



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Modelado y validación experimental de un banco de
supercapacitores y baterías con propósitos de
diagnóstico de fallas fuera de línea

presentada por

Ing. Diana Arleth Muñoz Menéndez

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. José Francisco Gómez Aguilar

Codirector de tesis

Dra. Ma. Guadalupe López López

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2020.



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor.,

No. de Oficio:

Asunto:

18/diciembre/2019

DIE/265/2019

Aceptación de documentos de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ing. Diana Arleth Muñoz Menéndez**, con número de control **M17CE061** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Modelado y validación experimental de un banco de supercapacitores y baterías con propósitos de diagnóstico de fallas fuera de línea"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Francisco Gómez Aguilar
Doctor en Física
Cédula profesional 9124781

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 7980045

REVISOR 1

Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 8699605

REVISOR 2

Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7534115

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
MPS/Irr.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos, 13/enero/2020

OFICIO No. SAC/007/2020
Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. DIANA ARLETH MUÑOZ MENÉNDEZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Modelado y validación experimental de un banco de supercapacitores y baterías con propósitos de diagnóstico de fallas fuera de línea", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente.

GVGR/chg



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir_cenidct@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx



Dedicatoria

*A mis padres **Ruvisel Muñoz** y **Mayra Menéndez**, por ser mi mayor ejemplo a seguir, por apoyarme incondicionalmente en cada aventura que he decidido embarcarme y porque han sido parte fundamental en cada meta que he logrado. Los amo profundamente.*

*A mis hermanos **Ivonne** y **Ruvisel**, por inspirarme a ser mejor cada día y por alegrar mi vida a pesar de la distancia. Ambos son el tesoro máspreciado que jamás imaginé tener, los amo.*

*A **Dios**, por su infinita misericordia, por la vida y la salud que me ha otorgado, y por todas esas personas maravillosas que ha puesto en mi camino y que han hecho la vida más llevadera.*

Agradecimientos

A Dios, porque sin merecerlo me ha dado regalos invaluable: vida, salud, familia y amigos.

A mis padres, por sus consejos, por la dedicación, el amor y el empeño que ponen para hacer suyos cada uno de mis sueños y el de mis hermanos.

A mi director de tesis, el Dr. José Francisco Gómez Aguilar, porque sus conocimientos y sus valiosos comentarios me guiaron en el desarrollo de esta tesis, por las libertades otorgadas para tomar mis propias decisiones que me hicieron crecer profesionalmente. También quiero agradecer profundamente por el esfuerzo y la paciencia puestos que van más allá del deber.

A mi co-directora de tesis, la Dra. Ma. Guadalupe López López, cuyos consejos y observaciones enriquecieron este trabajo de investigación.

A mis revisores, el Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez y el Dr. Carlos Daniel García Beltrán, por sus valiosas observaciones, por el material brindado y por el interés que pusieron en cada una de las revisiones, las cuales hicieron que este proyecto se haya materializado.

A la Lic. Lorena, por su apoyo y el entusiasmo con el que nos motiva a seguir nuestras metas.

*A mis amigos de generación, Eusebio, Erick, Miguel, Henry, Jonathan, Christian, Juan, Isaac y Ely, gracias por brindarme su amistad y apoyo en los momentos difíciles. A mis amigas Paty, Montse, Edumis, Susy y a mi **bestie Valeria**, porque (a pesar de que soy una persona altamente distraíble) siempre estuvieron animándome y motivándome para bien, agradezco su preocupación y aprecio por mí. A Iván, Emmanuel y Diego, por su valiosa amistad y su oportuna ayuda, porque, por mucho, fueron como un rayito de esperanza cuando la nube de dudas era muy densa. A mis amigos, Citlaly, Felipe P., Luis, Felipe F., Héctor, Hugo, Carlos, Ángel y Viry, mil gracias por estar para mí.*

De manera especial, quiero agradecer al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, que me abrió sus puertas y me brindó los medios necesarios para mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado para

realizar y culminar mis estudios de maestría.

Resumen Ejecutivo

En este trabajo de tesis se presenta el estudio de un sistema de almacenamiento de energía (SAE). El sistema de almacenamiento está compuesto por un banco de supercapacitores (SC) y un banco de baterías.

Se propuso el dimensionamiento para ambos bancos, el banco de supercapacitores está integrado por 36 *SCs* conectados en serie y paralelo para obtener el voltaje y corriente deseados a la salida. El banco de baterías está formado por 6 baterías conectadas en paralelo para mantener el voltaje deseado a la salida.

El modelo de ambos SAEs son no lineales y están representados en forma de circuito eléctrico equivalente (CEE) debido a que a la hora de simular los modelos es más fácil la manipulación de dichas ecuaciones. Para validar el modelo de estos sistemas se construyó un banco de supercapacitores y se realizó la caracterización de dicho banco.

Por último, teniendo la certeza de que el modelo había sido validado se procedió a diseñar un sistema de diagnóstico de fallas fuera de línea para cada supercapacitor y batería del banco, el esquema abordado para el diagnóstico fue un banco de observadores dedicados. Estos observadores, llamados también filtros de Kalman y filtros de Kalman extendidos, fueron utilizados para estimar el voltaje terminal, tanto para los supercapacitores como para las baterías, respectivamente, y en el caso de las baterías también se realizó la estimación del estado de carga.

Abstract

This thesis paper presents the study of an energy storage system (ESS). The storage system consists of a supercapacitors bank (SC) and a batteries bank.

The sizing for both banks was proposed, the supercapacitor bank is integrated by 36 SCs connected in series and parallel to obtain the desired voltage and current at the output. The battery bank consists of 6 batteries connected in parallel to maintain the desired output voltage.

The model of both ESSs are non-linear and are represented in the form of an equivalent electrical circuit (EMC) because when simulating the models it is easier to manipulate these equations. In order to validate the model of these systems, a bank of supercapacitors was built and the characterization of this bank was carried out.

Finally, having the certainty that the model had been validated, an off-line fault diagnosis system was designed for each supercapacitor and battery of the bank, the scheme dealt for the diagnosis was a bank of dedicated observers. These observers, also called Kalman filters and extended Kalman filters, were used to estimate the terminal voltage, both for the supercapacitors and for the batteries, respectively, and in the case of the batteries, the state of charge estimation was also made.

Índice general

Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Planteamiento del problema.	2
1.3. Objetivo general.	2
1.3.1. Objetivos específicos.	2
1.4. Metas.	2
1.5. Justificación.	3
1.6. Estado del arte	3
1.7. Alcances.	4
1.8. Propuesta de solución.	4
1.9. Organización del documento.	5
2. Marco teórico	6
2.1. Sistemas de almacenamiento de energía	6
2.1.1. Supercapacitor.	6
2.1.1.1. Modelo del supercapacitor.	8
2.1.2. Batería.	9
2.1.2.1. Modelo de la batería.	10
2.2. Ajuste de curvas.	11
2.2.1. Mínimos cuadrados.	11
2.2.2. Método de Levenberg-Marquardt.	12
2.3. Filtro de Kalman.	12
2.3.1. Filtro de Kalman en tiempo continuo.	12
2.3.2. Filtro de Kalman en tiempo discreto.	13
2.3.3. Propiedades del filtro de Kalman.	14
2.4. Filtro de Kalman linealizado.	15
2.5. Filtro de Kalman extendido.	16
3. Banco de supercapacitores y baterías.	17
4. Identificación de parámetros del modelo del supercapacitor y la batería.	22
4.1. Identificación de parámetros en el modelo de dos ramas del supercapacitor.	22
4.2. Identificación de parámetros en el modelo de batería.	29

5. Diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores y baterías.	47
5.1. Diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores.	47
5.1.1. Diagnóstico de fallas basado en datos.	49
5.1.2. Diagnóstico de fallas basado en modelo.	52
5.2. Diagnóstico de fallas en el banco de baterías.	65
6. Conclusiones	78
6.1. Trabajos futuros.	79
Bibliografía	80
Anexo A:Identificación de parámetros de la batería 2.	83
Anexo B: Póster.	86

Índice de tablas

3.1.	Especificaciones del supercapacitor <i>PowerStore XB Series</i>	19
3.2.	Especificaciones del banco de supercapacitores.	19
3.3.	Especificaciones de la batería de <i>LiFePO₄</i> , <i>Power Sonic PSL-12450</i>	21
3.4.	Especificaciones del banco de baterías de <i>LiFePO₄</i>	21
4.1.	Parámetros del modelo de un supercapacitor.	26
4.2.	Parámetros del modelo del banco de supercapacitores.	27
4.3.	Parámetros optimizados del modelo del banco de supercapacitores.	28
4.4.	Coefficientes para el $V_{OC}[SOC(t)]$	39
4.5.	Coefficientes de la función para R_i en el modelo de CEE.	41
4.6.	Coefficientes de la función para R_{TS} en el modelo de CEE.	41
4.7.	Coefficientes de la función para R_{TL} en el modelo de CEE.	41
4.8.	Coefficientes de la función para C_{TS} en el modelo de CEE.	43
4.9.	Coefficientes de la función para C_{TL} en el modelo de CEE.	43
4.10.	Parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente de la batería. . . .	44
4.11.	Índices de desempeño de la validación del modelo de <i>CEE</i> la batería. . . .	46
5.1.	Parámetros considerando los intervalos de fallas.	48
5.2.	Firma de fallas para un supercapacitor.	58
5.3.	Firma de fallas de la primera rama del banco de supercapacitores.	59
5.4.	Firma de fallas de la primera rama del banco de supercapacitores.	62
5.5.	Firma de fallas para una batería.	77
6.1.	Coefficientes para el $V_{OC}[SOC(t)]$ de la batería 2.	83
6.2.	Coefficientes de la función para R_i en el modelo de CEE de la batería 2. . .	83
6.3.	Coefficientes de la función para R_{TS} en el modelo de CEE de la batería 2. .	84
6.4.	Coefficientes de la función para R_{TL} en el modelo de CEE de la batería 2. .	84
6.5.	Coefficientes de la función para C_{TS} en el modelo de CEE.	84
6.6.	Coefficientes de la función para C_{TL} en el modelo de CEE de la batería 2. .	85
6.7.	Parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente de la batería 2. . .	85

Índice de figuras

2.1. Estructura interna de un supercapacitor.	7
2.2. Modelo de circuito eléctrico equivalente de un supercapacitor.	8
2.3. Estructura interna de una batería.	10
2.4. <i>Modelo dinámico con base en un circuito eléctrico equivalente de una batería.</i>	10
3.1. Estrategia de manejo de energía	17
3.2. Banco de 36 supercapacitores simulados en <i>Simscape</i>	18
3.3. <i>PowerStore XB Series</i>	19
3.4. Banco de baterías.	20
3.5. Batería de <i>LiFePO₄</i> , <i>Power Sonic PSL-12450</i>	20
4.1. Modelo de circuito eléctrico equivalente de un supercapacitor.	22
4.2. Medición del escalón de voltaje para el supercapacitor.	24
4.3. Curva característica tiempo-voltaje de un supercapacitor.	25
4.4. <i>Banco de pruebas del banco de supercapacitores.</i>	27
4.5. Resultados experimentales vs simulaciones numéricas con parámetros nominales, (carga/autodescarga).	28
4.6. Resultados experimentales vs simulaciones numéricas con parámetros optimizados, (carga/autodescarga).	29
4.7. <i>Banco de pruebas de la batería.</i>	30
4.8. <i>Modelo de circuito eléctrico equivalente de una batería. (Gandolfo et al., 2015).</i>	30
4.9. <i>Prueba experimental: Carga constante con 9 [A].</i>	31
4.10. <i>Prueba experimental: Carga constante con 11 [A].</i>	31
4.11. <i>Prueba experimental: Carga constante con 13 [A].</i>	32
4.12. <i>Prueba experimental: Descarga constante con 9 [A].</i>	32
4.13. <i>Prueba experimental: Descarga constante con 11 [A].</i>	33
4.14. <i>Prueba experimental: Descarga constante con 13 [A].</i>	33
4.15. <i>Prueba experimental: Carga pulsante con 9 [A].</i>	34
4.16. <i>Prueba experimental: Carga pulsante con 11 [A].</i>	34
4.17. <i>Prueba experimental: Carga pulsante con 13 [A].</i>	35
4.18. <i>Prueba experimental: Descarga pulsante con 9 [A].</i>	35
4.19. <i>Prueba experimental: Descarga pulsante con 11 [A].</i>	36
4.20. <i>Prueba experimental: Descarga pulsante con 13 [A].</i>	36
4.21. Respuesta en voltaje durante el proceso de descarga con corriente pulsante.	37
4.22. <i>OCV</i> en experimento de carga.	37
4.23. <i>OCV</i> en experimento de descarga.	38

4.24. Curva característica de OCV en las baterías.	38
4.25. Valores de R_i para el modelo de la batería LiFePO4.	39
4.26. Valores de R_{TS} para el modelo de la batería LiFePO4.	39
4.27. Valores de R_{TL} para el modelo de la batería LiFePO4.	40
4.28. Valores de C_{TS} para el modelo de la batería LiFePO4.	42
4.29. Valores de C_{TL} para el modelo de la batería LiFePO4.	42
4.30. Validación del modelo con carga constante.	44
4.31. Validación del modelo con descarga constante.	45
4.32. Validación del modelo con carga pulsante.	45
4.33. Validación del modelo con descarga pulsante.	46
5.1. Banco de 36 supercapacitores simulados en <i>Simscape</i>	49
5.2. Comportamiento del modelo nominal vs. modelo con falla	50
5.3. Media de la señal con falla vs. la señal sin falla	50
5.4. Función de densidad de probabilidad en la señal sin falla.	51
5.5. Función de densidad de probabilidad en la señal con falla.	51
5.6. Región de seguridad para detectar fallas.	52
5.7. Esquema de diagnóstico de fallas del SC.	53
5.8. Modelo vs. estimación del banco de observadores	55
5.9. Banco de observadores	55
5.10. Respuesta del estimador de estados del SC_1 ante una falla.	56
5.11. Esquema de generación de residuos para un supercapacitor.	57
5.12. Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 5 % en C_0	57
5.13. Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 15 % en C_0	57
5.14. Evaluación de los residuos generados en la primera rama.	59
5.15. Respuesta del estimador de estados del SC_4 ante una falla.	60
5.16. Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 5 % en C_0	61
5.17. Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 15 % en C_0	61
5.18. Evaluación de los residuos generados en la primera rama.	62
5.19. Respuesta del estimador de estados del SC_1 ante una falla.	63
5.20. Residuos de los estados del SC_1	64
5.21. Banco de baterías.	65
5.22. Esquema DOS para el diagnóstico de fallas en una batería.	66
5.23. <i>Modelo dinámico con base en un circuito eléctrico equivalente de una batería.</i>	66
5.24. Estimación de la carga pulsante en la batería.	69
5.25. Estimación del estado V_{TS} en función del SOC.	69
5.26. Estimación del estado V_{TL} en función del SOC.	70
5.27. Estimación del SOC a partir del la entrada del modelo.	70
5.28. Acercamiento de la condición inicial del modelo y los EFKs.	71
5.29. Comportamiento del voltaje ante un aumento y decremento de R_i	71
5.30. Comportamiento del voltaje ante fallas.	72
5.31. Residuo de la batería sin presencia de falla.	73
5.32. Comportamiento del voltaje del modelo de la batería vs. modelo con falla.	74
5.33. Estimación del modelo fallado	74
5.34. Comparación del comportamiento de V_{TS} en condiciones nominales vs. condiciones de falla.	75

5.35. Comparación del comportamiento de V_{TL} en condiciones nominales vs. condiciones de falla.	75
5.36. Estimación del estado de carga ante una falla.	76
5.37. Diagrama de generación de residuos para la batería.	76

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes.

La demanda de energía eléctrica ha crecido en las últimas décadas, por lo tanto, la intervención de los gobiernos en la regulación del uso de fuentes de energía altamente contaminantes ha llevado a la necesidad de investigar y explotar otro tipo de fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente.

El uso de sistemas de almacenamiento de energía ha surgido por la necesidad de proveer energía eléctrica cuando las fuentes de energía primarias no pueden entregar o mantener prolongadamente la potencia o la densidad de energía. Con el paso del tiempo y con ayuda de las nuevas investigaciones se han superado estos retos, pero aún falta mucho por mejorar.

El ejemplo más notorio de esta evolución es el supercapacitor. En la década de los 90, estos dispositivos apenas estaban surgiendo, y aunque la densidad de energía que almacenaban y las altas capacitancias que alcanzaban son parecidas a la gama más baja de capacitancia con las que se cuenta hoy en día, el tamaño físico de estos dispositivos era relativamente grande con respecto al tamaño que tienen los supercapacitores en la actualidad (Bernal, 1997).

Con el paso del tiempo, las investigaciones realizadas y el empeño en mejorar estos dispositivos ha rendido frutos, en la actualidad se pueden encontrar supercapacitores con mucho mayor capacidad de almacenamiento de carga, aunque la mejora en el tamaño del voltaje que pueden entregar no ha crecido notoriamente. Lo mismo pasa con las baterías, se sigue trabajando en el diseño de nuevas combinaciones de sustancias electroquímicas que permitan mejorar la capacidad de almacenamiento de energía en estos dispositivos.

Por otro lado, el surgimiento de éstas mejoras en dichos dispositivos también requieren mejoras en las técnicas de modelado, esto para obtener modelos más precisos que representen mejor el comportamiento de los dispositivos de almacenamiento de energía (Nikdel et al., 2014).

1.2. Planteamiento del problema.

La generación de energía mediante tecnologías verdes es un tema muy investigado en la actualidad debido a la creciente necesidad de aprovechar los recursos renovables y de disminuir gases de efecto invernadero. Esto implica un reto muy grande porque la naturaleza variable, intermitente e impredecible de este tipo de tecnologías ocasiona que no se garantice la generación constante de energía por lo que se considera que la forma de distribución de energía no es efectiva. En consecuencia, los sistemas de almacenamiento de energía se presentan como una respuesta a estas oscilaciones de tensión eléctrica, aunque no siempre se garantiza que este tipo de sistemas sea inmune a las fallas. En este trabajo se propone abordar el problema de diagnóstico de fallas en sistemas de almacenamiento de energía (SAE) como tal, compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías, abarcando desde el modelado y la validación de dichos modelos con datos experimentales, hasta el diseño de los esquemas de diagnóstico en cada elemento de cada banco ya que hasta el momento, en el caso de los supercapacitores, se ha encontrado que diversos autores trabajan en el diagnóstico de fallas en un sólo dispositivo, no en bancos de supercapacitores.

1.3. Objetivo general.

Realizar el modelado en circuito eléctrico equivalente y estimar estados mediante un filtro de Kalman de un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías con propósitos de detección y diagnóstico de fallas fuera de línea.

1.3.1. Objetivos específicos.

- Obtener un circuito eléctrico equivalente considerando el SOC para una batería y un supercapacitor.
- Construcción del banco y validación del modelo de los supercapacitores.
- Construcción del banco y validación del modelo de las baterías.
- Desarrollar un simulador de los dispositivos de almacenamiento de energía considerados.
- Diseñar dos esquemas para la detección y el diagnóstico de fallas fuera de línea, mostrando ventajas y desventajas del uso de ambos esquemas.
- Definir los umbrales y los protocolos de prueba para validar los esquemas de diagnóstico de fallas.

1.4. Metas.

- a) Modelar el banco de supercapacitores y baterías.

- b) Construir un banco de supercapacitores y validar experimentalmente el modelo.
- c) Definir para el banco de supercapacitores y el banco de baterías: naturaleza de falla, tipo de falla, umbral, duración de la falla y enfoque para la detección.
- d) Evaluar mediante simulaciones numéricas el esquema de diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores y en el banco de baterías.

1.5. Justificación.

Hoy en día los estudios e investigaciones relacionadas con la generación de energía mediante tecnologías verdes son relevantes y con muchas áreas de oportunidad, entre ellas, lo relacionado con el almacenamiento de energía para su posterior uso.

El poder diagnosticar las fallas en el sistema de almacenamiento de energía permite por un lado evitar un daño en el mismo, y por el otro, tener una operación segura cuando interactúe con otros equipos y/o sistemas.

Por ello, es necesario realizar en primer lugar el modelado y la caracterización de este tipo de sistemas, ya que son un factor importante a la hora de aplicar el diagnóstico de fallas, debido a que se trata de un procedimiento que integra partes importantes y dependientes unas con otras.

1.6. Estado del arte

El uso de las fuentes de energías renovables ha llevado a que se desarrollen diferentes formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarla cuando sea necesario, una de estas formas almacenamiento de energía es el supercapacitor. En cuanto a las investigaciones realizadas sobre los modelos de los supercapacitores, en Yao et al. (2006) se presenta un modelo que consiste en una capacitancia constante, ESR (Resistencia de la Serie Equivalente) y EPR (Resistencia Paralela Equivalente), los parámetros que proporciona este modelo no alcanzan a representar completamente la dinámica del supercapacitor debido a que solo cuenta con un capacitor en el modelo. En Nikkhoo et al. (2016), se puede encontrar un método simple para la identificación de parámetros en un modelo de tres ramas para un supercondensador, que está respaldado por el razonamiento físico, puede describir el comportamiento del supercondensador con precisión.

En Torregrossa et al. (2015) se describe el comportamiento de envejecimiento de los supercapacitores expuestos a sobre cargas de temperaturas y tensión realizando pruebas experimentales específicas bajo condiciones controladas de laboratorio.

Y por último en Jia et al. (2010) presenta un sistema de almacenamiento de energía híbrido compuesto por una batería y un capacitor de doble capa eléctrica (EDLC) para proporcionar una gran potencia y capacidad de energía, en este trabajo el almacenamien-

to de energía se optimiza diseñando correctamente el ancho de banda de la batería y el regulador de potencia del capacitor de doble capa (EDLC).

En el caso de las baterías, se puede encontrar en la literatura sobre las revisiones de los mecanismos de falla y los desafíos relacionados con el diagnóstico (Aurbach et al., 2002) y (Alavi et al., 2013). En Lombardi et al. (2014), se presentan algoritmos de diagnóstico para un paquete de baterías. Se ha presentado también una estrategia de detección y aislamiento de fallas en Liu et al. (2014) basada en el análisis estructural. En cuanto a los sistemas de administración de batería (BMS), y no necesariamente enfocados a una batería en sí, se puede encontrar en Dey et al. (2016) el diagnóstico en tiempo real de las fallas del sensor, ya que el autor considera que es fundamental para garantizar la seguridad y la confiabilidad de la batería.

Por otro lado, en las investigaciones realizadas sobre el diagnóstico de fallas se han encontrado trabajos sobre estimación de estados donde hacen uso del *Filtro de Kalman* para la estimación del estado de carga de una batería Dong et al. (2016), posteriormente en el trabajo de Wei et al, 2019, usan la aportación del trabajo anterior para hacer diagnóstico de fallas en baterías de Ion-litio Wei et al. (2019). También se ha encontrado el uso del *Filtro de Kalman Extendido* para aplicaciones de diagnóstico de fugas en un ducto hidráulico, donde presentan la estimación de estados del modelo dinámico del fluido y además hacen la estimación de un parámetro específico del modelo, el cual da información sobre la localización de la fuga Santos-Ruiz et al. (2018). Dado que no se ha encontrado la aplicación de filtros de Kalman en el diagnóstico de falla en supercapacitores, en el presente trabajo se propone el uso de éstos para fines de diagnóstico de fallas en los dispositivos del caso de estudio. Isermann (2006).

1.7. Alcances.

El presente trabajo de tesis se acota a:

- El diseño, a grandes rasgos, de un esquema de la estrategia de manejo de energía, que incluye el dimensionamiento del banco de supercapacitores y el banco de baterías.
- El modelado del banco de supercapacitores y baterías para y su respectiva simulación.
- La construcción del banco de supercapacitores físicos para fines de adquisición de datos para la parametrización y validación del modelo.
- El diseño de un esquema de diagnóstico de fallas fuera de línea para ambos sistemas de almacenamiento de energía (banco de supercapacitores y banco de baterías).

1.8. Propuesta de solución.

Le propuesta de solución que se propone para este trabajo de tesis es la siguiente:

- Estudio de los sistemas de almacenamiento de energía. Se hará una revisión del estado del arte sobre los antecedentes, el modelo y el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía.
- Modelado del banco de supercapacitores y el banco de baterías.

Se realizará el modelado de ambos sistemas de almacenamiento de energía y posteriormente se realizará la caracterización del modelo con la ayuda de pruebas experimentales para propósitos de validación.

- Diseño del esquema de diagnóstico de fallas fuera de línea para el banco de supercapacitores y de baterías.

Se realizará el estudio de todos los escenarios posibles de fallas, en cada uno de los sistemas, para modelarlas y considerarlas en el sistema de diagnóstico de fallas fuera de línea.

1.9. Organización del documento.

Los siguientes capítulos se encuentran organizados de la siguiente manera:

En el **Capítulo 2** se presentan algunos conceptos fundamentales acerca del diagnóstico de fallas y sistemas de almacenamiento de energía.

En el **Capítulo 3** se presenta el caso de estudio para el modelado, la validación experimental y el diagnóstico de fallas, se trata de un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías.

En el **Capítulo 4** se presenta el procedimiento de identificación de parámetros...

En el **Capítulo 5** se presenta el procedimiento y los resultados del diseño del esquema de diagnóstico de fallas: se trata del diseño de un banco de observadores (filtro de Kalman y filtro de Kalman extendido) para el diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores y baterías.

En el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones generales del trabajo de tesis a partir de los resultados obtenidos del presente trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan las definiciones y conceptos que brindan el sustento teórico de este trabajo de investigación.

2.1. Sistemas de almacenamiento de energía

Existen diferentes formas de almacenamiento de energía, como por ejemplo: baterías, biomasa, capacitores, supercapacitores, hidrógeno, etc. Es necesario clasificarlos según sus diferentes principios de funcionamiento, capacidad de almacenamiento, tiempo de respuesta en el despacho de energía almacenada, uso más frecuente, etc. Los sistemas en los que se va a enfocar el análisis del presente trabajo, por su método de almacenamiento, se clasifican en: electroquímico (en el caso de la batería) y eléctrico (tal es el caso de los supercapacitores).

2.1.1. Supercapacitor.

El supercapacitor está compuesto de partículas de carbón activado que actúan como electrodos polarizables que están separadas por un separador ion-permeable colocado entre los electrodos. Éstas partículas fuertemente comprimidas son inmersas en una solución electrolítica formando una distribución de carga de doble capa a lo largo de la superficie de contacto entre el carbón y el electrolito. (Fig. 2.1).

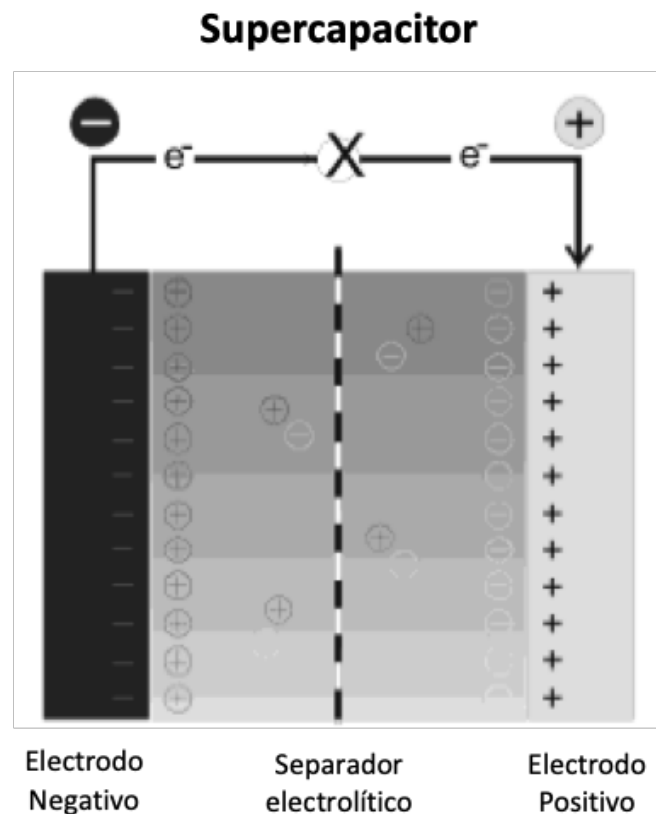


Figura 2.1: Estructura interna de un supercapacitor.

Existen 3 grandes aspectos de la física de la distribución de carga de doble capa que tienen influencia en la estructura del modelo de circuito equivalente y son las siguientes:

- Con base en las propiedades electroquímicas de la interfaz entre dos materiales en diferentes fases, la distribución de carga de doble capa de secciones diferenciales de la interfaz es modelada como un circuito RC.

El **elemento resistivo** representa la resistividad de los materiales formando la distribución de carga de doble capa. En el supercapacitor, ésto es principalmente la resistividad de las partículas de carbón.

El **elemento capacitivo** representa la capacitancia entre los dos materiales, para el supercapacitor, ésta es la capacitancia entre el carbón y el electrolito.

- Con base en la teoría de la tensión interfacial en la doble capa, la capacitancia de la distribución de carga de doble capa depende de la diferencia de potencial a lo largo del material.
- La distribución de carga de doble capa muestra cierta autodescarga.

También existen 3 consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para un modelo práctico y basados en los aspectos físicos de un supercapacitor.

- Representar el supercapacitor con circuitos RC pero manteniendo el número de elementos RC lo menos posible para razones prácticas.
- Incluir el efecto de la capacitancia no lineal en un solo elemento RC.
- Incluir un resistor de fuga en paralelo.

2.1.1.1. Modelo del supercapacitor.

En la literatura se han reportado varios modelos de supercapacitores, existen modelos de ecuaciones diferenciales basados en las propiedades electroquímicas de los supercapacitores y modelos de circuito eléctrico equivalente (Zhang et al., 2018), en el presente trabajo se analizará la segunda familia de modelos debido a que existen softwares que permiten simular los circuitos de manera más práctica. El modelo usado es el propuesto en Faranda (2010), a continuación se muestra en la Fig. 2.2

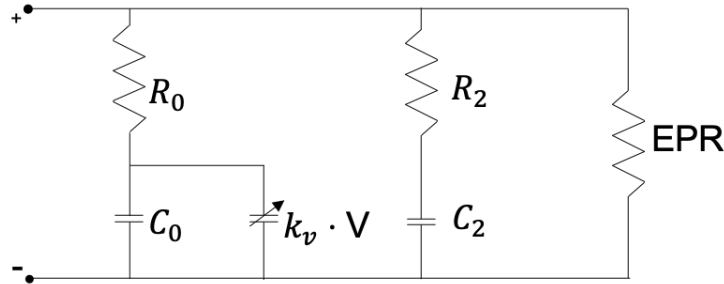


Figura 2.2: Modelo de circuito eléctrico equivalente de un supercapacitor.

En El Fadil et al. (2017) se presentan las ecuaciones en espacio de estados del circuito eléctrico equivalente de tres ramas RC tomado de Zubieta and Bonert (2000), de donde también se basó Faranda (2010), la única diferencia entre el segundo y el tercer autor, es que el tercero presenta una simplificación del modelo a dos ramas y propone un pequeño cambio en el método de parametrización.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{a_{11}x_1}{1+ax_1} + \frac{a_{12}x_2}{1+ax_1} + \frac{b_1u}{1+ax_1} , \\
 \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2u , \\
 y &= d_1x_1 + d_2x_2 + du ,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= v_1 , & x_2 &= v_2 , \\
 u &= i , & y &= v .
 \end{aligned}$$

Los parámetros dados anteriormente están descritos de la siguiente manera:

$$a_{11} = \frac{G_1(d_1 - 1)}{C_0} ; \quad a_{12} = \frac{G_1 d_1}{C_0} , \quad (2.2)$$

$$a_{21} = \frac{G_2 d_1}{C_2} ; \quad a_{22} = \frac{G_2(d_2 - 1)}{C_2} , \quad (2.3)$$

$$d_k = \frac{G_k}{G_T} ; \quad k = 1, 2 , \quad (2.4)$$

$$d = \frac{1}{G_T} , \quad (2.5)$$

$$b_1 = \frac{d_1}{C_0} ; \quad b_2 = \frac{d_2}{C_2} , \quad (2.6)$$

$$a = \frac{2k}{C_0} , \quad (2.7)$$

donde:

$$G_i = \frac{1}{R_i} , k = 1, 2 ; \quad G_{EPR} = \frac{1}{EPR} , \quad (2.8)$$

$$G_T = G_1 + G_2 + G_{EPR} . \quad (2.9)$$

2.1.2. Batería.

Una batería, también llamada acumulador eléctrico, es un dispositivo compuesto por celdas electroquímicas capaces de convertir la energía química en su interior en energía eléctrica, mediante la acumulación de corriente alterna.

Las baterías contienen celdas químicas que presentan un polo positivo (**cátodo**) y otro negativo (**ánodo**), así como electrolitos que permiten el flujo eléctrico hacia el exterior. Dichas celdas convierten la energía química en eléctrica, mediante un proceso irreversible que una vez consumado, agota su capacidad para recibir energía, ver Fig. 2.3. Además se pueden distinguir dos tipos de celdas:

- **Primarias.** Aquellas que, una vez producida la reacción, no pueden volver a su estado original, agotando así su capacidad de almacenar corriente eléctrica.
- **Secundarias.** Aquellas que pueden recibir una inyección de energía eléctrica para restaurar su composición química original, pudiendo así ser empleadas numerosas veces antes de agotarse del todo.

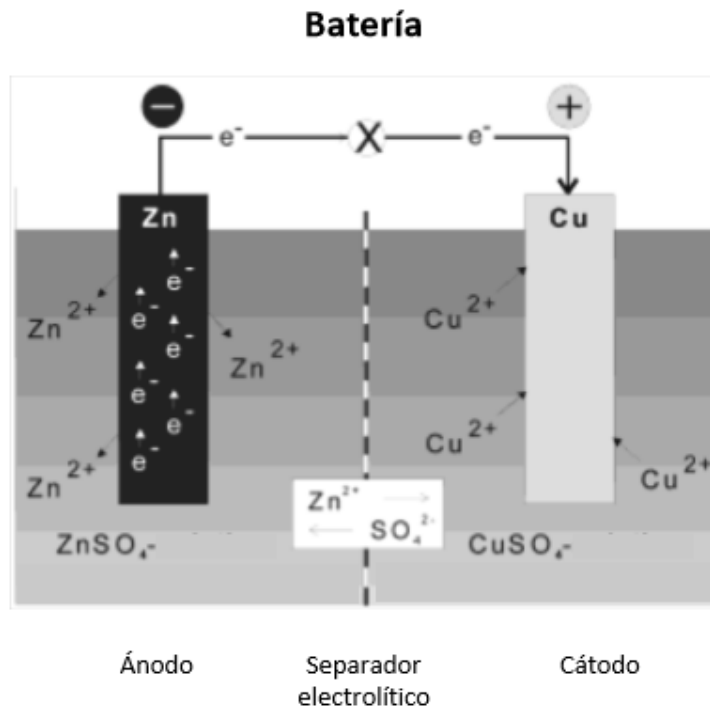


Figura 2.3: Estructura interna de una batería.

2.1.2.1. Modelo de la batería.

En la Fig. 2.4. se muestra el modelo de batería propuesto en Gandolfo et al. (2015).

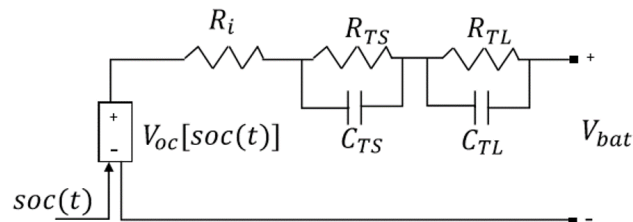


Figura 2.4: Modelo dinámico con base en un circuito eléctrico equivalente de una batería.

Este modelo con base en un circuito eléctrico equivalente, ajusta con buena precisión el comportamiento de carga y descarga de una batería. Debido a que existe una fuerte dependencia entre el comportamiento de la batería y el estado de carga (*SOC*), los parámetros están en función de esta variable.

R_i representa una caída de voltaje instantánea cuando una carga es conectada a la batería, la rama *RC* compuesta por R_{TS} y C_{TS} representa una constante de tiempo pequeña y la rama *RC* compuesta por R_{TL} y C_{TL} representa una constante de tiempo grande, R_{TS} y R_{TL} representan caídas de voltaje las cuales tienen una constante de tiempo asociada debido a las capacitancias C_{TS} y C_{TL} .

El voltaje en las terminales de la batería cuando se le demanda corriente es:

$$V_{Bat} = V_{OC} - V_{Ri} - V_{TS} - V_{TL} , \quad (2.10)$$

donde:

$$\begin{aligned} V_{OC} [SOC(t)] = & a_0 e^{-a_1 SOC(t)} + a_2 + a_3 SOC(t) - \dots \\ & \dots - a_4 SOC^2(t) + a_5 SOC^3(t) , \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$V_{Ri} = R_i i(t) , \quad (2.12)$$

$$\frac{dV_{C_{TS}}}{dt} = \frac{1}{C_{TS}} i(t) - \frac{V_{C_{TS}}}{R_{TS} C_{TS}} , \quad (2.13)$$

$$\frac{dV_{C_{TL}}}{dt} = \frac{1}{C_{TL}} i(t) - \frac{V_{C_{TL}}}{R_{TL} C_{TL}} , \quad (2.14)$$

y el estado de carga (SOC) se calcula de la siguiente manera:

$$SOC = SOC_i - \frac{1}{C_T} \int_0^t i(t) dt , \quad (2.15)$$

donde: SOC_i es el estado inicial del (SOC), C_T es la capacidad total de la batería e $i(t)$ es la corriente que circula por la batería.

2.2. Ajuste de curvas.

El ajuste de curvas es un proceso mediante el cual, dado un conjunto de N pares de puntos $\{x_i, y_i\}$ (siendo x la variable independiente y y la dependiente), se determina una función matemática $f(x)$ de tal manera que la suma de los cuadrados de la diferencia entre la imagen real y la correspondiente obtenida mediante la función ajustada en cada punto sea mínima:

$$\varepsilon = \min \left(\sum_i^N (y_i - f(x_i))^2 \right) . \quad (2.16)$$

Generalmente, se elige una función genérica $f(x)$ en función de uno o más parámetros y se ajusta el valor de estos parámetros de la manera que se minimice el error cuadrático, ε .

2.2.1. Mínimos cuadrados.

El objetivo del ajuste polinómico por mínimos cuadrados es determinar la ecuación del polinomio de grado M que minimiza el error cuadrático,

$$\varepsilon = \min \left(\sum_i^N (y_i - y_i^{calc})^2 \right) = \min \left(\sum_i^N (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 \dots - a_M x_i^M)^2 \right), \quad (2.17)$$

respecto a los parámetros $M + 1$ y los parámetros a_0, a_1, \dots, a_M .

2.2.2. Método de Levenberg-Marquardt.

El método de Levenberg-Marquardt (*MLM*) es un método iterativo para resolver problemas no lineales de estimación de parámetros por mínimos cuadrados.

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [f_i(x)]^2. \quad (2.18)$$

La técnica fue desarrollada primero por Levenberg modificando la norma ordinaria de mínimos cuadrados. Más tarde, Marquardt derivó básicamente la misma técnica mediante una estrategia diferente. La intención de Marquardt fue obtener un método que tendiera al método de Gauss en la vecindad del mínimo de la norma ordinaria de mínimos cuadrados y que tendiera al método del descenso infinito en la proximidad de la consideración inicial. El Método de Levenberg-Marquardt ha sido aplicado (Beck and Arnold, 1977) a la solución de una variedad de problemas inversos que involucran la estimación de parámetros desconocidos. La técnica es eficiente para resolver problemas lineales y no lineales de estimación de parámetros.

2.3. Filtro de Kalman.

El filtro de Kalman en sus diversas formas está claramente establecido como una herramienta fundamental para el análisis y solución de una amplia clase de problemas de estimación. Esta herramienta es un sistema dinámico capaz de reconstruir o estimar el valor de los estados de un proceso, a partir de las entradas $u(t)$ y las salidas disponibles $y(t)$.

2.3.1. Filtro de Kalman en tiempo continuo.

James Follin, A. G. Carlton, James Hanson and Richard Bucy desarrollaron el filtro de Kalman en tiempo continuo en un trabajo no publicado para el laboratorio de física aplicada Johns Hopkins a finales de la década de los 50. Rudolph Kalman desarrolló independientemente el filtro de Kalman en tiempo discreto en 1960. En abril de 1960 Kalman y Bucy se dieron cuenta del trabajo de cada uno y su colaboración en la publicación del filtro de Kalman en tiempo continuo.

El filtro de Kalman en tiempo continuo está dado de la siguiente manera.

- Las ecuaciones del sistema dinámico y las ecuaciones de medición en tiempo continuo están dadas como,

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= f(x, u, w, t) , \\
y &= h(x, v, t) , \\
w &\sim (0, Q_c) , \\
v &\sim (0, R_c) ,
\end{aligned} \tag{2.19}$$

donde todas las variables dependen del tiempo, y $w(t)$ y $v(t)$ son ruido blanco del proceso en tiempo continuo.

- Las ecuaciones del filtro de Kalman en tiempo continuo están dadas como,

$$\begin{aligned}
\hat{x}(0) &= E[x(0)] , \\
P(0) &= E[(x(0) - \hat{x}(0))(x(0) - \hat{x}(0))^T] , \\
K &= PC^T R_c^{-1} , \\
\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) , \\
\dot{P} &= -PC^T R_c^{-1} CP + AP + PA^T + Q_c .
\end{aligned} \tag{2.20}$$

La gran mayoría de las aplicaciones del filtro de Kalman son implementadas en computadores digitales, por ello puede ser innecesario discutir el filtrado de Kalman en tiempo continuo. Sin embargo, aún existen oportunidades para implementar filtros de Kalman en tiempo continuo, por ejemplo, en circuitos analógicos.

2.3.2. Filtro de Kalman en tiempo discreto.

El filtro de Kalman opera por la propagación de la media y la covarianza del estado a través del tiempo, como se mencionó anteriormente, la mayoría de las aplicaciones son implementadas en en computadoras digitales, por lo tanto es necesario discretizar las ecuaciones dinámicas de los sistemas y por ende las ecuaciones del filtro de Kalman porque la media del estado es el estado estimado por el filtro de Kalman y la covarianza del estado es la covarianza estimada por el filtro de Kalman. Cada vez que se obtiene una medición, se actualiza la media y la covarianza del estado.

Se asume que se tiene un sistema lineal en tiempo discreto de la forma

$$\begin{aligned}
x_k &= F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} , \\
y_k &= H_k x_k + v_k ,
\end{aligned} \tag{2.21}$$

en ambos casos, la señal de ruido del proceso w_k y la señal de ruido de medición v_k , se asume que el ruido es blanco, de media cero, no están correlacionados, y se tienen matrices de covarianza conocidas, Q_k y R_k , respectivamente,

$$\begin{aligned}
w_k &\sim (0, Q_k) , \\
v_k &\sim (0, R_k) , \\
E[w_k w_j^T] &= Q_k \delta_{k-j} , \\
E[v_k v_j^T] &= R_k \delta_{k-j} , \\
E[v_k w_j^T] &= 0 ,
\end{aligned} \tag{2.22}$$

donde δ_{k-j} es la función delta de Kronecker; esto es, $\delta_{k-j} = 1$ si $k = j$, y $\delta_{k-j} = 0$ si $k \neq j$. El objetivo es estimar el estado x_k con base en el conocimiento de la dinámica del

sistema y la disponibilidad de las mediciones ruidosas, y_k .

El filtro de Kalman se inicializa como sigue

$$\begin{aligned}\hat{x}_0^+ &= E(x_0) , \\ P_0^+ &= E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] , \\ E[v_k w_j^T] &= 0 .\end{aligned}\tag{2.23}$$

El filtro de Kalman en tiempo discreto está dado por las siguientes ecuaciones, las cuales se calculan para cada paso de tiempo $k = 1, 2, \dots$,

$$\begin{aligned}P_k^- &= F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} , \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} , \\ &= P_k^+ H_k^T R_k^{-1} , \\ \hat{x}_k^- &= F_{k-1} \hat{x}_{k-1} + G_{k-1} u_{k-1} = \text{estado estimado } a \text{ priori} , \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^-) = \text{estado estimado } a \text{ posteriori} , \\ P_k^- &= (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T , \\ &= [(P_k^-)^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k]^{-1} , \\ &= (I - K_k H_k) P_k^- .\end{aligned}\tag{2.24}$$

Como se puede observar, existen 3 expresiones para calcular P_k^+ , la primera es conocida como la versión estable de Joseph de la ecuación de la medición actual de la covarianza. Fue formulada por Peter Joseph en la década de los 60 y puede ser mostrada como la más estable y robusta que la tercera expresión (Bryson Jr and Henrikson, 1968; Crassidis and Junkins, 2011), además garantiza que siempre será simétrica definida positiva, tanto como P_k^- sea simétrica positiva definida. La tercera expresión de P_k^+ es computacionalmente más simple que la primera expresión, pero su forma no garantiza la simetría o la definidad positiva para P_k^+ , La segunda forma de P_k^+ es raramente implementada como se muestra anteriormente pero si se usa para el filtro de Kalman discreto entonces se debe hacer uso de la segunda expresión de K_k , esto debido a que la segunda expresión de K_k depende de P_k^+ , así que se necesita usar una expresión para P_k^+ que no dependa de K_k .

Un aspecto práctico del Filtro de Kalman es que en la Ec. 2.24 el cálculo de P_k^- , K_k y P_k^+ no depende de las mediciones de y_k , pero depende solamente de los parámetros del sistema F_k , H_k , Q_k y R_k . Esto significa que la ganancia de Kalman K_k puede ser calculada fuera de línea antes de la operación del sistema y el guardado en la memoria. Entonces cuando llega el tiempo de operación del sistema en tiempo real, sólo las ecuaciones de \hat{x}_k necesitan ser implementadas en tiempo real.

2.3.3. Propiedades del filtro de Kalman.

En esta sección se presentan algunas propiedades importantes e interesantes del filtro de Kalman. Suponiendo que se tiene un sistema lineal como el de la Ec. 2.24 y se requiere encontrar un filtro causal que resulte en la estimación del estado \hat{x}_k .

El error entre el verdadero estado y el estado estimado se denota como \tilde{x}_k

$$\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k.\tag{2.25}$$

Ya que el estado es parcialmente determinado por el proceso estocástico w_k , x_k es una variable aleatoria. Debido a que el estado estimado es determinado por la secuencia de medición y_k , la cual se vuelve parcialmente determinada por el proceso estocástico v_k , \hat{x}_k es una variable aleatoria. Por lo tanto, \tilde{x}_k también es una variable aleatoria.

2.4. Filtro de Kalman linealizado.

Hasta este punto se han puesto las bases de las definiciones y ecuaciones del filtro de Kalman para sistemas lineales, desafortunadamente, los sistemas lineales no existen en la práctica, todos los sistemas son no lineales.

Existen herramientas, como la linealización, para aproximar el modelo no lineal de los sistemas dinámicos y trabajar en una región de operación estable de dichos sistemas, en ocasiones estas herramientas son útiles y en algunas ocasiones no pero también existen otras técnicas para trabajar con ese tipo de sistemas, para este trabajo de tesis no fue necesario recurrir a ese tipo de técnicas debido a que a pesar de que los dos sistemas con los que se trabajó eran no lineales se pudo abordar la problemática de linealización, y aplicando el filtro de Kalman extendido, por eso no se profundiza en la explicación de ese tema. Para abordar el tema de linealización de sistemas no lineales, se debe considerar el modelo de un sistema no lineal general como el que se muestra en la Ec. 2.26

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w, t) , \\ y &= h(x, v, t) , \\ w &\sim (0, Q) , \\ v &\sim (0, R) , \end{aligned} \tag{2.26}$$

donde la ecuación del sistema $f(\cdot)$ y la ecuación de medición $h(\cdot)$ son funciones no lineales, las series de Taylor se usan para expandir estas ecuaciones alrededor de un control nominal u_0 , un estado nominal x_0 , una salida nominal y_0 , y valores nominales para las señales de ruido w_0 y v_0 . Todos estos valores nominales están en función del tiempo y están basados en suposiciones *a priori* que podrían presentarse en la trayectoria del sistema. La trayectoria nominal del sistema que se obtiene a partir de la linealización del modelo debe ser cercana a la trayectoria *actual* y esa es la aproximación que se logra mediante la linealización por series de Taylor (Ec. 2.27).

$$\begin{aligned} \dot{x} &\approx f(x_0, u_0, w_0, t) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 (x - x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_0 (u - u_0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial f}{\partial w} \right|_0 (w - w_0) , \\ &= f(x_0, u_0, w_0, t) + A\Delta x + B\Delta u + L\Delta w , \\ y &\approx h(x_0, v_0, t) \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_0 (x - x_0) + \left. \frac{\partial h}{\partial v} \right|_0 (v - v_0) , \\ &= h(x_0, v_0, t) + C\Delta x + M\Delta v , \end{aligned} \tag{2.27}$$

donde las derivadas parciales de las matrices A , B , C , L y M , y las definiciones de las desviaciones Δx , Δu , Δw y Δv son evidentes en la Ec. 2.27.

Se asume que todo el tiempo las señales de ruido nominales son igual a cero, por lo tanto las desviaciones entre las mediciones reales y las mediciones nominales se desprecian

y las ecuaciones del filtro de Kalman para el filtro de Kalman linealizado se pueden escribir de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
\Delta\dot{\hat{x}}(0) &= 0 , \\
P(0) &= E[(\Delta x(0) - \Delta\hat{x}(0))(\Delta x(0) - \Delta\hat{x}(0))^T] , \\
\Delta\dot{\hat{x}} &= A\Delta\hat{x} + K(\Delta y - C\Delta\hat{x}) , \\
K &= PC^T\tilde{R}^{-1} , \\
\dot{P} &= AP + PA^T + \tilde{Q} - PC^T\tilde{R}^{-1}CP , \\
\hat{x} &= x_0 + \Delta\hat{x} .
\end{aligned} \tag{2.28}$$

2.5. Filtro de Kalman extendido.

El filtro de Kalman extendido (EKF) es similar al filtro de Kalman linealizado, excepto que en este caso se ha elegido $x_0 = \hat{x}$, y se reescriben las ecuaciones de manera que se pueda obtener \hat{x} directamente, esto quiere decir que el principio del filtro de Kalman extendido sigue siendo el mismo que el del filtro de Kalman linealizado, la única diferencia es que la estimación del EKF no se basa en la linealización alrededor de una región de operación nominal, sino que se basa en la linealización del sistema no lineal a partir del estado estimado anteriormente. La ganancia K es la misma que se presenta en la Ec. 2.28, pero esta formulación ingresa directamente la medición de y , y estima directamente la salida del estado \hat{x} . Por lo tanto, las ecuaciones del EKF se presentan como

$$\begin{aligned}
\hat{x}(0) &= E[x(0)] , \\
P(0) &= E[(x(0) - \hat{x}(0))(x(0) - \hat{x}(0))^T] , \\
\dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u, w_0, t) + K[y - h(\hat{x}, v_0, t)] , \\
K &= PC^T\tilde{R}^{-1} , \\
\dot{P} &= AP + PA^T + \tilde{Q} - PC^T\tilde{R}^{-1}CP ,
\end{aligned} \tag{2.29}$$

donde los valores nominales del ruido están dados como $w_0 = 0$ y $v_0 = 0$.

Capítulo 3

Banco de supercapacitores y baterías.

Este capítulo se enfoca en la descripción del caso de estudio que aborda el presente trabajo. Se trata de un sistema de almacenamiento de energía (SAE), compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías, el cual fue modelado y validado experimentalmente para propósitos de diagnóstico de fallas fuera de línea, donde dichas fallas están acotadas a cada uno de los SAEs, sin considerar fallas en los convertidores ni en la fuente principal de suministro de energía.

Usualmente los SAEs necesitan de una estrategia de manejo de energía para aprovechar al máximo las ventajas que ofrece cada uno de ellos, en la Fig.3.1 se presenta a grandes rasgos el esquema del diseño de la estrategia de manejo de energía propuesto para nuestro caso de estudio.

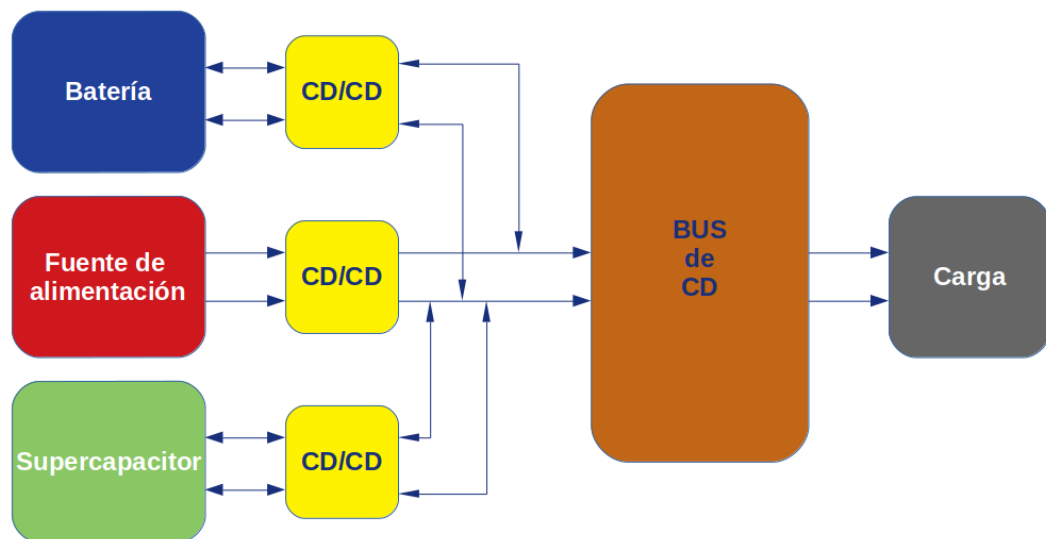


Figura 3.1: Estrategia de manejo de energía

Una estrategia común del manejo de energía es el dimensionamiento de los sistemas de almacenamiento con base en el promedio de potencia de la carga en lugar de considerar la máxima potencia requerida. Considerando que las propiedades acumulativas de energía y el tiempo de respuesta de cada sistema son distintos, se propone el diseño de un sistema en el que se combinen las características de la alta energía que proporcionan las

baterías y la alta potencia que pueden proporcionar los supercapacitores. Cabe mencionar que a pesar de que los supercapacitores pueden proporcionar altos picos de corriente y su respuesta de suministro de energía es más rápida en comparación con la respuesta que pueden proporcionar las baterías, su densidad de almacenamiento es muy pequeña, es por eso que se necesita conectar muchos supercapacitores, en serie y en paralelo, para obtener un sistema de almacenamiento con una densidad de energía más alta que pueda ser útil para ciertas aplicaciones.

El banco de supercapacitores tiene una dimensión de 6×6 supercapacitores (Fig. 3.2), de la marca *PowerStore XB Series*, (Fig.3.3), la capacitancia de cada uno es de $400 [F]$, las especificaciones de cada uno y del banco se muestran en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2, respectivamente.

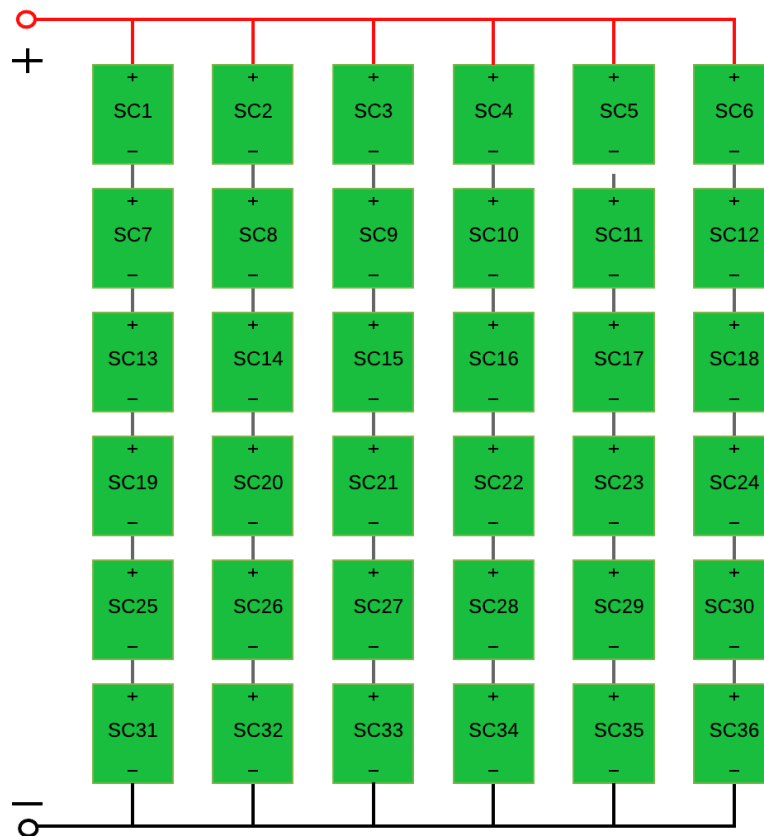


Figura 3.2: Banco de 36 supercapacitores simulados en *Simscape*.

Figura 3.3: *PowerStore XB Series*

Especificaciones de desempeño	Parámetro
Voltaje de trabajo máximo	2.5 [V]
Voltaje de sobretensión	2.85 [V]
Rango de temperatura de funcionamiento	-25 [C] a +75 [C]
Tolerancia de capacitancia	±10 [%] (+25 [C])
Capacitancia	400 [F]
ESR máxima	4.5 [mΩ]
Corriente continua máxima	19 [A]
Corriente pico	180 [A]
Corriente de fuga máxima	0.45 [mA]
Potencia máxima	350 [W]
Energía almacenada	0.35 [Wh]

Tabla 3.1: Especificaciones del supercapacitor *PowerStore XB Series*.

Especificaciones de desempeño	Parámetro
Voltaje de trabajo máximo	15 [V]
Voltaje de sobretensión	17.1 [V]
Capacitancia	400 [F]
ESR máxima	4.5 [mΩ]
Corriente continua máxima	114 [A]
Corriente pico	1071 [A]
Potencia máxima	12.5 [KW]
Energía almacenada	12.5 [Wh]

Tabla 3.2: Especificaciones del banco de supercapacitores.

El banco de baterías tiene una dimensión de 6×1 baterías, conectadas en paralelo (Fig.3.4), de la marca *Power Sonic*, (Fig.3.5), la capacidad nominal de cada una es de 45 [Ah], las especificaciones de cada una y del banco se muestran en la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4, respectivamente.

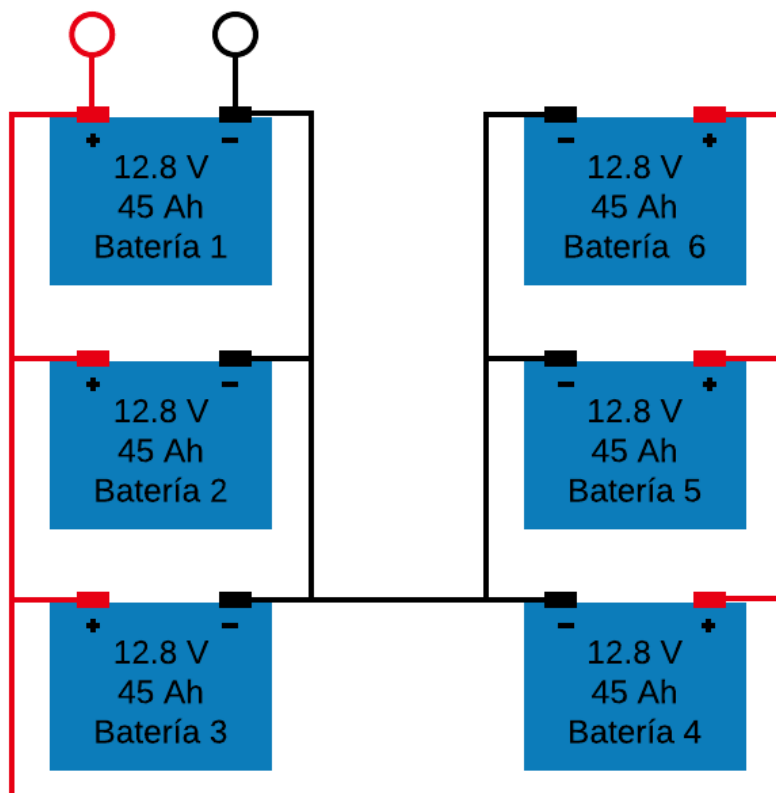


Figura 3.4: Banco de baterías.

Figura 3.5: Batería de $LiFePO_4$, Power Sonic PSL-12450

Especificaciones de desempeño	Parámetro
Voltaje nominal	12.8 [V]
Capacidad nominal 77 [F]/25 [F]	45 [Ah]
Capacidad mínima 77 [F]/25 [F]	42 [Ah]
Voltaje de corte de descarga	9.6 [V] = 2.4 [V] por celda
Voltaje de corte de carga	14.6 [V] = 3.65 [V] por celda
Resistencia interna al 50 % del SOC	< 25 [mΩ]
Energía específica	99 Wh/Kg]
Máxima corriente carga/descarga	20 [A]

Tabla 3.3: Especificaciones de la batería de $LiFePO_4$, Power Sonic PSL-12450

Especificaciones de desempeño	Parámetro
Voltaje nominal	12.8 [V]
Capacidad nominal 77 [F]/25 [F]	45 [Ah] por batería
Capacidad mínima 77 [F]/25 [F]	42 [Ah] por batería
Voltaje de corte de descarga	9.6 [V] = 2.4 [V] por celda
Voltaje de corte de carga	14.6 [V] = 3.65 [V] por celda
Máxima corriente carga/descarga	120 [A]

Tabla 3.4: Especificaciones del banco de baterías de $LiFePO_4$.

Como se puede observar en las características del banco de supercapacitores (Tabla 3.2) y el banco de baterías (Tabla 3.4), existen diferencias de valores en los parámetros, por ejemplo: el voltaje que puede suministrar cada sistema de almacenamiento, es por eso que se propone un convertidor CD/CD reductor de voltaje a 12 [V] para cada sistema de almacenamiento de energía.

Capítulo 4

Identificación de parámetros del modelo del supercapacitor y la batería.

En este capítulo se presenta el procedimiento de la identificación de parámetros del modelo del supercapacitor y del modelo de la batería, el procedimiento utilizado para cada modelo se muestra detallado en la siguiente sección.

4.1. Identificación de parámetros en el modelo de dos ramas del supercapacitor.

Uno de los objetivos de este trabajo de tesis es la validación del modelo del banco de supercapacitores y baterías, en esta sección se presenta la validación del modelo dinámico del supercapacitor, ver (Fig.4.1). Como se mencionó anteriormente, se usa un modelo de circuito eléctrico equivalente simplificado, también llamado modelo de dos ramas, para caracterizar el comportamiento del supercapacitor, para ello se realizaron pruebas experimentales para validar el modelo.

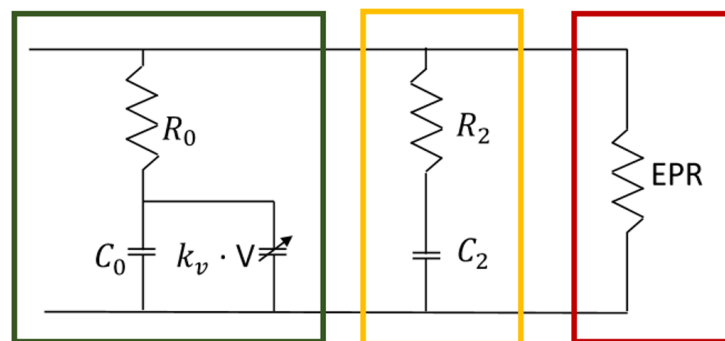


Figura 4.1: Modelo de circuito eléctrico equivalente de un supercapacitor.

La distribución de carga del modelo se representa de la siguiente manera:

La primera rama encerrada en color verde, también conocida como rama inmediata, domina el comportamiento inmediato de un supercapacitor en respuesta a una acción de

carga, dicha rama está compuesta por un resistor R_0 en serie con un capacitor que es el principal responsable para el almacenamiento inicial. El capacitor está compuesto por un capacitor constante C_0 en paralelo con un capacitor variable dependiente del voltaje, $k_v \cdot v$.

La segunda rama RC encerrada en color amarillo (rama de mediano plazo) representa la redistribución de carga del voltaje del dispositivo sobre medianos y largos periodos de tiempo.

La tercera rama encerrada en color rojo consta de una resistencia en paralelo equivalente (EPR) y se agrega para representar la propiedad de autodescarga.

Se realizaron distintas pruebas experimentales para la caracterización:

Carga con corriente constante y autodescarga En este tipo de experimento se aplicó al supercapacitor una corriente constante hasta que se alcanza el voltaje máximo del supercapacitor, los valores de corriente que se utilizaron fueron de 1 [A], 3 [A] y 5 [A]. Para el banco de supercapacitores, los valores de corriente que se utilizaron fueron de 7 [A], 11 [A] y 14 [A].

Carga/Descarga con corriente constante. En este tipo de experimento se aplicó al supercapacitor una corriente constante hasta que se alcanza el voltaje máximo del mismo, los valores de corriente que se utilizaron fueron de 1 [A], 3 [A] y 5 [A]. Los valores de corriente aplicados al banco de supercapacitores fueron de 7 [A], 11 [A] y 14 [A].

Carga/Descarga con corriente pulsante. Para este tipo de experimento se aplicó una corriente pulsante al supercapacitor, los valores de corriente que se utilizaron, al igual que en las pruebas anteriores, fueron de 1 [A], 3 [A] y 5 [A] con un ciclo de trabajo del 5 % y con un periodo de: 105, 35 y 21 segundos, respectivamente, y los valores de corriente aplicados al banco de supercapacitores y 7 [A], 11 [A] y 14 [A], respectivamente, con un ciclo de trabajo del 10 % y con un periodo de: 1800, 1473 y 1247 segundos, respectivamente, hasta que se alcanza el voltaje máximo del banco de supercapacitores.

De acuerdo con la descripción dada anteriormente, los parámetros de los elementos de la primera rama se pueden calcular bajo la consideración de que durante la fase de carga, toda la corriente suministrada al supercapacitor es absorbida por ésta. por lo tanto R_0 se calcula a partir de la medición del escalón de voltaje (Fig. 4.2) durante el primer periodo de carga (ΔV) y se divide entre la corriente de carga (I_c).

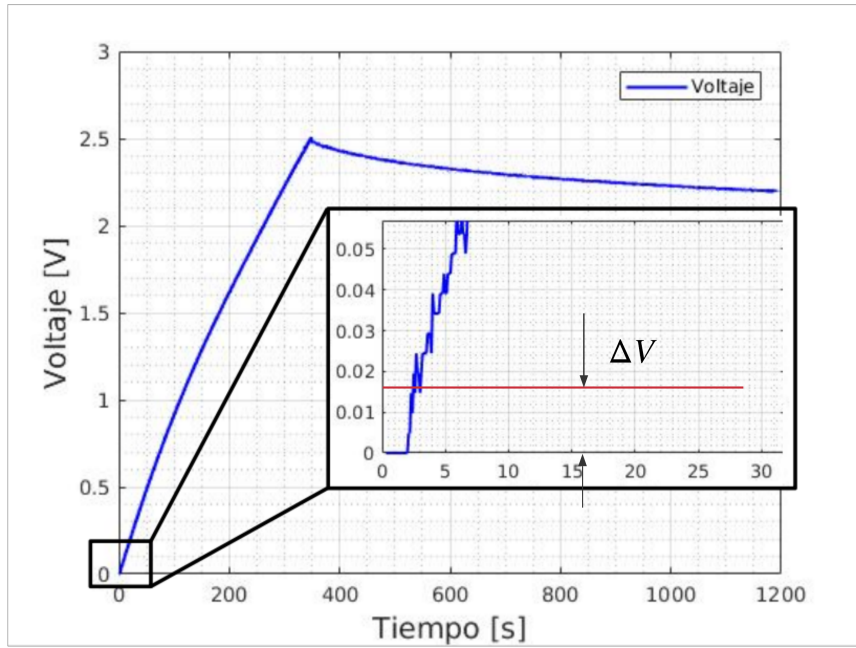


Figura 4.2: Medición del escalón de voltaje para el supercapacitor.

$$R0 = \frac{\Delta V}{I_c} , \quad (4.1)$$

la relación entre la carga, el voltaje y la corriente en un capacitor no lineal está expresada por

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dv} \frac{dv}{dt} = (C_0 + k_v v) , \quad (4.2)$$

integrando y reescribiendo la Ec. (4.2) mediante la separación de elementos variables y considerando constante la corriente de carga, ésta se puede llevar al lado derecho y se obtiene,

$$t = f(V) = \frac{C_0}{I_c} V + \frac{1}{2} \frac{k_v}{I_c} V^2 , \quad (4.3)$$

los valores de C_0 y k_v se pueden estimar como sigue:

$$\begin{aligned} C_0 &= c_1 I_c \\ k_v &= 2c_2 I_c . \end{aligned} \quad (4.4)$$

A partir de la curva de voltaje de carga, obtenida experimentalmente, se pueden determinar dos puntos $p_1(t_1, V_1)$ y $p_2(t_2, V_2)$ obtenidos de dos diferentes mediciones como se muestra en la Fig. 4.3.

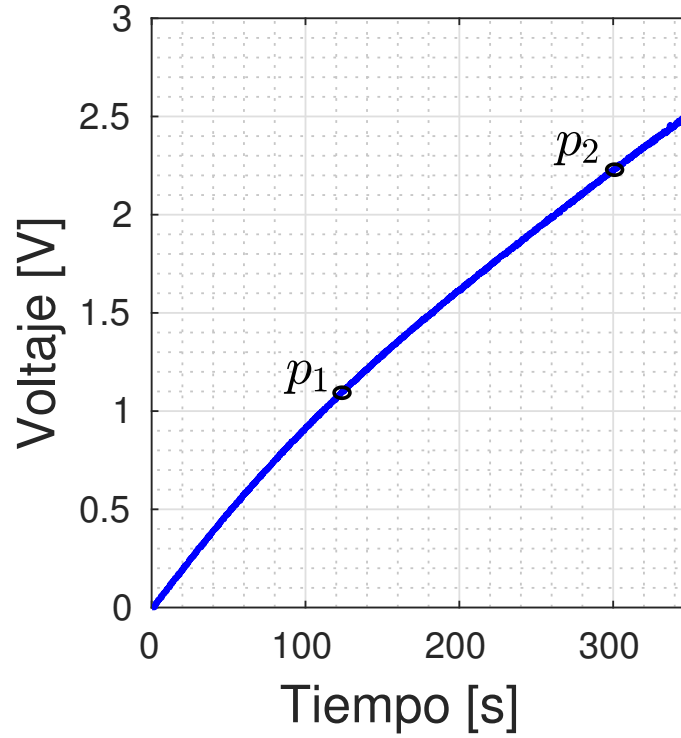


Figura 4.3: Curva característica tiempo-voltaje de un supercapacitor.

De la información del tiempo y voltaje obtenidos de las mediciones se obtienen las siguientes igualdades

$$\begin{cases} t_1 = c_1 V_1 + c_2 V_1^2 \\ t_2 = c_1 V_2 + c_2 V_2^2 \end{cases}, \quad (4.5)$$

despejando c_1 y c_2 de la Ec. 4.5 tenemos

$$\begin{cases} c_1 = \frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2} \\ c_2 = \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_1 V_2^2 - V_1^2 V_2} \end{cases}. \quad (4.6)$$

Sustituyendo la Ec. 4.5 en la Ec. 4.4 obtenemos

$$\begin{cases} c_0 = \left[\frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2} \right] I_c \\ k_v = \left[\frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_1 V_2^2 - V_1^2 V_2} \right] I_c \end{cases}, \quad (4.7)$$

Una vez que la identificación de la primera rama se ha completado, se procede a identificar los elementos de la segunda rama, cabe mencionar que cada rama tiene una constante de tiempo de carga diferente, aunque en la primera rama es tan pequeña que se desprecia, por lo tanto, los parámetros dependen de la respuesta en voltaje a causa de la

corriente aplicada al dispositivo, esta constante de tiempo de carga para la segunda rama tiene que ser aproximadamente 4 veces mayor que el valor del tiempo de carga y se debe elegir en relación con la forma de onda de voltaje experimental, explotando la definición de la constante de tiempo de carga tenemos que

$$R_2 = \frac{\tau_2}{C_2}, \quad (4.8)$$

y el valor de C_2 se determina a partir de la ecuación de carga del supercapacitor, tomando en cuenta que en esta ecuación se asume que el elemento C_2 representa la carga total del supercapacitor podemos despejarlo de la Ec. 4.9 y obtenemos

$$Q_{tot} = I_c T_c = C_2 V_{2f} + \left(C_0 + \frac{k_v}{2} V_{2f} \right) V_{2f}, \quad (4.9)$$

por lo tanto, como se mencionó anteriormente, despejando C_2 de la Ec. 4.9, tenemos,

$$C_2 = \frac{I_c T_c - C_0 V_{2f} - k_v V_{2f}^2}{2V_{2f}}, \quad (4.10)$$

donde T_c es el tiempo de carga y V_{2f} es el voltaje final que alcanza el supercapacitor. Por último, la resistencia en paralelo que se encuentra en la tercera rama y que modela el fenómeno no lineal de autodescarga del supercapacitor se calcula de la siguiente manera

$$EPR = \frac{V_n}{I_{fuga}}, \quad (4.11)$$

donde V_n es el voltaje de trabajo máximo en el cual el supercapacitor trabaja en condiciones nominales (Tabla 3.1) y la corriente de fuga, I_{fuga} se especifican en la hoja de datos del supercapacitor.

Los parámetros obtenidos a partir de las curvas características de voltaje y aplicando el procedimiento anterior son los que se muestran en la Tabla 4.1, comparándolos con los resultados obtenidos en la literatura.

Autor	Cap.	Parámetros				
		R_0 [Ω]	C_0 [F]	R_2 [Ω]	C_2 [F]	EPR [Ω]
Muñoz-Menéndez (2019)	400 [F]	8.15 [m]	155.0501	8.9829	49.1615	3.3 [K]
Faranda (2010)	350 [F]	4.80 [m]	232.51	5.55	43.19	2.5 [K]
Zubieta and Bonert (2000)	470 [F]	2.50 [m]	270	5.20	220	9 [K]
Nikkhoo et al. (2016)	470 [F]	2.48 [m]	259	5.28	208	8.9 [K]
Faranda (2010)	600 [F]	2.80 [m]	454.49	3.09	77.43	2.5 [K]

Tabla 4.1: Parámetros del modelo de un supercapacitor.

También se realizó la parametrización del banco de supercapacitores siguiendo el mismo procedimiento pero aplicando diferentes valores de corriente para la caracterización,

los valores aplicados fueron de 7 [A], 11 [A] y 14 [A]. En la Fig. 4.4 se muestra el banco de pruebas del banco de supercapacitores.



Figura 4.4: Banco de pruebas del banco de supercapacitores.

Los valores obtenidos se encuentran en la Tabla 4.2.

Parámetro	Valor
R_0	0.0465 [Ω]
C_0	210.9599 [F]
R_2	11.3697 [Ω]
C_2	72.1216 [F]
EPR	3.3 [K Ω]

Tabla 4.2: Parámetros del modelo del banco de supercapacitores.

Los resultados que se presentan en Faranda (2010) muestran un ajuste casi preciso en la curva de voltaje característica de carga y autodescarga de un supercapacitor, pero en realidad, siguiendo el mismo procedimiento, la curva de voltaje simulada con los parámetros identificados no se ajustó demasiado a la curva de voltaje obtenida experimentalmente. El valor del error relativo entre el modelo experimental y el modelo simulado con los parámetros identificados fue del 1.26 %, (Fig. 4.5).

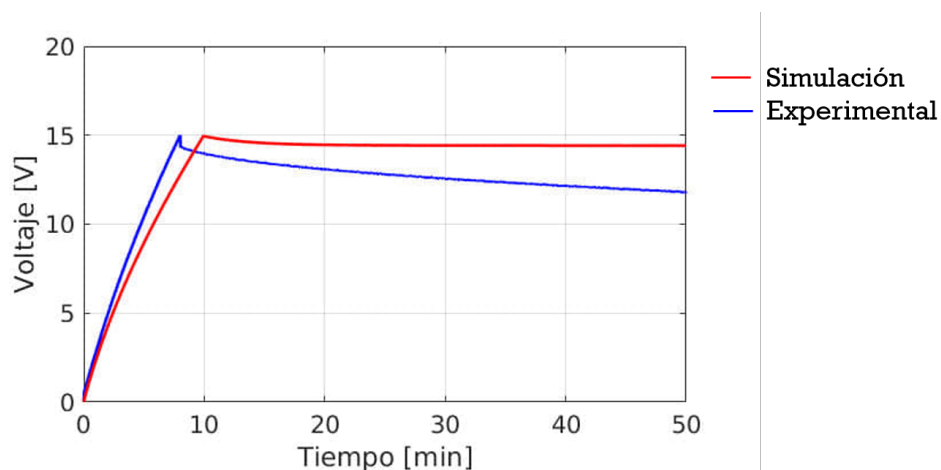


Figura 4.5: Resultados experimentales vs simulaciones numéricas con parámetros nominales, (carga/autodescarga).

Por este motivo, se optó por aplicar al modelo un algoritmo de optimización para encontrar los valores que se ajusten mejor a los datos experimentales y con un error relativo más pequeño. Los nuevos parámetros encontrados por el algoritmo *PSO* (por sus siglas en inglés, *Particle Swarm Optimization*) son los que se muestran en la Tabla 4.3, el ajuste que se realizó con éstos valores fue pequeño, en consecuencia, buscando en la literatura, se encontró que la propiedad de autodescarga se comporta como una fuga debido a reacciones redox faradéicas controladas por difusión, que es un proceso no lineal, y por ende, la autodescarga modelada nunca se ajustará al comportamiento experimental, a menos que se utilice una resistencia de fuga variable como un proceso interno de fuga óhmica Zhang and Yang (2011), es por ello que para el análisis de este trabajo se usan los parámetros optimizados que se muestran en la Tabla 4.3,

Parámetro	Valor
R_0	0.0450 [Ω]
C_0	220.9338 [F]
R_2	11.0526 [Ω]
C_2	83.6048 [F]
EPR	3.3 [$K\Omega$]

Tabla 4.3: Parámetros optimizados del modelo del banco de supercapacitores.

En la Fig. 4.6 se muestra la comparación del modelo con los parámetros optimizados de la Tabla 4.3.

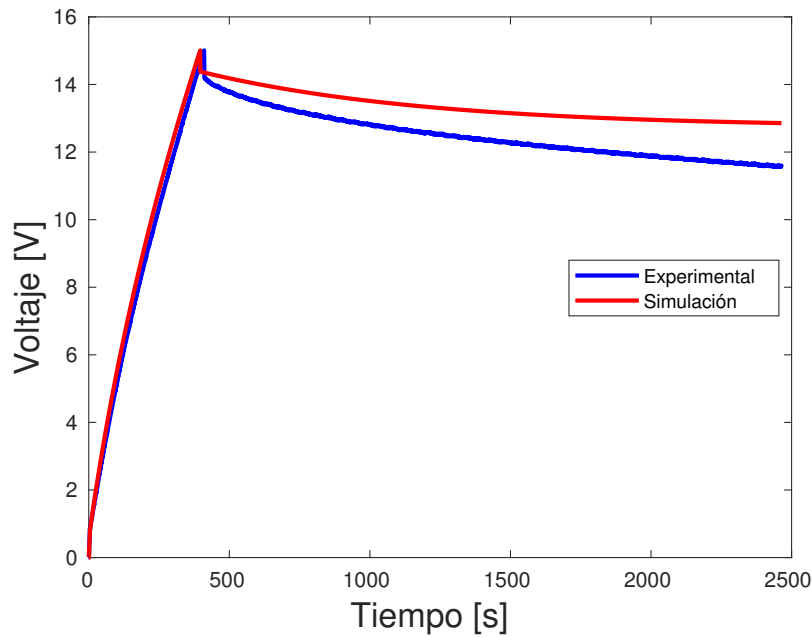


Figura 4.6: Resultados experimentales vs simulaciones numéricas con parámetros optimizados, (carga/autodescarga).

Como se puede observar en las figuras anteriores, los parámetros optimizados ajustan mejor el fenómeno de carga, y el de descarga lo aproxima en comportamiento. El valor del error relativo entre los datos experimentales y la evaluación en simulación con los parámetros optimizados fue de 0.8269 %.

4.2. Identificación de parámetros en el modelo de batería.

En esta sección se presenta la parametrización del modelo propuesto en Gandolfo et al. (2015), los parámetros del modelo propuesto se obtienen a partir de pruebas experimentales con datos obtenidos de las dos baterías que se tienen en el laboratorio (Fig.4.7). En el modelo presentado en la Fig. 4.8 se puede observar una fuerte dependencia de los parámetros con el estado de carga (SOC) de la batería, por este motivo se realizaron las siguientes pruebas:



Figura 4.7: Banco de pruebas de la batería.

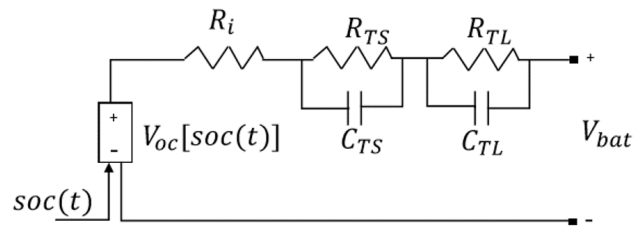


Figura 4.8: Modelo de circuito eléctrico equivalente de una batería. (Gandolfo et al., 2015)

Carga/Descarga con corriente constante. En este tipo de experimento se aplicó a la batería una corriente constante hasta alcanzar el voltaje de carga/descarga de corte en sus terminales, los valores de corriente que se utilizaron fueron de 9 [A], 11 [A] y 13 [A], tanto para carga como para descarga. En las siguientes figuras se muestran las curvas características de voltaje obtenidas de los experimentos mencionados anteriormente, Figs.(4.9)-(4.14).

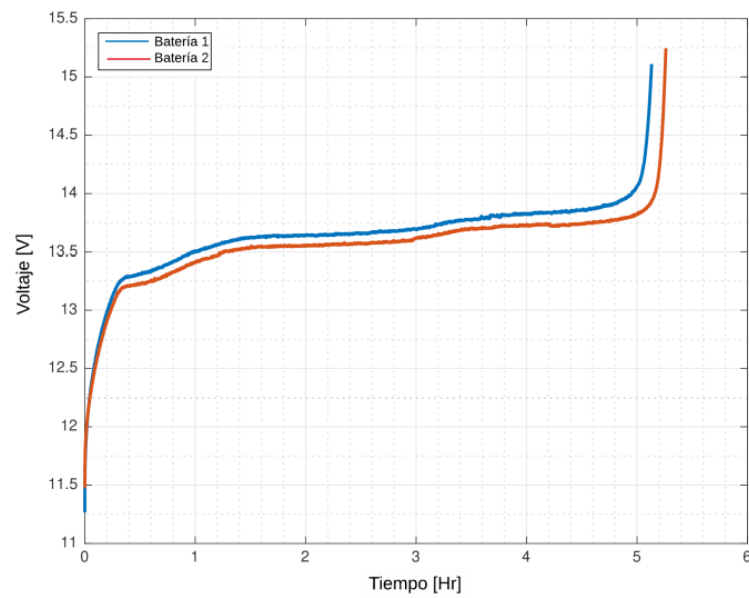


Figura 4.9: Prueba experimental: Carga constante con 9 [A].

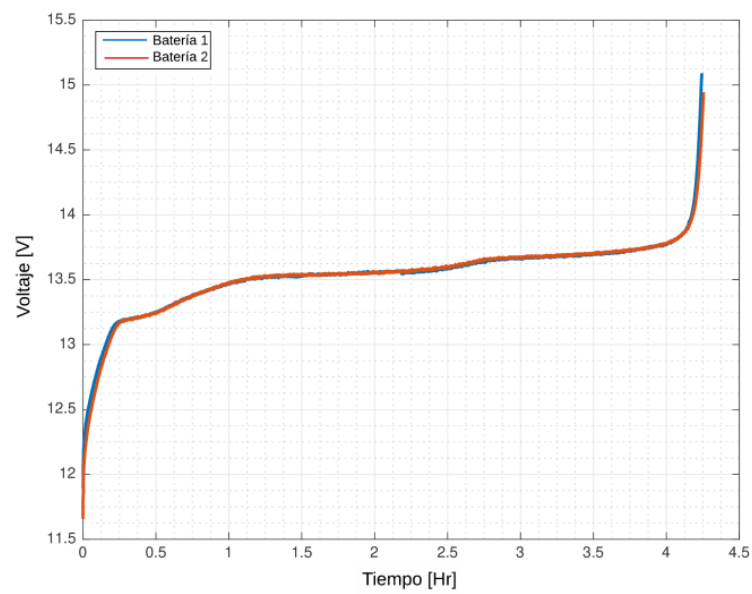


Figura 4.10: Prueba experimental: Carga constante con 11 [A].

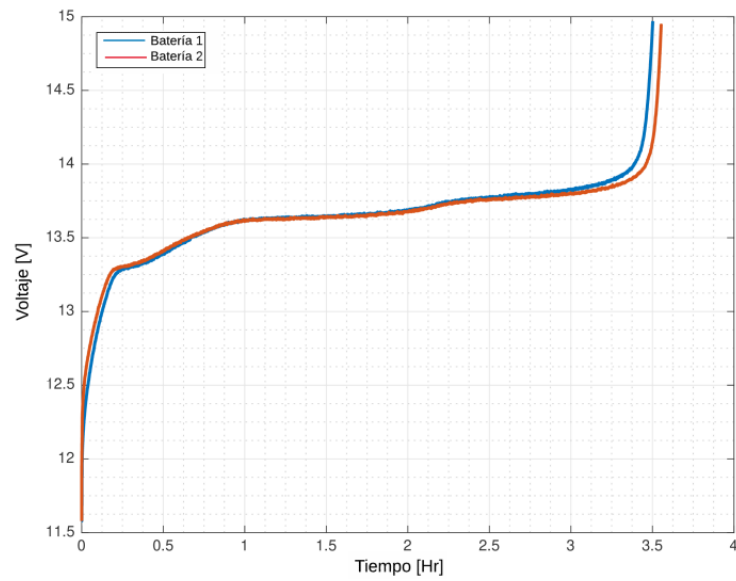


Figura 4.11: *Prueba experimental: Carga constante con 13 [A].*

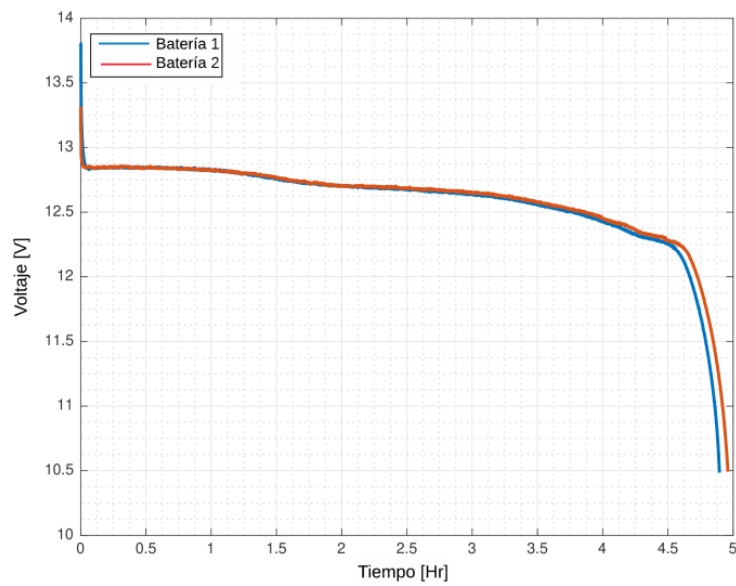


Figura 4.12: *Prueba experimental: Descarga constante con 9 [A].*

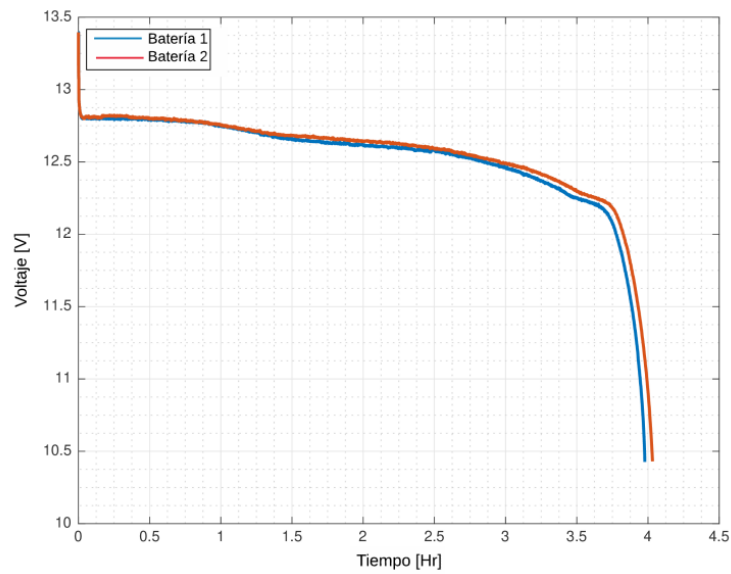


Figura 4.13: Prueba experimental: Descarga constante con 11 [A].

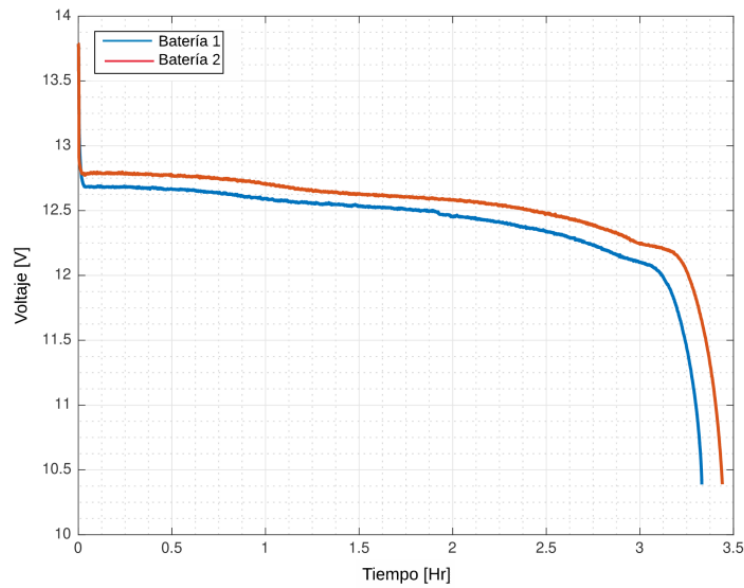


Figura 4.14: Prueba experimental: Descarga constante con 13 [A].

Carga/Descarga con corriente pulsante. Para este tipo de experimento se aplicó una corriente pulsante a la batería, los valores de corriente que se utilizaron fueron de 9 [A], 11 [A] y 13 [A], con un ciclo de trabajo del 50% y con un periodo de: 60, 49 y 41.5 minutos, respectivamente, hasta alcanzar el voltaje de carga/descarga de corte en sus terminales. En las Figs.(4.15)-(4.20) se muestran las curvas de voltaje obtenidas de las pruebas experimentales.

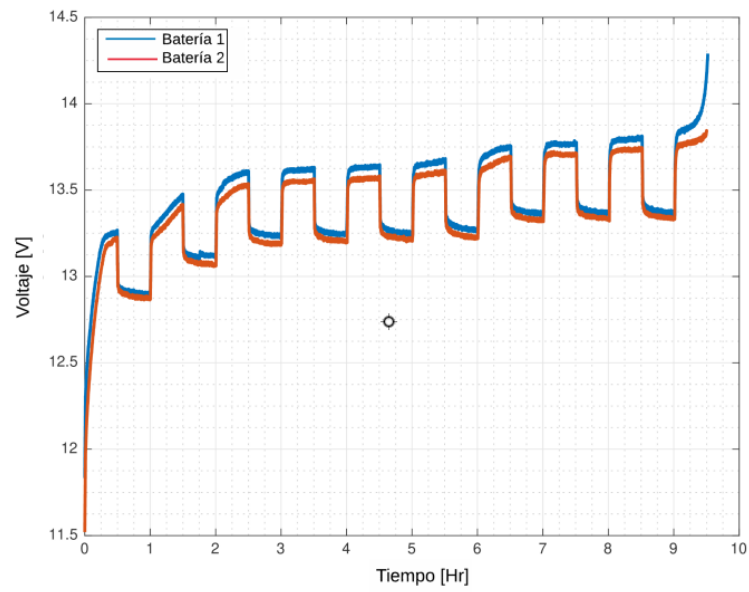


Figura 4.15: Prueba experimental: Carga pulsante con 9 [A].

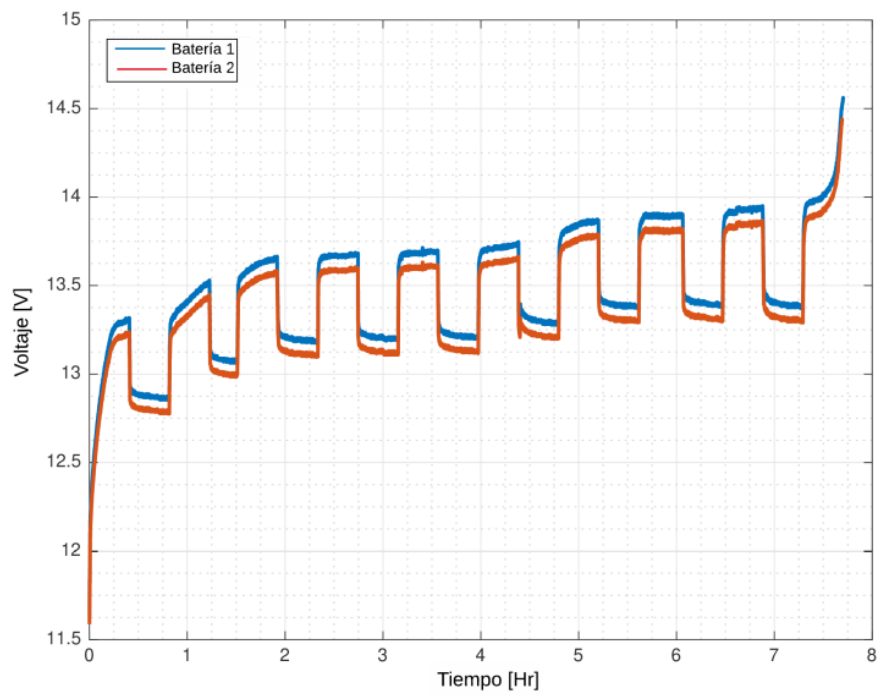


Figura 4.16: Prueba experimental: Carga pulsante con 11 [A].

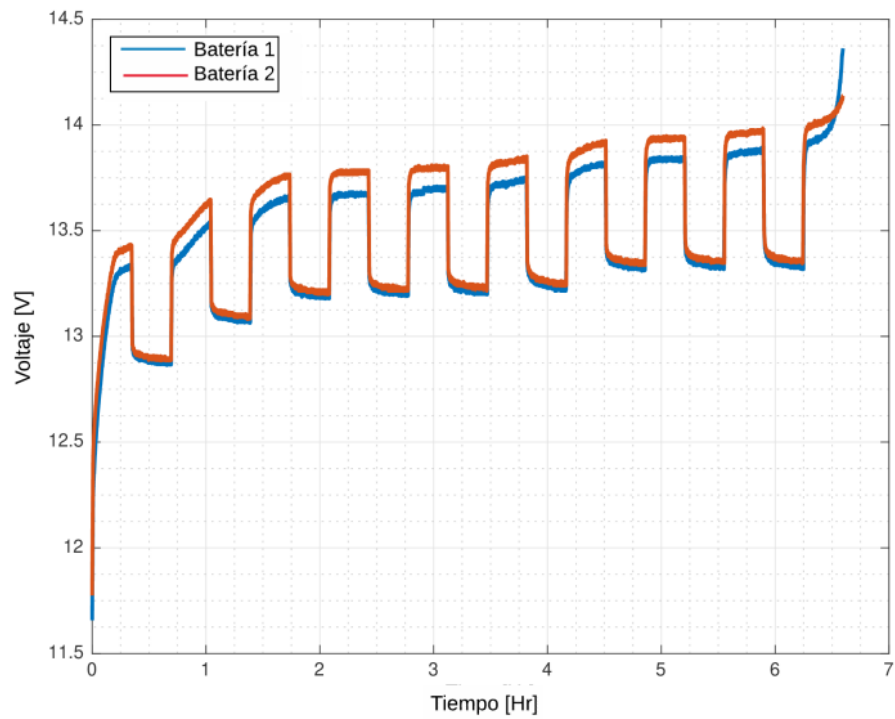


Figura 4.17: Prueba experimental: Carga pulsante con 13 [A].

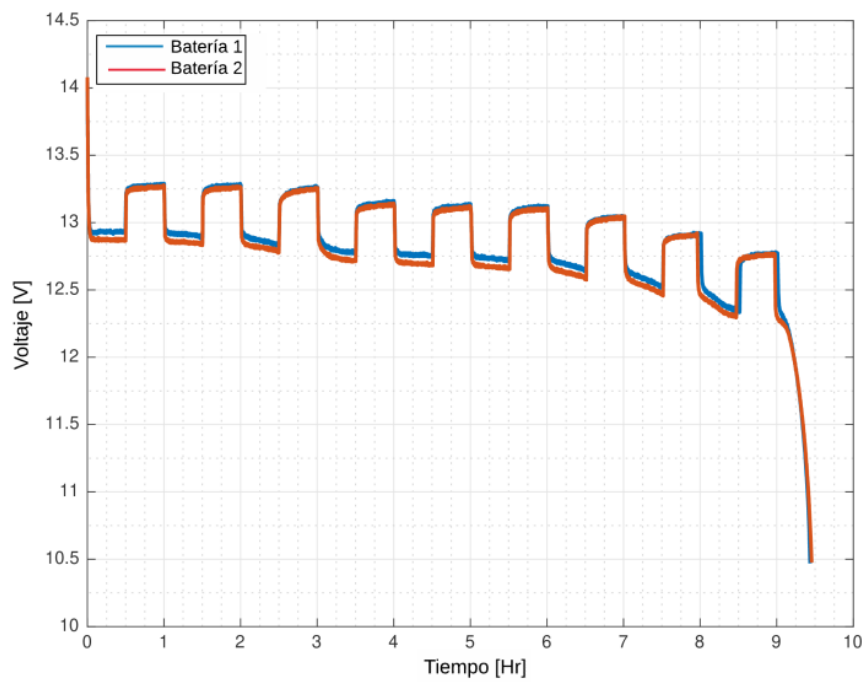


Figura 4.18: Prueba experimental: Descarga pulsante con 9 [A].

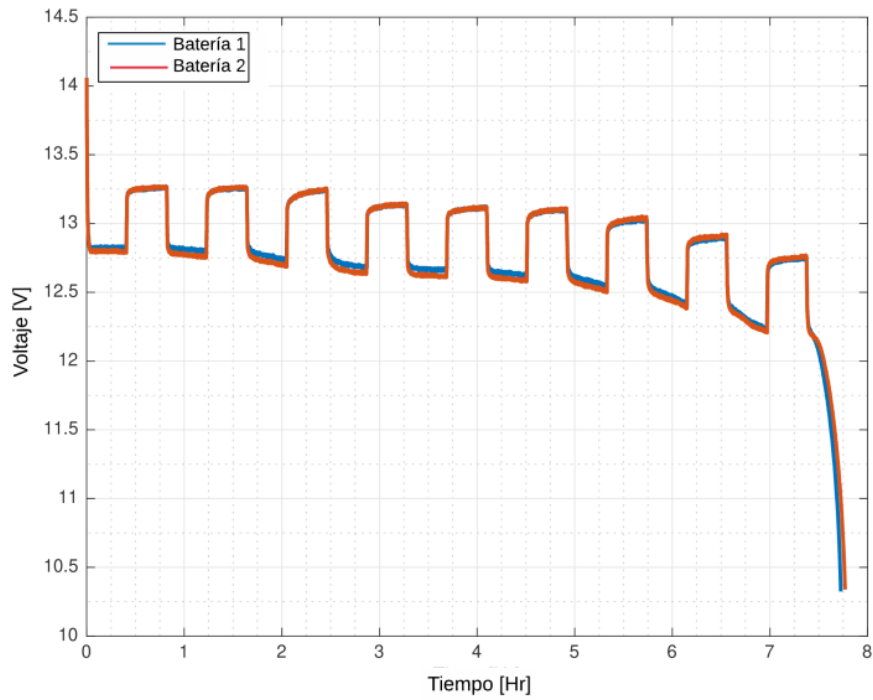


Figura 4.19: Prueba experimental: Descarga pulsante con 11 [A].

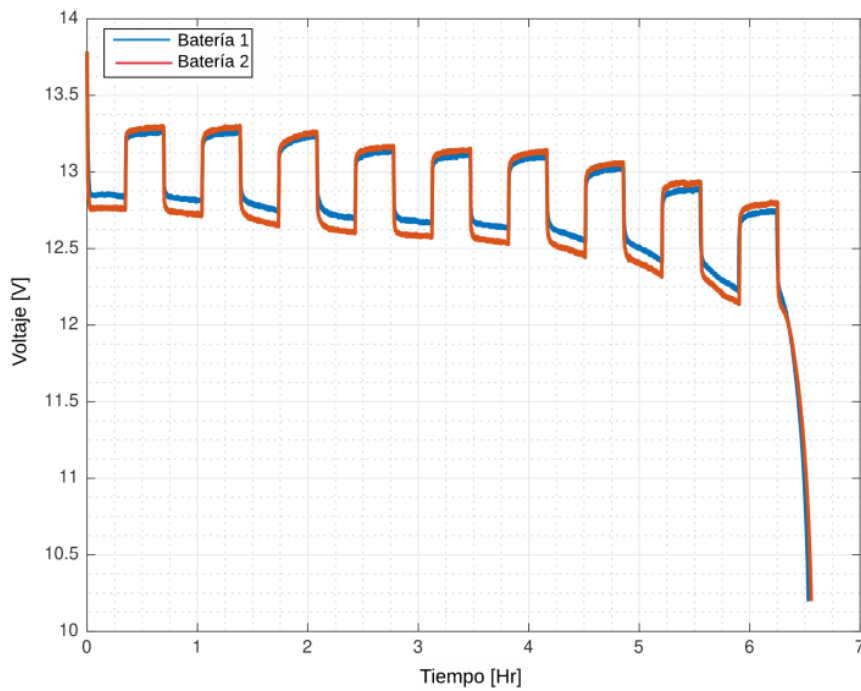


Figura 4.20: Prueba experimental: Descarga pulsante con 13 [A].

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en Chen and Rincon-Mora (2006), donde también se identifican los parámetros en función del estado de carga (SOC) y la corriente de descarga con base en las curvas obtenidas en los experimentos de corriente

pulsante, en este trabajo de tesis también se utiliza la información obtenida en los experimentos de descarga pulsante. En la Fig.(4.21) se presenta la curva característica de voltaje que se utiliza para estimar los parámetros del modelo.

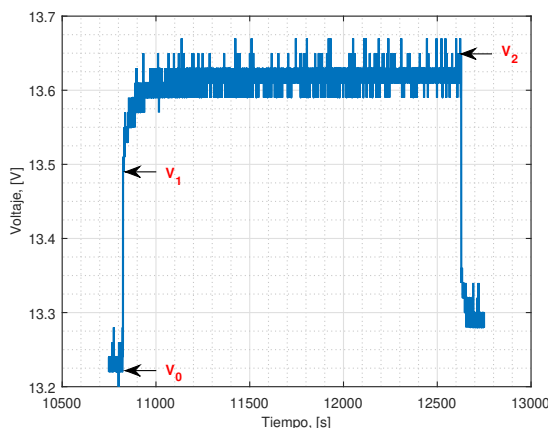


Figura 4.21: Respuesta en voltaje durante el proceso de descarga con corriente pulsante.

Primeramente se determina el voltaje en circuito abierto (*OCV*) de la batería, para no dejar lugar a dudas sobre la determinación del *OCV* se explica lo siguiente: en los experimentos de carga pulsante se aplicaba corriente durante un periodo de tiempo equivalente al 10 % del estado de carga de la batería, en el caso de los experimento de descarga pulsante se demandaba corriente durante periodos de tiempo equivalentes al 10 % del *SOC*, cabe mencionar que el periodo de tiempo varía con respecto al valor de corriente que se aplique o demande a la entrada, cuando el *SOC* de la batería llegaba al 10 %, se dejaba de demandar corriente en la entrada, es decir, se abría el circuito y la batería entraba en modo de operación: cero demanda de corriente (v_2), el mismo procedimiento se realizó hasta llegar al 100 % del *SOC* de la batería. Por lo tanto, se puede decir que el valor obtenido en el punto v_2 de cada ciclo del *SOC* es el denominado voltaje en circuito abierto (*OCV*). En las Figs.(4.22)-(4.23) se puede apreciar las curvas de *OCV* de la batería tanto en el proceso de carga como en el proceso de descarga.

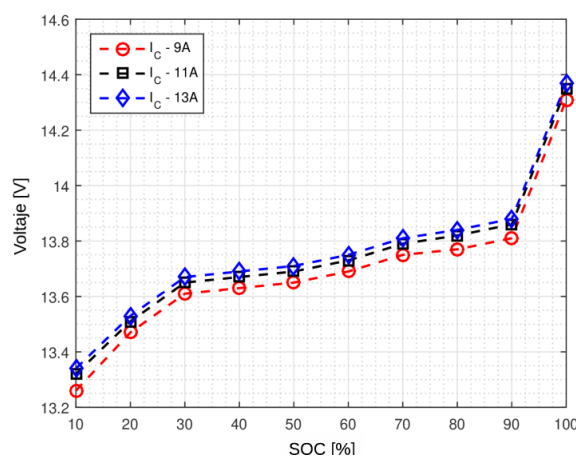


Figura 4.22: *OCV* en experimento de carga.

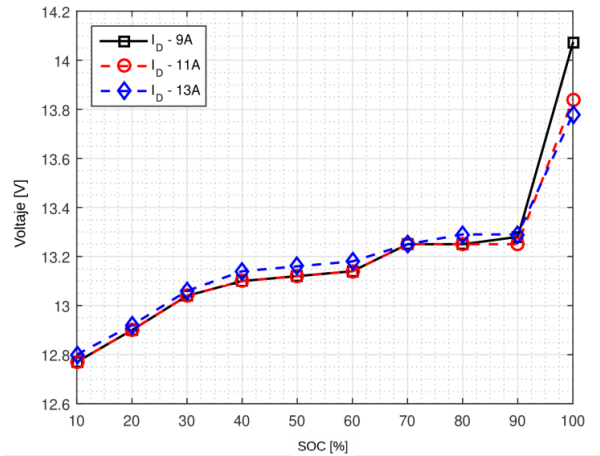


Figura 4.23: OCV en experimento de descarga.

Considerando los resultados anteriores, se determinó la señal promedio general de OCV considerando una señal promedio OCV de carga y una señal promedio de OCV de descarga, tal y como se muestra en la Fig.(4.24).

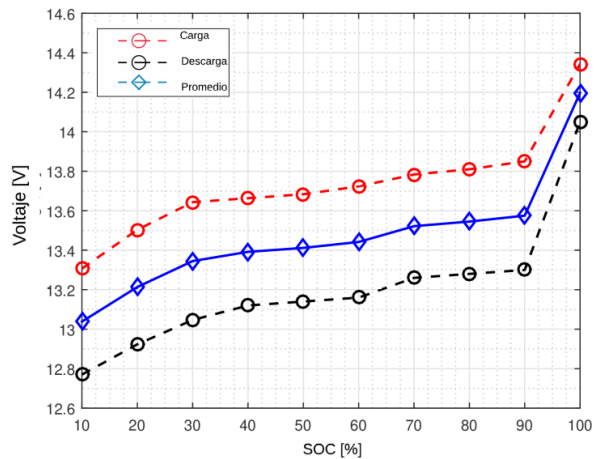


Figura 4.24: Curva característica de OCV en las baterías.

El voltaje en circuito abierto en función del estado de carga de la batería se calcula con la siguiente función:

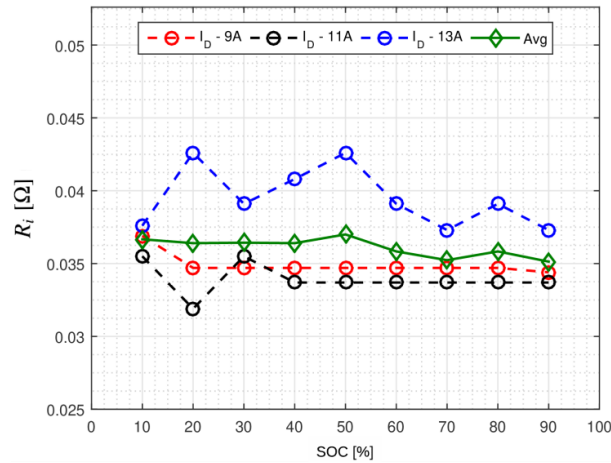
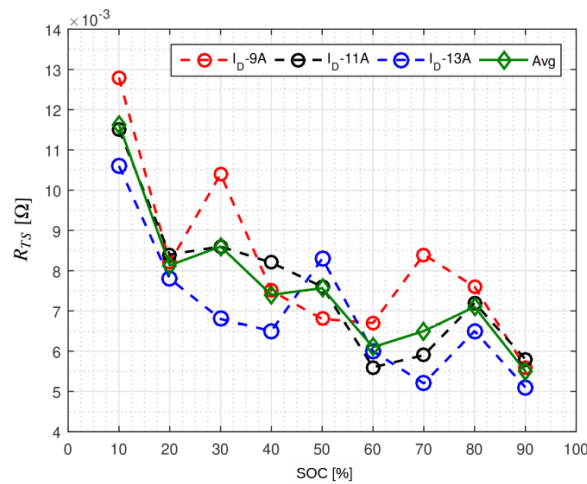
$$V_{OC} [SOC(t)] = a_1 e^{-a_2 SOC^9} + a_3 SOC^7 - a_4 SOC^5 + a_5 SOC + a_6. \quad (4.12)$$

Los coeficientes de la Ec. (4.12) se obtienen mediante un ajuste de curvas con ayuda del software *Matlab* usando la herramienta *lsqcurvefit* y el algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. En la Tabla (4.4) se presentan los valores de cada uno de estos coeficientes:

	Coefficientes
a_1	67.425
a_2	0.3952
a_3	35.4188
a_4	13.5634
a_5	1.4404
a_6	-54.518

Tabla 4.4: Coeficientes para el $V_{OC}[SOC(t)]$

Con los coeficientes de la Ec. (4.12), las mediciones V_0 , V_1 y V_2 que se muestran en la Fig.(4.21) y el conjunto de ecuaciones descritas en Kim and Qiao (2011) se puede determinar el valor de las resistencias R_i , R_{TS} y R_{TL} del modelo con base en circuito eléctrico equivalente en función del SOC . En las Figs.(4.25)-(4.27) se presentan los valores de estas resistencias para cada una de las pruebas realizadas a temperatura ambiente:

Figura 4.25: Valores de R_i para el modelo de la batería LiFePO4.Figura 4.26: Valores de R_{TS} para el modelo de la batería LiFePO4.

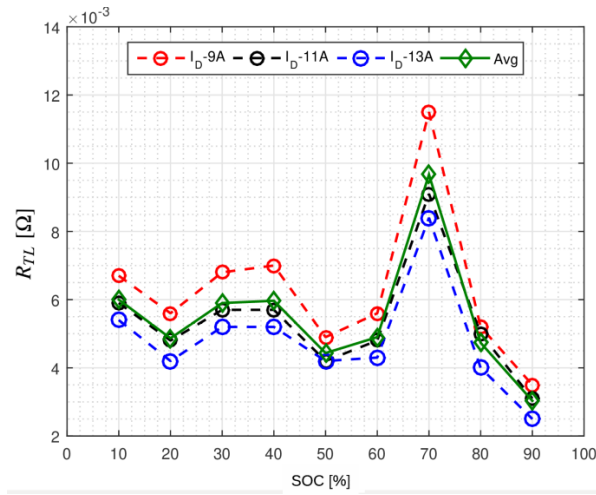


Figura 4.27: Valores de R_{TL} para el modelo de la batería LiFePO4.

Tomando en cuenta las señales para cada una de las resistencias mostradas en las figuras anteriores y realizando un ajuste de curvas, como se propone en Gandolfo et al. (2015), se puede obtener una función en términos del SOC para determinar sus valores:

$$R_i = \sum_{j=0}^{j=8} b_{(j)} [SOC(t)]^j, \quad (4.13)$$

$$R_{TS} = \sum_{j=0}^{j=8} c_{(j)} [SOC(t)]^j, \quad (4.14)$$

$$R_{TL} = \sum_{j=0}^{j=8} d_{(j)} [SOC(t)]^j. \quad (4.15)$$

Cada uno de los coeficientes b_j , c_j y d_j de las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15) se obtienen mediante el software MATLAB con la herramienta *lsqcurvefit* y el algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, los resultados se muestran en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7:

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
b_0	0.3902	0.9861	0.8732	0.0915
b_1	0.3604	0.2072	0.0545	0.4053
b_2	0.1403	0.7571	0.5004	0.1048
b_3	0.2601	0.8863	0.4328	0.1123
b_4	0.0868	0.4722	0.9043	0.7844
b_5	0.4294	0.1589	0.6302	0.2916
b_6	0.2573	0.8109	0.9830	0.6035
b_7	0.2976	0.4765	0.5852	0.9644
b_8	0.4249	0.1163	0.8406	0.4325

Tabla 4.5: Coeficientes de la función para R_i en el modelo de CEE.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
c_0	0.1170	0.2397	0.4886	0.1080
c_1	0.9898	0.7575	0.4071	0.5170
c_2	0.0705	0.7919	0.1266	0.1432
c_3	0.0600	0.3859	0.9254	0.5594
c_4	0.6616	0.3181	0.0056	0.0046
c_5	0.3441	0.4809	0.1864	0.7667
c_6	0.1285	0.2785	0.3241	0.8487
c_7	0.6371	0.1580	0.0502	0.9168
c_8	0.7465	0.3954	0.1445	0.9870

Tabla 4.6: Coeficientes de la función para R_{TS} en el modelo de CEE.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
d_0	0.0514	0.5857	0.2349	0.4138
d_1	0.3043	0.1742	0.3989	0.5027
d_2	0.5802	0.7286	0.2681	0.1254
d_3	0.5310	0.5343	0.8325	0.1323
d_4	0.9012	0.2531	0.9954	0.8705
d_5	0.5406	0.9171	0.6498	0.6030
d_6	0.4320	0.7582	0.7040	0.2653
d_7	0.5427	0.8870	0.9323	0.8648
d_8	0.7124	0.0688	0.6877	0.0581

Tabla 4.7: Coeficientes de la función para R_{TL} en el modelo de CEE.

Por último, el valor de los capacitores C_{TS} y C_{TL} del modelo con base en CEE en función del SOC , se determina de manera parecida al procedimiento de la identificación de los elementos resistivos del modelo, de igual manera se utiliza parte de la Fig.(4.21) (específicamente de los puntos V_1 al V_2) así como el procedimiento descrito en Kim and Qiao (2011). En las Figs.(4.28)-(4.29) se muestran los valores los capacitores, los cuales se obtuvieron a partir de datos experimentales:

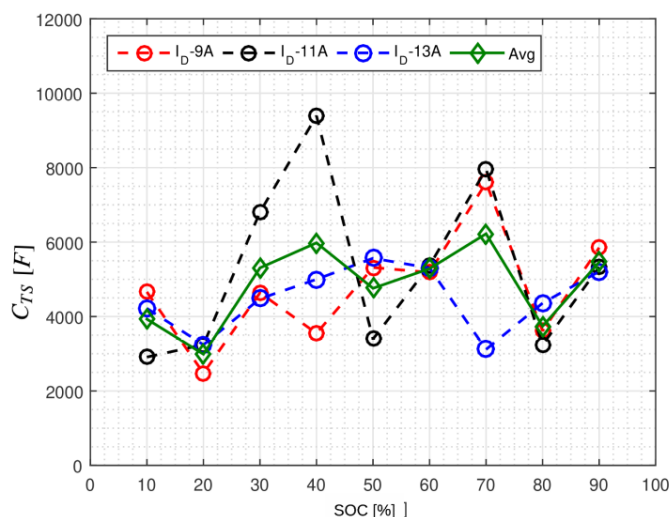


Figura 4.28: Valores de C_{TS} para el modelo de la batería LiFePO4.

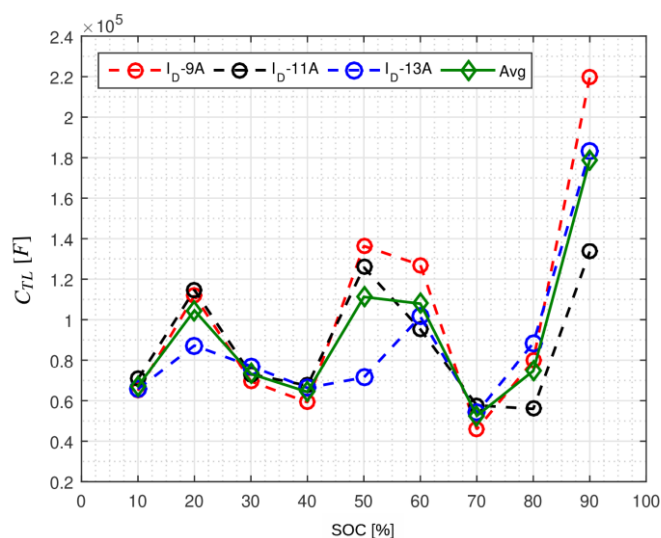


Figura 4.29: Valores de C_{TL} para el modelo de la batería LiFePO4.

Con base en los resultados mostrados en las gráficas anteriores y utilizando las ecuaciones descritas en Gandolfo et al. (2015) se obtiene un polinomio en función del SOC que modela el comportamiento de los elementos capa del CEE , se tiene:

$$C_{TS} = \sum_{j=0}^{j=8} e_{(j)} [SOC(t)]^j, \quad (4.16)$$

$$C_{TL} = \sum_{j=0}^{j=8} f_{(j)} [SOC(t)]^j, \quad (4.17)$$

Al igual que los coeficientes de las ecuaciones para los elementos R_i , R_{TS} y R_{TL} los coeficientes para C_{TS} y C_{TL} se determinan mediante las herramientas *lsqcurvefit* y el algoritmo de *Levenberg – Marquardt* del software Matlab. En las Tablas 4.8, 4.9 y 4.10, se presentan los valores obtenidos para cada uno de estos coeficientes:

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
e_0	0.4425	0.5723	0.2406	0.0350
e_1	0.4542	0.7920	0.2278	0.4055
e_2	0.9453	0.4197	0.3571	0.2497
e_3	0.2191	0.5325	0.9241	0.4809
e_4	0.8824	0.9257	0.5025	0.8808
e_5	0.0199	0.8991	0.8032	0.2807
e_6	0.3418	0.5448	0.3503	0.5991
e_7	0.7660	0.9011	0.4587	0.0262
e_8	0.3428	0.0518	0.9511	0.1552

Tabla 4.8: Coeficientes de la función para C_{TS} en el modelo de CEE.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
f_0	0.0573	0.4394	0.4945	0.3131
f_1	0.3010	0.3069	0.9482	0.6074
f_2	0.5217	0.2750	0.7978	0.3787
f_3	0.5619	0.1387	0.1330	0.9255
f_4	0.2416	0.1665	0.2378	0.0570
f_5	0.9127	0.4939	0.1277	0.9940
f_6	0.8257	0.0866	0.5341	0.6670
f_7	0.4445	0.9268	0.0567	0.6171
f_8	0.9821	0.1485	0.4686	0.1479

Tabla 4.9: Coeficientes de la función para C_{TL} en el modelo de CEE.

Corriente aplicada	Parámetro.				
	R_i	R_{Ts}	R_{Tl}	C_{Ts}	C_{Tl}
9 [A]	0.0294	0.0082	0.0063	4613.7756	101613.5922
11 [A]	0.0310	0.0076	0.0054	3916.2844	88262.9411
13 [A]	0.0245	0.0070	0.0048	4189.3122	88305.6500
Avg	0.0283	0.0076	0.0055	4239.7907	92727.3944

Tabla 4.10: Parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente de la batería.

Para validar el modelo de circuito eléctrico equivalente de la batería, que es uno de los objetivos de esta tesis, se realizaron simulaciones numéricas en *MATLAB/Simulink* usando los parámetros obtenidos de las pruebas experimentales. Posteriormente, los resultados de las simulaciones numéricas se compararon con los datos experimentales obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio mencionadas al inicio de la sección, ver Figs.(4.30)-(4.33).

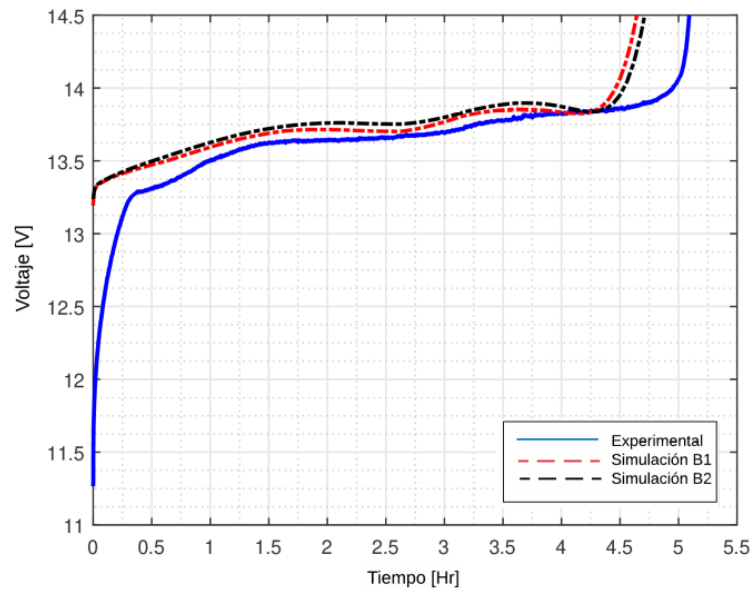


Figura 4.30: Validación del modelo con carga constante.

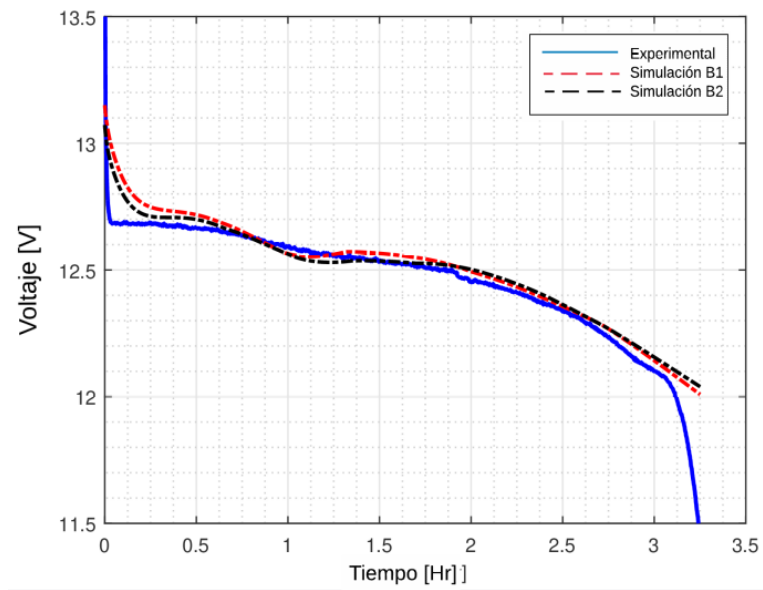


Figura 4.31: Validación del modelo con descarga constante.

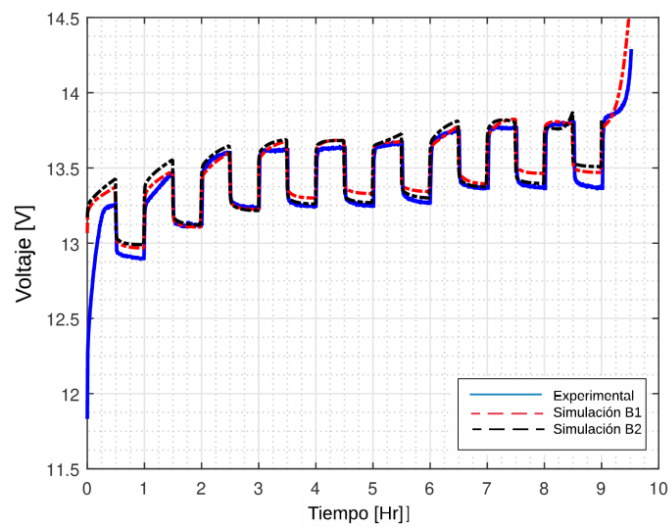


Figura 4.32: Validación del modelo con carga pulsante.

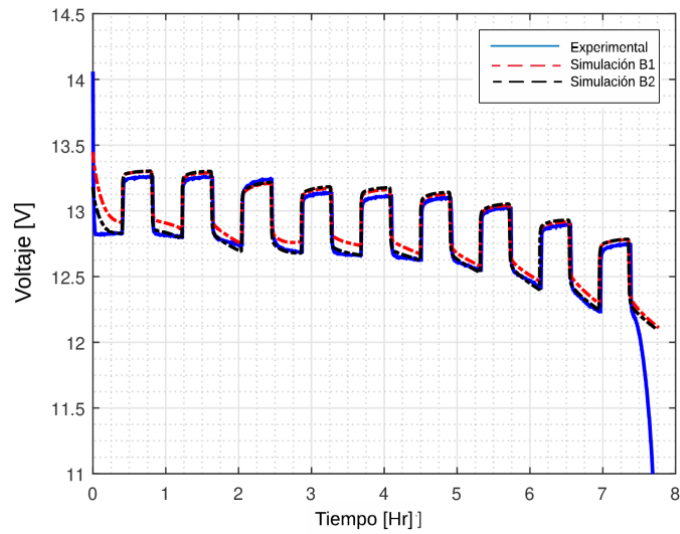


Figura 4.33: Validación del modelo con descarga pulsante.

En la Tabla 4.11 se muestra el índice de desempeño de las simulaciones numéricas sobre las pruebas experimentales.

Perfil de carga/descarga	Índice de desempeño	
	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error Relativo</i>
Carga con corriente constante a 9 [A]	0.5958	2.0789
Descarga con corriente constante a 13 [A]	0.6961	1.8844
Carga con corriente pulsante a 9 [A]	0.4973	1.4472
Descarga con corriente pulsante a 11 [A]	0.6903	2.0521

Tabla 4.11: Índices de desempeño de la validación del modelo de *CEE* la batería.

Capítulo 5

Diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores y baterías.

En este capítulo se presenta el esquema de diagnóstico que se aplicó al banco de supercapacitores y al banco de baterías.

5.1. Diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores.

Se realizó de un esquema de diagnóstico basado en datos y un esquema de diagnóstico basado en modelo para el caso del banco de supercapacitores. En las siguientes secciones se detalla el procedimiento que se llevó a cabo para el diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores.

Los motivos por los que un supercapacitor puede fallar son los siguientes: por la constante exposición de sobre temperatura y sobre voltaje. Cuando los valores nominales de un supercapacitor cambian, éste se considera que ha fallado.

De acuerdo con Torregrossa et al. (2015), las fallas más comunes que suelen presentarse en un supercapacitor son las siguientes:

- Aumento en la resistencia interna.
- Disminución en la capacitancia.
- Decaimiento del voltaje en la fase de relajación en la etapa de autodescarga.

Se considera una falla en la resistencia interna cuando el valor actual de la misma se encuentra aumentando en un intervalo del 90 % hasta el 400 % de su valor nominal, por ende la capacitancia aumenta en un 15 % al 20 %, teniendo en cuenta lo anterior, si estos valores se exceden de ese intervalo, se puede asumir una falla, los valores máximos en los que el supercapacitor ya presenta una avería son en el aumento de hasta el 1100 % en la resistencia interna y un decremento del 30 % (en adelante) en la capacitancia, en la Tabla 5.1 se muestran los valores que puede tomar un supercapacitor fallado.

Parámetro	Valor (nom)	Valor (mín)	Valor (máx)	Valor (avería)
R_0 [Ω]	0.0450	0.0855	0.0225	0.54
C_0 [F]	220.9338	176.7470	176.7470	176.7470
R_2 [Ω]	11.0526	20.9999	55.263	132.6312
C_2 [F]	83.6048	66.8838	66.8838	66.8838
EPR [$K\Omega$]	3.3	6.3	7.1	9.3

Tabla 5.1: Parámetros considerando los intervalos de fallas.

El subíndice: "*mín*" indica el valor del 90 % del valor nominal, el subíndice: "*máx*" el 400 % del valor nominal, dentro de ese umbral de valores todavía se puede considerar una falla, cuando la resistencia interna toma valores por encima de 400 % y hasta 1100 % se puede decir con certeza que ocurrió una avería, en primera instancia porque el supercapacitor no alcanza el voltaje nominal de operación y analizándolo microscópicamente, el separador electrolítico se fusiona con las partículas de carbón activado que, como se mencionó anteriormente, funcionan como electrodos polarizables. Los escenarios de fallas propuestos se abordan más adelante.

Según lo reportado en la literatura, en un banco de baterías o supercapacitores existen dispositivos que tienden a fallar primero que los otros, usualmente son los supercapacitores que están marcados con un recuadro rojo (Fig. 5.1), el motivo por el que los 6 supercapacitores de enfrente estén marcados, se debe a que son los que en primera instancia reciben la diferencia de potencial y por ende, están expuestos también a altas temperaturas causadas por el flujo de electrones en el material electroquímico de los mismos, el desempeño de los supercapacitores que se encuentran marcados en rojo en las ramas consecutivas también decrementa más rápido que los otros que se encuentran en el centro (Zhao et al., 2017), por esta razón y para cuestiones de análisis de este trabajo sólo se consideran fallas en esos supercapacitores en específico. Aunque extrapolando los resultados satisfactorios que se obtuvieron diseñando un banco de estimadores de estados para un solo supercapacitor se puede decir que se puede localizar la falla en cualquier supercapacitor del banco.

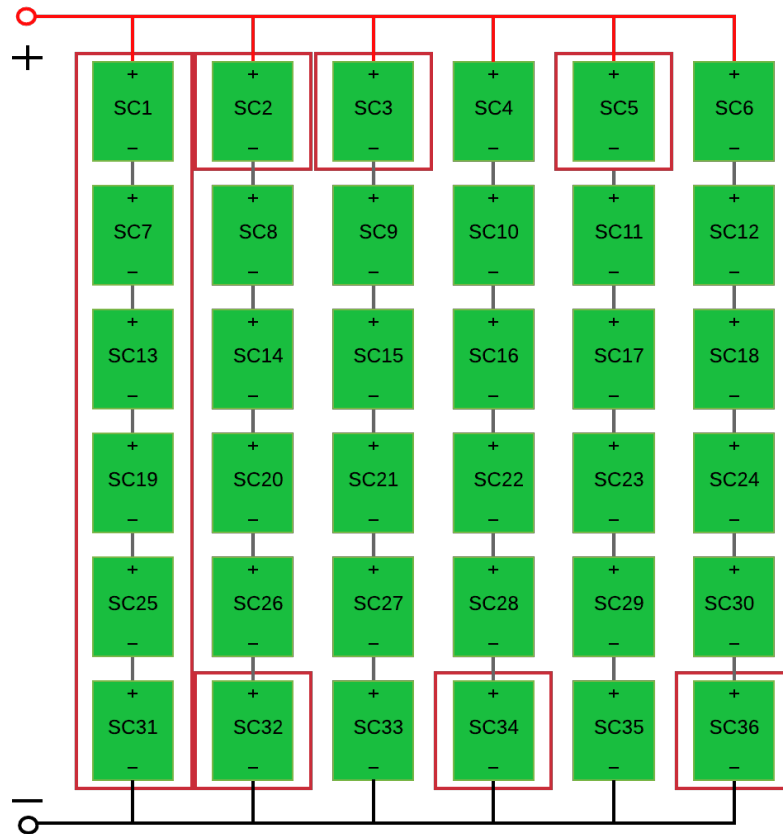


Figura 5.1: Banco de 36 supercapacitores simulados en *Simscape*.

5.1.1. Diagnóstico de fallas basado en datos.

El diagnóstico de fallas mediante técnicas basadas en datos es útil cuando se presentan dificultades en el modelo, o cuando no se puede obtener un modelo analítico porque los sistemas son no lineales, por lo que se ha optado tratar con técnicas que involucran estadística de variables aleatorias.

El esquema de diagnóstico basado en datos se aplicó a un sólo caso: se emuló una falla en una prueba de carga constante y autodescarga, la falla emulada es un cambio abrupto en la resistencia interna, físicamente se puede asociar a una exposición de sobrevoltaje. En la Fig. 5.2 se muestra el modelo con falla en comparación con el modelo nominal

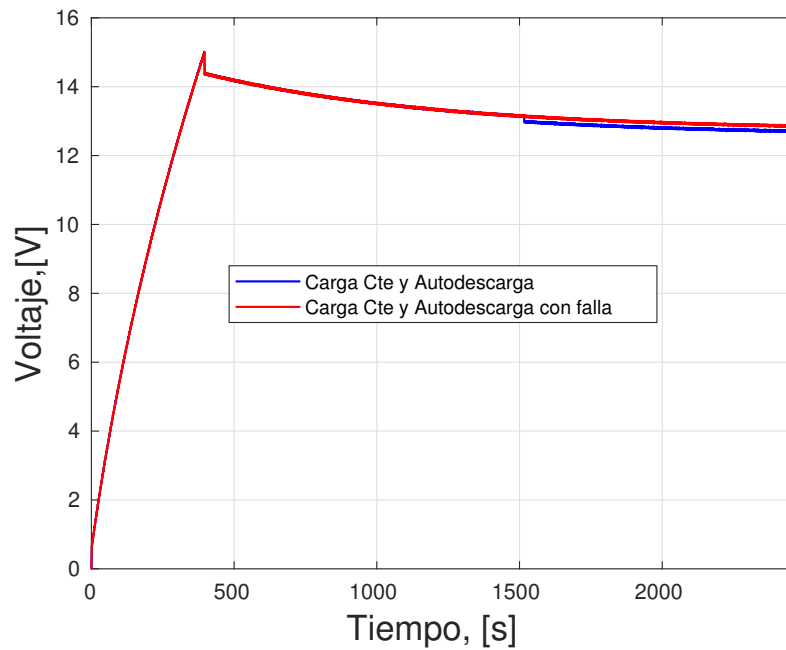


Figura 5.2: Comportamiento del modelo nominal vs. modelo con falla

Para el análisis de la señal de voltaje del banco de supercapacitores que nos, la cuál nos permitirá determinar la falla, se hace una separación de la señal antes y después de la falla para obtener la media y el valor esperado, la Fig. 5.3 muestra el valor esperado de las dos señales.

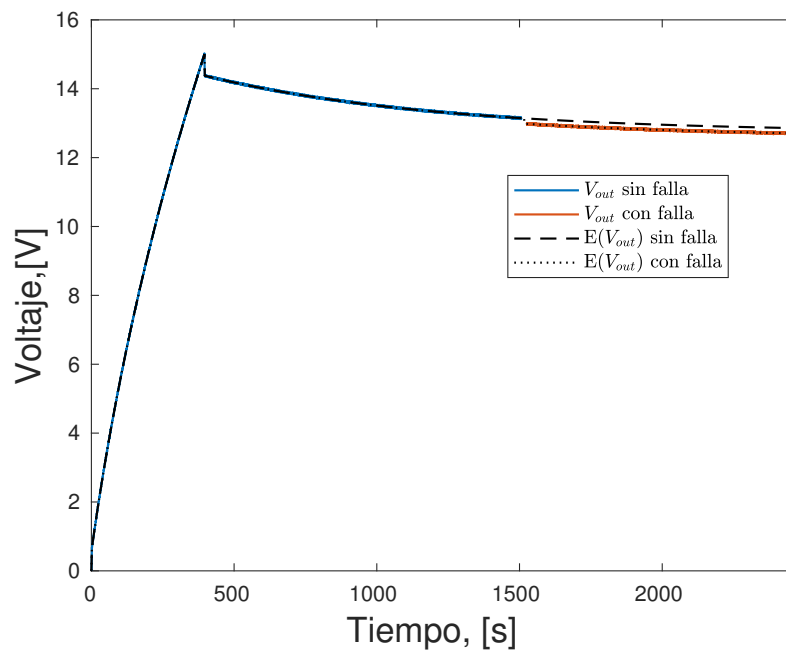


Figura 5.3: Media de la señal con falla vs. la señal sin falla

Con la media obtenida y calculando la desviación estándar de las señales se procede a

calcular la función de densidad de probabilidad de la señal sin falla para ver la distribución Gaussiana de la misma.

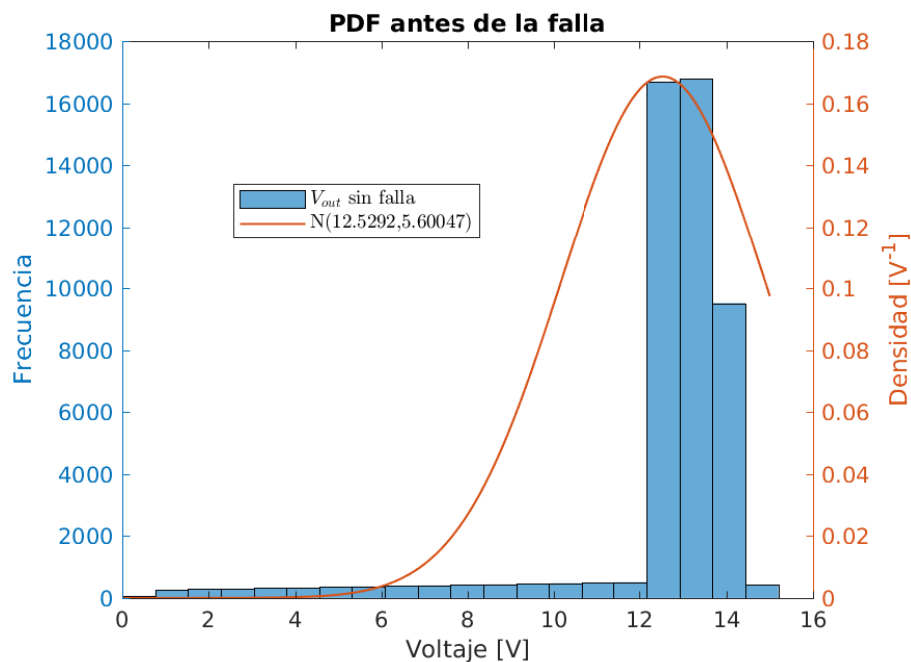


Figura 5.4: Función de densidad de probabilidad en la señal sin falla.

Ahora se se repite el paso anterior pero ahora con la señal con falla, en teoría ese sería el intervalo donde la probabilidad de ausencia de fallas es alta.

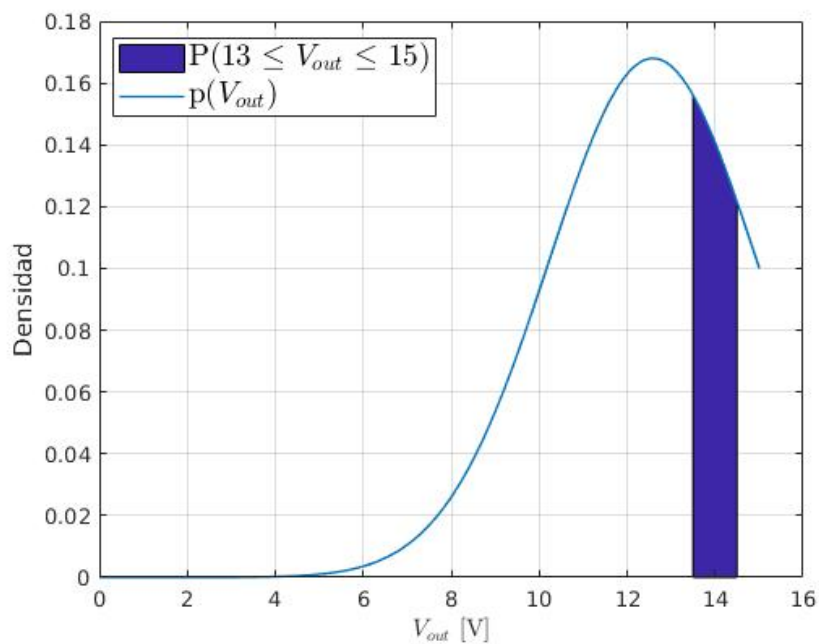


Figura 5.5: Función de densidad de probabilidad en la señal con falla.

Se procede a graficar las mediciones de las señales con falla y las señales sin falla encontrando un límite de seguridad de las mediciones sin falla.

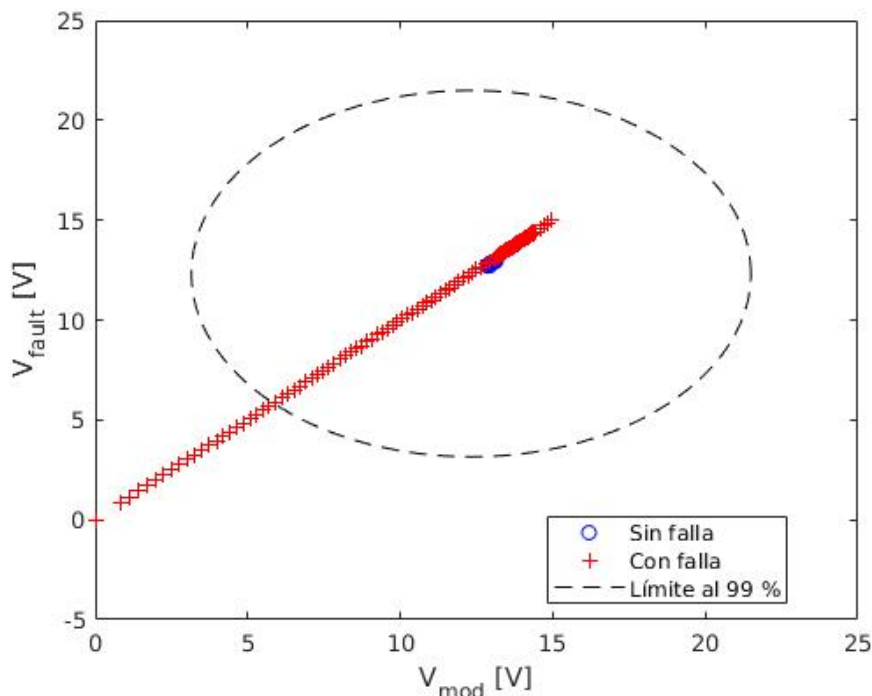


Figura 5.6: Región de seguridad para detectar fallas.

Esta técnica sólo proporciona información sobre la existencia de una falla en todo el banco pero no proporciona información sobre la ubicación de la misma, y debido a que sin importar en qué supercapacitor se emule la falla, el comportamiento de la señal sigue siendo el mismo, se propone abordar un enfoque de diagnóstico basado en modelo ya que sólo se puede detectar una falla mas no diagnosticar.

5.1.2. Diagnóstico de fallas basado en modelo.

Para la tarea del diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores se propone realizar un estimador de estados (*filtro de Kalman*) para cada supercapacitor debido a que las técnicas abordadas anteriormente no resultaron útiles para la generación de residuos. La firma de fallas que se generaba resultaba idéntica para cualquier tipo de falla que se inducía a cualquier supercapacitor del banco, por lo tanto, se dificultaba el aislamiento de la falla. En la Fig.5.7 se muestra el esquema de diagnóstico de fallas para cada supercapacitor, se tiene un banco de dos (*filtros de Kalman*) con el objetivo de tener redundancia analítica y estimar los dos estados del modelo para así generar una firma de fallas diferente para cada supercapacitor con ayuda de los residuos generados por cada uno, posteriormente se realiza la evaluación de residuos por cada rama para simplificar la tarea de aislamiento de fallas en el banco de supercapacitores.

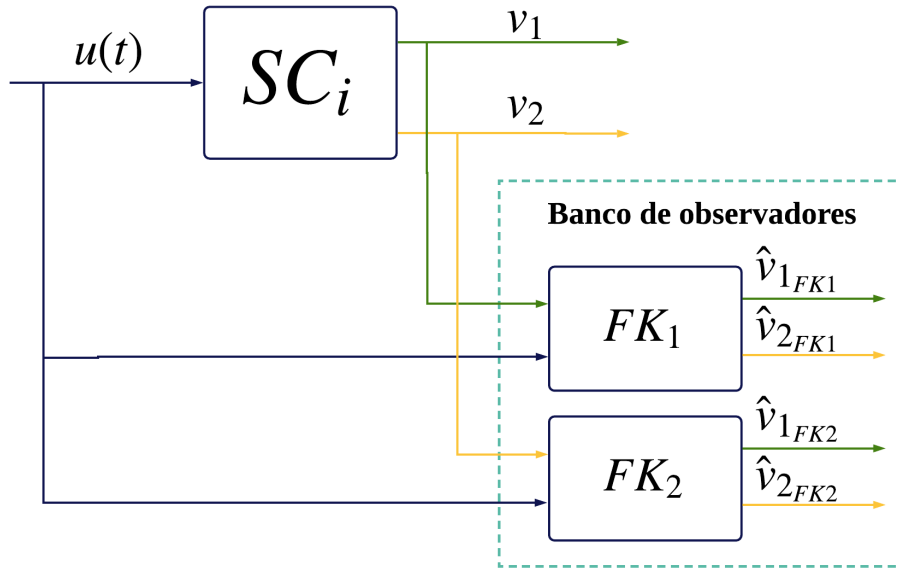


Figura 5.7: Esquema de diagnóstico de fallas del SC.

El modelo analítico no lineal del supercapacitor mostrado en la Ec. (2.1) se puede describir como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) , \\ y(t) &= h(x(t)) , \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde $x(t)$ es el vector de estados, compuesto por v_1 y v_2 , $u(t)$ es el vector de entradas, $i(t)$, y $y(t)$ es el vector de salidas $y = [v_1, v_2]^T$.

Tomando en cuenta la Ec. 5.1 y considerando ruido en la medición y en el proceso, las Ecuaciones del sistema están dadas como

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w, t) , \\ y &= h(x, v, t) , \\ w &\sim (0, Q) , \\ v &\sim (0, R) . \end{aligned} \quad (5.2)$$

El diseño del filtro de Kalman se basa en la evaluación de la trayectoria actual, la cual debe ser cercana a la trayectoria nominal del sistema, esto se logra linealizando las siguientes matrices evaluadas en la trayectoria nominal

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 , \\ L &= \left. \frac{\partial f}{\partial w} \right|_0 , \\ C &= \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_0 , \\ M &= \left. \frac{\partial h}{\partial v} \right|_0 . \end{aligned} \quad (5.3)$$

Calculando las matrices de ruido tenemos,

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= LQL^T , \\ \tilde{R} &= MRM^T , \end{aligned} \quad (5.4)$$

las ecuaciones del filtro de Kalman se pueden escribir como sigue

$$\begin{aligned}
\Delta\dot{x}(0) &= 0, \\
P(0) &= E[(\Delta x(0) - \Delta\dot{x}(0))(\Delta x(0) - \Delta\dot{x}(0))^T], \\
\Delta\dot{\hat{x}} &= A\Delta\hat{x} + K(\Delta y - C\Delta\hat{x}), \\
K &= PC^T\tilde{R}^{-1}, \\
\dot{P} &= AP + PA^T + \tilde{Q} - PC^T\tilde{R}^{-1}CP,
\end{aligned} \tag{5.5}$$

estimando los estados como sigue:

$$\dot{x} = x_0 + \Delta\hat{x}. \tag{5.6}$$

Diseñando el primer filtro de Kalman para estimar ambos estados a partir de la salida v_1 , tenemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{v}}_{1FK1} \\ \dot{\hat{v}}_{2FK1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}\hat{v}_{1FK1} + a_{12}\hat{v}_{2FK1}}{1+a\hat{v}_{1FK1}} + \frac{a_{12}\hat{v}_{2FK1}}{1+a\hat{v}_{1FK1}} \\ a_{21}\hat{v}_{1FK1} + a_{22}\hat{v}_{2FK1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_1 u}{1+a\hat{v}_{1FK1}} \\ b_2 u \end{bmatrix} + K [v_1 - \hat{v}_{1FK1}], \tag{5.7}$$

donde los parámetros a_{11} , a_1 , a_{21} , a_{22} , b_1 y b_2 están dados en la Ec. 2.2 a la Ec. 2.9.

Por lo tanto las matrices A y C para el **primer filtro de Kalman** están definidas como

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_0 R_1} \frac{(R_1(G_1+G_2+G_L)-1)}{C_0 R_1} \hat{v}_{1FK1} & \frac{1}{C_0 R_1 R_2 (G_1+G_2+G_L)} \hat{v}_{2FK1} \\ \frac{1}{C_2 R_1 R_2 (G_1+G_2+G_L)} \hat{v}_{1FK1} & \frac{1}{C_2 R_2} \frac{(R_2(G_1+G_2+G_L)-1)}{C_2 R_2} \hat{v}_{2FK1} \end{bmatrix}, \tag{5.8}$$

$$C = [1 \ 0]. \tag{5.9}$$

Las matrices A y C para el **segundo filtro de Kalman** están definidas como

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_0 R_1} \frac{(R_1(G_1+G_2+G_L)-1)}{C_0 R_1} \hat{v}_{1FK2} & \frac{1}{C_0 R_1 R_2 (G_1+G_2+G_L)} \hat{v}_{2FK2} \\ \frac{1}{C_2 R_1 R_2 (G_1+G_2+G_L)} \hat{v}_{1FK2} & \frac{1}{C_2 R_2} \frac{(R_2(G_1+G_2+G_L)-1)}{C_2 R_2} \hat{v}_{2FK2} \end{bmatrix}, \tag{5.10}$$

$$C = [0 \ 1]. \tag{5.11}$$

El banco de observadores, se muestra en la Fig.(5.8), donde se estiman los dos estados del modelo dinámico, el primer estado representa el voltaje que circula en la primera rama y el segundo estado representa el voltaje que circula en la segunda rama del modelo de circuito eléctrico equivalente tal y como lo proponen en el artículo de (El Fadil et al., 2017).

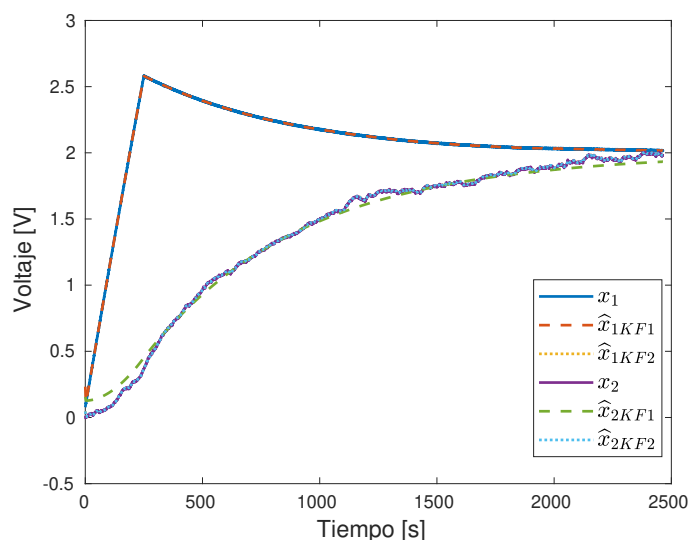


Figura 5.8: Modelo vs. estimación del banco de observadores

En la Fig.(5.9) se muestra un acercamiento del segundo estado del modelo del supercapacitor para observar el comportamiento de los dos estimadores, la línea morada representa el segundo estado del modelo del supercapacitor, la línea verde discontinua representa el primer observador del segundo estado del modelo del supercapacitor y la línea azul punteada representa la estimación del segundo observador.

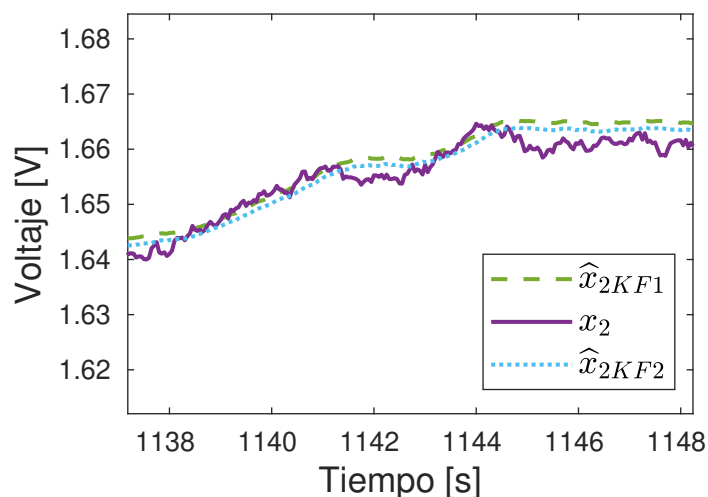


Figura 5.9: Banco de observadores

Teniendo en cuenta el resultado de las estimaciones del modelo que proporciona el banco de observadores, se procede a la tarea de diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores, se asume que ocurre una falla a la vez a lo largo de todo el banco (es decir, sólo falla un supercapacitor a la vez), no se consideran fallas múltiples, por lo tanto, se presentan tres casos de fallas y la evaluación de los residuos para cada uno.

Caso 1.

Este experimento se realizó en dos partes para observar el comportamiento de los estados cuando aumenta la resistencia y cuando disminuye la capacitancia. La falla se emuló en el *Supercapacitor 1*, (SC_1), el SC fallado se encontraba funcionando con parámetros distintos de los que funciona nominalmente. La primera falla inducida consistió en un incremento del 90 % con respecto al valor nominal de la resistencia R_0 y una disminución en el elemento capacitivo, C_0 , del 5 % con respecto al valor nominal de la capacitancia. La segunda falla fue inducida en el mismo supercapacitor y se mantuvo el valor incrementado en la resistencia y la capacitancia fue disminuida un 15 %, se obtuvo el siguiente resultado mostrado en la Fig.(5.10)

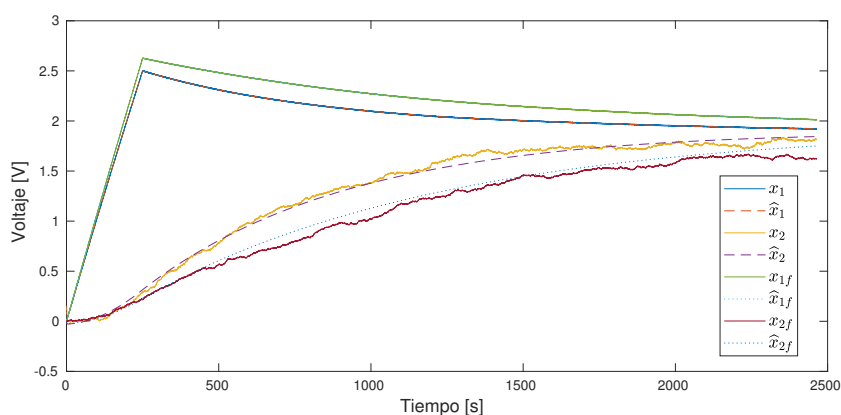


Figura 5.10: Respuesta del estimador de estados del SC_1 ante una falla.

Se puede observar que cuando los parámetros cambian, el voltaje del supercapacitor se ve afectado presentando un incremento con respecto al valor que presenta en el punto de operación nominal. En la falla inducida en la primera parte de este experimento, se puede observar que el voltaje del supercapacitor incrementa debido al aumento en la resistencia R_0 y a la disminución de la capacitancia del capacitor C_0 , en la falla inducida en la segunda parte del experimento se presentó una disminución en el voltaje de la segunda rama con respecto al voltaje con el que el supercapacitor opera en condiciones sin falla. A partir de estas mediciones se obtienen los residuos. La generación de residuos se realiza como se muestra en el esquema de la Fig.(5.11):

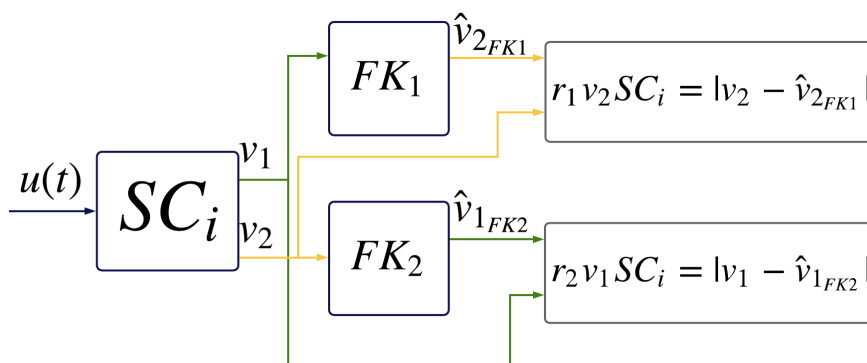
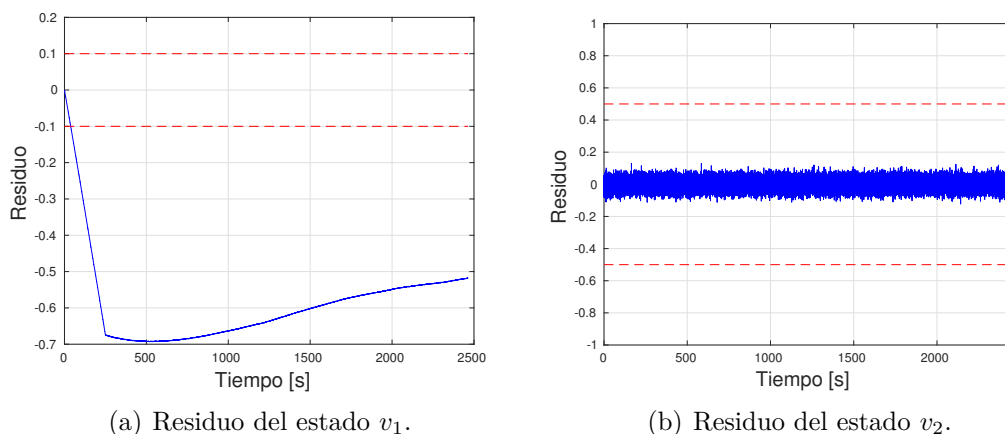


Figura 5.11: Esquema de generación de residuos para un supercapacitor.

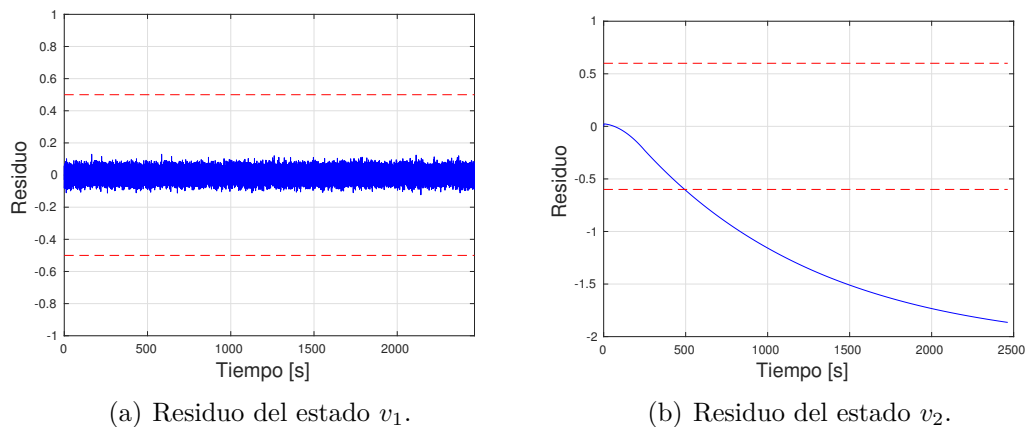
Los residuos obtenidos para cada estado estimado se muestran en las Figs.(5.12)-(5.13), los cuales representan el voltaje en la primera rama (v_1) y en la segunda rama (v_2) del modelo del supercapacitor:



(a) Residuo del estado v_1 .

(b) Residuo del estado v_2 .

Figura 5.12: Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 5 % en C_0 .



(a) Residuo del estado v_1 .

(b) Residuo del estado v_2 .

Figura 5.13: Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 15 % en C_0 .

Para la evaluación de los residuos generados anteriormente se diseñaron conjuntos de residuos correspondientes a cada falla específica (f_k) para cada supercapacitor, y se consideró la siguiente declaración lógica.

$$\nexists f_k \rightarrow \{r_1 v_2 SC_i = 0, \forall_{1v_2 SC_i} \in \mathcal{I}_k\} \Rightarrow \{r_1 v_2 SC_i \neq 0, \forall_{1v_2 SC_i} \in \mathcal{I}_k\} \rightarrow \exists f_k, \quad (5.12)$$

donde k representa el estado en el cual se ha inducido la falla y \mathcal{I}_k representa el conjunto de estados donde puede ocurrir una falla. Dentro del conjunto de los residuos generados por cada supercapacitor se consideraron los siguientes casos de fallas en los siguientes parámetros: aumento en R_0 , aumento en R_2 , aumento en EPR , disminución en C_0 , disminución en C_2 . Con el objetivo de observar el comportamiento del voltaje del supercapacitor cuando solamente cambia un parámetro a la vez, se llegó a la conclusión que la variación en los parámetros deben depender de los otros para que pueda considerarse una falla, por ello, los cambios que se consideran son los que se muestran en la Tabla 5.2 y aquellos valores que estén por encima de esos parámetros.

	f_{v_1}	f_{v_2}
$r_1 v_2 SC_i$		•
$r_2 v_1 SC_i$	•	

Tabla 5.2: Firma de fallas para un supercapacitor.

Usando el esquema DOS para el diagnóstico de fallas (propuesto en la Fig.(5.7)), en cada supercapacitor se asegura el aislamiento de la falla en cualquier dispositivo del banco, esto se logra reproduciendo el mismo esquema en cada uno de los supercapacitores del banco, y para facilitar la tarea de aislamiento, se realiza la evaluación de residuos por cada rama del banco, ver Fig.(5.18).

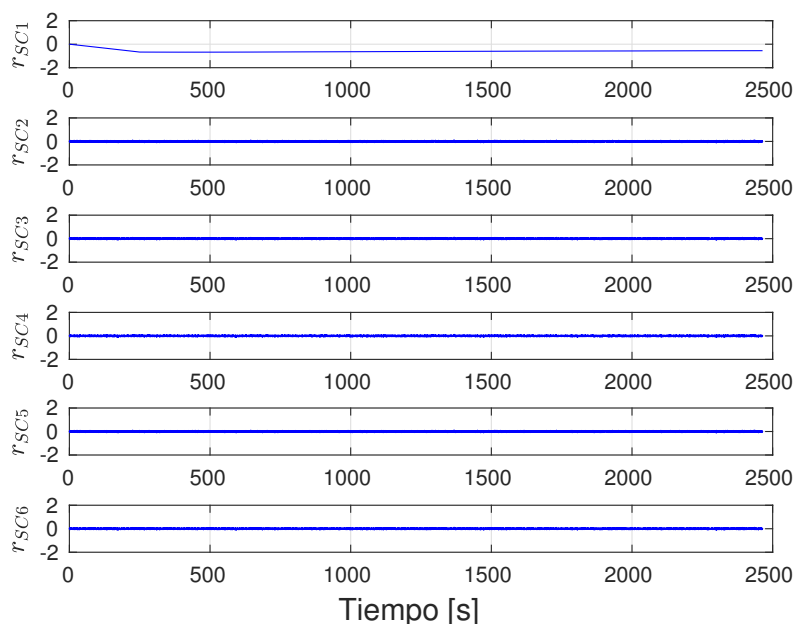


Figura 5.14: Evaluación de los residuos generados en la primera rama.

Debido a que se tiene un estimador para cada supercapacitor, la firma de fallas por rama será parecida a la firma de fallas de la primera rama (Tabla 5.3), es decir, solamente un residuo será diferente de cero en cada rama, visualmente, el residuo diferente de cero es el que indicará el SC que presenta un comportamiento anormal.

	f_{SC_1}	f_{SC_2}	f_{SC_3}	f_{SC_4}	f_{SC_5}	f_{SC_6}
r_{SC_1}	•					
r_{SC_2}		•				
r_{SC_3}			•			
r_{SC_4}				•		
r_{SC_5}					•	
r_{SC_6}						•

Tabla 5.3: Firma de fallas de la primera rama del banco de supercapacitores.

Caso 2.

En este segundo experimento, al igual que en el experimento del **Caso 1**, se dividió en dos partes. En la primera parte se emuló una falla en el *Supercapacitor 4*, (SC_4), la cual consistió en un incremento del 400% en la resistencia R_0 y una disminución en la capacitancia C_0 en un 10%. En el segundo caso se incrementó la resistencia R_2 en un 400% y se disminuyó la capacitancia C_2 en un 20%, los resultados se muestran en la Fig.(5.15).

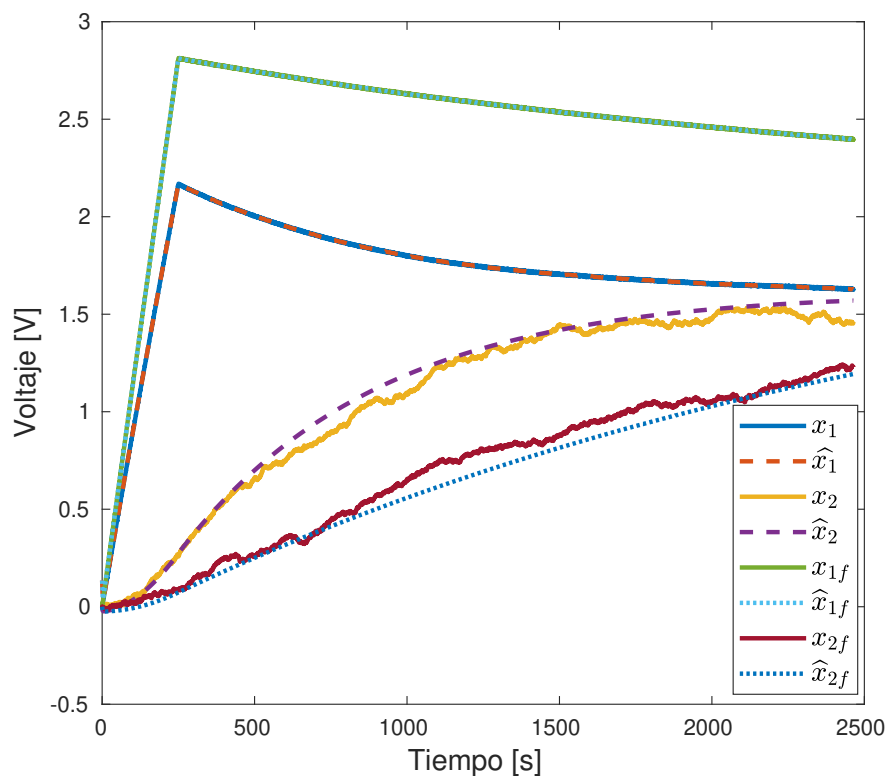


Figura 5.15: Respuesta del estimador de estados del SC_4 ante una falla.

Al igual que en el primer caso, se observa el mismo patrón de comportamiento. En la falla inducida en la primera parte de este experimento, se puede observar que el voltaje del supercapacitor incrementa debido al aumento en la resistencia R_0 y a la disminución de la capacitancia del capacitor C_0 , el voltaje que se alcanza al aumentar y disminuir, respectivamente, estos parámetros es el máximo voltaje permitido según la hoja de especificaciones técnicas del SC, esto quiere decir que el SC sigue funcionando pero no en condiciones ideales, ya que para este punto, su capacidad de almacenamiento de energía ha disminuido, que es lo que ocurre usualmente a causa del envejecimiento de SC. En la falla inducida en la segunda parte del experimento se presentó una disminución en el voltaje de la segunda rama con respecto al voltaje con el que el supercapacitor opera en condiciones sin falla. Los residuos generados se muestran en las Figs.(5.16)-(5.17).

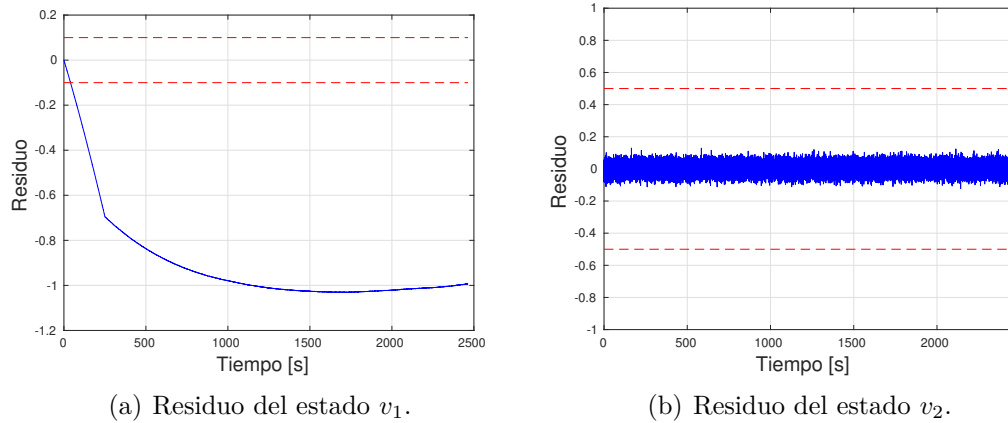


Figura 5.16: Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 5 % en C_0 .

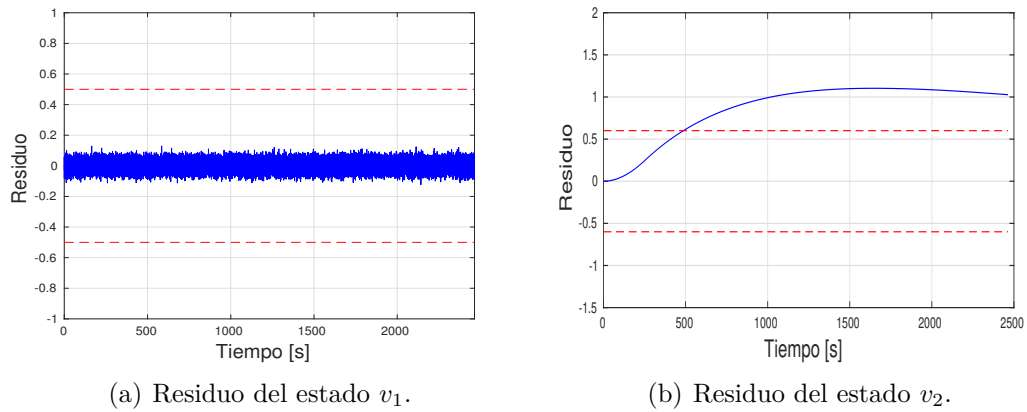


Figura 5.17: Residuos de la falla: aumento del 90 % en R_0 y disminución del 15 % en C_0 .

Como en este caso se emularon fallas parecidas al del caso uno, la firma de fallas es igual, la diferencia radica en el número de supercapacitor al que se le indujo la falla y en los valores de los parámetros fallados. Por lo tanto sólo se muestra la evaluación de residuos por rama y se puede observar en la Fig.(5.18):

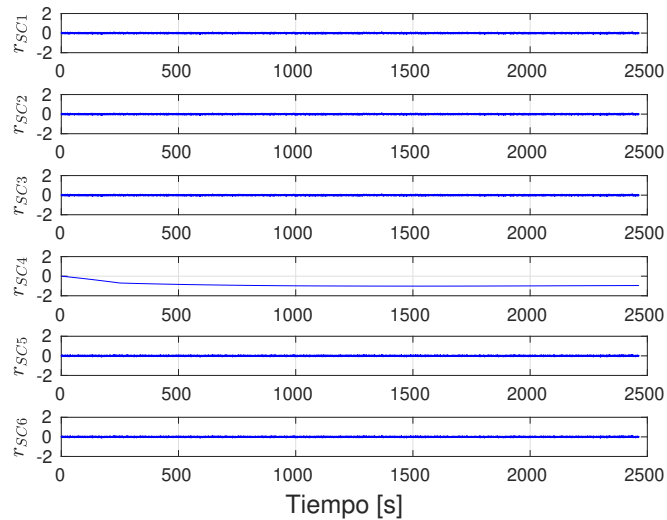


Figura 5.18: Evaluación de los residuos generados en la primera rama.

En la Tabla 5.4, al igual que en la Fig.(5.18), se indica de acuerdo a los residuos obtenidos que el SC_4 es el que presenta una falla.

	f_{SC_1}	f_{SC_2}	f_{SC_3}	f_{SC_4}	f_{SC_5}	f_{SC_6}
r_{SC_1}	•					
r_{SC_2}		•				
r_{SC_3}			•			
r_{SC_4}				•		
r_{SC_5}					•	
r_{SC_6}						•

Tabla 5.4: Firma de fallas de la primera rama del banco de supercapacitores.

Caso 3.

En este experimento se emuló una falla en el *Supercapacitor* 1, (SC_1), el SC fallado se encontraba funcionando con parámetros distintos de los que funciona nominalmente. La falla inducida consistió en un incremento del 1100% con respecto al valor nominal de la resistencia R_0 y una disminución del 30% con respecto al valor nominal de la capacitancia C_0 , y se obtiene la Fig.(5.19):

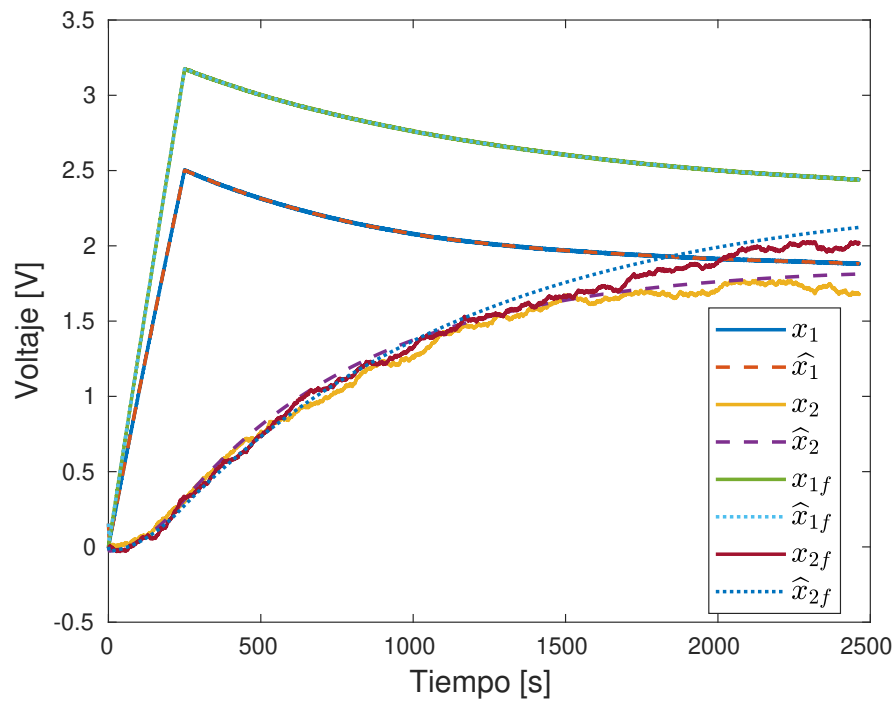
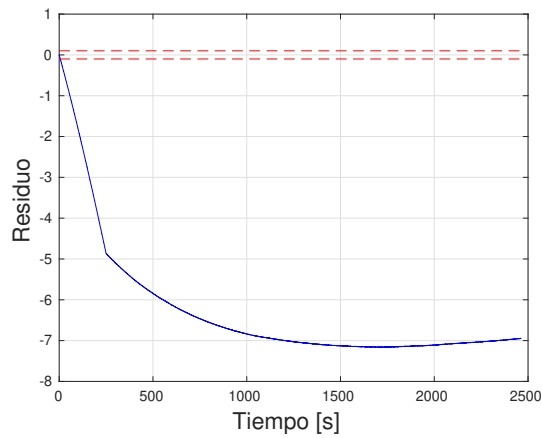
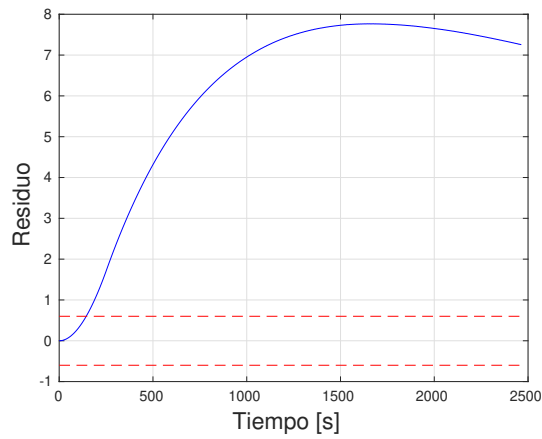


Figura 5.19: Respuesta del estimador de estados del SC_1 ante una falla.

En este caso ya no se trata de una falla sino una avería, es por eso que los residuos mostrados en la Fig. (5.20) son demasiado grandes, por encima del umbral establecido.

(a) Residuo del estado v_1 .(b) Residuo del estado v_2 .Figura 5.20: Residuos de los estados del SC_1 .

Cabe mencionar que las fallas en los supercapacitores son la consecuencia de ser expuestos a sobre voltaje y sobre temperatura. Cuando se presenta una falla como del SC_1 del *Caso 1* se puede determinar que la causa de la falla se debe a momentáneas exposiciones a sobre voltaje y cuando ocurre una avería, la causa de ésta se debe exposiciones prolongadas a sobre temperatura y sobre voltaje.

5.2. Diagnóstico de fallas en el banco de baterías.

En esta sección se presenta el esquema y el procedimiento que se realizó para diagnosticar fallas en una batería, al igual que con el banco de supercapacitores, se realizó el esquema DOS para el diagnóstico de fallas en una batería y posteriormente se aplicó el mismo esquema a cada batería del banco de baterías, ver Fig. (5.21).

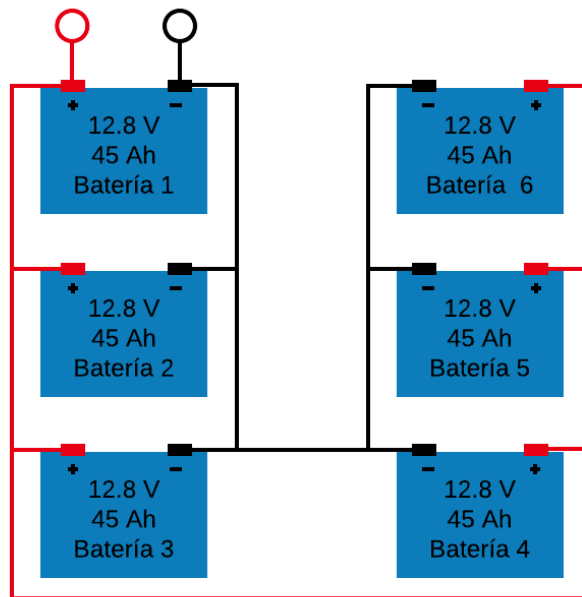


Figura 5.21: Banco de baterías.

A diferencia del estimador usado para el diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores, en el caso de las baterías se utilizó el *filtro de Kalman extendido*, ver Fig. (5.22).

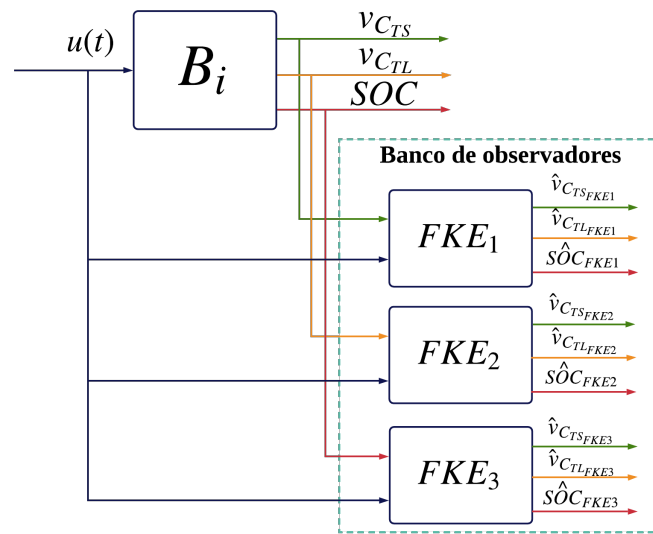


Figura 5.22: Esquema DOS para el diagnóstico de fallas en una batería.

El modelo que representa el comportamiento de la batería es de dinámica no lineal, las ecuaciones dinámicas del circuito eléctrico equivalente (Fig.5.23) que modela el voltaje final en las terminales de la batería, están dadas como

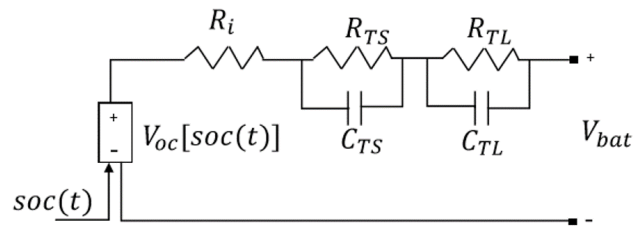


Figura 5.23: Modelo dinámico con base en un circuito eléctrico equivalente de una batería.

$$V_{Bat} = V_{OC} - V_{Ri} - V_{CTS} - V_{CTL} , \tag{5.13}$$

donde:

$$V_{OC} [SOC(t)] = a_0 e^{-a_1 SOC(t)} + a_2 + a_3 SOC(t) - \dots \quad (5.14)$$

$$\dots - a_4 SOC^2(t) + a_5 SOC^3(t) ,$$

$$V_{R_i} = R_i i(t) , \quad (5.15)$$

$$\frac{dV_{C_{TS}}}{dt} = \frac{1}{C_{TS}} i(t) - \frac{V_{C_{TS}}}{R_{TS} C_{TS}} , \quad (5.16)$$

$$\frac{dV_{C_{TL}}}{dt} = \frac{1}{C_{TL}} i(t) - \frac{V_{C_{TL}}}{R_{TL} C_{TL}} , \quad (5.17)$$

y el estado de carga (SOC) se calcula de la siguiente manera:

$$SOC = SOC_i - \frac{1}{C_T} \int_0^t i(t) dt . \quad (5.18)$$

Estas ecuaciones están en función del estado de carga.

Para el análisis del modelo, se eligen las caídas de voltaje y el estado de carga como variables de estado, por lo tanto la representación del modelo en espacio de estados se expresa como

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_{C_{TS}}}{dt} \\ \frac{dV_{C_{TL}}}{dt} \\ SOC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{TS} C_{TS}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{TL} C_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C_{TS}} \\ V_{C_{TL}} \\ SOC \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{TS}} \\ \frac{1}{C_{TL}} \\ -\eta \end{bmatrix} [i(t)] . \quad (5.19)$$

Debido a la no linealidad del sistema, se cumple con las características de la estructura de un modelo no lineal de la forma,

$$\begin{aligned} x(t+1) &= f(x(t), u(t)) + w(t) , \\ y(t) &= h(x(t)) + v(t) , \\ w &\sim (0, Q(t)) , \\ v &\sim (0, R(t)) , \end{aligned} \quad (5.20)$$

El diseño del filtro de Kalman extendido es similar al filtro de Kalman linealizado hasta cierto punto, como se explicó anteriormente, la única diferencia es que la estimación del EKF no se basa en la linealización alrededor de una región de operación nominal, sino que se basa en la linealización del sistema no lineal a partir del estado estimado anteriormente. Así que debido a la similitud del EKF con el filtro de Kalman linealizado, las matrices de linealización y de ruido se calculan de la misma forma, y se presentan

nuevamente en las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0, \\ L &= \left. \frac{\partial f}{\partial w} \right|_0, \\ C &= \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_0, \\ M &= \left. \frac{\partial h}{\partial v} \right|_0. \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= LQL^T, \\ \tilde{R} &= MRM^T, \end{aligned} \quad (5.22)$$

Las ecuaciones del EKF se presentan en la Ec. (5.23):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(0) &= E[x(0)], \\ P(0) &= E[(x(0) - \hat{x}(0))(x(0) - \hat{x}(0))^T], \\ \hat{\dot{x}} &= f(\hat{x}, u, w_0, t) + K[y - h(\hat{x}, v_0, t)], \\ K &= PC^T \tilde{R}^{-1}, \\ \dot{P} &= AP + PA^T + \tilde{Q} - PC^T \tilde{R}^{-1} CP. \end{aligned} \quad (5.23)$$

En el caso de las baterías, se considera de suma importancia la estimación del estado de carga, debido a que el modelo está en función del SOC, y los otros parámetros dependen fuertemente de este parámetro, específicamente, si no se hace una estimación adecuada, la acumulación del ruido en el estado de carga afectará la estimación de los demás parámetros y se pueden presentar falsas alarmas. Por eso, para el caso del diagnóstico de fallas en las baterías se ha optado por usar el EKF para mitigar la influencia del error en la estimación del SOC.

El SOC se estima a partir de la entrada del proceso, en este caso es la corriente que se aplica a la batería, esta estimación está ligada a la estimación del voltaje en la batería, por lo tanto, si ocurre una falla en cualquiera de estos estados, los tres se verán afectados, este fenómeno suele presentarse con mayor frecuencia en las pruebas de carga o descarga pulsante. En la Fig.(5.24), se muestra la estimación del modelo de la batería que realiza el EFK cuando está siendo sometida a carga pulsante.

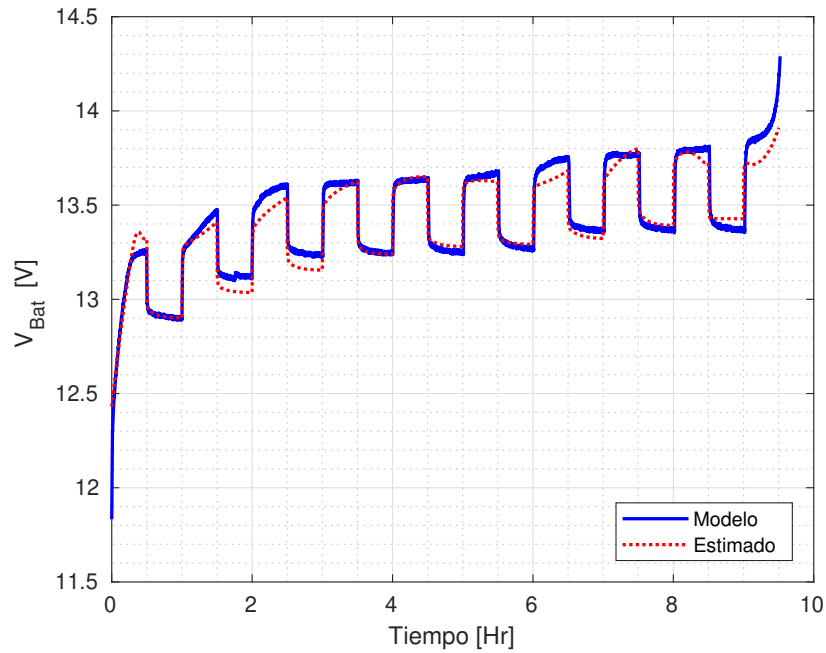
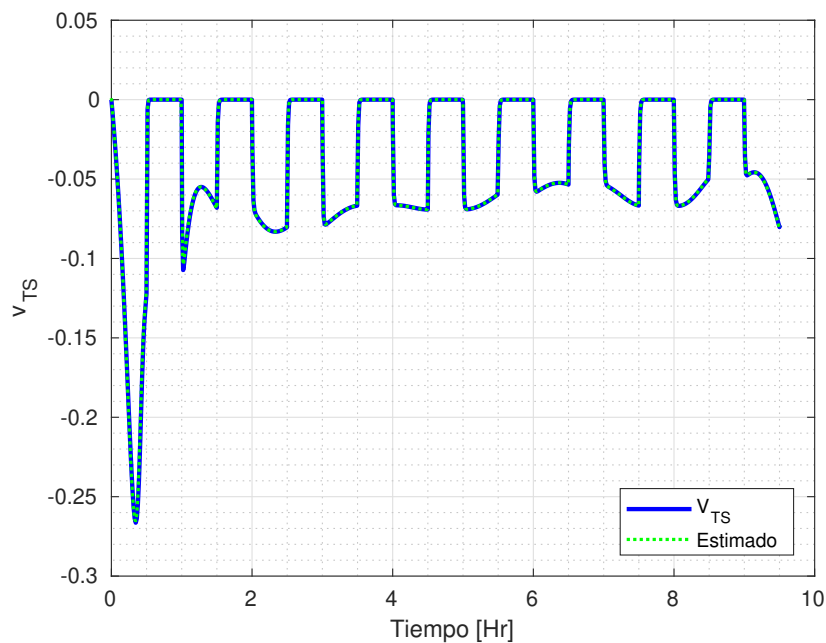


Figura 5.24: Estimación de la carga pulsante en la batería.

En las Figs.(5.25)-(5.27) se muestra el comportamiento de los estados en condiciones nominales de operación, estos se muestran en la Ec. (5.19).

Figura 5.25: Estimación del estado V_{TS} en función del SOC.

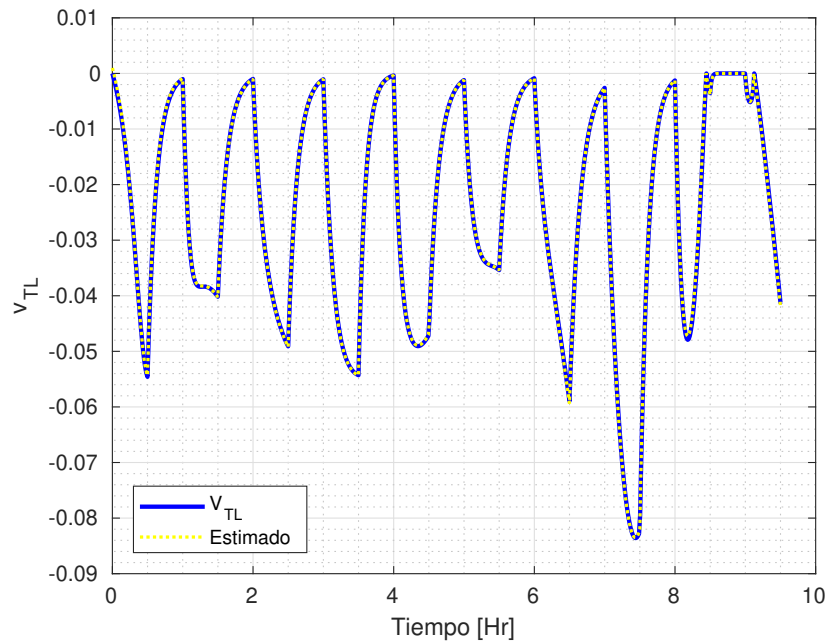
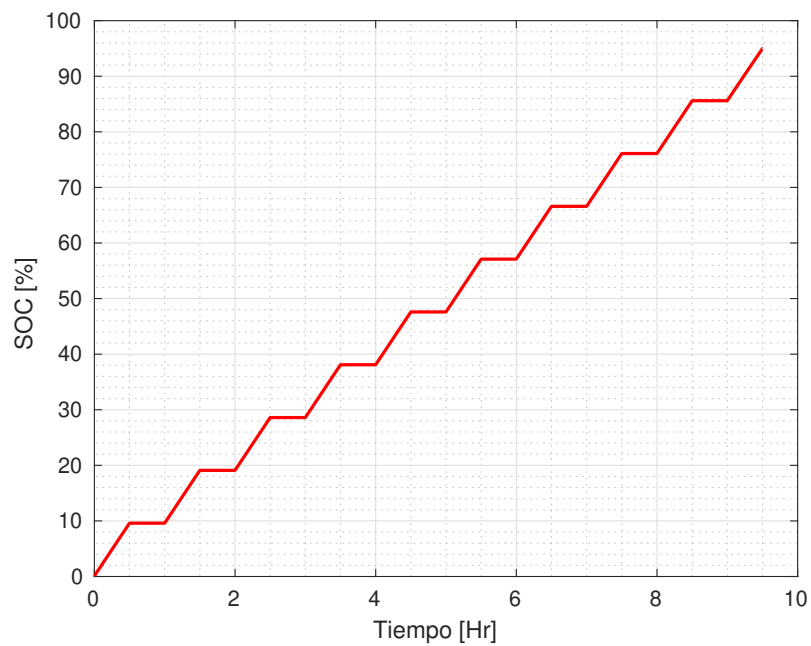
Figura 5.26: Estimación del estado V_{TL} en función del SOC.

Figura 5.27: Estimación del SOC a partir de la entrada del modelo.

En la Fig. 5.28 se muestra que las condiciones iniciales del modelo son distintas a las condiciones iniciales de los filtros de Kalman extendidos.

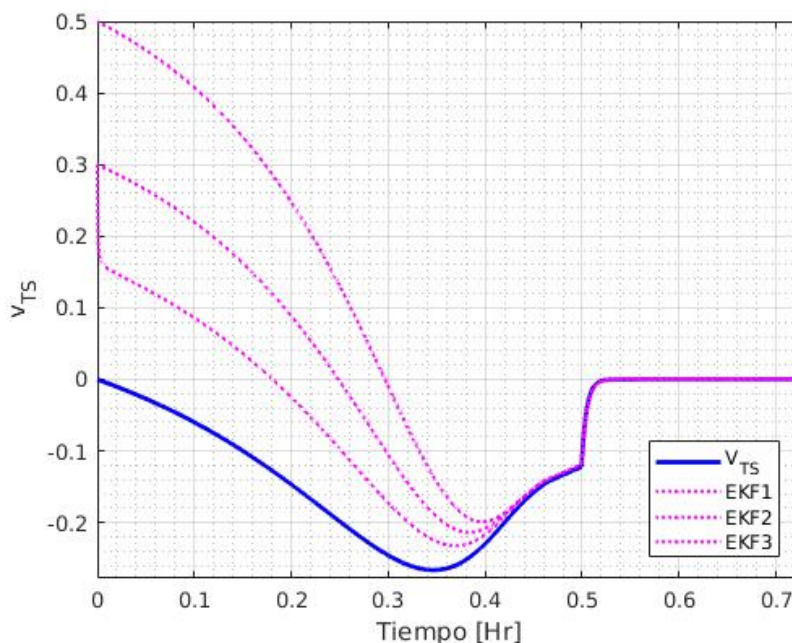


Figura 5.28: Acercamiento de la condición inicial del modelo y los EFKs.

A continuación se consideran dos casos de fallas:

Caso 1.

En este caso se emuló una falla en la resistencia R_i de la Batería 1, como se mencionó anteriormente, dentro de este tipo de falla se puede presentar el incremento o el decremento de la resistencia, se realizaron los dos casos en el mismo experimento (Fig.5.29) y en el escenario de carga constante.

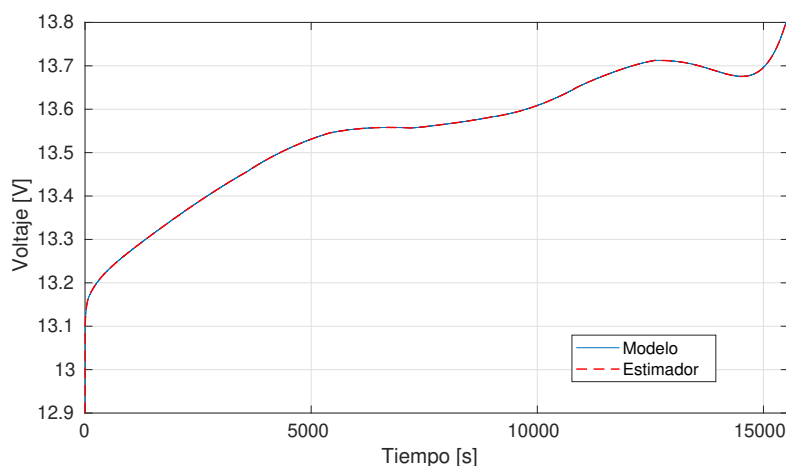
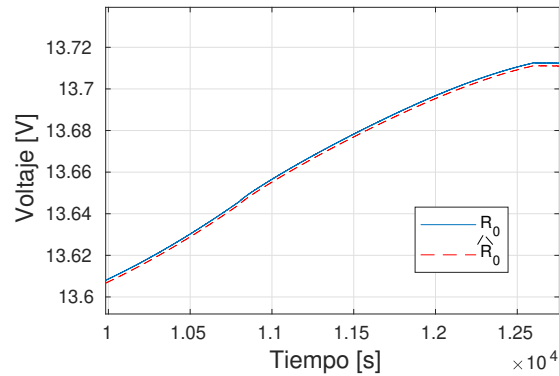


Figura 5.29: Comportamiento del voltaje ante un aumento y decremento de R_i

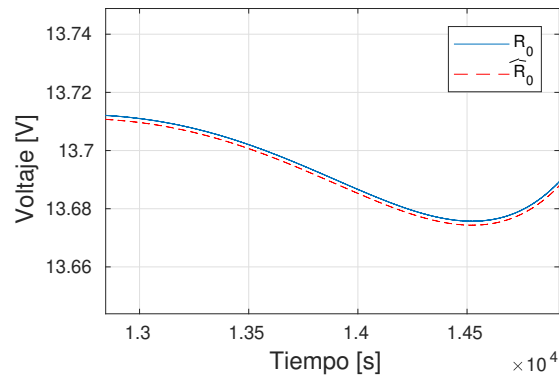
A los 10000 [s] se emuló la falla de baja impedancia, disminuyendo la resistencia a la mitad de su valor nominal y a los 12500 [s] se emuló la falla de alta impedancia, aumentando la resistencia al doble de su valor nominal. Se puede observar que cuando se presenta el

primer caso, el voltaje aumenta y en el segundo caso, el voltaje en las terminales disminuye.

En la Fig.(5.30) se puede observar el comportamiento del voltaje en los dos casos de falla, la idea básica del diagnóstico de fallas, al igual que con el caso de los supercapacitores, es la comparación de los residuos generados en cada caso y determinar el tipo de falla de acuerdo al patrón de residuos obtenidos.



(a) Falla de baja impedancia (r_b).



(b) Falla de alta impedancia (r_a).

Figura 5.30: Comportamiento del voltaje ante fallas.

Los residuos se obtienen de la Ec. (5.24) y se generan comparando el valor del modelo con el valor estimado:

$$r_i = y_m - \hat{y}_i, \quad i \in \{a, N, b\}, \quad (5.24)$$

donde a representa la falla de alta impedancia, b representa la baja impedancia y N representa el valor nominal de la resistencia óhmica. En caso libre de falla, el residuo es cero, o cercano a cero, como se muestra en la Fig.(5.31):

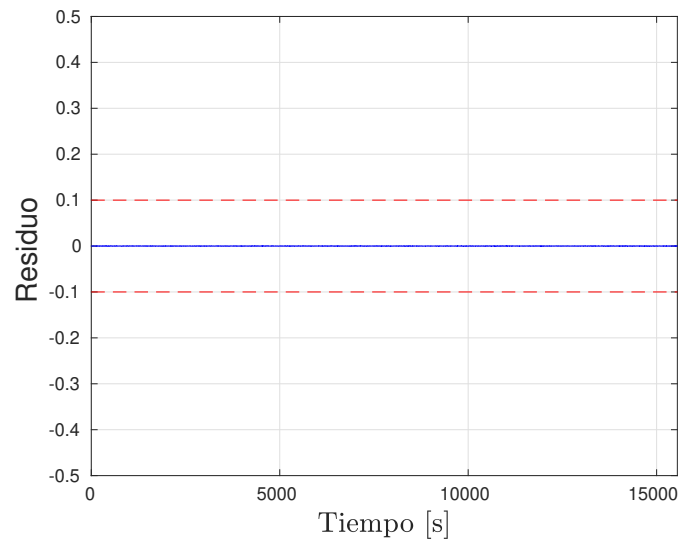


Figura 5.31: Residuo de la batería sin presencia de falla.

En este caso, la estimación del estado de carga no se modifica debido a que el experimento es de carga constante.

Caso 2. En este caso se emuló una de las fallas más comunes que se presentan en la batería, ésta es el aumento de la resistencia (usualmente es la R_i que se presenta en el modelo de CEE), ésta influye en la disminución de la capacitancia, por lo tanto, el cambio en estos parámetros influye también en el estado de carga de la batería, y a su vez en la respuesta del voltaje final de la batería. La falla emulada consistió en aumentar la resistencia y disminuir la capacitancia, ambas de la segunda rama del modelo en el escenario de carga pulsante, y se obtuvo el siguiente comportamiento, en la Fig.(5.32) se muestra en la línea roja el comportamiento de cuando se induce una falla.

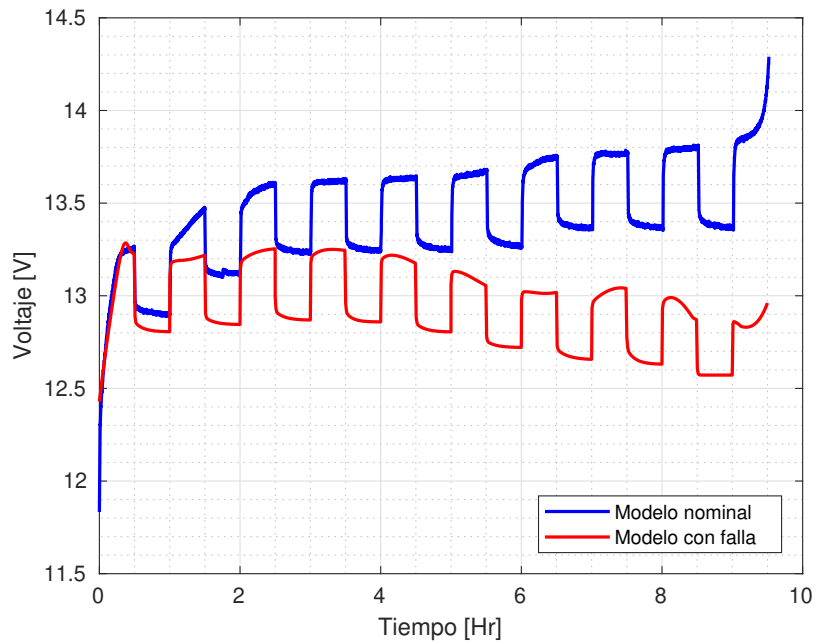


Figura 5.32: Comportamiento del voltaje del modelo de la batería vs. modelo con falla.

En la Fig.(5.33) se observa la respuesta del estimador al voltaje de salida de la batería.

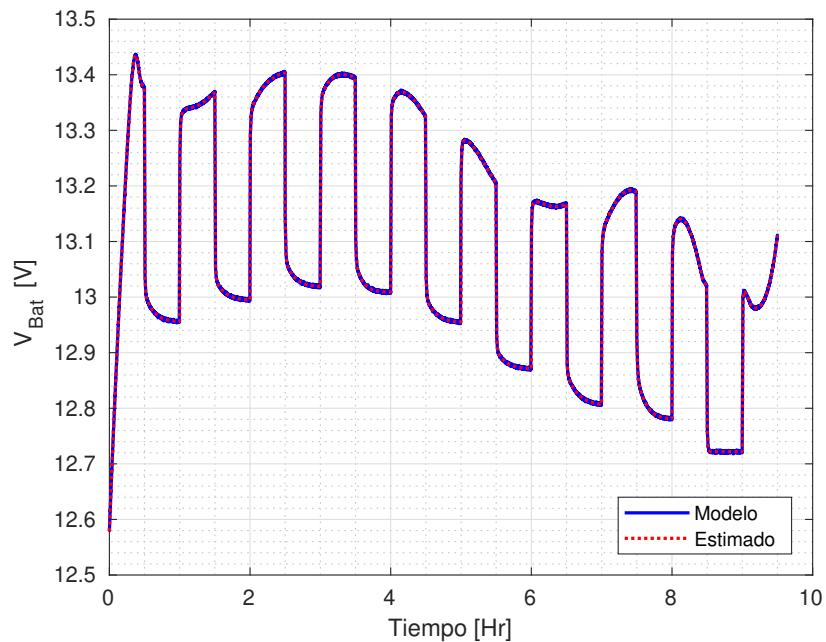


Figura 5.33: Estimación del modelo fallado

En las Figs.(5.34)-(5.36), se muestra el comportamiento y la estimación de los estados del modelo ante una falla.

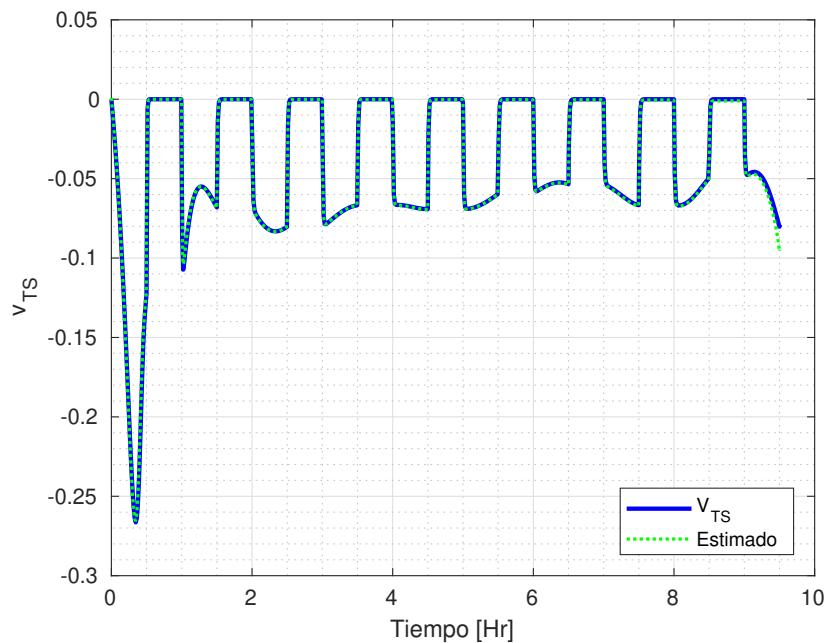


Figura 5.34: Comparación del comportamiento de V_{TS} en condiciones nominales vs. condiciones de falla.

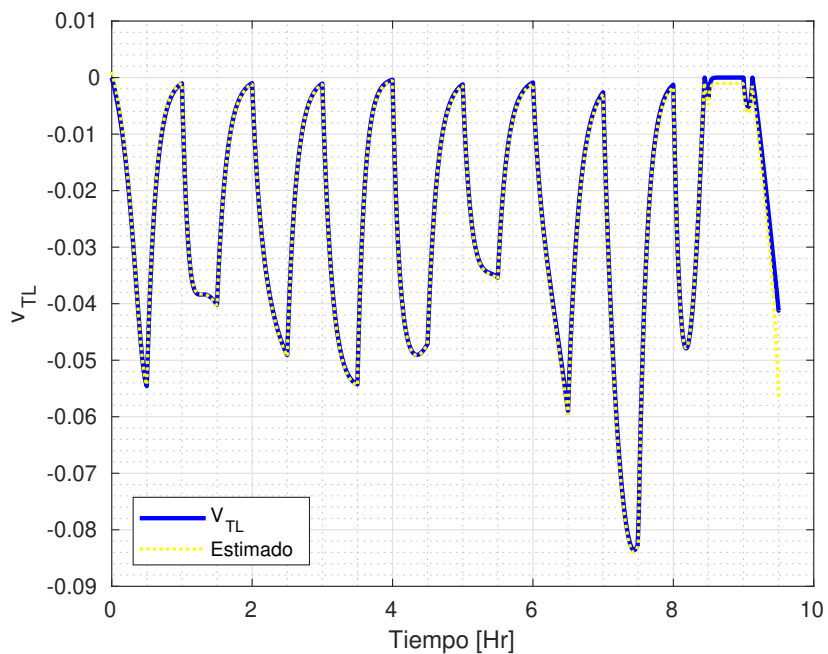


Figura 5.35: Comparación del comportamiento de V_{TL} en condiciones nominales vs. condiciones de falla.

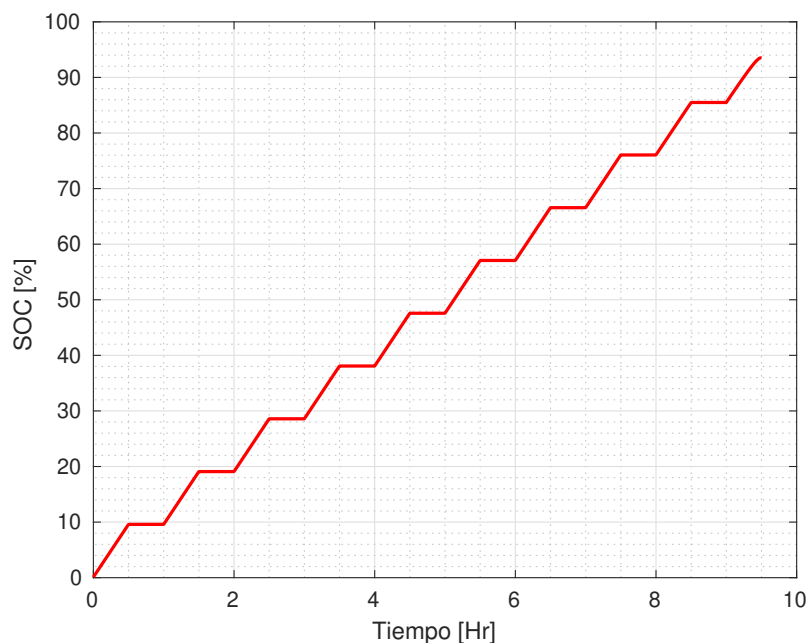


Figura 5.36: Estimación del estado de carga ante una falla.

Se puede observar que en condiciones de falla, el comportamiento del voltaje de salida y el SOC se ven afectados.

Siguiendo el mismo método de generación de residuos utilizado para los SCs de la Fig. 5.11 y de la Ec. 5.12 se presenta en la Fig. 5.37 el esquema para la generación de residuos.

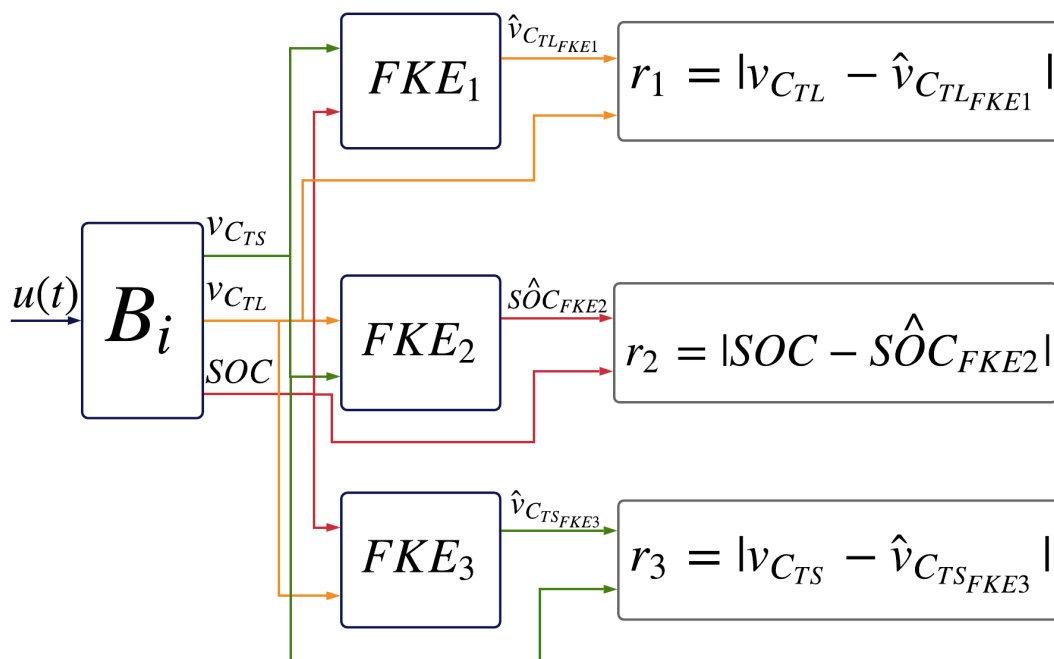


Figura 5.37: Diagrama de generación de residuos para la batería.

Y se obtiene la siguiente firma de fallas:

	$f_{C_{TS}}$	$f_{C_{TL}}$	f_{SOC}
r_1		•	
r_2			•
r_3	•		

Tabla 5.5: Firma de fallas para una batería.

Al tener una firma distinta para cada falla, se puede inferir que es posible detectar y aislar fallas en el banco de baterías.

Capítulo 6

Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones generales de este trabajo de tesis, así como los trabajos futuros que pueden surgir a partir de este proyecto.

Para el desarrollo de esta tesis se realizó el modelado de un banco de supercapacitores y un banco de baterías. Primeramente se validó el modelo de los supercapacitores individualmente mediante pruebas experimentales realizadas bajo las mismas condiciones iniciales, (supercapacitor completamente descargado) pero aplicando en la entrada distintos valores de corriente para cada prueba, además de eso, se realizaron pruebas de tres tipos: Carga y autodescarga, carga/descarga constante y carga/descarga pulsante. Se realizó también la validación individual de las baterías realizando pruebas experimentales de dos tipos: carga/descarga constante y carga/descarga pulsante, el segundo tipo de pruebas se realizó para extraer información de la dinámica de las baterías y aproximar el modelo lo más cercano posible al comportamiento real.

Además de la validación de los dispositivos individualmente, se construyó un banco de supercapacitores con dimensiones de 6×6 y se realizó la identificación de parámetros realizando pruebas experimentales para posteriormente validar el banco. En el caso de las baterías solamente se diseñó a nivel simulación un banco de 6 baterías conectadas en paralelo.

En cuanto al diagnóstico de fallas fuera de línea, se propuso un esquema de diagnóstico de fallas tipo tipo DOS basado en la estimación de estados mediante filtros de Kalman para cada supercapacitor y filtros de Kalman extendidos para cada batería del sistema de almacenamiento de energía, debido a que la naturaleza de cada dispositivo es distinta, incluso si están interconectados, cada uno de ellos representa un sistema con una dinámica diferente. Después de generar la firma de fallas para cada dispositivo del banco, se realizó la evaluación de los residuos para cada rama del banco con el fin de facilitar la tarea de aislamiento del dispositivo con falla. Se asume que ocurre una falla a la vez a lo largo de todo el banco, por lo tanto, las condiciones de aislamiento se simplifican y es posible localizar de manera precisa el elemento que se encuentra funcionando en modo de operación anormal y, además, determinar la razón de la falla.

6.1. Trabajos futuros.

A continuación se proponen los siguientes trabajos que pueden surgir tomando como antecedente este trabajo de tesis:

- Instrumentar el banco de supercapacitores con sensores de corriente y voltaje para propósitos de diagnóstico de fallas en línea.
- Construir e instrumentar un banco de baterías para propósitos de diagnóstico de fallas en línea, al igual que con el banco de supercapacitores.
- Interconectar ambos sistemas de almacenamiento de energía considerando agregar una fuente de energía primaria para hacer el proyecto funcional en aplicaciones que requieran las características con las que cuentan estos sistemas.

Bibliografía

- Alavi, S., Samadi, M. F., and Saif, M. (2013). Diagnostics in lithium-ion batteries: Challenging issues and recent achievements. *Integration of Practice-Oriented Knowledge Technology: Trends and Prospectives*, pages 277–291.
- Aurbach, D., Zinigrad, E., Cohen, Y., and Teller, H. (2002). A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions. *Solid state ionics*, 148(3-4):405–416.
- Beck, J. V. and Arnold, K. J. (1977). *Parameter estimation in engineering and science*. James Beck.
- Bernal, L. E. Z. (1997). *Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications*. PhD thesis, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada.
- Bryson Jr, A. and Henrikson, L. (1968). Estimation using sampled data containing sequentially correlated noise. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 5(6):662–665.
- Chen, M. and Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and iv performance. *IEEE transactions on energy conversion*, 21(2):504–511.
- Crassidis, J. L. and Junkins, J. L. (2011). *Optimal estimation of dynamic systems*. Chapman and Hall/CRC.
- Dey, S., Mohon, S., Pisu, P., and Ayalew, B. (2016). Sensor fault detection, isolation, and estimation in lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(6):2141–2149.
- Dong, G., Wei, J., and Chen, Z. (2016). Kalman filter for onboard state of charge estimation and peak power capability analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 328:615–626.
- El Fadil, H., Belhaj, F., Rachid, A., Giri, F., and Ahmed-Ali, T. (2017). Nonlinear modeling and observer for supercapacitors in electric vehicle applications. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):1898–1903.
- Faranda, R. (2010). A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. *Electric Power Systems Research*, 80(4):363–371.

- Gandolfo, D., Brandão, A., Patiño, D., and Molina, M. (2015). Dynamic model of lithium polymer battery–load resistor method for electric parameters identification. *Journal of the Energy Institute*, 88(4):470–479.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- Jia, H., Fu, Y., Zhang, Y., and He, W. (2010). Design of hybrid energy storage control system for wind farms based on flow battery and electric double-layer capacitor. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pages 1–6. IEEE.
- Kim, T. and Qiao, W. (2011). A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(4):1172–1180.
- Liu, Z., Ahmed, Q., Rizzoni, G., and He, H. (2014). Fault detection and isolation for lithium-ion battery system using structural analysis and sequential residual generation. In *Proc. 7th ASME Annu. Dyn. Syst. Control*, page V002T36A005.
- Lombardi, W., Zarudniev, M., Lesecq, S., and Bacquet, S. (2014). Sensors fault diagnosis for a bms. In *Control Conference (ECC), 2014 European*, pages 952–957. IEEE.
- Nikdel, M. et al. (2014). Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:477–485.
- Nikkhoo, M., Farjah, E., and Ghanbari, T. (2016). A simple method for parameters identification of three branches model of supercapacitors. In *Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on*, pages 1586–1590. IEEE.
- Santos-Ruiz, I. d. l., Bermúdez, J. R., López-Estrada, F. R., Puig, V., Torres, L., and Delgado-Aguíñaga, J. (2018). Online leak diagnosis in pipelines using an ekf-based and steady-state mixed approach. *Control Engineering Practice*, 81:55–64.
- Torregrossa, D., Toghiani, K. E., Amstutz, V., Girault, H. H., and Paolone, M. (2015). Macroscopic indicators of fault diagnosis and ageing in electrochemical double layer capacitors. *Journal of Energy Storage*, 2:8–24.
- Wei, J., Dong, G., and Chen, Z. (2019). Model-based fault diagnosis of lithium-ion battery using strong tracking extended kalman filter. *Energy Procedia*, 158:2500–2505.
- Yao, Y., Zhang, D., and Xu, D. (2006). A study of supercapacitor parameters and characteristics. In *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- Zhang, L., Hu, X., Wang, Z., Sun, F., and Dorrell, D. G. (2018). A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1868–1878.
- Zhang, Y. and Yang, H. (2011). Modeling and characterization of supercapacitors for wireless sensor network applications. *Journal of Power Sources*, 196(8):4128–4135.

-
- Zhao, Y., Liu, P., Wang, Z., Zhang, L., and Hong, J. (2017). Fault and defect diagnosis of battery for electric vehicles based on big data analysis methods. *Applied Energy*, 207:354–362.
- Zubieta, L. and Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on industry applications*, 36(1):199–205.

Anexo A: Identificación de parámetros de la batería 2.

En esta sección se presentan los coeficientes y parámetros que se obtuvieron mediante la caracterización de la batería dos.

	Coeficientes
a_1	75.9828
a_2	0.3471
a_3	35.7666
a_4	13.9287
a_5	1.4817
a_6	-63.0795

Tabla 6.1: Coeficientes para el $V_{OC}[SOC(t)]$ de la batería 2.

Coef.	Valor del coeficiente.			
	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
b_0	0.1973	0.0678	0.7713	0.4538
b_1	0.4053	0.1112	0.0604	0.4324
b_2	0.2974	0.2886	0.2625	0.8253
b_3	0.3964	0.2690	0.6511	0.0835
b_4	0.4208	0.5942	0.1336	0.1332
b_5	0.3115	0.4759	0.6385	0.1734
b_6	0.6938	0.3683	0.3849	0.3909
b_7	0.0919	0.6556	0.7657	0.8314
b_8	0.4021	0.9382	0.6529	0.8034

Tabla 6.2: Coeficientes de la función para R_i en el modelo de CEE de la batería 2.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	<i>Avg</i>
c_0	0.9033	0.1840	0.1952	0.7559
c_1	0.6041	0.0875	0.3307	0.6033
c_2	0.9262	0.3089	0.6428	0.7833
c_3	0.1169	0.2309	0.2174	0.1193
c_4	0.3408	0.9092	0.0769	0.9786
c_5	0.0367	0.9369	0.9806	0.8486
c_6	0.5384	0.0319	0.2068	0.0506
c_7	0.7372	0.5936	0.9833	0.4662
c_8	0.1812	0.0438	0.6104	0.3257

Tabla 6.3: Coeficientes de la función para R_{TS} en el modelo de CEE de la batería 2.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	<i>Avg</i>
d_0	0.7337	0.5306	0.4923	0.8154
d_1	0.8162	0.8324	0.6947	0.5027
d_2	0.5335	0.5975	0.9727	0.0031
d_3	0.5608	0.3353	0.3278	0.0875
d_4	0.3465	0.2992	0.8378	0.2607
d_5	0.5508	0.4526	0.7391	0.0228
d_6	0.0211	0.4226	0.9542	0.4241
d_7	0.7368	0.3596	0.0319	0.3411
d_8	0.8340	0.5583	0.3569	0.5414

Tabla 6.4: Coeficientes de la función para R_{TL} en el modelo de CEE de la batería 2.

	Valor del coeficiente.			
Coef.	9 [A]	11 [A]	13 [A]	<i>Avg</i>
e_0	0.6984	0.9781	0.1813	0.1197
e_1	0.4597	0.1171	0.9466	0.8866
e_2	0.1577	0.8693	0.1008	0.9703
e_3	0.4218	0.5679	0.3880	0.9425
e_4	0.5961	0.1202	0.2892	0.6381
e_5	0.3223	0.9703	0.0731	0.0906
e_6	0.8307	0.8400	0.1946	0.0747
e_7	0.1227	0.0623	0.4175	0.1825
e_8	0.2512	0.2781	0.2929	0.0317

Tabla 6.5: Coeficientes de la función para C_{TS} en el modelo de CEE.


Coef.	Valor del coeficiente.			
	9 [A]	11 [A]	13 [A]	Avg
f_0	0.2276	0.4096	0.1908	0.8337
f_1	0.9551	0.6268	0.9521	0.8154
f_2	0.0630	0.9191	0.7702	0.3240
f_3	0.1832	0.4152	0.8166	0.4617
f_4	0.6242	0.7115	0.4261	0.6740
f_5	0.2914	0.9709	0.3002	0.5952
f_6	0.1372	0.4355	0.6803	0.1334
f_7	0.1889	0.6354	0.8585	0.0195
f_8	0.9566	0.9016	0.8718	0.1251

Tabla 6.6: Coeficientes de la función para C_{TL} en el modelo de CEE de la batería 2.

Corriente aplicada	Parámetro.				
	R_i	R_{Ts}	R_{Tl}	C_{Ts}	C_{Tl}
9 [A]	0.0349	0.0077	0.0060	4765.5378	114270.0244
11 [A]	0.0339	0.0069	0.0054	5293.3544	97517.5822
13 [A]	0.0395	0.0064	0.0049	4499.3122	88247.8933
Avg	0.0361	0.0070	0.0054	4852.7348	100011.8333

Tabla 6.7: Parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente de la batería 2.

Anexo B: Póster.



Caracterización de un Banco de Supercapacitores y Batería de LiFePO4 y su aplicación en el diagnóstico de fallas.
 Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
 Departamento de Ingeniería Electrónica
 Ing. Diana Arleth Muñoz Menéndez.
 Asesores: Dr. José Francisco Gómez Aguilar, Dra. Ma. Guadalupe López López.

RESUMEN

Hoy en día los estudios e investigaciones relacionadas con la generación de energía mediante tecnologías verdes son relevantes y con muchas áreas de oportunidad, entre ellas, lo relacionado con el almacenamiento de energía para su posterior uso. El poder detectar y diagnosticar las fallas en el sistema de almacenamiento de energía permite por un lado evitar un daño en el mismo, y por el otro, tener una operación segura cuando interactúe con otros equipos y/o sistemas. Para este trabajo de investigación se construirá físicamente el banco de supercapacitores para fines de adquisición de datos para la parametrización del modelo y se diseñará un esquema de detección y diagnóstico de fallas en el banco de supercapacitores y en el banco de baterías y se hará la validación del mismo a nivel simulación.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía mediante tecnologías verdes es un tema muy investigado en la actualidad debido a la creciente necesidad de aprovechar los recursos renovables. Sin embargo, esto implica un reto muy grande porque la naturaleza variable, intermitente e impredecible de este tipo de tecnologías ocasiona que no se garantice la generación constante de energía por lo que se considera que la forma de distribución de energía no es efectiva. En consecuencia, los sistemas de almacenamiento de energía se presentan como una respuesta a estas fluctuaciones, aunque no siempre se garantiza que este tipo de sistemas sea inmune a las fallas, es por ello que en este trabajo se propone abordar el tema de detección y diagnóstico de fallas en un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías.

OBJETIVO

Realizar la detección y diagnóstico de fallas en un sistema de almacenamiento de energía compuesto por un banco de supercapacitores y un banco de baterías, interconectados con un sistema de acondicionamiento de potencia.

METODOLOGÍA

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser representados mediante modelos matemáticos de ecuaciones diferenciales basados en sus propiedades electroquímicas (baterías y supercapacitores) o mediante representaciones de circuito eléctrico equivalente. En este trabajo se optó por la segunda representación debido a que los modelos de CEE son intuitivos y útiles, además de incluir la posibilidad de su aplicación en simuladores de circuitos. El modelo de CEE del supercapacitor fue tomado de Faranda (2010) y se muestra en la Figura 1.

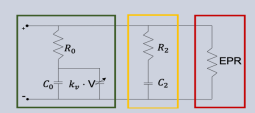


Figura 1. Modelo de circuito equivalente de dos ramas RC de un supercapacitor.

La primera rama encerrada en color verde, es principalmente la responsable para el almacenamiento inicial. La segunda rama RC encerrada en color amarillo representa la redistribución de carga del voltaje del dispositivo sobre medianos y largos períodos de tiempo. La tercera rama encerrada en color rojo se agrega para representar la propiedad de autodescarga.

El modelo de CEE de la batería fue tomado de Gandolfo (2015) y se muestra en la Figura 2 los parámetros se obtuvieron mediante pruebas experimentales con las baterías que se tienen en el laboratorio y con las siguientes ecuaciones:

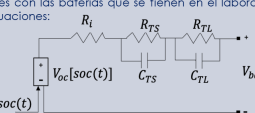


Figura 2. Modelo dinámico de circuito eléctrico equivalente de una batería.

$$R_i = \sum_{j=0}^{j=10} a_{(j)}[SOC(t)]^j \quad (Ec.1)$$

$$R_{rs} = \sum_{j=0}^{j=10} b[SOC(t)]^j \quad (Ec.2)$$

$$R_{rl} = \sum_{j=0}^{j=10} c[SOC(t)]^j \quad (Ec.3)$$

$$C_{rs} = \sum_{j=0}^{j=10} d[SOC(t)]^j \quad (Ec.4)$$

$$C_{tl} = \sum_{j=0}^{j=10} e_{(j)}[SOC(t)]^j \quad (Ec.5)$$

RESULTADOS

La Figura 3 muestra el resultado de las mediciones de voltaje en las baterías de LiFePO4, comparando dichos resultados contra los datos obtenidos en la simulación del modelo. Se puede observar un elevado grado de concordancia entre ambos resultados.

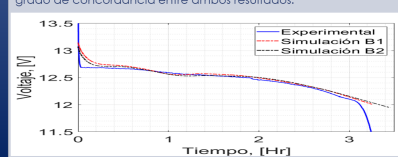


Figura 3. Resultados experimentales vs. Resultados en simulación Modelo batería.

Por otro lado, se realizaron mediciones experimentales en el banco de supercapacitores para la caracterización del modelo, las pruebas que se realizaron para ajustar los parámetros fueron de carga y descarga constante aplicando diferentes corrientes (Figura 4). Una de las características dinámicas del sistema es que a mayor corriente el tiempo de carga es menor.

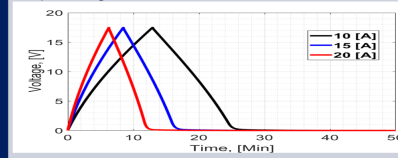


Figura 4. Respuesta del voltaje del banco de supercapacitores ante diferentes corrientes.

CONCLUSIONES

Se presentan los modelos de circuito eléctrico equivalente para la batería y para el banco de supercapacitores. Se obtuvieron los parámetros del modelo de la batería y del banco de supercapacitores. Se demostró que los modelos de CEE representan fielmente el comportamiento de la batería y los supercapacitores. Se sigue trabajando en la técnica de detección y diagnóstico de fallas.

REFERENCIAS

- [1] ESCOBAR-MEJÍA, A. and HOLGUÍN-LONDOÑO, M. (2011). Sistemas de almacenamiento de energía y su aplicación en energías renovables. *Scientia et Technica*, 17(47).
- [2] Faranda, R. (2010). A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model. *Electric Power Systems Research*, 80(4):363–371.
- [3] Gandolfo, D., Brandão, A., Patiño, D., and Molina, M. (2015). Dynamic model of lithium polymer battery-load resistor method for electric parameters identification. *Journal of the Energy Institute*, 88(4):470–479.
- [4] Nikkhoo, M., Farjah, E., and Ghanbari, T. (2016). A simple method for parameters identification of three branches model of supercapacitors. In *Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on*, pages 1586–1590. IEEE.
- [5] Torregrossa, D., Toghiani, K. E., Amstutz, V., Girault, H. H., and Paolone, M. (2015). Macroscopic indicators of fault diagnosis and ageing in electrochemical double layer capacitors. *Journal of Energy Storage*, 2:8–24.
- [6] Zubieta, L. and Bonert, R. (2000). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1):199–205.



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

cenidet[®]
*Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico*