivalent Circuit Modeling, Cap. 8 Converter transfer Functions, Cap. 9 Controller Design)
- [16] Sitio web de Maxwell, fabricante de supercondensadores:  
[http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627\\_boostcap\\_product\\_guide.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf)
- [17] Nota de aplicación de Cygnal Integrated Products AN018, "Improving ADC Resolution By Oversampling and Averaging", Mayo 2001.
- [18] Nota de aplicación de Microchip AN1152, Jayanth Murthy Madapura "Achieving Higher ADC Resolution Using Oversampling", 2008.
- [19] F. Arteche, I. Echeverria, A. Pradas , M. Ullan, I.Vila and A. Ruiz, "Base line design for the ILC-FTD sub-detector power distribution system", International Conference on Future Linear Colliders (LCWS12), Texas, USA, October 2012.
- [20] A.Pradas,F. Arteche, C. Marinas, M. Iglesias, I.Echeverria, FJ. Piedrafita, I.Vila, "Super-capacitor characterization system for FTD-ILD sub-detector power distribution system", ECFA - Linear Collider Workshop 2013, Hamburg, Germany.
- [21] Sitio web del proyecto del futuro "International Linear Collider" (ILC):  
<http://www.linearcollider.org/ILC>