

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electricidad

### Determinación de los Parámetros de la Caracterización DLC del Supercondensador del Laboratorio de Micro-Red


Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**Autor:**

Andrés Alberto Martínez Curipoma

**Director:**

Ciro Mauricio Larco Barros

ORCID:  0000-0002-7801-1514

**Cuenca, Ecuador**

2025-10-27

## Resumen

Los supercapacitores son dispositivos clave en aplicaciones modernas de almacenamiento de energía, especialmente en sistemas de respaldo, vehículos eléctricos y microrredes, gracias a su alta densidad de potencia y larga vida útil. En este trabajo se determinan los parámetros de dos modelos de circuito equivalente aplicados a un banco de supercapacitores con más de una década de uso. El primer modelo, basado en la estructura propuesta por el fabricante, no logra reproducir adecuadamente la evolución del voltaje en terminales, incluso tras un ajuste numérico de sus parámetros, lo que evidencia su limitación para representar el comportamiento real del banco. El segundo modelo, correspondiente a la propuesta de Zubieta, incorpora la dependencia no lineal de la capacitancia con el voltaje y fue obtenido sobre los resultados del modelo del fabricante. Sin embargo, también requirió un ajuste numérico, que resultó en parámetros significativamente distintos y coherentes con un estado de envejecimiento avanzado del dispositivo. Los resultados sugieren una pérdida de capacidad de conducción, una reducción de la capacitancia total, un aumento de la resistencia de fuga y una respuesta más lenta, teniendo en cuenta que el banco se encuentra próximo al final de su vida útil.

*Palabras clave del autor:* banco de supercapacitores, modelamiento dinámico, circuito equivalente, simulación computacional



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

Supercapacitors are key devices in modern energy storage applications, particularly in backup systems, electric vehicles, and microgrids, due to their high power density and long service life. This work presents the identification of parameters for two equivalent circuit models applied to a supercapacitor bank with over a decade of usage. The first model, based on the structure proposed by the manufacturer, fails to accurately reproduce the terminal voltage evolution, even after numerical parameter adjustment, revealing its limitation in representing the actual behavior of the aged bank. The second model, based on Zubieta's proposal, incorporates the nonlinear dependence of capacitance on voltage and was obtained based on the manufacturer's model output. However, it also required numerical tuning, which yielded significantly different parameters consistent with an advanced aging state of the device. The results suggest a loss of conduction capability, a reduction in total capacitance, an increase in leakage resistance, and a slower dynamic response, considering that the bank is approaching the end of its useful life.

*Author Keywords:* supercapacitor bank, dynamic modeling, equivalent circuit, computational simulation



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

1.	Generalidades .....	10
1.1.	Introducción .....	10
1.2.	Objetivos .....	11
1.2.1.	Objetivo General .....	11
1.2.2.	Objetivos específicos.....	11
1.3.	Alcance .....	11
1.4.	Justificación .....	11
2.	Revisión de la literatura .....	12
2.1.	Capacitores de doble capa eléctrica .....	12
2.1.1.	La doble capa eléctrica.....	12
2.1.2.	Supercapacitores .....	14
2.2.	Modelamiento de Supercapacitores .....	16
3.	Metodología.....	20
3.1.	Materiales .....	20
3.1.1.	Banco de Supercapacitores Bajo Estudio.....	20
3.2.	Descripción general de los métodos para obtener los parámetros.....	20
3.3.	Metodología para determinación de parámetros por el método del fabricante .....	21
3.4.	Metodología para la caracterización DLC de Zubieta.....	22
3.4.1.	Diseño del esquema de simulación de la prueba experimental .....	24
3.4.2.	Proceso de obtención de los parámetros del circuito equivalente de Zubieta	25
3.4.3.	Consideraciones previas a una posterior aplicación de la prueba experimental	27
4.	Resultados y Discusión .....	28
4.1.	Parámetros de acuerdo con el método del fabricante .....	28
4.2.	Parámetros de acuerdo con el método de Zubieta.....	29
4.3.	Ajuste de parámetros del modelo del fabricante .....	30

4.4.	Ajuste de parámetros del modelo de Zubieta .....	32
4.5.	Comparación del diagrama de bloques expandido del modelo de Zubieta .....	34
5.	Conclusiones .....	34
6.	Referencias .....	36

## Índice de figuras

Figura 1. Modelo de interacciones electrostáticas en la interfaz electrodo-electrolito según Helmholtz.....	13
Figura 2. Modelo de interacciones electrostáticas en la interfaz electrodo-electrolito según Stern.....	14
Figura 3. Esquema general de la estructura de un SC. ....	15
Figura 4. Modelo de Circuito Equivalente usado por el Fabricante.....	21
Figura 5. Esquema del modelo del fabricante para la validación de los parámetros calculados. .....	22
Figura 6. Modelo de circuito equivalente de Zubieta.....	23
Figura 7. Esquema de validación de los parámetros de Zubieta calculados usando el bloque “Supercapacitor” de Simscape.....	23
Figura 8. Diagrama de bloques del modelo de Zubieta para comparación con el bloque compacto “Supercapacitor” de Simscape. ....	24
Figura 9. Esquema de simulación de la carga de Zubieta aplicada al modelo del fabricante. .....	25
Figura 10. Comportamiento del voltaje del modelo del fabricante y de la medición real. ....	28
Figura 11. Comportamiento del modelo de Zubieta obtenido a partir del modelo del fabricante por simulación. ....	29
Figura 12. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo de Zubieta en comparación con la medición real.....	30
Figura 13. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo del fabricante luego del ajuste de parámetros. ....	31
Figura 14. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo de Zubieta luego del ajuste de parámetros. ....	32
Figura 15. Comparación del diagrama de bloques expandido con el bloque compacto del modelo de Zubieta. ....	34

**Índice de tablas**

Tabla 1. Diferentes materiales de electrodos y electrolitos para supercapacitores [13]......	16
Tabla 2. Modelos de SC segmentados en categorías. ....	17
Tabla 3. Expresiones para el cálculo de los parámetros de las ramas RC. ....	21
Tabla 4. Descripción de los eventos de la metodología de Zubieta para la determinación de sus parámetros. ....	26
Tabla 5. Parámetros del modelo del fabricante. ....	28
Tabla 6. Parámetros del modelo de Zubieta. ....	29
Tabla 7. Parámetros del modelo del fabricante ajustados a la medición real.....	31
Tabla 8. Parámetros del modelo de Zubieta ajustados a la medición real. ....	33

## Dedicatoria

A mis padres, por su apoyo incondicional y confianza en cada etapa de mi formación profesional

## Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al director de este trabajo, Ing. Ciro Larco, por su valiosa orientación y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto. Asimismo, agradezco a los técnicos del laboratorio de Micro-Red por su colaboración y disposición para facilitar los recursos y procesos necesarios dentro de sus posibilidades. Su contribución resultó esencial para la ejecución de este estudio.

## 1. Generalidades

### 1.1. Introducción

Los sistemas de almacenamiento de energía tienen un rol fundamental en un amplio rango de aplicaciones industriales, con características como energía específica, potencia específica, vida útil, fiabilidad, y seguridad (Zhang et al. 2018a). Los dispositivos más comunes de almacenamiento suelen ser las baterías de plomo-ácido y las baterías de iones de litio, debido a que poseen una alta densidad de energía. No obstante, estas tecnologías carecen de la habilidad de entregar grandes potencias en cortos periodos de tiempo, es decir, poseen una baja densidad de potencia. En este contexto, los supercapacitores (SCs), también conocidos como ultracapacitores, o capacitores de doble capa eléctrica representan una solución a este inconveniente debido a su alta densidad de potencia, siendo muy relevantes en aplicaciones donde se requiere una rápida entrega de energía en cortos períodos de tiempo. Actualmente, los SCs se aplican en redes eléctricas de potencia, industrias médicas de gran escala, vehículos eléctricos, vehículos submarinos autónomos y vehículos aéreos (Wang et al. 2021).

Para que los SCs puedan integrarse de manera eficiente en estas aplicaciones es necesario utilizar un modelo de su comportamiento que permita representar su dinámica real. Modelos de SCs se han desarrollado en una gran variedad, pudiéndose distinguir seis categorías como modelos electroquímicos, modelos de circuito equivalente, modelos inteligentes, modelos de orden fraccionario, modelos de auto descarga y modelos térmicos, cada uno con ventajas y limitaciones según el contexto de aplicación. Dentro de los modelos de circuito equivalente, también existe una gran variedad de modelos, desde modelos que consideran comportamiento lineal hasta aquellos que consideran la dinámica no lineal del SC. Entre estos, los modelos de tres ramas RC en paralelo son el foco de este trabajo, Sin embargo, dichos modelos no incorporan explícitamente los efectos del envejecimiento, lo cual puede generar discrepancias entre la respuesta simulada y la medición real.

En este trabajo se identifican los parámetros de dos modelos de circuito equivalente aplicados a un banco de supercapacitores conformado por módulos del fabricante Maxwell Technologies, con más de una década de uso. La metodología parte de la información contenida en la hoja de datos del fabricante, a partir de la cual se obtienen los parámetros del modelo base. Posteriormente, se simula el comportamiento del voltaje en los terminales del banco, con el fin de identificar las discrepancias esperadas frente a las mediciones reales debido al envejecimiento del sistema. A continuación, se realiza un ajuste numérico de los parámetros del modelo para analizar los cambios que podrían haber sufrido sus componentes internos hasta alcanzar el estado actual. Adicionalmente, se obtienen los parámetros del

modelo de Zubieta, que incorpora la dependencia no lineal de la capacitancia con el voltaje, utilizando como referencia la simulación de la prueba de carga a corriente constante aplicada sobre el modelo del fabricante en Simulink. Dichos parámetros también son ajustados numéricamente para comparar su capacidad de representación frente a la medición real. Este análisis permite evaluar la aplicabilidad y limitaciones de ambos modelos ante condiciones de envejecimiento avanzado, y plantea recomendaciones orientadas a mejorar su precisión mediante ensayos experimentales adicionales.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar los parámetros de la caracterización de capacitor de doble capa (DLC) del banco de supercondensadores del laboratorio de Microred mediante simulación de pruebas experimentales para reducir la incertidumbre en los análisis.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Realizar el estado del arte de los supercondensadores, identificando modelos matemáticos y aplicaciones relevantes mediante una revisión de literatura.

Analizar las características técnicas y el estado actual del banco de supercapacitores en el laboratorio de Microred, recopilando información proporcionada por las autoridades responsables y a través de inspección directa.

Obtener los parámetros de acuerdo con la caracterización DLC, simulando la prueba experimental y validando los resultados con una medición real.

Realizar el modelamiento del supercondensador de la Microred bajo la caracterización DLC en Simulink/Simscape, integrando los parámetros obtenidos y construyendo un diagrama de bloques que permita realizar simulaciones sin necesidad de configuraciones adicionales.

## **1.3. Alcance**

Este trabajo busca obtener los parámetros de la caracterización DLC del banco de supercapacitores del Laboratorio de Microred mediante la simulación de la aplicación de una metodología experimental al modelo del fabricante. Una vez obtenidos los parámetros, se realiza un modelo del banco de SCs en Simulink/Simscape, integrando los parámetros obtenidos en un diagrama de bloques y se realiza simulaciones utilizando este diagrama para comprobar su validez comparando con el bloque ya integrado en Simulink de un SC.

## **1.4. Justificación**

En el laboratorio de Microred de la Universidad de Cuenca se encuentran diversos elementos cuyos parámetros matemáticos requieren ser revisados con mayor detalle para un análisis

adecuado. Uno de estos elementos es el banco de supercondensadores (SCs). Conocer sus parámetros implica que los resultados de futuros análisis y simulaciones posean una baja incertidumbre y permite que sea implementado en aplicaciones donde se requiere conocer su comportamiento lo más cercano su estado actual. Los parámetros del SC son esenciales para que pueda ser implementado en importantes aplicaciones que describe (Zhang et al. 2018b) tales como fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), en donde se utilizan en combinación con baterías para suprimir el pico de potencia aplicado a las baterías durante el tiempo de respaldo y una entrega completa de la potencia durante los cortes de energía de la red; en electrónica de potencia, donde los SCs pueden ser una alternativa reduciendo el tamaño de las unidades de respaldo de energía y por tanto su costo; en la integración de energías renovables, conformando la unidad de almacenamiento de energía y mitigando los impactos de la intermitencia de generación con energías renovables; para el almacenamiento de energía híbrido, al ser un complemento ideal a las celdas de combustible y baterías recargables que poseen alta energía pero respuesta lenta; entre otras aplicaciones industriales.

Al lograr estos objetivos, este trabajo contribuye a obtener una representación adecuada del comportamiento del SC en donde futuros investigadores obtengan resultados confiables en sus simulaciones o aplicaciones. Además, este trabajo presenta un punto de partida para el modelamiento de la degradación del supercapacitor del Laboratorio de Microred.

## 2. Revisión de la literatura

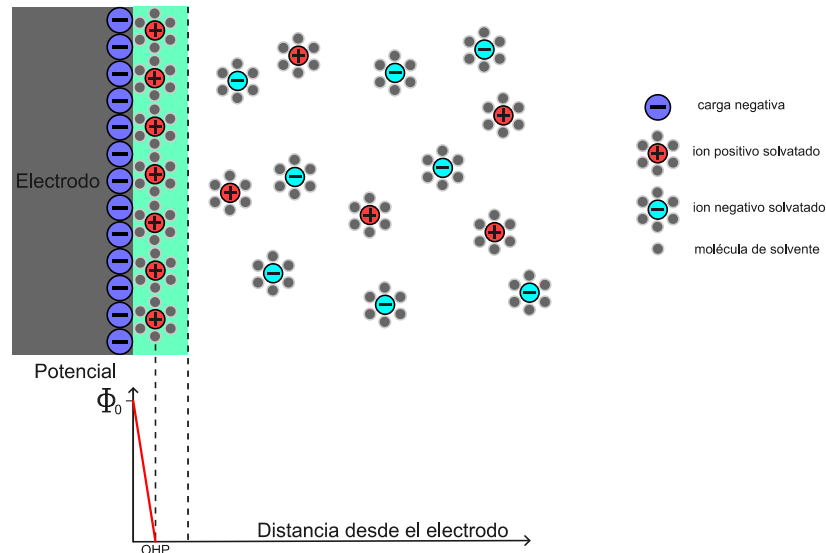
En esta sección se expone una visión general sobre el origen y evolución del concepto de doble capa eléctrica, la estructura y funcionamiento de los supercapacitores, los materiales utilizados en su fabricación y los principales enfoques de modelado que permiten predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas.

### 2.1. Capacitores de doble capa eléctrica

#### 2.1.1. La doble capa eléctrica

La naturaleza de las interacciones en la interfaz electrodo-electrolito fue explicada por primera vez por Helmholtz en 1850 dando lugar al término <<Doble capa eléctrica>> (Helmholtz 1879). Helmholtz asumió que las interacciones entre el electrodo y el electrolito eran de naturaleza electrostática, dado que el electrodo mantiene una densidad de carga que surge de un exceso o deficiencia de electrones en su superficie. Esta carga es balanceada por una redistribución de los iones presentes en el electrolito cerca de la superficie del electrodo. Esto forma una región cerca de la superficie del electrodo como se observa en la **Figura 1**. La distancia a la cual se acercan los iones de la superficie está limitada por el radio del ion y el

tamaño de las moléculas del solvente. Toda esta interacción forma dos capas de carga y una caída de potencial en esta región, denominada el Plano Helmholtz Exterior (OHP), de la solución. El resultado es análogo al comportamiento de un capacitor eléctrico de dos placas separadas por alguna distancia, donde la caída de potencial se da de manera lineal a través de ellas.



*Figura 1. Modelo de interacciones electrostáticas en la interfaz electrodo-electrolito según Helmholtz.*

El modelo Helmholtz de la doble capa eléctrica simplificaba el comportamiento del electrolito, al no considerar aspectos como la difusión, la absorción en la superficie y la interacción entre los momentos dipolares del solvente y el electrodo (Department of Chemical Engineering and Biotechnology 2013). Estos aspectos fueron considerados más tarde por Stern en 1924 (Stern 1924). Stern asumió que los iones pueden moverse en la solución y las interacciones electrostáticas están influenciadas por un movimiento browniano. Esto resulta en una región cercana a la superficie del electrodo que incluye la OHP y una región con una cantidad decreciente de iones conforme se aleja de la superficie. De esta manera, se produce una región, denominada capa difusa, donde el potencial decae no linealmente. Este modelo y la caída de potencial se puede entender como se muestra en la **Figura 2**.

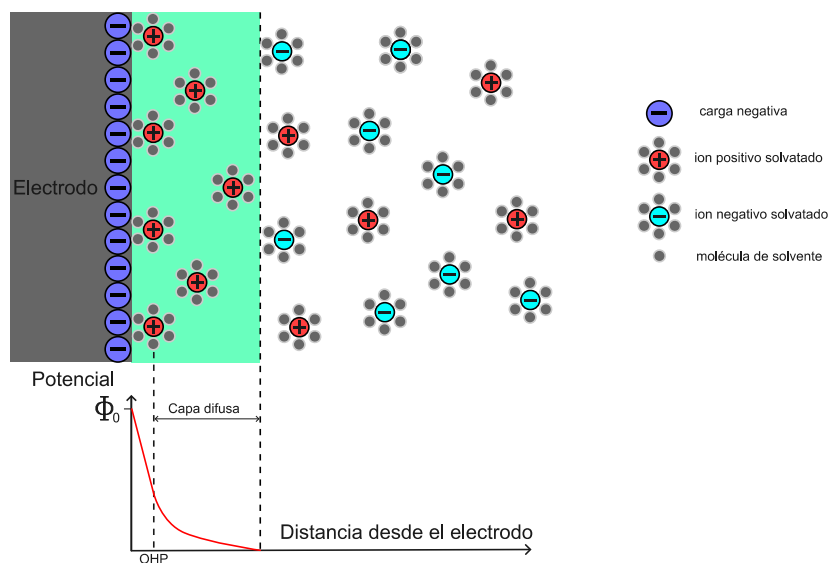


Figura 2. Modelo de interacciones electrostáticas en la interfaz electrodo-electrolito según Stern.

### 2.1.2. Supercapacitores

El primer supercapacitor fue patentado por Howard Becker en 1957 bajo el nombre de capacitor electrolítico de bajo voltaje, estableciéndolo como un dispositivo de almacenamiento de energía (Becker 1957). Este dispositivo incluye un contenedor aislante con mínimo dos electrodos de carbono porosos separados e inmersos en un electrolito para formar la doble capa eléctrica que produce una gran capacitancia a bajo voltaje. La compañía eléctrica de Nippon (NEC) empezó a utilizar esta tecnología como dispositivos de respaldo de memoria de computadoras, sin embargo, más tarde, identificaron que se comportan como capacitores de alta capacidad específica, de tal manera que cuando la compañía de petróleo estadounidense SOHIO patenta un capacitor con forma de disco, NEC utiliza la licencia de esa tecnología en 1971 para lanzar el primer supercapacitor comercial. Para el año 1980 varias compañías estaban produciendo los capacitores electroquímicos (Sharma y Bhatti 2010).

Un supercapacitor de manera general está compuesto por dos electrodos, una membrana separadora y electrolito, como se muestra en la **Figura 3**, donde se observa a los electrodos en contacto con el electrolito y separados por una membrana que permite la movilidad de los iones pero prohíbe la interacción eléctrica. La energía eléctrica se almacena a través de la formación de estructuras de doble capa eléctrica en la interfaz de cada electrodo con el electrolito, que funcionan de manera análoga a capacitores convencionales. Este almacenamiento de energía no requiere cambios en los procesos o estructura química, a

excepción de reacciones faradaicas rápidas y reversibles que se dan en el electrodo opuesto (Khaled Laadjal y Marques Cardoso 2021).

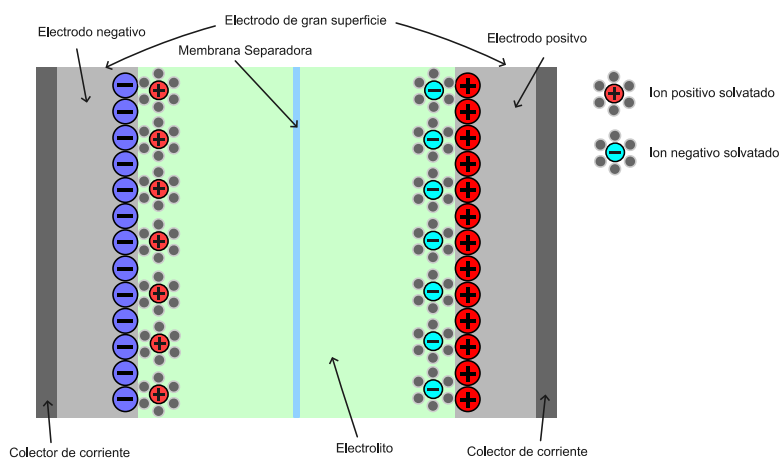


Figura 3. Esquema general de la estructura de un SC.

El electrodo en los SCs tiene un gran impacto en la capacitancia total. Esto depende principalmente del material utilizado y sus características físicas como la porosidad y conductividad. Comúnmente son utilizados los electrodos de carbono y estos pueden ser modificados por tratamiento de oxidación fuerte junto con la deposición de partículas metálicas oxidadas y polímeros conductores para mejorar la capacitancia final, a través de efectos rápidos de pseudocapacitancia faradaica (Frackowiak y Béguin 2001). Una extensa revisión de electrodos de carbono se realiza en (Frackowiak y Béguin 2001). Por su parte, la porosidad del electrodo es crucial en el rendimiento del SC, provocando una gran área efectiva de varios ordenes de magnitud más grande que el área geométrica del capacitor. Sin embargo, la medición del área efectiva es complicada, tal que, en (Chatterjee et al. 2024) se propone medir la accesibilidad de la estructura de poros mediante la dependencia del voltaje de la doble capa. El trabajo de (Weber, Reichenauer, y Pflaum 2015) proporciona un entendimiento más profundo de los electrodos de carbono, permitiendo una estimación cuantitativa de los parámetros estructurales relevantes. Los distintos tipos de materiales utilizados para electrodos de supercapacitores se mencionan en (Saini 2023), de los cuales se muestran algunos que producen la mayor capacitancia específica en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Diferentes materiales de electrodos y electrolitos para supercapacitores (Saini 2023).

Material	Electrolito	Voltaje de operación (V)	Capacitancia específica (F/g)
Materiales basados en carbono			
Nanofibras de carbono	1 M KOH	1.0	192
Aerogel de carbono	1.5M Et <sub>3</sub> MeNBF <sub>4</sub> + PC	3.0	160
Tela de fibra de carbono activado	6M/L KOH	1.0	208
Carbono mesoporoso	30 wt% KOH	0.9	180
Grafeno de pocas capas	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.8	186
Carbono activado	1M Et <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> + PC	1.5	40
Polímeros conductores			
PANI/MnO <sub>2</sub>	0.1 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.2	715
PANI/carbon activado	6 M KOH	0.9	588
PANI	Electrolito de polímero de gel	0.7	259
Óxidos metálicos de transición			
RuO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	0.5M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.0	650
Co-Ni óxidos/CNTs	1 M KOH	1.0	569
WC/carbono	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.9	477

El voltaje óptimo para un SC está limitado por el mínimo voltaje requerido para descomponer el electrolito en sus constituyentes mediante electrólisis, es decir, el voltaje de descomposición (Khaled Laadjal y Marques Cardoso 2021). Este voltaje no suele superar los 3 voltios y es la razón del voltaje de operación bajo de los supercapacitores. Algunos electrolitos y sus voltajes de operación se muestran en la **Tabla 1**.

## 2.2. Modelamiento de Supercapacitores

Existe una gran variedad de modelos desarrollados que buscan representar el comportamiento del SC. Estos modelos pueden ser agrupados en seis grandes categorías de modelos: Modelos electroquímicos, modelos de circuito equivalente, modelos inteligentes, modelos de orden fraccionario, modelos de auto descarga y modelos térmicos. Modelos novedosos y clásicos de cada una de estas categorías se resumen en la **Tabla 2**.

Los modelos electroquímicos y de orden fraccionario tienden a ser los más populares para modelar el comportamiento eléctrico. Estos proveen una alta precisión pero una pobre potencia computacional. Esto último debido que logran capturar todo el mecanismo de reacción dentro de los SCs al costo de ecuaciones diferenciales combinadas, lo cual es un problema para la gestión de energía y control en tiempo real (K. Laadjal y Marques Cardoso 2021).

Los modelos de circuito equivalente están basados en evidencia empírica, y resultados empíricos bajo ciertas condiciones de operación. Esto provoca que no sean lo suficientemente adecuados para representar la dinámica del SC bajo distintas condiciones de operación. Sin embargo, su exactitud en cortos periodos de tiempo es lo que los hace atractivos para ciertas aplicaciones. Varios modelos de circuito equivalente han sido comparados en (Miniguano et al. 2019), que incluye la implementación en Simscape de Zubieta. En (Suo et al. 2015) se hace una revisión centrada en los modelos de circuito equivalente.

De acuerdo con (Berrueta et al. 2014), el uso de modelos térmicos para predecir la temperatura de los SC también ha sido ampliamente estudiado. Estos modelos pueden considerarse en dos grupos. Un grupo de estos modelos consta de modelos detallados basados en ecuaciones diferenciales relacionadas con la geometría y materiales del SC, calculando como se distribuye la temperatura en el interior con métodos numéricos. A pesar de ser altamente precisos, tienen la desventaja de requerir un tiempo de simulación considerable. En el otro grupo están los modelos sencillos que consideran al SC como un cuerpo homogéneo y compacto, el calor se genera de manera uniforme, representándose como un circuito equivalente. La ventaja es que estos modelos permiten una simulación sencilla y rápida con una precisión adecuada para varias aplicaciones.

*Tabla 2. Modelos de SC segmentados en categorías.*

Categoría	Autor/es	Descripción
Modelos electroquímicos	(Helmholtz 1879)	Descripción de la interacción electrostática en la interfaz electrodo-electrolito como una doble capa, que provoca una caída de potencial lineal.
	(Gouy 1910),(Chapman 1913)	Modificación del modelo de Helmholtz para permitir la movilidad de iones a través de los efectos de difusión y electrostáticos en soluciones electrolíticas.
	(Stern 1924)	Asociación del modelo de Helmholtz y el modelo de Gouy-Chapman dividiendo la interfaz en dos partes separadas: la línea Stern y la capa difusa.
	(Bikerman 1942)	Se tiene en cuenta el volumen de los iones y sus propiedades.
	(Verbrugge y Liu 2005)	Modelo unidimensional basado en la teoría de soluciones diluidas y la ciencia de electrodos porosos, asumiendo al SC como un objeto continuo, homogéneo e isotrópico.
Modelos de circuito equivalente	(Charoen-amornkitt et al. 2023)	Sugiere un método unificado de los modelos CV y EIS mediante el modelo de elemento de fase constante para caracterizar el comportamiento no ideal de los EDLC.
	(Schaeffer et al. 2016)	Se analiza el comportamiento electroquímico se SCs de carbono con electrolitos de líquido iónico, mediante EIS calibrada y modelado por elementos finitos.
	(Nelms, Cahela, y Tatarchuk 2003)	Modelo circuito "Ladder" a partir de datos de impedancia AC.
	(Zubieta y Bonert 2000)	Se utilizan tres ramas RC en paralelo, con una de ellas de capacitancia de voltaje dependiente.

Categoría	Autor/es	Descripción
Modelos Inteligentes	(Quintáns et al. 2017)	Modelo RC en paralelo que considera la dependencia de los parámetros con el voltaje, ajustándolos a partir de la respuesta transitoria usando regresión lineal sobre datos experimentales. Se utilizan pulsos de corriente para la identificación de parámetros.
	(Sejin Noh et al. 2008)	Modelo de tres ramas de transmisión con capacitancias de constante de tiempo variable. Los parámetros identificados a partir de resultados experimentados en el software PSIM.
	(Michalczuk, Grzesiak, y Ufnalski 2015)	Modelo de resistencia en serie con una rama RC paralelo para representar el comportamiento en conjunto con batería de ion de litio. Los parámetros son variables.
	(Suo et al. 2015)	Presenta una mejora del modelo de tres ramas mediante ecuaciones de estado y resistencia de fuga variable para modelar la autodescarga.
	(Jannif et al. 2023)	Modelado de un circuito de dos ramas, estimando los parámetros mediante una técnica de minimización restringida fuera de línea, basada en unca ecuación matricial a partir de manipulaciones algebraicas del modelo.
	(Lemian, Bode, y Lapusan 2025)	Combinación de circuito RC con un método híbrido de estimación de parámetros (HyMASC).
	(Wang et al. 2022)	Simplificación del modelo de tres ramas a dos ramas RC para mejorar la velocidad de cálculo, utilizando un Filtro de Kalman Extendido (EKF) para estimar estados y parámetros del sistema.
	(Naresh, Sai Vinay Kishore, y Seshadri Sravan Kumar 2023)	Desarrollo de un acercamiento basado en regresión lineal para la estimación de los parámetros del circuito equivalente.
	(Xu et al. 2019)	Mejora del circuito de dos ramas con una fuente controlada de corriente para describir en tiempo real las características de operación de carga, descarga y autodescarga de un SC.
	(Marin-Coca et al. 2023)	Identificación de los parámetros del modelo de dos ramas, a partir de datos experimentales, obtenidos de una descarga del SC a corriente constante.
Modelos de orden	(Wang et al. 2024)	Siete algoritmos de optimización inteligente se usan para la identificación de parámetros, incluyendo cinco métodos de fusión de resultados para mejorar la predicción del voltaje.
	(Ahmed et al. 2021)	Modelo de predicción basado en técnicas de Machine Learning para estimar el rendimiento de SCs con electrodos de carbono, considerando su estructura, y empleando redes neuronales (ANN) y bosques aleatorios (RF).
	(Reddy et al. 2023)	Se modela la capacitancia específica de los electrodos basados en carbono usando ANN, logrando un entendimiento de como se ve afectada la capacitancia específica.
	(Wu, Hung, y Hong 2012)	Modelo dinámico no lineal en línea, basado en un modelo lineal inicial derivado de espectroscopía de impedancia y un identificador de parámetros implementando mediante una red neuronal de retropropagación.
	(Yousri, Fathy, y Rezk 2021)	Propone algoritmo metaheurístico CLMPA para optimizar los parámetros del modelo de circuito equivalente de SCs.
Modelos de orden	(Yasin, Dhaouadi, y Mukhopadhyay 2024)	Basado en el modelo de Zubieta de circuito equivalente, optimizando los parámetros mediante combinación de algoritmos metaheurísticos con técnicas de gradiente.
	(Satpathy et al. 2023)	Basado en la teoría de Drude para caracterizar la descarga de SCs, usando la ley de potencias en lugar de la regla exponencial. Los

Categoría	Autor/es	Descripción
fraccionario	(Wang, Li, y Chen 2020)	parámetros se identifican por ajuste de mínimos cuadrados. Modelo basado en análisis experimental mediante espectroscopía de impedancia electroquímica. Incluye modelos compensados por temperatura junto con la aplicación de Particle Swarm Optimization (PSO).
	(Riu, Retiere, y Linzen 2004)	Se sugiere un modelo de medio orden de SCs que reduce la sobre carga computacional.
	(Martynyuk y Ortigueira 2015)	Modelo de orden fraccionario basado en una función de transferencia obtenida por mínimos cuadrados ajustando los datos de impedancia del capacitor electroquímico.
	(Bertrand et al. 2010)	Se utiliza un conjunto de sistemas lineales de orden fraccionario para obtener un modelo no lineal del SC.
	(Martín et al. 2008)	Un modelo de EDLCs se obtiene a partir del uso de cálculo fraccionario.
	(Dzielinski, Sarwas, y Sierociuk 2010)	Uso de los resultados en el dominio de la frecuencia se usan para validar la respuesta del SC en el dominio del tiempo.
	(Gabano, Poinot, y Kanoun 2015)	Se identifica la impedancia del SC usando un modelo fraccionario continuo LPV.
	(Ricketts y Ton-That 2000)	La tasa de autodescarga de SCs con electrodos de carbono y electrolitos orgánicos se interpreta a partir de la difusión de iones y la fuga de carga a través de la doble capa en la interfaz electrolito-carbono.
	(Black y Andreas 2009)	Se examina el efecto de la redistribución de la carga en el perfil de autodescarga de electrodos de carbono poroso.
	(Niu, Conway, y Pell 2004)	La autodescarga de la doble capa es entendida utilizando mediciones de corriente flotante potencioestáticas en electrodos porosos.
Modelos de autodescarga	(Yang y Zhang 2011)	Se modela la resistencia de fuga variable como una función del voltaje terminal del SC en lugar del tiempo de autodescarga.
	(Junxing, Jianxin, y Changshi 2023)	Descripción cinética de la autodescarga en SCs, basada en la revisión del modelo logarítmico. El modelo incluye dos parámetros y permite calcular de forma algebraica el tiempo final en el que la tensión cae a cero desde la tensión inicial de carga.
	(Schiffer, Linzen, y Sauer 2006)	Mediciones de temperatura durante ciclos de carga y descarga muestran que el calor en un SC es resultado de una generación de calor de Joule irreversible y una generación de calor reversible causada por un cambio en la entropía.
Modelos térmicos	(Dandeville et al. 2011)	Una técnica calorimétrica se desarrolla para determinar los perfiles de calor dependientes del tiempo de ECs.
	(Wang et al. 2013)	Se presenta un modelo térmico de elemento finito tridimensional, investigando la relación entre la máxima temperatura y la corriente de carga y descarga.
	(Al Sakka et al. 2009)	Modelo térmico basado en una analogía térmica-eléctrica que permite la determinación de la temperatura del SC.
	(Berrueta et al. 2014)	Modelo electrotérmico de un SC Maxwell. Predice el voltaje de operación y su temperatura como función de la corriente y temperatura ambiente.

Además de las categorías de modelos mencionadas, existen algunos modelos basados en análisis en el dominio de la frecuencia como (Fouda et al. 2019) y (Riu et al. 2004).

### 3. Metodología

Esta sección describe los materiales usados para la validación propuesta. Posteriormente, la metodología y el diseño del experimento que condujo a alcanzar los objetivos de este estudio es descrita a detalle.

#### 3.1. Materiales

##### 3.1.1. Banco de Supercapacitores Bajo Estudio

En el Laboratorio de Microred, un banco de supercapacitores está compuesto por diez capacitores de doble capa conectados en serie de 130 F y 56  $V_{DC}$  cada uno, modelo BMOD0130 P056 B03 del fabricante Maxwell Technologies, en un gabinete. El voltaje terminal del banco es 560  $V_{DC}$  con una capacidad total de almacenamiento de energía de 0.57 kWh. Conectado a este equipo se encuentra un convertidor de potencia nominal de 30 kW.

Este banco ha sido utilizado previamente en un estudio comparativo de su respuesta dinámica con respecto a otros tipos de almacenamiento de energía que se encuentran en el mismo laboratorio (Ochoa-Correa et al. 2024). En este estudio se revela que para extraer 0.189 kWh de energía eléctrica, es necesario 0.202 kWh durante el proceso de carga, mostrando una eficiencia del 92.4%. Además, se describe su dinámica como curiosa al presentar resultados de naturaleza lineal. En (Ochoa et al. 2022) se describe como fue utilizado este banco de supercapacitores mediante una técnica de control de frecuencia para reducir en un 30% las fluctuaciones de frecuencia de una microrred eléctrica aislada real con generación fotovoltaica y térmico diésel.

Hasta el instante de realizar la prueba de carga, este equipo, con aproximadamente 11 años desde su fabricación, permaneció almacenado sin carga por un tiempo aproximado de 6 meses.

#### 3.2. Descripción general de los métodos para obtener los parámetros

La determinación de los parámetros se realizó en dos etapas. En la primera se utiliza el método propuesto por el fabricante (Maxwell Tech 2009), utilizando la información de la hoja de datos de cada módulo para obtener los parámetros del banco de supercapacitores sin tener que realizar pruebas experimentales. La segunda etapa es seguir la metodología experimental del modelo de tres ramas de Zubieta (Zubieta y Bonert 2000), simulando la prueba de carga en Simscape con los parámetros obtenidos en la primera etapa. Esto se justifica dado que el fabricante menciona que los parámetros obtenidos mediante su método representan con alta precisión el comportamiento del SC a corto plazo.

### 3.3. Metodología para determinación de parámetros por el método del fabricante

El fabricante de cada uno de los módulos en el banco propone una forma para determinar los parámetros de cada supercapacitor y también de su configuración en N elementos en serie del mismo (Maxwell Tech 2009). De acuerdo con esta metodología, el supercapacitor es modelado mediante tres ramas RC en paralelo sin tener en cuenta la variación de la capacitancia con el voltaje, es decir, sus elementos son constantes, junto con una resistencia en paralelo que representa el comportamiento de auto descarga (**Figura 4**).

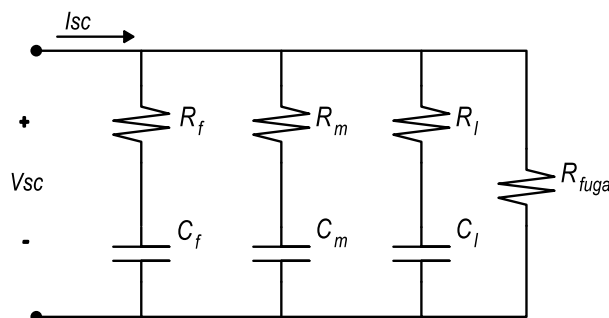


Figura 4. Modelo de Circuito Equivalente usado por el Fabricante.

Los parámetros del arreglo de N supercapacitores en serie se obtienen escalando los valores de resistencia serie equivalente  $ESR$ , capacitancia nominal  $C_0$ , voltaje nominal  $V_r$  y corriente de fuga  $I_{leak}$ , otorgados en la hoja de características del módulo supercapacitor con el cual se ha formado el banco, de acuerdo con las expresiones de la **Tabla 3**.

Tabla 3. Expresiones para el cálculo de los parámetros de las ramas RC.

	Rápida (fast)		Media (medium)		Lenta (slow)
$R_f$	$\frac{2}{3}N * ESR$	$R_m$	$909.3338 * N * ESR$	$R_s$	$2380.7 * N * ESR$
$C_f$	$\frac{1.05C_0}{N}$	$C_m$	$\frac{0.0947C_0}{N}$	$C_s$	$\frac{0.0947C_0}{N}$
$\tau_f$	$R_f C_f$	$\tau_m$	$R_m C_m$	$\tau_s$	$R_s C_s$
$R_{leak}$	$\frac{NV_r}{I_{leak}}$				

Los valores del supercapacitor utilizados, dados por el fabricante, son:

- Voltaje nominal  $V_r = 56 V$ .
- Corriente de fuga  $I_{leak} = 120 mA$ .
- Resistencia serie equivalente  $ESR = 8.1 m\Omega$ .
- Capacitancia nominal  $C_0 = 130 F$ .

El esquema para validar los parámetros obtenidos mediante estas expresiones se muestra en la **Figura 5**.

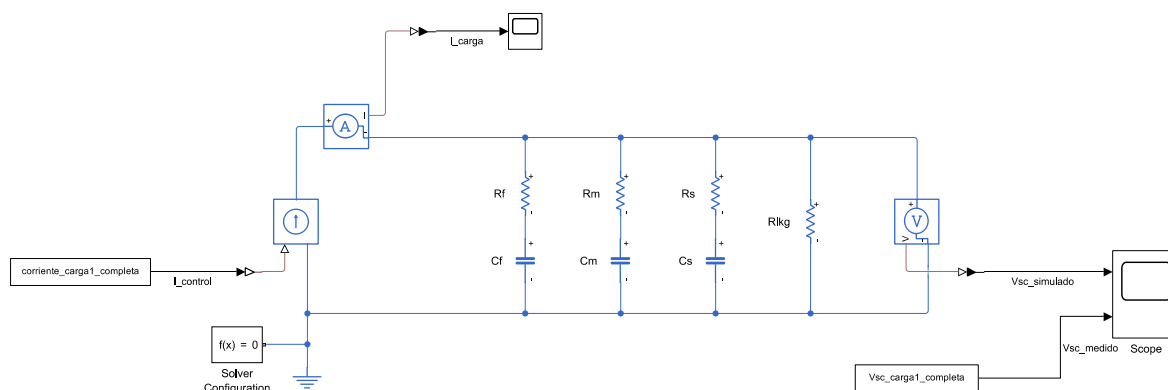


Figura 5. Esquema del modelo del fabricante para la validación de los parámetros calculados.

### 3.4. Metodología para la caracterización DLC de Zubieta

La caracterización del DLC mediante el modelo de Zubieta contempla la realización de una prueba de carga experimental. No obstante, debido a las limitaciones de los equipos disponibles en el laboratorio para llevar a cabo dicha prueba, se optó por simularla sobre el modelo proporcionado por el fabricante, utilizando los parámetros obtenidos a partir de la metodología descrita en la sección anterior. Posteriormente, sobre este modelo del fabricante, se aplica la metodología correspondiente al modelo de Zubieta.

El modelo y la metodología experimental que se simula se basa en el trabajo de Zubieta y Bonert (Zubieta y Bonert 2000). El modelo propuesto en ese trabajo busca representar el comportamiento en terminales del DLC para un intervalo de aproximadamente 30 minutos de forma confiable. Este método se plantea con la idea de representar la física del dispositivo mientras logra ser lo más simple posible de manera que sea una herramienta práctica de diseño. El modelo propuesto, cuyo circuito equivalente se muestra en la **Figura 6**, consta de tres ramas RC, con distintas constantes de tiempo, en paralelo:

- Rama inmediata ( $R_i$  y  $C_i$ ): Domina el comportamiento inmediato del DLC en respuesta al proceso de carga. Únicamente en esta rama se modela el comportamiento no lineal.
- Rama retrasada ( $R_d$  y  $C_d$ ): Domina el comportamiento de las terminales en el rango de minutos.
- Rama de largo plazo ( $R_l$  y  $C_l$ ): Domina el comportamiento para tiempos mayores a 10 minutos.

Además, se agrega una rama resistiva en paralelo para representar la propiedad de autodescarga.

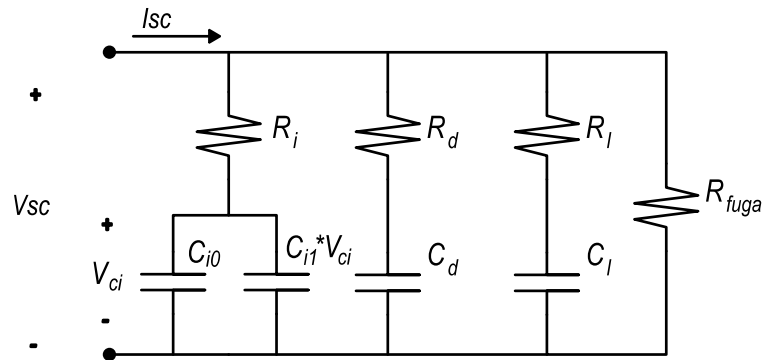


Figura 6. Modelo de circuito equivalente de Zubieta.

Uno de los esquemas utilizados para la validación de los parámetros calculados es el que se muestra en la **Figura 7**, el cual es un bloque de Simscape que ya integra el modelo de Zubieta, únicamente se debe ingresar los parámetros.

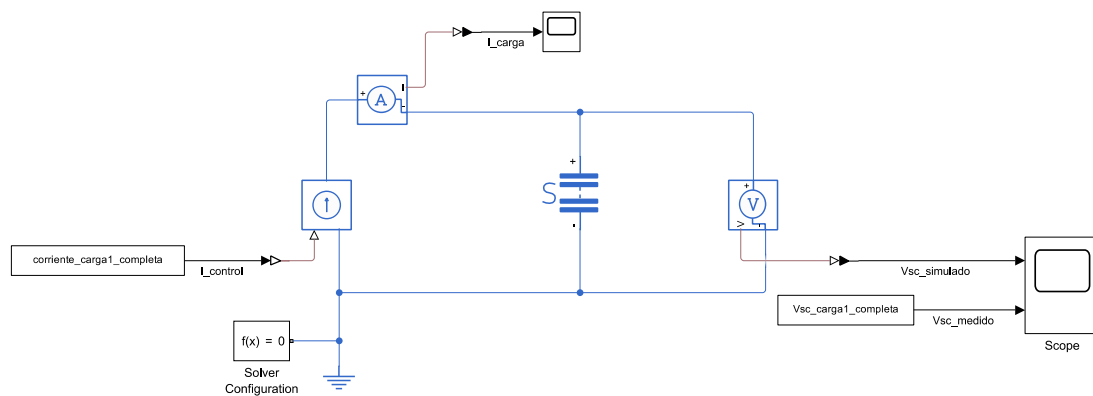


Figura 7. Esquema de validación de los parámetros de Zubieta calculados usando el bloque “Supercapacitor” de Simscape.

Utilizando el trabajo de (Miniguano et al. 2019), se ha realizado el diagrama de bloques del modelo de Zubieta (**Figura 8**) integrando los parámetros obtenidos, de manera que, no sea necesario ingresar los valores. Además, en este diagrama se puede alterar el modelo agregando elementos, como una cuarta rama RC o agregar otra capacitancia variable, para una posible mejora del modelo en alguna aplicación específica. Por último, se compara la validez de este diagrama con el bloque compacto de Simulink del SC.

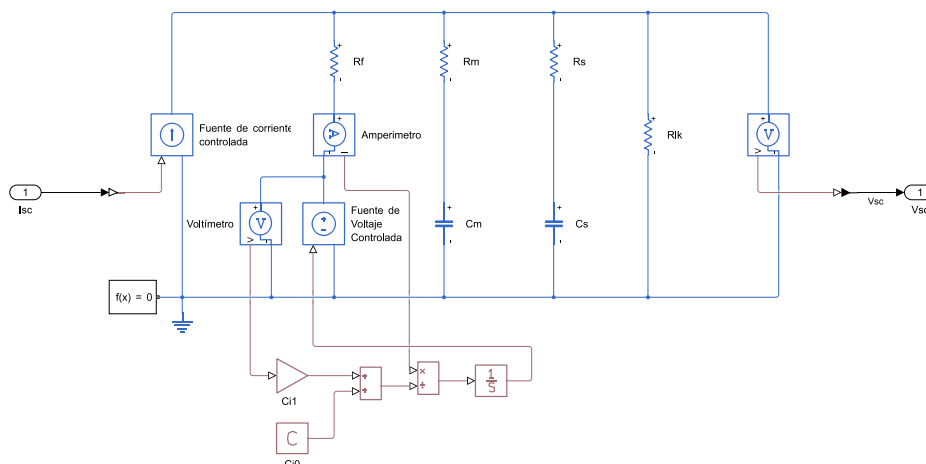


Figura 8. Diagrama de bloques del modelo de Zubieta para comparación con el bloque compacto "Supercapacitor" de Simscape.

### 3.4.1. Diseño del esquema de simulación de la prueba experimental

Para la prueba es necesario realizar el proceso de carga mediante una fuente controlada de corriente dado que una fuente de voltaje presenta considerables dificultades (Bonert y Zubieta 1997). La fuente de corriente debería ser controlada automáticamente para poder determinar de manera precisa la carga hacia o desde el capacitor. En este caso, el bloque que representa esta fuente en Simscape se denomina "Controlled Current Source".

De acuerdo con la ref. (Zubieta y Bonert 2000), la medición de los parámetros de cada rama del circuito equivalente requieren de un procedimiento de carga rápida a corriente constante de valor relativamente alto, mientras se mide el voltaje en terminales. Para ello, se menciona utilizar una corriente del 5% de la corriente de cortocircuito del SC sobre el cual realiza la experimentación.

Como se ha mencionado anteriormente, la corriente debe ser elevada para lograr un proceso de carga rápida del SC. Sin embargo, para realizar la prueba, se ha limitado al equipo disponible. El equipo para realizar la carga del SC con el cual se cuenta en el Laboratorio de Microred permitiría una corriente de carga de hasta 75 A. Por ello, se ha utilizado una corriente de 60 A para el proceso de carga.

La medición del voltaje en terminales se realiza con el bloque "Voltage Sensor", que será crucial para enviar la señal de voltaje hacia la fuente de corriente controlable, con la intención de interrumpir la carga cuando el voltaje alcance el voltaje nominal de 560 V del banco de SCs. El esquema para simular este proceso de carga es el que se muestra en la **Figura 9**. En esta se observa el modelo del fabricante del SC siendo alimentado por una fuente de corriente constante cuyo valor es controlado. Este control del valor de corriente permite

entregar 60 A de carga hasta que el voltaje de las ramas RC alcance el voltaje nominal de 560 V, cambiando a un valor de 0 A en ese instante. A partir de ese punto, únicamente se mide el voltaje hasta los 1800 segundos. Una vez obtenida la curva de voltaje, se procede a calcular los parámetros de acuerdo con la metodología de Zubieta.

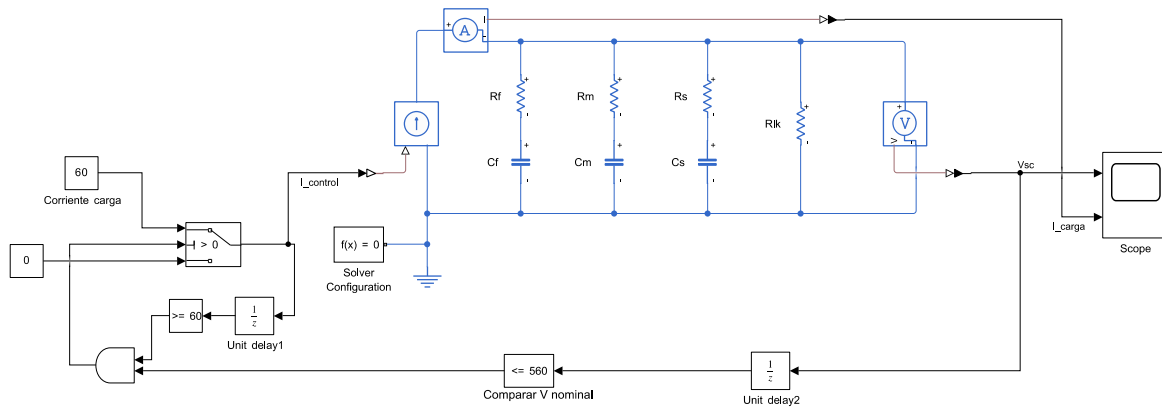


Figura 9. Esquema de simulación de la carga de Zubieta aplicada al modelo del fabricante.

### 3.4.2. Proceso de obtención de los parámetros del circuito equivalente de Zubieta

Como se ha mencionado previamente, se sigue la metodología de Zubieta para la simulación de la prueba experimental. El proceso de obtención de los parámetros se describe en n eventos, donde se mide el voltaje en terminales  $V_n$  y el tiempo  $t_n$  para cada evento. El instante en el que suceden estos eventos junto con las expresiones necesarias para el cálculo se resumen en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Descripción de los eventos de la metodología de Zubieta para la determinación de sus parámetros.

Evento n	Descripción
n = 0	Instante en el que se enciende la fuente de corriente con el voltaje del SC $V_0 = 0V$ y la carga inyectada en cero.
n = 1	Se espera un tiempo $t_1$ que corresponde al tiempo para que $I$ se eleve hasta la corriente de carga $I_{ch}$ . Experimentalmente $t_1 = 20\text{ ms}$ . Se mide $V_1$ , y se determina el parámetro $R_i$ con $R_i = \frac{V_1}{I_{ch}}$
n = 2	Se da cuando $V_2 = V_1 + \Delta V$ , siendo $\Delta V$ una constante que depende de la resolución de los sensores de voltaje. En este caso se utiliza $50\text{ mV}$ igual que en el trabajo de Zubieta. En este instante, se mide $t_2$ y se calcula $\Delta t = t_2 - t_1$ . Dado que el voltaje $V_{ci}$ es aproximadamente cero, entonces $C_{diff}(V) = C_{i0} + C_{i1}V_{ci}$ $C_{diff}(V) = C_{i0}$ Por tanto, el parámetro $C_{i0}$ está dado por $C_{i0} = \frac{I_{ch}\Delta t}{\Delta V}$
n = 3	Sucede cuando $V_3 = V_{nominal} = 560\text{ V}$ . Se debe medir $t_3$ y apagar la fuente de corriente.
n = 4	Sucede a $20\text{ms}$ después de $t_3$ , debido al tiempo de caída de la corriente, es decir, $t_4 = t_3 + 20\text{ ms}$ . En este instante, se mide $V_4$ , se calcula la carga total inyectada al SC con $Q_{tot} = I_{ch}(t_4 - t_1)$ para luego calcular la capacitancia equivalente con $C_{eq} = Q_{tot}/V_4$ , y se obtiene el parámetro $C_{i1}$ con $C_{i1} = \frac{2}{V_4}(C_{eq} - C_{i0})$
n = 5	Se da cuando $V_5 = V_4 - \Delta V$ y se mide $t_5$ y $\Delta t = t_5 - t_4$ . La capacitancia diferencial $C_{diff}$ se calcula con $C_{diff} = C_{i0} + C_{i1}V_{ci}$ Siendo, para este instante, $V_{ci} = V_4 - \frac{\Delta V}{2}$ . Luego, se calcula el parámetro $R_m$ con $R_m = \frac{V_{ci}\Delta t}{C_{diff}\Delta V}$
n = 6	Ocorre cuando $t_6 = t_5 + 3(R_m C_m)$ , considerando que $R_m C_m \approx 100\text{ s}$ , entonces $t_6 = t_5 + 300\text{ms}$ . Luego, se calcula el parámetro $C_m$ con la expresión $C_m = \frac{Q_{tot}}{V_6} - \left(C_{i0} + \frac{C_{i1}V_6}{2}\right)$
n = 7	Sucede cuando $V_7 = V_6 - \Delta V$ , se mide $t_7$ y $\Delta t = t_7 - t_6$ , y se calcula $R_s$ con $R_s = \frac{\left(V_6 - \frac{\Delta V}{2}\right)\Delta t}{C_{diff}\Delta V}$
n = 8	Se da cuando $t_8 = 1800\text{ s}$ , asumiendo que la redistribución de la carga ha finalizado, se mide $V_8$ y se calcula $C_s$ con $C_s = \frac{Q_{tot}}{V_8} - \left(C_m + C_{i0} + \frac{C_{i1}V_8}{2}\right)$

### 3.4.3. Consideraciones previas a una posterior aplicación de la prueba experimental

Previo a efectuar la prueba de carga se debería seguir la recomendación que menciona (Zubieta y Bonert 2000) de mantener las terminales del SC en cortocircuito durante algunas semanas, con el objetivo de tener una condición de cero carga, necesaria para la identificación de los parámetros.

Otra opción, en caso de no contar con el tiempo suficiente, es realizar el procedimiento de normalización, que puede tomar como máximo 2 días, que se menciona en (Bonert y Zubieta 1997).

4. Resultados y Discusión

4.1. Parámetros de acuerdo con el método del fabricante

Los parámetros obtenidos aplicando las expresiones de la **Tabla 3** considerando que el banco de SCs está formado por diez módulos en serie, es decir,  $N = 10$ , se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros del modelo del fabricante.

	Rápida (fast)		Media (medium)		Lenta (slow)
$R_f$	0.0540 $\Omega$	$R_m$	73.6560 $\Omega$	$R_s$	192.8340 $\Omega$
$C_f$	13.65 F	$C_m$	1.2308 F	$C_s$	3.2223 F
$\tau_f$	0.7371 s	$\tau_m$	90.6573 s	$\tau_s$	621.3744 s
$R_{leak}$	4667 $\Omega$				

El comportamiento que provocan estos parámetros es comparado con la medición real en el supercapacitor en la **Figura 10**. Se observa una clara discrepancia en la magnitud del voltaje del modelo, sin embargo, el comportamiento de las curvas es similar. Esto significa que los parámetros así obtenidos necesitan ser ajustados para lograr representar el comportamiento actual del banco de SCs.

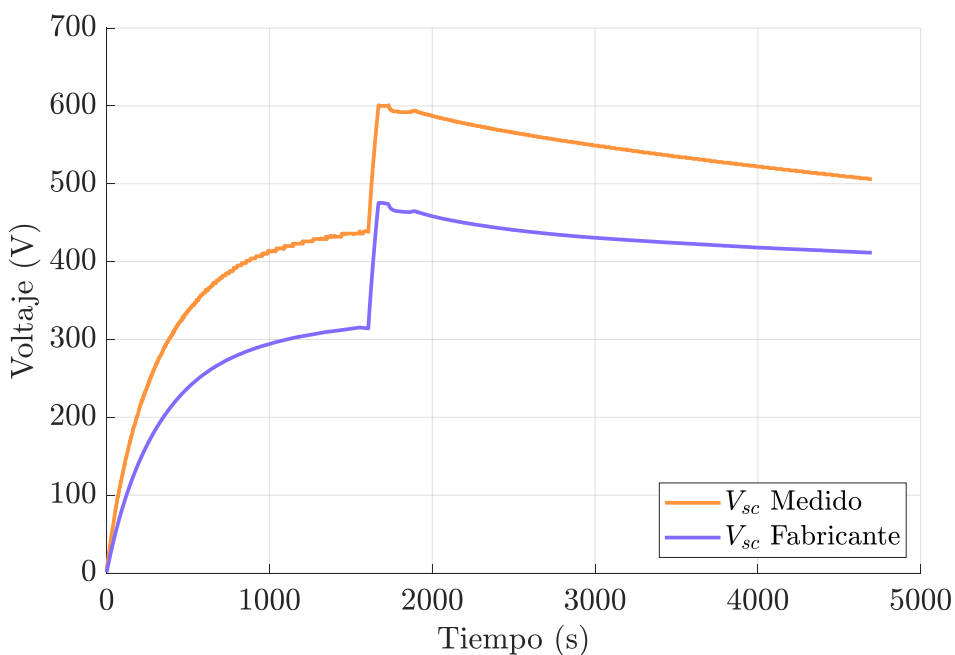


Figura 10. Comportamiento del voltaje del modelo del fabricante y de la medición real.

## 4.2. Parámetros de acuerdo con el método de Zubieta

Una vez aplicada la metodología de Zubieta sobre el modelo del fabricante, usando el esquema de la **Figura 9**, se han obtenido los nuevos parámetros que se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Parámetros del modelo de Zubieta.

	Rápida (fast)		Media (medium)		Lenta (slow)
$R_f$	0.0554 $\Omega$	$R_m$	75.2407 $\Omega$	$R_s$	309.0712 $\Omega$
$C_{i0}$	13.6986 F	$C_m$	1.9826 F	$C_s$	1.9827 F
$C_{i1}$	0.003296 F/V				
$R_{leak}$			5133.3 $\Omega$		

Estos parámetros son comparados con la curva utilizada para obtenerlos en la **Figura 11**, con el fin de validarlos. La curva muestra que los parámetros obtenidos mediante la simulación de la aplicación experimental logran un comportamiento adecuado del voltaje en terminales del SC. De acuerdo con Zubieta, esta metodología permite representar el comportamiento durante al menos 30 minutos, es decir, 1800 segundos, sin superar el 10% de error. El voltaje obtenido con la simulación de estos parámetros muestra que el error no supera el 5%. Por tanto, los parámetros calculados se consideran válidos.

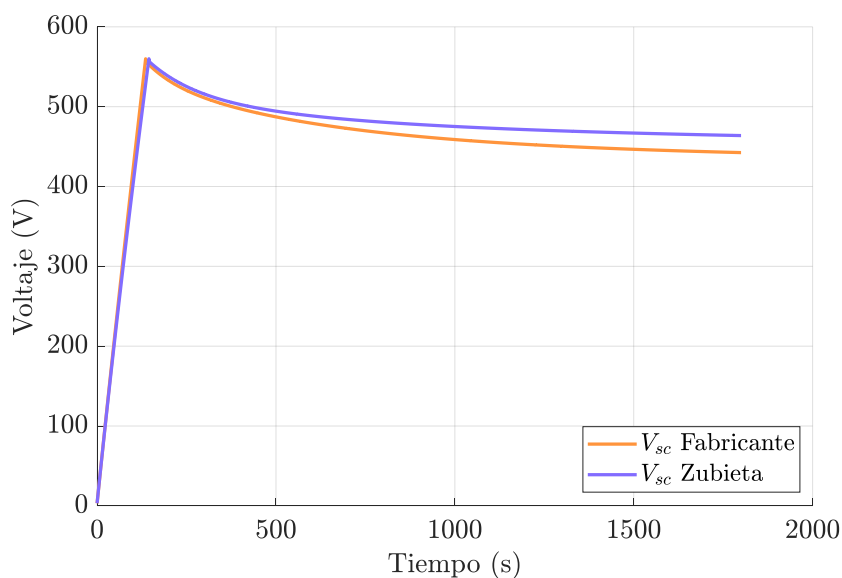


Figura 11. Comportamiento del modelo de Zubieta obtenido a partir del modelo del fabricante por simulación.

El comportamiento de estos parámetros en comparación con la medición real se puede observar en la **Figura 12**. En esta se muestra que, a pesar de capturar la forma general del perfil de voltaje, durante la etapa de precarga, el modelo subestima el voltaje respecto a la

medición real, implicando que la capacitancia total del modelo es mayor a la del sistema, como es de esperar debido al envejecimiento.

De manera similar al caso del fabricante, este comportamiento está alejado de representar la dinámica real del sistema, especialmente en magnitud y tasa de variación del voltaje, implicando la necesidad del ajuste de los parámetros.

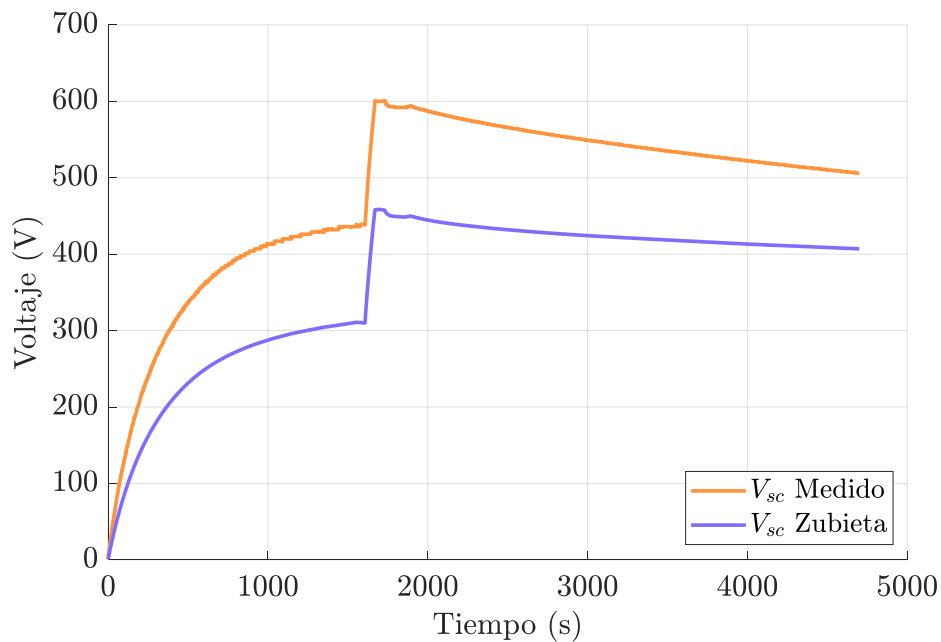


Figura 12. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo de Zubieta en comparación con la medición real.

### 4.3. Ajuste de parámetros del modelo del fabricante

La necesidad del ajuste de los parámetros del modelo fabricante se ha hecho evidente en secciones anteriores. En esta sección se analiza la posibilidad de lograr llevar el comportamiento del modelo del fabricante hacia la curva real medida ajustando los parámetros obtenidos según su metodología.

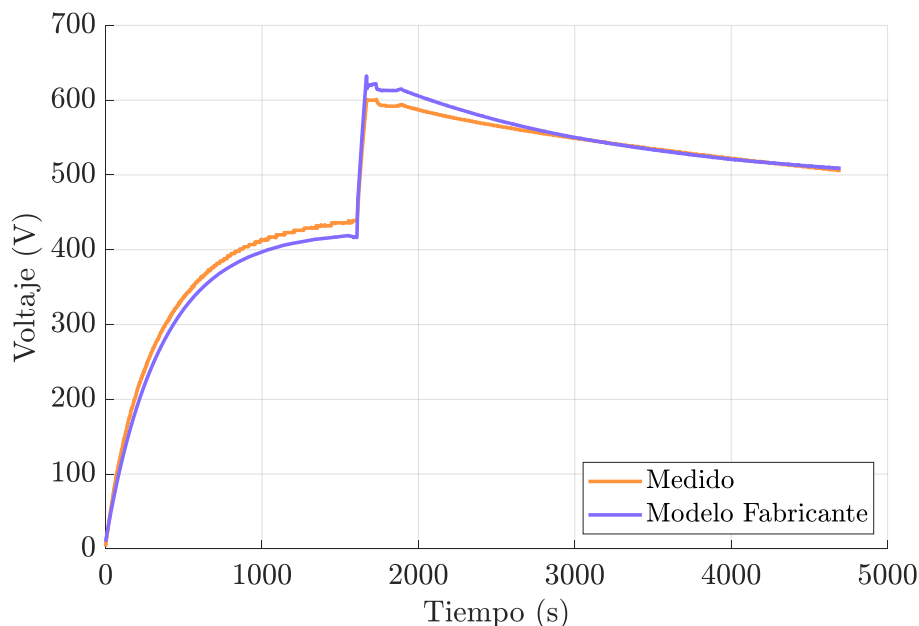


Figura 13. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo del fabricante luego del ajuste de parámetros.

Se ha realizado un ajuste de los parámetros por mínimos cuadrados, mediante la aplicación “Parameter Estimator” de Simulink, obteniéndose el comportamiento de la **Figura 13**. Este comportamiento ha sido el mejor resultado del ajuste de parámetros, resultado de la convergencia en 37 iteraciones, provocando los nuevos parámetros que se muestran en la **Tabla 7**. En esta tabla también se muestra el cambio absoluto que ha tenido cada parámetro, mostrando cambios importantes en estos.

Tabla 7. Parámetros del modelo del fabricante ajustados a la medición real.

	Rápida		Media			Lenta		
	(Valor   Cambio absoluto)		(Valor   Cambio absoluto)			(Valor   Cambio absoluto)		
$R_f$	0.6729 $\Omega$	1246.11%	$R_m$	428.12 $\Omega$	581.24%	$R_s$	425.2869 $\Omega$	220.55%
$C_f$	11.3104 F	82.86%	$C_m$	1.9979 F	162.33%	$C_s$	2.0310 F	63.03%
$\tau_f$	7.6107 s	1032.52%	$\tau_m$	855.34 s	943.49%	$\tau_s$	863.76 s	139.01%
$R_{leak}$	16848 $\Omega$			361.00%				

En la rama rápida ha habido un gran incremento en la resistencia y una ligera disminución de la capacitancia, provocado un gran aumento de la constante de tiempo de esta rama. Este gran incremento podría explicarse debido al bloqueo de los poros superficiales del material de los electrodos, sin embargo, un mayor análisis y varias pruebas son necesarias para llegar a una conclusión más sólida.

En la rama media, se produce un gran aumento de la resistencia y una disminución de la capacitancia, provocando un aumento de la constante de tiempo en aproximadamente nueve veces. En la rama lenta se observan cambios del mismo tipo, sin embargo, destaca que la constante de tiempo es muy cercana a la de la rama media, lo que indica que su respuesta no solo es más lenta, sino que ambas responden en tiempos similares.

La autodescarga representada por la resistencia en paralelo a las ramas RC se ve afectada debido a que ha aumentado 3.61 veces. Esto se entendería como una clara degradación del banco de supercapacitores.

A pesar de haber logrado un comportamiento del voltaje en terminales cercano al voltaje medido, aún existe un considerable error, especialmente en los instantes con cambios rápidos del voltaje. Esto resulta en una gran desventaja para aplicaciones donde se requiere conocer el comportamiento en tiempos cortos. Por tanto, ajustar los parámetros del modelo del fabricante, no logra una fiel representación del voltaje en terminales del SC.

#### 4.4. Ajuste de parámetros del modelo de Zubieta

La misma metodología de ajuste es aplicada a los parámetros del modelo de Zubieta aplicado al bloque de Supercapacitor de Simscape, obteniéndose el comportamiento de la **Figura 14**, con los nuevos parámetros y su cambio absoluto indicados en la **Tabla 8**. Los parámetros se obtienen al converger a las 11 iteraciones del método de mínimos cuadrados ejecutado en la aplicación "Parameter Estimator" de Simulink.

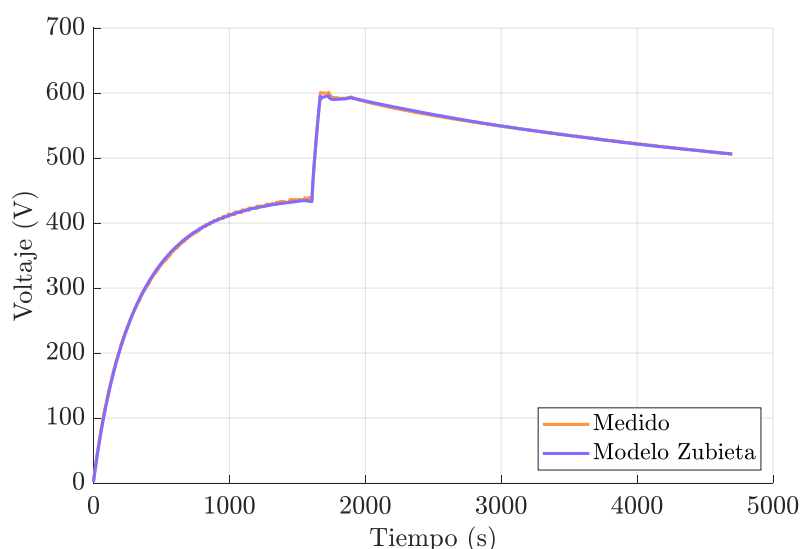


Figura 14. Comportamiento del voltaje en terminales del modelo de Zubieta luego del ajuste de parámetros.

Tabla 8. Parámetros del modelo de Zubieta ajustados a la medición real.

	Rápida		Media		Lenta			
	(Valor   Cambio absoluto)		(Valor   Cambio absoluto)		(Valor   Cambio absoluto)			
$R_f$	0.2362 $\Omega$	426.35%	$R_m$	1186.3 $\Omega$	1576.7%	$R_s$	1114.1 $\Omega$	360.5%
$C_{i0}$	8.9637 $F$	65.45%	$C_m$	0.89707 $F$	45.25%	$C_s$	5.4318 $F$	274.0%
$C_{i1}$	0.010617 $F/V$	322.12%						
$R_{leak}$	277.270 $k\Omega$				5401.4%			

Los parámetros ajustados presentan serios cambios respecto de los valores base. Se observa un deterioro importante en los componentes de la rama rápida, donde la resistencia  $R_f$  se ha incrementado al 426.35%, lo que indica una pérdida importante en la capacidad de conducción inmediata del banco. Esta degradación puede estar relacionada con la pérdida de conductividad del electrolito o envejecimiento de las conexiones internas. Por su parte, la capacitancia fija  $C_{i0}$  ha disminuido al 65.45%, sugiriendo una menor capacidad de almacenamiento de energía en respuestas rápidas. Además, la capacitancia variable  $C_{i1}$  presenta un incremento al 322.12%, lo que implica que la respuesta rápida se ha vuelto más sensible a los cambios de voltaje, posiblemente debido a que se han intensificado los efectos no lineales en el tiempo.

En la rama media, se observa un deterioro más grave. La Resistencia  $R_m$  presenta un incremento a más de 1500%, indicando una degradación considerable de la capacidad de conducción en tiempos intermedios. La capacitancia de esta rama también se reduce por debajo del 50%. Estos cambios resultan en una constante de tiempo más grande, que implica una respuesta más lenta en escalas de tiempo de minutos.

Se evidencia un cambio distinto en la rama lenta. Aunque la resistencia  $R_l$  aumenta al 360.5%, la capacitancia  $C_s$  aumenta 2.74 veces. Este resultado parece contradictorio al indicar una mejora en la capacidad, cuando se esperaría que disminuya con el envejecimiento. Sin embargo, se atribuyen estos resultados al proceso de ajuste del modelo, en el cual las ramas más rápidas han incorporado parte de la respuesta extendida en el tiempo, compensando el valor de capacitancia mayor para mejorar el ajuste de descarga a largo plazo. Es decir, el aumento de la capacitancia en esta rama no implica una mejora sino una representación más precisa del comportamiento medido en presencia de la degradación.

Por último, la resistencia de fuga  $R_{leak}$  necesita aumentar y superar el 5400 % de su valor original para lograr el ajuste de la curva. El aumento de la resistencia de fuga es coherente con el envejecimiento del dispositivo, dado que se espera que los electrodos y materiales

dieléctricos formen capas pasivas que incrementen el aislamiento interno. Debido a esto, el banco presenta menores corrientes de autodescarga, lo que puede parecer una mejora, sin embargo, también indica un deterioro de los mecanismos internos de conducción.

Dado que los parámetros indican tanto disminuciones de capacitancia como aumentos de resistencia, se recomienda realizar una descarga controlada a corriente constante para estimar la capacitancia efectiva a partir de los datos que se obtengan. Esto permitirá validar si los valores de capacitancia ajustados, que podrían estar sobreestimados debido al ajuste numérico en las ramas lentas, tienen relación con la capacitancia efectiva.

#### 4.5. Comparación del diagrama de bloques expandido del modelo de Zubieta

El diagrama expandido que representa el modelo de Zubieta es el de la **Figura 8**. Para validar este diagrama se ha comparado el comportamiento del voltaje en terminales con el bloque compacto “Supercapacitor” de Simscape. El resultado es el que se muestra en la **Figura 15**, observándose un comportamiento idéntico, lo cual valida el uso del diagrama expandido para futuros usos o modificaciones.

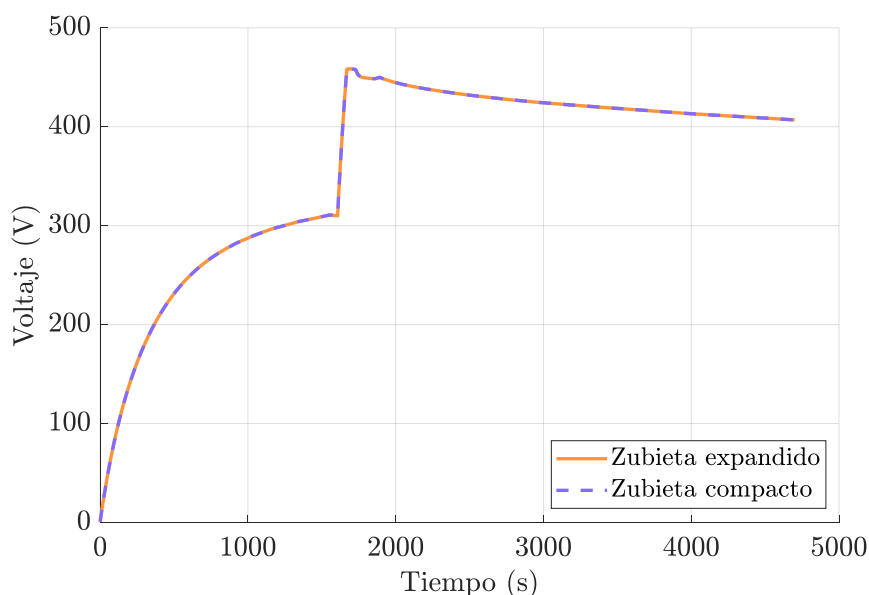


Figura 15. Comparación del diagrama de bloques expandido con el bloque compacto del modelo de Zubieta.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se han obtenido los parámetros de dos modelos de circuito equivalente de un banco de supercapacitores. El primero, correspondiente al modelo proporcionado por el fabricante, mostró una desviación significativa respecto al voltaje medido. Aunque se realizó un ajuste numérico de sus parámetros, no logró representar adecuadamente el comportamiento dinámico del banco en su estado actual, evidenciando su insuficiencia.

El segundo modelo implementado fue el modelo de Zubieta, el cual considera la variación de la capacitancia en función del voltaje. Inicialmente, sus parámetros fueron obtenidos sobre la base del modelo del fabricante, pero se realizó un ajuste numérico adicional para acercarse a los datos experimentales. Este ajuste permitió una coincidencia visual clara entre la curva simulada y la medida.

Entre los resultados más relevantes, se destacan los cambios sustanciales en los parámetros del modelo luego del ajuste: la resistencia en la rama media  $R_m$  aumentó en un 1576.7 %, la resistencia de fuga  $R_{leak}$  se incrementó en un 5401.4 %, y la resistencia de la rama rápida  $R_f$  creció en un 426.35 %. Estos cambios reflejan una degradación significativa en el estado del banco de supercapacitores, próxima al final de su vida útil, afectando su capacidad de respuesta tanto en escalas de tiempo rápidas como medias.

Una limitación importante de este trabajo es que el ajuste numérico de parámetros se basa en datos simulados y no considera restricciones físicas específicas, por lo que algunos valores pueden estar sobreestimados. Además, la falta de pruebas experimentales directas limita la validación completa de los resultados obtenidos.

Como líneas de investigación futura, se recomienda realizar pruebas de descarga a corriente constante sobre el banco real para validar la capacitancia efectiva, así como aplicar directamente la metodología de Zubieta sobre las mediciones experimentales, evitando depender del modelo del fabricante. También sería valioso explorar la influencia de variables como la temperatura o el número de ciclos de carga y descarga sobre el desempeño del sistema de almacenamiento.

## 6. Referencias

- Ahmed, S. I., S. Radhakrishnan, B. B. Nair, y R. Thiruvengadathan. 2021. «Efficient hyperparameter-tuned machine learning approach for estimation of supercapacitor performance attributes». *Journal of Physics Communications* 5(11). doi:10.1088/2399-6528/ac3574.
- Al Sakka, Monzer, Hamid Gualous, Joeri Van Mierlo, y Hasan Culcu. 2009. «Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications». *Journal of Power Sources* 194(2):581-87. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.06.038.
- Becker, Howard I. 1957. «Low voltage electrolytic capacitor».
- Berrueta, Alberto, Idoia San Martín, Andoni Hernández, Alfredo Ursúa, y Pablo Sanchis. 2014. «Electro-thermal modelling of a supercapacitor and experimental validation». *Journal of Power Sources* 259:154-65. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.02.089.
- Bertrand, Nicolas, Jocelyn Sabatier, Olivier Briat, y Jean-Michel Vinassa. 2010. «Fractional Non-Linear Modelling of Ultracapacitors». *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 15(5):1327-37. doi:10.1016/j.cnsns.2009.05.066.
- Bikerman, J. J. 1942. «XXXIX. Structure and capacity of electrical double layer». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 33(220):384-97. doi:10.1080/14786444208520813.
- Black, Jennifer, y Heather A. Andreas. 2009. «Effects of charge redistribution on self-discharge of electrochemical capacitors». *Electrochimica Acta* 54(13):3568-74. doi:10.1016/j.electacta.2009.01.019.
- Bonert, R., y L. Zubieta. 1997. «Measurement techniques for the evaluation of double-layer power capacitors». Pp. 1097-1100 vol.2 en *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*. Vol. 2.
- Chapman, David Leonard. 1913. «LI. A Contribution to the Theory of Electrocapillarity». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 25(148):475-81. doi:10.1080/14786440408634187.
- Charoen-amornkitt, P., W. Pholauyphon, T. Suzuki, y S. Tsushima. 2023. «An approach to unify capacitance measurements of electric double layer capacitors using sinusoidal potential scan». *Journal of Energy Storage* 66. doi:10.1016/j.est.2023.107522.
- Chatterjee, K., P. Kumar, S. Basu, y N. Gupta. 2024. «Quantification of Pore Accessibility in Mesoporous Supercapacitor Electrode Using Cyclic Voltammetry». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 73:1-9. doi:10.1109/TIM.2023.3341125.
- Dandeville, Y., Ph. Guillemet, Y. Scudeller, O. Crosnier, L. Athouel, y Th. Brousse. 2011. «Measuring time-dependent heat profiles of aqueous electrochemical capacitors under cycling». *Thermochimica Acta* 526(1):1-8. doi:10.1016/j.tca.2011.07.027.
- Department of Chemical Engineering and Biotechnology. 2013. «The Electrical Double Layer». <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/the-electrical-double-layer>.

- Dzielinski, Andrzej, Grzegorz Sarwas, y Dominik Sierociuk. 2010. «Time domain validation of ultracapacitor fractional order model». Pp. 3730-35 en *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Atlanta, GA, USA: IEEE.
- Fouda, M. E., A. S. Elwakil, A. Allagui, H. Rezk, y A. M. Nassef. 2019. «Communication—convolution-based estimation of supercapacitor parameters under periodic voltage excitations». *Journal of the Electrochemical Society* 166(10):A2267-69. doi:10.1149/2.1421910jes.
- Frackowiak, Elzbieta, y François Béguin. 2001. «Carbon Materials for the Electrochemical Storage of Energy in Capacitors». *Carbon* 39(6):937-50. doi:10.1016/S0008-6223(00)00183-4.
- Gabano, Jean-Denis, Thierry Poinot, y Houcem Kanoun. 2015. «LPV continuous fractional modeling applied to ultracapacitor impedance identification». *Control Engineering Practice* 45:86-97. doi:10.1016/j.conengprac.2015.09.001.
- Gouy, M. 1910. «Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte». *Journal de Physique Théorique et Appliquée* 9(1):457-68. doi:10.1051/jphysap:019100090045700.
- Helmholtz, H. 1879. «Studien Über Electriche Grenzschichten». *Annalen Der Physik* 243(7):337-82. doi:10.1002/andp.18792430702.
- Jannif, N. I., R. R. Kumar, A. Mohammadi, G. Cirrincione, y M. Cirrincione. 2023. «Constrained Least-Squares Parameter Estimation for a Double Layer Capacitor †». *Energies* 16(10). doi:10.3390/en16104160.
- Junxing, L., Z. Jianxin, y L. Changshi. 2023. «Estimation of final time of self-discharge via a kinetic model». *Journal of Power Sources* 556. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.232275.
- Laadjal, K., y A. J. Marques Cardoso. 2021. «A review of supercapacitors modeling, SoH, and SoE estimation methods: Issues and challenges». *International Journal of Energy Research* 45(13):18424-40. doi:10.1002/er.7121.
- Laadjal, Khaled, y Antonio J. Marques Cardoso. 2021. «A Review of Supercapacitors Modeling, SoH, and SoE Estimation Methods: Issues and Challenges». *International Journal of Energy Research* 45(13):18424-40. doi:10.1002/er.7121.
- Lemian, D., F. I. Bode, y C. Lapan. 2025. «Enhancing Supercapacitor Simulation Accuracy Through a Novel Hybrid Modeling Approach». *Applied Sciences (Switzerland)* 15(1). doi:10.3390/app15010226.
- Marin-Coca, S., A. Ostadrahimi, S. Bifaretti, E. Roibas-Millan, y S. Pindado. 2023. «New Parameter Identification Method for Supercapacitor Model». *IEEE Access* 11:21771-82. doi:10.1109/ACCESS.2023.3250965.
- Martín, Rodolfo, Jose J. Quintana, Alejandro Ramos, y Ignacio de la Nuez. 2008. «Modeling of Electrochemical Double Layer Capacitors by Means of Fractional Impedance». *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 3(021303). doi:10.1115/1.2833909.
- Martyniuk, Valeriy, y Manuel Ortigueira. 2015. «Fractional model of an electrochemical capacitor». *Signal Processing* 107:355-60. doi:10.1016/j.sigpro.2014.02.021.

Maxwell Tech. 2009. «White Paper: Energy Buffers».

Michalczuk, Marek, Lech M. Grzesiak, y Bartłomiej Ufnalski. 2015. «Experimental parameter identification of battery-ultracapacitor energy storage system». Pp. 1260-65 en *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Buzios, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE.

Miniguano, H., A. Barrado, C. Fernández, P. Zumel, y A. Lázaro. 2019. «A general parameter identification procedure used for the comparative study of supercapacitors models». *Energies* 12(9). doi:10.3390/en12091776.

Naresh, P., N. Sai Vinay Kishore, y V. Seshadri Sravan Kumar. 2023. «Improved equivalent circuit characterization of an ultracapacitor for power electronic applications». *Journal of Energy Storage* 69. doi:10.1016/j.est.2023.107874.

Nelms, R. M., D. R. Cahela, y B. J. Tatarchuk. 2003. «Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits». *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 39(2):430-38. doi:10.1109/TAES.2003.1207255.

Niu, Jianjun, Brian E. Conway, y Wendy G. Pell. 2004. «Comparative studies of self-discharge by potential decay and float-current measurements at C double-layer capacitor and battery electrodes». *Journal of Power Sources* 135(1):332-43. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.03.068.

Ochoa, Danny, Edisson Villa, Vinicio Iñiguez, Ciro Larco, y Rodrigo Sempértégui. 2022. «Uso de supercondensadores para brindar soporte de frecuencia en una microrred aislada». *Revista Tecnológica ESPOL - RTE* 34(4):174-85.

Ochoa-Correa, Danny, Edisson Villa-Ávila, Vinicio Iñiguez-Morán, y Patricio Astudillo-Salinas. 2024. «Comparative Study of Dynamic Response by Three Types of Energy Storage Systems for Grid Studies: A Microgrid Laboratory Experimental-Based Study». *Revista Tecnológica - ESPOL* 36(1):13-31. doi:10.37815/rte.v36n1.1117.

Quintáns, Camilo, Ramiro Iglesias, Alfonso Lago, Jorge Marcos Acevedo, y Carlos Martínez-Peñalver. 2017. «Methodology to Obtain the Voltage-Dependent Parameters of a Fourth-Order Supercapacitor Model With the Transient Response to Current Pulses». *IEEE Transactions on Power Electronics* 32(5):3868-78. doi:10.1109/TPEL.2016.2593102.

Reddy, B. S., P. L. Narayana, A. K. Maurya, U. M. R. Paturi, J. Sung, H. J. Ahn, K. K. Cho, y N. S. Reddy. 2023. «Modeling capacitance of carbon-based supercapacitors by artificial neural networks». *Journal of Energy Storage* 72. doi:10.1016/j.est.2023.108537.

Ricketts, B. W., y C. Ton-That. 2000. «Self-discharge of carbon-based supercapacitors with organic electrolytes». *Journal of Power Sources* 89(1):64-69. doi:10.1016/S0378-7753(00)00387-6.

Riu, D., N. Retiere, y D. Linzen. 2004. «Half-order modelling of supercapacitors». Pp. 2550-54 en *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*. Vol. 4. Seattle, WA, USA: IEEE.

Saini, Parveen. 2023. «A Historical Review of Electrode Materials and Electrolytes for Electrochemical Double Layer Supercapacitors and Pseudocapacitors». *Indian*

- Satpathy, S., N. K. Misra, V. Goyal, S. Das, V. Sharma, y S. Ali. 2023. «An AI-Based Newly Developed Analytical Formulation for Discharging Behavior of Supercapacitors with the Integration of a Review of Supercapacitor Challenges and Advancement Using Quantum Dots». *Symmetry* 15(4). doi:10.3390/sym15040844.
- Schaeffer, E., F. Auger, Z. Shi, P. Guillemet, y L. Loron. 2016. «Comparative analysis of some parametric model structures dedicated to EDLC Diagnosis». *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63(1):387-96. doi:10.1109/TIE.2015.2465357.
- Schiffer, Julia, Dirk Linzen, y Dirk Uwe Sauer. 2006. «Heat generation in double layer capacitors». *Journal of Power Sources* 160(1):765-72. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.12.070.
- Sejin Noh, Jaeho Choi, Hyung-Cheol Kim, y Eun-Kyu Lee. 2008. «PSiM based electric modeling of supercapacitors for line voltage regulation of electric train system». Pp. 855-59 en *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*. Johor Bahru, Malaysia: IEEE.
- Sharma, Pawan, y T. S. Bhatti. 2010. «A Review on Electrochemical Double-Layer Capacitors». *Energy Conversion and Management* 51(12):2901-12. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.031.
- Stern, Otto. 1924. «Zur Theorie Der Elektrolytischen Doppelschicht». *Zeitschrift Für Elektrochemie Und Angewandte Physikalische Chemie* 30(21-22):508-16. doi:10.1002/bbpc.192400182.
- Suo, C., S. Liu, W. Zhang, S. Su, Y. Yan, y Y. Yang. 2015. «Accurate modeling of supercapacitor based on variable resistor». *Chinese Journal of Sensors and Actuators* 28(2):183-87. doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2015.02.006.
- Verbrugge, Mark W., y Ping Liu. 2005. «Microstructural Analysis and Mathematical Modeling of Electric Double-Layer Supercapacitors». *Journal of The Electrochemical Society* 152(5):D79. doi:10.1149/1.1878052.
- Wang, B., C. Wang, Z. Wang, H. Xue, y S. Ni. 2021. «Adaptive Energy Estimation for Supercapacitor Based on a Real-Time Voltage State Observer in Electric Vehicle Applications». *IEEE Transactions on Power Electronics* 36(7):7337-41. doi:10.1109/TPEL.2020.3044889.
- Wang, C., C. Shen, A. Tang, y P. Liu. 2024. «A Comparative Study of Parameter Identification Fusion Methods With a High-Precision Supercapacitor Model for Electric Vehicles». *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage* 21(1). doi:10.1115/1.4062638.
- Wang, Kai, Li Zhang, Bingcheng Ji, y Jinlei Yuan. 2013. «The Thermal Analysis on the Stackable Supercapacitor». *Energy* 59:440-44. doi:10.1016/j.energy.2013.07.064.
- Wang, L. X., J. D. Duan, K. Zhang, K. Zhao, y L. Sun. 2022. «Fast online parameter identification and state estimation of supercapacitor». *Dianji yu Kongzhi Xuebao/Electric Machines and Control* 26(1):57-67. doi:10.15938/j.emc.2022.01.007.

- Wang, Y., M. Li, y Z. Chen. 2020. «Experimental study of fractional-order models for lithium-ion battery and ultra-capacitor: Modeling, system identification, and validation». *Applied Energy* 278. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115736.
- Weber, C., G. Reichenauer, y J. Pflaum. 2015. «Electroless preparation and ASAXS microstructural analysis of pseudocapacitive carbon manganese oxide supercapacitor electrodes». *Langmuir* 31(2):782-88. doi:10.1021/la5027762.
- Wu, C. H., Y. H. Hung, y C. W. Hong. 2012. «On-Line Supercapacitor Dynamic Models for Energy Conversion and Management». *Energy Conversion and Management* 53(1):337-45. doi:10.1016/j.enconman.2011.01.018.
- Xu, D., L. Zhang, B. Wang, y G. Ma. 2019. «Modeling of Supercapacitor Behavior With an Improved Two-Branch Equivalent Circuit». *IEEE Access* 7:26379-90. doi:10.1109/ACCESS.2019.2901377.
- Yang, Hengzhao, y Ying Zhang. 2011. «Self-discharge analysis and characterization of supercapacitors for environmentally powered wireless sensor network applications». *Journal of Power Sources* 196(20):8866-73. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.06.042.
- Yasin, A., R. Dhaouadi, y S. Mukhopadhyay. 2024. «A Novel Supercapacitor Model Parameters Identification Method Using Metaheuristic Gradient-Based Optimization Algorithms». *Energies* 17(6). doi:10.3390/en17061500.
- Yousri, D., A. Fathy, y H. Rezk. 2021. «A new comprehensive learning marine predator algorithm for extracting the optimal parameters of supercapacitor model». *Journal of Energy Storage* 42. doi:10.1016/j.est.2021.103035.
- Zhang, Lei, Xiaosong Hu, Zhenpo Wang, Fengchun Sun, y David G. Dorrell. 2018a. «A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:1868-78. doi:10.1016/j.rser.2017.05.283.
- Zhang, Lei, Xiaosong Hu, Zhenpo Wang, Fengchun Sun, y David G. Dorrell. 2018b. «A Review of Supercapacitor Modeling, Estimation, and Applications: A Control/Management Perspective». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:1868-78. doi:10.1016/j.rser.2017.05.283.
- Zubieta, L., y R. Bonert. 2000. «Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications». *IEEE Transactions on Industry Applications* 36(1):199-205. doi:10.1109/28.821816.