

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE
SUPERCAPACITORES Y SIMULACIÓN PARA SU USO EN FUENTES HÍBRIDAS

ANDRES MAURICIO MUÑOZ ACOSTA
HENRY JULIAM PINEDA RUEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE
SUPERCAPACITORES Y SIMULACIÓN PARA SU USO EN FUENTES HÍBRIDAS

ANDRES MAURICIO MUÑOZ ACOSTA
HENRY JULIAM PINEDA RUEDA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRICISTA

DIRECTOR
JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

CODIRECTORA
DIANA SOFIA MENDOZA CONTRERAS
INGENIERA ELECTRICISTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Jehová Dios por darme la salud y la sabiduría necesarias para afrontar estos años de estudio. Les agradezco a mis padres Mauricio Muñoz y Olga Acosta por su apoyo incondicional, sin ustedes no habría tenido la motivación para cumplir tan anhelada meta. A mi abuela Lilia muchas gracias por tu acompañamiento y apoyo. A todos mis compañeros que hicieron parte de este proceso muchas gracias, sin ustedes no habría sido grato mi tiempo en la universidad. Agradecimientos especiales a todos mis profesores y a la UIS por darme una educación pública y de calidad.

ANDRÉS MAURICIO MUÑOZ ACOSTA

AGRADECIMIENTOS

Después de más cinco años de arduo esfuerzo, agradezco primeramente a Dios por haberme dado la fortaleza para culminar esta importante etapa de mi vida y darme el privilegio de poder estudiar en una universidad pública de gran calidad como lo es la UIS.

A mis compañeros de estudio con los que pasé tanto tiempo, les agradezco la compañía y la ayuda recibida en nuestro proceso académico, además de los buenos momentos que pasamos.

Especialmente a mis padres, Luz Stella Rueda Guarguati y Henry Pineda Parra, que después de poder observar todo el esfuerzo y sacrificio que realizaron para poder apoyarme en mi formación personal y profesional, me hacen sentir orgulloso al decir que los verdaderos Ingenieros son ellos.

HENRY JULIAM PINEDA RUEDA

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.1 Objetivos	17
1.2 Alcance	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Fundamentos	19
2.2 Tipos	20
2.3 Aplicaciones	21
2.4 Movilidad eléctrica y SCs	22
3. MODELO DEL SUPERCAPACITOR	25
3.1 Modelos circuitales	26
3.2 Modelo seleccionado	28
4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	31
4.1 Pruebas experimentales de carga y descarga	31
4.1.1 Montaje experimental de las pruebas	32
4.2 Algoritmo de identificación de parámetros	33
4.2.1 Formulación del problema de optimización	34
4.2.2 Algoritmo de solución	35
4.2.3 Resultados preliminares	38
4.3 Parámetros del circuito equivalente	40
5. CASO DE ESTUDIO: GESTIÓN DE ENERGÍA DE UNA FUENTE HÍBRIDA	47
5.1 Modelo	47
5.1.1 Baterías	49
5.1.2 SCs	50
5.1.3 Perfiles de demanda	51

5.1.4 Estrategia de gestión de energía	52
5.2 Simulaciones.....	52
5.2.1 Operación de la fuente en detalle.	53
5.3. Resultados.....	56
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS.....	66
ANEXO A. Interfaces del software de laboratorio	66
ANEXO B. Mediciones en laboratorio	68
ANEXO C. Parámetros estimados	70
ANEXO D. Verificación de parámetros	72
ANEXO E. Errores del modelo.....	80
ANEXO F. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	82
ANEXO F.1 COMPARACIÓN CASO PARALELO VS. SERIE	82
ANEXO F.2. COMPARACIÓN CONFIGURACIÓN SC1 VS SERIE-PARALELO ..	85
ANEXO F.3. CAPACIDAD DEL SC1.	88
ANEXO F.4. COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valor promedio de los parámetros de los circuitos equivalentes para cada una de las configuraciones evaluadas.	40
Tabla 2. Exactitud de los equipos de medida de la fuente y carga programable ...	45
Tabla 3. Valor promedio de los indicadores y el EPM máximo para cada configuración.....	45
Tabla 4. Parámetros del sistema de baterías para la simulación.....	49
Tabla 5. Restricciones de las baterías para la simulación.	49
Tabla 6. Parámetros asociados a un SC para la simulación.....	50
Tabla 7. Restricciones de los SCs para la simulación.	50
Tabla 8. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC ₁	70
Tabla 9. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC ₂	70
Tabla 10. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración paralelo.	71
Tabla 11. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración serie.	71
Tabla 12. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC ₁	80
Tabla 13. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC ₂	80
Tabla 14. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración paralelo.	81
Tabla 15. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración serie.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de un SC simétrico.....	20
Figura 2. Diagrama de Ragone para capacitores, SCs, baterías de ion de litio y pilas de combustible (PC).	23
Figura 3. Comparación entre la respuesta de un SC y un modelo RC convencional simulado.....	26
Figura 4. Circuito equivalente propuesto por Spyker y Nelms, donde C es la capacitancia nominal, EPR la resistencia paralela equivalente y la ESR la resistencia equivalente en serie.....	27
Figura 5. Modelo de parámetros distribuidos análogo a líneas de transmisión.....	28
Figura 6. Circuito eléctrico equivalente del SC propuesto por Zubieta y Bonert. ...	29
Figura 7. Ejemplo de conexión de la fuente, carga y SCs (en serie). De izquierda a derecha, carga programable, SCs y fuente programable.....	32
Figura 8. Mediciones experimentales de la tensión en el SC1 en las 5 pruebas de carga y descarga.	33
Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de parámetros.....	36
Figura 10. Bloques de Simulink que componen el modelo del SC de Zubieta y la relación entradas/salida.	37
Figura 11. Bloques de subsistema de Simulink donde se modelan las dos ramas del circuito en el dominio de Laplace.....	38
Figura 12. Ajuste de curva para las pruebas de 1 A en las configuraciones de SC1 (a) y serie (b).....	39
Figura 13. Circuito equivalente para el SC1.....	41
Figura 14. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A en las configuraciones de SC1 (a) y serie (b).....	42
Figura 15. Raíz del error cuadrático medio en cada una de las pruebas para las 4 configuraciones.....	43
Figura 16. Error porcentual medio en cada una de las pruebas para las 4 configuraciones.....	44

Figura 17. Error absoluto porcentual entre los datos. Se evidencia el aumento del error porcentual en bajas tensiones.....	45
Figura 18. Modelo del SEH del caso de estudio.	48
Figura 19. Perfil de velocidad de conducción de la bicicleta usado en las simulaciones.	51
Figura 20. Perfil de potencia demandada por la bicicleta usado en las simulaciones.	52
Figura 21. Distribución de potencia en los componentes del sistema.....	53
Figura 22. Detalle de la distribución de la potencia de carga entre los SCs (rojo) y la batería (amarillo) para atender la demanda (azul).	54
Figura 23. Tensión en el SC1 durante el intervalo temporal analizado.....	54
Figura 24. Tensión en la batería durante el intervalo temporal analizado.....	55
Figura 25. Detalle de la corriente que fluye por el SC1 durante la simulación. Los valores positivos implican descarga.....	55
Figura 26. Detalle de la corriente que fluye desde la batería durante la simulación.	56
Figura 27. Interfaz del software que controla la fuente programable.	66
Figura 28. Interfaz del software que controla la carga programable.	67
Figura 29. Mediciones experimentales de la tensión en el SC ₂ en las 5 pruebas de carga y descarga.	68
Figura 30. Mediciones experimentales de la tensión en la configuración serie en las 5 pruebas de carga y descarga.....	68
Figura 31. Mediciones experimentales de la tensión en la configuración serie en las 5 pruebas de carga y descarga.....	69
Figura 32. Verificación de parámetros para las pruebas de 2 A (a), 3 A (b), 5 A (c), 10 A (d) y 15 A (e) en la configuración SC1.....	72
Figura 33. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A (a), 2 A (b), 3 A (c), 5 A (d), 10 A (e), 15 A (f) en la configuración SC2.	74
Figura 34. Verificación de parámetros para las pruebas de 2 A (a), 3 A (b), 5 A (c) y 10 A (d) en la configuración Serie.....	76

Figura 35. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A (a), 2 A (b), 3 A (c), 5 A (d), 10 A (e), 10 A (f) en la configuración Paralelo.....	78
Figura 36. Potencia despachada por los SCs en la configuración serie.	82
Figura 37. Potencia despachada por los SCs en la configuración serie.	83
Figura 38. Tensión en los SCs para la configuración serie.	83
Figura 39. Tensión en los SCs para configuración paralelo.....	84
Figura 40. Corriente en los SCs para la configuración paralelo.	84
Figura 41. Corriente en los SCs para la configuración serie.	85
Figura 42. Comparación entre los perfiles de potencia.	85
Figura 43. Comparación entre los perfiles de corriente en el SC para dos configuraciones.....	86
Figura 44. Comparación entre los perfiles de tensión en bornes del SC para las tres configuraciones.....	87
Figura 45. Comparación entre los perfiles de SOC en el SC para las tres configuraciones.....	87
Figura 46. Corriente en el SC para la configuración SC1	88
Figura 47. Potencia despachada por el SC1.....	89
Figura 48. SOC del SC para la configuración SC1.	89
Figura 49. Potencia de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.	90
Figura 50. SOC de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.	90
Figura 51. Tensión de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.	91
Figura 52. Corriente de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.	91

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS	66
ANEXO A. Interfaces del software de laboratorio	66
ANEXO B. Mediciones en laboratorio	68
ANEXO C. Parámetros estimados	70
ANEXO D. Verificación de parámetros	72
ANEXO E. Errores del modelo.....	80
ANEXO F. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	82
ANEXO F.1 COMPARACIÓN CASO PARALELO VS. SERIE	82
ANEXO F.2. COMPARACIÓN CONFIGURACIÓN SC1 VS SERIE-PARALELO ..	85
ANEXO F.3. CAPACIDAD DEL SC1.	88
ANEXO F.4. COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA	89

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE SUPERCAPACITORES Y SIMULACIÓN PARA SU USO EN FUENTES HÍBRIDAS.*

AUTORES: ANDRES MAURICIO MUÑOZ ACOSTA - HENRY JULIAM PINEDA RUEDA.**

PALABRAS CLAVE: SUPERCONDENSADOR, CARACTERIZACIÓN, DISPOSITIVO ALMACENADOR DE ENERGÍA, FUENTES HIBRIDAS, MATLAB.

DESCRIPCIÓN: Los supercapacitores son una tecnología emergente que ha probado su valía en sistemas de energía híbridos en múltiples aplicaciones de diversas áreas de la ingeniería eléctrica. El presente trabajo de grado presenta la caracterización experimental de dos módulos de supercapacitores del fabricante Maxwell Technologies con valores nominales de 16 V, 58 F. El procedimiento de caracterización consistió en la selección de un modelo eléctrico del supercapacitor a partir de la revisión en la literatura científica seguido de mediciones de tensión y corriente mediante pruebas experimentales para obtener los parámetros del circuito equivalente mediante el proceso de ajuste de curvas concluyendo con el análisis de la precisión de los resultados utilizando diversas métricas de error. Por último, se evalúa el comportamiento del modelo obtenido mediante simulación en una fuente híbrida que constó de una batería de ácido de plomo, los supercapacitores y un perfil de potencia demandada que representa el perfil de potencia de una ruta de bicicleta eléctrica de pedaleo asistido. Realizadas las simulaciones, se estudió el comportamiento de la potencia, la tensión, el estado de carga y las corrientes en cada dispositivo de la fuente híbrida. Los resultados demostraron que existen múltiples enfoques para abordar el problema de la caracterización de estos dispositivos, mientras que se evidenció el papel fundamental que tienen en el reparto de potencia.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: Javier Enrique Solano Martínez

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF SUPERCAPACITORS MODULE AND SIMULATION FOR USE IN HYBRID SOURCES *

AUTHORS: ANDRES MAURICIO MUÑOZ ACOSTA - HENRY JULIAM PINEDA RUEDA.**

KEYWORDS: SUPERCONDENSADOR, CHARACTERIZATION, ENERGY STORAGE DEVICE, HYBRID SOURCES, MATLAB.

DESCRIPTION: Supercapacitors are an emerging technology that has proven its worth in hybrid power systems in multiple applications from various areas of electrical engineering. The present degree work presents the experimental characterization of two modules of supercapacitors from Maxwell Technologies which their nominal values are 16V, 58F. The characterization process started with the selection of an electrical model for the supercapacitor which was selected based on the state of the art followed by the measurement of voltage and current through experimental tests to get the parameters of the electrical model by the curve-adjusting method and analyze the precision of the model with several errors metrics. Lastly, it is evaluated the behavior of the electrical model by the simulation of a hybrid source which consists of a Lead-acid battery and supercapacitors that supply a demand curve which represents the power profile of an assisted pedaling bicycle route. Once the simulations are made, the behavior of power, voltage, state of charge, and electrical current was studied on each device from the hybrid source. The results showed that there are multiple approaches to address the problem of the characterization of these devices, while the fundamental role that supercapacitors have in power distribution was evidenced.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: Javier Enrique Solano Martínez

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de energía juegan un papel importante en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. Se encuentran presentes en dispositivos móviles, sistemas de respaldo energético y sistemas de transporte, entre otros¹. Recientemente, un sistema innovador de almacenamiento de energía ha tomado gran importancia debido a sus características únicas: el supercapacitor (SC)². Estas características incluyen una alta densidad de potencia, operación de larga duración sin mantenimiento, rápida carga-descarga, alta eficiencia y ser amigables con el medio ambiente³.

En términos generales, los SCs^(*) son dispositivos almacenadores de energía que se caracterizan, principalmente, por tener una capacitancia de varios ordenes de magnitud mayor, una tensión nominal menor, una densidad de energía mayor y una densidad de potencia menor en comparación con los condensadores convencionales⁴. Estas diferencias se derivan de diferencias fundamentales en su construcción y componentes electroquímicos⁵, que derivan en variaciones en el comportamiento dinámico de estos dispositivos cuando se encuentran operando en sistemas eléctricos en comparación con los capacitores convencionales⁶.

¹ JAVED, K., ASHFAQ, H. y SINGH, R. Application of Supercapacitor as Hybrid Energy Storage Device in Stand-alone PV System. En: 2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA). 2019, pp. 1-4.

² AFIF, Ahmed, *et al.* Advanced materials, and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review. En: Journal of Energy Storage, 2019, vol. 25.

³ CHANG, Liang. y HANG HU, Yun. Supercapacitors. Comprehensive Energy Systems. En: Elsevier. 2018, pp. 663-695.

^(*) Otros nombres que reciben son supercondensadores, ultracapacitores, pseudo-capacitores, capacitores electroquímicos de doble capa, entre otros.

⁴ AFIF. Op. cit., vol 25.

⁵ GONZÁLEZ, Ander, *et al.* Review on supercapacitors: Technologies and materials. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58. 2018, pp. 1189-1206.

⁶ PETREUS, Dorin, *et al.* Modeling and sizing of supercapacitors. En: Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 8, no. 2. 2008, pp. 15-22.

Dadas las razones anteriores, se sigue el hecho de que los modelos convencionales de capacitores convencionales no aplican fielmente a estos nuevos SCs, por lo que nuevos modelos deben ser propuestos⁷. Y así ha sido: numerosos modelos para SCs han sido propuestos, cada uno enfocado en atender un área de estudio en particular de esta tecnología, por lo que se pueden identificar modelos circuitales, matemáticos, electroquímicos y físicos⁸. En lo que conciernen a los sistemas eléctricos de potencia, son de mayor interés los modelos circuitales y matemáticos. Este documento presenta la caracterización de dos módulos de SCs del fabricante Maxwell Technologies (ref. BMOD0058 E016 B02), como parte de la línea de trabajo en movilidad eléctrica emprendida en el grupo de investigación GISEL^(*) de la escuela E3T^(**) de la UIS^(***). Algunos trabajos en esta línea son, entre otros, trabajos de pregrado como la simulación y montaje de un sistema de caracterización de SCs de baja potencia⁹, trabajos de maestría como el dimensionado de una fuente híbrida compuesta de pilas a combustible y SCs¹⁰ y algunas publicaciones y conferencias

⁷ ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

⁸ Ibid., p. 1868-178.

^(*) Siglas para Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos.

^(**) Isotipo de las siglas de Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

^(***) Siglas de Universidad Industrial de Santander.

⁹ GALINDO RAMÍREZ, Juan Daniel y OLARTE ORTIZ, Oscar. SIMULACIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2018.

¹⁰ JÁCOME, Andres. DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA COMPUESTA DE PILAS A COMBUSTIBLE TIPO PEM Y SUPERCONDENSADORES CON CONEXIÓN DIRECTA. Trabajo de posgrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2018.

internacionales ^{11,12,13,14}. La caracterización de este dispositivo se hizo con el fin de evaluar el comportamiento de este dispositivo en el sistema de alimentación de una bicicleta de pedaleo asistido a través de simulación.

Este documento está organizado de la siguiente manera: el capítulo 1 presenta los objetivos, alcance y justificación del trabajo. El capítulo 2 discute las generalidades de los SCs como su principio de funcionamiento, tipos, características, limitaciones y sus aplicaciones en el mercado. El capítulo 3 presenta el proceso de selección del modelo sobre el cual hacer la caracterización. El capítulo 4 expone el proceso de identificación de los parámetros del circuito equivalente y su aplicación en los módulos. El capítulo 5 describe el caso de estudio del modelo en la simulación de un sistema híbrido (batería y SCs) de energía. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo, la bibliografía y los anexos.

¹¹ SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013

¹² SOLANO, Javier, *et al.* IEEE VTS motor vehicles challenge 2020 - Energy management of a fuel cell/ultracapacitor/lead-acid battery hybrid electric vehicle. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 – Proceedings. 2019, pp. 3-8

¹³ DOMINGUEZ, Ricardo; SOLANO, Javier y JÁCOME, Andrés. Sizing of fuel cell - Ultracapacitors hybrid electric vehicles based on the energy management strategy. En: 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 – Proceedings. 2019.

¹⁴ SOLANO, Javier, *et al.* A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles. En: Information Sciences, vol. 190. 2012, pp. 192-207.

1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Objetivos

El propósito de este trabajo es avanzar un poco en la comprensión que se tiene sobre los SCs con que dispone la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la UIS. En particular, el objetivo general de este trabajo de grado en la modalidad de investigación es el siguiente:

- Caracterizar experimentalmente el módulo de SCs Maxwell (BMOD0058 E016 B02) y evaluar por simulación su uso en fuentes híbridas.

El cumplimiento del objetivo general se logra a través del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos.

- Seleccionar un modelo de SC del estado del arte aplicable a un sistema de alimentación de una bicicleta eléctrica.
- Identificar los parámetros del modelo de dos SCs Maxwell BMOD0058 E016 B02 usando el algoritmo de ajuste de curvas presentado en ¹⁵.
- Evaluar el modelo obtenido a través de la simulación en un sistema de energía híbrido adaptando el modelo de ¹⁶ usando los perfiles propuestos en ¹⁷.

¹⁵ SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

¹⁶ SOLANO, Javier, *et al.* IEEE VTS motor vehicles challenge 2020 - Energy management of a fuel cell/ultracapacitor/lead-acid battery hybrid electric vehicle. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 – Proceedings. 2019, pp. 3-8

¹⁷ AMAYA RIVERA, Juan Felipe y RUEDA FONSECA, Fabian Andres. Análisis y simulación de E-bikes empleando Representación Macroscópica Energética: Casos de estudio. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2019.

1.2 Alcance

La caracterización de los SCs objeto de este estudio se logra a través de la consecución de algunas actividades recogidas en tres etapas descritas a continuación:

En primer lugar, se selecciona el modelo más adecuado de acuerdo con los hallazgos y avances del estado del arte. En el caso de este proyecto, existen varios trabajos precedentes que arrojan pistas sobre el mejor modelo de SC al cual ajustar la caracterización. Una vez seleccionado el modelo, la segunda etapa consiste en la realización de las pruebas experimentales sobre los SCs. Se realizan pruebas de carga y descarga a corriente constante individuales en dos módulos de SC de manera independiente, asimismo, en conexión serie y paralelo. Los valores de corriente de carga y descarga serán 1, 2, 5, 10 y 15 amperios, mientras se registra la evolución de la tensión del SC en el tiempo. Se considera que el proceso de carga culmina cuando la tensión de los SCs pasa de ser 0 a su valor nominal, mientras que la descarga culmina cuando la tensión en el SC es prácticamente 0. Para garantizar la corriente de carga y descarga constante, se usa una fuente programable (BK Precision 9202) y una carga programable (BK Precision 8500), respectivamente.

A partir de la medición, se determinan los parámetros con técnicas de ajustes de curvas con el criterio del mínimo error cuadrático medio. El problema de optimización se resuelve usando la *Optimization Toolbox* de Matlab/Simulink. Esta segunda etapa culmina con la comparación de los resultados del modelo contra los valores medidos, para así estimar la calidad del ajuste de curva.

Para finalizar la caracterización de los módulos, en la tercera etapa se examina su comportamiento a través de la simulación de la fuente de alimentación de una bicicleta eléctrica con pedaleo asistido. Esta fuente es representada como un sistema de energía híbrido, alimentado por una batería y los SCs, para un determinado perfil de potencia demandada. Esta simulación se realiza en Simulink.

2. MARCO TEÓRICO

El SC se presenta como una tecnología emergente con el potencial de permitir avances importantes en el almacenamiento de energía¹⁸. Sin embargo, estos dispositivos no se rigen por las mismas ecuaciones fundamentales que los condensadores convencionales y, en comparación, son capaces de almacenar una cantidad de energía mayor¹⁹. Este capítulo aborda los fundamentos de los SC, sus características, tipos y describe los avances más recientes en su modelamiento, con el fin de tener una visión general sobre el papel del SC en los sistemas energéticos.

2.1 Fundamentos

El SC surgió como concepto por primera vez en el año 1853 a raíz de los trabajos del físico Hermann von Helmholtz, quien se basó en el principio de la doble capa eléctrica²⁰. Sin embargo, no fue sino hasta el año 1957 en el que la compañía General Electric desarrolló la primera patente de un SC²¹. En la década de los setenta, la Nippon Electric Company introdujo al mercado el primer producto que utilizaba un SC en sus componentes²². A partir de esto, diferentes compañías empezaron a fabricar sus propios modelos de SCs como lo fueron Maxwell Technologies, Siemens, Epcos y Panasonic²³.

En su forma más básica, un SC está compuesto principalmente por dos electrodos, una membrana aislante, un par de colectores y un electrolito (ver Figura 1). A diferencia de los capacitores convencionales, el mecanismo que le permite a los SCs almacenar una mayor cantidad de energía es el de la doble capa presente en

¹⁸ SCIBIOH, M.A. y VISWANATHAN, B., 2020. Supercapacitor: an introduction. Materials for Supercapacitor Applications. Elsevier. 2020, pp. 1-13.

¹⁹ Ibis., p. 1-13.

²⁰ SAMANTARA, Aneeya y RATHA, Satyajit. Materials Development for Active/Passive Components of a Supercapacitor. En: Springer Singapore.

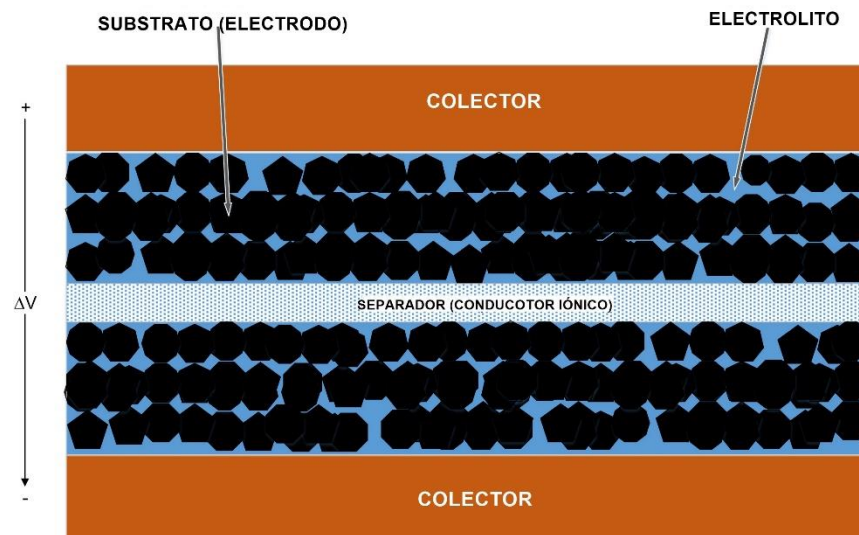
²¹ ESPACENET, 1954. US2800616A Low voltage electrolytic capacitor.

²² ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

²³ SCIBIOH. Op. cit., p 1-13.

la interfaz entre los electrodos y el electrolito. También se conoce que su capacitancia aumenta debido a los materiales porosos utilizados en los electrodos que sirven para elevar su área específica²⁴.

Figura 1. Diagrama esquemático de un SC simétrico.



FUENTE: FARAJI, Sohelia y ANI, Farid. The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42. 2015, pp. 823-834.

2.2 Tipos

Existen, principalmente, tres tipos de SCs y se clasifican de acuerdo con el tipo de almacenamiento y los materiales que los componen. Los tres tipos son: SCs electroquímicos de doble capa (EDLC por sus siglas en inglés), los pseudocapacitores y SCs híbridos. Los capacitores electroquímicos de doble capa basan su sistema de almacenamiento en el principio de la doble capa eléctrica y utilizan derivados del carbón tales como carbón activado, nanotubos de carbón o grafeno para los electrodos. Por otro lado, los pseudocapacitores presentan una

²⁴ FARAJI, Sohelia y ANI, Farid. The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42. 2015, pp. 823-834

transferencia de carga farádica entre el electrolito y el electrodo debido a una sucesión de reacciones de oxido-reducción y electro-absorción; sus electrodos suelen estar compuestos de óxidos de metal o polímeros conductores. Por último, los SCs híbridos combinan la tecnología de los dos tipos anteriores con para obtener las mejores propiedades de cada uno de ellos ^{25,26}.

2.3 Aplicaciones

Las aplicaciones de los SC son múltiples. De acuerdo con un fabricante²⁷, las aplicaciones pueden ir desde rangos de miliamperios hasta miles de amperios. En general, las áreas que requieren SC son la electrónica, tracción mecánica, sistemas de alimentación como UPSs y movilidad eléctrica. En cuanto a la electrónica de consumo, aplicaciones particulares son cámaras digitales, computadoras o GPS. Algunas aplicaciones en transporte son arranques de motores diesel y frenado regenerativo. En cuanto la movilidad eléctrica en particular, son usados para las redes de alimentación de 42 voltios, control de válvulas electromagnéticas, arranques, apertura de puertas, accionamientos eléctricos, cinturones de seguridad y, por supuesto, como fuentes de potencia para motores.

²⁵ ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective.

En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

²⁶ FARAJI, Sohelia y ANI, Farid. The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review.

En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42. 2015, pp. 823-834.

²⁷ MAXWELL TECHNOLOGIES. Product Guide: BOOSTCAP Ultracapacitors. [Consulta: Junio, 2009].

2.4 Movilidad eléctrica y SCs

Una forma de enfrentar las problemáticas ambientales es la movilidad eléctrica. Toda clase de vehículos, desde automóviles hasta barcos, han sido desarrollados para ser impulsados por electricidad en lugar de combustibles fósiles. No obstante, los vehículos eléctricos presentan nuevos retos de ingeniería ²⁸, ²⁹. Uno de los principales es el almacenamiento eficiente de potencia y energía en un espacio confinado. Otro reto importante es que los vehículos eléctricos requieren que la energía cinética sea despachada o almacenada al ritmo que acelera o desacelera el vehículo.

Las baterías pueden lidiar con estos problemas a pequeña escala, pero aplicaciones de gran potencia requieren tecnologías con mayor capacidad y tiempos de respuesta reducidos. Una de las tecnologías que puede ayudar a resolver este problema es el SC, el cual es capaz de almacenar mayor cantidad de energía que el capacitor convencional y además es capaz de proporcionar una mayor cantidad de potencia que las diversas tecnologías de baterías, para un mismo volumen³⁰. En lo que respecta a la relación potencia-energía por unidad de masa (o volumen) los SCs llenan la brecha entre los condensadores electrolíticos y las baterías³¹. Una forma de explicar gráficamente la situación de estas tecnologías de almacenamiento es a través del diagrama de Ragone de la Figura 2, donde se compara la potencia específica versus la energía específica de las tecnologías de almacenamiento, mientras que los tiempos de descarga se aprecian como líneas diagonales.

²⁸ ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective.

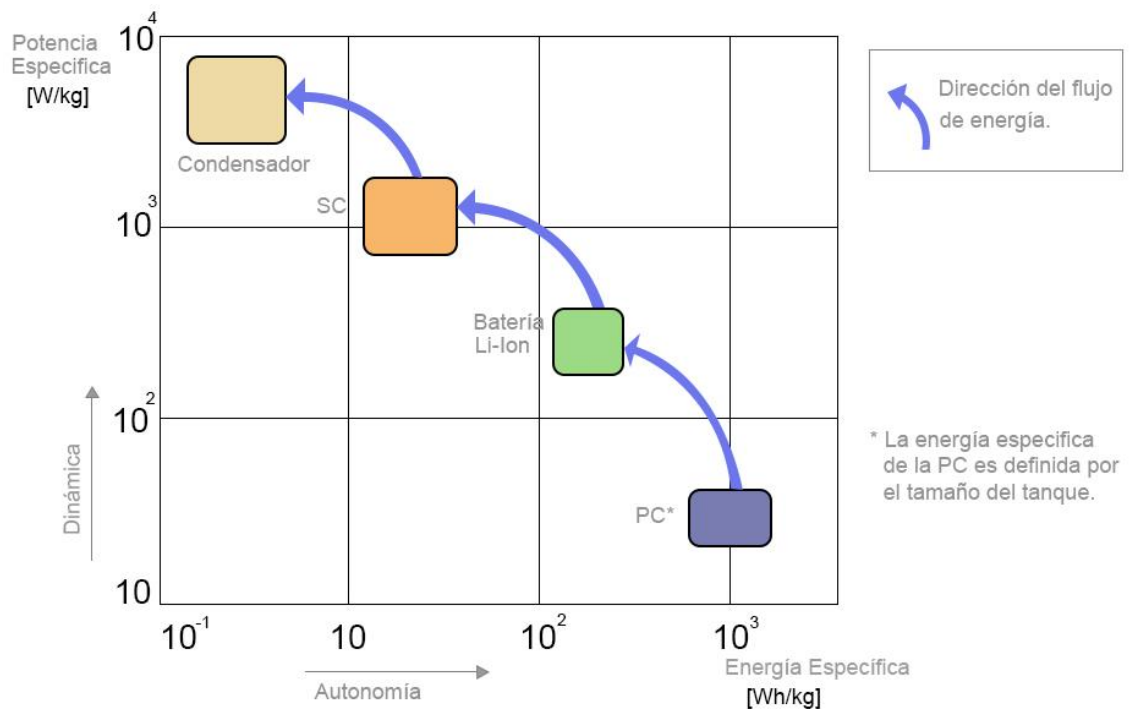
En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

²⁹ SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

³⁰ GONZÁLEZ, Ander, *et al.* Review on supercapacitors: Technologies and materials. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58. 2018, pp. 1189-1206.

³¹ MENDOZA, Diana Sofia, *et al.* Energy Management of a Dual-Mode Locomotive Based on the Energy Sources Characteristics. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2019, pp. 1-4.

Figura 2. Diagrama de Ragone para capacitores, SCs, baterías de ion de litio y pilas de combustible (PC).



FUENTE: MENDOZA, Diana Sofia, *et al.* Energy Management of a Dual-Mode Locomotive Based on the Energy Sources Characteristics. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).

Así, combinando la capacidad de las baterías para almacenar altas cantidades de energía, con la de los SC (y a veces capacitores) de proporcionar gran cantidad de potencia, se han logrado desarrollar sistemas de energía híbridos más eficientes, menos costosos, más duraderos y mejor dimensionados que aquellos que cuentan solo con baterías³². Además, con las características añadidas a los SC de largos ciclos de vida, costos competitivos, poco mantenimiento y bajo tiempo de carga (ideal para sistemas regenerativos), los SCs se sitúan como un componente atractivo y relevante en los sistemas energéticos de hoy. Así, establecer modelos, validarlos y caracterizar el funcionamiento de los SCs es una labor que debe hacer parte de los estudios en ingeniería eléctrica.

³² ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

En cuanto los SCs del presente trabajo, estos son fabricados por Maxwell Technologies y son de tipo EDLC. El modelo de SCs usado es BMOD0058 E016 B02³³, cuya tensión nominal es 16 V con una capacitancia nominal de 58 F. Se garantiza una vida útil de 500.000 ciclos de carga-descarga. Finalmente, tiene una potencia específica útil de 2,2 kW/kg y una energía específica de 3,3 Wh/kg, para un módulo de masa 0,63 kg.

³³ MAXWELL TECHNOLOGIES. UC Reference: BMOD0058 E016 B020.

3. MODELO DEL SUPERCAPACITOR

El primer paso del proceso de caracterización del SC es la elección de un modelo. En este caso, la elección del modelo se hizo a partir de la revisión de la literatura científica. En general, los diversos modelos intentan capturar comportamientos eléctricos, térmicos o fisicoquímicos³⁴. En este estudio interesa el comportamiento eléctrico, para los cuáles existen tres tipos de modelos, principalmente: electroquímicos, equivalentes circuitales y modelos circuitales de orden fraccionario. Los modelos electroquímicos son modelos matemáticos escritos en derivadas parciales que se caracterizan por su alta exactitud, pero con baja eficiencia computacional ³⁵, ³⁶. Por otro lado, los modelos circuitales provienen de análisis experimentales bajo condiciones dadas y son adecuados para análisis en tiempo real y modelos de *gestión de flujos de potencia*³⁷. Finalmente, los modelos fraccionarios son modelos en derivadas parciales fraccionarias, más complejos y exactos que los electroquímicos³⁸.

Debido a su idoneidad y el objeto del presente estudio, este capítulo describe los modelos circuitales más relevantes de la literatura. Asimismo, se selecciona aquel que es más conveniente para el presente trabajo, que correspondió con el modelo circuitual propuesto por Zubieta et al.³⁹, debido a que es modelo sencillo y con ventajas frente a los demás, como se verá a lo largo del capítulo.

³⁴ ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

³⁵ *Ibis.*, P. 1868-1878.

³⁶ SRINIVASAN, V. Mathematical Modeling of Electrochemical Capacitors. Journal of The Electrochemical Society, vol. 146, no. 5. 1999, pp. 1650.

³⁷ HU, X., LI, S. y PENG, H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. En: Journal of Power Sources, vol. 198. 2012, pp. 359-367.

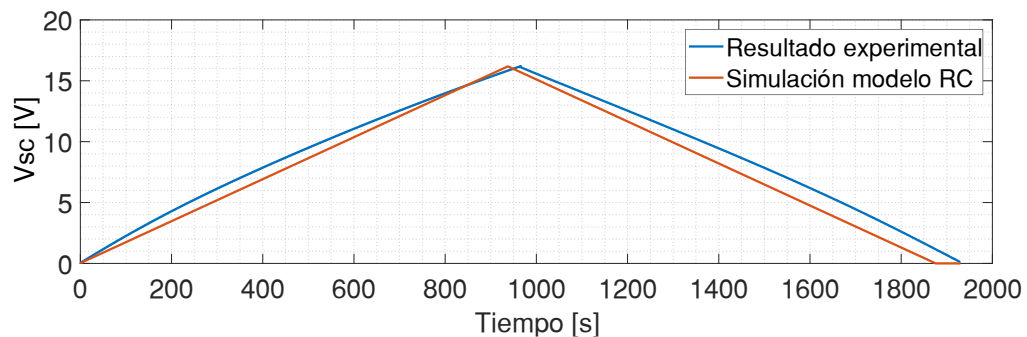
³⁸ MARTÍN, Rodolfo, *et al.* Modeling of Electrochemical Double Layer Capacitors by Means of Fractional Impedance. En: Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 3, no. 2. 2008.

³⁹ ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205.

3.1 Modelos circuitales

Los modelos circuitales son modelos representados en términos de circuitos eléctricos, generalmente modelables como sistemas ecuaciones diferenciales ordinarias⁴⁰. El modelo más básico es el modelo RC tradicional, que representa la capacitancia nominal del SC en serie con una resistencia que da cuenta de las pérdidas. Sin embargo, este modelo no representa fielmente el comportamiento de los SCs⁴¹ como se puede apreciar en la Figura 3, por lo que una cantidad importante de topologías y métodos de caracterización han sido propuestos.

Figura 3. Comparación entre la respuesta de un SC y un modelo RC convencional simulado.



Una propuesta inicial fue la de Spyker y Nelms⁴², quienes agregaron un resistor en paralelo con la capacitancia para modelar los efectos de la auto descarga, sin embargo, este modelo se queda corto al representar la no linealidad de la carga y descarga del SC y su dinámica (Ver Figura 4). Zubieta y Bonert⁴³ formularon un modelo muy popular en aplicaciones que implican electrónica de potencia, el cual consta de tres ramas RC que capturan la respuesta del SC en diferentes escalas de

⁴⁰ HU, X., LI, S. y PENG, H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. En: Journal of Power Sources, vol. 198. 2012, pp. 359-367.

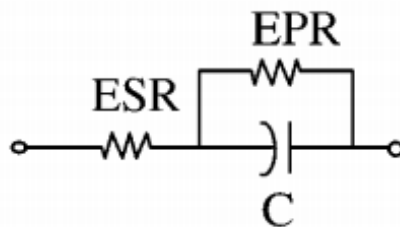
⁴¹ ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205.

⁴² SPYKER, R.L. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. En: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, no. 3 PART 1. 2000, pp. 829-836.

⁴³ ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205.

tiempo y una capacitancia no-lineal (ver Figura 6). Zubieta y Bonert propusieron, conjuntamente, un método de caracterización que implica la aplicación de un corriente escalón y la observación de la respuesta en tensión. Algunos modelos derivados de este son el propuesto por Rajani et al.⁴⁴,⁴⁵,⁴⁶, quienes presentan técnicas experimentales diferentes para la caracterización de los SCs.

Figura 4. Circuito equivalente propuesto por Spyker y Nelms, donde C es la capacitancia nominal, EPR la resistencia paralela equivalente y la ESR la resistencia equivalente en serie.



FUENTE: SPYKER, R.L. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. En: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, no. 3 PART 1. 2000, pp. 829-836.

Existen modelos más complejos, como el de Buller et al.⁴⁷, quien propone un circuito en el dominio de la frecuencia, a partir de las características electroquímicas. Zhang et al.⁴⁸ propuso un modelo de ramas RC paralelo conectadas en serie y para la extracción de parámetros se requiere el uso del filtro de Kalman. Gualous et al.⁴⁹

⁴⁴ RAJANI, S.V., PANDYA, V.J. y SHAH, V.A., 2016. Experimental validation of the ultracapacitor parameters using the method of averaging for photovoltaic applications. En: Journal of Energy Storage, vol. 5. 2016, pp. 120-126.

⁴⁵ FARANDA, R. A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. En: Elsevier. 2010.

⁴⁶ CHAI, Ruizhi. y ZHANG, Ying. A Practical Supercapacitor Model for Power Management in Wireless Sensor Nodes. En: IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12. 2015, pp. 6720-6730.

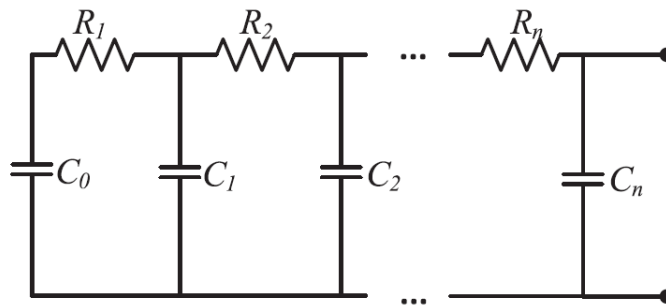
⁴⁷ BULLER, Stephan, et al. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6. 2002, pp. 1622-1626.

⁴⁸ ZHANG, Lei, et al. Online parameter identification of ultracapacitor models using the extended Kalman filter. En: Energies, vol. 7, no. 5. 2015, pp. 3204-3217.

⁴⁹ GUALOUS, Hamid, et al. Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature. En: Journal of Power Sources, vol. 123, no. 1. 2003, pp. 86-93.

sintetizaron sus experimentos en un circuito equivalente con parámetros dependientes de la temperatura. Uno de los circuitos de mayor magnitud identificado es el de Rafik et al⁵⁰, que cuenta con 7 resistencias, 7 capacitores y un inductor, con algunos parámetros dependientes de la temperatura o la tensión en terminales. El modelo circuital más completo observado es el modelo de parámetros distribuidos, análogo al de las líneas de transmisión⁵¹ (ver Figura 5), que pretende modelar las múltiples capacitancias paralelas que se derivan de la porosidad de los electrodos.

Figura 5. Modelo de parámetros distribuidos análogo a líneas de transmisión.



FUENTE: ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

3.2 Modelo seleccionado

El objetivo de la caracterización del presente trabajo es evaluar el comportamiento de los SCs en un sistema de energía híbrido compuesto por una carga variable relacionada con un motor de DC, un sistema de baterías y los SCs. Debido a que la parte eléctrica consta de la combinación baterías y SCs y el comportamiento transitorio queda por fuera del alcance de este trabajo, los efectos de la frecuencia no se tienen en cuenta. En cuanto a la temperatura, se asume que todo el sistema

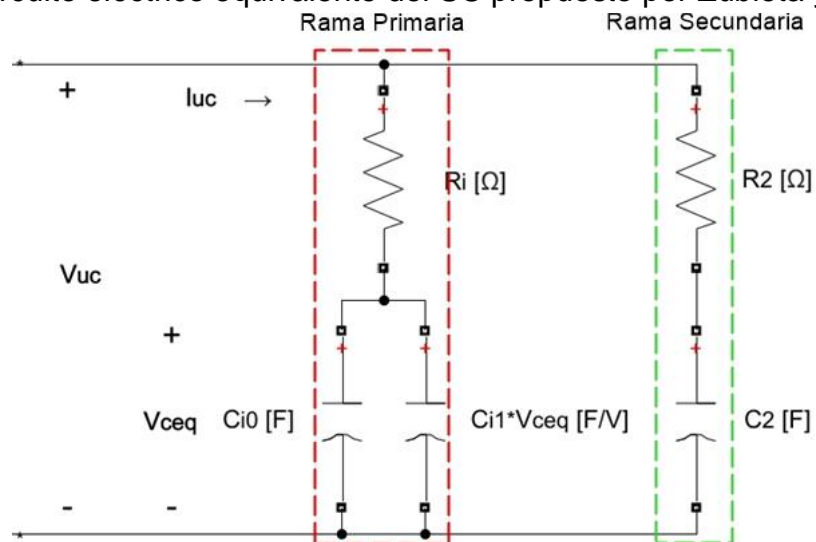
⁵⁰ RAFIK, F, *et al.* Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. En: Journal of Power Sources, vol. 165, no. 2. 2007, pp. 928-934.

⁵¹ BELHACHEMI, F.; RAEL, S. y DAVAT, B. Physical based model of power electric double-layer supercapacitors. En: Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), IEEE. 2000, pp. 3069-3076.

de pedaleo está bien diseñado y refrigerado. Finalmente, los SCs en estudio son del tipo EDLC.

Teniéndose en cuenta estos hechos, se eligió el modelo de Zubieta y Bonert⁵² como el más adecuado, ya que aplica a SCs tipo EDLC, no requiere la inclusión de los efectos de la frecuencia y temperatura, responde adecuadamente en múltiples escalas de tiempo y se ha probado eficiente en aplicaciones que implican el modelo conjunto con sistemas de electrónica de potencia⁵³ y gestión de flujos de potencia⁵⁴. La Figura 6 presenta el circuito equivalente seleccionado.

Figura 6. Circuito eléctrico equivalente del SC propuesto por Zubieta y Bonert.



FUENTE: SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

⁵² ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205.

⁵³ ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878.

⁵⁴ SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

Como puede observarse en la Figura 6, el circuito eléctrico está compuesto por cuatro ramas que pueden agruparse en una rama principal (rojo) y otra secundaria (verde). La rama principal consta de la resistencia interna (R_i) y la acumulación de energía en un condensador constante (C_{i0}) y otro no lineal ($C_{i1} V_{eq}$). En la rama secundaria se modela como un equivalente, donde la redistribución de carga es representada mediante un condensador constante (C_2) y el fenómeno de auto descarga con una resistencia (R_2). De acuerdo con los autores del modelo, la respuesta teórica en tensión del circuito corresponde muy aproximadamente con mediciones, si se aplica una corriente escalonada en carga y descarga.

4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

El procedimiento completo de determinación de parámetros realizado en este trabajo consta de tres partes fundamentales, a saber, el proceso de adquisición de datos a través de medición, seguido del proceso de obtención de parámetros por ajuste de curvas, para concluir en el análisis de la calidad de los parámetros. Este capítulo presenta las actividades realizadas durante estas tres fases que permitieron la identificación de los parámetros del circuito equivalente de los dos SCs.

4.1 Pruebas experimentales de carga y descarga

El primer paso para lograr la caracterización es la realización de pruebas en el laboratorio de carga y descarga. Los autores del modelo recomiendan hacer una prueba de carga o descarga rápida con corriente constante (inferior al 5% de la corriente de cortocircuito), mientras se registra la evolución de la tensión en terminales del SCs y el tiempo⁵⁵. Ambas pruebas, deben hacerse a la misma corriente y es preferible que sea una a continuación de la otra.

Para este trabajo, fueron probados dos SCs, independientemente, luego conectados en serie y luego en paralelo. A cada configuración le fueron realizadas 6 pruebas de carga-descarga diferentes. Los valores de corriente^(*) en las pruebas fueron 1, 2, 3, 5, 10 y 15 A ^(**). La carga iniciaba con el condensador descargado (0 V) hasta que se alcanzaba la tensión nominal (16 V, o 32 V en el caso serie). Las pruebas de carga y descarga se hacían inmediatamente una después de otra.

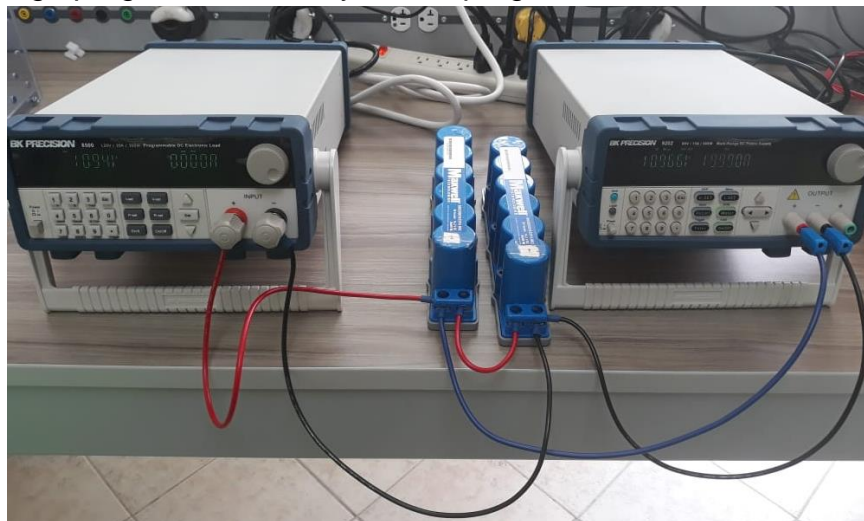
⁵⁵ ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205.

^(*) La corriente de cortocircuito nominal del SC es 730 A, por lo que estos valores son muy inferiores al límite máximo del 5% recomendado para las pruebas, es decir, 36.5 A.

^(**) La prueba de 15 A no se pudo realizar para la configuración serie ya que se excedía la capacidad de la fuente.

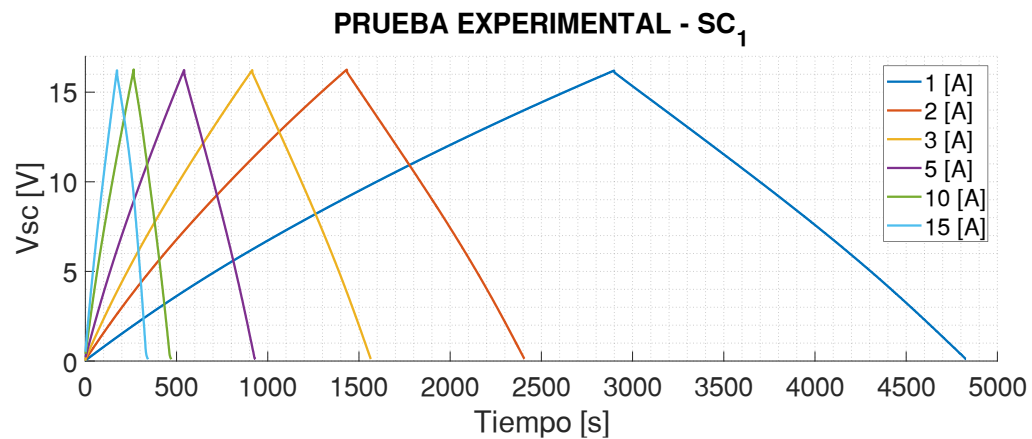
4.1.1 Montaje experimental de las pruebas: El montaje experimental se realizó usando los siguientes equipos de laboratorio: El control de la corriente en la prueba carga y medición de la evolución de la tensión en el tiempo se hizo con la fuente programable BK Precision 9202, mientras que para el proceso de descarga se usó la carga programable BK Precision 8500. Los tres dispositivos (fuente, SCs y carga) se conectaron en paralelo. Estos dispositivos permitieron realizar la medición de la tensión en cada instante de tiempo a una frecuencia de muestreo predeterminada. La adquisición de datos se realizó con la máxima frecuencia de muestreo que permitían los softwares de control proporcionados por el fabricante de la fuente y la carga, es decir, 2 Hz (un dato cada 0,5 s). La conexión real se presenta en la Figura 7, para la prueba en conexión serie de los SCs y las interfaces del software de control se presentan en el Anexo A.

Figura 7. Ejemplo de conexión de la fuente, carga y SCs (en serie). De izquierda a derecha, carga programable, SCs y fuente programable.



Los resultados obtenidos en estas pruebas se ilustran en la Figura 8, los cuales corresponden a todas las pruebas del SC número 1 (SC₁). Los resultados para el SC₂, la configuración serie y paralelo tiene un comportamiento similar. Como se espera, conforme aumenta la corriente en la prueba, el proceso de carga/descarga es proporcionalmente más rápido. En ANEXO B. Mediciones en laboratorio se recogen las mediciones concernientes a las demás pruebas.

Figura 8. Mediciones experimentales de la tensión en el SC1 en las 5 pruebas de carga y descarga.



4.2 Algoritmo de identificación de parámetros

El proceso de caracterización se realizó resolviendo un problema de ajuste de curvas, donde se determinaron los valores de los parámetros de un modelo que mejor ajustan una determinada salida, dada una entrada, ambas obtenidas experimentalmente; este enfoque de *ajuste de curva* también es conocido como problema inverso⁵⁶. En términos generales, un problema inverso se resuelve minimizando la diferencia^(*) entre las mediciones experimentales y la respuesta del modelo, dadas una misma entrada, a través de la variación de los parámetros que componen el modelo.

En este trabajo, la identificación de los parámetros se realizó numéricamente usando el entorno de programación MATLAB y su entorno de simulación Simulink. En particular, se usó la función de optimización restringida no-lineal *fmincon* de MATLAB para minimizar el error cuadrático medio (ECM) entre los puntos que componen la curva de la tensión medida (experimental) y aquellos de la curva de tensión que arroja el modelo implementado en Simulink, dados unos parámetros (ver Figura 9).

⁵⁶ ASTER, R.C.; BORCHERS, B. y THURBER, C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems. 3 ed. 2013

^(*) Existen múltiples formas de calcular dicha diferencia. Algunos ejemplos son la diferencia convencional, la norma L2 (mínimos cuadrados), la diferencia absoluta, la norma L-infinito, entre otros [39].

La función, iterativamente, varía los parámetros del modelo, comenzando desde un punto inicial (x_0), y calcula dicha diferencia, hasta que dicha diferencia sea menor a un valor predeterminado o hasta que se alcance el número máximo de iteraciones.

4.2.1 Formulación del problema de optimización: El problema de optimización matemáticamente se formuló minimizando el error cuadrático medio entre la tensión experimental y la tensión simulada. Matemáticamente se expresa así:

$$\min(ECM), \quad (1)$$

$$\text{con} \quad ECM(R_i, C_{i0}, C_{i1}, C_2, R_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{exp_i} - V_{sim_i})^2 \quad (2)$$

donde ECM es la función objetivo que representa el error cuadrático medio, expresado en V^2 .

$R_i, C_{i0}, C_{i1}, C_2, R_2$ son las variables de optimización o parámetros del circuito equivalente (ver Figura 6) expresados en Ω , F, F/V, F y Ω respectivamente.

N es el número de datos registrados en la prueba.

V_{exp_i} representa el i ésimo dato de la tensión medida expresado en V.

V_{sim_i} representa el i ésimo dato de la tensión simulada en el modelo del SC implementado en Simulink expresado en V.

4.2.2 Algoritmo de solución: El algoritmo de optimización usado para resolver el problema es *fmincon*, una función de la *Optimization Toolbox* de MATLAB. Este algoritmo debe inicializarse con valores de los parámetros cercanos a donde se espera obtener la solución. La selección de estos valores iniciales se hizo de acuerdo a las recomendaciones en [9], aprovechándose la información del fabricante del SC⁵⁷ y el significado físico de los parámetros: R_i se inició en la ESR^(*), C_{i0} como la mitad de la capacitancia nominal, C_{i1} como la mitad de la división entre la capacitancia nominal y la tensión nominal, R_2 como 20 veces la R_i y C_2 la décima parte de la capacitancia nominal^(**). Finalmente, este problema solo se restringe en los valores máximos y mínimos que pueden tomar los parámetros⁵⁸, el número máximo de iteraciones se fijó en 500.

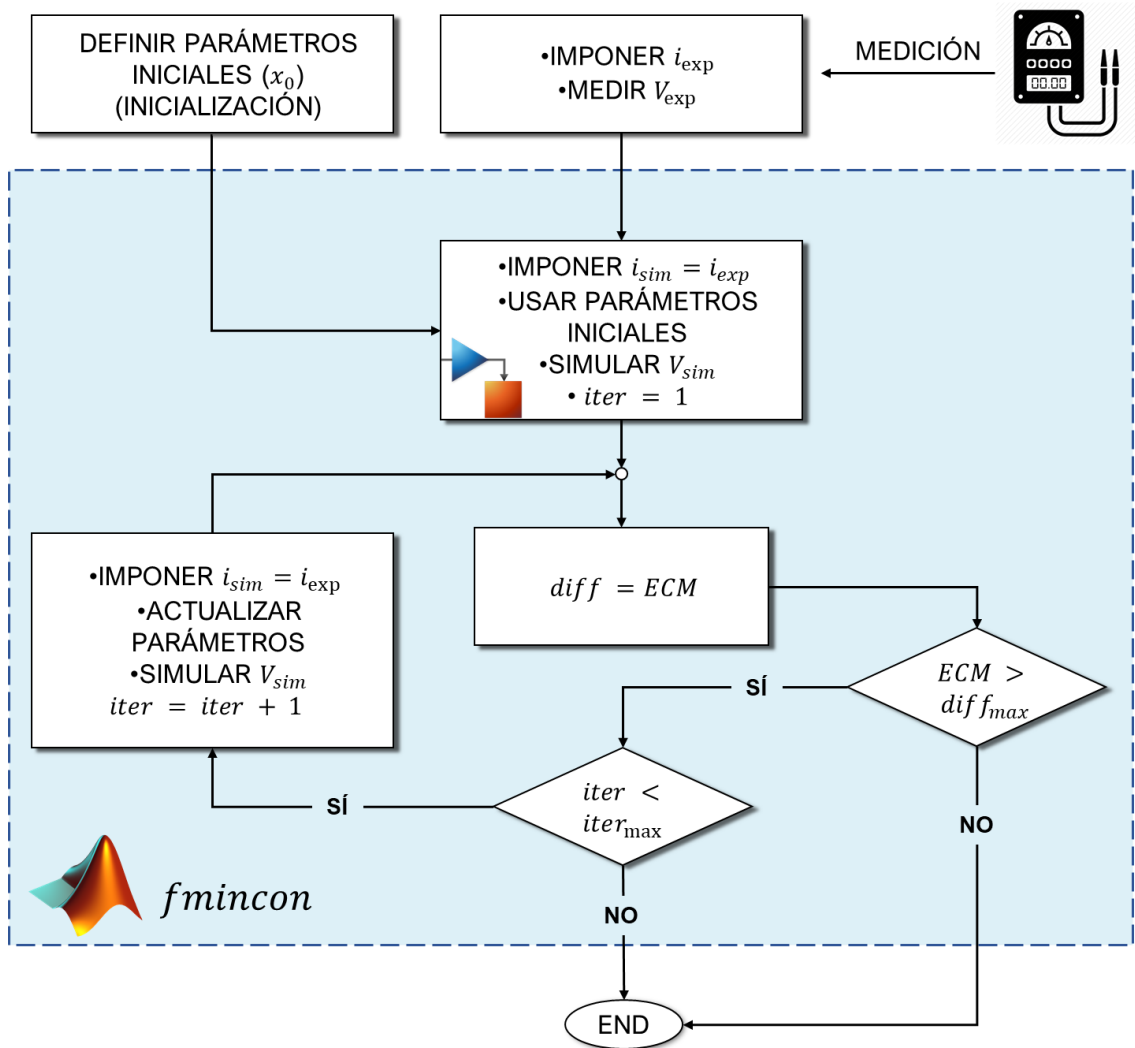
⁵⁷ MAXWELL TECHNOLOGIES. UC Reference: BMOD0058 E016 B020.

^(*) Siglas en inglés para Resistencia Equivalente en Serie, obtenida de pruebas en DC al SC y formulada en el modelo de Spyker [27]

^(**) Para las pruebas serie y paralelo, se tuvo en cuenta los efectos de esta conexión en la capacitancia nominal, la ESR y la tensión nominal.

⁵⁸ SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de parámetros.

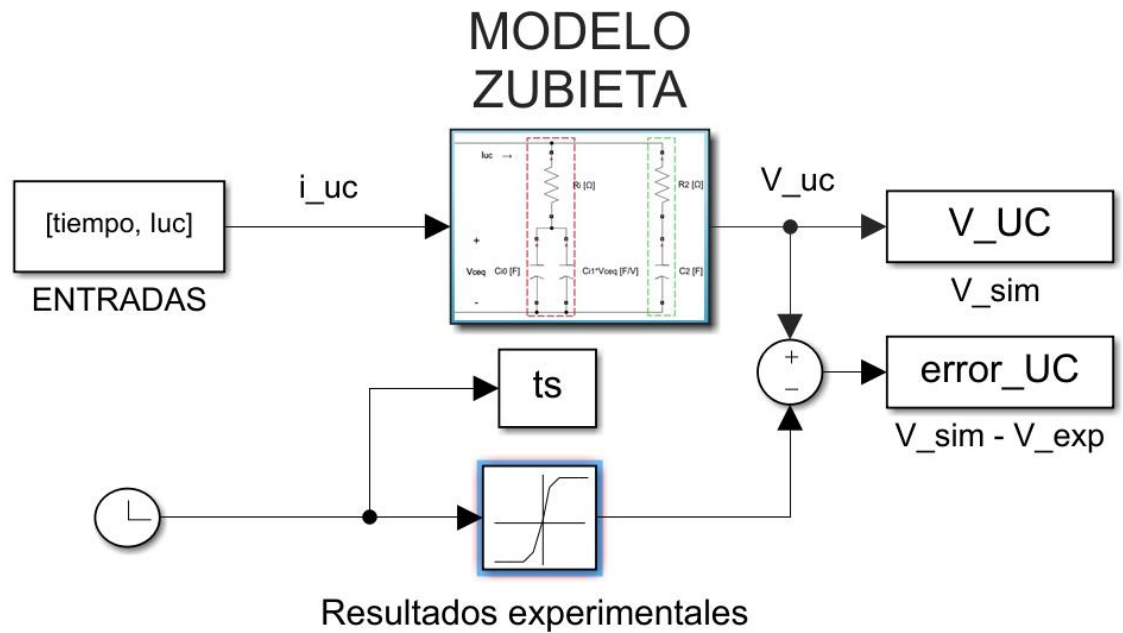


FUENTE: SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013.

Obsérvese que, contrario a como ocurre en los problemas convencionales de ajuste de curva, el ajuste no se hace sobre una función definida matemáticamente, sino a un modelo de simulación del cual se extraen salidas a partir de las entradas. El algoritmo plantea, iterativamente, probar valores de los parámetros en el modelo, para obtener la V_{sim} , compararla con la V_{exp} hasta obtener un ECM menor a la

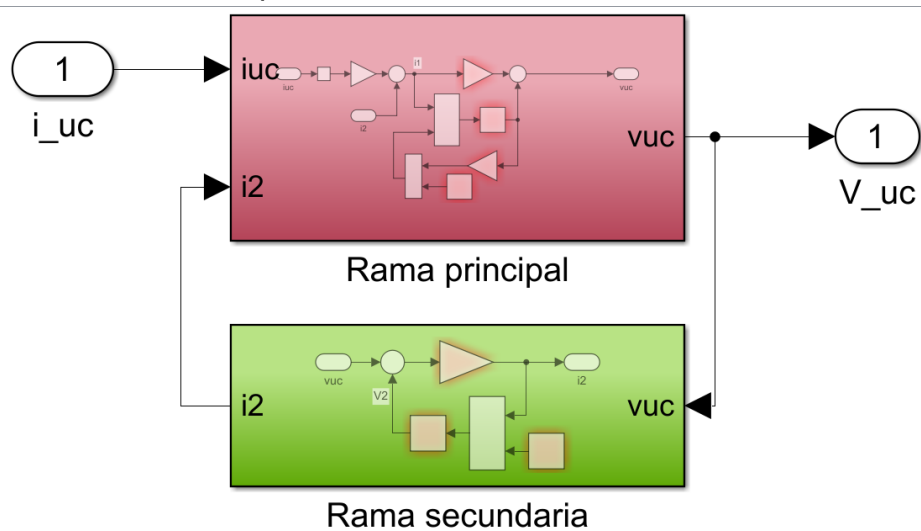
tolerancia. El modelo de simulación a partir del cual se obtiene la tensión simulada se presenta en la Figura 10.

Figura 10. Bloques de Simulink que componen el modelo del SC de Zubieta y la relación entradas/salida.



En el modelo presentado en la Figura 10, se muestra la relación entre la entrada (la corriente de cada prueba) y las salidas, es decir, la tensión simulada (bloque V_UC) y la diferencia entre la tensión simulada y la experimental (bloque error_UC). Los parámetros que se iteran se incluyen en el modelo dentro del bloque superior central, el cual contiene un conjunto de operaciones en bloques que representan la función de transferencia entre la corriente aplicada al SC (i_{uc}) y la respuesta en tensión (V_{uc}), como muestra la Figura 11.

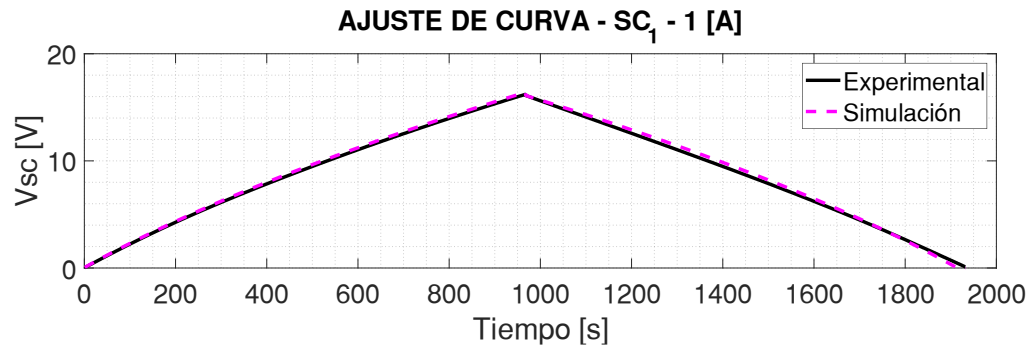
Figura 11. Bloques de subsistema de Simulink donde se modelan las dos ramas del circuito en el dominio de Laplace.



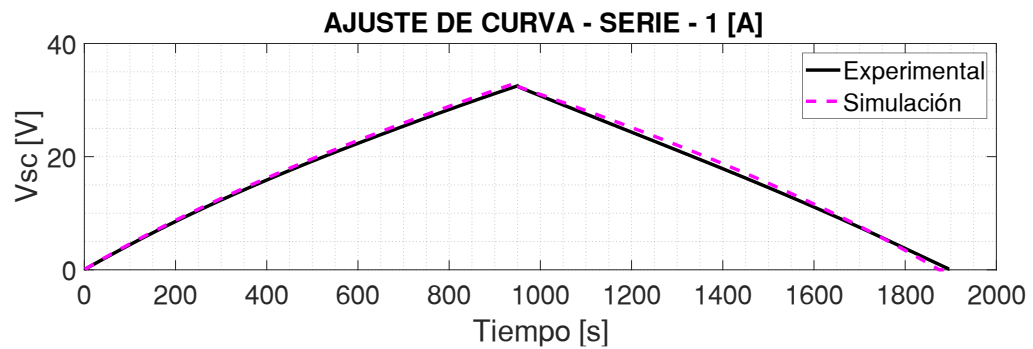
4.2.3 Resultados preliminares: Ejecutado el algoritmo, se puede apreciar la respuesta de la tensión de simulación en comparación con la tensión simulada en la Figura 12. Se observa que la curva de simulación se ajusta de una manera aproximada a las mediciones en la mayoría de las pruebas. Gráficamente, se observó que los ajustes para las configuraciones de un único SC (Figura 12.a) son más precisos que cuando el ajuste se hace sobre las configuraciones serie y paralelo (Figura 12.b). Las razones de este hecho se discutirán en la sección siguiente.

Figura 12. Ajuste de curva para las pruebas de 1 A en las configuraciones de SC1 (a) y serie (b).

(a)



(b)



Así, se evidencia que, resolviéndose este problema de optimización, se espera obtener los parámetros que mejor ajustan la curva simulada a la curva medida, según las condiciones dadas. En otras palabras, finalizado el algoritmo, se obtiene los valores de los parámetros del circuito equivalente de los SCs. Sin embargo, en este punto no es posible afirmar si estos valores son los mejores o si el ajuste fue lo suficientemente "bueno". Por lo que es imprescindible el paso siguiente: evaluar la calidad del ajuste, como se expone con más detalle en la sección siguiente.

4.3 Parámetros del circuito equivalente

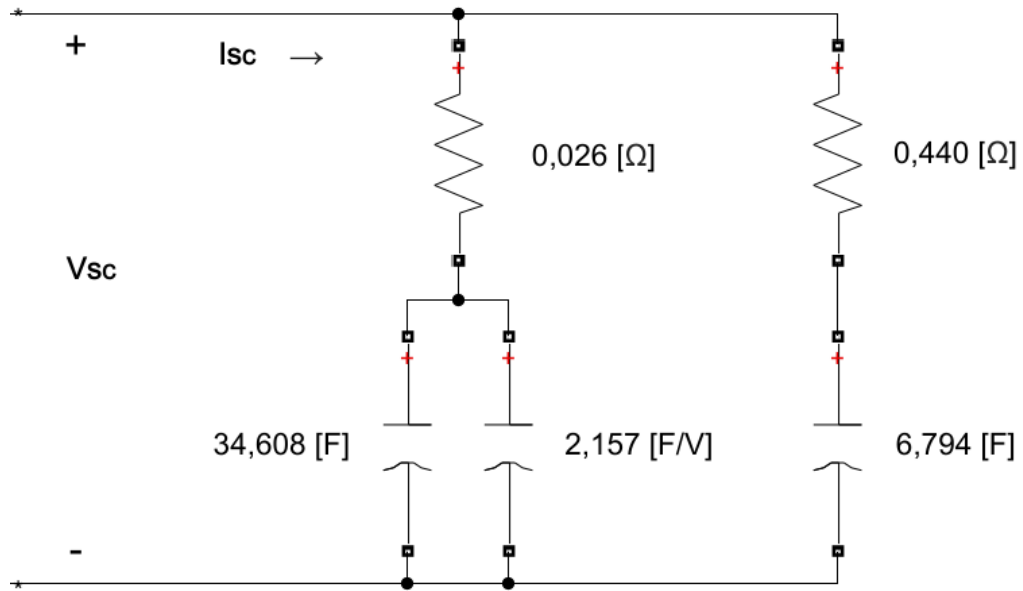
El procedimiento seguido en la sección anterior se ejecutó para cada una de las pruebas realizadas. Los resultados para cada una de las pruebas en todas las configuraciones se presentan en el Anexo C. A partir de estos resultados, se eligieron los parámetros finales de cada configuración, calculados como el promedio de los valores arrojados por cada prueba, pues en la mayoría^(*) de los casos la desviación estándar de estos valores fue inferior al 5% (respecto a la media). La Tabla 1 recoge los resultados para cada una de las configuraciones. La Figura 13 presenta el circuito equivalente con los valores correspondientes al SC₁.

Tabla 1. Valor promedio de los parámetros de los circuitos equivalentes para cada una de las configuraciones evaluadas.

CONFIGURACIÓN	R_i [Ω]	C_{i1} [F/V]	C_{i0} [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
SC1	0,026	2,157	34,608	0,440	6,794
SC2	0,024	2,154	34,800	0,352	6,916
SERIE	0,053	0,490	17,400	0,705	3,480
PARALELO	0,012	4,107	69,600	0,209	13,920

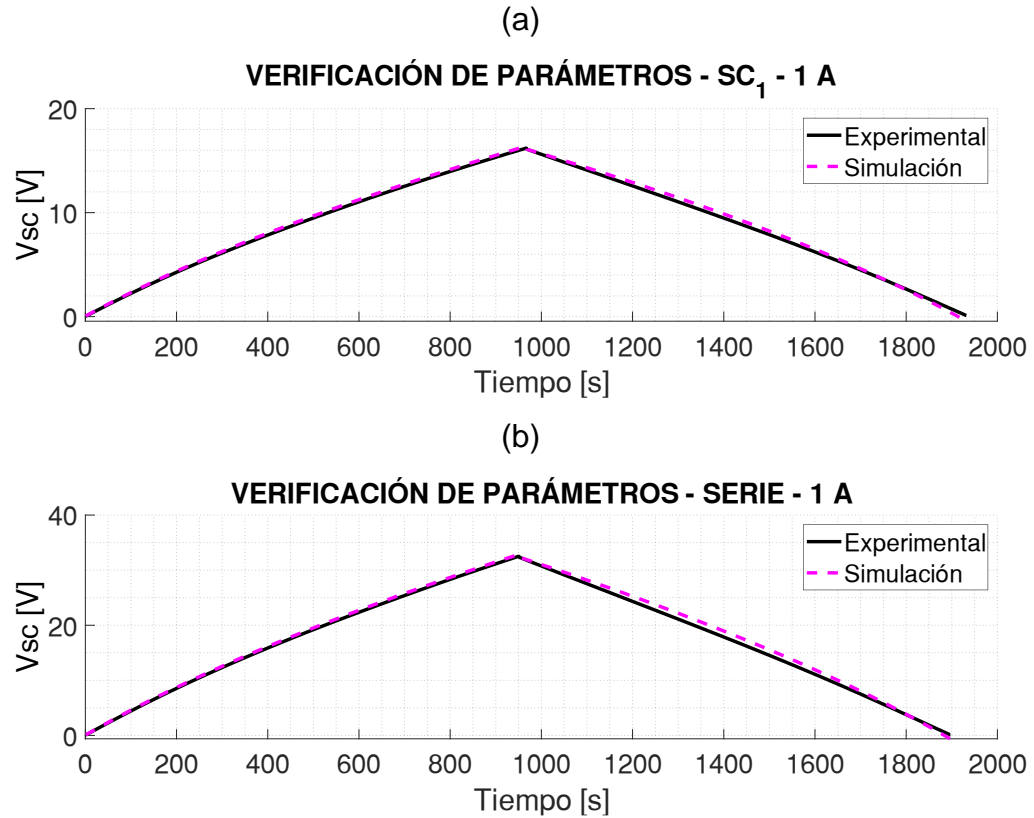
^(*) Excepto el parámetro R_i en las pruebas del SC2 y la configuración paralela, donde la desviación estándar fue de casi 15% y el parámetro R_2 en las mismas configuraciones arrojó una desviación del 20%. Estas desviaciones se consideran aceptables.

Figura 13. Circuito equivalente para el SC1.



A partir de los datos consignado en la Tabla 1, se simularon en Simulink los cuatro circuitos equivalentes para todos los casos correspondientes a las pruebas, esto con el fin de medir qué tan bien se ajustaron los parámetros escogidos a las mediciones realizadas. La Figura 14 presenta los casos de la prueba de 1 A en la configuración del SC₁ (ver Figura 14.a) y la configuración serie (ver Figura 14.b). Si estas gráficas se comparan visualmente con los resultados presentados en la Figura 12, se observa variaciones en la respuesta de la tensión simulada que, sin embargo, parecen consistentes con la tensión medida. Las gráficas para las demás pruebas se pueden consultar en el ANEXO D.

Figura 14. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A en las configuraciones de SC1 (a) y serie (b).



A pesar de las observaciones gráficas, es necesario medir cuantitativamente la calidad del ajuste. Para esto, se calcularon tres indicadores relacionados con el error entre los conjuntos de datos simulados y medidos: la raíz del error cuadrático medio ($RECM$)^(*), el error porcentual medio $\overline{\epsilon}_{\%}$ (EPM) y el indicador auxiliar EPM_{max} que recoge el valor máximo de error encontrado en cada prueba. Estos indicadores se calculan así:

^(*) Obsérvese que este indicador está relacionado directamente con la función objetivo del problema. En este caso se obtiene a partir de la comparación de los datos simulados y experimentales y no de la solución del problema de optimización.

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{exp_i} - V_{sim_i})^2} \quad [V] \quad (3)$$

$$\overline{\epsilon}_{\%} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{exp_i} - V_{sim_i}}{V_{exp_i}} \right| \quad [\%] \quad (4)$$

$$EPM_{max} = \max \left| \frac{V_{exp_i} - V_{sim_i}}{V_{exp_i}} \right| \quad [\%] \quad (5)$$

Una vez calculados los indicadores, se graficaron el $RECM$ y el $\overline{\epsilon}_{\%}$ respecto en cada una de las pruebas para cada configuración con el fin entender mejor el comportamiento de estos errores. La relación entre la $RECM$ y cada prueba se presenta en la Figura 15, mientras que la relación entre $\overline{\epsilon}_{\%}$ y las pruebas se muestra en la Figura 16.

Figura 15. Raíz del error cuadrático medio en cada una de las pruebas para las 4 configuraciones.

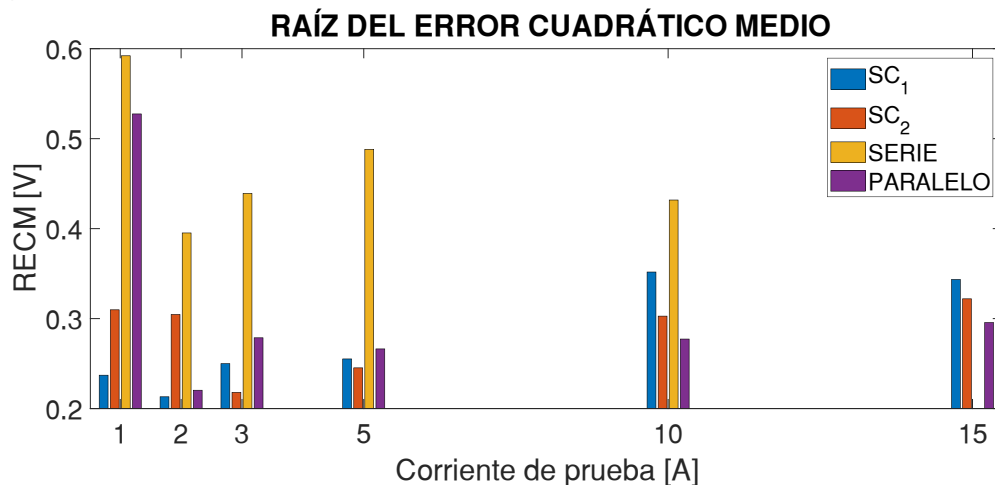
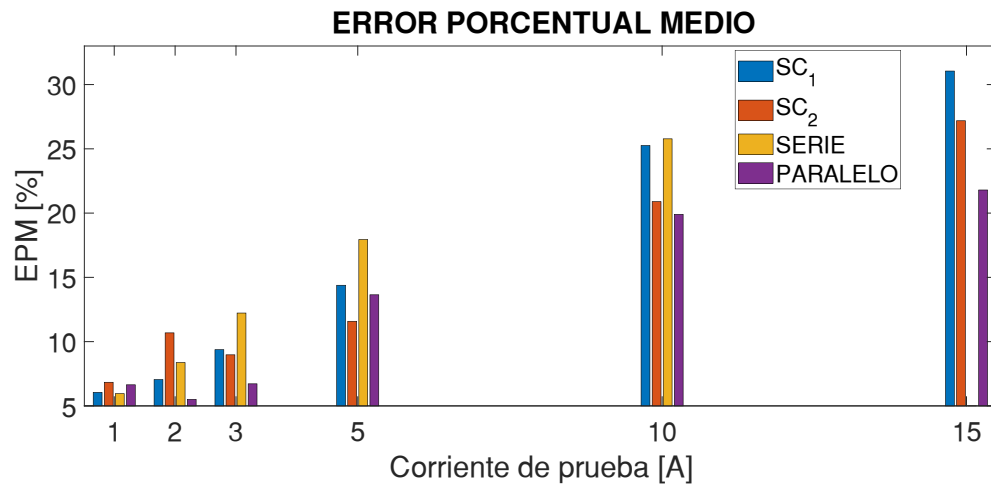


Figura 16. Error porcentual medio en cada una de las pruebas para las 4 configuraciones.



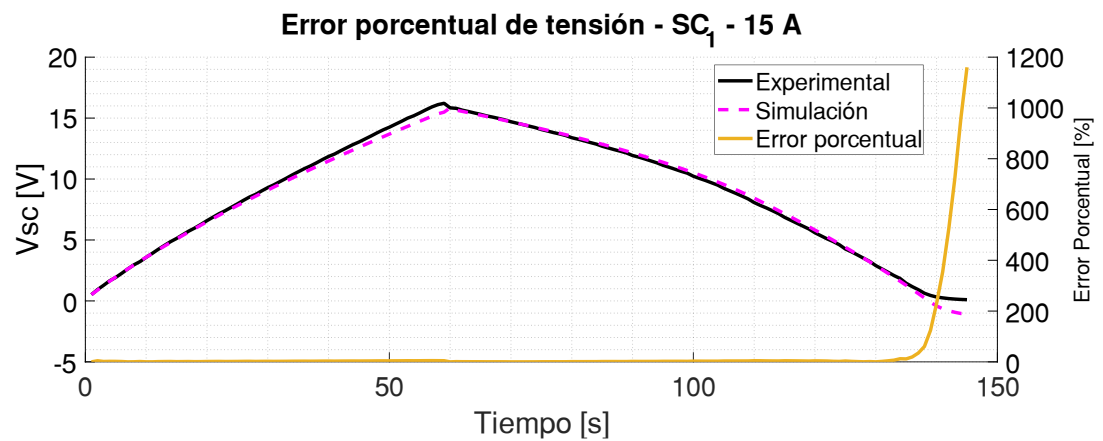
Como puede ser observado, la *RECM* presenta valores hasta de 0,6 V, pero en su mayoría se encuentran cercanos a 0,3 V. Esto quiere decir que la diferencia absoluta promedio entre la tensión simulada y la tensión experimental no supera los 0,6 V. Al comparar estos errores respecto a los datos experimentales, se obtiene el error porcentual medio, superior al 5% y que aumenta conforme aumenta la corriente en la prueba, hasta valores del 30%.

El aumento del error respecto a la corriente puede deberse a que corrientes elevadas como 10 A y 15 A sostenidas durante toda la prueba contribuyen a aumentar los efectos de temperatura en los SCs. Asimismo, la diferencia entre las simulaciones y las mediciones se acentúan para valores bajos de tensión (menores a 2 V), donde el error porcentual fue hasta del 1160% que aumentaron el promedio del EPM en gran medida, como evidencia la Figura 17. Si se ignoran los efectos del error para valores menores al 10% de la tensión nominal, es decir, 1,6 V, el error porcentual promedio fue inferior al 3% en todas las pruebas lo cual verifica numéricamente la calidad del ajuste. Otra de las razones del error proviene del equipo de adquisición de datos y medida, el cual estaba integrado en la fuente y carga programable. La información que proporciona el fabricante de estos equipos de medida relacionado con la exactitud en la medición se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Exactitud de los equipos de medida de la fuente y carga programable

EQUIPO DE MEDICIÓN	MEDIDA DE TENSIÓN	MEDIDA DE CORRIENTE
FUENTE PROGRAMABLE	$\leq 0.03\% + 5 \text{ mV}$	$\leq 0.01\% + 15 \text{ mA}$
CARGA PROGRAMABLE	$\pm (0.02\% + 24 \text{ mV})$	$\pm (0.02\% + 45 \text{ mA})$

Figura 17. Error absoluto porcentual entre los datos. Se evidencia el aumento del error porcentual en bajas tensiones.



A partir de los datos graficados en la Figura 16 para cada configuración y, además, determinando los valores del EPM máximo y el error porcentual medio acotado (EPMA), es decir, el EPM sin tener en cuenta las mediciones de tensión inferiores a 1,6 V, se obtienen los datos consignados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valor promedio de los indicadores y el EPM máximo para cada configuración.

CONFIGURACIÓN	<i>RECM</i> [v]	<i>EPM</i> [%]	<i>EPM_{MAX}</i> [%]	<i>EPMA</i> [%]
SC1	0,275	15,528	870,722	2,347
SC2	0,284	14,359	836,161	2,675
SERIE	0,469	14,054	1418,089	2,297
PARALELO	0,311	12,369	722,339	2,937

Así, se considera aceptable el ajuste de curvas, por lo que los parámetros identificados se aceptan para el modelo de los SC. En el capítulo siguiente se evalúa el comportamiento de los SCs en un contexto diferentes, a saber: un sistema de energía híbrido.

5. CASO DE ESTUDIO: GESTIÓN DE ENERGÍA DE UNA FUENTE HÍBRIDA

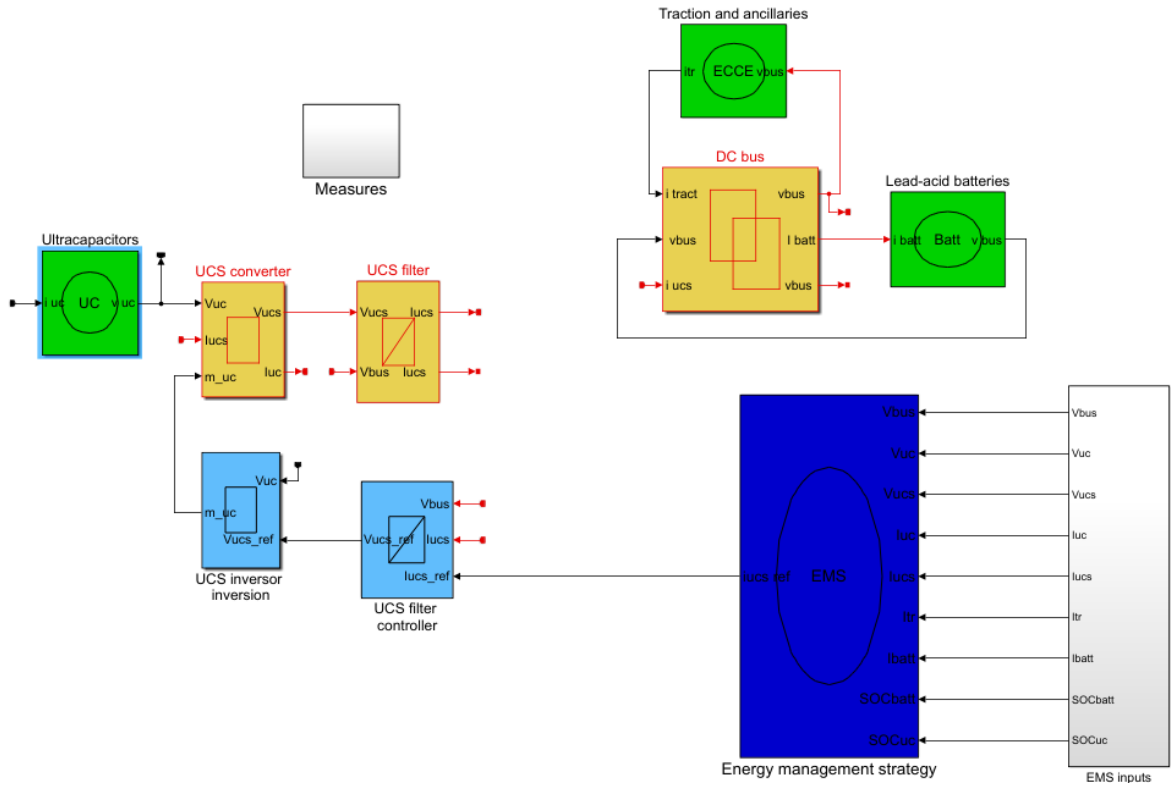
Una de las aplicaciones más relevantes en la actualidad para los SCs es la implementación de fuentes de alimentación híbridas para vehículos eléctricos. Entre estos vehículos se encuentra las bicicletas de pedaleo asistido, comúnmente conocidas como bicicletas eléctricas. El presente capítulo presenta los resultados de la simulación en Simulink de una fuente de energía híbrida que consta de una batería de ácido de plomo, los SCs y un perfil de potencia demandada que representa la exigencia de potencia y energía de la tracción en una ruta de bicicleta. Se realizaron simulaciones para las configuraciones de SC₁, serie y paralelo.

5.1 Modelo

Se empleó el modelo en Simulink de una fuente de energía híbrida del vehículo eléctrico de pruebas asociado con el *IEEE VTS Motor Vehicles Challenge – Versión 2020*. Este modelo⁵⁹, originalmente, simula el sistema de alimentación del vehículo, constituido por un conjunto de SCs, celdas de combustible y baterías de plomo ácido. Para este trabajo se adaptó el modelo, por lo que se removió la celda de combustible y se modificaron los parámetros de las baterías, los SCs y el perfil de carga. La Figura 18 presenta el modelo modificado e implementado en Simulink.

⁵⁹ SOLANO, Javier, *et al.* IEEE VTS motor vehicles challenge 2020 - Energy management of a fuel cell/ultracapacitor/lead-acid battery hybrid electric vehicle. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 – Proceedings. 2019, pp. 3-8.

Figura 18. Modelo del SEH del caso de estudio.



FUENTE: SOLANO, Javier, *et al.* IEEE VTS motor vehicles challenge 2020 - Energy management of a fuel cell/ultracapacitor/lead-acid battery hybrid electric vehicle. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 – Proceedings. 2019, pp. 3-8.

El modelo original se implementó usando el formalismo de la Representación Energética Macroscópica⁶⁰ que permite, de manera gráfica y sintética, analizar las interacciones entre sistemas multi-físicos. Los sistemas representados en la Figura 18 son los SCs, las baterías y la carga (en color verde), el sistema de gestión de la energía en (azul), los sistemas de conversión o distribución de energía (en amarillo) y los elementos de inversión (en azul cian).

⁶⁰ BIENAIME, Daniel, *et al.* Energetic Macroscopic Representation as an efficient tool for energy management in a hybrid electrical system embedded in a helicopter. En: 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE. 2012, pp. 1-6.

5.1.1 Baterías: La principal fuente de energía del sistema es una batería de plomo-ácido. La función de esta batería, como se verá, es proveer al sistema de un flujo constante de energía. Los parámetros de este componente se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del sistema de baterías para la simulación.

VARIABLE	NOMBRE	VALOR
kEm	Constante del modelo	0.3897
Em_0	Tensión nominal	38 [V]
T_1	Constante del modelo	2000 [s]
$nCell$	Numero de celdas	1
r_0	Constante del modelo	2.3e-3
r_1	Constante del modelo	1.97e-3
SOC_0	Estado de carga inicial	0.8 [p.u.]
Q_{nom}	Capacidad Nominal	100 [Ah]

La batería está sometida a una serie de restricciones físicas que deben ser tenidas en cuenta dentro de la simulación, pues, debido a que la batería se conecta directamente al barraje DC del sistema, sin la intervención de electrónica de potencia, se debe mantener la tensión en los bornes dentro de un rango específico por cuestiones de estabilidad. Estas y otras restricciones de la batería se consigan en la Tabla 5.

Tabla 5. Restricciones de las baterías para la simulación.

VARIABLE	NOMBRE	VALOR
$V_{bus_{max}}$	Tensión máxima	38 [V]
$V_{bus_{min}}$	Tensión mínima	34 [V]
$SOC_{batt_{max}}$	Estado de carga máximo	0.8 [p.u.]
$SOC_{batt_{min}}$	Estado de carga mínimo	0.2 [p.u.]
$I_{batt_{max}}$	Corriente máxima	40 [A]
$I_{batt_{min}}$	Corriente mínima	-40 [W]

5.1.2 SCs: A partir de la identificación de los modelos en el capítulo precedente, se decidió usar los parámetros de las configuraciones SC₁, serie y paralelo, ya que los parámetros para el SC₂ eran muy cercanos al SC₁. La función principal de este dispositivo será atender las variaciones súbitas de potencia que se presenten. Algunos parámetros diferentes a los del circuito equivalente asociados con los SCs se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros asociados a un SC para la simulación.

VARIABLE	NOMBRE	VALOR
v_0	Tensión inicial	16 [V]
v_{nom}	Tensión nominal	16 [V]
R_{uc}	Resistencia del filtro	0,2 [Ω]
L_{uc}	Inductancia del filtro	0,04 [H]
k_p	Constante proporcional	50
k_i	Constante Integral	100

Así mismo, para mantener el sentido físico del modelo, se fijaron un conjunto de restricciones asociados con los límites de tensión, corrientes de carga/descarga, estados de carga y potencia máxima. Estas restricciones se consignan en la Tabla 7 y fueron tomadas de la información del fabricante⁶¹.

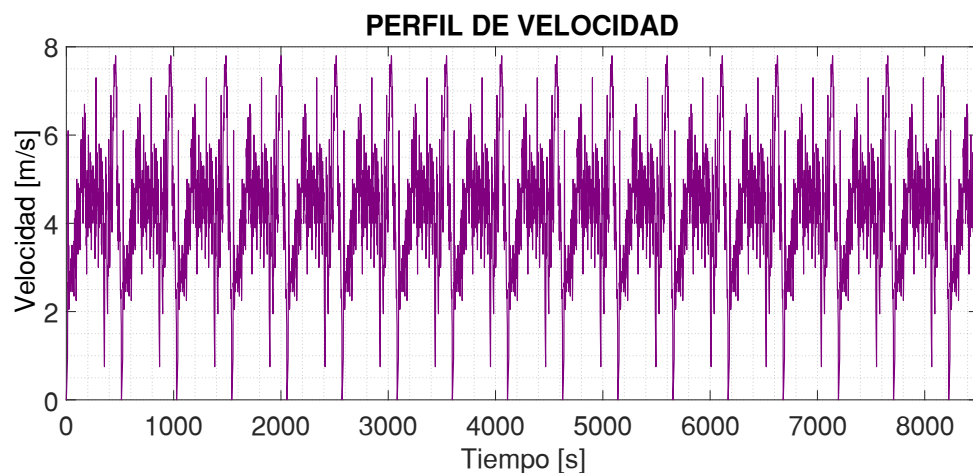
Tabla 7. Restricciones de los SCs para la simulación.

VARIABLE	NOMBRE	VALOR
$V_{uc_{max}}$	Tensión máxima	17 [V]
$I_{uc_{max}}$	Corriente máxima	170 [A]
$I_{uc_{min}}$	Corriente mínima	-170 [A]
$SOC_{uc_{max}}$	Estado de carga máximo	1 [p.u.]
$SOC_{uc_{min}}$	Estado de carga mínimo	0.25 [p.u.]
$P_{uc_{max}}$	Potencia máxima	2890 [W]

⁶¹ MAXWELL TECHNOLOGIES. UC Reference: BMOD0058 E016 B020.

5.1.3 Perfiles de demanda: Los perfiles de conducción en este estudio están asociados con una ruta en la ciudad de Bucaramanga (Colombia) propuesta en ⁶². Los autores diseñaron la ruta y a partir de herramientas computacionales, los parámetros de la bicicleta y sus conductores calcularon las distancias, perfiles del terreno, velocidad y, así, lograron estimar los requerimientos de potencia eléctrica que la ruta exigía. El perfil de velocidad estudiado en este trabajo se presenta en la Figura 19 Como se observa a simple vista de la figura, el perfil consiste en una ruta repetida 17 veces, con una velocidad promedio de 4,48 m/s y una velocidad máxima de 7,80 m/s.

Figura 19. Perfil de velocidad de conducción de la bicicleta usado en las simulaciones.

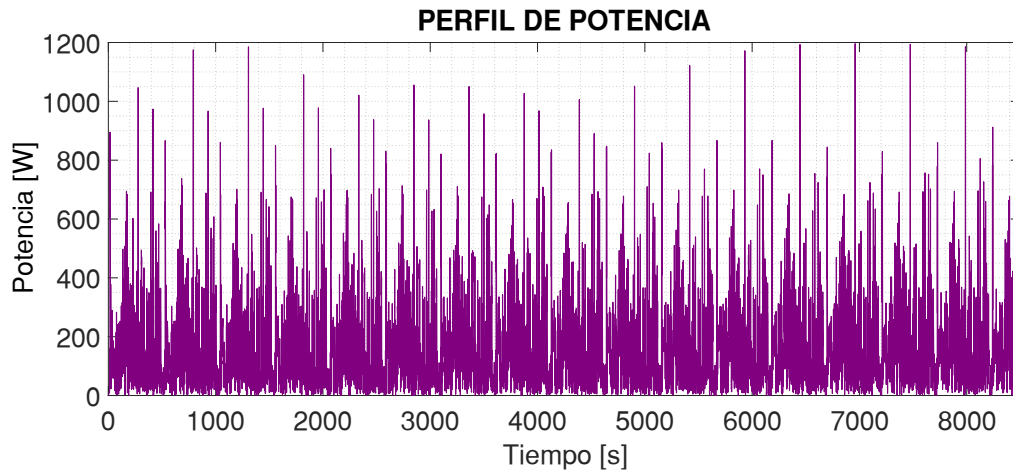


El perfil de potencia demandado por la bicicleta, derivado de la ruta propuesta se presenta en la Figura 20. Este perfil tiene varios picos que sobrepasan los 600 W, hasta alcanzar potencias instantáneas de 1205 W, no obstante, el valor promedio de la potencia es de apenas 175 W, mientras que la energía total requerida por este

⁶² AMAYA RIVERA, Juan Felipe y RUEDA FONSECA, Fabian Andres. Análisis y simulación de E-bikes empleando Representación Macroscópica Energética: Casos de estudio. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2019.

perfil es 366 Wh. Estos perfiles se incorporaron al bloque “*Traction and ancillaries*” de la Figura 18.

Figura 20. Perfil de potencia demandada por la bicicleta usado en las simulaciones.

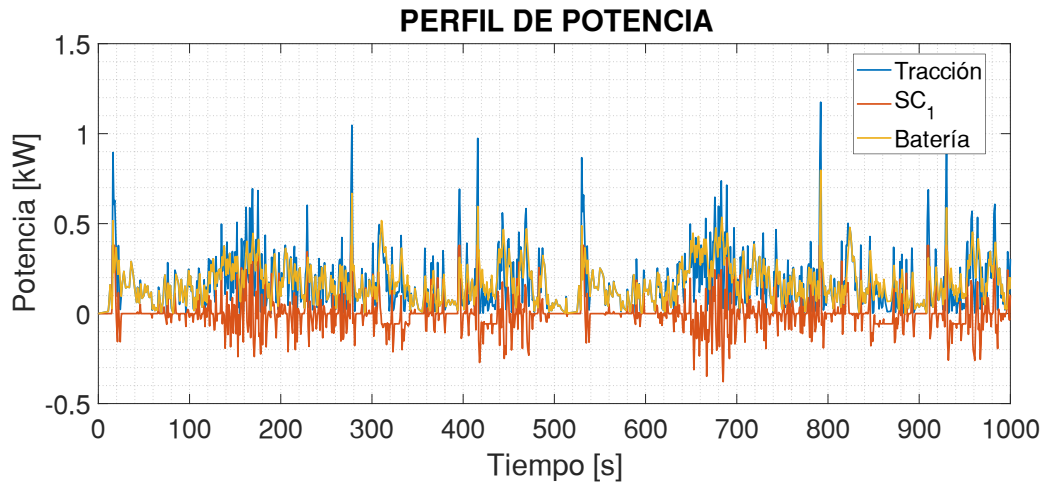


5.1.4 Estrategia de gestión de energía: Un componente fundamental de este modelo es el bloque de *Energy Management Strategy* (EMS). Este bloque tiene como función definir la referencia de despacho de cada una de las fuentes de potencia, a partir de un conjunto de reglas predefinidas. En el caso de este trabajo, la regla fundamental de la EMS es que la corriente de referencia de los SCs supla los cambios rápidos de la potencia demandada, esto se hace calculando la diferencia entre la potencia de un momento (t) contra la potencia en el momento precedente (t-1). Este bloque también considera las restricciones en las variables de tensión, corriente, estado de carga y límites de potencia.

5.2 Simulaciones

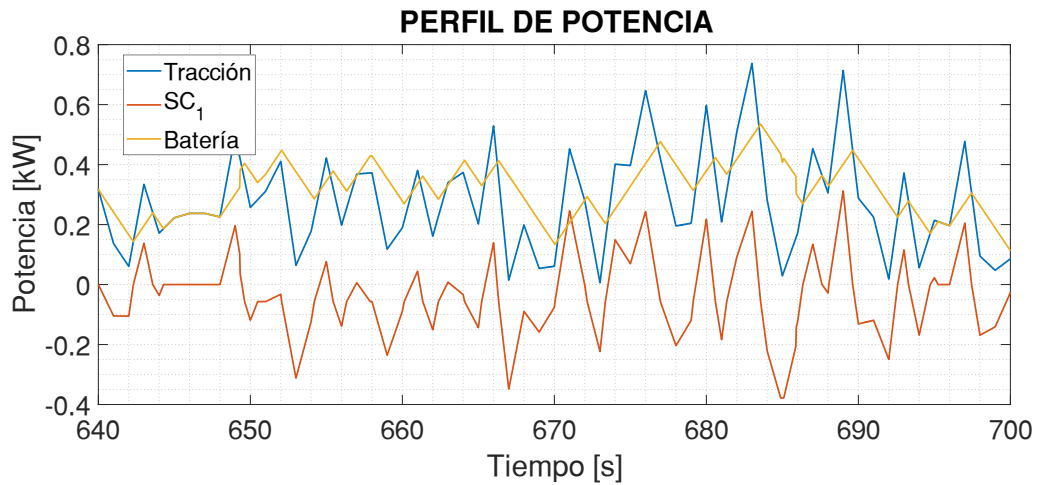
Se realizaron tres simulaciones, una con los parámetros del SC₁, otra con los parámetros para el conjunto serie y otra el conjunto paralelo, para los primeros 1000 segundos. A partir de estos resultados, se estudió el comportamiento de la potencia, la tensión, el SOC y las corrientes en los dispositivos. La distribución de potencia durante todo el trayecto simulado se presenta en la Figura 21.

Figura 21. Distribución de potencia en los componentes del sistema.



5.2.1 Operación de la fuente en detalle: Debido al tamaño de los datos de simulación y la cantidad, resulta más interesante hacer un acercamiento al comportamiento durante los picos para una de las configuraciones. Este acercamiento se realizó entre el segundo 640 y el segundo 700 de la simulación. En el caso del despacho de potencia, la Figura 22 presenta el detalle. A partir de esta gráfica, se logra observar que mientras la potencia de la batería se mantiene más o menos estable, las fluctuaciones repentinas de la potencia de carga son asumidas por los SCs, es decir, el ritmo de variación de la potencia en los SCs es superior al de las baterías. Asimismo, en los momentos en que la carga es 0 o relativamente baja, las baterías cargan los SCs. Así, la EMS cumple su objetivo, encargando a los SCs de la entrega de las variaciones de potencia y manteniendo estable la entrega de potencia de las baterías.

Figura 22. Detalle de la distribución de la potencia de carga entre los SCs (rojo) y la batería (amarillo) para atender la demanda (azul).



Por otra parte, durante este intervalo se aprecia que el SC tiende a cargarse, pues presenta aumentos de tensión, como lo muestra la Figura 23. Mientras que la tensión en la batería está dentro de los rangos de operación estable, manteniéndose alrededor de 37,8 V, pues es la encargada de mantener la tensión del barraje DC (Ver Figura 24).

Figura 23. Tensión en el SC1 durante el intervalo temporal analizado.

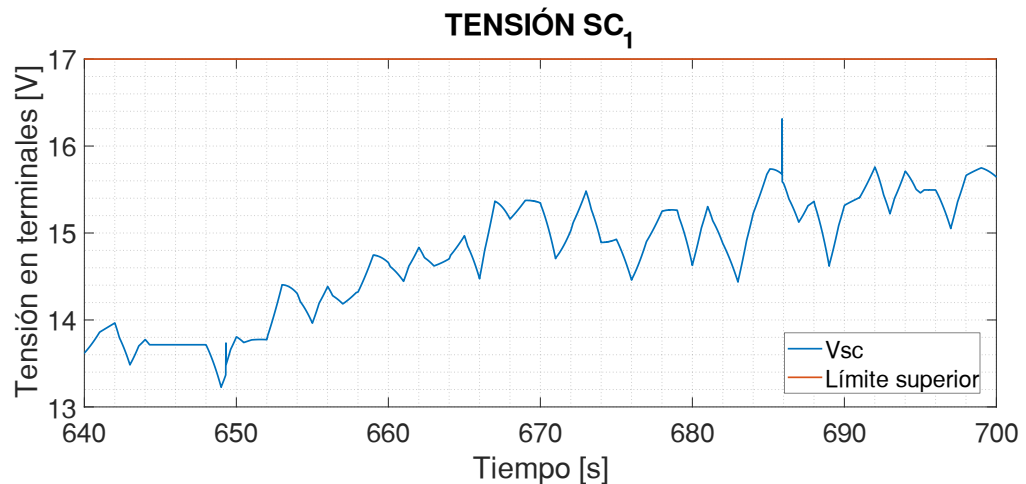
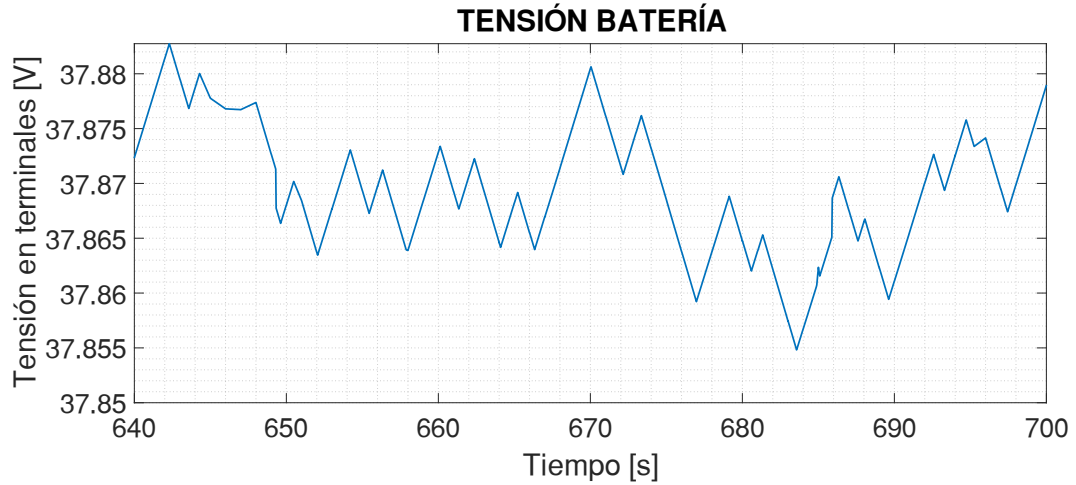


Figura 24. Tensión en la batería durante el intervalo temporal analizado.



En cuanto a la corriente, se observa que el comportamiento de esta en la batería es proporcional a la potencia, mientras que en la corriente del SC se evidencia las variaciones rápidas que, segundo a segundo, asume el dispositivo. En ambos casos, las corrientes están muy por debajo de la capacidad máxima (ver Tabla 5. Restricciones de las baterías para la simulación. Tabla 5 y Tabla 7) de los dispositivos. Teniéndose en cuenta que el intervalo analizado corresponde a un intervalo con múltiples picos, se observa que el sistema de alimentación se encuentra sobredimensionado y los componentes subutilizados.

Figura 25. Detalle de la corriente que fluye por el SC1 durante la simulación. Los valores positivos implican descarga.

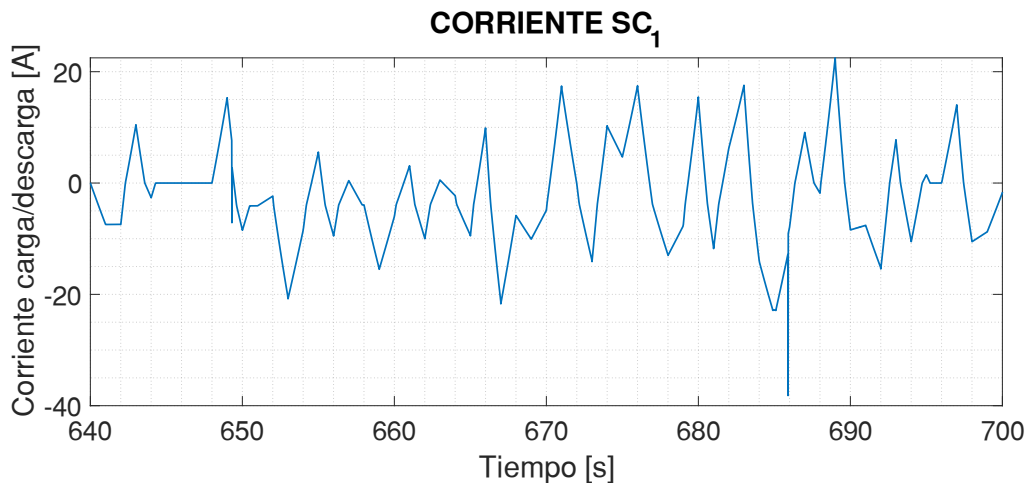
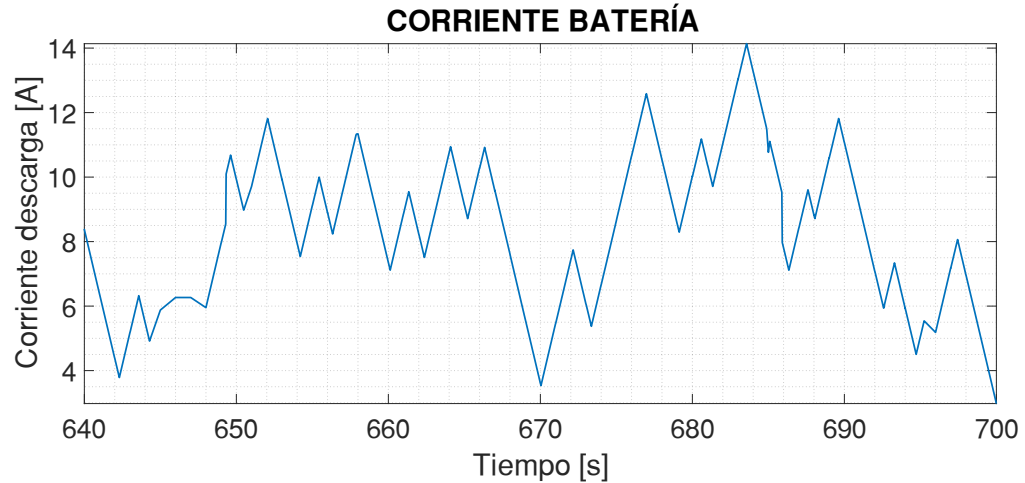


Figura 26. Detalle de la corriente que fluye desde la batería durante la simulación.



5.3. Resultados

Los datos obtenidos de la simulación hacen de los SCs usados, un sistema factible para su uso en una fuente híbrida como la de la simulación. Estos datos se recogen en un conjunto de gráficas en el Anexo F.

En términos generales, los hallazgos más importantes se resumen en los siguientes incisos:

- El comportamiento de la potencia de salida de los SCs en serie y en paralelo fue el mismo, ya que cuentan con la misma capacidad de potencia y la EMS es la misma. El efecto de la conexión se vio reflejado en la tensión y la corriente, pues la tensión en serie fue el doble de la tensión en paralelo, pero la corriente en serie fue la mitad de la corriente en paralelo, conservándose la proporcionalidad derivada del cambio en la conexión y la fórmula $P = VI$. Sin embargo, la forma de la característica es exactamente la misma. Estas gráficas se recogen en el anexo F.1.
- Cuando se compara la configuración SC₁ con las configuraciones con dos SCs (serie o paralelo), se identifica que el perfil de potencia fue prácticamente idéntico, excepto por tres intervalos de tiempo, donde la EMS lleva a que los SCs se carguen. Un comportamiento similar se observa en la corriente, mientras que la característica de tensión en el SC₁ tiene un comportamiento

que difiere en su forma al de las configuraciones serie o paralelo^(*). Estos hallazgos se ilustran en el anexo F.2.

- Un solo supercondensador es suficiente para atender los picos de corriente y potencia demandados por la carga y asignados por el EMS. Esto debido a que la corriente máxima de los SCs es 170 A, mientras que la simulación reveló que las corrientes máximas demandadas al SC no superaron los 30 A; mientras que la potencia nominal de cada SC es de 2,89 kW, la potencia demanda al SC no superó los 0,4 kW en los picos mayores. Otro dato que apoya esta información es que el SOC de los SCs en todas las simulaciones se mantuvo por encima de 68%. Las figuras que soportan estas afirmaciones se recogen en el anexo F.3.
- Se observó que los perfiles de tensión, corriente y SOC en la batería se mantuvieron sin cambio alguno en las 3 simulaciones. Esto quiere decir que el aumento de la capacidad del SC o la variación de sus parámetros internos no tiene efecto alguno en el comportamiento de la batería. El comportamiento de las baterías en cada prueba se puede observar en el anexo F.4.

^(*) Se podría pensar que la diferencia en la tensión entre ambos escenarios tendría efectos significativos en la corriente si se sabe que la potencia se mantiene prácticamente igual, no obstante, el rango de variaciones de la tensión es de apenas unos pocos voltios, que no repercuten significativamente la corriente.

CONCLUSIONES

La caracterización de dos SCs marca Maxwell (ref. BMOD0058 E016 B02) fue realizada y los modelos identificados en la simulación de una bicicleta eléctrica fueron evaluados. Las actividades llevadas y sus resultados permitieron sacar las siguientes conclusiones:

- Existen una cantidad numerosa y variada de modelos para SC. Sin embargo, la aplicabilidad de cada uno de ellos es limitada a un conjunto de estudios específicos. En el caso de SCs para la simulación dinámica de sistemas de energía híbridos, una de las opciones más interesantes y aplicadas es el modelo de Zubieta y Bonert, aunque, si se quieren tener una mayor precisión en los resultados, debe optarse por modelos que incluyan los efectos de la temperatura en el dispositivo, lo cual se recomienda como trabajo futuro para la escuela, pues interesa conocer los impactos de la temperatura frente a este modelo y si vale la pena su inclusión.
- Por otra parte, se corroboró la precisión del ajuste de curvas del algoritmo propuesto en [13] en la identificación de parámetros del modelo de Zubieta y Bonert, no obstante, este algoritmo solo es aplicable a una prueba experimental a la vez. Cuando se cuentan con múltiples mediciones experimentales del mismo SC (como en este trabajo, donde el SC se sometió a múltiples corrientes de entrada), los parámetros finales escogidos deben calcularse a partir de los resultados de cada una de las pruebas individuales. Este enfoque condujo a errores en la evaluación final de los parámetros, pues los parámetros finales de un SC eran el resultado del promedio de los parámetros calculados para cada prueba experimental. Podría buscarse la forma de plantear un algoritmo que resuelva el ajuste de curvas de manera simultánea para todas las pruebas, obteniéndose un conjunto de parámetros único.
- Se confirmó a través de simulación que los SCs son una alternativa efectiva para asumir las variaciones rápidas de potencia y proteger a las baterías de estas variaciones. Sin embargo, para apreciar mejor estos efectos, debe simularse un sistema que esté apropiadamente dimensionado para las exigencias de la carga.

- Finalmente, si se implementa un sistema con SCs idénticos, conectados en serie o paralelo y manteniendo la misma referencia de potencia dada por la EMS, la conexión no tiene ningún impacto significativo en la respuesta dinámica del sistema, pues es visto como una sola fuente cuya capacidad se duplicó.

BIBLIOGRAFÍA

AFIF, Ahmed, *et al.* Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review. En: Journal of Energy Storage, 2019, vol. 25. ISSN 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2019.100852.

AMAYA RIVERA, Juan Felipe y RUEDA FONSECA, Fabian Andres. Análisis y simulación de E-bikes empleando Representación Macroscópica Energética: Casos de estudio. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2019.

ASTER, R.C.; BORCHERS, B. y THURBER, C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems. 3 ed. 2013. ISBN 9780123850485.

BELHACHEMI, F.; RAEL, S. y DAVAT, B. Physical based model of power electric double-layer supercapacitors. En: Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), IEEE. 2000, pp. 3069-3076. DOI 10.1109/ias.2000.882604.

BIENAIME, Daniel, *et al.* Energetic Macroscopic Representation as an efficient tool for energy management in a hybrid electrical system embedded in a helicopter. En: 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE. 2012, pp. 1-6. ISBN 978-1-4673-1372-8. DOI 10.1109/ESARS.2012.6387385.

BULLER, Stephan, *et al.* Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy. En: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6. 2002, pp. 1622-1626. ISSN 00939994. DOI 10.1109/TIA.2002.804762.

CHAI, Ruizhi. y ZHANG, Ying. A Practical Supercapacitor Model for Power Management in Wireless Sensor Nodes. En: IEEE Transactions on Power

Electronics, vol. 30, no. 12. 2015, pp. 6720-6730. ISSN 08858993. DOI 10.1109/TPEL.2014.2387113.

CHANG, Liang. y HANG HU, Yun. Supercapacitors. Comprehensive Energy Systems. En: Elsevier. 2018, pp. 663-695. DOI 10.1016/B978-0-12-809597-3.00247-9.

DOMINGUEZ, Ricardo; SOLANO, Javier y JÁCOME, Andrés. Sizing of fuel cell - Ultracapacitors hybrid electric vehicles based on the energy management strategy. En: 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 – Proceedings. 2019. DOI 10.1109/VPPC.2018.08605018.

ESPACENET, 1954. US2800616A Low voltage electrolytic capacitor

FARAJI, Sohelia y ANI, Farid. The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42. 2015, pp. 823-834. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2014.10.068.

FARANDA, R. A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. En: Elsevier. 2010.

GALINDO RAMÍREZ, Juan Daniel y OLARTE ORTIZ, Oscar. SIMULACIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES DE BAJA POTENCIA. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2018.

GONZÁLEZ, Ander, *et al.* Review on supercapacitors: Technologies and materials. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58. 2018, pp. 1189-1206. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2015.12.249.

GUALOUS, Hamid, *et al.* Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature. En: Journal of Power Sources, vol. 123, no. 1. 2003, pp. 86-93. ISSN 03787753. DOI 10.1016/S0378-7753(03)00527-5.

HU, X., LI, S. y PENG, H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. En: Journal of Power Sources, vol. 198. 2012, pp. 359-367. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013.

JÁCOME, Andres. DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA COMPUESTA DE PILAS A COMBUSTIBLE TIPO PEM Y SUPERCONDENSADORES CON CONEXIÓN DIRECTA. Trabajo de posgrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, 2018.

JAVED, K., ASHFAQ, H. y SINGH, R. Application of Supercapacitor as Hybrid Energy Storage Device in Stand-alone PV System. En: 2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA). 2019, pp. 1-4. ISBN 978-1-7281-3958-6. DOI 10.1109/ICPECA47973.2019.8975650.

LEPAGE, G.P, *et al.* Constrained curve fitting. En: Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, vol. 106-107. 2002, pp. 12-20. ISSN 09205632. DOI 10.1016/S0920-5632(01)01638-3.

MARTÍN, Rodolfo, *et al.* Modeling of Electrochemical Double Layer Capacitors by Means of Fractional Impedance. En: Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 3, no. 2. 2008. ISSN 1555-1415. DOI 10.1115/1.2833909.

MAXWELL TECHNOLOGIES. Product Guide: BOOSTCAP Ultracapacitors. [Consulta: Junio, 2009]. Disponible en:

https://www.maxwell.com/images/documents/PG_boostcap_product_guide.pdf

MAXWELL TECHNOLOGIES. UC Reference: BMOD0058 E016 B020. [Consulta: Junio, 2020]. Disponible en: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/16v-small-modules/documents>.

MENDOZA, Diana Sofia, *et al.* Energy Management of a Dual-Mode Locomotive Based on the Energy Sources Characteristics. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2019, pp. 1-4. ISBN 978-1-7281-1249-7. DOI 10.1109/VPPC46532.2019.8952445.

PETREUS, Dorin, *et al.* Modeling and sizing of supercapacitors. En: Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 8, no. 2. 2008, pp. 15-22. ISSN 15827445. DOI 10.4316/aece.2008.02003.

RAFIK, F, *et al.* Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. En: Journal of Power Sources, vol. 165, no. 2. 2007, pp. 928-934. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2006.12.021.

RAJANI, S.V., PANDYA, V.J. y SHAH, V.A., 2016. Experimental validation of the ultracapacitor parameters using the method of averaging for photovoltaic applications. En: Journal of Energy Storage, vol. 5. 2016, pp. 120-126. ISSN 2352152X. DOI 10.1016/j.est.2015.12.002.

SAMANTARA, Aneeya y RATHA, Satyajit. Materials Development for Active/Passive Components of a Supercapacitor. En: Springer Singapore. ISBN 978-981-10-7262-8.

SCIBIOH, M.A. y VISWANATHAN, B., 2020. Supercapacitor: an introduction. Materials for Supercapacitor Applications. Elsevier. 2020, pp. 1-13. ISBN 9780128198582.

SOLANO, Javier, *et al.* A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles. En: Information Sciences, vol. 190. 2012, pp. 192-207. ISSN 00200255. DOI 10.1016/j.ins.2011.12.013.

SOLANO, Javier, *et al.* IEEE VTS motor vehicles challenge 2020 - Energy management of a fuel cell/ultracapacitor/lead-acid battery hybrid electric vehicle. En: 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 – Proceedings. 2019, pp. 3-8. DOI 10.1109/VPPC46532.2019.8952246.

SOLANO, Javier, HISSEL, Daniel y PERA, Marie-Cécile. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. En: 2013 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2013. DOI 10.1109/VPPC.2013.6671692.

SPYKER, R.L. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. En: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, no. 3 PART 1. 2000, pp. 829-836. ISSN 00189251. DOI 10.1109/7.869502.

SRINIVASAN, V. Mathematical Modeling of Electrochemical Capacitors. Journal of The Electrochemical Society, vol. 146, no. 5. 1999, pp. 1650. ISSN 00134651. DOI 10.1149/1.1391821.

ZHANG, Lei, *et al.* A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81. 2016, pp. 1868-1878. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.283.

ZHANG, Lei, *et al.* Online parameter identification of ultracapacitor models using the extended Kalman filter. En: *Energies*, vol. 7, no. 5. 2015, pp. 3204-3217. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en7053204.

ZUBIETA, Luis. y BONERT, Richard. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. En: *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1. 2000, pp. 199-205. ISSN 00939994. DOI 10.1109/28.821816.

ANEXOS

ANEXO A. Interfaces del software de laboratorio

Figura 27. Interfaz del software que controla la fuente programable.

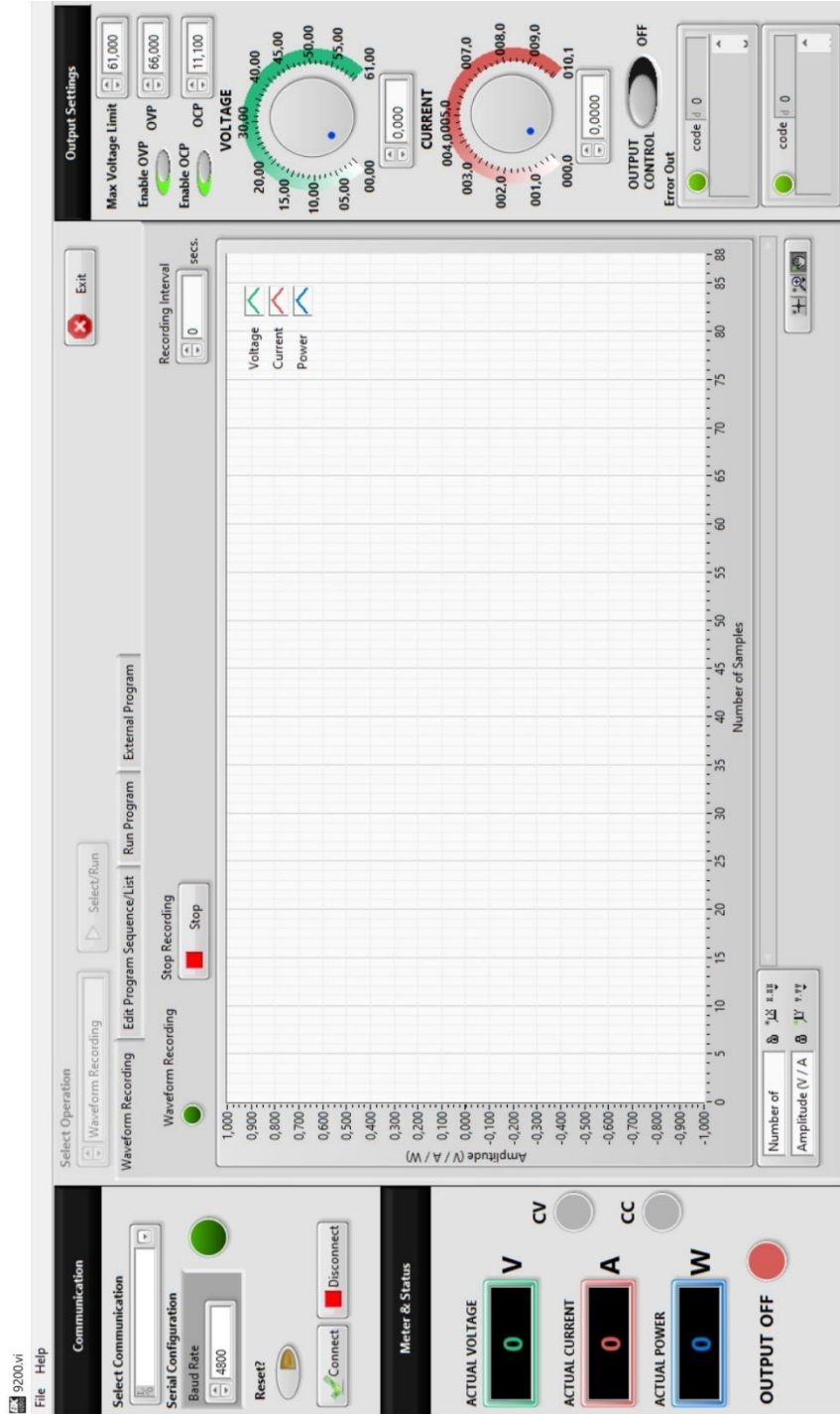
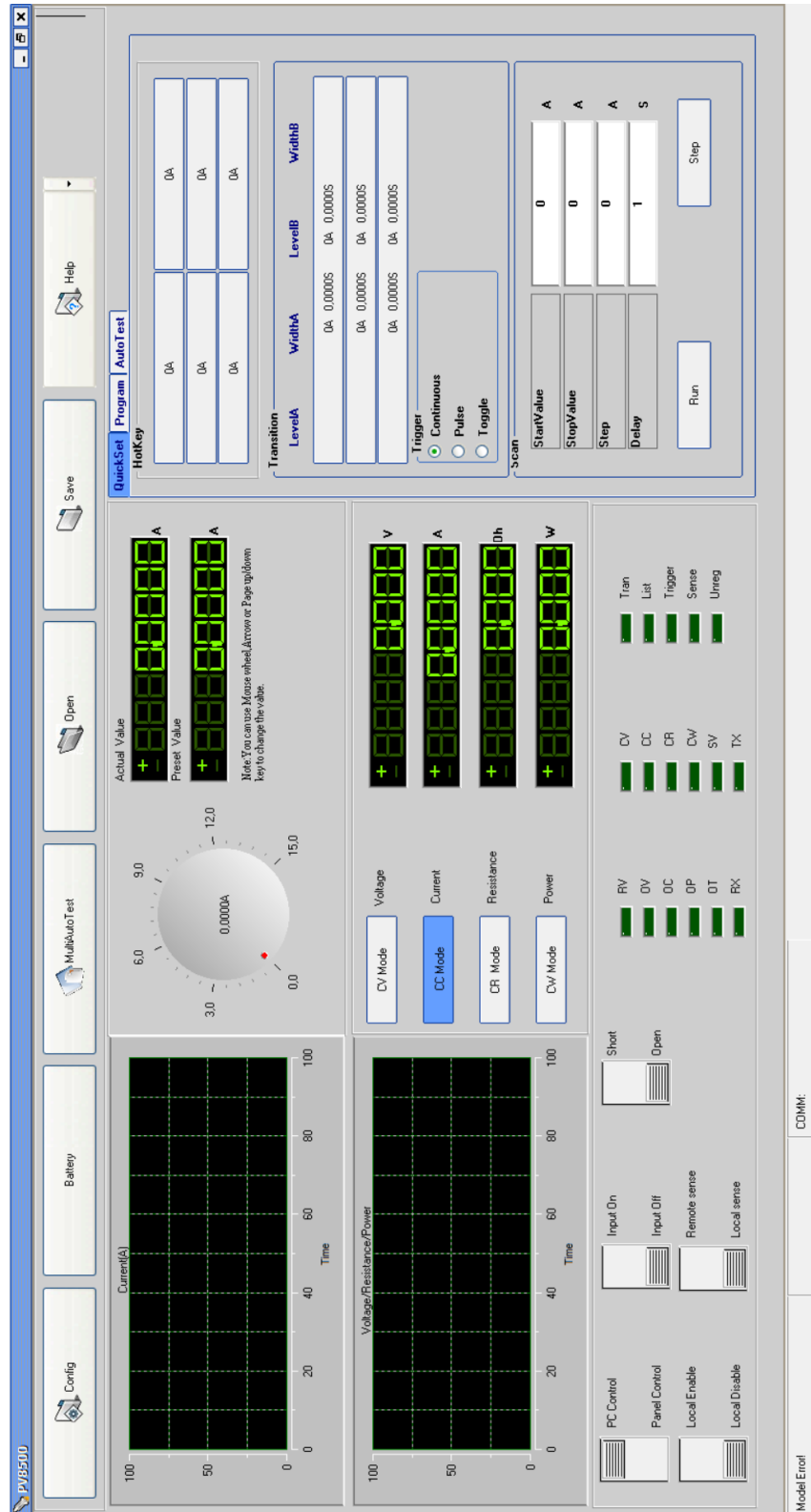


Figura 28. Interfaz del software que controla la carga programable.



ANEXO B. Mediciones en laboratorio

En este anexo se presentan las gráficas correspondientes a las mediciones en laboratorio de la tensión en el SC2, la configuración serie y paralelo pertinentes a las pruebas de carga y descarga.

Figura 29. Mediciones experimentales de la tensión en el SC₂ en las 5 pruebas de carga y descarga.

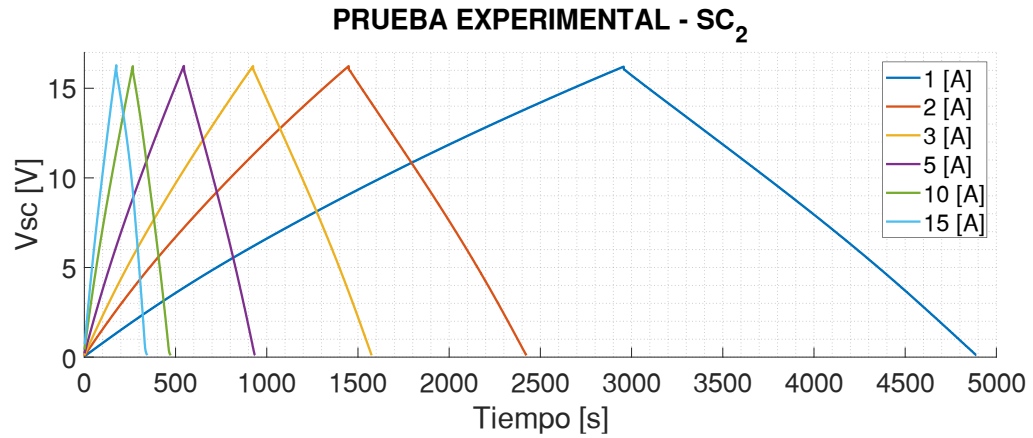


Figura 30. Mediciones experimentales de la tensión en la configuración serie en las 5 pruebas de carga y descarga.

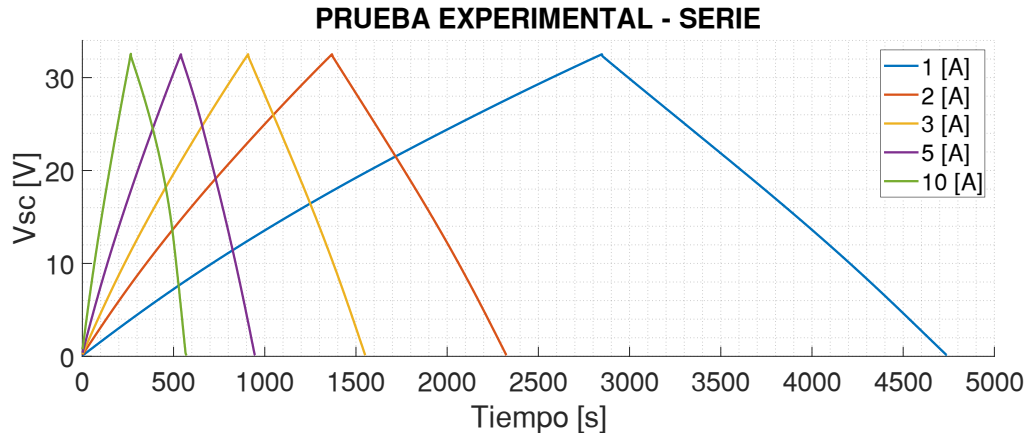
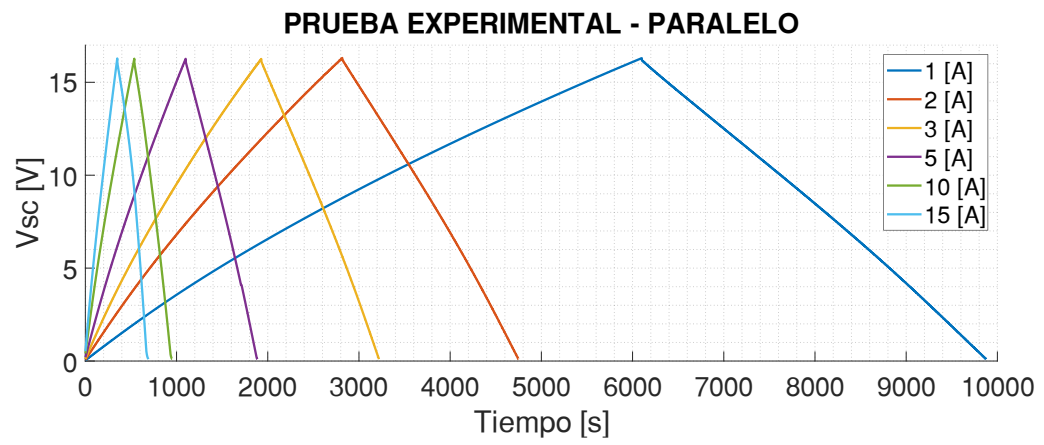


Figura 31. Mediciones experimentales de la tensión en la configuración serie en las 5 pruebas de carga y descarga.



ANEXO C. Parámetros estimados

El presente anexo contiene los valores de los parámetros para cada una de las pruebas de carga realizada en cada una de las configuraciones. Estos parámetros se agrupan por configuración en las tablas siguientes.

Tabla 8. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC₁.

CONFIGURACIÓN SC₁	R_i [Ω]	C_{i1} [F/V]	C_{i0} [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
1 A	0,026	2,114	34,800	0,352	6,960
2 A	0,026	2,140	34,800	0,352	6,960
3 A	0,026	2,175	34,240	0,528	6,948
5 A	0,026	2,175	34,800	0,352	6,706
10 A	0,026	2,175	34,206	0,528	6,959
15 A	0,026	2,162	34,800	0,528	6,230
PROMEDIO	0,026	2,157	34,608	0,440	6,794
DESVIACIÓN	0,000	0,025	0,298	0,096	0,294

Tabla 9. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC₂.

CONFIGURACIÓN SC₂	R_i [Ω]	C_{i1} [F/V]	C_{i0} [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
1 A	0,023	2,157	34,800	0,352	6,960
2 A	0,018	2,175	34,800	0,352	6,960
3 A	0,026	2,155	34,800	0,352	6,960
5 A	0,026	2,160	34,800	0,352	6,960
10 A	0,026	2,175	34,800	0,352	6,699
15 A	0,026	2,105	34,800	0,352	6,960
PROMEDIO	0,024	2,154	34,800	0,352	6,916
DESVIACIÓN	0,004	0,026	0,000	0,000	0,107

Tabla 10. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración paralelo.

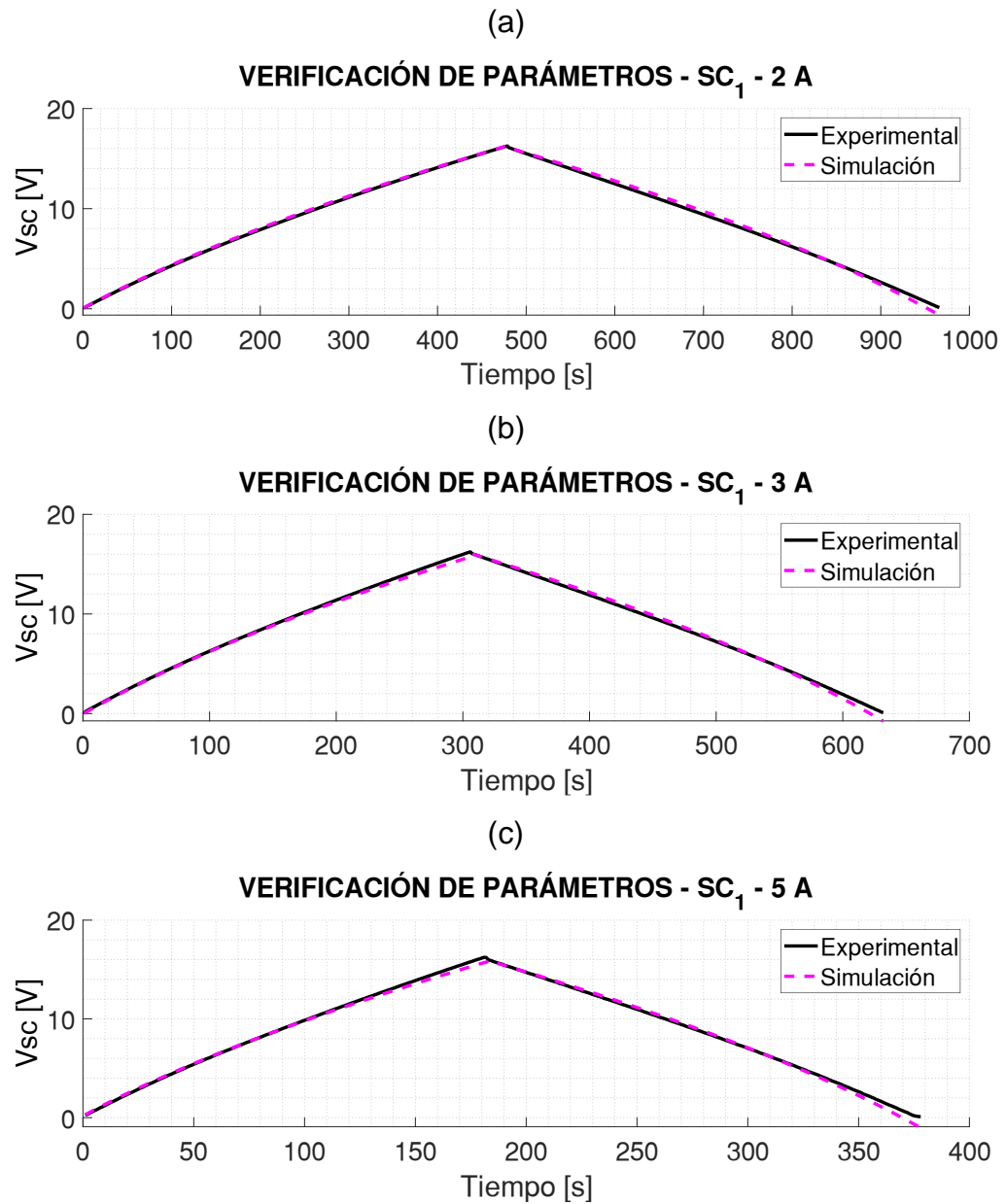
CONFIGURACIÓN PARALELO	R_i [Ω]	C_{i1} [F/V]	C_{i0} [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
1 A	0,009	4,005	69,600	0,187	13,920
2 A	0,013	4,023	69,600	0,176	13,920
3 A	0,013	4,116	69,600	0,186	13,920
5 A	0,013	4,240	69,600	0,176	13,920
10 A	0,013	4,198	69,600	0,264	13,920
15 A	0,013	4,060	69,600	0,264	13,920
PROMEDIO	0,012	4,107	69,600	0,209	13,920
DESVIACIÓN	0,002	0,096	0,000	0,043	0,000

Tabla 11. Parámetros calculados para cada una de las pruebas en la configuración serie.

CONFIGURACIÓN SERIE	R_i [Ω]	C_{i1} [F/V]	C_{i0} [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]
1 A	0,053	0,473	17,400	0,707	3,480
2 A	0,053	0,486	17,400	0,704	3,480
3 A	0,053	0,501	17,400	0,704	3,480
5 A	0,053	0,506	17,400	0,704	3,480
10 A	0,053	0,486	17,400	0,704	3,480
PROMEDIO	0,053	0,490	17,400	0,705	3,480
DESVIACIÓN	0,000	0,013	0,000	0,001	0,000

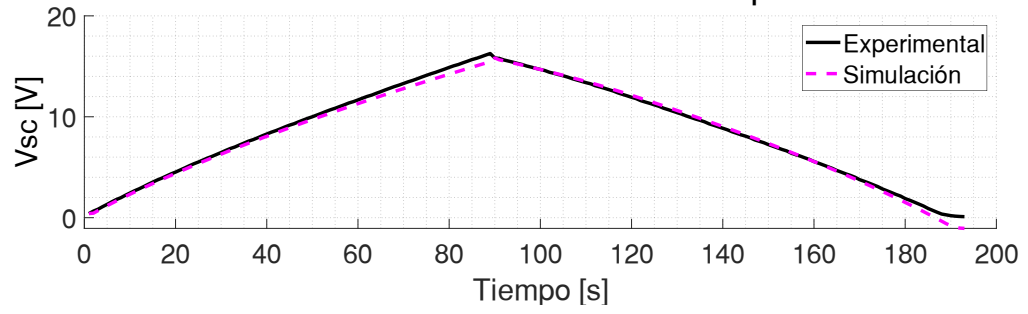
ANEXO D. Verificación de parámetros

Figura 32. Verificación de parámetros para las pruebas de 2 A (a), 3 A (b), 5 A (c), 10 A (d) y 15 A (e) en la configuración SC1.



(d)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SC₁ - 10 A



(e)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SC₁ - 15 A

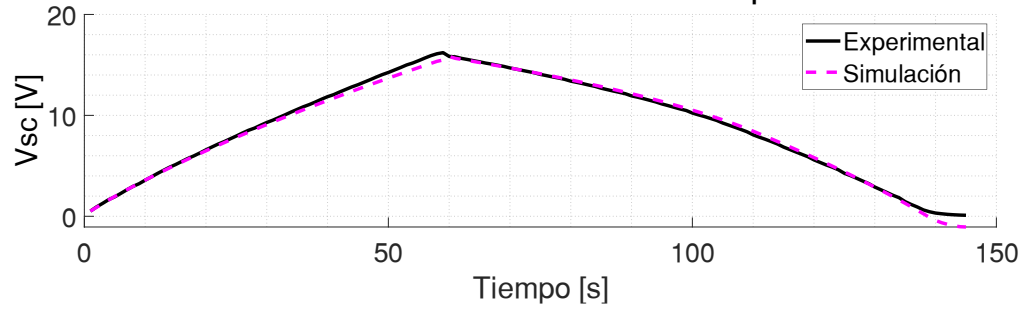
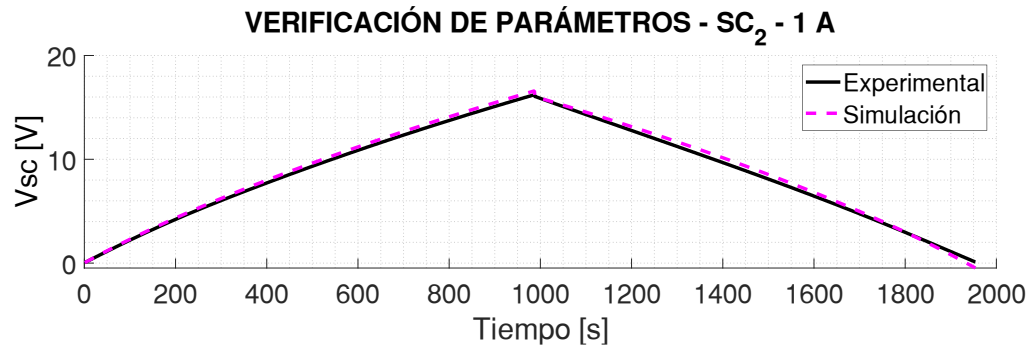
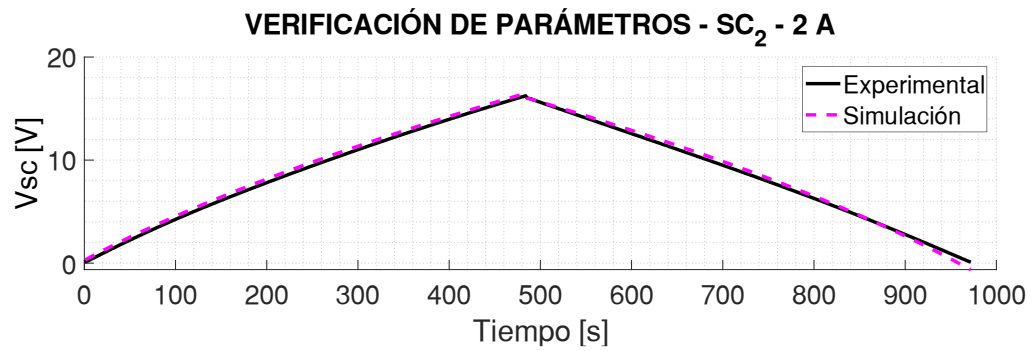


Figura 33. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A (a), 2 A (b), 3 A (c), 5 A (d), 10 A (e), 15 A (f) en la configuración SC2.

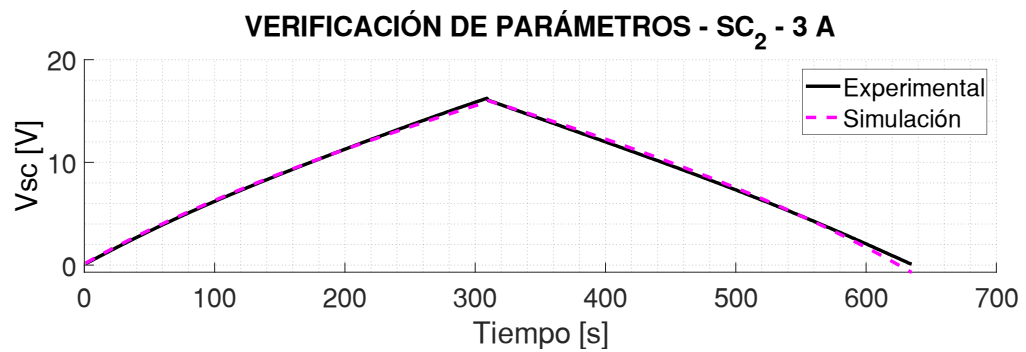
(a)



(b)

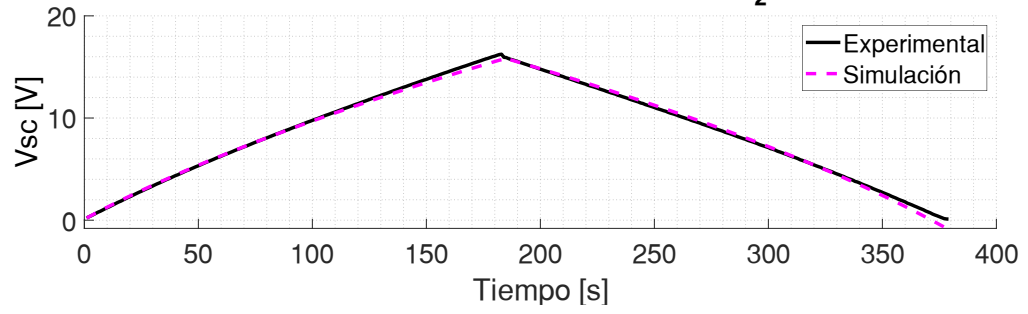


(c)



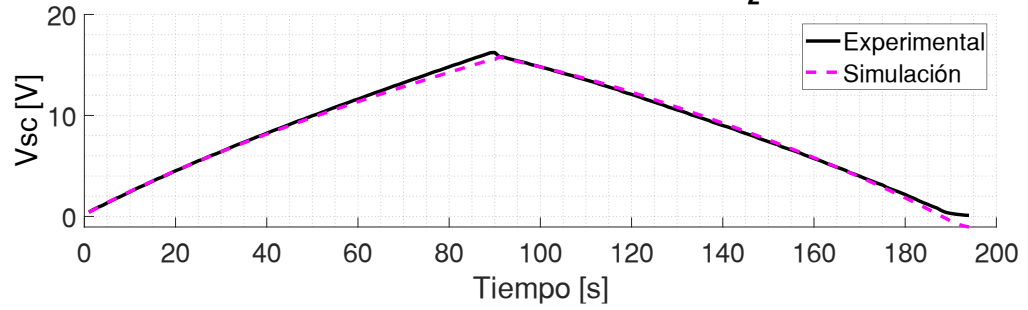
(d)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SC₂ - 5 A



(e)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SC₂ - 10 A



(f)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SC₂ - 15 A

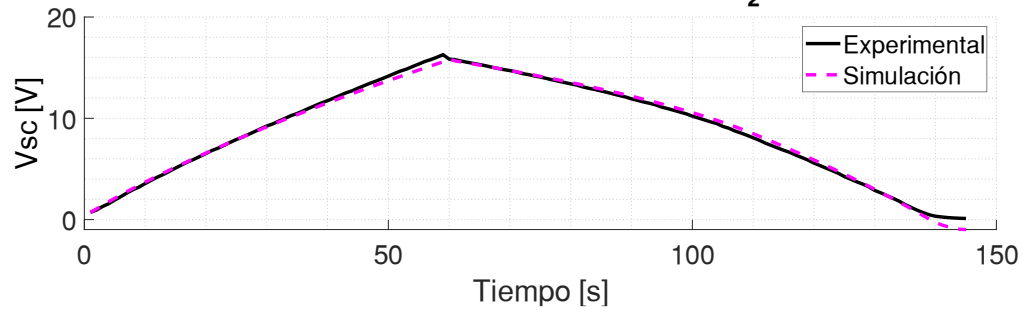
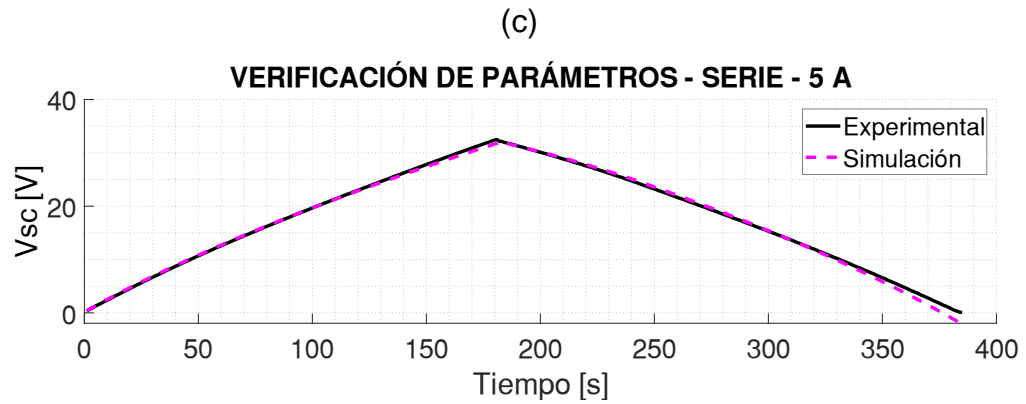
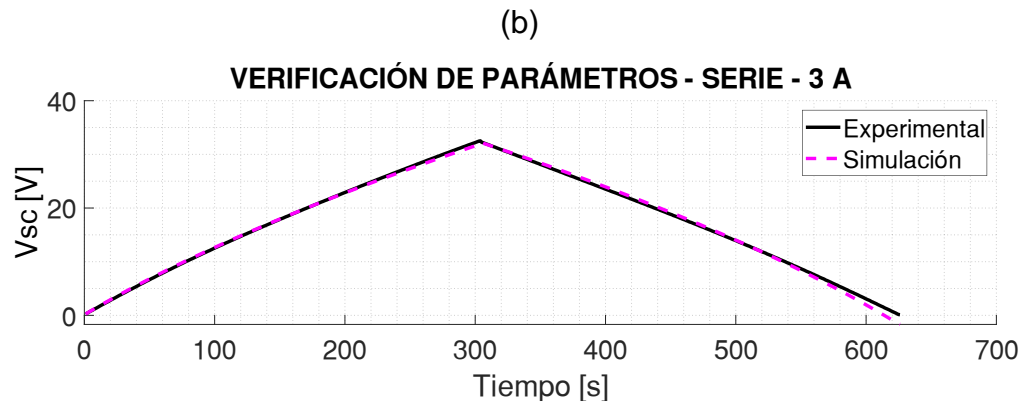
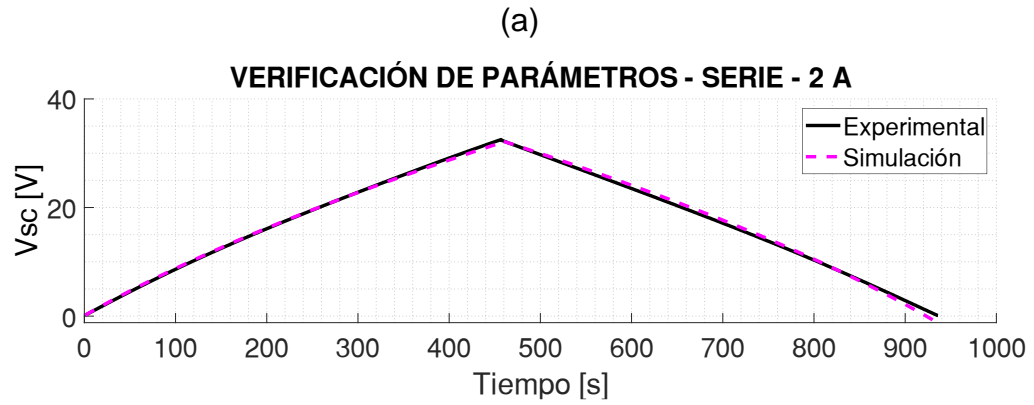


Figura 34. Verificación de parámetros para las pruebas de 2 A (a), 3 A (b), 5 A (c) y 10 A (d) en la configuración Serie.



(d)

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS - SERIE - 10 A

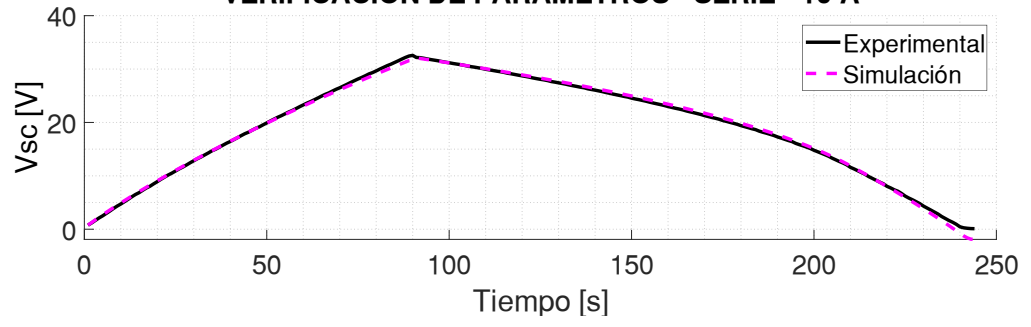
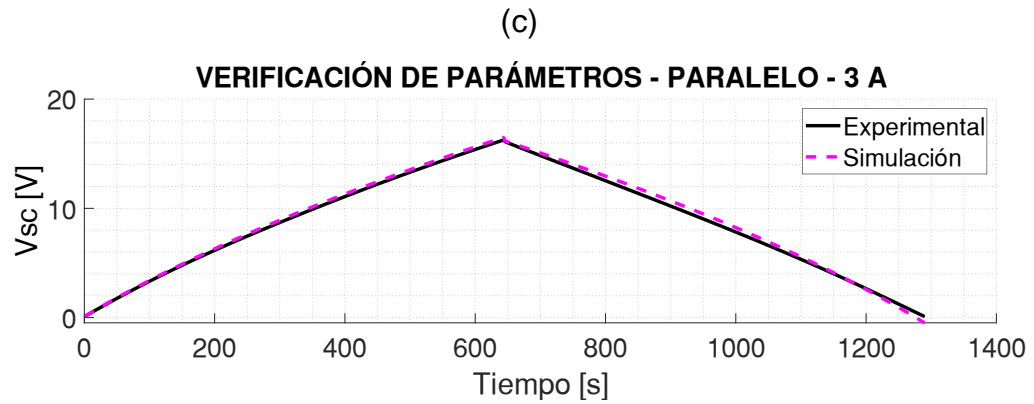
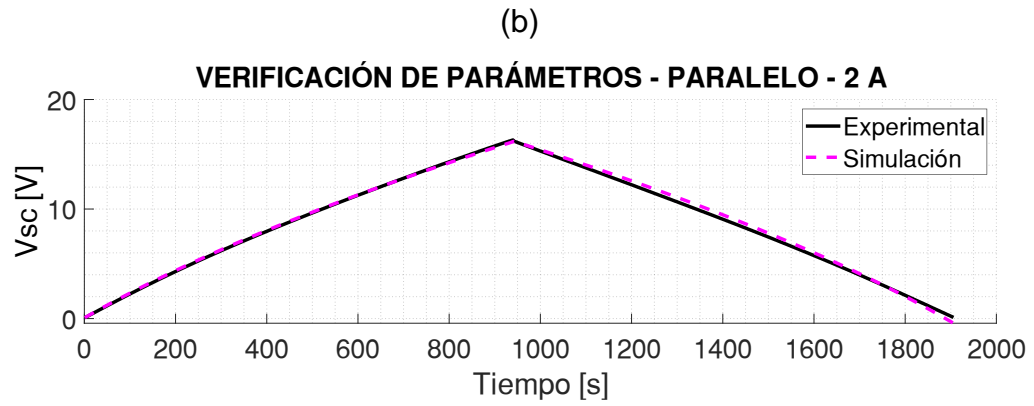
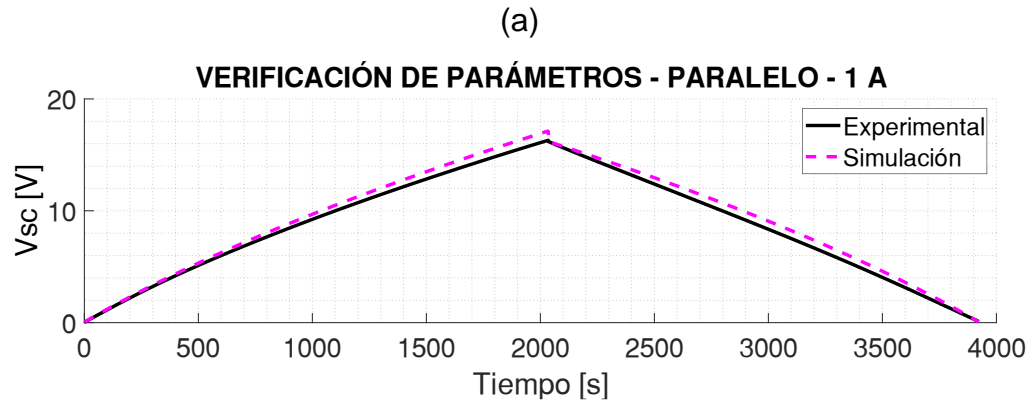
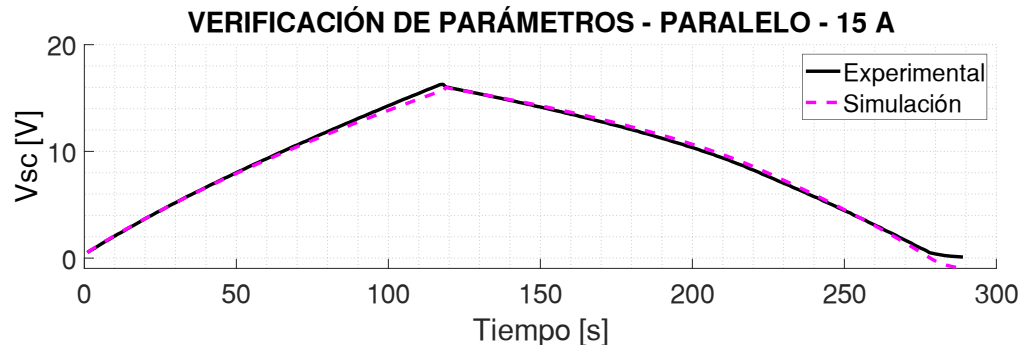
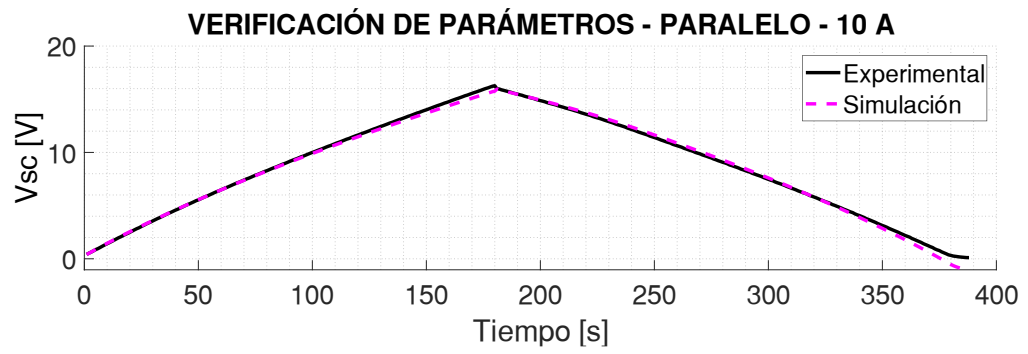
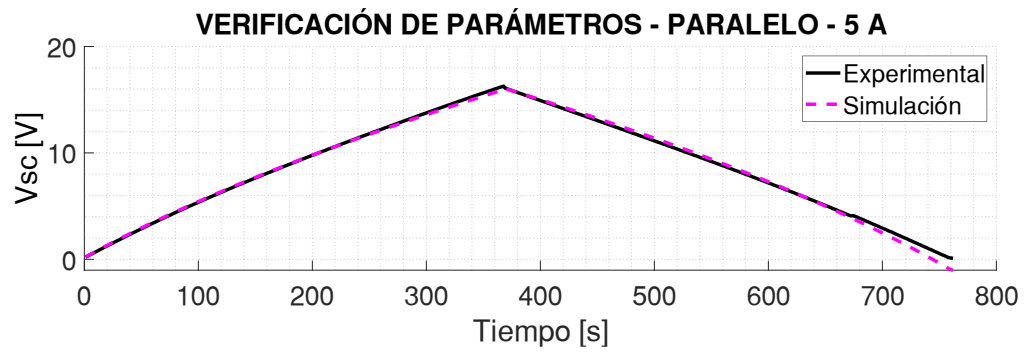


Figura 35. Verificación de parámetros para las pruebas de 1 A (a), 2 A (b), 3 A (c), 5 A (d), 10 A (e), 10 A (f) en la configuración Paralelo.



(d)



ANEXO E. Errores del modelo

Tabla 12. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC₁.

CONFIGURACIÓN SC₁	RECM [V]	$\overline{\epsilon}_{\%}$ [%]	EPM_{max} [%]	EPMA [%]
1 A	0,237	6,051	499,282	2,554
2 A	0,213	7,048	623,985	2,108
3 A	0,249	9,372	764,860	2,162
5 A	0,255	14,386	1015,569	2,155
10 A	0,351	25,257	1160,621	2,865
15 A	0,343	31,051	1160,012	2,238
PROMEDIO	0,275	15,528	870,721	2,347
DESVIACIÓN	0,058	10,358	282,405	0,31

Tabla 13. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración de SC₂.

CONFIGURACIÓN SC₂	RECM [V]	$\overline{\epsilon}_{\%}$ [%]	EPM_{max} [%]	EPMA [%]
1 A	0,309	6,838	531,437	3,351
2 A	0,304	10,681	727,084	3,875
3 A	0,218	8,973	791,444	2,117
5 A	0,245	11,584	829,510	1,983
10 A	0,302	20,894	1144,095	2,119
15 A	0,322	27,184	993,392	2,608
PROMEDIO	0,283	14,359	836,160	2,675
DESVIACIÓN	0,041	7,924	212,764	0,774

Tabla 14. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración paralelo.

CONFIGURACIÓN PARALELO	RECM [V]	$\overline{\epsilon}_{\%}$ [%]	EPM_{max} [%]	EPMA [%]
1 A	0,527	6,640	43,599	6,405
2 A	0,220	5,509	486,958	2,170
3 A	0,278	6,717	577,703	2,859
5 A	0,266	13,643	1123,027	2,201
10 A	0,277	19,904	1040,461	1,949
15 A	0,295	21,798	1062,280	2,037
PROMEDIO	0,311	12,369	722,338	2,937
DESVIACIÓN	0,109	7,199	427,627	1,729

Tabla 15. Errores calculados para cada una de las pruebas en la configuración serie.

CONFIGURACIÓN SERIE	RECM [V]	$\overline{\epsilon}_{\%}$ [%]	EPM_{max} [%]	EPMA [%]
1 A	0,592	5,952	611,812	3,352
2 A	0,395	8,372	1105,110	2,321
3 A	0,439	12,225	1509,517	2,523
5 A	0,488	17,942	1860,709	2,700
10 A	0,431	25,777	2003,294	2,113
PROMEDIO	0,469	14,054	1418,088	2.297
DESVIACIÓN	0,076	7,965	568,940	0.858

ANEXO F. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El presente anexo presenta las gráficas que dan soporte a las observaciones y el análisis de resultados de las tres simulaciones de la fuente híbrida.

ANEXO F.1 COMPARACIÓN CASO PARALELO VS. SERIE

En primer lugar, es posible observar a simple vista que la potencia despachada por los SCs en la configuración serie (ver Figura 36) es exactamente igual a la potencia despachada en la configuración paralelo (ver Figura 37). Para el EMS es indiferente la variación en los parámetros internos, solo identifica a los SCs como fuentes idénticas en capacidad de potencia.

Figura 36. Potencia despachada por los SCs en la configuración serie.

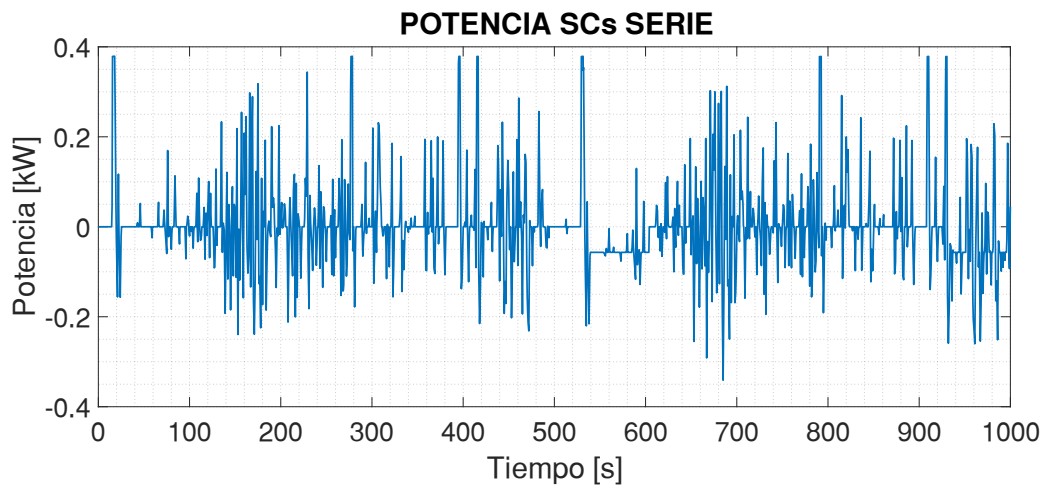
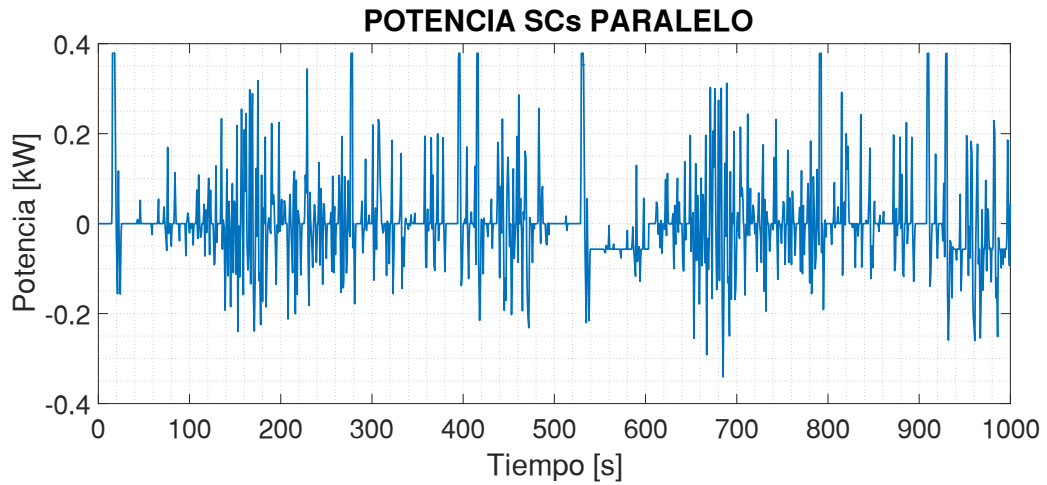


Figura 37. Potencia despachada por los SCs en la configuración serie.



En términos de la tensión, la configuración serie (ver Figura 38) mostró el doble de la tensión que la configuración en paralelo (ver Figura 39). Sin embargo, la forma de la característica de la tensión es exactamente igual en ambos casos.

Figura 38. Tensión en los SCs para la configuración serie.

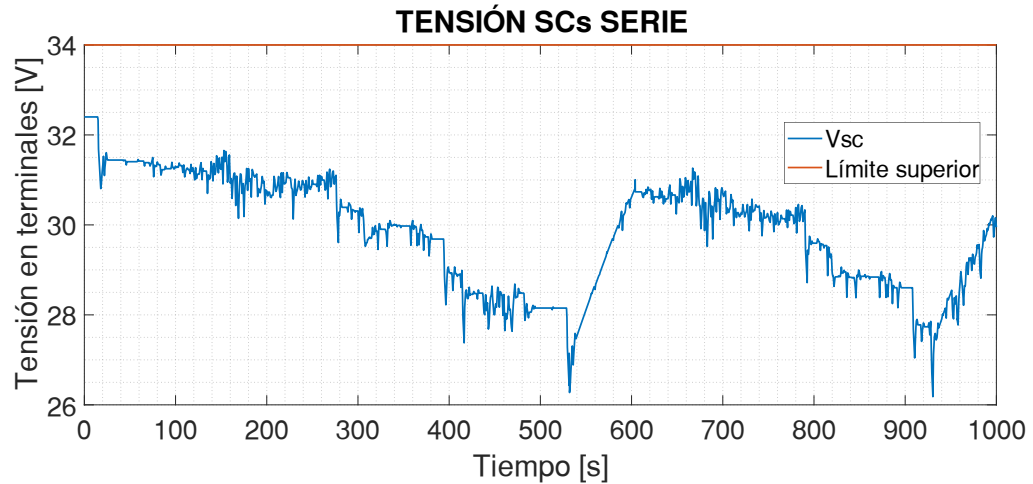
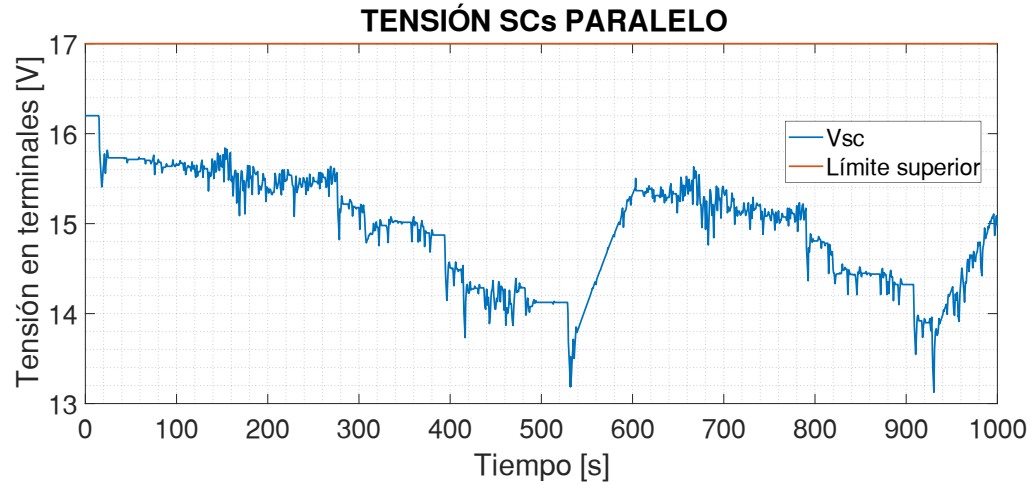


Figura 39. Tensión en los SCs para configuración paralelo.



Ocurre algo similar en la característica de la corriente, en este caso es la configuración de los SCs en paralelo (ver Figura 40) la que dobla los valores de corriente respecto a la configuración de los SCs en serie (ver Figura 41), pero, nuevamente, los dos casos tienen un perfil de corriente similar.

Figura 40. Corriente en los SCs para la configuración paralelo.

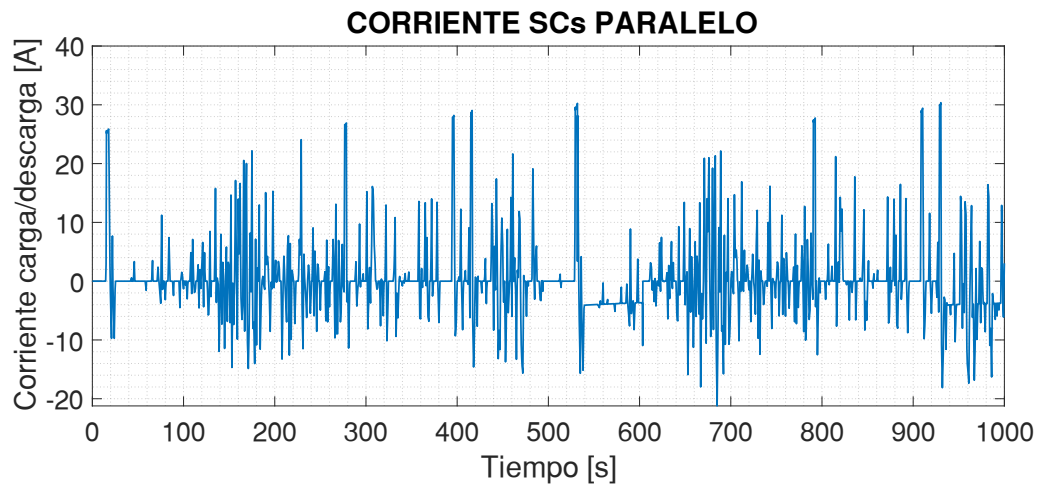
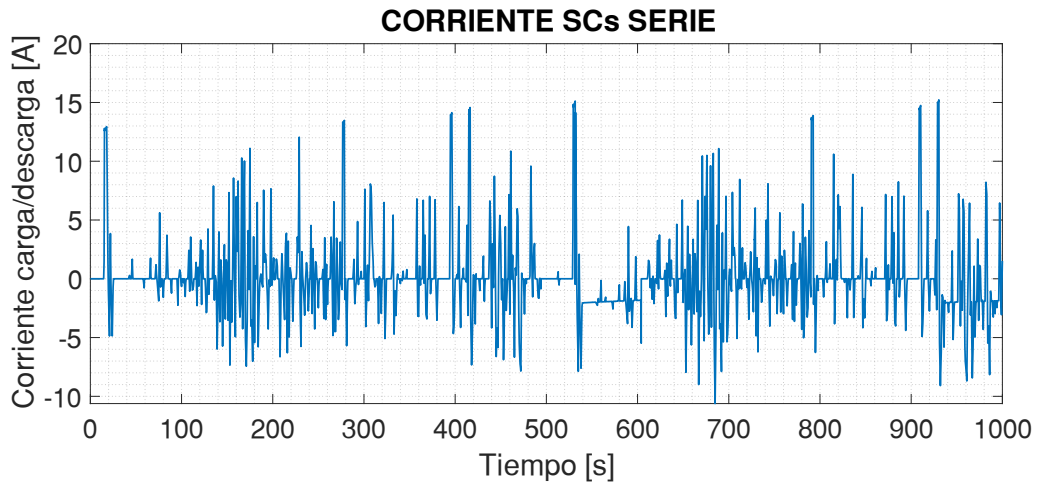


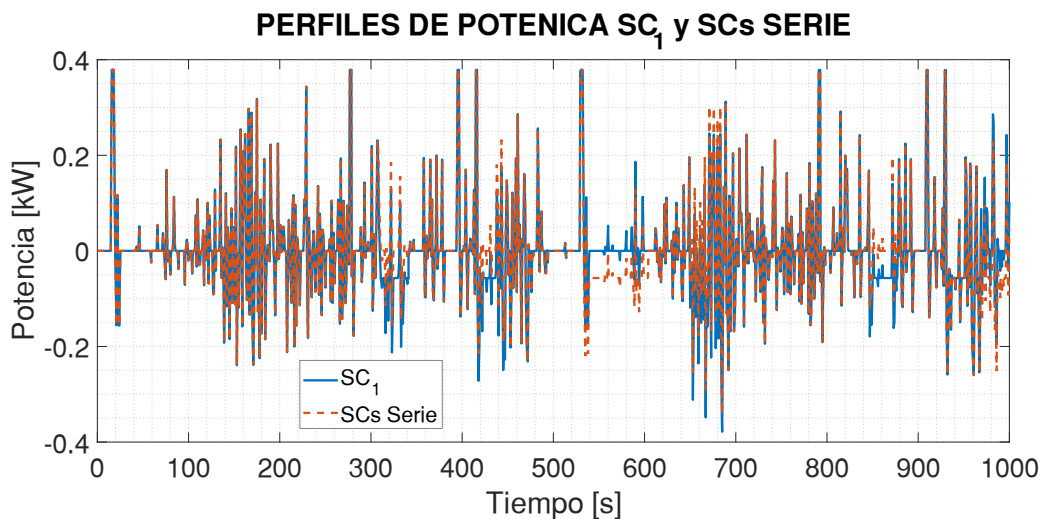
Figura 41. Corriente en los SCs para la configuración serie.



ANEXO F.2. COMPARACIÓN CONFIGURACIÓN SC1 VS SERIE-PARALELO

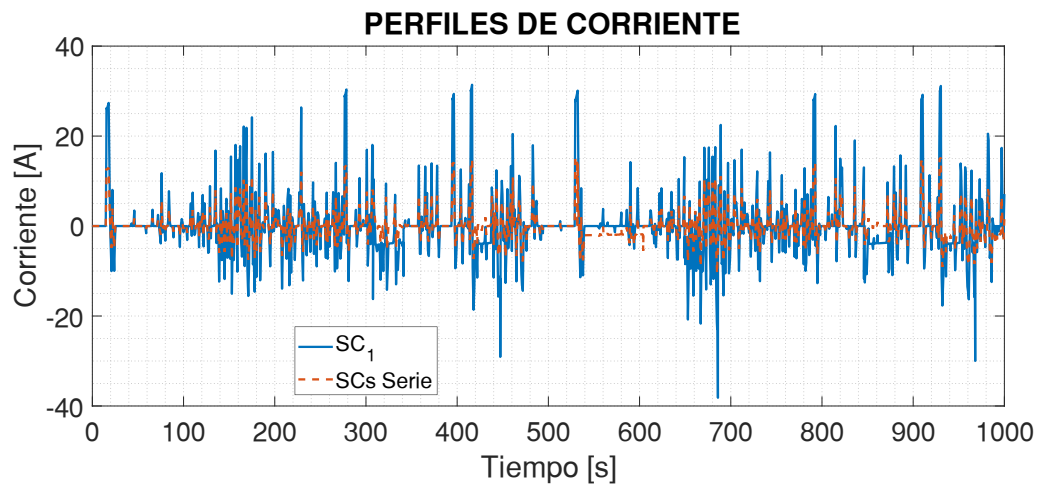
Una vez demostrado que las configuraciones en serie y paralelo tienen un comportamiento en potencia prácticamente idéntico, se identificaron algunas diferencias respecto al comportamiento de un SC. En primer lugar, la potencia despachada en las tres simulaciones parece ser la misma a simple vista, sin embargo, se identificaron 3 periodos donde ocurren evidentes diferencias entre los perfiles de potencia (ver Figura 42). Los periodos son entre el segundo 300 y el 450, entre los segundos 530 690 y entre los segundos 840 y 1000.

Figura 42. Comparación entre los perfiles de potencia.



Esta diferencia en las potencias también se refleja en la corriente (ver Figura 43). El comportamiento en corriente es proporcional al de potencia, por lo que los intervalos en los que existen diferencias entre las configuraciones son los mismo en el caso de la potencia como el de tensión.

Figura 43. Comparación entre los perfiles de corriente en el SC para dos configuraciones.



La diferencia entre configuraciones es mucho más significativa (ver Figura 44) en el caso de la tensión. No obstante, la diferencia entre la configuración SC1 y serie es, en promedio, inferior a 1V, mientras que la tensión en paralelo es prácticamente el doble de la respuesta de la tensión en serie. Finalmente, la diferencia más significativa radica en el SOC (ver Figura 45) debido a que las configuraciones serie o paralelo tienen el doble de capacidad de carga que la configuración SC1; del comportamiento del SOC también se puede constatar la gran similitud que tienen entre sí las configuraciones serie y paralelo.

Figura 44. Comparación entre los perfiles de tensión en bornes del SC para las tres configuraciones.

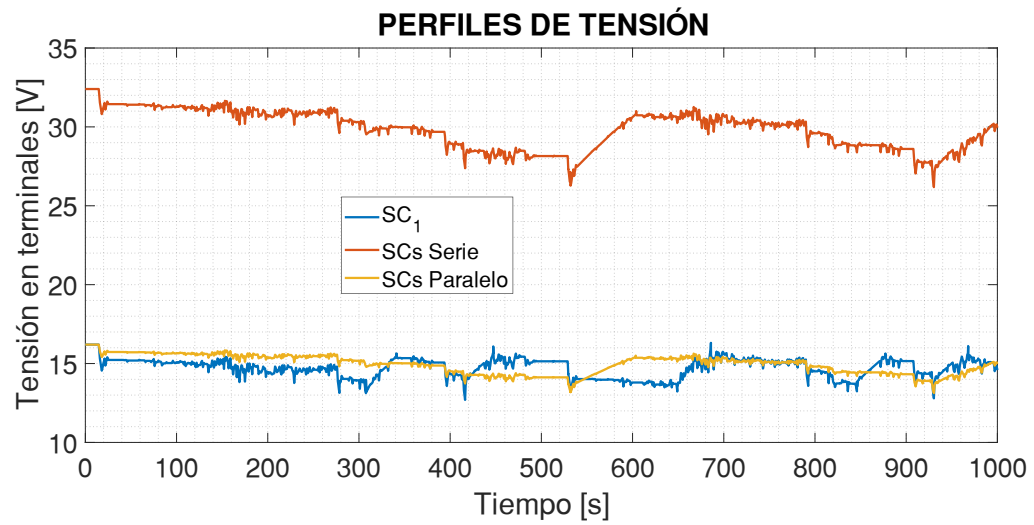
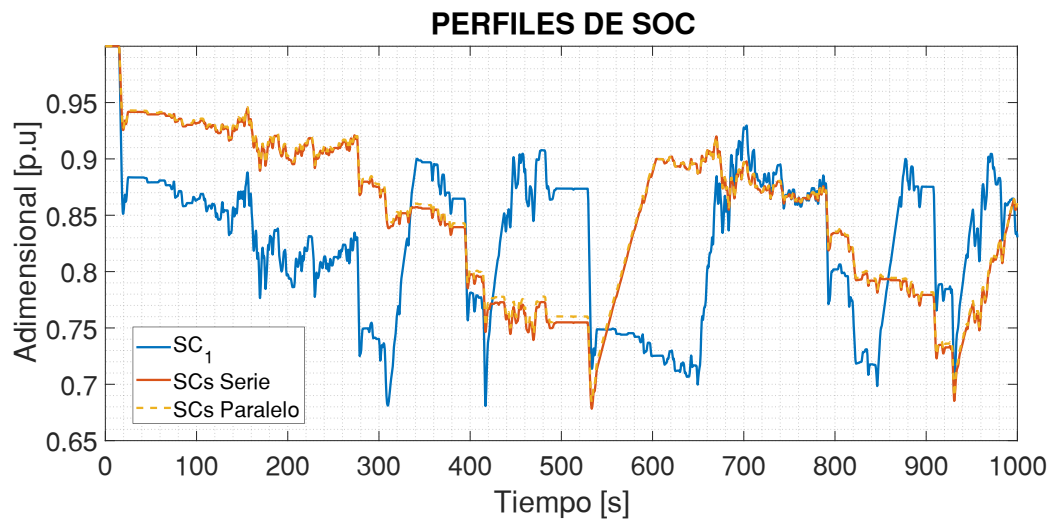


Figura 45. Comparación entre los perfiles de SOC en el SC para las tres configuraciones.



ANEXO F.3. CAPACIDAD DEL SC1.

La respuesta en corriente, potencia y estado de carga dan información muy importante para poder determinar qué tan bien dimensionada está una fuente. En el caso del SC1, se evidencia que la corriente (ver Figura 46) fue muy inferior a sus límites de carga y descarga (± 170 A), mientras la potencia jamás estuvo cerca de superar los $\pm 2,89$ kW, como se evidencia en la Figura 47. Otra forma de ver el comportamiento de la capacidad es a través del estado de carga (ver Figura 48), en el que se evidencia que la energía almacenada dentro del SC siempre fue suficiente para atender los requerimientos del sistema y nunca llegó a descargarse completamente.

Figura 46. Corriente en el SC para la configuración SC1

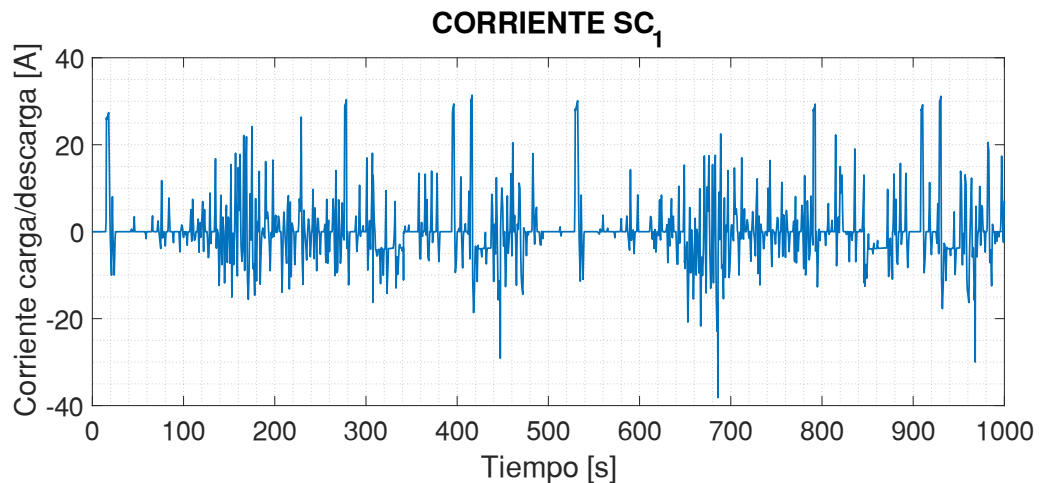


Figura 47. Potencia despachada por el SC1.

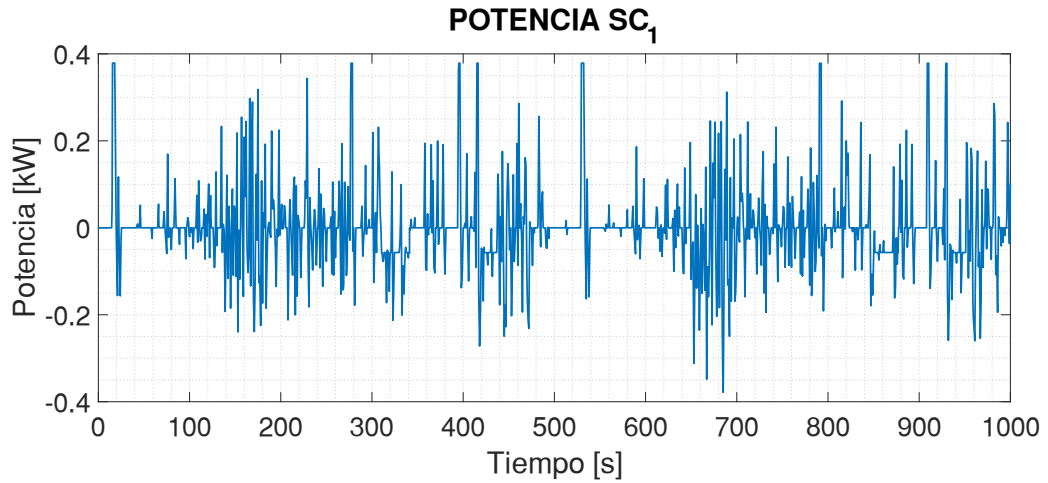
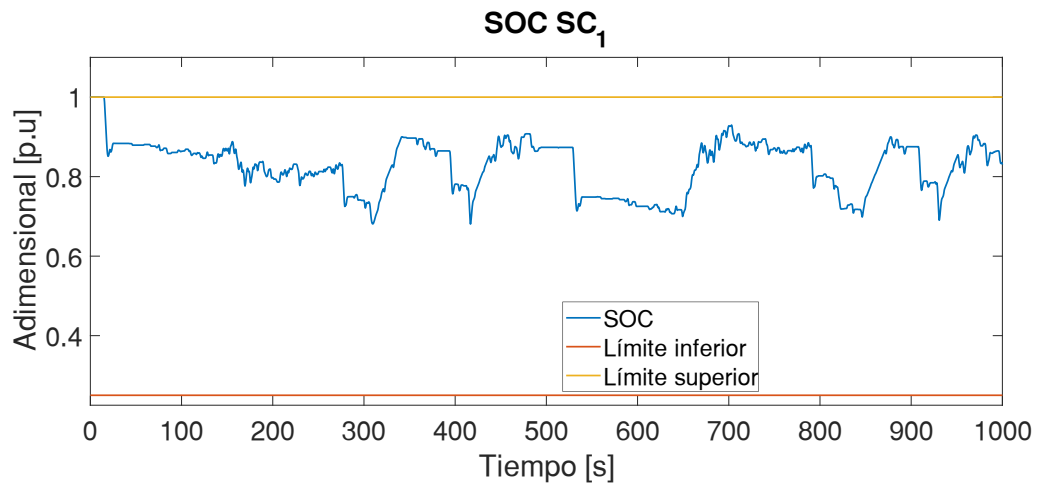


Figura 48. SOC del SC para la configuración SC1.



ANEXO F.4. COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA

Los resultados de la simulación para la batería demuestran que el tipo de conexión en los SCs no afectó en mayor medida el comportamiento de esta. La potencia mantuvo prácticamente el mismo perfil, incluyendo las fluctuaciones más altas de potencia (ver Figura 49). El SOC de la batería fue levemente mayor en la configuración serie por algunos momentos, pero no lo suficiente para llegar a ser considerable ya que solo alcanzó a tener un máximo de diferencia de 0,0025 en p.u (ver Figura 50). Finalmente, las variables de tensión y corriente en la batería tuvieron

un proceder similar que las variables mencionadas anteriormente (ver Figura 51 y Figura 52) para los dos tipos de conexión.

Figura 49. Potencia de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.

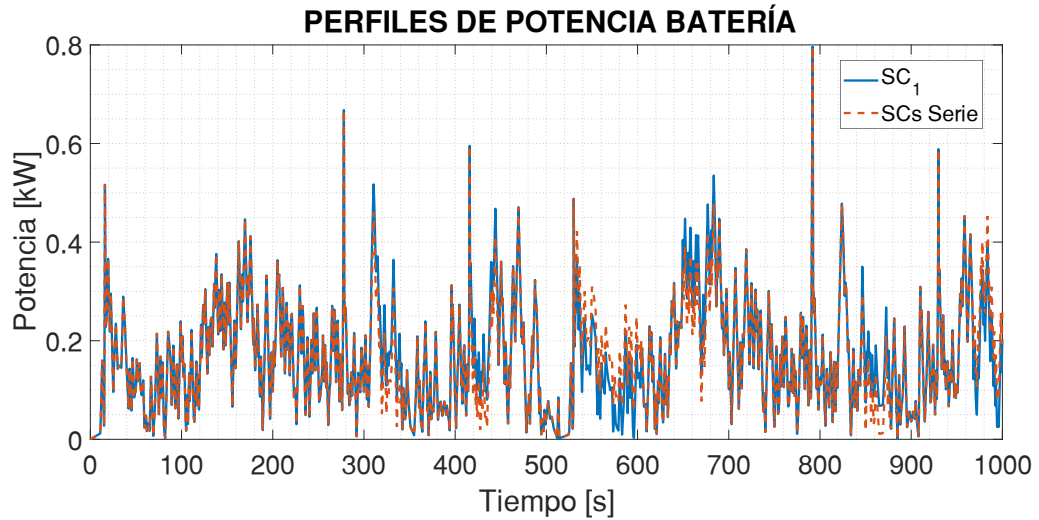


Figura 50. SOC de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.

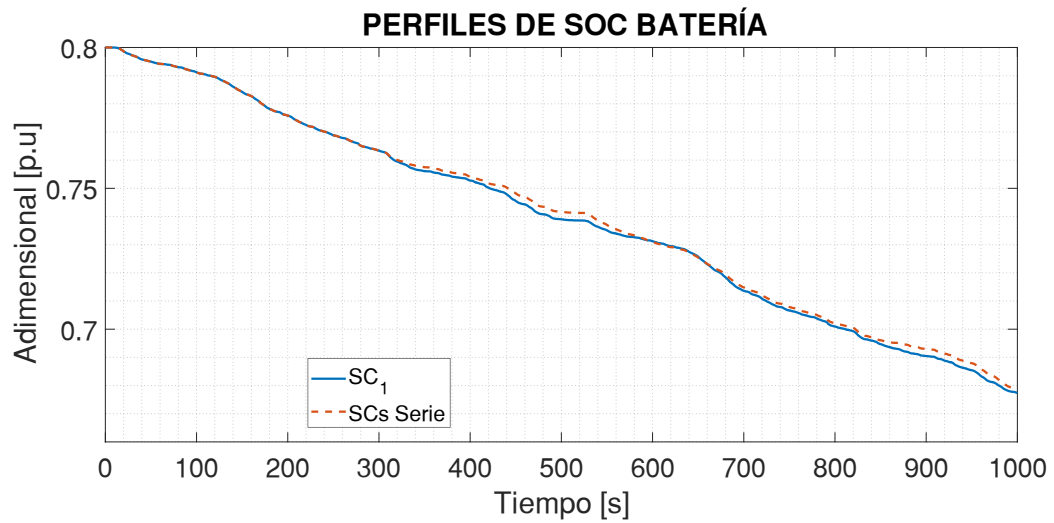


Figura 51. Tensión de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.

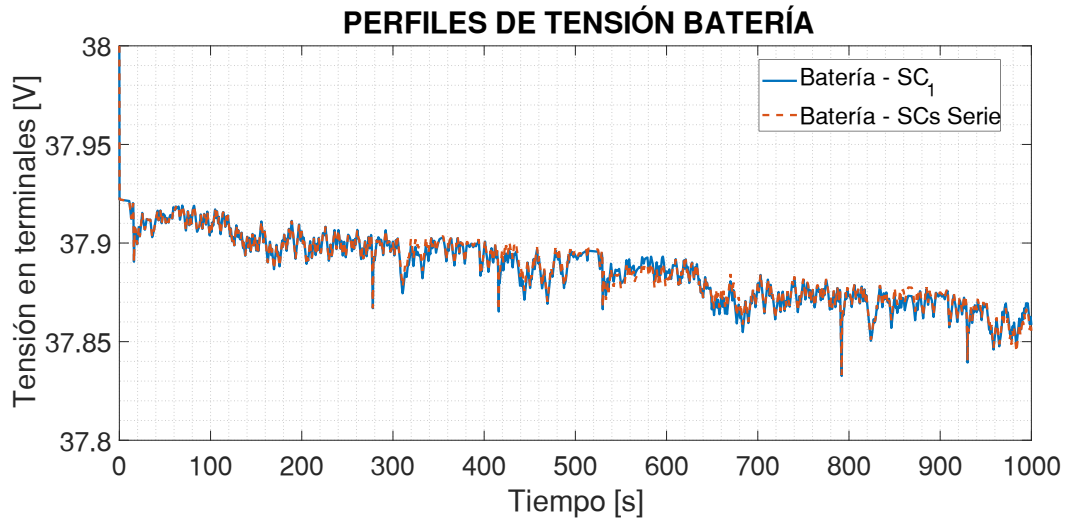


Figura 52. Corriente de la batería para las configuraciones SC1 y Serie.

