



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Energía Renovable

DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UN MÓDULO DE
SUPERCONDENSADORES CON CONFIGURACIÓN
FLEXIBLE PARA EL INCREMENTO DE TIEMPO DE
DESCARGA A VOLTAJE CONSTANTE

Tesis que presenta

IMEC. MARÍA GUADALUPE REVELES MIRANDA

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán. Noviembre 2013

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación

Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Mérida Yucatán, 1 de Noviembre del 2013

IMEC. María Guadalupe Reveles Miranda

La presente tesis se realizó en los laboratorios de la Unidad de Energía Renovable, bajo la dirección de la Dra. Daniella Esperanza Pacheco Catalán, los laboratorios de instrumentación del CICY bajo la supervisión del M.I.M. Julio Alejandro Lugo Jiménez, y en el laboratorio de Física III Electrónica de la Universidad de Quintana Roo, bajo la dirección del Dr. Freddy Ignacio Chan Puc.

Dr. Felipe Augusto Vázquez Flota
Coordinador de docencia

A mi padre Salvador Reveles Carrillo, por guiar mi camino

A mi madre Blanca Estela Miranda Galván, por confiar y creer en mí

A mi hermano Juan Salvador Reveles Miranda por ser mi héroe

A Karla Ramos Gallardo, Pablo y Sofía, por hacer de mi vida una aventura

A mis hermanas de corazón Alejandra, Gaby, Maru y Fátima por luchar mis batallas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONACYT por la beca otorgada número 264348.

Al proyecto Fordecyt-CONACYT 116157, por el financiamiento de los materiales necesarios para la construcción del módulo.

A la Dra. Daniella Esperanza Pacheco Catalán, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, por las facilidades prestadas y todo el apoyo durante la realización del mismo.

Al Dr. Freddy Ignacio Chan Puc por su dirección y su ayuda, así como a la Universidad de Quintana Roo campus Chetumal por las facilidades prestadas para realizar las pruebas eléctricas en el laboratorio de Física III Electrónica; al Dr. Víctor Sánchez, al Ing. Jesús Álvarez y al Ing. Julio Sabido por el soporte técnico.

Al Dr. Manuel Israel Flota por la asesoría, el apoyo y la confianza en todo momento.

A mis revisores el Dr. Juan Carlos Chavarría, Dr. Fernando Hernández y al Dr. José Luis Durán Gómez por sus valiosas aportaciones.

Al M.I.M. Julio Alejandro Lugo Jiménez por su apoyo y sus valiosas contribuciones en la parte eléctrica y de control.

Al Ing. Luis Samuel Flores Mena y al Ing. Gabriel Pool Balam, así como a todo el departamento de instrumentación por la ayuda en el maquinado y fabricación del módulo.

Al M. en C. Enrique Escobedo Hernández, al I.Q. Martín Baas López, al I.Q. Isaí Carrera León y al IMEC. Gerardo Cámara Chale por el apoyo y soporte técnico en el laboratorio.

A Julia González Montilla por el apoyo en el área administrativa.

A la unidad de Energía Renovable del CICY por las instalaciones prestadas para el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos de generación y de laboratorio: A Zaira por ser la roomie de mi vida, Marisol, Xavier, Diana, Paola, Mint, Nancy, Pepe, Flor, Jorge, Rita, Zamy, Laurita, Alfredo, Irving, Vincent, Ulises, Harvey, Arely, Elda, Gerardo, Paco, Martín, Isaí, Marisol Castro.

En especial a Carlos Reyes Cabrera por llegar y estar.

ÍNDICE

LISTADO DE ABREVIATURAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xviii
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	2
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	5
1.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	6
1.2 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO	7
1.3 SUPERCONDENSADORES	9
1.3.1 SUPERCONDENSADORES DE DOBLE CAPA ELECTROQUÍMICA	10
1.3.2 SUPERCONDENSADORES REDOX	11
1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPERCONDENSADORES	13
1.5 MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO	14
1.5.1 INTERCONEXIÓN	15
1.6 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA	17
1.6.1 VOLTAJE, INTENSIDAD DE CORRIENTE Y CAPACITANCIA	17
1.6.2 CURVAS DE CARGA/DESCARGA	20
1.6.2.1 CARGA DEL SUPERCONDENSADOR	20
1.6.2.2 DESCARGA DEL SUPERCONDENSADOR	21
CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO Y METODOLOGÍA	25
2.1 DIAGRAMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO	26
2.2 CONVERTIDOR CD/CD	27
2.3 REGULADOR	28
2.4 ALUX	28
2.5 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN	30
2.6 DISEÑO DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN	30
2.6.1 CONEXIÓN SERIE/PARALELO	30
2.6.1.1 PROCESO DE CARGA DEL MÓDULO	32

2.6.1.2 PROCESO DE DESCARGA DEL MÓDULO	32
2.6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DISEÑADO PARA LA RECONFIGURACIÓN	34
2.6.3 PROGRAMACIÓN	35
2.7 ENSAMBLADO DEL MÓDULO	35
2.8 CONSUMO DE ENERGÍA DEL MÓDULO	37
2.8 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL MÓDULO	38
2.9 CÁLCULO DE ESR Y EPR	38
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES	41
3.1 RECONFIGURACIÓN E INCREMENTO DE TIEMPO	42
3.2 EXTRACCIÓN DE ENERGÍA	47
3.3 CÁLCULO DE LA ESR Y EPR	50
CONCLUSIONES	55
PERSPECTIVAS DE TRABAJO	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÉNDICE A	67
APÉNDICE B	69
APÉNDICE C	73

LISTADO DE ABREVIATURAS

SMES	Sistemas de almacenamiento de energía magnética
PHS	Acumulación por bombeo hidroeléctrico
CAES	Sistemas de aire comprimido
EDLC	Supercondensador de doble capa electroquímica
ESR	Resistencia equivalente en serie
EPR	Resistencia equivalente en paralelo
EDL	Doble capa electroquímica
UPS	Sistema de alimentación ininterrumpida
V	Voltaje
I	Intensidad de corriente
R	Resistencia
RL	Resistencia limitadora de intensidad de corriente
C	Capacitancia
Q	Carga del supercondensador
SC	Supercondensador
SC_E	Circuito equivalente
V_M	Voltaje del módulo
V₁, V₂,...	Voltaje en cada supercondensador
I_M	Intensidad de corriente del módulo
I₁, I₂,...	Intensidad de corriente en cada supercondensador
C_M	Capacitancia total del módulo
C₁, C₂,...	Capacitancia de cada supercondensador
Sw	Interruptor
B_{SC}	Módulo de supercondensadores
V_F	Fuente de alimentación
τ	Constante de tiempo
E	Energía
E_F	Energía en el supercondensador durante la carga
E_e	Energía en el supercondensador durante la descarga
η	Factor de extracción de energía
V_C	Voltaje en la carga del supercondensador
V_D	Voltaje total en la descarga del supercondensador
P_M	Potencia total del módulo de supercondensadores
T_Q	Incremento de Tiempo
T_T	Tiempo total de la descarga del módulo de supercondensadores
T_L	Tiempo de reconfiguración
T_{Q%}	Porcentaje de incremento de tiempo
W_{max}	Cantidad máxima de energía del módulo
V_{MAX}	Voltaje máximo de operación del módulo
CD	Intensidad de corriente directa
CA	Intensidad de corriente alterna
ADC	Convertidor analógico digital
6 paralelo	Seis supercondensadores en Paralelo
3 Grupos 2SC's	Tres grupos en paralelo de dos supercondensadores en serie
2 Grupos 3SC's	Dos grupos en paralelo de tres supercondensadores en serie
6 serie	Seis supercondensadores en serie

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Densidad de potencia como una función de la densidad de energía	8
Figura 1.2. Configuración típica de un supercondensador.	9
Figura 1.3. Proceso no farádico entre la interface electrodo/electrolito	10
Figura 1.4. Proceso farádico entre la interfaz electrodo/electrolito]	11
Figura 1.5. Circuito equivalente de un supercondensador	13
Figura 1.6. Nivel de energía como una función del nivel de voltaje	16
Figura 1.7. Configuración serie de varios supercondensadores	18
Figura 1.8. Configuración paralelo de varios supercondensadores	19
Figura 1.9. Circuito de carga de un supercondensador	20
Figura 1.10. Perfil de carga del módulo de supercondensadores.	20
Figura 1.11. Circuito de descarga de un supercondensador.	21
Figura 1.12. Perfil de descarga del módulo de supercondensadores	22
Figura 2.1. Diagrama general de funcionamiento del módulo.	26
Figura 2.2. Diagrama esquemático del convertidor <i>MC34063A</i> .	27
Figura 2.3. Diagrama esquemático del circuito regulador <i>LM317</i>	28
Figura 2.4. Tarjeta de desarrollo <i>Alux V1.1</i> .	29
Figura 2.5. Esquemático del circuito eléctrico de conmutación	30
Figura 2.6. Diagrama de flujo reconfiguración serie/paralelo	34
Figura 2.7. Base interior del módulo de supercondensadores.	35
Figura 2.8. Tapa interior del módulo de supercondensadores	36
Figura 2.9. Exterior módulo	36
Figura 2.10. Banco de pruebas de carga/descarga de los supercondensadores.	38
Figura 2.11. Diagrama básico de la función de transferencia	39
Figura 2.12. Obtención de la función de transferencia por <i>MATLAB®</i> .	40
Figura 3.1. Perfiles de descarga programada de las rutinas de reconfiguración	42
Figura 3.2. Perfiles de carga/descarga de la caracterización del supercondensador	51
Figura 3.3. Perfiles de carga/descarga obtenidos por <i>MATLAB®</i> .	52
Apéndice C.1. Exportar datos desde hoja de cálculo.	73
Apéndice C.2. Perfiles de corriente y de voltaje del supercondensador.	74
Apéndice C.3. Variables de entrada y salida	74

Apéndice C.4. Establecimiento de parámetros.	75
Apéndice C.5. Función de transferencia.	75
Apéndice C.6. Matriz de tiempo	76
Apéndice C.7. Señal de entrada, fuente de alimentación en función del tiempo	76
Apéndice C.8. Función de transferencia.	77
Apéndice C.9. Visualización de los perfiles de corriente y voltaje.	77
Apéndice C.10. Perfiles de corriente y de voltaje obtenidos por medio de Simulink.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características de los dispositivos de almacenamiento más empleados	9
Tabla 2.1. Configuraciones entre los seis supercondensadores del módulo	31
Tabla 2.2. Rutinas de descarga con reconfiguración programada.	33
Tabla 2.3. Intensidad máxima de corriente consumida por el módulo	37
Tabla 3.1. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V.	43
Tabla 3.2. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.6 V.	43
Tabla 3.3. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.7 V.	44
Tabla 3.4. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.8 V.	44
Tabla 3.5. Incremento de tiempo, reconfiguración con nivel de voltaje variable.	45
Tabla 3.6. Reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V.	47
Tabla 3.7. Reconfiguración con límite de voltaje 0.6 V.	47
Tabla 3.8. Reconfiguración con límite de voltaje 0.7 V	48
Tabla 3.9. Reconfiguración con límite de voltaje 0.8 V	48
Tabla 3.10. Reconfiguración con límite de voltaje variable.	49

RESUMEN

En este trabajo se aborda la configuración flexible de las conexiones entre los seis supercondensadores de un módulo, con el objetivo de extraer la mayor cantidad de energía disponible en cada dispositivo e incrementar el tiempo de entrega de energía del módulo. Se construyó un módulo de seis supercondensadores y se diseñó una lógica de conmutación para reconfigurar los dispositivos de acuerdo a su nivel de voltaje, proponiendo 5 rutinas de descarga (*voltaje variable, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 V*). Se empleó como sistema de control la tarjeta de desarrollo *Alux V1.1*, basada en un microcontrolador *PIC®18F2550*. La caracterización eléctrica del módulo, se realizó por medio de la medición de los perfiles de voltaje y corriente obtenidos durante ciclos de carga/descarga.

De acuerdo al circuito eléctrico equivalente de los supercondensadores electroquímicos reportado en la literatura, se desarrollaron y propusieron ecuaciones para obtener los valores de las resistencias internas en serie y en paralelo, debido a la inexistencia de un método que involucre ambas, siendo esto de suma importancia para conocer el estado de los dispositivos.

La propuesta de auto-reconfiguración de los supercondensadores que se utilizó en este trabajo, incrementó el tiempo de descarga del módulo en un intervalo del 25 al 49 %, de acuerdo a cada rutina de descarga; obteniendo un promedio máximo de extracción de energía del 98 % en cada supercondensador; por lo que, se obtienen ciclos de carga/descarga más profundos y un mejor aprovechamiento de la energía útil de cada dispositivo.

Se realizó la caracterización de un supercondensador marca *IC 107DCN2R7Q*, por medio de ciclos de carga/descarga, utilizando *MATLAB®* para la estimación de las resistencias involucradas con base a los perfiles de tensión y de corriente. Siendo los valores obtenidos de las resistencias internas en serie y en paralelo de 0.27Ω y 118Ω , respectivamente; el valor de la primera es similares al reportado por el fabricante, mientras que el valor de la segunda aunque no está dado por el fabricante, se encuentra dentro del intervalo de valores reportados en la literatura; indicando esto que las ecuaciones desarrolladas y el método seguido es viable para la obtención de ambos parámetros.

ABSTRACT

This study presents a flexible configuration of connections among six supercapacitors of a module in order to get the maximum energy extraction in each device and increase the discharge time of the module. The module was constructed using six supercapacitors, as well as development of a switching logic to reconfigure the connection between the energy storage devices according to their voltage level, by means of five routines of charge/discharge (variable voltage, 0.5, 0.6, 0.7 and 0.8 V). The control algorithm was implemented using a development board based on a *PIC 18F2550* microcontroller (Alux V1.1). Electrical characterization of the module was performed by means of the charge/discharge of the energy storage module for the acquisitions of voltage and current data.

A function transfer that includes series and parallel resistances was proposed, due to the lack of a standard method, and according to the equivalent circuit of electrochemical supercapacitors reported in the literature. These parameters are very important to know the status of the devices.

The self-reconfiguration of the module increased the discharge time in the range of 25 to 49% varying according to the routine. By this method, a maximum energy extraction of 98% for each supercapacitor, deeper cycles of charge/ discharge, and better use of the useful energy of each device were obtained.

The electrical characterization of only one commercial supercapacitor IC 107DCN2R7Q, by means of the charge/discharge for the acquisition of voltage and current data, and posteriorly was used MATLAB for estimating the resistances involved. The values obtained from the internal resistances in series and parallel of 0.27 Ω and 118 Ω , respectively, the value of the first is similar to that reported by the manufacturer, while the second value but not given by the manufacturer, is within the range of values reported in the literature that indicates that the equations developed, and the method adopted is feasible to obtain both parameters.

INTRODUCCIÓN

La energía es un factor clave para el desarrollo y por consiguiente esencial para el progreso, por lo que es fundamental contar con un suministro de energía eléctrica disponible a cualquier hora y en cualquier lugar. Actualmente, el desarrollo de sistemas eficientes capaces de proveer un abastecimiento ininterrumpido de energía eléctrica a partir del uso de fuentes renovables es un gran desafío, representando un reto su aprovechamiento debido a que su producción es intermitente y variable, dependiente de factores climáticos.

Dentro de los dispositivos de almacenamiento más comúnmente empleados se encuentran las baterías, esto se debe a su alta densidad de energía y fácil acceso, ya que es una tecnología madura; sin embargo, su desventaja radica en el hecho de manejar baja densidad de potencia, su tiempo de vida se ve directamente afectado por su número limitado de ciclos de carga/descarga, son costosas y contienen componentes altamente contaminantes y tóxicos. Los supercondensadores son la opción más viable para sustituir a sistemas basados únicamente en baterías, debido a su alta densidad de potencia, gran cantidad de ciclos de carga/descarga, bajo y/o casi nulo mantenimiento, resistencia a climas extremos y amplio tiempo de vida; sin embargo, no pueden reemplazar aún en su totalidad a las baterías debido a su baja densidad de energía la cual limita su capacidad de almacenamiento.

Como una alternativa para mejorar y aprovechar las propiedades de los supercondensadores, se hace uso de módulos que conectan varias celdas; por lo general, estos módulos son conectados en sistemas híbridos donde trabajan en conjunto con baterías, soportando picos de corriente y brindándoles a éstas mayor tiempo de vida, no pudiendo sustituirlas debido a que su almacenamiento continua siendo momentáneo y su voltaje variable.

Durante la descarga, el supercondensador pierde el 50% de voltaje cuando solo ha entregado el 75% de su energía, generando que después de este valor deje de ser funcional, debido a los requerimientos de voltaje de operación de los aparatos eléctricos, provocando que en cada ciclo de carga/descarga un 25% de energía quede sin extraer.

Por todo lo anterior y buscando obtener un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovable, así como de realizar una importante contribución en beneficio del medio ambiente, se busca diseñar y desarrollar dispositivos eficientes y capaces de almacenar energía para proveerla en cualquier situación, sin comprometer su calidad.

Una alternativa para contrarrestar algunas de las desventajas que presentan los módulos de supercondensadores y aprovechar al máximo toda la energía almacenada en cada dispositivo, es el uso de una configuración flexible de las conexiones entre los supercondensadores que lo conforman. Lo anterior permitirá incrementar el tiempo de entrega de energía dentro de un intervalo de voltaje constante, manteniendo su densidad de potencia y extrayendo la mayor cantidad de energía almacenada en cada supercondensador. Debido al empleo de configuración flexible, se permite extraer cerca del 83 % de la energía almacenada en cada supercondensador [1], asegurando con esto que el ciclo de carga y descarga deje de ser superficial para volverse profundo.

Por lo anterior, en este trabajo se propone una configuración flexible de las conexiones entre seis supercondensadores que conforman un módulo, con el objetivo de extraer la mayor cantidad de energía almacenada en cada dispositivo, obteniendo ciclos profundos de carga/descarga y por lo tanto incrementando el tiempo de entrega de energía del módulo dentro de un intervalo de voltaje constante.

HIPÓTESIS

Una configuración flexible entre seis supercondensadores de un módulo durante la descarga, aumentará el tiempo de entrega de voltaje dentro de un intervalo constante, incrementando el nivel de extracción de energía de cada supercondensador al presentar ciclos profundos de carga/descarga.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo de almacenamiento de energía a base de seis supercondensadores, programado para reconfigurar la conexión entre sus celdas, incrementando el tiempo de descarga y proporcionar un intervalo de voltaje de salida constante.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis, cálculo y diseño de las reconfiguraciones entre las conexiones de los seis supercondensadores del módulo.
- Esquemmatización y elaboración de los circuitos eléctricos del módulo.
- Ensamblado del módulo.
- Programación de la plataforma de control.
- Caracterización eléctrica del módulo mediante pruebas de carga/descarga programada con adquisición de datos.
- Obtención de los valores de las resistencias equivalentes en serie (*ESR*) y en paralelo (*EPR*) de cada supercondensador.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En este capítulo se hace una descripción de los dispositivos de almacenamiento más comunes, de una manera más particular se describen las propiedades y características de los módulos de almacenamiento basados en supercondensadores, su mecanismo de almacenamiento, sus diferentes configuraciones, su método de caracterización y una reseña del estado del arte.

1.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

La integración adecuada entre fuentes renovables y sistemas de almacenamiento, permite un aprovechamiento razonable de la energía utilizando dispositivos eficientes, capaces de proveer energía cuando se les demande, resultando en un ahorro considerable.

La importancia de los sistemas de almacenamiento radica, en el hecho de poder producir energía a partir de fuentes intermitentes durante periodos de baja demanda, y poder suministrarla energía en períodos de alta demanda o cuando no existe otra fuente de alimentación disponible. Aparte de cumplir con funciones como: compensación y regulación de carga, eficiencia y calidad del sistema en general [2, 3].

El almacenamiento de energía es la capacidad de almacenar energía para producir y liberar electricidad para su uso en periodos donde su utilización sea más beneficiosa; abarcando una amplia gama de tecnologías, escalas y aplicaciones. Sus características esenciales de funcionamiento se describen en términos de factores como [4, 5, 6]:

- Densidad de energía (Wh/kg),
- densidad de potencia (W/kg),
- eficiencia del ciclo (%),
- características de auto-descarga,
- ciclos de vida (número de ciclos),
- vida cronológica (número de años),
- soporte de la potencia,
- ganancia en la calidad de la energía almacenada,
- empleo de materiales que no sean tóxicos, no sean caros y no demanden gran cantidad de energía en su procesamiento,
- baja demanda de mantenimiento, así como nivel bajo de fallas, sensibilidad a climas extremos y sus efectos ambientales.

La energía eléctrica no puede ser almacenada directamente, por lo que se convierte en otro tipo de energía para su posterior extracción cuando es requerida. Los diversos métodos de almacenamiento, se clasifican en [7, 8]:

1. Almacenamiento eléctrico:
 - (i) Electrostático: Capacitores y supercondensadores;
 - (ii) magnético: Sistemas superconductores de almacenamiento de energía magnética (superconducting magnetic energy storage system *SMES*).
2. Almacenamiento mecánico:
 - (i) Cinético: Volantes de inercia;
 - (ii) potencial: Acumulación por bombeo hidroeléctrico (Pumped Hydroelectric Storage *PHS*) y los sistemas de aire comprimido (Compressed Air Energy Storage system *CAES*).
3. Almacenamiento químico:
 - (i) Electroquímico: Baterías;
 - (ii) químico: Celdas de combustible;
 - (iii) termoquímico: Disociación-recombinación térmica.
4. Almacenamiento térmico:
 - (i) A bajas temperaturas: Almacenamiento criogénico;
 - (ii) a altas temperaturas: Sistemas de calor latente y sistemas sensibles al calor

1.2 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO

Los parámetros esenciales a considerar en un dispositivo de almacenamiento, se basan en cuanta energía puede almacenar y cuán rápido es capaz de entregarla; en la Figura 1.1 se muestra la densidad de energía como una función de la densidad de potencia entre los dispositivos de almacenamiento más comunes.

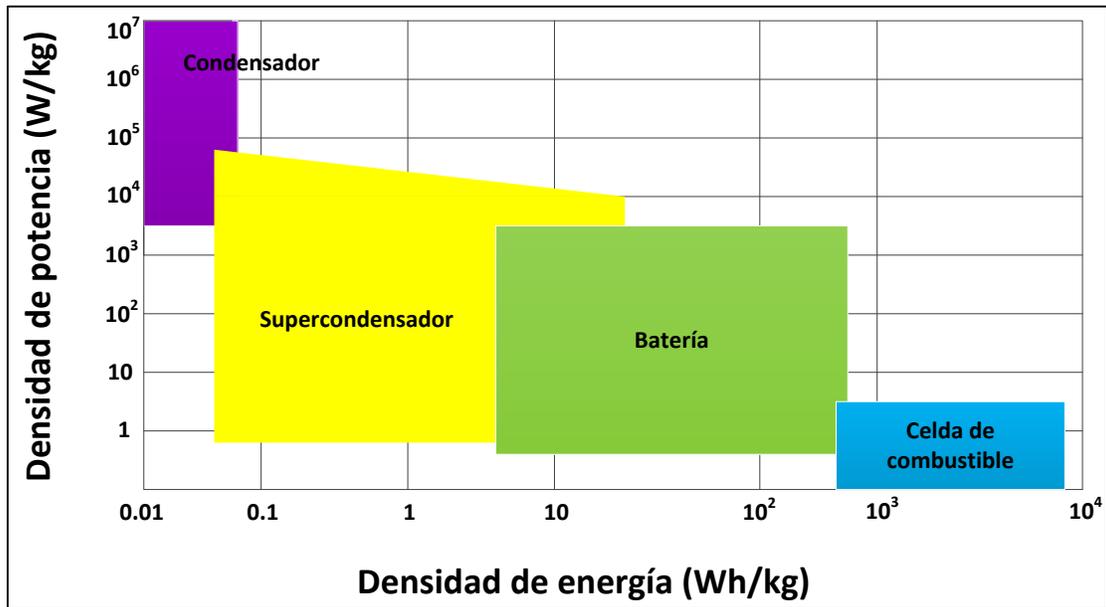


Figura 1.1. Densidad de potencia como una función de la densidad de energía de los dispositivos de almacenamiento más empleados [9].

Dentro de los dispositivos de almacenamiento más empleados se encuentran las baterías, las cuales convierten la energía química en energía eléctrica; son dispositivos formados por varias pilas, que a su vez están constituidas por un electrodo positivo y otro negativo separados por un electrolito (líquido o sólido) que transporta electrones y lleva a cabo reacciones de oxidación/reducción (redox) [10, 11, 12]. Sus principales desventajas radican en su baja densidad de potencia y en el uso de materiales contaminantes, como es el caso del litio (Li), cadmio (Cd), mercurio (Hg), zinc (Zn) y plomo (Pb) [13].

En cambio las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierte directamente la energía química en energía eléctrica, no se recargan y solo generan electricidad mientras se les suministre combustible, ya que éste continuamente se consume; el combustible más empleado es hidrógeno, generando solo vapor de agua como residuo [14, 15, 16].

Los condensadores son dispositivos formados por dos conductores próximos uno a otro (dos armaduras paralelas o placas metálicas), separadas por un dieléctrico (papel, vidrio, cerámicos, madera o porcelana), de tal modo que tienen la misma cantidad de carga, pero

con signos contrarios. Su capacidad de carga es momentánea, conduciendo corriente sólo un instante y con un tiempo de carga proporcional al de descarga. Se clasifican en tres tipos: electrostáticos, electrolíticos y electroquímicos [17, 18]. En la Tabla 1.1 se muestran las principales características de los dispositivos de almacenamiento más desarrollados.

Tabla 1.1. Características de los dispositivos de almacenamiento más empleados [19]

Dispositivos de almacenamiento	Eficiencia (%)	Densidad de potencia (MW/kg)	Densidad de energía (Wh/kg)	Tiempo de vida (Años)	Ciclos de vida	Fuga de energía (Al día)	Tiempo de carga	Madurez de la tecnología	Impacto ambiental
Condensadores	60-65	0.5	0.05-5.0	~ 5	>500,000	40%	Segundos	Desarrollo	Mínimo
Supercondensadores	90-95	0.3	2.5-1.5	20+	>1,000,000	20-40%	Segundos	Desarrollo	Mínimo
Baterías Li-Ion	85-90	0.1	75-200	5-15	4,500	0.1-0.3%	Minutos	Madura	Moderado
Celdas de Combustible	20-50	0 - 50	800-10,000	5-15	>1,000	-	Horas	Desarrollo	Mínimo

1.3 SUPERCONDENSADORES

También denominados condensadores electroquímicos o ultracondensadores, son dispositivos electroquímicos que constan de dos electrodos porosos impregnados en un electrolito y aislados de contacto eléctrico por un papel separador; almacenan energía por el principio de doble capa electroquímica formada en la interface electrodo/electrolito [20]. Este principio se muestra en la Figura 1.2.

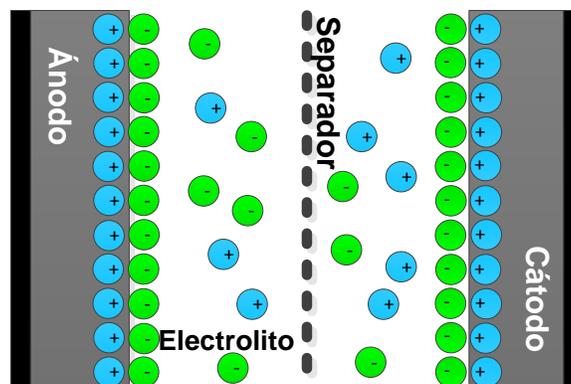


Figura 1.2. Configuración típica de un supercondensador [21].

Los supercondensadores pueden presentar procesos de pseudocapacitancia (o proceso farádico) cuando se producen reacciones de reducción/oxidación (redox), adsorción de iones o proceso de intercalación [22].

Su capacidad de almacenamiento está determinada por el área superficial de los electrodos y el tamaño de los iones del electrolito empleado ya que el almacenamiento sucede cuando los iones del electrolito penetran en los poros del electrodo [23]. De acuerdo al proceso de almacenamiento que emplean estos dispositivos, se tienden dos tipos fundamentales de supercondensadores, los de doble capa electroquímica (*EDLC*) y los redox o pseudocapacitores.

1.3.1 SUPERCONDENSADORES DE DOBLE CAPA ELECTROQUÍMICA

En los supercondensadores de doble capa electroquímica (*EDLC*'s), la energía es almacenada sobre la interface electrodo/electrolito donde se forma la doble capa electroquímica. Ésta doble capa es generada por la atracción y repulsión de iones debido a la tensión eléctrica interfacial formada por los electrodos que están en contacto sin mezclarse, generando una corriente capacitiva o no faradaica al no implicar transferencia de masa, lo que significa un almacenamiento electrostático, como se muestra en la Figura 1.3 [24, 25].

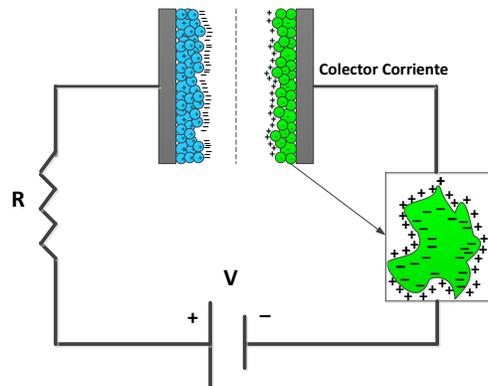


Figura 1.3. Proceso no farádico entre la interface electrodo/electrolito [18].

Su capacidad de almacenamiento está en función de la doble capa electroquímica, del electrolito y es proporcional al área superficial accesible del material activo de cada

electrodo. Los electrodos de carbón son químicamente estables en diferentes soluciones, por lo que los nanotubos de carbono y las nanofibras de carbón activado han sido estudiados ampliamente como materiales para electrodos en *EDLC*'s, debido a sus singulares propiedades físico/químicas. Cuentan con gran superficie específica (por lo general en los electrodos de carbón poroso está en el intervalo de los 2000 m²/g – 3000 m²/g) [18], una buena conductividad electrónica y estabilidad química dentro de un amplio intervalo de temperaturas [26, 27]. Actualmente se estabilizan materiales, controlando las aglomeraciones para que presenten propiedades estructurales beneficiosas y poder utilizarse como electrodos en supercondensadores; como en el caso de los aerogeles de carbón, los cuales son altamente porosos y cuentan con elevada área superficial [28, 29].

1.3.2 SUPERCONDENSADORES REDOX

En los supercondensadores redox, las reacciones pseudocapacitivas se basan en un proceso farádico reversible, permitiendo la transferencia de electrones en la interfaz electrodo-electrolito además de en la doble capa electroquímica, esto debido a las rápidas reacciones de transferencia de carga farádica. En este proceso no implica ningún tipo de transporte de masa o transformación de la materia, contrario a lo que sucede en las baterías, consistiendo solo en un proceso farádico reversible como se muestra en la Figura 1.4.

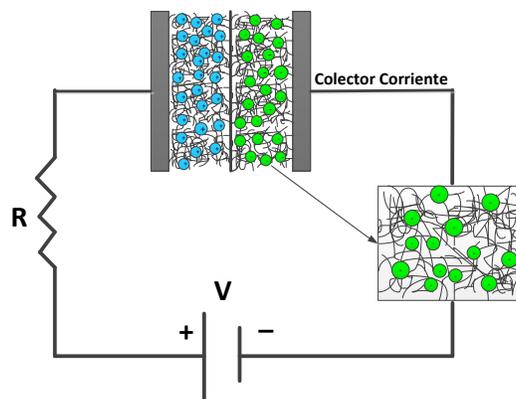


Figura 1.4. Proceso farádico entre la interfaz electrodo/electrolito [18]

Durante el proceso de carga, el material del electrodo se reduce provocando cambios en su estado de oxidación, almacenando iones que posteriormente son liberados durante la

oxidación. Los supercondensadores redox presentan mayor capacitancia que los de doble capa electroquímica, sin embargo, la presencia de procesos farádicos limita su densidad de potencia y su ciclo de vida.

Se han fabricado supercondensadores utilizando polímeros intrínsecamente conductores, tales como, politiofeno, polipirrol, polianilina y sus respectivos derivados relacionados para lograr energías de almacenamiento de alrededor de los 200 F/g [30, 31]. Para aumentar la densidad de energía en supercondensadores, se han utilizado electrodos positivos fabricados de óxidos metálicos; como en el caso de los supercondensadores híbridos fabricados con electrodo positivo de dióxido de manganeso (MnO_2) y el otro de carbón activado, los cuales presentaron un voltaje de celda de 1.8 V y una capacitancia de 22.1 F/g [32].

El electrolito utilizado tanto en los supercondensadores redox como en los *EDLC*'s puede ser acuoso u orgánico. Los acuosos ofrecen ventajas en términos de accesibilidad, mayor conductividad, gran capacidad calorífica y su bajo impacto ambiental, pero a menudo tienen un voltaje de celda menor (1.0 a 2.0 V) respecto a los orgánicos (2.0 a 4.0 V); dependiendo esto directamente del voltaje de ruptura del electrolito. La principal desventaja de los electrolitos acuosos es su reducido voltaje de operación, mientras que para los orgánicos radica en el uso de componentes tóxicos no amigables con el medio ambiente [33, 34].

El modelo de circuito eléctrico equivalente de un supercondensador electroquímico se muestra en la Figura 1.5. El cual no sólo consta del elemento capacitivo, si no que consta en un par de resistencias involucradas, que influyen en los ciclos de carga/descarga del supercondensador. La resistencia equivalente en serie (*ESR*) representa las pérdidas óhmicas del electrodo (zona activa, porosidad, espesor), del electrolito y la resistencia de contacto (propiedades de papel separador); esta resistencia también tiene influencia en la energía eficiente y en la densidad de potencia.

La resistencia equivalente en paralelo (*EPR*) tiene influencia sobre las fugas de corriente cuando el supercondensador está en reposo, por lo general son ignoradas por representar valores de pérdidas insignificantes. En general, los valores bajos de resistencia mejoran la eficiencia y fiabilidad del supercondensador, ya que permiten la entrega de alta densidad de potencia y alta capacitancia [35, 36, 37, 38].

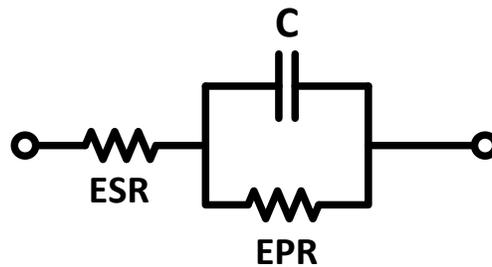


Figura 1.5. Circuito equivalente de un supercondensador [38].

1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores transfieren alta energía y potencia específicas en comparación con los condensadores y con las baterías, por lo que se emplean en aplicaciones que requieren grandes pulsos durante periodos cortos de tiempo [27, 39, 40].

La diferencia en los procesos que se producen en los supercondensadores y en las baterías, hace que cada dispositivo presente características que se oponen y los hace adecuados para su uso en diferentes tecnologías, trabajando en complementario o en solitario; las diferencias más notables entre estos dos dispositivos son:

- i. Los supercondensadores almacenan una cantidad mucho menor de energía que las baterías; en los supercondensadores con electrolito acuoso la densidad de energía está en el orden de 4.5 Wh/kg - 10 Wh/kg, mientras que para las baterías de ion-litio está en el orden de 150-250 Wh/kg [41, 42].
- ii. El principio de almacenamiento de la doble capa electroquímica (*EDL*) implica procesos completamente reversibles, permitiendo a los supercondensadores tener un número mucho mayor de ciclos de carga/descarga (~100,000), con degradación insignificante, mientras que en el caso de las baterías, en cada ciclo se producen cambios que degradan poco a poco los electrodos limitando su ciclo de vida, por lo que tienen que ser reemplazadas en un lapso de 3-7 años, dependiendo del sistema [3, 43, 44].

- iii. La densidad de potencia de los supercondensadores es nueve veces mayor que en las baterías (3.5 - 6.4 kW/kg Vs. 0.7 kW/kg) [41, 42].
- iv. En cuanto a la eficiencia, de estos dispositivos, las baterías pueden perder entre un 20-30% durante el ciclo de carga/descarga, mientras que los supercondensadores solo pierden un 10% [12].
- v. Los supercondensadores pueden operar en intervalos de temperatura de -50 a 50 °C, mientras que las baterías operan cerca de los 20 a 25 °C [21].

1.5 MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO

La nanotecnología ha hecho posible almacenar altos niveles de energía en dispositivos de mínimo volumen capaces de liberar grandes ráfagas de energía durante picos de potencia con mayor cantidad de ciclos de carga/descarga que las baterías recargables. Dividiéndose en dos grupos, los del orden de 100 F – 5,000 F utilizados en automoción y trabajo pesado; mientras que los pequeños de la gama de 0.1 F – 10 F se utilizan en electrónica en general [34]. Con el objetivo de aumentar y mejorar sus propiedades, los supercondensadores son conectados en módulos que conectan varios dispositivos para ser empleados en grandes aplicaciones.

En sistemas híbridos, estos módulos de almacenamiento son conectados complementando a los bancos de baterías, lo que permite mantener un voltaje constante, ya que las demandas transitorias de potencia son proporcionadas por los supercondensadores; de esta manera en el sistema siempre se suministra una potencia media continua, ayudando a una explotación equilibrada y una extensión de vida de las baterías, así como a una gestión eficiente de la energía [45, 46].

En aplicaciones robustas, estos sistemas híbridos han sido ampliamente estudiados; en automoción los supercondensadores proporcionan la energía durante pendientes, aceleraciones repentinas y en el sistema de arranque-parada, donde el desarrollo de convertidores electrónicos de potencia ha permitido la gestión eficaz de la energía cinética en el frenado, almacenándola y suministrándola a otras entidades del vehículo, reduciendo

el tamaño de las baterías, prolongando su tiempo de vida considerablemente y produciendo hasta un 15% de ahorro de combustible [45, 47, 48, 49]. Los módulos de supercondensadores también son utilizados como dispositivos complementarios a fuentes de energía, como sistemas de protección o refuerzo de fuentes alternas, se añaden al circuito intermedio del sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) para mejorar la fiabilidad de la fuente de alimentación en caso de fallo de la red o riesgo de interrupción de energía.

En electrónica de potencia suministran energía a transformadores de potencia diseñados para sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna mejorando la calidad de la energía y en sistemas de alimentación ininterrumpida mejoran la fiabilidad de la fuente de alimentación en fallos de red, así como en motores para mejorar los huecos durante caídas de voltaje [50, 51].

1.5.1 INTERCONEXIÓN

La conexión entre los supercondensadores de un módulo depende de las propiedades y los requerimientos del sistema donde se utilizará. La conexión en serie incrementa el intervalo de voltaje y proporciona un suministro de energía en aplicaciones más robustas y con grandes requerimientos de voltaje [52]. Sin embargo, este arreglo produce desequilibrio en el voltaje del módulo procedente de las diferentes propiedades de cada dispositivo, ya que algunos supercondensadores se cargan o descargan en exceso, lo que conlleva a un deterioro prematuro de cada dispositivo [53, 54].

Los módulos con conexión en paralelo se utilizan en aplicaciones que requieren de elevada corriente para su funcionamiento, pudiendo con esta conexión aumentar la capacidad de almacenamiento y controlar el intervalo de voltaje, aunque ésta siempre está limitada al voltaje de celda de los supercondensadores del módulo [55, 56].

Un factor a considerar en la conexión entre los supercondensadores de los módulos es el hecho de que el voltaje entre sus terminales eléctricas, varía de acuerdo a la energía almacenada. Ya que la extracción de energía en los supercondensadores es más demandante que en el caso de las baterías; cuando éstas han entregado casi el 100% de

su carga, su voltaje solo disminuye un 20%; mientras que cuando los supercondensadores solo han entregado el 75% de su energía, su voltaje ya ha disminuido al 50%.

Después de este valor y bajo estas condiciones, los módulos dejan de cumplir los requerimientos demandados por las cargas las cuales requieren de un valor mínimo de voltaje para operar correctamente, lo que hace que quede un 25% de energía sin utilizar, limitando a que se presenten ciclos profundos de carga/descarga, como se muestra en la Figura 1.6 [23, 57].

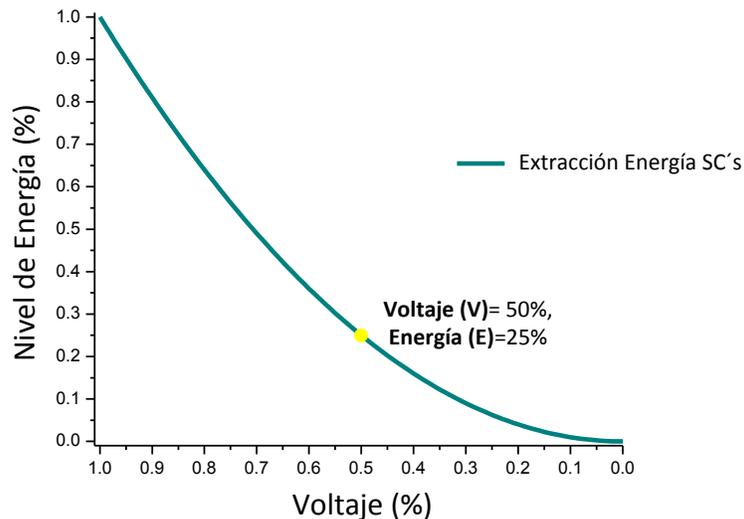


Figura 1.6. Nivel de energía como una función del nivel de voltaje de los supercondensadores.

Por lo anterior, las técnicas de extracciones de energía de los módulos se encuentran aún en desarrollo, siendo una de las alternativas la auto-reconfiguración de las conexiones entre los supercondensadores que conforman los módulos de almacenamiento.

En el trabajo realizado por Enhui, *et al.*, [55] describe que una rutina de reconfiguración, serie-paralelo en las conexiones entre los supercondensadores de un módulo, presenta mayor porcentaje de fiabilidad entre las conexiones y en el módulo completo; este arreglo a su vez, minimiza la variación de capacitancia entre los dispositivos y reduce sus requisitos de voltaje.

Se han propuesto diferentes trabajos como el reportado por Sugimoto *et al.*, [1] donde presenta la conmutación de ocho supercondensadores y cuatro reconfiguraciones flexibles serie/paralelo durante carga/descarga, con una eficiencia general del sistema del 93% y un

promedio de factor de extracción de energía del 83%; sin embargo, la extracción de energía en cada supercondensador es variable, por lo que no se presentan ciclos profundos de carga/descarga en todos los dispositivos.

En otro trabajo similar, de Uno *et al.*, [57, 58] se presenta un sistema de seis supercondensadores con dos reconfiguraciones durante la carga/descarga, sin obtener ciclos profundos, ya que solo reportan un 80.6% de factor de extracción de energía en cada supercondensador, con una tasa de variación de voltaje del 36%.

1.6 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

1.6.1 VOLTAJE, INTENSIDAD DE CORRIENTE Y CAPACITANCIA

El voltaje (V) de una celda es el trabajo por unidad de carga ejercido por un campo eléctrico para desplazar los electrones de un lugar a otro; mientras que la intensidad de corriente (I) es la rapidez con la que fluyen estos electrones; estas propiedades se encuentran dadas por la ley de ohm, ecuación (1.1):

$$I = V / R \quad (1.1)$$

donde:

I = Intensidad de corriente (A)

V = Voltaje eléctrica (V)

R = Resistencia (Ω)

La capacitancia (C) es la capacidad que tiene un supercondensador de almacenar carga (Q) por cada volt de voltaje que existe entre sus dos electrodos, dependiente del tamaño y capacidad de cada uno de ellos, así como de la carga que se le suministre. La capacitancia está dada por la ecuación (1.2) [59]:

$$C = Q/V \quad (1.2)$$

Los valores de C , V e I de un módulo varían de acuerdo a la conexión de los supercondensadores que lo conforman. Para cada conexión existe un circuito equivalente,

en la Figura 1.7 se observa la conexión en serie de varios supercondensadores y su circuito equivalente (SC_E).

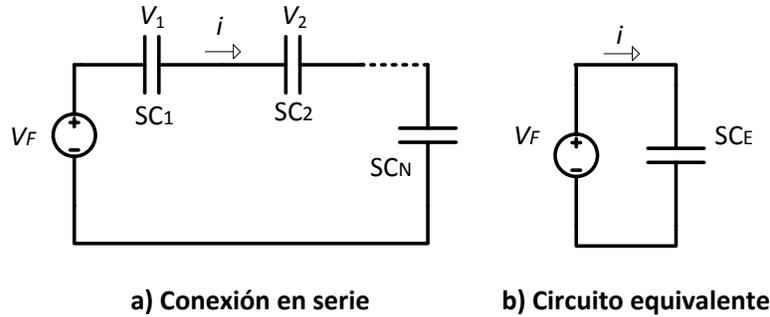


Figura 1.7. Configuración de varios supercondensadores; a) conexión en serie, b) circuito equivalente

Cuando los supercondensadores se encuentran conectados en serie, el voltaje total del módulo (V_M) está dado por la suma del voltaje de cada dispositivo conectado (V_1, V_2, V_N) y está dado por la ecuación (1.3):

$$V_M = V_1 + V_2 + \dots + V_N \quad (1.3)$$

Por otro lado, la intensidad de corriente que circula por el módulo (I_M) será la misma en cada supercondensador conectado (I_1, I_2, I_N) y se define por la relación (1.4):

$$I_M = I_1 = I_2 = I_N \quad (1.4)$$

La capacitancia total del módulo (C_M) es obtenida por la ecuación (1.5), involucrando la capacitancia de cada supercondensador conectado (SC_1, SC_2, SC_N):

$$C_M = \frac{SC_1 \cdot SC_2 \cdot \dots \cdot SC_N}{SC_1 + SC_2 + \dots + SC_N} \quad (1.5)$$

En la Figura 1.8 se muestra el circuito eléctrico de la conexión de supercondensadores en paralelo y su circuito equivalente (SC_E).

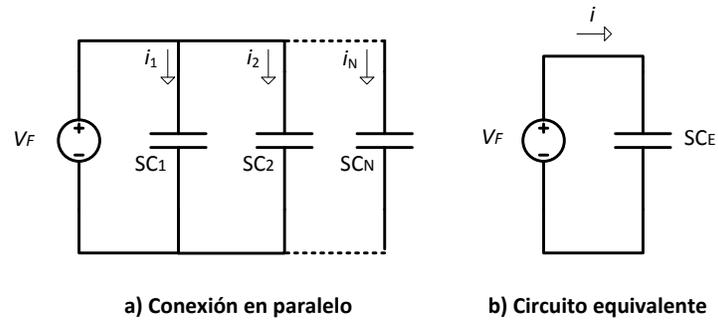


Figura 1.8. Configuración de varios supercondensadores; a) conexión en paralelo, b) circuito equivalente.

Cuando los supercondensadores están conectados en paralelo, V_M es igual al voltaje de V_1 , V_2 , V_N , y está definido por la siguiente relación (1.6):

$$V_M = V_1 = V_2 = V_N \quad (1.6)$$

Mientras que I_M será la suma de las intensidades de corriente que circulan por cada supercondensador conectado (I_1 , I_2 , I_N) y se define, por la siguiente ecuación (1.7):

$$I_M = I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (1.7)$$

De igual manera, C_M será la suma de la capacitancia de cada supercondensador conectado (SC_1 , SC_2 , SC_N) y está dada por la ecuación (1.8):

$$C_M = SC_1 + SC_2 + \dots + SC_N \quad (1.8)$$

1.6.2 CURVAS DE CARGA/DESCARGA

1.6.2.1 CARGA DEL SUPERCONDENSADOR

La caracterización eléctrica se realiza mediante curvas de carga/descarga conectando una resistencia en serie con el módulo y siendo un relevador el que controle el suministro de alimentación, permitiendo la fase de carga o descarga [60, 61].

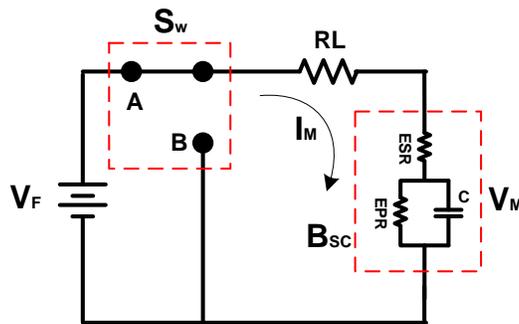


Figura 1.9. Circuito de carga de un supercondensador

Cuando el interruptor (S_w) cierra (A) como se muestra en la Figura 1.9, la transferencia de electrones suministrada al módulo de supercondensadores (B_{SC}) es muy rápida, por lo que instantáneamente I_M se eleva a un valor limitado únicamente por la resistencia de carga (R_L), disminuyendo a medida que el módulo se carga; mientras que V_M sube gradualmente hasta igualarse con V_F , como se muestra en la Figura 1.10.

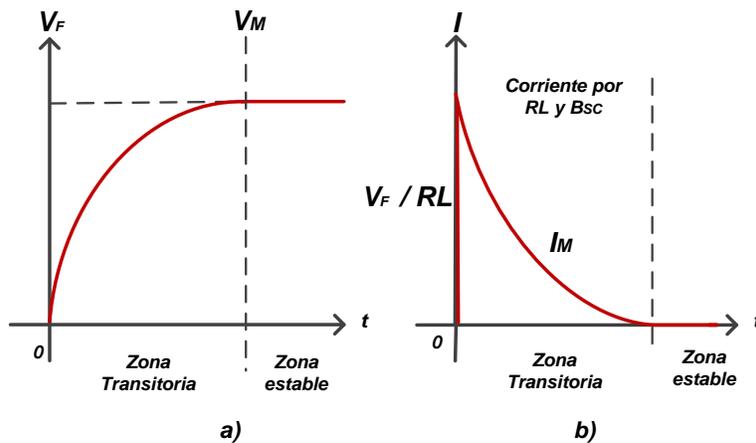


Figura 1.10. Perfil de carga del módulo de supercondensadores; a) voltaje, b) corriente.

La ecuación (1.1) proporciona el valor de la intensidad de corriente máxima, en el instante de tiempo ($t = 0$ s), sin embargo, después de este instante esta ecuación deja de ser válida debido a que el módulo comienza a cargarse, por lo que los valores de I_M y de V_M en cualquier momento durante la carga se pueden obtener mediante la ecuación (1.9):

$$I_M = \frac{V}{R} \cdot e^{-t/\tau} \quad (1.9)$$

donde τ es la constante de tiempo en segundos, siendo I_M muy sensible al cambio de este valor, que está dado por la ecuación (1.10):

$$\tau = R \cdot C \quad (1.10)$$

Para los valores crecientes de t , la magnitud de $e^{-t/\tau}$ disminuye; por lo que el valor de I_M será cero después de que hayan transcurrido 5τ , pasando de la zona transitoria a la zona estable. Mientras que el valor de V_M durante la carga está dado por la ecuación (1.11):

$$V_M = V_F \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.11)$$

Donde debido a la presencia del factor $(1 - e^{-t/\tau})$, se puede asumir que V_M será igual a V_F después de 5τ ; después de este tiempo el flujo de electrones se detiene, I_M es igual a cero y V_M cesa de cambiar de magnitud –la fase de carga habrá concluido–. En este momento el módulo asume las características de un circuito abierto [62].

1.6.2.2 DESCARGA DEL SUPERCONDENSADOR

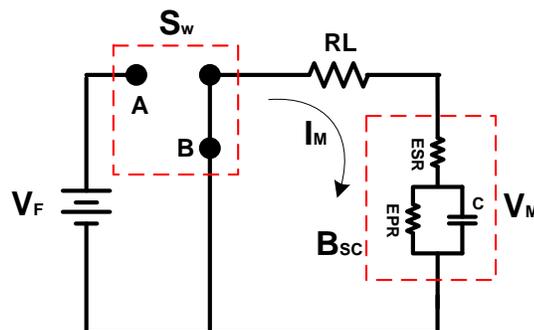


Figura 1.11. Circuito de descarga de un supercondensador.

Cuando Sw se abre (B) como muestra la Figura 1.11, el módulo comienza a descargarse; V_M comienza a decrecer gradualmente influenciado por τ hasta llegar a cero, mientras que I_M cambia de sentido y cae instantáneamente a un valor limitado solamente por RL disminuyendo a medida que fluye la descarga, como se muestra en la Figura 1.12 [62].

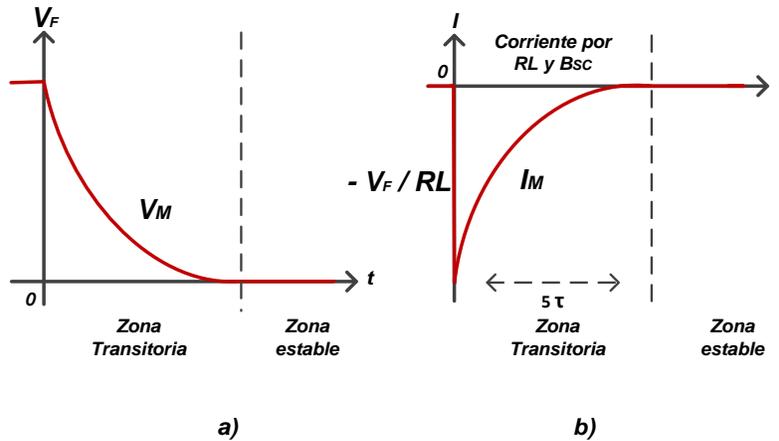


Figura 1.12. Perfil de descarga del módulo de supercondensadores; a) voltaje, b) corriente.

El módulo se descarga a una velocidad sensible a τ por lo que V_M en cualquier momento durante la descarga está dado por la ecuación (1.12):

$$V_M = V_F \cdot e^{-t/\tau} \tag{1.12}$$

Mientras que I_M invierte su dirección durante la fase de descarga, lo que genera un pulso negativo y cambia la polaridad en R ; al igual que la carga, la descarga concluirá después 5τ ; su valor está dado por la ecuación (1.13):

$$I_M = \frac{V_F}{R} \cdot e^{-t/\tau} \tag{1.13}$$

Por otro lado la energía (E) almacenada en el módulo en cualquier momento durante la carga (E_F) o descarga (E_e) puede obtenerse a partir de la ecuación (1.14).

$$E = \frac{1}{2} \cdot CV^2 \tag{1.14}$$

El factor de extracción de energía del módulo η está dado por la relación de la energía en E_F por medio de la ecuación (1.13) utilizando el voltaje total en la carga (V_C) y E_e tomando el voltaje total en la descarga (V_D); este factor está dado por la ecuación (1.15) [1].

$$\eta = \frac{E_F - E_e}{E_F} \quad (1.15)$$

La potencia del módulo (P_M) es el producto de la diferencia de V_M e I_M del módulo; se obtiene a partir de la ecuación (1.16):

$$P_M = V_m \cdot I_M \quad (1.16)$$

El incremento de tiempo de descarga (T_Q) está dado por la ecuación (1.17); éste es directamente relacionado con el tiempo total de descarga (T_T) y con el tiempo límite o tiempo de reconfiguración (T_L).

$$T_Q = T_T - T_L \quad (1.17)$$

Mientras que el porcentaje total de incremento de tiempo $T_{Q\%}$ está dado por la ecuación (1.18):

$$T_{Q\%} = \frac{T_Q \cdot 100}{T_T} \quad (1.18)$$

La máxima cantidad de energía (W_{max}) que puede ser almacenada y entregada por el módulo, está definida por la siguiente ecuación, donde C_M es la capacitancia equivalente del módulo y el voltaje máximo de operación del módulo (V_{MAX}) (1.19):

$$W_{max} = \frac{C_M \cdot V_{max}}{2} \quad (1.19)$$

El voltaje y la intensidad de corriente que pasan a través del módulo de supercondensadores están influenciadas por ESR y EPR , pudiendo obtener sus valores a través de las siguientes ecuaciones obtenidas de la relación de la intensidad de corriente, su resistencia limitadora, el voltaje y la capacitancia, (Apéndice A). La intensidad de

corriente de cada supercondensador respecto a la fuente de alimentación (I/V_F) está dada por la ecuación (1.20):

$$I_M/V_F = \frac{\frac{S}{RL+ESR} + \frac{1}{(RL+ESR)EPR \cdot C}}{S + \frac{(RL+ESR+EPR)}{(RL+ESR)EPR \cdot C}} \quad (1.20)$$

Mientras que el voltaje respecto a la fuente de alimentación (V/V_F) está dada por la ecuación (1.21):

$$V_M/V_F = \left(\frac{((ESR)(EPR \cdot C + 1) + EPR) V_F}{(R + ESR)(EPR \cdot C) + R + ESR + EPR} \right) \quad (1.21)$$

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO Y METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el diagrama general de funcionamiento del módulo de supercondensadores, así como cada una de las partes que lo conforman y un pequeño marco teórico para adentrar en el tema. Se presenta la lógica de programación empleada para controlar la interconexión entre los supercondensadores, los diagramas de los circuitos eléctricos y el ensamblado del módulo.

2.1 DIAGRAMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO

El módulo tiene la capacidad de conectar seis supercondensadores y reconfigurar la conexión entre ellos de acuerdo a su nivel de voltaje, esto por medio de la implementación de un sistema de control basado en un microcontrolador.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama general de funcionamiento del módulo de supercondensadores. La alimentación del módulo es de $5 V_{CD}$ por medio de un cable *USB de conector tipo "A" a conector tipo "B"*, esto permite que dicha alimentación provenga tanto de la PC como de un *Convertidor CA/CD con salida USB ($5V_{CD}$, 2 A)*. Adicionalmente este cable también es utilizado para la comunicación del módulo.

El módulo de supercondensadores consta de una tarjeta de desarrollo *Alux V1.1* como sistema de control de las reconfiguraciones del circuito de conmutación, un convertidor *CD/CD* elevador para alimentar al circuito de conmutación; un circuito eléctrico *regulador de CD* para suministrar la carga a los supercondensadores.

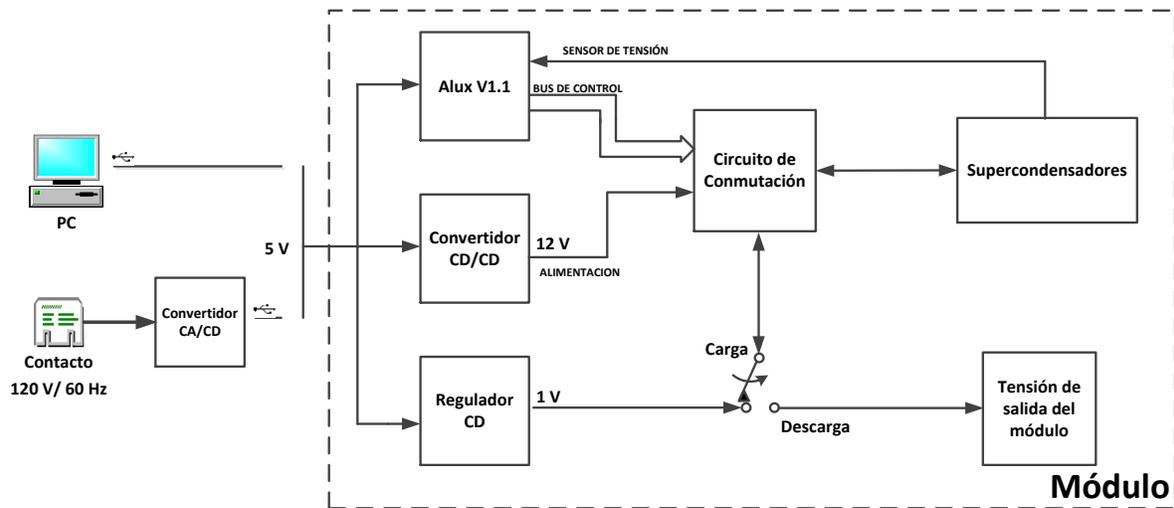


Figura 2.1. Diagrama general de funcionamiento del módulo de supercondensadores.

2.2 CONVERTIDOR CD/CD

Los convertidores CD/CD son configuraciones de electrónica de potencia que permiten a partir de una fuente de CD elevar o bajar el valor de voltaje de salida [63]. Las configuraciones básicas son tres:

- Regulador reductor: El voltaje de salida es menor que la de entrada. Su principal aplicación es en fuentes de alimentación de CD reguladas y control de velocidad de motores de CD.
- Regulador elevador: El voltaje es mayor que la de entrada, sin necesidad de utilizar un transformador, su eficiencia es alta; una de sus desventajas, es que el voltaje de salida es muy sensible a los cambios en el ciclo de trabajo y puede ser difícil su estabilización.
- Regulador reductor-elevador. El voltaje de salida puede ser mayor o menor que la de entrada, siendo de polaridad inversa. Cuentan con alta eficiencia, sin embargo la corriente de entrada es discontinua [64, 65].

El convertidor CD/CD empleado en el módulo es del tipo elevador, utiliza un circuito integrado *MC34063A* ($3V_{CD}-40 V_{CD}$, $I_{Max} 5 A$) [66]. Éste recibe un voltaje de entrada de $5V_{CD}$ y suministra un voltaje de salida de $12 V_{CD}$, voltaje requerido para alimentar al circuito de conmutación. El diagrama esquemático del circuito eléctrico mostrado en la Figura 2.2, se realizó en el software de diseño electrónico *EAGLE 6.0.3®*.

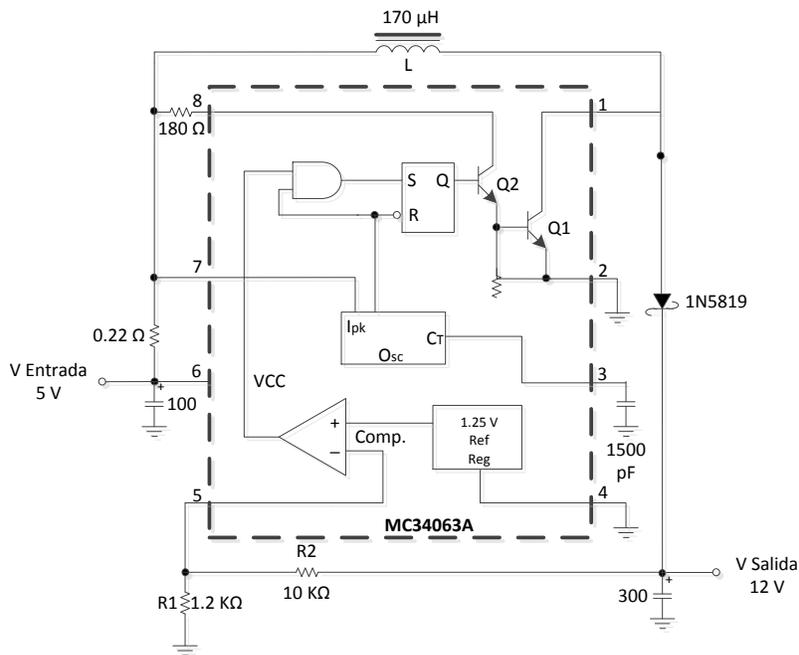


Figura 2.2. Diagrama esquemático del convertidor *MC34063A* [67].

Están diseñados para reducir costos y el consumo de energía de un sistema en particular, existen gran variedad con diferentes características, su programación se lleva a cabo mediante un software y una tarjeta electrónica [70, 71, 72].

Para el control del módulo se utilizó una tarjeta de desarrollo *ALUX V1.1*, la cual emplea un *PIC18F2550* [73], para el control y procesamiento de sus funciones. La tarjeta *ALUX V1.1* es empleada para el manejo de las reconfiguraciones de los supercondensadores del módulo.

Utiliza una interfaz de comunicación y alimentación *USB*, comunicándose con el circuito de conmutación por medio de un bus de datos de seis hilos.

El convertidor analógico digital (*ADC*) del microcontrolador es el encargado de monitorear, registrar y convertir el voltaje de salida del módulo en un valor digital para poder ser leído por el procesador y mandar la señal a los puertos encargados de la reconfiguración de los supercondensadores.

El diagrama esquemático de la tarjeta *Alux V1.1* se muestran en la Figura 2.4.

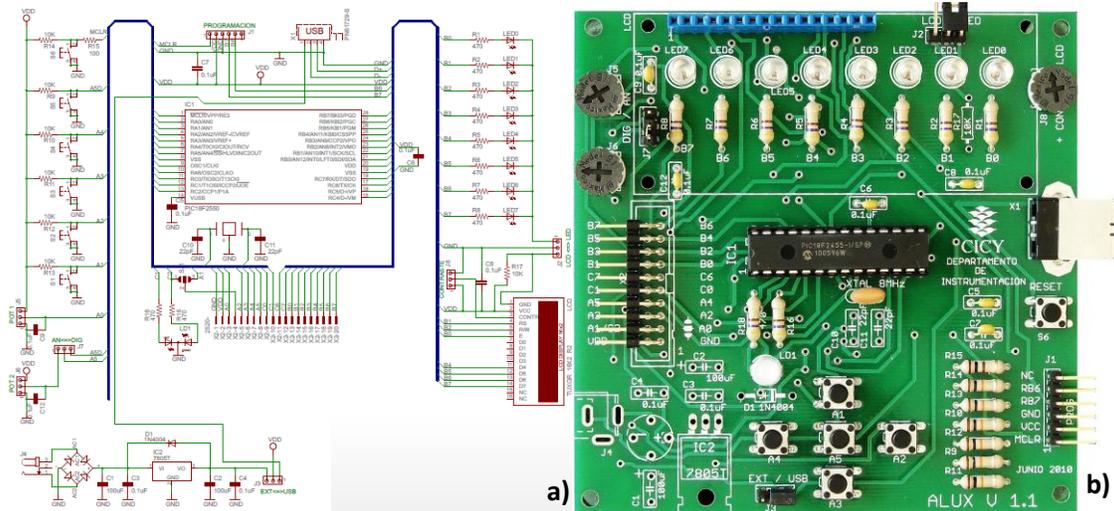


Figura 2.4. Tarjeta de desarrollo; a) esquemático, b) *Alux V1.1*.

2.5 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN

El circuito eléctrico de conmutación reconfigura la conexión entre los supercondensadores del módulo, dependiendo del valor de voltaje de salida del módulo, valor que es monitoreado y convertido por el *ADC* del microcontrolador de la tarjeta de control, para manipular los puertos de salida del bus de control conectado al circuito de conmutación; los puertos de salida son los encargados de reconfigurar la conexión entre los supercondensadores del módulo.

El diagrama del circuito eléctrico de conmutación se muestra en la Figura 2.5, se realizó en el software de diseño electrónico *EAGLE 6.0.3®*. Emplea cinco relevadores *TDS – 1202L (2P/2T 12 VCD)* para conmutar la conexión entre los dispositivos. La Figura 2.6 presenta una imagen del circuito de conmutación construido.

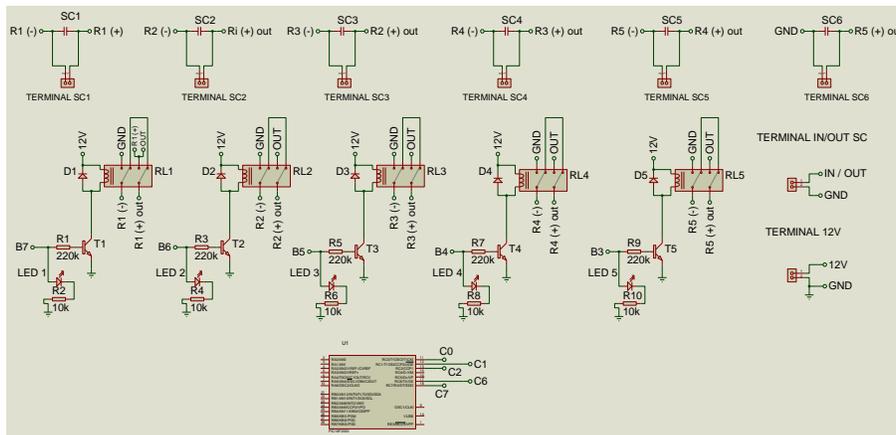


Figura 2.5. Esquemático del circuito eléctrico de conmutación

2.6 DISEÑO DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN

2.6.1 CONEXIÓN SERIE/PARALELO

El diseño de las configuraciones entre las conexiones de los supercondensadores del módulo, se realizó considerando varios factores como:

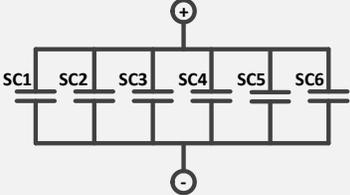
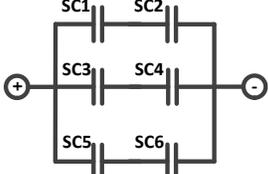
- Número de dispositivos que conforman el módulo;
- se incremente el tiempo de entrega de voltaje del módulo;

- el nivel de voltaje sea constante y dentro de un intervalo de variación determinado;
- extracción uniforme de energía disponible en cada supercondensador; obtener ciclos más profundos de carga/descarga.

Se plantean cuatro configuraciones posibles entre los supercondensadores, con el circuito de conmutación diseñado; realizándose cada una de ellas a medida que el nivel de voltaje de salida del módulo disminuye durante la descarga.

Las cuatro configuraciones y el arreglo de supercondensadores se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Configuraciones entre los seis supercondensadores del módulo

CONFIGURACIONES	ARREGLO DE SC's
a) Seis supercondensadores en paralelo (6 paralelo)	
b) Tres grupos en paralelo de dos supercondensadores en serie (3 Grupos. 2SC's)	
c) Dos grupos en paralelo de tres supercondensadores en serie (2 Grupos. 3SC's)	
d) Seis supercondensadores en serie (6 serie)	

2.6.1.1 PROCESO DE CARGA DEL MÓDULO

Inicialmente y durante el proceso de carga del módulo, los supercondensadores se encuentran conectados en paralelo, con el objeto de tener una carga más rápida demandando un mínimo de corriente más (Tabla 2.1, a)).

Cuando se completa la carga, el módulo se desconecta de la fuente de alimentación cambiando de posición el interruptor empleado para regular la carga/descarga, y posterior comenzar la descarga. Durante todo el ciclo de carga/descarga se mantiene registrado el valor del voltaje de salida por medio del *ADC* de la tarjeta *Alux V1.1*.

2.6.1.2 PROCESO DE DESCARGA DEL MÓDULO

La descarga comienza con los dispositivos conectados en paralelo, cuando el voltaje de salida del módulo V_M es menor o igual al valor del primer voltaje de conmutación programada, la tarjeta de desarrollo *Alux V1.1* manda la señal a los puertos de salida necesarios para reconfigurar los supercondensadores en tres grupos en paralelo de dos supercondensadores en serie (*3Gpos. 2SC's*) (Tabla 2.1, b))

El voltaje del módulo aumenta instantáneamente pero continua la descarga, cuando el voltaje de salida del módulo V_M es menor o igual al segundo voltaje de conmutación programada, se manda nuevamente la señal a los puertos necesarios para reconfigurar la conexión entre los supercondensadores en dos grupos en paralelo de tres supercondensadores en serie (*2Gpos. 3SC's*) (Tabla 2.1, c)).

Nuevamente, el voltaje del módulo aumenta instantáneamente y continúa la descarga del módulo; cuando el voltaje de salida del módulo V_M es menor o igual al tercer voltaje de conmutación programada, se manda la señal a los puertos necesarios para reconfigurar la conexión de las seis celdas en serie (*6serie*) (Tabla 2.1 d)).

El voltaje aumenta y continua la descarga del módulo; cuando el voltaje de salida del módulo V_M es menor o igual al cuarto voltaje de conmutación programada, se manda finalmente la señal a los puertos necesarios para reconfigurar la conexión de todos los

supercondensadores en paralelo (*6 paralelo*) (Tabla 2.1 a)), para terminar el ciclo de descarga y comenzar otra vez la carga.

Se proponen cinco rutinas de descarga programada variando solamente el valor de voltaje al cual se lleva a cabo cada una de las reconfiguraciones de las conexiones entre los supercondensadores del módulo. En la Tabla 2.2 se muestran las cinco rutinas de descarga programada propuestas y los el valor de voltaje al se realizan las reconfiguraciones.

Tabla 2.2. Rutinas de descarga con reconfiguración programada.

Configuración	Límite 0.5 V	Límite 0.6 V	Límite 0.7 V	Límite 0.8 V	Voltaje Variable
1)	0.50	0.60	0.70	0.80	0.50
2)	0.25	0.30	0.35	0.40	0.33
3)	0.16	0.20	0.23	0.26	0.16
4)	0.08	0.10	0.11	0.13	0.10

2.6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DISEÑADO PARA LA RECONFIGURACIÓN

El diagrama de flujo que describe la lógica de programación mencionada anteriormente, se muestra en la figura 2.6.

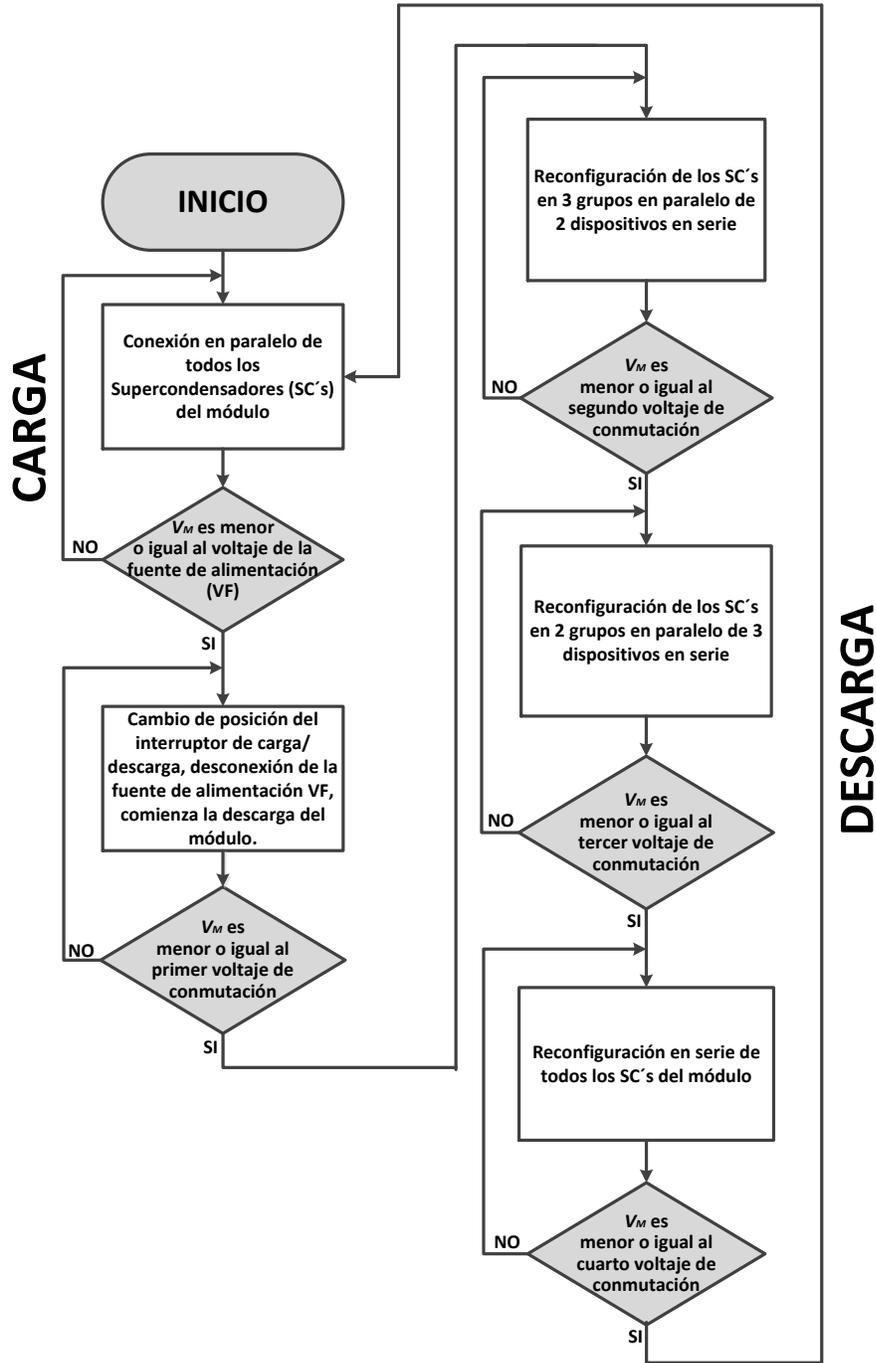


Figura 2.6. Diagrama de flujo reconfiguración serie/paralelo

2.6.3 PROGRAMACIÓN

El software empleado para la programación de la tarjeta *Alux V1.1* fue el *PCWHD COMPILER (PIC C Compiler)*, haciendo uso de un *USB HID BOOTLOADER V2.90^a* de *Microchip*®, para el grabado del programa en la memoria del microcontrolador por medio de la conexión *USB* de la tarjeta de desarrollo *Alux V1.1*. Se utilizó el *ADC* de 10 Bits del microcontrolador por tener mayor resolución y ser más preciso en la conversión de los valores de voltaje registrados (El código de programación se muestra en el APÉNDICE B).

2.7 ENSAMBLADO DEL MÓDULO

El ensamblado del módulo se realizó en un gabinete de plástico con dimensiones de $22.3 \times 14 \times 9.2 \text{ cm}$; en la Figura 2.7 se aprecia el interior del módulo de supercondensadores, integrado por:

- Circuito de conmutación
- Regulador *CD/CD* ($5 \text{ V} - 1 \text{ V}$)
- Convertidor *CD/CD* ($5 \text{ V} - 12 \text{ V}$)
- Supercondensadores
- Interruptor (Carga/descarga)

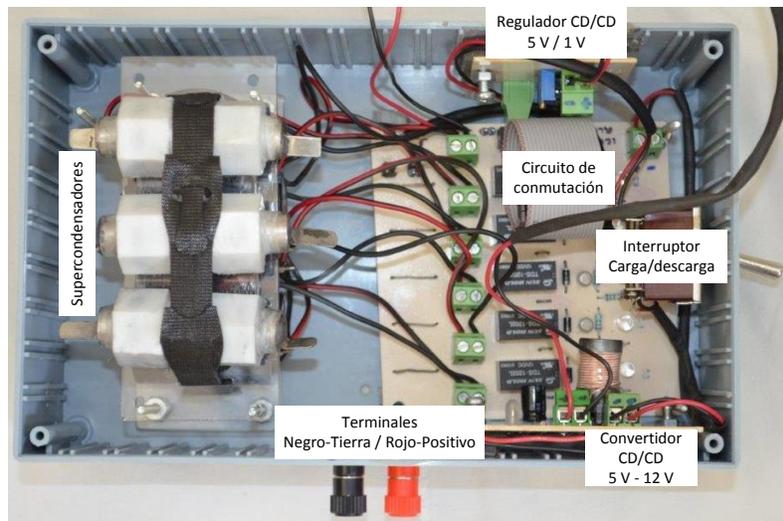


Figura 2.7. Base interior del módulo de supercondensadores.

Mientras que la Figura 2.8 muestra la vista interior de la tapa del módulo, donde se sitúa el *Alux V1.1* con su pantalla *LCD 16x2* y la *rejilla de transferencia de calor*.

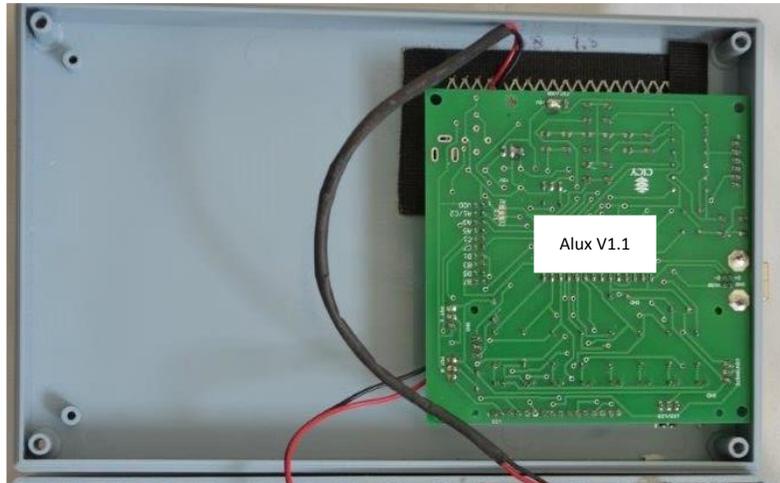


Figura 2.8. Tapa interior del módulo de supercondensadores

En la Figura 2.9 se aprecia el exterior del módulo; integrado por:

- Terminales
- Interruptor
- Pantalla
- Rejilla de transferencia de calor.
- Entrada de alimentación.

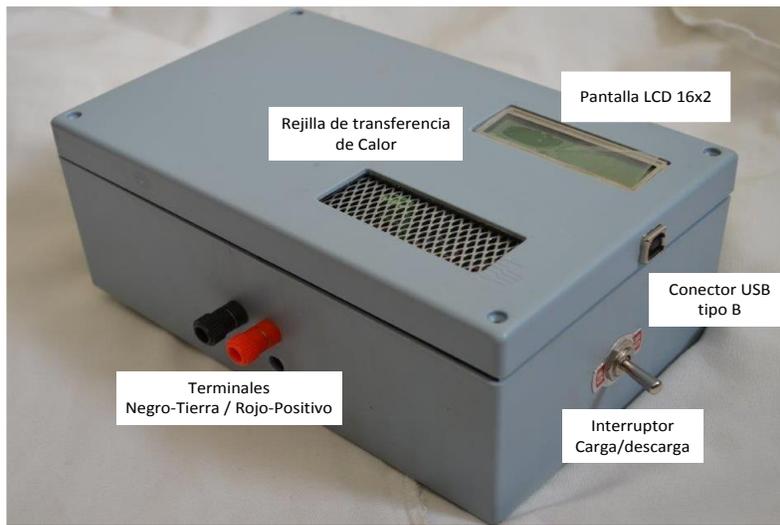


Figura 2.9. Exterior módulo

El módulo cuenta con dos terminales de salida tipo *Banana* (10 A, Negro-Tierra / Rojo-Positivo); un *interruptor de palanca* (2P/2T, 15 A), el cual controla el proceso de carga/descarga. Para la alimentación de los circuitos eléctricos y la carga de los supercondensadores, el módulo cuenta con un conector *USB tipo B*, el cual también permite la conexión con la PC (5 V, 500 mA); pudiendo también alimentarse de la toma eléctrica utilizando un *convertidor CA/CD USB 2.0* (2 A, CA/CD).

La pantalla *LCD 16x2* permite la visualización del voltaje del módulo; mientras que la rejilla permite el flujo de aire para la ventilación y enfriamiento de los circuitos eléctricos.

2.8 CONSUMO DE ENERGÍA DEL MÓDULO

Los requerimientos de intensidad de corriente de todos circuitos eléctricos que conforman el módulo fueron obtenidos por medio de caracterización eléctrica. Ésta fue realizada a base de pruebas de funcionamiento y consumo de intensidad de corriente, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.3. Esta caracterización se realizó para corroborar el correcto funcionamiento de los circuitos eléctricos que conforman el módulo y para conocer la demanda de corriente de cada uno de ellos. Es importante conocer éste parámetro para saber si las fuentes de alimentación propuestas, cumplen con los requerimientos eléctricos del módulo; en este caso la fuente de alimentación por medio del puerto USB de una computadora representaba la limitante al contar con intervalos de valores de trabajo ya establecidos (500 mA; 5 V). De acuerdo a los valores resultantes, los requerimientos de trabajo del módulo podrán ser cumplidos por dicha fuente de alimentación.

Tabla 2.3. Intensidad máxima de corriente consumida por los componentes del módulo.

Circuito eléctrico	Consumo Intensidad de corriente (mA)
Alux V1.1	50
Circuito de Conmutación	100
Convertidor CD/CD	160
Regulador	5
Supercondensadores	180
Total	495

2.8 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL MÓDULO

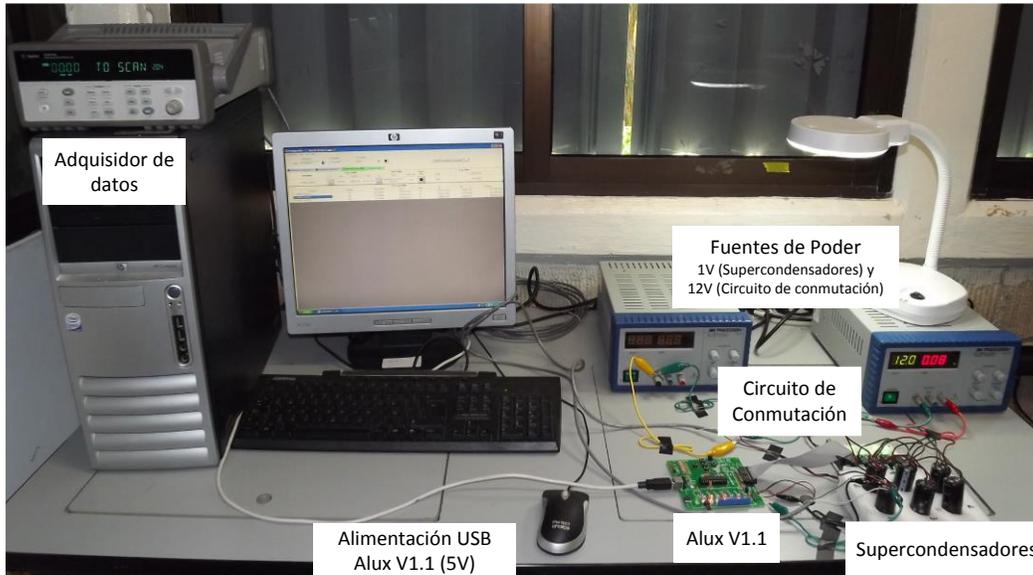


Figura 2.10. Banco de pruebas de carga/descarga de los supercondensadores.

La caracterización eléctrica se hizo con los datos adquiridos en pruebas de carga/descarga; éstas se realizaron con seis supercondensadores marca *IC 107DCN2R7Q (2.7 V – 100 F)* [75]. Para controlar la corriente de carga de los supercondensadores se empleó una resistencia limitadora de 4.7Ω ; la descarga se realizó por medio de una resistencia de 3.7Ω ; los supercondensadores (1 V) y el circuito de conmutación (12 V) fueron alimentados por fuentes de poder marca *DC GW Instek GPS-3303*; se utilizó un adquisidor de datos *Agilent 34970A (Data acquisition Unit, 61/2-digit multimeter accuracy)* y *LabVIEW®* como plataforma de adquisición, medida y registro de los datos. La Figura 2.10 muestra el banco de pruebas.

2.9 CÁLCULO DE ESR Y EPR

Una función de transferencia es un modelo matemático que relaciona la respuesta de un sistema, con respecto a una señal de entrada o excitación. Son utilizadas para caracterizar relaciones de entrada/salida de sistemas descritos mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. El modelo básico de un sistema describe matemáticamente la influencia de una señal de entrada $u(t)$ sobre otra señal de salida $y(t)$,

ambas relacionadas mediante una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes de orden n [76]. El diagrama de bloques básico de una función de transferencia se muestra en la Figura 2.11.

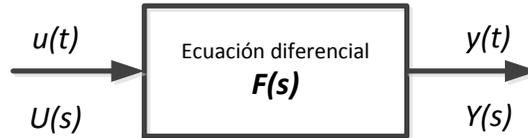


Figura 2.11. Diagrama básico de la función de transferencia

Se realizó la caracterización eléctrica de un supercondensador comercial marca *IC 107DCN2R7Q* (2.7 V – 100 F) a 1 V, empleando una resistencia limitadora de corriente y una de descarga con valor de 4.7 Ω cada una. Empleando los perfiles de voltaje y corriente resultado de dicha caracterización, se empleó *MATLAB®* para estimar las funciones de transferencia del comportamiento ideal de dichos perfiles durante la carga/descarga, como se muestra en la Figura 2.12. Posteriormente, se despejan los valores de dichas ecuaciones y se obtienen los valores correspondientes de *ESR* y *EPR*.

Tomando las ecuaciones (1.20) y (1.21) como referencia, se calcula el valor de las *ESR* y *EPR*; se utilizó *Mathcad®* para la comprobación de los resultados (El procedimiento seguido se muestra en el APÉNDICE C).

$$\frac{I}{V_F} = \frac{\frac{S}{RL+ESR} + \frac{1}{(RL+ESR)EPR \cdot C}}{S + \frac{(RL+ESR+EPR)}{(RL+ESR)EPR \cdot C}} \quad (1.20)$$

$$V_M/V_F = \left(\frac{((ESR)(EPR \cdot C + 1) + EPR) V_F}{(R+ESR)(EPR \cdot C) + R + ESR + EPR} \right) \quad (1.21)$$

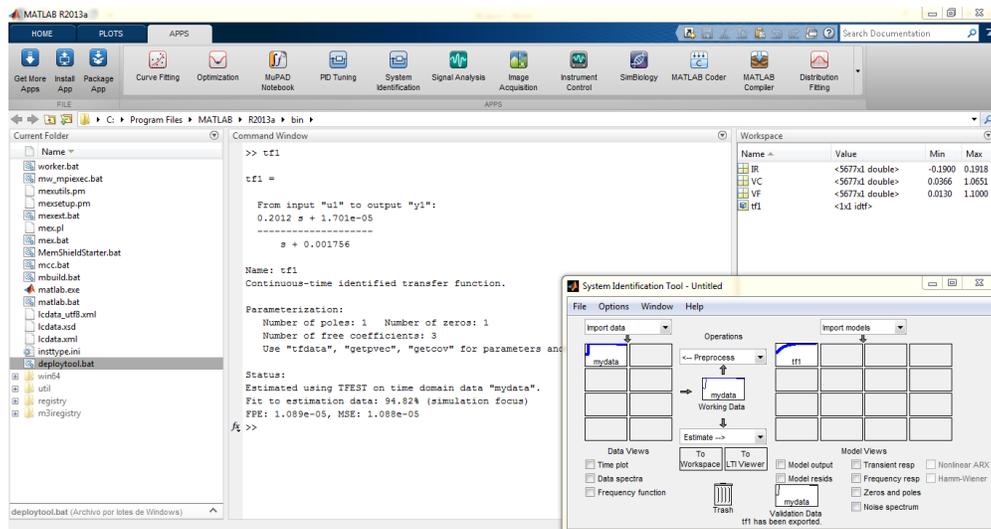


Figura 2.12. Obtención de la función de transferencia por **MATLAB®**.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de descarga programada hechas al módulo, la gráfica obtenida, así como los valores de intensidad eléctrica y de tiempo a los cuales se realiza cada una de las reconfiguraciones en la conexión de los supercondensadores; se muestran los valores de extracción de energía de cada supercondensador y el cálculo de sus valores de *ESR* y *EPR*.

3.1 RECONFIGURACIÓN E INCREMENTO DE TIEMPO

Los perfiles de voltaje obtenidos durante los ciclos de descarga programada, que se muestran en la Figura 3.1, son los correspondientes a las cinco rutinas de descarga con reconfiguración. Dichos perfiles fueron el resultado de la caracterización eléctrica realizada al módulo; los picos de incremento de voltaje observados, indican la ejecución de cada una de las reconfiguraciones propuestas.

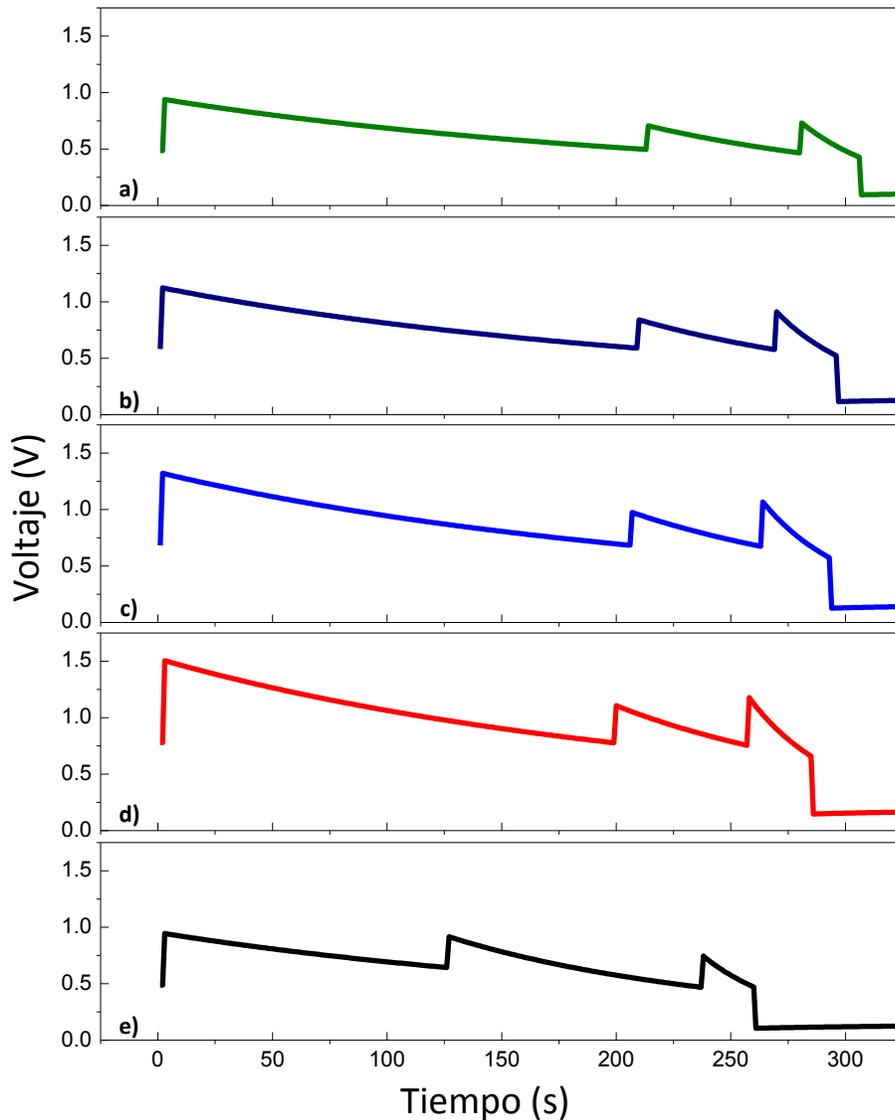


Figura 3.1. Perfiles de descarga programada de las rutinas de reconfiguración, *a)* con límite de voltaje 0.5 V, *b)* con límite de voltaje 0.6 V, *c)* con límite de voltaje 0.7 V, *d)* con límite de voltaje 0.8 V, *e)* con límite de voltaje variable.

A partir del comportamiento de cada rutina de descarga anteriormente descrito, se obtuvo el promedio del nivel de voltaje presente en cada supercondensador, así como del intervalo de tiempo en el cual se realiza cada reconfiguración, obteniendo los valores que se presentan en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5; así mismo, se muestra también el valor promedio de energía presente en cada dispositivo, así como del módulo completo, durante cada una de las reconfiguraciones. En la Tabla 3.1 se muestran los valores resultantes en la rutina de reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V, observando un incremento de 295 s respecto al tiempo de la descarga sin reconfiguración, representando esto un 25.7% más de tiempo extra con una potencia máxima de 110 mW.

Tabla 3.1. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V.

Configuración	Voltaje SC (V)		Energía SC (J)		Voltaje módulo (V)		Energía módulo (J)		Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Tiempo total (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1)	1.02	0.50	51.65	12.34	1.02	0.49	310.06	70.86	15,055	15,904	849
2)	0.49	0.26	12.23	3.37	0.94	0.50	66.11	18.49	15,905	16,115	210
3)	0.26	0.16	3.31	1.36	0.71	0.47	16.59	7.24	16,116	16,182	66
4)	0.16	0.11	1.28	0.60	0.73	0.50	4.45	2.12	16,183	16,200	17
Total de tiempo										1145	
Incremento de Tiempo										295	
% incremento										25.76	

La Tabla 3.2 muestra los valores correspondientes a la rutina de reconfiguración con límite de voltaje 0.6 V; observando un incremento de 287 s respecto al tiempo de la descarga sin reconfiguración, representando esto un 30.93 % más de tiempo adicional, con una potencia máxima de 150 mW.

Tabla 3.2. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.6 V.

Configuración	Voltaje SC (V)		Energía SC (J)		Voltaje módulo (V)		Energía módulo (J)		Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Tiempo Total (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1)	1.03	0.60	53.03	17.73	1.03	0.58	318.36	101.55	22,077	22,717	640
2)	0.59	0.31	17.53	4.84	1.12	0.59	94.79	26.12	22,718	22,925	207
3)	0.31	0.21	4.70	2.22	0.84	0.58	23.56	11.10	22,926	22,985	59
4)	0.20	0.13	1.97	0.86	0.91	0.60	6.92	3.03	22,986	23,005	19
Total de tiempo										928	
Incremento de Tiempo										287	
% incremento										30.93	

Los valores mostrados en la Tabla 3.3 corresponden a la rutina de reconfiguración con límite de voltaje 0.7 V, presentando un incremento de 281 s, respecto al tiempo de la descarga sin reconfiguración, teniendo una aportación adicional de 38.13% de tiempo, con una potencia máxima de 200 mW.

Tabla 3.3. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.7 V.

Configuración	Voltaje SC (V)		Energía SC (J)		Voltaje módulo (V)		Energía módulo (J)		Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Tiempo total (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1)	1.06	0.70	55.83	24.64	1.06	0.68	335.34	139.87	23,430	23,885	455
2)	0.70	0.36	24.21	6.49	1.32	0.68	131.00	35.08	23,886	24,090	204
3)	0.36	0.25	6.31	3.02	0.97	0.67	31.64	15.16	24,091	24,147	56
4)	0.23	0.15	2.70	1.17	1.07	0.70	9.50	4.10	24,148	24,167	19
Total de tiempo										737	
Incremento de Tiempo										281	
% incremento										38.13	

Los valores de la reconfiguración con límite de voltaje 0.8 V, se muestran en la Tabla 3.4 presentando incremento de 272 s, respecto al tiempo de una descarga sin reconfiguración, lo que representa un 49.10 % de tiempo adicional, y una potencia máxima de 260 mW.

Tabla 3.4. Incremento de tiempo, reconfiguración con límite de voltaje 0.8 V.

Configuración	Voltaje SC (V)		Energía SC (J)		Voltaje módulo (V)		Energía módulo (J)		Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Tiempo total (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1)	1.05	0.80	54.61	31.84	1.06	0.68	335.34	139.87	20,000	20,281	281
2)	0.79	0.41	31.54	8.41	1.32	0.68	131.00	35.08	20,282	20,478	196
3)	0.40	0.27	8.18	3.55	0.97	0.67	31.64	15.16	20,479	20,536	57
4)	0.26	0.18	3.32	1.56	1.07	0.70	9.50	4.10	20,537	20,554	17
Total de tiempo										554	
Incremento de Tiempo										272	
% incremento										49.10	

Mientras que los valores de la rutina de descarga con límite de reconfiguración a voltaje variable, se muestran en la Tabla 3.5 con un valor reportado de incremento de 253 s, respecto al tiempo de una descarga sin reconfiguración, representando un 22.06 % más de tiempo, y con una potencia máxima de 130 mW.

Tabla 3.5. Incremento de tiempo, reconfiguración con nivel de voltaje variable.

Configuración	Voltaje SC (V)		Energía SC (J)		Voltaje módulo (V)		Energía módulo (J)		Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Tiempo total (s)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1)	1.04	0.50	54.22	12.60	1.04	0.48	324.48	69.12	24,707	25,600	893
2)	0.50	0.34	12.37	5.75	0.94	0.64	66.27	30.72	25,601	25,724	123
3)	0.33	0.17	5.57	1.46	0.91	0.46	27.60	7.05	25,725	25,835	110
4)	0.16	0.11	1.31	0.61	0.74	0.50	4.56	2.08	25,836	25,854	18
Total de tiempo										1147	
Incremento de Tiempo										253	
% incremento										22.06	

Respecto a los niveles de voltaje a los cuales se realiza cada una de las reconfiguraciones entre los supercondensadores, se puede mencionar que en cada una de las rutinas de descarga programada, se presentó una variación no mayor al 0.1, respecto a los valores teóricos propuestos (ver Tabla 2.2), observándose que su valor, no es estadísticamente significativo. De acuerdo a lo reportado previamente por Yang *et al.*, [77] estas variaciones representan pérdidas, debidas mayormente a la diferencia entre las características ideales y las reales de los componentes empleados en los circuitos electrónicos, afectando directamente su nivel de eficiencia. Otra de las causas en la variación de voltaje, es el intervalo de error que existe en el factor de conversión del convertidor del *PIC18F2550*®, empleado, siendo este valor de aproximadamente $0.002 V$, según lo reportado por el fabricante [73].

En los supercondensadores, el nivel de voltaje de salida está directamente relacionado con el nivel de energía presente en cada dispositivo, por lo que se puede observar a partir de los niveles presentes de voltaje en cada supercondensador conforme se realizan las reconfiguraciones, que la energía extraída después de presentarse una caída de voltaje de celda del 50 %, es la energía residuo; la cual queda sin extraer durante las rutinas de descarga sin programación, en las cuales los ciclos de descarga son parciales.

A su vez, conforme se realizan las reconfiguraciones en las rutinas programadas, la energía disminuye haciendo que el dispositivo se descargue cada vez más rápido, además de deberse al hecho de que la extracción de energía en los supercondensadores demanda más caída de voltaje que en el caso de las baterías [23, 78].

El valor de voltaje máximo y el mínimo obtenidos en cada una de las reconfiguraciones varió en un intervalo entre el 50 % y un 53%, siendo este valor el intervalo de variación; valor que presentó un incremento constante en todas las rutinas de descarga; debiéndose al hecho de que en todas las rutinas de descarga programada el diseño de las reconfiguraciones no varió.

Este valor en el intervalo de variación fue obtenido con menor número de dispositivos, y con mayor número de reconfiguraciones solo durante la descarga, que el 50 % reportado por Uno *et al.*, [57] en una rutina de descarga en la cual, donde solo se realizan dos reconfiguraciones. Así como también fue mayor que el 20% reportado por Sugimoto *et al.*, [1] donde se registran el mismo número de reconfiguraciones durante la rutina de descarga, sin embargo, haciendo hace uso de un mayor número de dispositivos.

Respecto al incremento de tiempo de descarga obtenido mediante las rutinas de descarga programada, se obtuvieron valores de dentro de los intervalos de 253 s y 295 s, respecto a una rutina de descarga sin reconfiguración, representando estos valores entre un 22 % y un 49 % más de tiempo, de acuerdo al nivel de límite de voltaje de reconfiguración. Se observó que el incremento porcentual de tiempo de las rutinas programadas respecto a las rutinas sin reconfiguración, presentó un comportamiento progresivo, ya que entre más alto es el límite de voltaje de reconfiguración más grande es el incremento de tiempo, debiéndose esto, a que el tiempo de descarga original es más pequeño y por lo tanto el incremento más significativo.

De acuerdo al 56.9 % de incremento reportado por Sugimoto *et al.*, [1] el cual representa un tiempo de 94 min más respecto a una descarga sin reconfiguración, realizando las reconfiguraciones de los supercondensadores dentro de un intervalo de voltaje entre 80 V y 100 V. El valor en incremento porcentual de tiempo obtenido por Sugimoto *et al.*, es similar al obtenido, aun cuando en el presente trabajo los supercondensadores empleados en el módulo reconfigurable son diferentes, así como también las condiciones límite de reconfiguración y de la caracterización eléctrica en general.

3.2 EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

El voltaje inicial y el final presente en cada supercondensador durante todo el ciclo de carga/descarga, y su factor de extracción de energía en cada uno, en cada reconfiguración de descarga programada, se muestra en las Tablas 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. La Tabla 3.6 muestra un 98.83 % de promedio de extracción de energía en todos los supercondensadores durante la rutina de reconfiguración con límite de 0.5 V, representando esto 70.44 J más de energía obtenida con respecto a la extraída en una descarga sin reconfiguración.

Tabla 3.6. Reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V.

Supercondensador	Voltaje inicial (V1)	Voltaje final (V2)	Extracción de energía (%)	Energía extra (J)
SC1	1.02	0.10	99.05	11.57
SC2	1.02	0.12	98.69	11.78
SC3	1.02	0.11	98.84	11.72
SC4	1.02	0.11	98.73	11.78
SC5	1.02	0.11	98.84	11.79
SC6	1.02	0.11	98.82	11.80
Promedio			98.83	
Total Energía Extra				70.44

El 98.37 % de promedio de extracción de energía de todos los supercondensadores del módulo mostrado en la Tabla 3.7 corresponde al porcentaje obtenido durante la rutina de reconfiguración con límite 0.6 V, representando 101.22 J, adicionales de energía obtenida con respecto a la extraída en una descarga sin reconfiguración.

Tabla 3.7. Reconfiguración con límite de voltaje 0.6 V.

Supercondensador	Voltaje Inicial (V1)	Voltaje Final (V2)	Extracción de energía (%)	Energía Extra (J)
SC1	1.03	0.12	98.67	16.59
SC2	1.03	0.14	98.18	16.91
SC3	1.03	0.13	98.39	16.83
SC4	1.03	0.14	98.24	16.99
SC5	1.03	0.13	98.38	17.01
SC6	1.03	0.13	98.36	16.89
Promedio			98.37	
Total Energía Extra				101.22

En la Tabla 3.8 se muestra un promedio del 97.90% de extracción de energía de todos los supercondensadores, durante la rutina de reconfiguración con límite de 0.7 V, representando 140.79 J adicionales de energía obtenida con respecto a la extraída en una descarga sin reconfiguración.

Tabla 3.8. Reconfiguración con límite de voltaje 0.7 V

supercondensador	Voltaje inicial (V1)	Voltaje final (V2)	Extracción de energía (%)	Energía extra (J)
SC1	1.05	0.13	98.27	23.56
SC2	1.05	0.16	97.66	23.48
SC3	1.05	0.15	97.93	23.61
SC4	1.05	0.15	97.74	23.42
SC5	1.05	0.15	97.92	23.46
SC6	1.05	0.15	97.90	23.27
Promedio			97.90	
Total Energía Extra				140.79

Durante la rutina de reconfiguración con límite 0.8 se obtuvo un promedio de extracción del 97.13% obteniendo un total de 181.66 J adicionales de energía obtenida con respecto a la extraída en una descarga sin reconfiguración, como se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Reconfiguración con límite de voltaje 0.8 V

Supercondensador	Voltaje inicial (V1)	Voltaje final (V2)	Extracción de energía (%)	Energía extra (J)
SC1	1.04	0.16	97.63	29.80
SC2	1.04	0.18	96.81	30.32
SC3	1.04	0.17	97.19	30.53
SC4	1.04	0.18	96.91	30.38
SC5	1.04	0.17	97.16	30.28
SC6	1.04	0.17	97.11	30.35
Promedio			97.13	
Total Energía Extra				181.66

Por último, en la Tabla 3.10 se aprecia un promedio del 98.87% de extracción de energía de todos los supercondensadores, obteniendo un total de 71.90 J adicionales de energía obtenida con respecto a la extraída en una descarga sin reconfiguración.

Tabla 3.10. Reconfiguración con límite de voltaje variable.

Supercondensador	Voltaje inicial (V1)	Voltaje final (V2)	Extracción de energía (%)	Energía extra (J)
SC1	1.03	0.09	99.08	12.03
SC2	1.04	0.11	98.72	11.98
SC3	1.04	0.11	98.88	12.05
SC4	1.04	0.11	98.75	11.94
SC5	1.04	0.10	98.89	11.99
SC6	1.04	0.11	98.88	11.91
Promedio			98.87	
Total Energía Extra				71.90

Los valores de energía extra obtenida en cada rutina de reconfiguración indican que conforme se eleva el límite de las reconfiguraciones, el promedio de extracción de energía disminuye y la energía extra que puede ser obtenida aumenta, debido a que a mayor valor de voltaje en la reconfiguración, existe más energía por extraer en el supercondensador.

La variación en el factor de extracción de energía en cada supercondensador durante cada una de las rutinas de descarga tuvo una variación máxima de 0.2, siendo este valor no es significativo. Esta variación se presenta debido a las propiedades internas de cada supercondensador, ya que de acuerdo a lo reportado por Enhui *et al.*, [55] se indica que aunque todos los dispositivos presenten características iguales, su capacitancia ideal siempre será diferente, provocando que su voltaje de celda presente un intervalo de variación de -10 % hasta 10 %.

Otra de las causas de la variación del factor de extracción de energía, se debe a la *EPR* presente en cada supercondensador, ya que el valor de ésta resistencia representa las fugas que presenta cada dispositivo, siendo diferente en cada uno de ellos, debido a que se trata de una propiedad interna de cada supercondensador [37, 38].

Los promedios de extracción de energía obtenidos en todos los supercondensadores durante las cinco rutinas de descarga, variaron entre un 97.1 % y un 98.8 %, sobrepasando el máximo de 70 %, valor reportado como intervalo de una descarga parcial de un dispositivo de almacenamiento; por lo que, los valores presentados entran dentro del intervalo de descarga profunda.

Los ciclos profundos de descarga son un parámetro directamente relacionado al ciclo de vida útil de los diferentes dispositivos de almacenamiento; por ejemplo, en el caso de las baterías recargables a menor profundidad de descarga, menor será su tiempo de vida [79]. En el caso de los supercondensadores, aun cuando éstos pueden ser descargados casi en su totalidad a niveles altos de corriente un alto número de ciclos, una descarga parcial afectará a su nivel de eficiencia a largo plazo, por lo que una descarga más profunda asegurará un funcionamiento óptimo del dispositivo por más tiempo [80].

Con las rutinas de reconfiguración propuestas en este trabajo, solo en el ciclo de descarga, se obtuvo una extracción uniforme de energía en los supercondensadores que integran el módulo, permitiendo de esta manera que al incluir un circuito eléctrico de conmutación con menos componentes eléctricos, se obtuvieron cuatro reconfiguraciones y un incremento de 18 % en el factor de extracción de energía adicional a los valores reportados por Uno *et al.*, [52, 57] donde se menciona la utilización de un mayor número de contactos en el circuito eléctrico de conmutación, logrando así una rutina con solo dos reconfiguraciones en la carga y en la descarga, con un factor de extracción de energía del 80 %; Por otro lado, en otro de sus trabajos, se reporta un factor de extracción del 97 %, estando debajo de los valores obtenidos en el presente trabajo. Además, se obtuvo un incremento de un 15 % en el factor de extracción de energía, con una extracción uniforme en todos los supercondensadores, respecto al trabajo reportado por Sugimoto *et al.*, [1] en el cual se obtuvieron factores de extracción de energía del 93 %, no siendo uniforme en los ocho supercondensadores, durante una rutina de descarga de cuatro reconfiguraciones.

3.3 CÁLCULO DE LA ESR Y EPR

Los perfiles de corriente y de voltaje mostrados en la Figura 3.2, fueron obtenidos mediante la caracterización eléctrica del supercondensador *IC 107DCN2R7Q*, por medio de ciclos de carga/descarga.

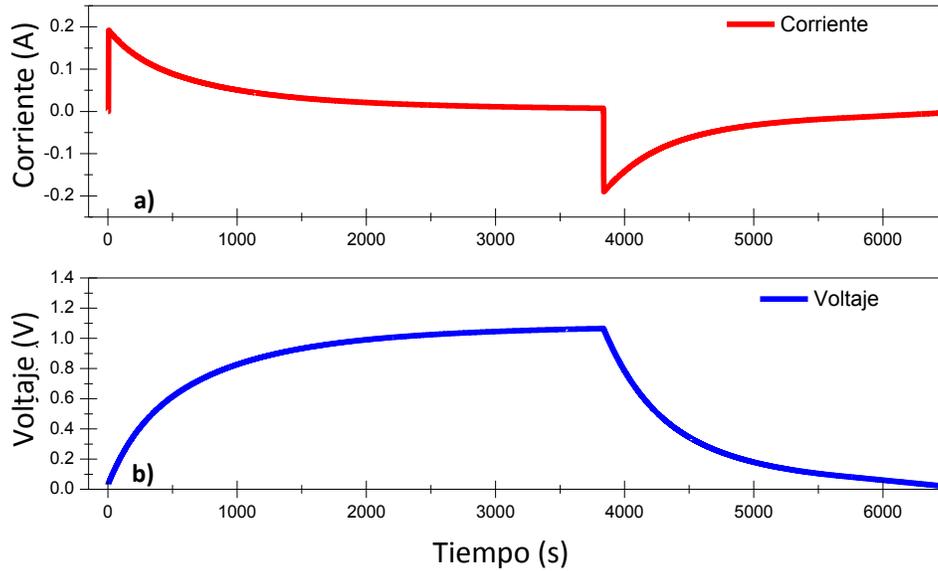


Figura 3.2. Perfiles de carga/descarga de la caracterización del supercondensador IC 107DCN2R7Q; a) corriente, b) voltaje.

Con los datos obtenidos, de la caracterización eléctrica del módulo, se estimaron las funciones de transferencia de ambos perfiles utilizando el software *MATLAB*®, buscando obtener una ecuación equivalente que a partir de un modelo matemático describa el comportamiento ideal de los perfiles de corriente y voltaje del supercondensador caracterizado. La función de transferencia obtenida, para el perfil de la corriente del supercondensador respecto a la fuente de alimentación I/V_F , está dada por la ecuación (3.1).

$$I/V_F = \frac{0.2012 S + 1.701^{-05}}{S + 0.001756} \quad (3.1)$$

Mientras que la función que se obtuvo para el perfil de voltaje del supercondensador respecto a la fuente de alimentación V/V_F , está dada por la ecuación (3.2).

$$V/V_F = \frac{0.001752}{S + 0.001848} \quad (3.2)$$

A partir de las funciones de transferencia obtenidas para los perfiles de descarga de corriente y voltaje del dispositivo caracterizado; se graficó la respuesta modelada para dichas ecuaciones, la cual debe de ser similar a los perfiles de corriente y voltaje como se

muestra en la Figura 3.2. Mediante la caracterización eléctrica, con el objetivo de comparar la desviación entre ambos. Dicha respuesta se muestra en la Figura 3.3

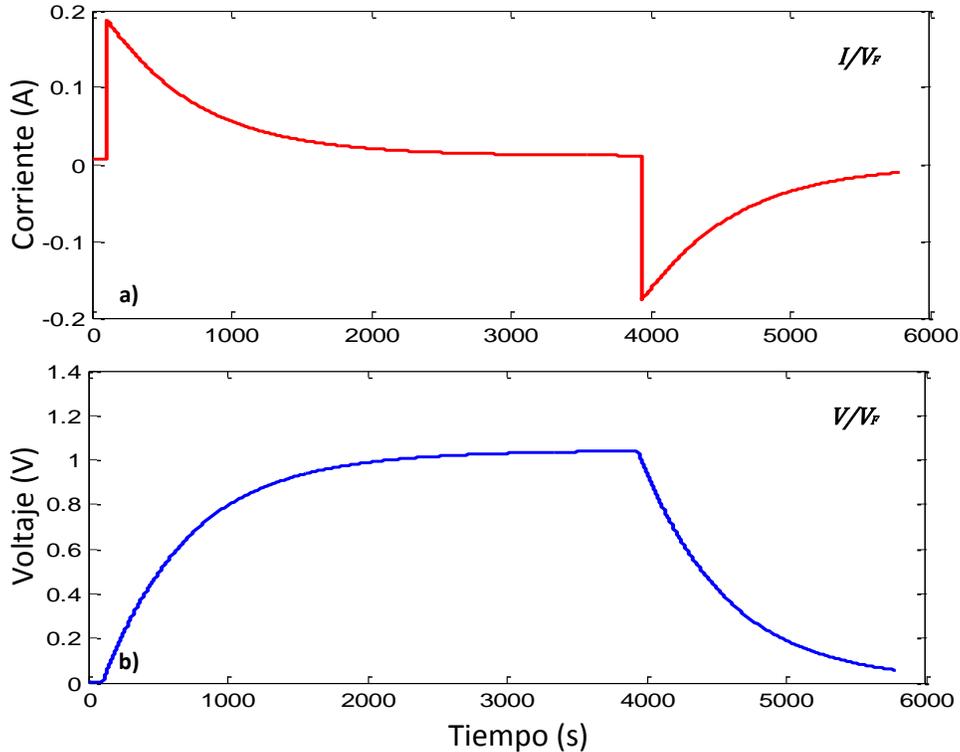


Figura 3.3. Perfiles de carga/descarga obtenidos por *MATLAB*®; a) corriente, b) voltaje.

Los perfiles de corriente y voltaje de las funciones de transferencia presentan el mismo comportamiento que los obtenidos por medio de la caracterización eléctrica, lo que indica que las funciones de transferencia son correctas.

Ambas funciones son igualadas con las ecuaciones 1.20 y 1.21, respectivamente, con la finalidad de despejar los valores desconocidos y obtener el valor de la *ESR* y la *EPR*. El valor obtenido de *ESR* fue de 0.27 mΩ, estando dentro del intervalo de los valores reportados por el fabricante alrededor de los 0.28 mΩ [75]. Su valor dentro del intervalo de los mΩ representan la capacidad del dispositivo de entregar elevada densidad de potencia y por consiguiente presentar una mayor eficiencia, ya que este parámetro representa las pérdidas óhmicas generadas por el electrodo, el electrolito y la resistencia de contacto entre

ellos, los valores altos representan pérdidas y aumento de la temperatura interna del dispositivo, [38, 81, 82].

Por otro lado, el valor obtenido de *EPR* fue de 118.28Ω , siendo este valor mayor que el de la *ESR*, mas sin embargo, no estando dentro de los intervalos reportados de $K\Omega$. Esta resistencia está asociada a las fugas de energía que presenta el supercondensador cuando se encuentra en estado de reposo. La obtención de un valor bajo respecto al reportado, indica que el dispositivo está presentando pérdidas de energía y que su nivel de funcionamiento ya dejó de ser eficiente.

En la mayoría de circuitos eléctricos equivalentes referentes a los supercondensadores reportados, la obtención de *EPR* es despreciado y considerando su valor representativo solo en modelos con descarga lenta donde no se requiere de una alta precisión; sin embargo, aunque su valor es despreciado por otros autores, el cálculo de ambas resistencias en conjunto, es el mejor procedimiento que se puede emplear para saber el nivel de eficiencia del supercondensador a lo largo de su vida útil, ya que el análisis de los valores obtenidos en estas dos resistencias es el mejor indicador de fallo en el dispositivo [36, 37, 38].

CONCLUSIONES

- Los perfiles de descarga de cada rutina programada, muestran que las reconfiguraciones planteadas en todos los casos, incrementan el tiempo de descarga respecto a una descarga no programada.
- El incremento de tiempo varió entre un mínimo de 253 s, representando un 22 % para la rutina con reconfiguración con límite de voltaje variable, y un máximo de 287 s siendo esto un 25.7 % más de tiempo para la rutina reconfiguración con límite de voltaje 0.5 V.
- El mayor porcentaje de incremento de tiempo se obtuvo en la rutina de descarga de 0.8 V con un tiempo de 272 s, representando un 49.1 % más de tiempo respecto a una descarga no programada; observándose con esto que, a mayor nivel de reconfiguración, es menor el tiempo de descarga y por lo tanto más significativo el incremento logrado en la reconfiguración.
- Los valores presentes en el voltaje de cada supercondensador durante cada reconfiguración, indican que la energía extra obtenida, es la energía residual no aprovechada durante los ciclos parciales de carga/descarga.
- Las variaciones en los valores de los supercondensadores de voltaje teórico respecto al real presentes en cada reconfiguración, se deben a pérdidas en los circuitos eléctricos, a la variación en los valores reales e ideales de los componentes y al factor de conversión del convertidor analógico/digital del microcontrolador.
- En todas las rutinas, la reconfiguración permitió una extracción uniforme de energía en cada dispositivo. Así como los promedios obtenidos superiores al 70 %, indican que los ciclos de descarga en los supercondensadores, dejaron de ser parciales para volverse profundos.
- El promedio máximo de extracción de energía fue de 98.8 % en la rutina de reconfiguración con límite de voltaje variable, mientras que el menor promedio de

extracción de energía fue de 97.1 % obtenido en la rutina reconfiguración con límite de 0.8 V. Por lo que se observó que este factor es dependiente del nivel de voltaje de reconfiguración; siendo menor el porcentaje de extracción a mayor nivel de voltaje.

- El valor total de la energía extraída se incrementó en las rutinas de con mayor nivel de voltaje de reconfiguración; indicando que a voltajes menores de reconfiguración se tiene menos energía disponible por extraer; variando los valores obtenidos dentro del intervalo entre un 70.44 J y un 181.66 J.
- El valor de la *ESR* obtenido mediante las ecuaciones propuestas fue de 0.27 m Ω siendo el valor similar al reportado por la hoja de datos del fabricante; mientras que el valor obtenido para la *EPR*, fue de 118 Ω ; es te último valor indica que al no estar dentro del intervalo de los K Ω , las fugas de energía presentes en el supercondensador caracterizado son significativas y por consiguiente el dispositivo no se encuentra en su estado de funcionamiento más óptimo. Los valores obtenidos demuestran que las ecuaciones propuestas son válidas para la obtención de dichos parámetros.
- La reconfiguración en módulos de supercondensadores resulta ser una buena opción para incrementar el tiempo de entrega de energía y obtener un mayor porcentaje de extracción de energía en cada dispositivo, obteniendo ciclos más profundos de carga/descarga respecto a la descarga no programada.

PERSPECTIVAS DE TRABAJO

- Ensamblar los seis supercondensadores desarrollados en el laboratorio, para comprobar la descarga programada del módulo con estos dispositivos.
- Con los supercondensadores ensamblados en el laboratorio, realizar la caracterización eléctrica del módulo, para obtener las curvas de carga, descarga y de corriente para obtener los valores de *ESR* y *EPR*, las cuales están involucradas en todos los supercondensadores ensamblados y del módulo completo.
- Evaluación del ciclo de vida de los supercondensadores al someterlos a ciclos profundos de carga/descarga.
- Evaluación de la eficiencia del módulo completo considerando el consumo energético de todo el sistema de control, ya que al manejar valores de energía pequeños en este trabajo no se tomó en cuenta dicho factor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. S. Sugimoto; S. Ogawa; H. Katsukawa; H. Mizutani; M. Okamura, A study of series-parallel changeover circuit of a capacitor bank for an energy storage system utilizing electric double-layer capacitors, *Electr Eng* 145, 33-42, 2003
2. G. Coppez; S. Chowdhury; S. P. Chowdhury. *The importance of energy storage in Renewable Power Generation: A review.* in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International.* 2010.1-5.
3. J. M. Carrasco; L. G. Franquelo; J. T. Bialasiewicz; E. Galvan; R. C. P. Guisado; M. A. M. Prats; J. I. Leon; N. Moreno-Alfonso, Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 53, 1002-1016, 2006
4. X. Li; M. Zhang. *Research on high-precision survey of supercapacitor ESR.* in *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on.* 2011.1627-1630.
5. S. J. Kazempour; M. P. Moghaddam; M. R. Haghifam; G. R. Yousefi, Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and traditional technologies, *Renew Energ* 34, 2630-2639, 2009
6. N. S. Chouhan; M. Ferdowsi. *Review of energy storage systems.* in *North American Power Symposium NAPS, 2009.* 2009.1-5.
7. J. Baker, New technology and possible advances in energy storage, *Energy Policy* 36, 4368-4373, 2008
8. H. Chen; T. N. Cong; W. Yang; C. Tan; Y. Li; Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Prog Nat Sci* 19, 291-312, 2009
9. C. Klumpner; G. Asher; G. Z. Chen. *Selecting the power electronic interface for a supercapattery based energy storage system.* in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest.* 2009.1-7.
10. B. R. Alamri; A. R. Alamri. *Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy.* in *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on.* 2009.1-5.
11. N.-K. C. Nair; N. Garimella, Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration, *Energ Buildings* 42, 2124-2130, 2010

12. S. Vazquez; S. Lukic; E. Galvan; L. G. Franquelo; J. M. Carrasco; J. I. Leon. *Recent advances on Energy Storage Systems*. in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2011.4636-4640.
13. C. C. B. Martha de Souza; D. Corrêa de Oliveira; J. A. S. Tenório, Characterization of used alkaline batteries powder and analysis of zinc recovery by acid leaching, *J. Power Sources* 103, 120-126, 2001
14. M. W. Ellis; M. R. Von Spakovsky; D. J. Nelson, Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century, *Proceedings of the IEEE* 89, 1808-1818, 2001
15. G. Merle; M. Wessling; K. Nijmeijer, Anion exchange membranes for alkaline fuel cells: A review, *J. Membr. Sci.* 377, 1-35, 2011
16. Y. Wang; K. S. Chen; J. Mishler; S. C. Cho; X. C. Adroher, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research, *Applied Energy* 88, 981-1007, 2011
17. P. Sharma; T. S. Bhatti, A review on electrochemical double-layer capacitors, *Energy Convers Manage* 51, 2901-2912, 2010
18. A. K. Shukla; S. Sampath; K. Vijayamohanan, Electrochemical supercapacitors: Energy storage beyond batteries, *Curr. Sci.* 6, 2000
19. A. Evans; V. Strezov; T. J. Evans, Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration, *Renew Sust Energ Rev* 16, 4141-4147, 2012
20. H. Pan; J. Li; Y. Feng, Carbon Nanotubes for Supercapacitor, *Nanoscale Res Lett* 5, 654-668, 2010
21. P. P. Barker. *Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications*. in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*. 2002.316-320.
22. P. Simon; Y. Gogotsi, Materials for electrochemical capacitors, *Nat Mater* 7, 1476-1122, 2008
23. V. A. Shah; J. A. Joshi; R. Maheshwari; R. Roy, Review of Ultracapacitor Technology and its Applications, *NPSC* 2008
24. M. D. Stoller; S. Park; Y. Zhu; J. An; R. S. Ruoff*, Graphene-Based Ultracapacitors, *Nano Lett* 6, 2008

25. A. Chandra, Supercapacitors: An Alternate Technology for Energy Storage, *Natl Acad Sci* 79–90, 2012
26. S.-y. Zhou; X.-h. Li; Z.-x. Wang; H.-j. Guo; W.-j. Peng, Effect of activated carbon and electrolyte on properties of supercapacitor, *T Nonferr Metal Soc* 17, 1328-1333, 2007
27. M. M. Bruno; G. Cotella; C. Miras; C. Barbero, *Aplicaciones de Materiales Nanoestructurados en Supercapacitores Electroquímicos*. 2003: Argentina.
28. L. Zubizarreta; A. Arenillas; J. Pis; J.-P. Pirard; N. Job, Studying chemical activation in carbon xerogels, *Mater Sci* 44, 6583-6590, 2009
29. J. Cheng; G.-P. Cao; Y.-S. Yang, Characterization of sol–gel-derived NiOx xerogels as supercapacitors, *Power Sour* 159, 734-741, 2006
30. Y. Gogotsi, *Carbons for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL., 2010,
31. M. T. Brumbach; T. M. Alam; R. H. Nilson; P. G. Kotula; B. B. McKenzie; R. G. Tissot; B. C. Bunker, Ruthenium oxide–niobium hydroxide composites for pseudocapacitor electrodes, *Mater Chem Phys* 124, 359-370, 2010
32. Y.-T. Wang; A.-H. Lu; W.-C. Li, Mesoporous manganese dioxide prepared under acidic conditions as high performance electrode material for hybrid supercapacitors, *Micropor Mesopor Mat* 153, 247-253, 2012
33. I. Galkin; A. Stepanov; J. Laugis, Outlook of usage of supercapacitors in uninterruptible power supplies, *IEEE Int. Baltic Electron. Conf.* 4, 2006
34. P. Mars. *A survey of supercapacitors, their applications, power design with supercapacitors, and future directions*. in *IEEE Technologies Beyond 2020 (TTM)*, 2011 2011.1-2.
35. X. Li; M. Zhang. *Research on high-precision survey of supercapacitor ESR*. in *ICECC, 2011* 2011.1627-1630.
36. A. A. Gazwi; S. B. Tennakoon. *Modelling of Super Capacitor Modules and Parameters Extraction*. in *UPEC, Proceedings of 2011 46th International*. 2011.1-6.
37. R. L. Spyker; R. M. Nelms, Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 36, 829-836, 2000
38. Y. Y. Yao; D. L. Zhang; D. G. Xu. *A Study of Supercapacitor Parameters and Characteristics*. in *PST, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*. 2006.1-4.

39. A. Burke, R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors, *Electrochim Acta* 53, 1083-1091, 2007
40. R. Frasca; F. Andreozzi; B. Cascone; D. Della Valle; L. Fratelli; G. Giannini; V. Improta; C. Nappo; M. Porzio. *Supercapacitors system for balancing power-supply gap in railway electric vehicles*. in *SPEEDAM, 2012 International Symposium on*. 2012.754-758.
41. P. S. Fernández; A. Arenillas; E. G. Calvo; J. A. Menéndez; M. E. Martins, Carbon xerogels as electrochemical supercapacitors. Relation between impedance physicochemical parameters and electrochemical behaviour, *Int J Hydrogen Energy* 37, 10249-10255, 2012
42. H. Liu; M. Chengxiong; L. Jiming; W. Dan, Electronic power transformer with supercapacitors storage energy system, *Electr Pow Syst Res* 9, 2009
43. P. Kulsangcharoen; C. Klumpner; M. Rashed; G. Asher. *A new duty cycle based efficiency estimation method for a supercapacitor stack under constant power operation*. in *PEMD 2010, 5th IET International Conference on*. 2010.1-6.
44. A. Lahyani; P. Venet; A. Guermazi; A. Troudi. *Utilization of supercapacitors to reduce lead acid battery stresses in UPS*. in *RENET, 2012 First International Conference on*. 2012.90-100.
45. C. Lungoci. *Energy management in hybrid systems for automotive*. in *ISEEE, 2010 3rd International Symposium on*. 2010.124-128.
46. M. Chami; M. Y. Ayad; A. Djerdir; A. Miraoui. *Control study of fuel cell and supercapacitors system using Hybrid Dynamic Nets*. in *ISIE 2008, IEEE International Symposium on*. 2008.1622-1626.
47. F. Ciccarelli; D. Iannuzzi; P. Tricoli, Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand, *Transport Res C-Emer* 24, 36-49, 2012
48. V. Musolino; A. Pievatolo; E. Tironi, A statistical approach to electrical storage sizing with application to the recovery of braking energy, *Energy* 36, 6697-6704, 2011
49. F. Rafik; H. Gualous; R. Gallay; A. Crausaz; A. Berthon, Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, *Elsevier* 7, 2006
50. A. M. Puscas; M. C. Carp; C. Z. Kertesz; P. N. Borza; G. Coquery. *Thermal and voltage testing and characterization of supercapacitors and batteries*. in *OPTIM, 2010 12th International Conference on*. 2010.125-132.

51. P. K. Peter; P. Sharma; V. Agarwal. *Switched capacitor DC-DC converter based current equalization scheme for maximum power extraction from partially shaded PV modules without bypass diodes*. in *PVSC, 2012 38th IEEE*. 2012.001422-001427.
52. M. Uno; K. Tanaka. *Single-switch single-inductor equalization charger using a voltage multiplier for series-connected energy storage modules*. in *ICPE & ECCE, 2011 IEEE 8th International Conference on*. 2011.2985-2989.
53. A. Hijazi; P. Kreczanik; E. Bideaux; P. Venet; G. Clerc; M. Di Loreto, *Thermal Network Model of Supercapacitors Stack*, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 59, 979-987, 2012
54. D. Linzen; S. Buller; E. Karden; R. W. De Doncker, *Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems*, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 41, 1135-1141, 2005
55. E. Zhang; Z. Qi; T. Wei. *Research on combination of series and parallel with supercapacitor module*. in *PEDG, 2010 2nd IEEE International Symposium on*. 2010.685-690.
56. P. Srithorn; M. Aten; R. Parashar. *Series Connection of Supercapacitor Modules for Energy Storage*. in *PEMD, 2006. The 3rd IET International Conference on*. 2006.354-360.
57. M. Uno, *Series-Parallel Reconfiguration Technique for Supercapacitor Energy Storage Systems*, *ISAS 2009*
58. M. Uno; H. Toyota. *Equalization technique utilizing series-parallel connected supercapacitors for energy storage system*. in *Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on*. 2008.893-897.
59. I. Gamry Instruments, *Testing Electrochemical Capacitors Part 2 - Cyclic Charge Discharge and stacks*. 2012, Gamry Instruments, Inc.;; Warminster PA. p. 6.
60. S. Wolf; R. F. M. Smith, *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*, 1992, 583
61. A. B. Cultura; Z. M. Salameh. *Performance evaluation of a supercapacitor module for energy storage applications*. in *IEEE, PESGM - CDEE in the 21st Century, 2008* 2008.1-7.
62. R. L. Boylestad, *Introducción al Análisis de Circuitos*, Pearson Educación, 2004, 390-403

63. D. U. Campos Delgado, Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD., *Facultad de Ciencias (UASLP)* 1-9, 2001
64. Salas Castro Pablo; Campos-Cantón I. ; J. R. J. Jimmy, Convertidores CD-CD, *Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica* 83-93, 2005
65. E. R. da Silva; Y. Murai; T. A. Lipo; L. P. De Oliveira; C. B. Jacobina. *Pulsed DC-link current converters-a review*. in *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE*. 1997.1406-1413.
66. Y. Tang; G. Wu. *Design of DC-DC Converter of Single-Transistor Positive Buck Based on MC34063A*. in *IFITA, 2010 International Forum on*. 2010.300-303.
67. MOTOROLA, *DC-to-DC Converter Control Circuits*, I. Motorola, Editor. 1996.
68. S. Wolf; R. F.M. Smith, *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*. 1992, Pearson Educación.
69. F. Semiconductor, *KA317/LM317*, F. S. CORPORATION, Editor. 2002.
70. F. Villalobos Piña; H. Rodríguez Marmolejo; J. Molina Contreras; R. Trejo Vázquez, Boot Loader para Microcontroladores PIC serie 18, *Conciencia Tecnológica* 32, 2006
71. Emilliano; C. K. Chakrabarty; A. B. A. Ghani; A. K. Ramasamy. *Online partial discharge counting system using microcontroller PIC 16F877A and FPGA technology*. in *SCOReD, 2010 IEEE Student Conference on*. 2010.314-319.
72. W. Hongmin; j. Zhu; N. Xufei; L. Dandan. *Design of PIC microcontroller-based high-capacity multi-channel data acquisition module*. in *MIC, 2012 International Conference on*. 2012.685-688.
73. Microchip, *PIC18F2455/2550/4455/4550*, M. T. Inc., Editor. 2009.
74. S. H. E. INC, TDS-1202L, 1998
75. I. Illinois Capacitor, DNC Supercapacitors, 2008
76. J. Gonzalez Ocampo, Dinamica y control de procesos, *Universidad Nacional de Colombia* 234, 1996
77. Y. Liu; Y. Hu; J. Han; J. Wen; K. Wu. *Research on quality tracing based on data package of electronic components*. in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on*. 2013.1556-1559.

78. M. E. Ortúzar; R. E. Carmi; J. W. Dixon; L. Morán, Voltage-source active power filter based on multilevel converter and ultracapacitor DC link., *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53, 477-485., 2006
79. J. B. Olson. *Characteristics of an advanced lead-acid spiral wound deep cycle battery*. in *Proceedings of the 31st Intersociety*. 1996.1153-1158.
80. L. Rengui; Z. Chunbo; T. Likun; W. Qi, Super-Capacitor Stacks Management System With Dynamic Equalization Techniques, *Magnetics, IEEE Transactions on* 43, 254-258, 2007
81. A. M. R. Amaral; A. J. M. Cardoso. *Use of ESR to predict failure of output filtering capacitors in boost converters*. in *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2004.1309-1314.
82. Cheng Zhang Yi; W. Li; Shen Xiaojun; L. Haiquan, Study of Supercapacitor in the Application of Power Electronics, *School of Electronics and Information* 508-517, 2006

APÉNDICE A

El desarrollo de las ecuaciones de intensidad de corriente y de voltaje del supercondensador, ambas respecto a la fuente de alimentación se muestran a continuación.

La ecuación que representa la corriente del supercondensador respecto a la fuente de alimentación I/V_F se obtuvo de simplificar la siguiente relación.

$$I = \frac{V_F}{R \cdot ESR \cdot \left(\frac{EPR \cdot \frac{1}{C_S}}{EPR + \frac{1}{C_S}} \right)}$$

$$I = \frac{V_F}{R \cdot ESR + \left(\frac{\frac{EPR}{C_S}}{\frac{EPR C_S + 1}{C_S}} \right)}$$

$$I = \frac{V_F}{R \cdot ESR + \left(\frac{EPR}{EPR \cdot C_S + 1} \right)}$$

$$\frac{I}{V_F} = \frac{1}{\left(\frac{(R + ESR)(EPR C_S + 1) + EPR}{EPR \cdot C_S + 1} \right)}$$

$$\frac{I}{V_F} = \frac{EPR C_S + 1}{(R + ESR)(EPR \cdot C_S + 1) + EPR}$$

$$\frac{I}{V_F} = \frac{EPR C_S + 1}{(R + ESR)(EPR \cdot C_S) + R + ESR + EPR}$$

$$I = \frac{(EPR C_S + 1) V_F}{(R + ESR)(EPR \cdot C_S) + R + ESR + EPR}$$

$$\frac{I}{V_F} = \frac{\frac{S}{R + ESR} + \frac{1}{(R + ESR)EPR \cdot C}}{S + \frac{(R + ESR + EPR)}{(R + ESR)EPR \cdot C}}$$

La ecuación que representa el voltaje en el supercondensador respecto a la fuente de alimentación V_C/V_F se obtuvo de simplificar la siguiente relación.

$$V_C = \left(\frac{(ESR)(EPR C_s + 1) + EPR}{(EPR C_s + 1)} \right) \left(\frac{(EPR C_s + 1)V_F}{(R + ESR)(EPR \cdot C_s) + R + ESR + EPR} \right)$$

$$V_C = \left(\frac{((ESR)(EPR C_s + 1) + EPR) V_F}{(R + ESR)(EPR \cdot C_s) + R + ESR + EPR} \right)$$

APÉNDICE B

El código de programación desarrollado para la reconfiguración de las conexiones entre los seis supercondensadores del módulo se presenta a continuación.

```
// Microcontrolador usado.
#include <18F2550.h>

// Elegimos la configuracion de los módulos internos del PIC.
#fuses
HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL2,CPUDIV1,VREGEN,M
CLR,NOPBADEN

// Declaramos el número de bits que utilizara el adc.
#device ADC=10

// Declaramos la frecuencia del PIC para el cálculo de los retardos
#use delay(clock=48000000)

// Si NO está usando el HID bootloader en el PIC es IMPORTANTE que se comente
#include <microchip_bootloader.h>

// Conf. De la Ubic. Del LCD En este caso Puerto B del pic.
#define LCD_DATA_PORT getenv("SFR:PORTB")

// Biblioteca de funciones del LCD
#include <lcd.c>

// Variable y constantes

enum CONFIGURACIONES{
    CARGA,
    PARALELO_6,
    PARALELO_3_SERIE_2,
    PARALELO_2_SERIE_3,
    SERIE_6
} Estado;

char Nombre[5][10]={"Carga","6P","3P-2S","2P-3S","6S"};

int16 adc0,adc4;
float volSC,volMD;

// Subrutinas
```

```

void Lectura_Adcs(void) {

    // Lectura del adc0
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    adc0 = read_adc();
    volSC = (float) 5*adc0/1023;

    // Lectura del adc4
    set_adc_channel(4);
    delay_us(10);
    adc4 = read_adc();
    volMD = (float) 5*adc4/1023;

}

void Configuracion(Enum CONFIGURACIONES Estado) {

    switch (Estado) {

        case CARGA:
            output_bit(PIN_C0,1);
            output_bit(PIN_C1,1);
            output_bit(PIN_C2,1);
            output_bit(PIN_C6,1);
            output_bit(PIN_C7,1);
            break;

        case PARALELO_6:
            output_bit(PIN_C0,1);
            output_bit(PIN_C1,1);
            output_bit(PIN_C2,1);
            output_bit(PIN_C6,1);
            output_bit(PIN_C7,1);
            break;

        case PARALELO_3_SERIE_2:
            output_bit(PIN_C0,1);
            output_bit(PIN_C1,0);
            output_bit(PIN_C2,0);
            output_bit(PIN_C6,1);
            output_bit(PIN_C7,0);
            break;

        case PARALELO_2_SERIE_3:
            output_bit(PIN_C0,0);
            output_bit(PIN_C1,0);
            output_bit(PIN_C2,1);
            output_bit(PIN_C6,0);
    }
}

```

```

        output_bit(PIN_C7,0);
        break;

    case SERIE_6:
        output_bit(PIN_C0,0);
        output_bit(PIN_C1,0);
        output_bit(PIN_C2,0);
        output_bit(PIN_C6,0);
        output_bit(PIN_C7,0);
        break;
    }
}

// Inicio del programa principal.

void main(void) {

// Inicialización de periféricos LCD, ADC.

//LCD
lcd_init();

//ADC
setup_adc_ports(AN0_TO_AN4);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

// Establecemos el estado inicial
Estado=CARGA;

// Inicia el bucle infinito.
while (TRUE) {

    // Actualiza las lecturas de adc0,adc4,vol0,vol4.
    Lectura_Adcs();

    // Muestra el estado actual
    printf(lcd_putc, "\fMOD:%1.2fV %s*\n SC:%1.2fV",volMD,Nombre[Estado],volSC);
    delay_ms(200);

    switch (Estado) {

        case CARGA:
            if (volSC>=1.00) {
                Estado=PARALELO_6;
            }
            else {
                Configuracion(CARGA);
            }
        }
    }
}

```

```
    }  
    break;  
  
    case PARALELO_6:  
        if (volSC<=0.500) {  
            Estado=PARALELO_3_SERIE_2;  
        }  
        else {  
            Configuracion(PARALELO_6);  
        }  
        break;  
  
    case PARALELO_3_SERIE_2:  
        if (volSC<=0.333) {  
            Estado=PARALELO_2_SERIE_3;  
        }  
        else {  
            Configuracion(PARALELO_3_SERIE_2);  
        }  
        break;  
  
    case PARALELO_2_SERIE_3:  
        if (volSC<=0.166) {  
            Estado=SERIE_6;  
        }  
        else {  
            Configuracion(PARALELO_2_SERIE_3);  
        }  
        break;  
  
    case SERIE_6:  
        if (volSC<=0.034) {  
            Estado=CARGA;  
        }  
        else {  
            Configuracion(SERIE_6);  
        }  
        break;  
    }  
}  
}
```

APÉNDICE C

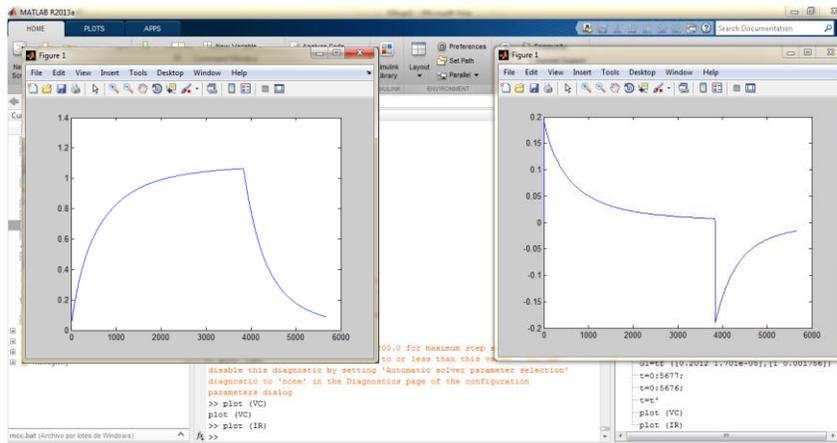
El procedimiento empleado para la obtención de los valores de ESR y EPR por medio de $MATLAB$ ® se presenta a continuación.

- Se realiza la caracterización eléctrica de un supercondensador por medio de ciclos de carga/descarga con adquisición de datos durante cada segundo, para obtener los perfiles de voltaje (V) y de corriente (I) del dispositivo.
- Los valores de V , I , así como de la fuente de alimentación (V_F) durante todo el ciclo de carga y descarga, se importan a $MATLAB$ ®, como *Column vector* como se muestra en la figura referente al Apéndice C.1. Es importante que las columnas de los tres parámetros contengan el mismo número de datos.

	VC	IR	VF
1	VC	IR	VF
2	0.0368	-2.0588e-05	0.0363
3	0.0366	-2.0615e-05	0.0365
4	0.0366	-2.0668e-05	0.0365
5	0.0366	-2.0598e-05	0.0363
6	0.0413	0.1918	0.0428
7	0.0434	0.1915	0.0433
8	0.0455	0.1911	0.0437
9	0.0476	0.1907	0.0448
10	0.0497	0.1903	0.0444
11	0.0518	0.1900	0.0447
12	0.0539	0.1896	0.0449
13	0.0560	0.1892	0.0452
14	0.0580	0.1888	0.0454
15	0.0601	0.1884	0.0456
16	0.0621	0.1880	0.0458
17	0.0642	0.1876	0.0459
18	0.0662	0.1872	0.0462
19	0.0682	0.1868	0.0465
20	0.0702	0.1863	0.0466
21	0.0722	0.1862	0.0472
22	0.0742	0.1858	0.0475
23	0.0762	0.1854	0.0478

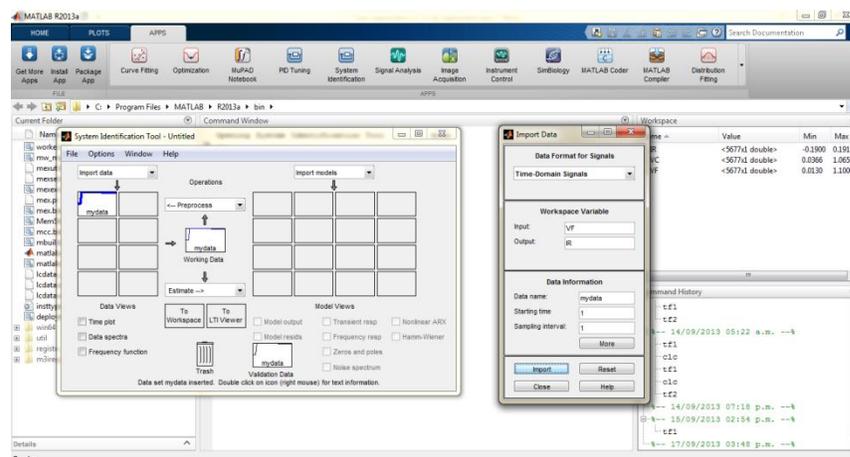
Apéndice C.1. Exportar datos desde hoja de cálculo.

- Se grafican los perfiles de corriente y de voltaje correspondientes al ciclo de carga/descarga del supercondensador, con la función $plot(V)$ y $plot(I)$ para comprobar que los datos importados son correctos. como se muestra en la figura referente al Apéndice C.2



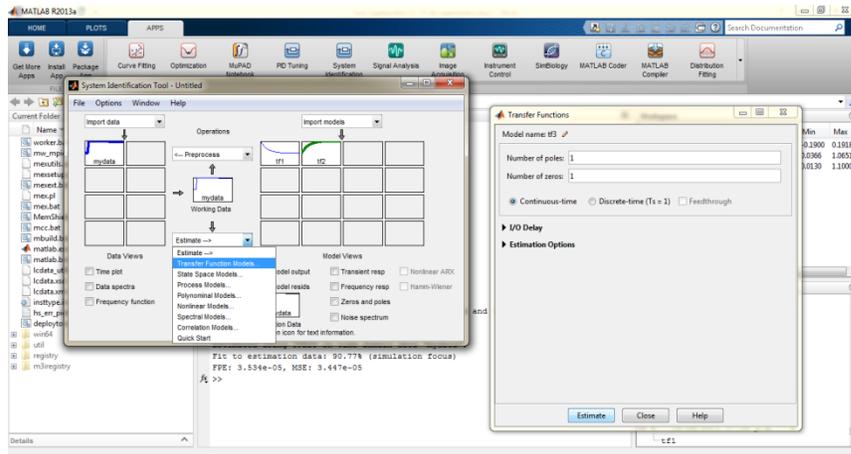
Apéndice C.2. Perfiles de corriente y de voltaje del supercondensador.

- En el menú *APPS/System identification/import data*. Se establece V_F como variable de entrada (Constante), mientras I como variable de salida (Variable) para obtener la función de transferencia correspondiente a I/V_F ; mientras que para obtener la función correspondiente a V/V_F se establece V como variable de salida y V_F como variable de entrada. Como se muestra en la figura correspondiente al Apéndice C.3.



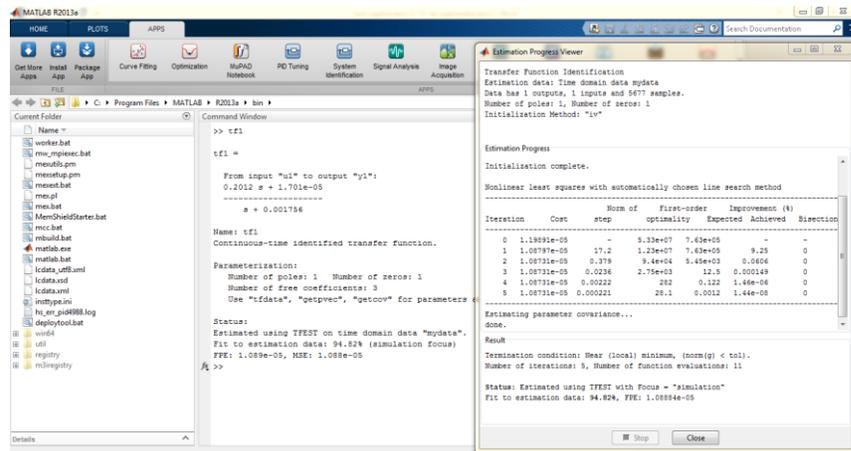
Apéndice C.3. Variables de entrada y salida

- Se elige la función estimación de *Función de transferencia* y se establecen los parámetros de la misma, el número de polos y de ceros; en este caso al tomar en cuenta las ecuaciones 1.20 y 1.21 en ambas funciones estos valores fueron uno, como se muestra en la figura correspondiente al Apéndice C.4.



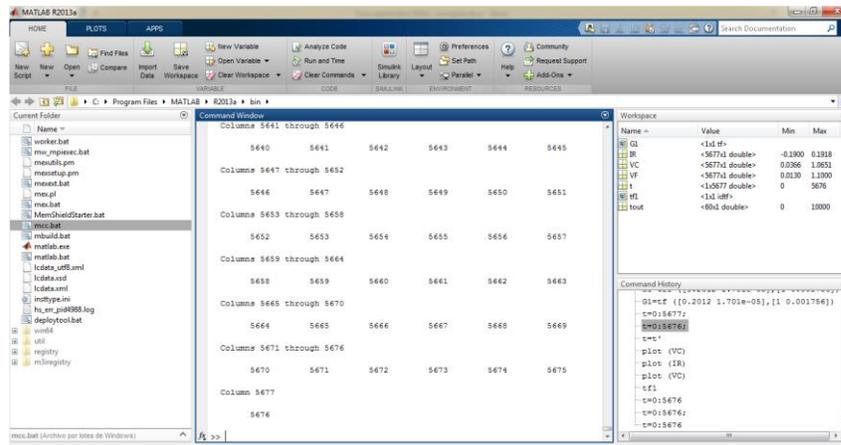
Apéndice C.4. Establecimiento de parámetros.

- El software realiza la estimación y arroja ambas funciones y les asigna un nombre, como se muestra la figura correspondiente al Apéndice C.5.



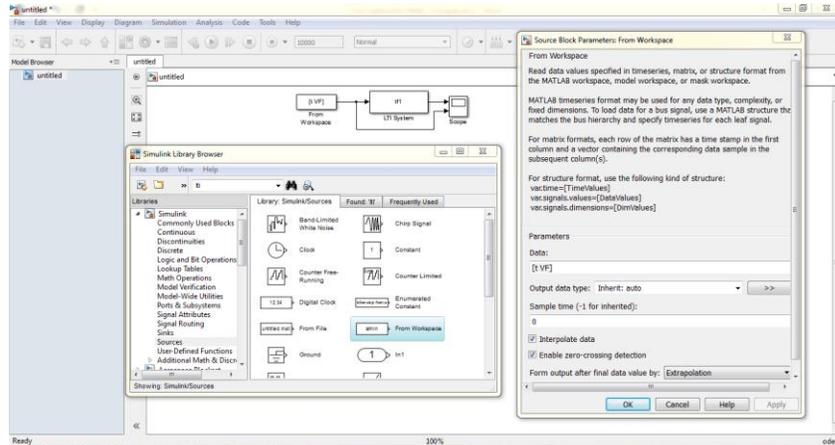
Apéndice C.5. Función de transferencia.

- Para comprobar que ambas ecuaciones describen el comportamiento ideal, el cual debe de ser similar al de los perfiles de corriente y voltaje obtenidos mediante la caracterización eléctrica, por lo cual se procede a graficar dichas funciones por medio de la librería *Simulink* del mismo software. Se va a requerir de un cuarto vector, correspondiente a la señal de entrada representando el tiempo en segundos del ciclo de carga/descarga; siendo este vector del mismo tamaño de los vectores de V , I y VF ; éste se obtiene mediante la instrucción “ $t=0:5676$ ” y “ $t=t$ ”, como se muestra en la figura Apéndice C.6.



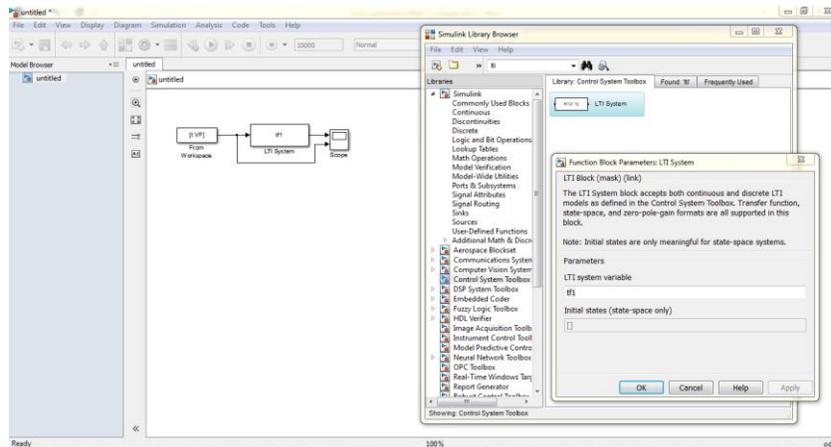
Apéndice C.6. Matriz de tiempo

- En *Simulink* se realiza un modelo que consiste en una sentencia de bloques. El primer bloque representa la señal de entrada. La cual se llama *From workspace* y se encuentra en la librería *Sources*. En los parámetros de dicho bloque se establece como entrada la fuente de alimentación *VF* respecto al tiempo *t* con la instrucción $[t \text{ VF}]$, como se muestra en la figura correspondiente al Apéndice C. 7.



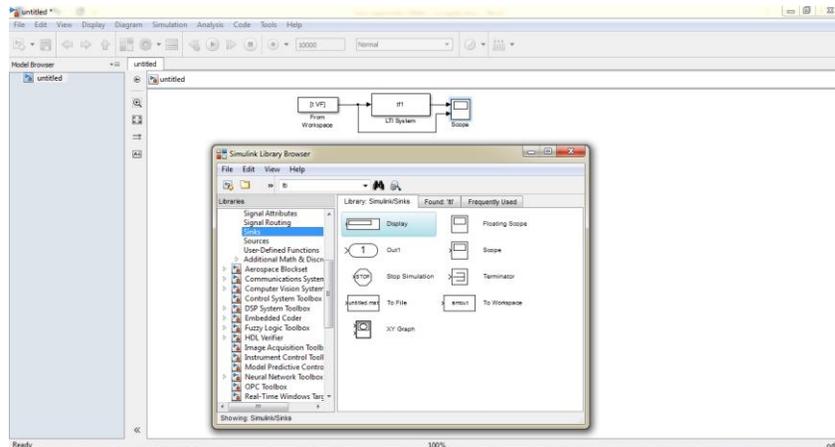
Apéndice C.7. Señal de entrada, fuente de alimentación en función del tiempo

- El siguiente bloque representa el comportamiento de las señales, el cual representa a la función de transferencia, este bloque llama *LTI System* y se encuentra en la librería *Control System Toolbox* en la cual se establece el nombre asignado anteriormente a la función de transferencia estimada. Como se muestra en la figura correspondiente al Apéndice C. 8



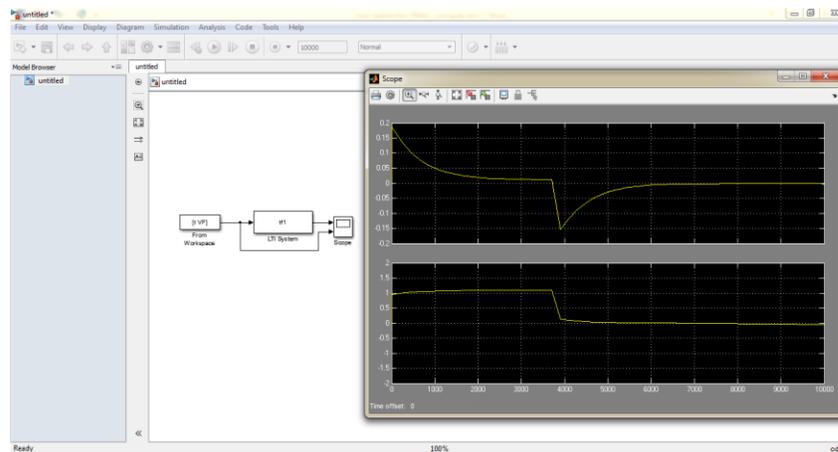
Apéndice C.8. Función de transferencia.

- El tercer bloque representa una forma de visualizar los perfiles de corriente y de voltaje correspondientes a las funciones de transferencia. Este bloque se llama *Scope* y se encuentra en la librería *Sinks*, como se muestra en la Figura correspondiente al Apéndice C.9.



Apéndice C.9. Visualización de los perfiles de corriente y voltaje.

- Cuando se tienen los tres bloques conectados y perfectamente configurados, solamente se da la opción *play* para proceder a la simulación, para obtener los perfiles de corriente y voltaje, como se muestra en la figura correspondiente al Apéndice C.10.



Apéndice C.10. Perfiles de corriente y de voltaje obtenidos por medio de Simulink.

- Una vez que se comprueba que los perfiles obtenidos por medio de la simulación, se comportan de manera similar a los obtenidos por medio de la caracterización eléctrica, se corrobora que las funciones de transferencia son correctas y se procede a ser igualadas a las ecuaciones 1.20 y 1.21 propuestas, sustituyendo los valores conocidos, despejar las incógnitas y obtener los valores de las resistencias equivalentes en serie y en paralelo.

