

## **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ELECTRÓNICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCAPACITORES**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ELECTRONIC TEST BENCH FOR THE CHARACTERIZATION OF SUPERCAPACITORS**

**William F. Rodríguez S.\* Julián A. Correa G. \*\* Aldemar Fonseca V. \*\*\***

**Resumen:** Los bancos de pruebas en electrónica, son dispositivos que permiten medir el comportamiento de diferentes componentes electrónicos cuando son expuestos a diferentes variables físicas como lo son: voltajes, corrientes, temperaturas entre otras.

Este artículo describe el desarrollo, diseño e implementación de un banco de pruebas electrónico para la caracterización de supercondensadores, basándose en el método de carga y descarga a corriente constante propuesto por la norma IEC62391[1] . El banco de pruebas cuenta con un circuito electrónico que permite obtener y acondicionar las señales eléctricas tomadas del supercondensador para transmitir las por medio de un Microcontrolador a un computador en donde se genera una base de datos en Excel y una interfaz gráfica en Matlab.

**Palabras clave:** Supercondensadores, base de datos, interfaz de computador, MATLAB.

\* Estudiante de tecnología en electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
[wifrodriguez@correo.udistrital.edu.co](mailto:wifrodriguez@correo.udistrital.edu.co)

\*\* Estudiante de tecnología en electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
[jacorreag@correo.udistrital.edu.co](mailto:jacorreag@correo.udistrital.edu.co)

\*\*\* Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital. Grupo de investigación INTEGRA. [aldefonseca@yahoo.com](mailto:aldefonseca@yahoo.com)

**Abstract:** The test benches in electronics are devices that measure the performance of various electronic components when exposed to different physical variables such as: voltages, currents, temperatures and more.

This paper describes the development, design and implementation of a test bed for the characterization of supercapacitors based on the method of loading and unloading constant current proposed by the IEC 62391 standard[1]. The test bench comprises an electronic circuit for obtaining and to condition electrical signals of the supercapacitor, the electrical signals are transmitted by a microcontroller to a computer where a database and a graphical user interface is generated in Matlab.

**Key Words:** Supercapacitors, database, computer interface, MATLAB.

## **1. Introducción**

La falta de bancos de pruebas en Colombia para conocer el comportamiento eléctrico de los supercondensadores, causa la falta de investigación y desarrollo sobre éstos elementos, siendo una de las consecuencias, el desaprovechamiento total o parcial de estos componentes en el campo de la electricidad y la electrónica.

Con este proyecto se propone el desarrollo de un banco de pruebas para realizar mediciones eléctricas a supercondensadores que permitan al usuario a través de una interfaz gráfica

observar el comportamiento de estos componentes al ser sometidos a un método de carga y descarga a corriente constante, obteniendo de esta manera su caracterización.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Capacitancia**

Es la medida que se realiza en un dispositivo para determinar la cantidad de energía almacenada en forma de un campo eléctrico. Esta etapa de almacenamiento de energía se produce cuando la corriente circula de una placa a otra del condensador. La capacitancia es definida como la razón de la carga almacenada a la diferencia de voltaje entre dos placas conductoras o alambres. [2]

La capacitancia de un condensador según la norma IEC-62391 [1] puede hallarse matemáticamente utilizando la formula (1), siempre y cuando la corriente de carga y descarga sea constante[1].

$$C = I * \frac{(T_1 - T_2)}{(U_1 - U_2)} \quad (1)$$

Dónde:

C: es la capacitancia en Faradios (F).

I: la corriente constante en Amperios(A).

T<sub>1</sub>: Tiempo (s) de la descarga al 80% del voltaje nominal del supercondensador.

$T_2$ : Tiempo (s) de la descarga al 40% del voltaje nominal del supercondensador.

$U_1$ : Tensión (V) de la descarga al 80% del voltaje nominal del supercondensador.

$U_2$ : Tensión (V) de la descarga al 40% del voltaje nominal del supercondensador.

## **2.2 Energía almacenada en un condensador**

Todo condensador cargado tiene una determinada cantidad de energía necesaria para realizar un trabajo específico. Al momento de cargarse el capacitor realiza el trabajo para mover las cargas eléctricas de una placa a otra, acumulándose de este modo energía potencial electrostática que posteriormente es liberada en el proceso de descarga.

Cuando el capacitor es conectado a una batería y se cierra el interruptor del circuito eléctrico se transfiere energía de una placa a otra hasta que la diferencia de potencial en el capacitor sea igual al producido por la fuente aunque de polaridades opuestas. [3]

## **2.3 Corriente de fuga en un condensador**

Al mantener cargado un condensador durante largo tiempo, a través del dieléctrico hay un paso de electrones llamado corriente de fuga, que disminuye la capacidad del condensador. Por ello el dieléctrico debe tener gran resistencia de aislamiento, que se reduce con el aumento de la humedad y de la temperatura. Hay que tener en cuenta que no se debe colocar los condensadores cerca de alguna fuente de calor, ni humedad, ni aplicarles una tensión excesiva.[4]

## **2.4 Supercondensador**

Los Supercondensadores son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Un supercondensador puede llegar a tener capacidades del orden de miles de faradios. Los Supercondensadores son caracterizados por ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de picos de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración[5].

Los condensadores electroquímicos de doble capa, EDLC por sus siglas en inglés, han surgido como una alternativa o complemento importante para otros dispositivos de producción o almacenamiento de energía como las pilas de combustibles o las baterías. Una de las ventajas de los EDLC son la rapidez de carga y su gran ciclabilidad. La acumulación de energía eléctrica de un Supercondensador se produce, en principio, por la separación puramente electrostática de cargas (iones) entre los dos electrodos[6].

## **2.5 Circuito equivalente clásico de un supercondensador**

El circuito incluye una capacitancia, una resistencia en serie (ESR) y una resistencia en paralelo (EPR) que produce un efecto de corriente de autodescarga cuando el supercondensador está desconectado de toda fuente de alimentación, figura 1 [7].

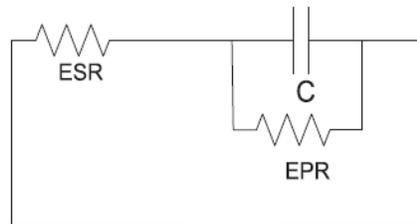


Figura 1. Circuito equivalente clásico de un supercondensador.

Este es un modelo muy aproximado frente al comportamiento real del dispositivo, que de acuerdo a pruebas experimentales realizadas, confirma su correlación con el rendimiento de un verdadero dispositivo en aplicaciones de baja descarga.

### Cálculo de la EPR

El efecto de ésta resistencia es importante para determinar el comportamiento de autodescarga del supercondensador (2).

$$EPR = \frac{-t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) * C} \quad (2)$$

Dónde:

EPR: Resistencia paralela equivalente.

t: Tiempo (s) de autodescarga.

V<sub>2</sub>: Voltaje final de la autodescarga.

V<sub>1</sub>: Voltaje inicial de la autodescarga.

C: Capacitancia en faradios.

## **Cálculo de la ESR**

La ESR puede determinarse solo cuando se presenta un cambio de voltaje y corriente (3) en el instante en que comienza el proceso de descarga del supercondensador.

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3)$$

Dónde:

ESR: Resistencia serie equivalente.

$\Delta V$ : Diferencia de voltaje en el primer instante de descarga.

$\Delta I$ : Diferencia de corriente en el primer instante de la descarga (A).

## **2.6 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 [1], el cual permite estimar tanto la capacidad como la resistencia serie equivalente y la resistencia de fuga. El ensayo 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 4, la cual muestra una evolución esquemática de la tensión en bornes de un supercondensador [8].

La tabla 1 muestra la corriente en miliamperios (mA) necesaria para realizar el proceso de carga-descarga según la aplicación en la que se implemente el supercondensador.

| 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). |                   |                 |                     |

Tabla 1. Parámetros de ensayo según la norma IEC 62391

La ESR se representa gráficamente como la diferencia de potencial  $\Delta U_3$ , ver figura 2.

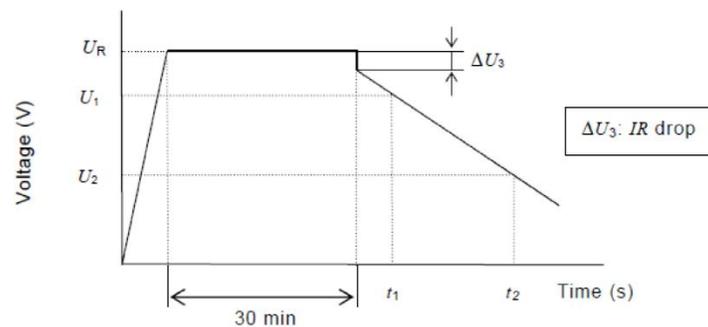


Figura 2 Proceso de carga-descarga de un supercondensador según la norma IEC 62391.

### **3. Estado del arte**

Los Supercondensadores EDLC son elementos que permiten aumentar el nivel de capacitancia hasta unos miles de faradios, permiten tener una alta densidad de energía y una larga vida útil en comparación con los condensadores de una sola capa.

A continuación se presenta una recopilación de artículos que muestran la aplicación de los EDLC para mejorar los sistemas de almacenamiento de energía actuales.

En la Universidad de Lyon en Francia se ocupan del envejecimiento flotante de los Supercondensadores, estableciendo ciertas pruebas para demostrar la pérdida de capacitancia de estos componentes de acuerdo a unas condiciones establecidas de temperatura constante y tensión. De el mismo modo el Laboratorio Ampere de Villeurbanne en Lyon hacen el estudio de envejecimiento de Supercondensadores a través de una red neuronal neo-difusa con la predicción de series de tiempo por delante de un solo paso, encontrando que el método es eficiente para determinar este envejecimiento y puede ser aplicado para instalaciones en complejos industriales[9][10].

El Departamento de Ingenieros Eléctricos en la Universidad de Transilvania, realiza una comparación entre tres diferentes paquetes de Supercondensadores. La comparación se establece entre dos tipos de paquetes de alto voltaje y uno para circuitos de baja potencia. Se identifica que dependiendo de la tecnología, el modo de conexión y el envasado de los Supercondensadores, estos son apropiados para diferentes tipos de aplicaciones[11].

En un trabajo conjunto realizado entre la Universidad de Lyon, la Universidad de Carthage y la Universidad de Sfax, elaboraron una estrategia para combinar Supercondensadores con una batería de 500kVA de una UPS. La razón del uso de Supercondensadores se realizó con el fin de aumentar el nivel de almacenamiento para superar la potencia a plena falla de la red y reforzar el pico de potencia durante el tiempo de funcionamiento de la UPS[12][13].

En 2013 la Universidad de Bucharest, investiga sobre un proceso para el mejoramiento de la vida útil de una UPS usando Supercondensadores, debido a que en una UPS normalmente la carga de la batería tiene grandes periodos de tiempo y bajos voltajes pero con una salida de corriente alta, siendo esto un problema debido al deterioro que sufren los componentes internos del circuito[14].

En la Universidad de Mie en Japón, se propone un método de control para prolongar la vida útil de una batería en un sistema de energía renovable utilizando Supercondensadores. Realizaron un circuito de topología buck/boost simulado en Psim para comprobar la efectividad del método. Conectaron así mismo, el Supercondensador en paralelo a la batería de plomo-acido del sistema de energía renovable para absorber el componente AC de la señal y con la reducción del tiempo de carga de la batería, aumentaron su tiempo de vida útil[15].

En el Instituto de Tecnología de Osaka, Japón, desarrollan un nuevo tipo de carga rápida para un motor eléctrico Scooter por medio de Supercondensadores. Presentaron un sistema con conexiones en serie y paralelo de los EDLC y se describe un convertidor cuasi-resonante

de alta potencia para aumentar la rapidez del sistema de carga. Así mismo en el Colegio de Tecnología Nacional Ibaraki y en la Universidad de Meisei, Japón, presentan un sistema de cambio serie-paralelo para una batería con un EDLC implementado en un vehículo eléctrico. El sistema aumenta la gama de tensión para el funcionamiento del banco de Supercondensadores[16][17][18].

En la Universidad de Malasia en el 2012, presentaron la fabricación de un Supercondensador de alto rendimiento usando entidades de carbono. Se estudió la viscosidad del agua frente a un adhesivo epoxi típico, determinando velocidades de flujo en la mezcla a usar para el EDLC[19].

En la primera conferencia de energías renovables y tecnología vehicular, se trata de mostrar cómo cambia la impedancia de los Supercondensadores a medida que hay un cambio en los poros del material. Se indica un modelo de multi-poros (MP) en el cual se ponen ramas en paralelo en el electrodo resultante cambiando de esta manera la impedancia[20].

La Universidad Lanzhou JiaoTong, estudia el efecto de auto-descarga de un Supercondensador basado en carbono, presentando un mecanismo híbrido de difusión de iones en el cual el tiempo para la descarga del EDLC fue de 550 minutos para una capacidad nominal de 50000F[21].

En otro artículo desarrollado por la Universidad de Tokio en 2007, plantean la idea de transmitir una parte de la energía eléctrica producida en una planta de generación eólica a un Supercondensador con el propósito de convertir esta energía en hidrogeno. Se realizó un

análisis numérico para determinar el comportamiento del sistema, encontrando que es necesario tener un flujo continuo de corriente generada en el sistema eólico para que la producción de hidrogeno fuera eficiente[22].

En la conferencia internacional sobre sistemas tecnológicos de potencia 2010 los ingenieros eléctricos Guoqing Li y Jinlong Liu presentaron una regulación de potencia para un parque eólico basado en la tecnología de almacenamiento con Supercondensadores con el fin disminuir la destrucción local del voltaje estable y la calidad de energía causada por fluctuaciones estocásticas, obteniendo resultados muy favorables debido a que los EDLC completan la carga y descarga en un tiempo muy corto[23].

Investigadores en la Universidad de Kumamoto, Japón, hicieron una simulación en el entorno de Matlab / Simulink para determinar la efectividad en potencia de un Supercondensador aplicado aún vehículo eléctrico híbrido. Se aplicó una topología en paralelo, consiguiendo buenos resultados en el rendimiento y en las condiciones de la batería a partir de una alta capacitancia en el EDLC[24].

Tsuyoshi Funaki, ingeniero de la IEEE, hace un estudio de los efectos de la temperatura y la tensión que se aplican a los Supercondensadores, encontrando que hay una modificación en la frecuencia debido a estos parámetros. Se determina un circuito RC de tres etapas que permite reducir el error del modelo del EDLC[25].

En el Departamento de Ingeniería Electrónica en Taiwán, evalúan la estabilidad de potencia en un sistema de energía fotovoltaico. Mediante una simulación e implementación física del

circuito con EDLC establecen que una capacitancia de 10F es la más adecuada para lograr una forma de onda de voltaje estable con apenas un error del 3%[26].

El departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la universidad Putra Malaysia realiza un estudio para almacenar los pulsos transitorios de voltaje y corriente usando Supercondensadores, dando como conclusión que los Supercondensadores al tener tiempos de carga y descarga más lentos son incapaces de almacenar pulsos en microsegundos, también que los Supercondensadores son más adecuados para la estabilidad de voltaje y corrientes generadas en las fallas por cortos circuitos en un sistema de alimentación[27].

Un grupo de ingenieros liderado por Michael Di Loreto presentan un modelo de red térmica para Supercondensadores debido al rápido envejecimiento de estos elementos por el aumento de calor ocasionado por el manejo de altas corrientes y voltajes, logrando determinar que parámetro tiene más impacto en el modelo presentado[28].

El departamento de Ingeniería de Electricidad y Electrónica de la universidad de Dalian, China, realiza un estudio del campo eléctrico en dos clases de Supercondensadores de alta potencia: El Supercondensador de doble capa de electrodo poroso y el Supercondensador híbrido que está compuesto de ánodos de condensadores electrolíticos y cátodos de condensadores electroquímicos. Concluyendo que el cambio de los parámetros físicos, como la estructura del electrodo y el material, y los parámetros eléctricos pueden optimizar las estructuras y funcionamiento de Supercondensadores para mejorar la densidad de energía y potencia y aumentar la corriente instantánea de descarga[29].

Institutos de Tecnología de Japón hacen una verificación experimental de dos tipos de vehículos eléctricos usando Supercondensadores, con el fin de realizar mejoras en el kilometraje y disminuir el tiempo de carga en la batería. Se logró reducir el consumo de energía de las baterías recargables, determinando para futuras investigaciones, cual es la capacidad eléctrica optima en comparación con la relación costo-eficacia en los EDLC[30].

En China, el Laboratorio Nacional de Ingeniería para Seda Moderna, desarrolla una nano-estructura jerárquica compuesta de esferas de carbono y grafeno para Supercondensadores fibrosos y flexibles, logrando un excelente rendimiento electroquímico y una capacitancia de tres veces mayor a la de los Supercondensadores de grafeno puro. Este desarrollo se puede utilizar para fabricar varios electrodos compuestos basados en el grafeno para la electrónica portátil y el almacenamiento de energía[31].

El Departamento de Ingeniería Eléctrica en Italia, discute la posibilidad de mejorar la energía recuperada durante el frenado de los vehículos ferroviarios y la reducción de los picos de potencia durante la aceleración. Con el uso de Supercondensadores se puede reducir la corriente de línea en un 50%, consiguiendo de este modo disminuir la potencia RMS suministrada[32].

En Francia, el Laboratorio de Informática y Sistemas de Automatización, da a conocer un nuevo modelo de Supercondensadores que trabajan con un convertidor AC – DC. El principio de este modelo es utilizado para controlar el intercambio de energía entre los

Supercondensadores y la red eléctrica. Los autores hicieron una topología en paralelo para así encontrar el modelo matemático más sencillo[33].

La Universidad Técnica de Cluj-Napoca, Rumania, presentaron dos diseños para modelar un Supercondensador. Un modelo se realizó en Simulink 7.5 y el otro en Orcad 7.2, demostrando la exactitud de los modelos y del método utilizado para calcular los valores de los componentes[34].

El departamento de energía avanzada de la universidad de Tokio presenta una idea futurista para lograr mejorar la eficiencia de energía en vehículos eléctricos usando Supercondensadores, demostrando que los EDLC son más eficientes que las baterías al tener una vida útil más larga y un menor tiempo de carga[35].

La escuela de electrónica, ingeniería eléctrica y computación de la universidad de Birmingham, dan a conocer un método para obtener la capacitancia más óptima y la localización de Supercondensadores estacionarios para un vehículo de riel ligero basado en un simulador de tren, mostrando resultados con una restricción isoperimétrica que optimizó el problema para garantizar que la energía almacenada en el Supercondensador fuera la misma tanto al principio como al final del recorrido. Las pérdidas de energía se redujeron en un 70,67% basado en un módulo disponible en el mercado de Supercondensadores[36].

La universidad de Mie, Japón realizaron una simulación para comprobar el método de potencia para micro-redes usando condensadores eléctricos de doble capa (EDLC). Este

sistema compensa la fluctuación de energía causada por la generación de electricidad con energías renovables o el cambio repentino de la carga[37].

La Universidad de California de Estados Unidos presentan un desarrollo en nano- cables de carburo de silicio como material de electrodo para los micro- Supercondensadores, obteniendo una vida útil superior al millón de ciclos de carga y descarga, dejando como trabajo futuro la fabricación de un micro-Supercondensador de alta temperatura, capaz de alimentar sensores inalámbricos de carburo de silicio que operarían en un ambiente hostil[38].

En el año 2013, la Universidad Nacional de Colombia plantea el diseño de un sistema de carga y descarga de energía eléctrica para vehículos eléctricos de alto desempeño. Usaron Supercondensadores con el fin de proporcionar a los motores del vehículo una corriente elevada en 10 segundos con el fin de mejorar el rendimiento de la batería.[39]

La Universidad de Zaragoza en España, elabora un sistema de ensayo y caracterización de Supercondensadores en donde se muestra el proceso de estudio, presentando el modelo matemático, los diferentes circuitos convertidores, las correspondientes simulaciones y la implementación final de un banco para la prueba de estos componentes[40].

En general los artículos muestran el desarrollo del modelo matemático de los Supercondensadores, los diferentes tipos de convertidores que pueden ser usados para acondicionar la señal de estos componentes así como el uso de determinados EDLC dependiendo de la aplicación en la que se implementen.

### 3. Desarrollo del Proyecto

A continuación se describe el desarrollo de cada uno de los bloques que conforman el proyecto, figura 3, explicando detalladamente cual es el proceso de construcción de cada uno.

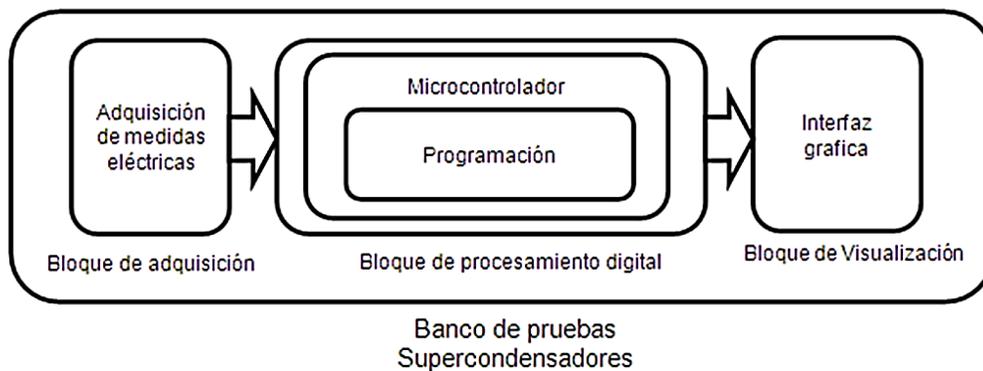


Figura 3 Diagrama de bloques del Banco de Pruebas para la Caracterización de Supercondensadores.

#### 3.1. Bloque de adquisición

El bloque de adquisición de señal está conformado por un circuito de corriente constante, circuito restadores para medir el voltaje de los supercondensadores en el proceso de carga y descarga y una etapa de protección para regular los niveles de voltaje que ingresan al Microcontrolador.

##### 3.1.1 Circuito de corriente constante

Este circuito es el encargado de producir una corriente constante para la carga y descarga de cada uno de los supercondensadores a caracterizar, figura 4. El banco de pruebas es capaz

de medir diferentes valores de capacitancia para cada uno de los supercondensadores con base a lo establecido en la norma IEC 62391 [1][40] que dependiendo de la capacitancia del elemento, su voltaje de carga nominal y la aplicación a la que va a ser utilizado, ver tabla 1, se establece un valor de corriente específica (4), para que el proceso de carga y descarga sea el más adecuado. La norma presenta la gráfica del comportamiento del supercondensador cuando es sometido a este método de corriente constante, ver figura 4. El banco de pruebas se diseña con el fin de manejar un voltaje para la carga de los supercondensadores desde 2.7V hasta un valor máximo de 10V y corrientes entre 0A y 1.5A. De acuerdo a esto y como se observa en la tabla 2, se propuso tres escalas de corriente y al mismo tiempo se indica los valores de capacitancia máximos permitidos por cada escala para un voltaje de 2.7V.

| ESCALA DE CORRIENTE (A) | CAPACITANCIA MAXIMA (F) |
|-------------------------|-------------------------|
| 0 - 0,1                 | 0.92                    |
| 0 - 0.5                 | 4.62                    |
| 0 – 1.5                 | 13.8                    |

Tabla 2. Escalas de corriente y capacitancia máxima.

Se debe escoger la escala de corriente más adecuada para cada componente con el fin de que la caracterización a realizar sea la más eficiente.

$$I = k * CUr \quad (4)$$

Dónde:

I: Corriente en miliamperios (mA).

k: Constante clase 1= 1, clase 2= 0,4, clase 3= 4 y clase 4= 40.

C: Capacitancia en faradios.

Ur: Voltaje nominal del supercondensador.

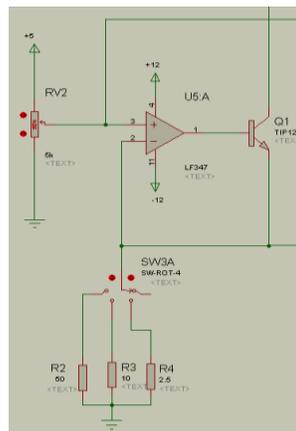


Figura 4 Circuito de corriente constante

### 3.1.2 Circuito restador

Este circuito es el encargado de sensar el voltaje del supercondensador por medio del amplificador de instrumentación AD620 durante todo su proceso de carga y descarga. El banco de pruebas cuenta con un restador general y otros cuatro restadores adicionales para sensar el voltaje respectivo al momento de hacer la conexión de hasta cuatro supercondensadores en serie. Ver figura 5.

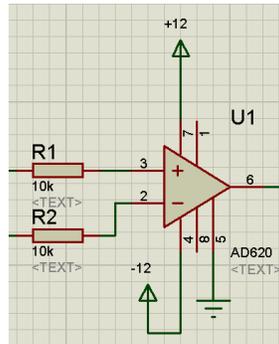


Figura 5 Circuito restador

### 3.1.3 Switch MOS

Este circuito integrado permite el paso del voltaje de los circuitos restadores a una etapa de amplificación de señal que luego es capturada por el microcontrolador. El circuito cuenta con un transistor que permite la habilitación del switch con 12V a partir de una señal que envía el microcontrolador, ver figura 6.

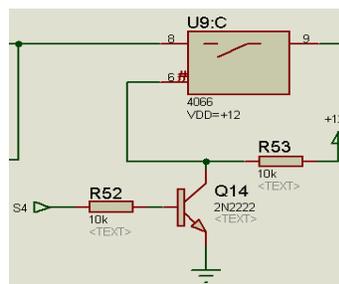


Figura 6 Switch MOS.

### 3.1.4 Potenciómetro digital

El potenciómetro MCP42100 maneja una comunicación SPI para la asignación de un valor de resistencia. Está configurado para transmitir 16 bits, a una velocidad de 1MHz, en modo (0,0). Los 16 bits para configurar el potenciómetro están organizados de la forma que se muestra en la figura 7.

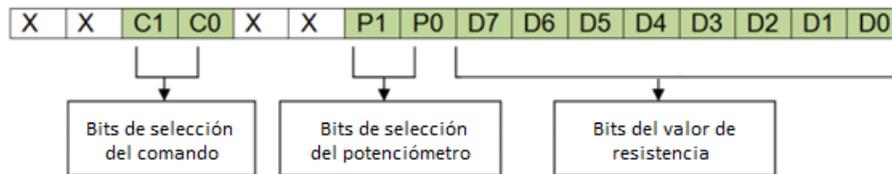


Figura 7 Formato del byte de comando enviado a través de la comunicación serial SPI [41]

Los bits C1 y C0, permiten la selección de los modos de funcionamiento del potenciómetro, esto se puede observar en la figura 8. Por su parte los bits P1 y P0 seleccionan el potenciómetro con el cual se va a trabajar, las opciones se pueden visualizar en la figura 9.

| C1 | C0 | COMANDO       | DESCRIPCION DEL COMANDO   |
|----|----|---------------|---|
| 0  | 0  | No opera      | No se ejecuta ningún comando.   |
| 0  | 1  | Escribir dato | Escribe el dato contenido en el dato de 8 bits para el o los potenciómetros determinados por los bits de selección del potenciómetro P1 y P0                  |
| 1  | 0  | Suspendido    | El o los potenciómetros determinados por los bits de selección entran en modo "suspensión" y no se ejecuta ninguna acción mientras se encuentre en este modo. |
| 1  | 1  | No opera      | No se ejecuta ningún comando.   |

Figura 8 Opciones de selección de modo de funcionamiento[41]

| P1 | P0 | SELECCIÓN DEL POTENCIOMETRO                       |
|----|----|---|
| 0  | 0  | Ningún potenciómetro es seleccionado.             |
| 0  | 1  | El comando es ejecutado por el potenciómetro 0.   |
| 1  | 0  | El comando es ejecutado por el potenciómetro 1.   |
| 1  | 1  | El comando es ejecutado por ambos potenciómetros. |

Figura 9 Opciones de selección de potenciómetro [41]

### 3.1.5 Codificador 74HC147

El 74HC147 mostrado en la figura 10, codifica en forma binaria los pulsos de la selección tanto de los supercondensadores como de las escalas de corriente para indicar cuantos supercondensadores se van a utilizar y para ajustar el rango de corriente que se necesita para hacer el proceso de carga-descarga respectivamente.

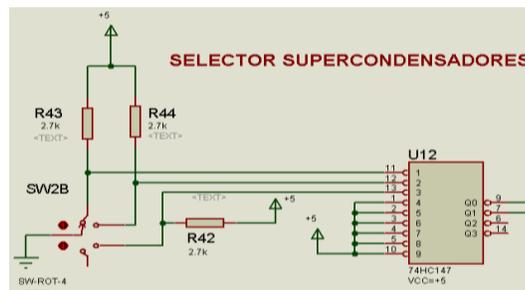


Figura 10 Codificador 74HC147

### 3.1.6 Protección de voltaje

La figura 11 muestra el circuito de protección para las entradas del PIC 18F4550, circuito que se encarga de controlar el voltaje de las etapas de amplificación hasta un nivel máximo de 5V.

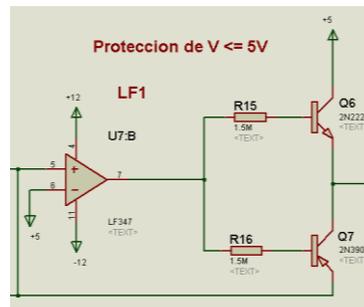


Figura 11 Circuito de protección de voltaje.

## 3.2 Bloque de procesamiento digital

### 3.2.1 Microcontrolador PIC 18F4550

Es el dispositivo encargado de obtener los voltajes sensados de los circuitos restadores con sus respectivas etapas de amplificación y a su vez recibe los pulsos de selección de la escala de corriente y de los supercondensadores a medir, con el propósito de almacenar estos datos obtenidos y enviarlos a través de una comunicación USB al computador que posteriormente serán procesados en Matlab.

## 3.3 Bloque de visualización

### 3.3.1 Interfaz grafica

La interfaz gráfica realizada en Matlab, figura 12, muestra en tiempo real el voltaje de carga-descarga del supercondensador, a su vez las gráficas correspondientes a la corriente de

carga-descarga, la corriente de fuga y la potencia. En un cuadro externo muestra el dato de la energía absorbida y entregada por el supercondensador.

Los botones CT, C1, C2, C3, C4 muestran la gráfica total de una serie de supercondensadores y cada una de las gráficas individuales por cada supercondensador utilizado respectivamente.

La etiqueta: Capacitancia, muestra el valor correspondiente de la capacitancia del supercondensador(s) cuando termina el proceso de carga-descarga.

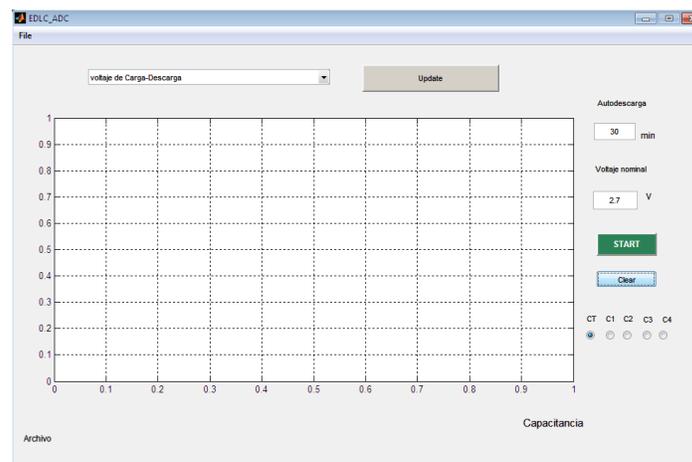
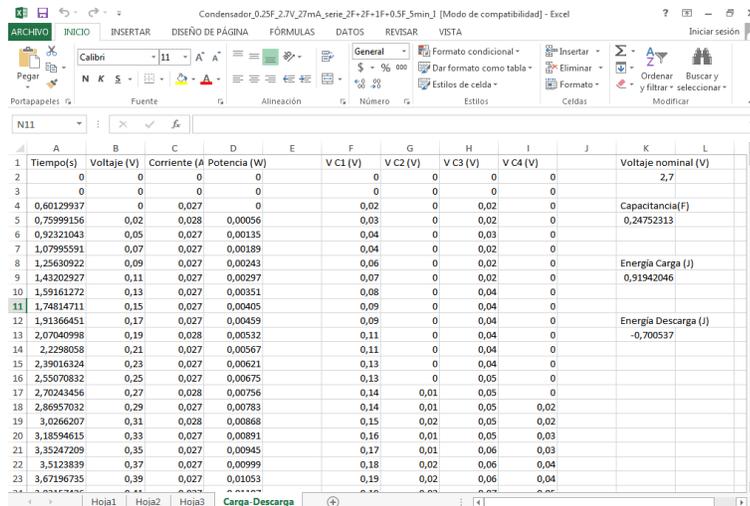


Figura 12 Interfaz gráfica de usuario.

En el campo de texto: Voltaje nominal, se puede ingresar un valor de voltaje desde 2.7V hasta 10V para la carga de los supercondensadores. Adicionalmente en el campo de texto: Autodescarga, es necesario ingresar el valor en tiempo de la autodescarga del supercondensador que según la norma IEC 62391 [1] debe ser de 30 minutos.

La interfaz gráfica puede generar una base de datos en un archivo de Excel y así mismo cargar un archivo previamente almacenado. La figura 13 muestra un archivo guardado en donde se indica en la primera columna el tiempo, la segunda columna el voltaje, la tercera columna la corriente, cuarta columna la potencia, los datos de voltaje de cada uno de los supercondensadores conectados en serie y los datos calculados de la capacitancia y la energía absorbida y entregada.



| #  | A          | B           | C             | D            | E | F        | G        | H        | I        | J | K                    | L |
|----|------------|-------------|---------------|--------------|---|----------|----------|----------|----------|---|----------------------|---|
|    | Tiempo(s)  | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |   | V C1 (V) | V C2 (V) | V C3 (V) | V C4 (V) |   | Voltaje nominal (V)  |   |
| 1  | 0          | 0           | 0             | 0            |   | 0        | 0        | 0        | 0        |   | 2,7                  |   |
| 2  | 0          | 0           | 0             | 0            |   | 0        | 0        | 0        | 0        |   |                      |   |
| 3  | 0          | 0           | 0             | 0            |   | 0        | 0        | 0        | 0        |   |                      |   |
| 4  | 0,60129937 | 0           | 0,027         | 0            |   | 0,02     | 0        | 0,02     | 0        |   | Capacitancia(F)      |   |
| 5  | 0,75999156 | 0,02        | 0,028         | 0,00056      |   | 0,03     | 0        | 0,02     | 0        |   | 0,24752313           |   |
| 6  | 0,92321043 | 0,05        | 0,027         | 0,00135      |   | 0,04     | 0        | 0,03     | 0        |   |                      |   |
| 7  | 1,07995591 | 0,07        | 0,027         | 0,00189      |   | 0,04     | 0        | 0,02     | 0        |   |                      |   |
| 8  | 1,25630922 | 0,09        | 0,027         | 0,00243      |   | 0,06     | 0        | 0,02     | 0        |   | Energía Carga (J)    |   |
| 9  | 1,43202927 | 0,11        | 0,027         | 0,00297      |   | 0,07     | 0        | 0,02     | 0        |   | 0,91942046           |   |
| 10 | 1,59161272 | 0,13        | 0,027         | 0,00351      |   | 0,08     | 0        | 0,04     | 0        |   |                      |   |
| 11 | 1,74614711 | 0,15        | 0,027         | 0,00405      |   | 0,09     | 0        | 0,04     | 0        |   |                      |   |
| 12 | 1,91366451 | 0,17        | 0,027         | 0,00459      |   | 0,09     | 0        | 0,04     | 0        |   | Energía Descarga (J) |   |
| 13 | 2,07040998 | 0,19        | 0,028         | 0,00532      |   | 0,11     | 0        | 0,04     | 0        |   | -0,700537            |   |
| 14 | 2,22980508 | 0,21        | 0,027         | 0,00567      |   | 0,11     | 0        | 0,04     | 0        |   |                      |   |
| 15 | 2,39016324 | 0,23        | 0,027         | 0,00621      |   | 0,13     | 0        | 0,04     | 0        |   |                      |   |
| 16 | 2,55070832 | 0,25        | 0,027         | 0,00675      |   | 0,13     | 0        | 0,05     | 0        |   |                      |   |
| 17 | 2,70243456 | 0,27        | 0,028         | 0,00756      |   | 0,14     | 0,01     | 0,05     | 0        |   |                      |   |
| 18 | 2,86957032 | 0,29        | 0,027         | 0,00783      |   | 0,14     | 0,01     | 0,05     | 0,02     |   |                      |   |
| 19 | 3,0266207  | 0,31        | 0,028         | 0,00868      |   | 0,15     | 0,02     | 0,05     | 0,02     |   |                      |   |
| 20 | 3,18594615 | 0,33        | 0,027         | 0,00891      |   | 0,16     | 0,01     | 0,05     | 0,03     |   |                      |   |
| 21 | 3,35247209 | 0,35        | 0,027         | 0,00945      |   | 0,17     | 0,01     | 0,06     | 0,03     |   |                      |   |
| 22 | 3,5123839  | 0,37        | 0,027         | 0,00999      |   | 0,18     | 0,02     | 0,06     | 0,04     |   |                      |   |
| 23 | 3,67196735 | 0,39        | 0,027         | 0,01053      |   | 0,19     | 0,02     | 0,06     | 0,04     |   |                      |   |

Figura 13 Base de datos en Excel.

#### 4. Resultados

El banco de pruebas para la caracterización de supercondensadores cuenta con una planta física mostrada en la figura 14 y una interfaz gráfica de usuario explicada anteriormente, en donde la planta física cuenta con tres circuitos impresos, uno de los cuales es la fuente de voltaje que proporciona salidas de 12V, -12V, 10V y 5V así como una corriente máxima de

1.5A que garantiza el correcto funcionamiento. La segunda PCB fue diseñada para realizar la carga-descarga a corriente constante, controlada por un microcontrolador que a su vez permite la transmisión de los datos obtenidos por una comunicación usb hacia el computador. Por último la tercera PCB que es la encargada de sensar el voltaje de carga y descarga del o los supercondensadores, fue diseñada con amplificadores de instrumentación AD620 seguidos por un amplificador operacional en modo diferencial, que disminuye el voltaje a la mitad para luego ser procesado digitalmente.



Figura 14 Planta física del banco de pruebas de supercondensadores

Realizando pruebas del funcionamiento del banco, se obtuvieron las gráficas de voltaje, corriente, potencia, corriente de fuga, un cuadro con el valor de la impedancia y otro en donde se indica la energía absorbida y entregada correspondientes al proceso de carga-

descarga del supercondensador con una capacitancia de 0.25F, conformado por una conexión en serie de cuatro supercondensadores: dos de 2F, uno de 1F y el ultimo de 0.5F, como se muestran en las figuras de la 15 a la 20 respectivamente. Es importante aclarar que las anteriores pruebas del banco, fueron realizadas con un tiempo de autodescarga de 1 minuto, para observar y garantizar el correcto funcionamiento del banco, ya que según la norma el tiempo de autodescarga debe ser de 30 minutos como se observa en la prueba realizada correspondiente a la figura 21. La figura 22 muestra una prueba de carga-descarga medida con el osciloscopio para un supercondensador de 0.5F.

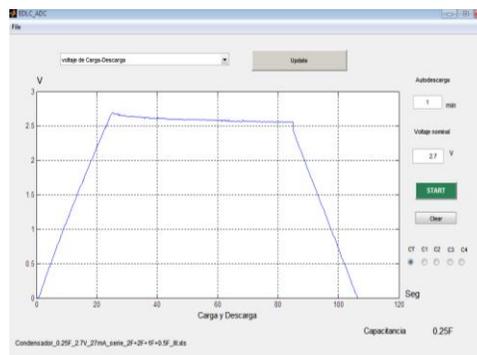


Figura 15 Voltaje de carga-descarga del supercondensador de 0.25F.

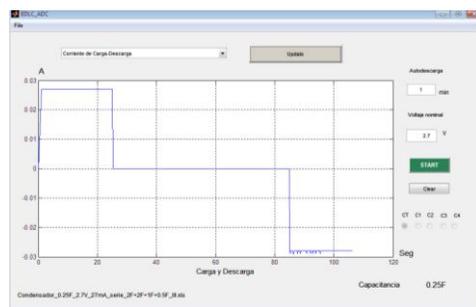


Figura 16 Corriente de carga-descarga del supercondensador de 0.25F.

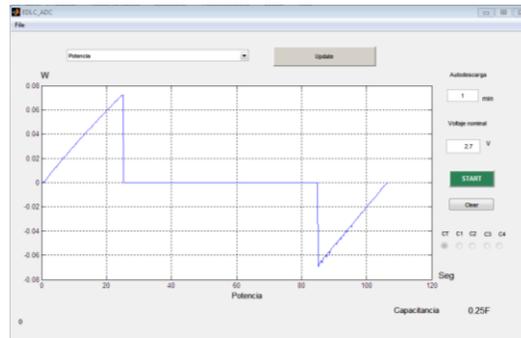


Figura 17 Potencia de carga-descarga del supercondensador de 0.25F.

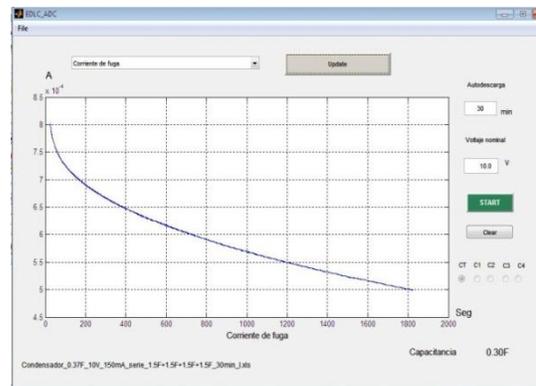


Figura 18. Corriente de fuga del supercondensador de 0.25F.

**Imped...**

$$Z = ESR + 1 / j(2 * \pi * f * C)$$

ESR= 2.614 Ohm

C= 0.23 F

$$Z = 2.614 + 1 / j(1.460) * f$$

**OK**

Figura 19. Impedancia del supercondensador de 0.25F.

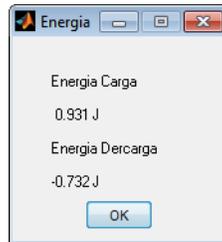


Figura 21 Energía absorbida y entregada del supercondensador de 0.25F.

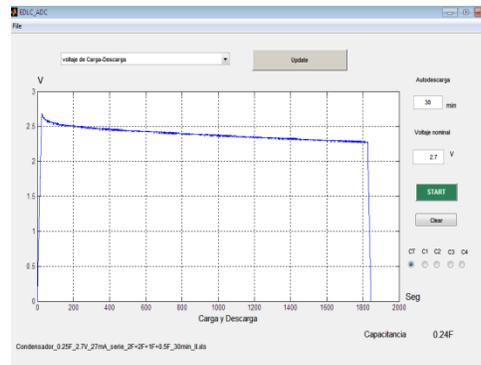


Figura 20. Voltaje de carga-descarga del supercondensador de 0.24F.



Figura 22. Medición de un supercondensador de 0.5F.

## **CONCLUSIONES**

- Con el desarrollo de este proyecto se diseñó un banco de pruebas electrónico que permite obtener la caracterización de supercondensadores por medio de un método de carga-descarga a corriente constante, así como la obtención de las gráficas en el tiempo, del voltaje, la corriente, la potencia y la corriente de fuga, además de los datos de la capacitancia, energía e impedancia, en una interfaz de usuario realizada en Matlab y en una base de datos en Excel.
- La energía que entrega un supercondensador es menor que su energía absorbida, esto es debido a que los materiales con los que se fabrican estos componentes producen una resistencia interna que limita la circulación de corriente por los bornes del supercondensador.
- Un supercondensador defectuoso presenta un aumento significativo en la resistencia interna y un incremento en la corriente de fuga, produciendo una autodescarga muy rápida, impidiendo que se mantengan las características mínimas necesarias para lograr una buena caracterización del supercondensador, teniendo en cuenta que un supercondensador en buen estado debe mantener su carga en un nivel superior al 80% del voltaje nominal en un tiempo mínimo de 30 minutos.
- La ganancia del circuito restador para la medición del voltaje de carga y descarga del supercondensador tiene que ser muy precisa, debido a que si esta ganancia no es lo más próxima al valor calculado, el voltaje de autodescarga aumenta significativamente, causando

en algunos casos que el voltaje de descarga sea inferior al 80% del valor nominal y por tal motivo no se podría calcular la capacitancia del supercondensador.

- El voltaje almacenado por cada uno de los supercondensadores conectados en serie con capacitancias iguales no es el mismo, a diferencia de la teoría que plantea que cada supercondensador carga el mismo voltaje en sus terminales debido a que esta carga se distribuye uniformemente para cada componente en el circuito. Este comportamiento podría ser un objeto de estudio a futuro.
- Caracterizando los supercondensadores a un voltaje inferior al nominal, se obtuvieron resultados menos precisos en comparación a los realizados con los voltajes nominales adecuados para cada supercondensador, confirmando los resultados obtenidos en el método de carga-descarga a corriente constante que aplico la Universidad de Zaragoza en donde se muestra que la incertidumbre de medida será menor conforme mayor sea la tensión de carga del supercondensador.

## REFERENCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission, “IEC62391-1 Fixed electric double capacitors for use in electronic equipment.” 2006.
- [2] R. Dorf, “Circuitos Eléctricos.” Alfaomega, 2006.
- [3] O. Vasquez Garcia, “Física General III,” .
- [4] W. Quispe Soto, “Circuitos Electricos II,” EPAMET.
- [5] D. E. U. N. Sistema, D. E. A. D. E. Energ, B. Basado, E. N. Bater, S. Para, S. U. Integraci, E. N. M. El, C. Autor, I. Gil, and M. Tutor, “Diseño de un sistema de almacenamiento de energia hibrido basado en baterias y supercondensadores para su integracion en microredes electricas,” p. 21, 2009.
- [6] A. Menéndez Diaz, *El carbon en la vida cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial.* 2012.
- [7] R. L. Spyker, “Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 36, no. 3 PART 1, pp. 829–836, 2000.
- [8] I. Industrial, “Estudio de Métodos de Medida para Supercondensadores,” 2012.
- [9] R. German, A. Sari, P. Venet, U. De Lyon, U. Lyon, O. Briat, and J. Vinassa, “Ageing Law for Supercapacitors Floating Ageing,” pp. 1773–1777, 2014.
- [10] A. Soualhi, A. Sari, H. Razik, P. Venet, G. Clerc, R. German, O. Briat, J. M. Vinassa, and I. M. S. Bordeaux, “Supercapacitors Ageing Prediction by Neural Networks,” pp. 6812–6818, 2013.
- [11] C. M. Lungoci and I. D. Oltean, “Comparative analysis for the supercapacitors packaging characteristics,” *2010 IEEE 16th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, pp. 93–98, Sep. 2010.
- [12] A. Lahyani, P. Venet, U. Lyon, and U. De Lyon, “Design of Power Sharing System Between Supercapacitors and Battery in an Uninterruptible Power Supply,” 2011.
- [13] a. Lahyani, P. Venet, a. Guerhazi, and a. Troudi, “Utilization of supercapacitors to reduce lead acid battery stresses in UPS,” *2012 First Int. Conf. Renew. Energies Veh. Technol.*, pp. 90–100, Mar. 2012.

- [14] A. Vasile and C. Marghescu, "EDLC hybrid system with increased lifespan for supplying an UPS," *2013 IEEE 19th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, pp. 245–248, Oct. 2013.
- [15] Y. Jia, R. Shibata, N. Yamamura, and M. Ishida, "A Control Method of Prolonging the Service Life of Battery in Stand-alone Renewable Energy System using Electric Double Layer Capacitor ( EDLC ) Tenvionmneneray thed aotemartive , Current of Power Supply," pp. 228–233, 2005.
- [16] Y. Maeyama, H. Omori, N. Kimura, T. Morizane, and M. Nakaoka, "A novel type of super-rapid charging electric-motor driven scooter incorporating EDLC stack for home power appliances," *2014 16th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–6, Aug. 2014.
- [17] K. Hata, N. Watanabe, and K. Sung, "A Series or Parallel Changeover System Using Battery with EDLC for EV Keywords."
- [18] E. Takahara, T. Wakasa, and J. Yamada, "A study for electric double layer capacitor (EDLC) application to railway traction energy saving including change over between series and parallel modes," *Proc. Power Convers. Conf. 2002 (Cat. No.02TH8579)*, vol. 2, pp. 855–860, 2002.
- [19] T. Adam, U. Hashim, D. Isa, and C. Y. Yee, "An Electric Double-Layer Capacitor (EDLC) Production for Optimum Energy Driven Communication System Using Taguchi Technique," *2012 Fourth Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul.*, pp. 405–409, Sep. 2012.
- [20] R. German, P. Venet, A. Sari, O. Briat, J. M. Vinassa, U. De Lyon, L. Ampere, U. M. R. Cnrs, U. Claude, and B. Lyon, "Comparison of EDLC impedance models used for ageing monitoring," pp. 2–7, 2012.
- [21] Z. Li and F. Wu, "Diagnostic Identification of Self-Discharge Mechanisms for Carbon-Based Supercapacitors with High Energy Density," *2011 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–5, Mar. 2011.
- [22] H. Kaneuchi, T. Yachi, and T. Tani, "Effect of an EDLC in a wind turbine system for hydrogen production," *INTELEC 07 - 29th Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp. 557–562, 2007.
- [23] G. Li, J. Liu, X. Li, L. Yang, Z. Wang, and D. Yang, "Wind farm output power regulation based on EDLC energy storage technology," *2010 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, pp. 1–5, Oct. 2010.

- [24] I. Sefik, D. a. Asfani, and T. Hiyama, "Electric double layer capacitor impact on the performance of Hybrid Electric Vehicle," *2012 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, pp. 102–107, May 2012.
- [25] T. Funaki, "Evaluating Energy Storage Efficiency by Modeling the Voltage and Temperature Dependency in EDLC Electrical Characteristics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 5, pp. 1231–1239, May 2010.
- [26] Y. Huang, K. Weng, P. Tsai, and K. County, "Evaluation of the Stability Improvement in Power Generation of a Concentration Photovoltaic Module with Supercapacitors," pp. 941–943, 2011.
- [27] N. Khan, N. Mariun, M. Zaki, and L. Dinesh, "Transient analysis of pulsed charging in supercapacitors," *2000 TENCON Proceedings. Intell. Syst. Technol. New Millenn. (Cat. No.00CH37119)*, vol. 2, pp. 193–199, 2000.
- [28] A. Hijazi, P. Kreczanik, E. Bideaux, P. Venet, G. Clerc, and M. Di Loreto, "Thermal Network Model of Supercapacitors Stack," vol. 59, no. 2, pp. 979–987, 2012.
- [29] J.-Y. Song, L. Zhang, and J.-Y. Zou, "The Study of Electric Field of High-Power Supercapacitors," *2008 14th Symp. Electromagn. Launch Technol.*, pp. 1–5, Jun. 2008.
- [30] H. Ikeda, H. Ajishi, and T. Hanamoto, "Experimental Verification of Electric Vehicle Using EDLC."
- [31] X. Zhang, Y. Zheng, and K.-Q. Zhang, "Fibrous and flexible supercapacitors with a hierarchical nanostructure comprised of carbon spheres and graphene," *2013 IEEE MTT-S Int. Microw. Work. Ser. RF Wirel. Technol. Biomed. Healthc. Appl.*, pp. 1–4, Dec. 2013.
- [32] D. Iannuzzi and I. Member, "Improvement of the Energy Recovery of Traction Electrical Drives using Supercapacitors," pp. 1469–1474, 2008.
- [33] S. Tnania, G. Champenoisa, E. Mounib, and B. M. Leroy, "Modeling and Parameter Identification of Supercapacitors Using a Bidirectional DC-AC Converter," pp. 1019–1024, 2013.
- [34] C. F. D. Petreu, I. Ciocan, and N. Palaghi, "Modeling and Simulation of Supercapacitors," 2009.

- [35] Y. Hori, “THU-KS-1 Novel EV Society based on Motor / Capacitor / Wireless – Application of Electric Motor , Supercapacitors , and Wireless Power Transfer,” pp. 3–8, 2012.
- [36] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, “Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems,” *2014 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 807–812, Jun. 2014.
- [37] H. Hayashi, N. Yamamura, M. Ishida, and A. Power, “Power Smoothing System using Electric Double Layer Capacitor.”
- [38] M. Vincent, M. S. Kim, C. Carraro, and R. Maboudian, “SILICON CARBIDE NANOWIRES AS AN ELECTRODE MATERIAL FOR Berkeley Sensor & Actuator Center , 2 Department of Chemical and Biomolecular Engineering,” no. February, pp. 39–42, 2012.
- [39] W. Hernán and M. Martínez, “Diseño de un sistema de carga y descarga de energía eléctrica para vehículos eléctricos de alto desempeño,” p. 5, 2013.
- [40] P. Luengo, A. Mart, I. Codirector, F. Jos, and A. Gonz, “Sistema de ensayo y caracterización de Estudio de supercondensadores sometidos a radiación ionizante .,” pp. 1–25, 2013.
- [41] A. F. Serna Ruiz, “Diseño de la Instrumentación Electrónica que Permita el Seguimiento Estructural de un Puente en Guadua,” 2011.

## **ANEXOS**

### 3. Diagrama Esquemático de la Planta

