



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

**DISEÑO DE UN BANCO DE SUPERCAPACITORES
CON IMPLEMENTACIÓN DE UNA MATRIZ DE
CONMUTACIÓN PARA EL ALMACENAMIENTO
EFICIENTE DE ENERGÍA**

**DESING OF A BANK OF SUPERCAPACITORS WITH
IMPLEMENTATION OF A COMMUTATION MATRIX FOR
EFFICIENT ENERGY STORAGE**

Manuel Olan Ramos

Tecnológico Nacional de México

Candelario Ramon de los Santos

Tecnológico Nacional de México

Jesus Ixta Morales

Tecnológico Nacional de México

Guadalupe Jimenez Morales

Tecnológico Nacional de México

Daniel Andres Cordova Cordova

Tecnológico Nacional de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15606

Diseño de un Banco de Supercapacitores con Implementación de una Matriz de Conmutación para el Almacenamiento Eficiente de Energía

Manuel Olan Ramos¹manuel.olan@comalcalco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0001-9980-9165>Tecnológico Nacional de México
Campus Comalcalco
México**Candelario Ramon de los Santos**candelario.ramon@comalcalco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-1509-8632>Tecnológico Nacional de México
Campus Comalcalco
México**Jesus Ixta Morales**jesus.ixta@comalcalco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2016-4128>Tecnológico Nacional de México
Campus Comalcalco
México**Guadalupe Jimenez Morales**guadalupe.jimenez@comalcalco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-9007-0488>Tecnológico Nacional de México
Campus Comalcalco
México**Daniel Andres Cordova Cordova**daniel.cordova@comalcalco.tecnm.mx
<https://orcid.org/0009-0001-9785-3928>Tecnológico Nacional de México
Campus Comalcalco
México

RESUMEN

El presente documento plasma el diseño, construcción física y evaluación experimental de un banco de supercapacitores (SC's), así como el desarrollo de una matriz de conmutación para su implementación dentro del banco de SC's, con el objetivo de buscar potenciar los parámetros eléctricos en los tiempos y ciclos de carga y descarga del banco, brindando mayor efectividad y eficiencia en comparación con otros sistemas de almacenamiento de energía (SAE). El banco esta conformado por 8 supercapacitores con conexiones variables, la matriz de conmutación permite gestionar y distribuir la energía almacenada en los supercapacitores de manera óptima con cuatro configuraciones diferentes (serie, paralelo y dos mixtas). Adicionalmente el banco se complemento con una batería de ciclo profundo, un elevador de voltaje y un inversor de 12 V CD a 110 V CA. La adición de una batería de ciclo profundo mejora la capacidad de almacenamiento y proporciona energía adicional cuando los SC alcanzan niveles bajos de carga, lo cuál asegura un suministro constante de energía. El inversor de 12 V CD a 110 V CA convierte la corriente continua almacenada en el banco de SC's y batería en corriente alterna de 110 V CA.

Palabras clave: capacitancia, almacenamiento, energía, batería, carga

¹ Autor principal

Correspondencia: manuel.olan@comalcalco.tecnm.mx

Desing of a Bank of Supercapacitors with Implementation of a Commutation Matrix for Efficient Energy Storage

ABSTRACT

This document presents the design, physical construction, and experimental evaluation of a supercapacitor bank (SCs), as well as the development of a commutation matrix for its implementation within the SC bank, with the aim of enhancing the electrical parameters during the charge and discharge cycles of the bank, providing greater effectiveness and efficiency compared to other energy storage systems (ESS). The bank is made up of 8 supercapacitors with variable connections; the commutation matrix allows for optimal management and distribution of the energy stored in the supercapacitors with four different configurations (series, parallel, and two mixed). Additionally, the bank is complemented by a deep-cycle battery, a voltage booster, and a 12V DC to 110V AC inverter. The addition of a deep-cycle battery improves the storage capacity and provides additional energy when the SCs reach low charge levels, ensuring a constant energy supply. The 12V DC to 110V AC inverter converts the direct current stored in the SC and battery bank into 110V AC alternating current.

Keywords: capacitance, storage, energy, battery, charge

Artículo recibido 02 noviembre 2024

Aceptado para publicación: 10 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

El almacenamiento eficiente de energía eléctrica es un desafío clave en la actualidad, especialmente con el aumento de la demanda de fuentes de energía sostenibles y renovables. En este contexto, los supercapacitores (SC) han emergido como una solución prometedora gracias a su alta densidad de potencia (Vonsien & Madlener, 2020, Kuipers et al., 2020), rápida capacidad de carga y descarga (Thomas et al., 2019), y su ciclo de vida prolongado (Xie et al., 2016) en comparación con las baterías convencionales (Bujewska et al., 2019). Sin embargo, para maximizar su rendimiento, es esencial contar con un diseño adecuado que optimice su capacidad de almacenamiento y entrega de energía.

Se hace imperativo desarrollar sistemas de almacenamiento eficientes y sostenibles (Reveles et al., 2017) que puedan satisfacer las demandas energéticas de manera confiable. En este contexto, el presente proyecto se enfoca en el diseño de un banco de supercapacitores con la implementación de una matriz de conmutación, que permite gestionar de manera eficiente la conexión y desconexión de cada uno de los SC's, asegurando un uso óptimo de la energía almacenada. Este enfoque busca mejorar la eficiencia energética en aplicaciones que requieren una respuesta rápida y confiable de los sistemas de almacenamiento de energía, como los vehículos eléctricos (Srivastava et al., 2023), los sistemas de respaldo energético (Xu et al., 2017) y las redes inteligentes (Wei et al., 2012).

El banco de supercapacitores se convierte en el núcleo central de este proyecto debido a sus propiedades únicas e innovadoras de almacenamiento de energía. Los supercapacitores son dispositivos de alta densidad energética que tienen la capacidad de cargarse y descargarse rápidamente (Velázquez et al., 2010), lo que los convierte en una opción atractiva para aplicaciones que requieren una entrega de energía instantánea y eficiente (Srivastava et al., 2023). Sin embargo, para aprovechar al máximo su potencial, es necesario implementar una matriz de conmutación que permita la carga y descarga selectiva de los supercapacitores (Reveles et al., 2017).

La implementación de una matriz de conmutación es clave para gestionar el flujo de energía dentro del banco de supercapacitores, evitando pérdidas innecesarias y prolongando la vida útil de los componentes.

Otra de las mejoras claves e innovadoras realizadas en este proyecto es la integración de una batería de ciclo profundo en el sistema. Esta adición complementa los supercapacitores al proporcionar una mayor

capacidad de almacenamiento de energía y una mayor estabilidad en el suministro eléctrico durante períodos de alta demanda. La batería de ciclo profundo se caracteriza por su capacidad para soportar múltiples ciclos de carga y descarga profunda sin sufrir daños significativos (Zhang et al., 2021, Huang et al., 2022), lo que garantiza su durabilidad y confiabilidad a largo plazo.

Además, se ha incorporado un inversor de voltaje capaz de convertir la corriente continua de 12 V proveniente de los supercapacitores y la batería en corriente alterna de 110 V. Esta función permite utilizar dispositivos que requieran de la tensión de 110 V, brindando una fuente de alimentación confiable y estable tanto para aplicaciones domésticas como para equipos de oficina.

Este diseño innovador se basa en estudios recientes que destacan la importancia de la arquitectura de conmutación para mejorar la eficiencia en la entrega de energía en sistemas de alto rendimiento (Chen et al., 2021, Smith & Zhao, 2019). Además, se exploran los desafíos técnicos asociados con la integración de supercapacitores en redes de almacenamiento y cómo la matriz de conmutación puede ser una solución viable para superar estos obstáculos (Jones et al., 2020).

METODOLOGÍA

Con el objetivo diseñar las diferentes configuraciones de la matriz, se realizaron los cálculos correspondientes para voltaje e intensidad de corriente basándose en la ley de ohm (Ec. 1).

$$V = IR \quad \text{Ecuación 1}$$

Para conexiones de los supercapacitores en serie la carga de cada capacitor es igual que la carga total Q_T , está dado por la Ecuación 2, la diferencia de potencial a través de la batería es igual a la suma de las caídas de voltaje en cada capacitor esta dado por la Ecuación 3, y el inverso de la capacitancia neta se halla mediante la Ecuación 4 (Tippens, 2011):

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad \text{Ecuación 4}$$

En conexiones en paralelo de los supercapacitores la carga total es igual a la suma de las cargas a través de cada capacitor que esta dado por la Ecuación 5, la caída de voltaje a través de cada capacitor es igual que la caída correspondiente a través de la batería dado por la Ecuación 6, y la capacitancia efectiva es

igual a la suma de las capacitancias individuales mediante la Ecuación 7 (Tippens, 2011):

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3 \quad \text{Ecuación 7}$$

Una vez que se realizaron pruebas en las configuraciones del banco de acuerdo con los cálculos, se procedió a diseñar la lógica de funcionamiento de la matriz de conmutación que se aplicó al banco.

Carga del Banco de supercapacitores

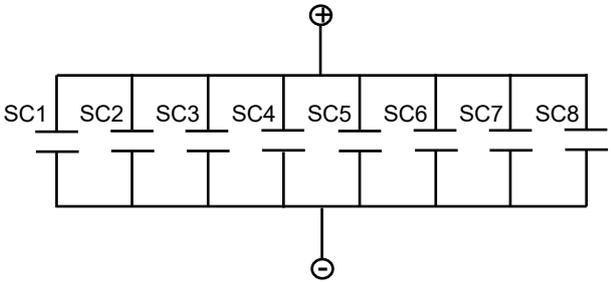
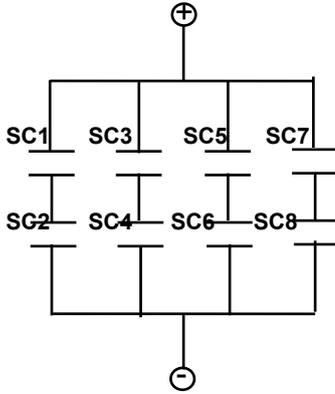
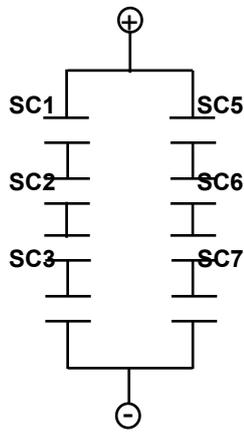
Para el proceso de carga del módulo, los SC's se encuentran conectados en paralelo, esto debido a que en esta configuración se obtiene una carga más rápida consumiendo menos corriente, tal y como se observa en la Figura 1a. Una vez que la carga se encuentra completa, el módulo se desconectará de la fuente de alimentación de manera automática, para comenzar la descarga. Durante todo el proceso, por medio de las entradas analógicas del microcontrolador se registra el voltaje del banco de SC's.

Descarga del Banco de supercapacitores

Una vez concluido el periodo de carga del módulo, la primera configuración programada para la descarga fue la de 8 supercapacitores conectados en paralelo (Tabla 1 b)), cuando el voltaje registrado por el controlador (V_o) en la salida del módulo sea menor o igual que el primer voltaje de cambio programado, el PIC16F887 enviará una señal al circuito de conmutación, compuesto por relevadores para activar y desactivar los pines a modo de reconfigurar el banco en 4 grupos en paralelo de 2 capacitores en serie (4P/2S), como se muestra en la Tabla 1 c). Debido a lo anterior, el voltaje del BSC's aumentará de manera instantánea, pero sin cambiar el estado de descarga. Nuevamente cuando el voltaje de salida del BSC's (V_o) se registre menor o igual al segundo voltaje de cambio programada, se manda nuevamente la señal al microcontrolador para activar/desactivar los puertos necesarios para reconfigurar la conexión entre los supercapacitores en 2 grupos en paralelo de 4 supercapacitores en serie (2P/4S), mostrado en la Tabla 1 d). Tal como sucedió en el caso anterior, el voltaje del BSC's aumenta instantáneamente, pero continuando con la descarga. Cuando el voltaje de salida (V_o) sea menor o igual al tercer voltaje de cambio programado, se manda la señal al microcontrolador y este a los puertos necesarios para reconfigurar la conexión de 8 supercapacitores en serie como se muestra en la Tabla 1 a).

El voltaje aumenta, pero continúa descargando el módulo, no obstante, en este caso cuando el voltaje de salida (V_o) es menor o igual al cuarto voltaje de cambio programado, se manda la señal al microcontrolador para activar/desactivar los puertos que permiten la configuración en de los 8 supercapacitores en paralelo, concluyendo el ciclo de descarga, y comenzando la carga de nuevo.

Tabla 1. Configuraciones y arreglos de la matriz de conmutación del banco de supercapacitores.

Configuraciones	Arreglo de SC's
a) Ocho supercapacitores en serie	
b) Ocho supercapacitores en paralelo	
c) Cuatro grupos en paralelo de dos SC's en serie.	
d) Dos grupos en paralelo de cuatro SC's en serie.	

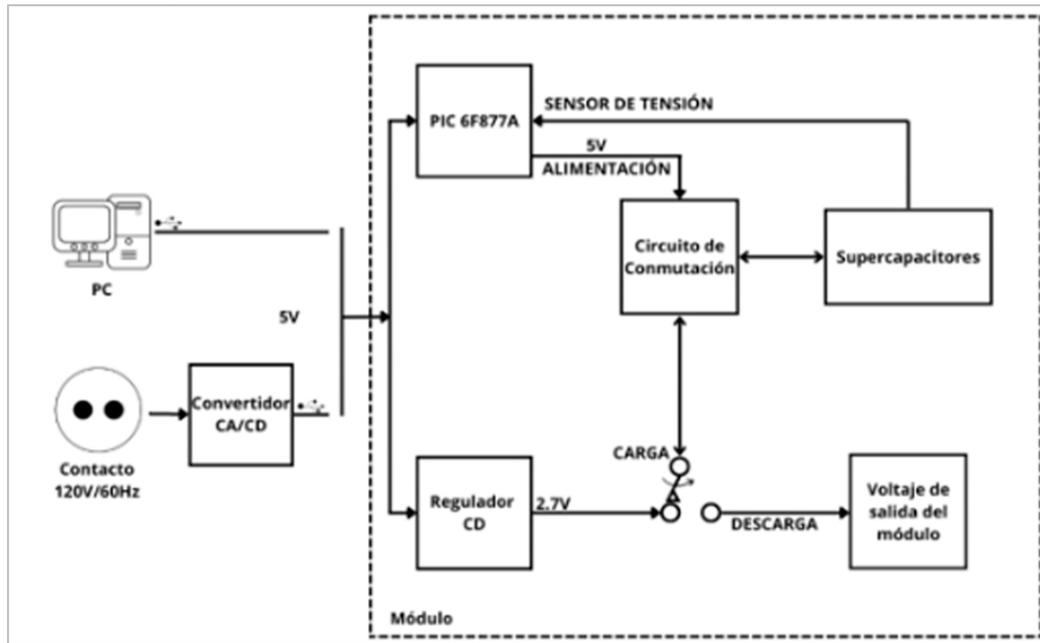
Se realizaron las pruebas de carga y descarga de los SC's en las cuatro configuraciones planteadas, los SC's fueron cargados con una fuente de alimentación OWON ODP3033 para mantener una carga constante y controlada en los mismos (Figura 1).

Figura 1. Arreglo mixto, cuatro grupos en paralelo de dos SC's en serie.



El objetivo principal del módulo BSC consiste en establecer la conexión de los ocho capacitores mediante diversas disposiciones eléctricas, las cuales son gestionadas por la matriz de conmutación. Esto se logra a través de la programación de un microcontrolador de gama media, el PIC16F887. La Figura 2 ilustra el funcionamiento general, en la que se aprecia la provisión de alimentación de 5VDC, que puede ser obtenida a partir de una fuente USB tipo A de una computadora o de un convertidor CA/CD con una salida USB de 5VDC a 2A. Esta misma fuente se utiliza para cargar la programación. Asimismo, se muestra el controlador, que tiene como finalidad efectuar las reconfiguraciones del banco de supercapacitores (módulo), así como un regulador de voltaje destinado a suministrar la energía necesaria a los supercapacitores de corriente continua (CD) con el propósito de proporcionar la carga a los supercapacitores.

Figura 2. Diagrama del funcionamiento del módulo de capacitores con matriz de conmutación aplicada.



Diseño de la lógica de programación

Para diseñar la programación, fue necesario establecer las condiciones de funcionamiento del banco:

- Número de capacitores a utilizar.
- Tiempo de carga/descarga del módulo.
- Niveles de voltaje para estabilizar el sistema de almacenamiento.
- Cambios de la matriz en el momento de la descarga.
- Extracción uniforme de energía disponible en cada supercondensador; en la búsqueda de crear ciclos más profundos de carga/descarga.

Una vez que se consideraron estos parámetros del banco de almacenamiento de energía, se proponen las siguientes configuraciones para el proceso de carga y el proceso de descarga. Realizándose cada una de ellas a medida que el nivel de voltaje de salida del módulo disminuye durante la carga en función de las rutinas que se establezcan en los parámetros de descarga. Como se muestra en la Tabla 1.

Se procedió a realizar la programación completa de la matriz de conmutación, haciendo uso de un ciclo while y switch, mediante los cuales se enviarán las señales para activar y desactivar pines. Se incorporan las bibliotecas necesarias y se establecen las configuraciones iniciales del microcontrolador. También se definen las constantes que representan las configuraciones de los pines de la sección B y C, los cuales controlan la salida para el banco de supercapacitores. Además, se declaran las variables requeridas,

como valor ADC para almacenar el valor leído del convertidor analógico-digital, voltaje para guardar el voltaje calculado y configuración para controlar la configuración actual del banco de capacitores.

La fase de configuración y visualización inicial comprende la configuración del convertidor analógico-digital y la inicialización de la pantalla LCD. Se muestra un mensaje de inicio en la pantalla y se espera un período de tiempo determinado antes de borrar la pantalla y presentar un mensaje indicando el encendido de la fuente de alimentación con una configuración específica.

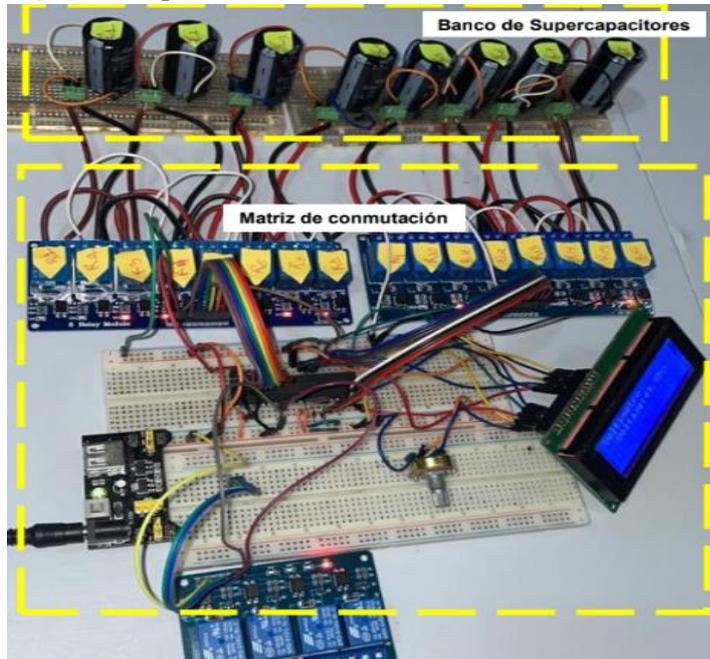
El ciclo principal se introduce en un bucle infinito que realiza la medición del voltaje de entrada y ejecuta las acciones correspondientes según la configuración actual. El valor del voltaje medido se muestra en la pantalla LCD. Se utiliza una estructura de control switch para determinar la configuración actual del banco de capacitores y llevar a cabo acciones según el voltaje medido. Para cada configuración del banco de capacitores, si el voltaje se encuentra dentro de un rango específico, se muestra un mensaje que indica la preparación para la descarga. A continuación, se inicia una cuenta regresiva en la pantalla LCD antes de realizar la descarga o cambiar la configuración. Se actualiza la configuración del banco de capacitores y se muestra un mensaje correspondiente en la pantalla LCD. Después de un tiempo de espera, se procede al siguiente ciclo de medición.

Tras completar una acción (descarga o cambio de configuración), se regresa al punto de medición del voltaje para continuar el ciclo. De esta manera, el programa se ejecuta de forma continua y monitorea constantemente el voltaje de entrada. Dependiendo del voltaje medido y la configuración actual del banco de capacitores, se llevan a cabo acciones específicas, como descargas o cambios de configuración, con el fin de mantener el voltaje dentro de los límites deseados.

Una vez realizada la programación y pruebas, se procedió a cargarla en el simulador, para verificar que no haya posibles errores y de haberlos que sean corregidos antes de elaborar la conexión física. Posteriormente se realizó la conexión física de los supercapacitores, se conectó cada uno de los supercapacitores a una bornera, un pin para la salida positiva y otro para la negativa, también el módulo de relevadores y pantalla LCD de 16X2 fueron conectados al microcontrolador como se definió en el diagrama general y en las tablas de verdad con los cuales se activarán y desactivarán las configuraciones. Seguidamente, tomando guía del diagrama general de funcionamiento, se procedió a realizar la conexión de las salidas de los SC's a las salidas comunes de los relevadores, además de

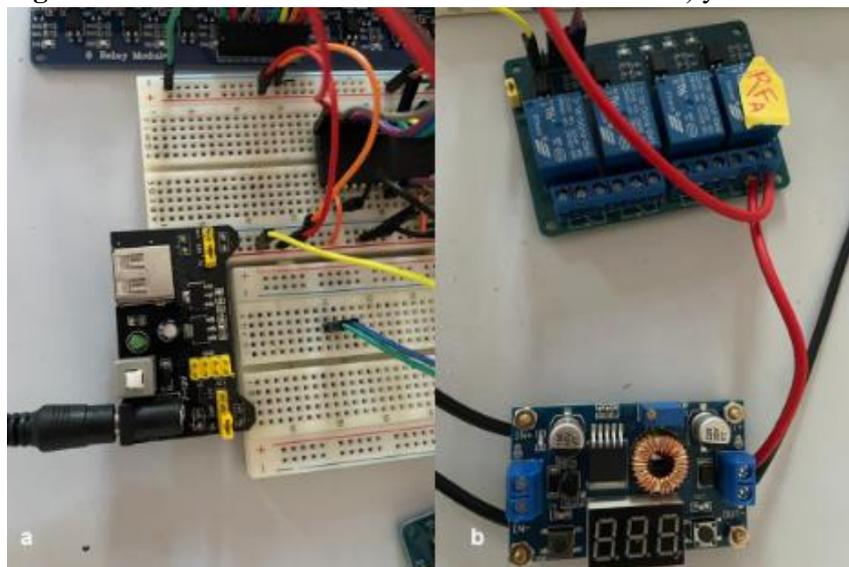
respetar las interconexiones entre las salidas normalmente abiertas y normalmente cerradas, como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3. Implementación de la matriz de conmutación al banco de SC's.



Se conectaron las fuentes de alimentación, la correspondiente al PIC, LCD, relevadores y la correspondiente a los supercapacitores (Figura 4), esto con la finalidad de realizar las pruebas de funcionamiento y en el entendido de que las fuentes son independientes entre sí debido a la cantidad de amperaje que se requiere para cargar el banco de SC's, que excede las tolerancias de módulo de la matriz de conmutación.

Figura 4. Fuente de alimentación del circuito de control a) y fuente de alimentación del banco de SC's.



Implementación de la batería de ciclo profundo al BSC's

Se llevó a cabo la conexión de la batería de ciclo profundo al banco de supercapacitores. Esta conexión fue fundamental para optimizar el rendimiento del sistema y garantizar una mayor capacidad de almacenamiento de energía. La batería de ciclo profundo, conocida por su capacidad de soportar múltiples ciclos de carga y descarga profunda sin sufrir daños significativos, se integró estratégicamente al sistema.

Implementación de un inversor en el BSC's

El inversor es un dispositivo fundamental que permite convertir la corriente continua almacenada en los supercapacitores en corriente alterna, específicamente a una tensión de 110 V.

La colocación del inversor ZIWANYI DC-AC se realizó siguiendo las pautas de instalación recomendadas por el fabricante y cumpliendo con los requisitos de seguridad eléctrica. Se seleccionó un lugar adecuado en el sistema del banco de supercapacitores para ubicar el inversor, asegurándose de contar con suficiente ventilación y espacio para su correcto funcionamiento.

Una vez instalado, se procedió a conectar el inversor a los supercapacitores y al sistema de distribución eléctrica. Esto implicó realizar las conexiones eléctricas correspondientes y asegurarse de que los cables estuvieran debidamente aislados y fijados para garantizar una conexión segura y confiable.

Además, se llevó a cabo la configuración y programación adecuada del inversor para que cumpliera con los requisitos de funcionamiento del sistema. Esto incluyó ajustar los parámetros de voltaje, frecuencia y protecciones.

La colocación del inversor en el banco de supercapacitores permite ampliar su funcionalidad al proporcionar una salida de voltaje de 110 V. Esto abre la posibilidad de utilizar dispositivos y equipos que requieren este nivel de voltaje estándar, brindando más flexibilidad y opciones en las aplicaciones del banco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediciones de verificación

Se procedió a realizar una verificación de los parámetros proporcionados por el multímetro incorporado en el banco de supercapacitores a través del PIC16F887. Se llevó a cabo un análisis minucioso para asegurarse de que los datos medidos y mostrados por el multímetro fueran precisos y confiables.

Durante esta verificación, se tomaron en cuenta diversos aspectos, como la calibración del multímetro, la estabilidad de las lecturas y la consistencia de los resultados obtenidos.

Se realizaron mediciones en diferentes condiciones y se compararon con mediciones realizadas utilizando equipos de medición externos de referencia.

Además, se llevó a cabo un análisis de los posibles errores de medición, considerando factores como la impedancia de entrada del multímetro, los efectos de carga, la influencia de ruidos eléctricos y otros posibles errores sistemáticos. Se realizaron ajustes y correcciones según corresponda para asegurar la calidad de las mediciones realizadas por el multímetro en el banco de supercapacitores.

Durante el desarrollo del presente proyecto, se llevó a cabo una verificación de la gráfica de descarga de los supercapacitores utilizando instrumentos de medición de alta precisión, como lo es el Osciloscopio Digital Tecktronix TBS2000B Series. El objetivo principal fue asegurar la exactitud y confiabilidad de las mediciones realizadas y obtener una representación precisa del comportamiento de descarga de los supercapacitores.

En primer lugar, se conectó un osciloscopio al banco de supercapacitores para monitorear y capturar la forma de onda de la descarga en tiempo real. Adicionalmente, se utilizó un voltímetro integrado para realizar mediciones puntuales del voltaje en puntos específicos durante el proceso de descarga. Esto permite obtener mediciones exactas y confirmar los datos obtenidos a través del osciloscopio digital.

El enfoque riguroso de verificación, utilizando tanto el osciloscopio como el voltímetro integrado, permitió evaluar de manera precisa y confiable la gráfica de descarga de los supercapacitores del BSC's.

Los datos obtenidos proporcionaron información importante sobre el rendimiento y la capacidad de los supercapacitores durante el proceso de descarga, lo cual es fundamental para tomar decisiones informadas y optimizar el funcionamiento general del banco de supercapacitores.

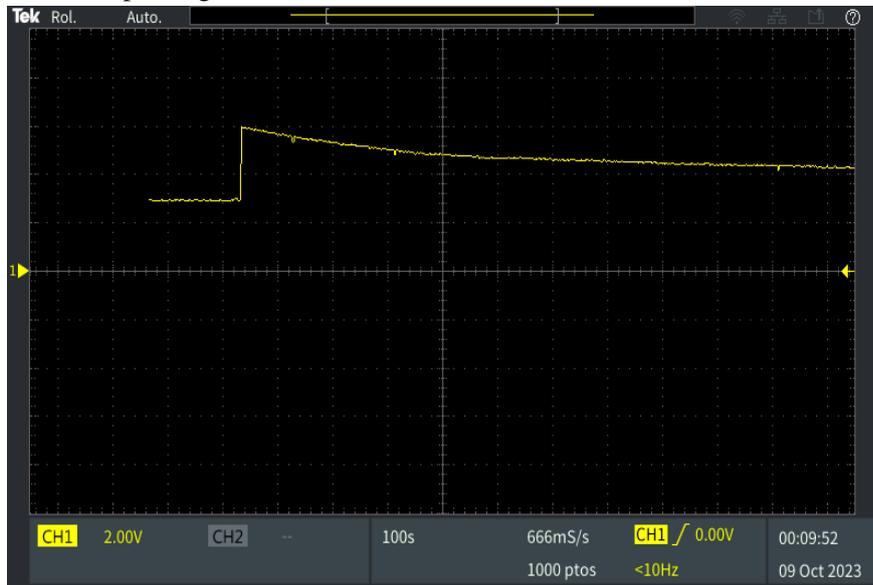
Medición de descarga en el osciloscopio

Para llevar a cabo la medición, se conectó el osciloscopio al banco de supercapacitores utilizando sondas de medición adecuadas. Estas sondas se conectan a los puntos de medición específicos del banco para captar el voltaje en tiempo real.

A medida que los supercapacitores se descargan, el osciloscopio muestra la forma de onda resultante en su pantalla como se puede ver en la Figura 5.

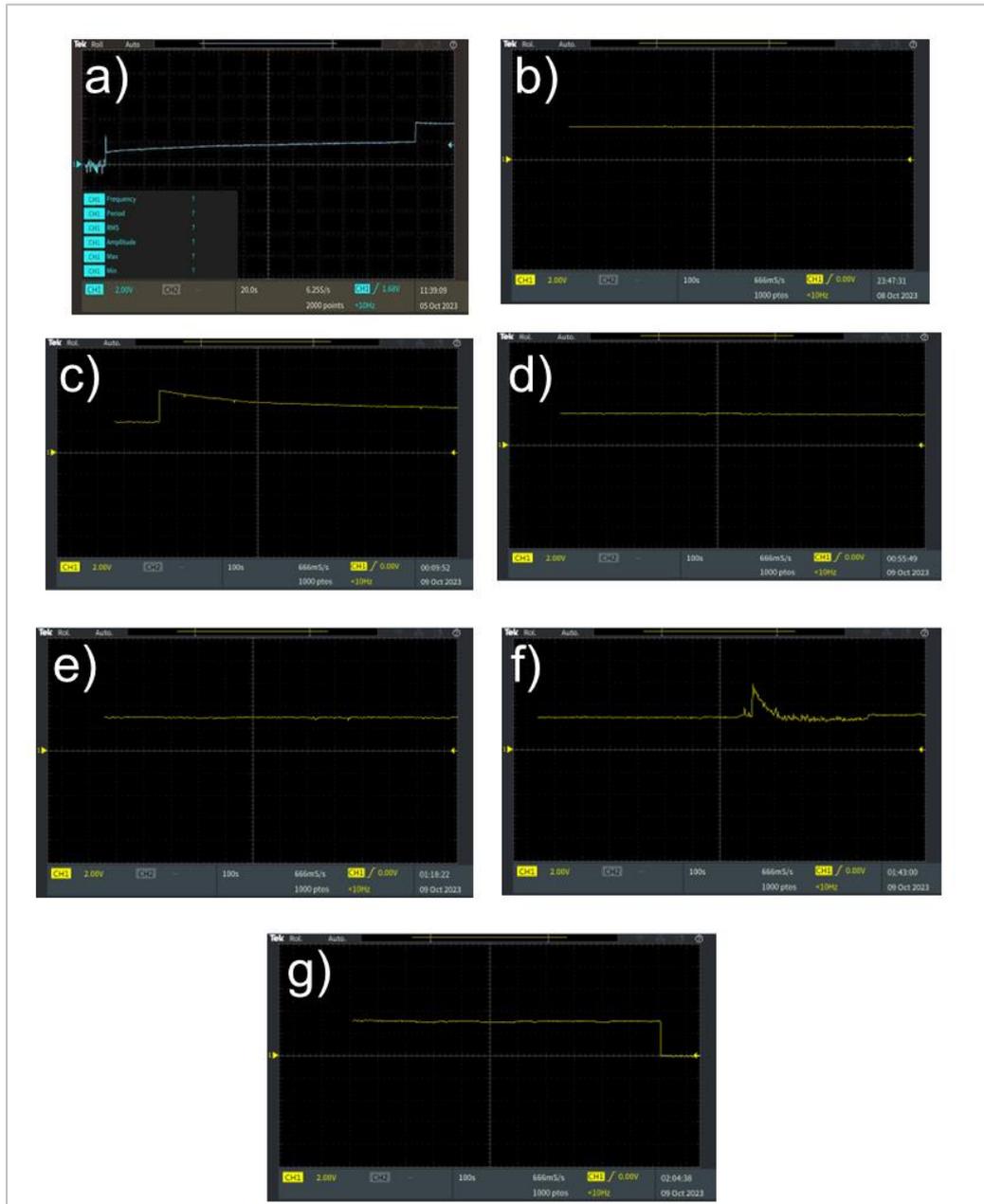
Esto permite observar y analizar cómo el voltaje varía a lo largo del tiempo durante el proceso de descarga. Se puede examinar la estabilidad del voltaje, la forma de la curva de descarga y otros detalles importantes para comprender el comportamiento de los supercapacitores.

Figura 5. Grafica de la carga/descarga de los supercapacitores conectados al banco, mostrado en el Osciloscopio Digital Tecktronix TBS2000B Series.



Además de visualizar la forma de onda, el osciloscopio proporciona información cuantitativa sobre el voltaje mediante la lectura de los valores en la escala de voltaje establecida. Esto permite realizar mediciones precisas y obtener datos numéricos relacionados con la descarga de los supercapacitores. Pruebas digitalizadas del osciloscopio de la carga y descarga del BSC en su primera fase, se puede ver la gráfica de inicio en la Figura 6 a), ya que esta es de las fases más pronunciadas por su largo tiempo de descarga.

Figura 6. Comportamiento de carga y descarga del BSC's en el Osciloscopio Digital Tecktronix TBS2000B Series.



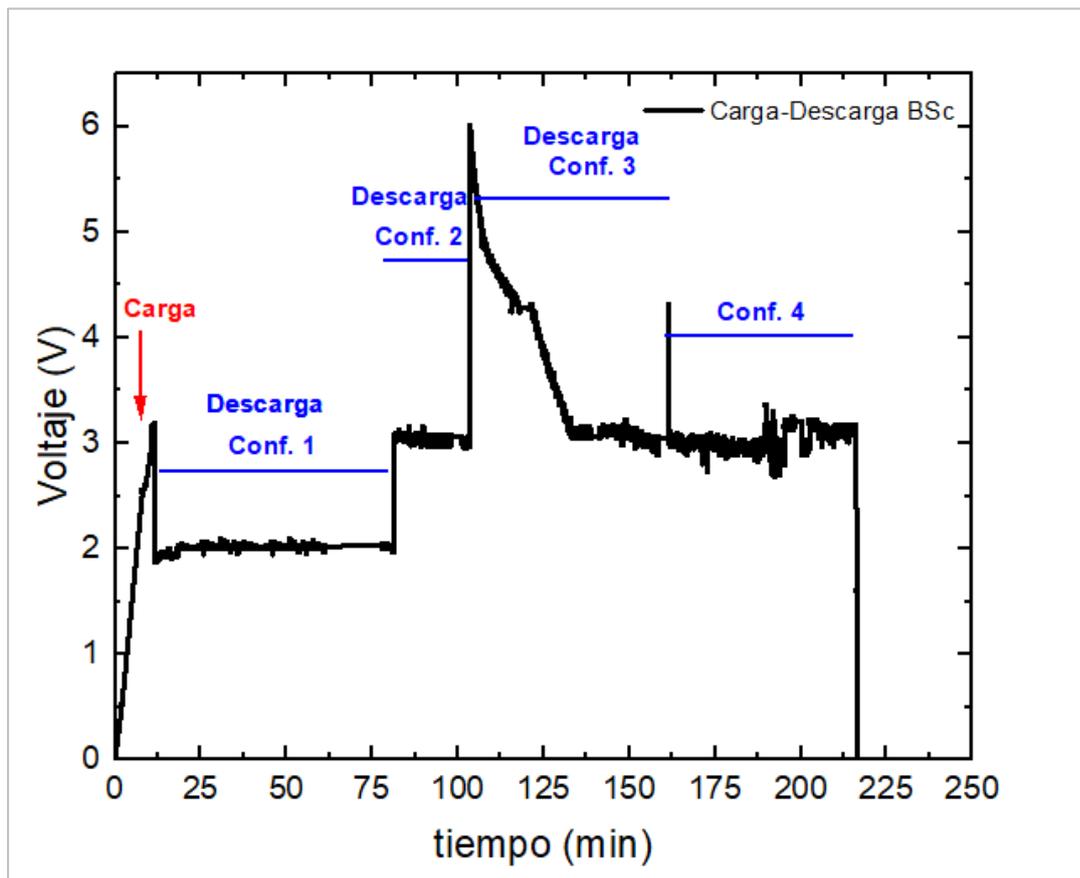
Al haber pasado la etapa de carga observada en la Figura 6 a) y haber llegado al voltaje mínimo esperado se realizó el primer cambio en la matriz de conmutación que se ve prolongado en la Figura 6 b) hasta que después de haber disminuido hasta el voltaje establecido se realizó el segundo cambio en la matriz de conmutación que se puede observar en la Figura 6 c).

Al haber realizado el segundo cambio en la matriz de conmutación la energía almacenada fue descendiendo gradualmente como se puede observar en las Figura 6 d) y e). Como se puede observar en la Figura 6 f) al haber llegado al voltaje mínimo programado para la segunda sección de la matriz de

conmutación se realizó el cuarto y último cambio en la misma. En la Figura 6 g) se puede observar el fin de la matriz de conmutación cuando este llega al voltaje mínimo establecido para la cuarta sección de dicha matriz el sistema regresa a 0 V.

Se realizó la representación gráfica de los datos capturados con el osciloscopio con el software de graficación Origin Lab para poder apreciar de una mejor manera el comportamiento del banco de supercapacitores con la matriz de conmutación como se puede observar en la Figura 7.

Figura 7. Proceso de carga/descarga del banco de supercapacitores con la implementación de la matriz de conmutación.



En la Figura 7 se representa el proceso completo de carga y descarga del banco de 8 supercapacitores. La primera fase corresponde a la carga del banco, donde se alcanza una carga completa en un tiempo de 11 minutos 46 segundos. Durante esta etapa, la energía se acumula en los supercapacitores hasta que alcanzan su capacidad máxima.

La segunda fase implica la descarga del banco. En la gráfica se pueden observar picos que indican cuatro etapas distintas, denominadas Conf.1, Conf. 2, Conf. 3 y Conf. 4. Estos picos representan los cambios de configuración del banco de supercapacitores. Estos cambios se realizan mediante una matriz

de conmutación, que modifica la disposición de los supercapacitores para obtener diferentes configuraciones eléctricas.

Estas configuraciones incluyen:

- Todos los supercapacitores en paralelo (8 SCs en paralelo): En esta configuración, los 8 supercapacitores están conectados en paralelo. Esto significa que todos los terminales positivos de los supercapacitores están conectados entre sí, al igual que todos los terminales negativos. Cuando están en paralelo, la capacitancia total del banco es la suma de las capacitancias individuales de cada supercapacitor. En este caso, al estar en paralelo, la carga se distribuye entre los supercapacitores, permitiendo una carga más rápida ya que se están cargando a un voltaje de solo 2.7 V.
- Dos supercapacitores en serie y cuatro en paralelo (2 SCs en serie y 4 en paralelo): En esta configuración, se tienen dos grupos de dos supercapacitores en serie. Luego, estos dos grupos están conectados en paralelo. Cuando los supercapacitores están en serie, sus voltajes se suman, por lo que se obtiene un voltaje total mayor. Al conectar estos dos grupos en paralelo, la capacitancia total del banco aumenta y, por lo tanto, la carga se descarga más lentamente en comparación con la configuración de todos los supercapacitores en paralelo.
- Cuatro supercapacitores en serie y dos en paralelo (4 SCs en serie y 2 en paralelo): En esta configuración, se tienen cuatro supercapacitores conectados en serie, lo que aumenta aún más el voltaje total. Luego, estos cuatro supercapacitores en serie se conectan en paralelo con otros dos supercapacitores en paralelo. Esto proporciona un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento de energía (voltaje total) y la rapidez con la que se puede suministrar energía a una carga.
- Todos los supercapacitores en serie (8 SCs en serie): En esta configuración, todos los supercapacitores están conectados en serie. Esto significa que el terminal positivo de un supercapacitor está conectado al terminal negativo del siguiente supercapacitor, y así sucesivamente. Al estar en serie, los voltajes individuales de los supercapacitores se suman, lo que proporciona el voltaje total más alto posible. Sin embargo, la capacitancia total del banco se reduce en comparación con las configuraciones en paralelo, lo que significa que la energía disponible se descarga más lentamente.



Este cambio de configuración permite mantener un voltaje constante entre 2 y 3 V en la salida del banco de supercapacitores, a pesar de que la carga conectada tenga un requerimiento de 5 V.

El tiempo total de descarga del banco, considerando todas las configuraciones, es de 206 minutos y 36 segundos. Este proceso de descarga controlada permite utilizar eficientemente la energía almacenada en los supercapacitores para alimentar cargas con diferentes requisitos de voltaje.

CONCLUSIONES

Uno de los aspectos más destacados de este banco de supercapacitores es su capacidad para adaptarse a las fluctuaciones de voltaje, gracias a la matriz de conmutación que ajusta automáticamente la configuración de los supercapacitores a medida que disminuye el voltaje. Este enfoque dinámico no solo permite mantener un suministro de energía constante, sino que también maximiza la capacidad de almacenamiento y prolonga la vida útil del sistema. La capacidad de sumar el voltaje a medida que se agota el nivel de energía disponible se revela como un elemento crucial para garantizar un rendimiento óptimo en diversas aplicaciones.

Los resultados experimentales obtenidos durante el ciclo de carga y descarga del banco de supercapacitores proporcionan una visión clara de su eficiencia y fiabilidad. Con un tiempo de carga inicial de 11 minutos con 46 segundos, este sistema demuestra una capacidad impresionante para acumular energía en un período relativamente corto, lo que lo hace ideal para su integración en entornos donde la disponibilidad de energía es crucial. Por otro lado, el tiempo de descarga prolongado de 206 minutos con 36 segundos refleja la capacidad de este banco de supercapacitores para mantener un suministro de energía estable durante períodos prolongados, lo que lo convierte en una solución confiable para aplicaciones de larga duración.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bujewska P., Gorska B., Fic K. (2019). Redox activity of selenocyanate anion in electrochemical capacitor application. *Synthetic Metals*, 253, 62.

Chen, W., Liu, X., y Yang, H. (2021). Optimization of Energy Storage Systems using Supercapacitors and Switching Matrices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(8), 1021-1035.



- Huang, S., Yuan, Z., Salla, M., Wang, X., Zhang, H., Huang, S., & Wang, Q. (2023). A redox-mediated zinc electrode for ultra-robust deep-cycle redox flow batteries. *Energy & Environmental Science*, 16(2), 438-445.
- Jones, M., Patel, S., y Lee, D. (2020). Challenges in Integrating Supercapacitors with Energy Grids: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109875.
- Kuipers M., Schröer P., Nemeth T., Zappen H., Blömeke A., Sauer D. U. (2020). An Algorithm for an Online Electrochemical Impedance Spectroscopy and Battery Parameter Estimation: Development, Verification and Validation. *Journal of Energy Storage*, 30, 101517.
- Reveles-Miranda M. G., Chan-Puc Freddy, Flota-Bañuelos M. I., Pacheco-Catalán D. (2017). Experimental Evaluation of a Switching Matrix Applied in a Bank of Supercapacitors. *Energies*, 10, 2077.
- Smith, R., y Zhao, Y. (2019). High-Efficiency Supercapacitor Bank Design for Energy Storage Applications. *Journal of Energy Storage*, 24(5), 67-75.
- Srivastava, A., Manas, M., & Dubey, R. K. (2023). Electric vehicle integration's impacts on power quality in distribution network and associated mitigation measures: a review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 32.
- Thomas P., Wei L. Ch., Mohd J., Bin R. (2019). Recent developments in biomass derived carbon as a potential sustainable material for super-capacitor-based energy storage and environmental applications. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 140.
- Tippens. P. (2011) *Física, conceptos y aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.
- Velázquez-Trujillo A., Bolaños-Reynoso E., Pliego-Bravo Y. S. (2010). Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista mexicana de ingeniería química*, 9, 359.
- Vonsien S., Madlener R. (2020). Li-ion battery storage in private households with PV systems: Analyzing the economic impacts of battery aging and pooling. *Journal of Energy Storage*, 29, 101407.
- Wei L., Yushin G. (2012). Nanostructured activated carbons from natural precursors for electrical double layer capacitors. *Nano Energy*, 1, 552.



- Xie Q., Bao R., Xie Ch., Zheng A., Wu S., Zhang Y., Zhang R., Zhao P. (2016). Core shell Ndoped active carbon fiber graphene composites for aqueous symmetric supercapacitors with high energy and highpower density. *Journal of Power Sources*, 317, 133.
- Xu X., Nan J., Wang J., Gao Z. (2017). Estimate of Super Capacitor's Dynamic Capacity. *Energy Procedia*, 105, 2194.
- Zhang, W., Zhao, Q., Hou, Y., Shen, Z., Fan, L., Zhou, S., & Archer, L. A. (2021). Dynamic interphase-mediated assembly for deep cycling metal batteries. *Science Advances*, 7(49), eabl3752.

