



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Doctorado

Desarrollo y Control de una Fuente de Energía Híbrida
Compuesto de un Sistema de Celdas de Combustible
Tipo PEM

presentada por

MC. Jorge Iván Hidalgo Reyes

como requisito para la obtención del grado de
Doctor en Ciencias en Ing. Electrónica

Director de tesis

Dr. José Francisco Gómez Aguilar

Codirector de tesis

Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2020.



ESC\FORDOC09

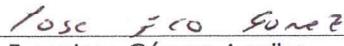
ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS DOCTORAL

Cuernavaca, Morelos a 5 de diciembre de 2019.

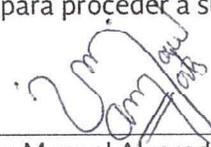
Dr. Mario Ponce Silva
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica
Presente

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la Tesis Doctoral del alumno **Jorge Iván Hidalgo Reyes**, manifiestan que después de haber revisado su trabajo de tesis doctoral titulado **"Desarrollo y control de una fuente de energía híbrida compuesto de un sistema de celdas de combustible tipo PEM"** realizado bajo la dirección del **Dr. José Francisco Gómez Aguilar** y codirección del **Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez**, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE



Dr. José Francisco Gómez Aguilar
CENIDET



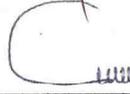
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
CENIDET



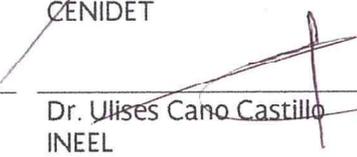
Dr. Manuel Adam Medina
CENIDET



Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
CENIDET



Dra. Ma. Guadalupe López López
CENIDET



Dr. Ulises Cano Castillo
INEEL

Reciba un cordial saludo.

c.c.p: M.E. Guadalupe Garrido Rivera / Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
c.c.p: Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez / Subdirector Académico.
c.c.p: Expediente.





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

ESC\FORDOC010

Cuernavaca, Morelos a 13 de diciembre de 2019.

M.C. Jorge Iván Hidalgo Reyes

Candidato al grado de Doctor
en Ciencias en Ingeniería Electrónica
P r e s e n t e

Después de haber sometido a revisión su trabajo final de tesis titulado **"Desarrollo y control de una fuente de energía híbrida compuesto de un sistema de celdas de combustible tipo PEM"**, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis le hizo, le comunico que se le concede autorización para que proceda a la impresión de la misma, como requisito para la obtención del grado.

Reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

Dr. Mario Ponce Silva

Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica

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

c.c.p.: Expediente.

Dedicatoria.

*A mi madre **Luz Maria Reyes Cruz**, por su incansable labor cotidiana como madre y padre de familia, así como en el ejercicio de tu profesión.*

Pero sobretodo, por su ejemplo de voluntad, carácter y Fe para superar cualquier tribulación. Eres mi fuente de inspiración.

*A mi hermano **Miguel Angel**, por sus valiosos consejos y enseñanzas, por ser un ejemplo como hijo y como estudiante.*

*A mi hermano **Erick**, por recordarme que la vida es más fácil cuando sonreímos.*

*A mi sobrino **Erick**, quién llegó a nuestra familia para darle un nuevo sentido a nuestras vidas.*

*Y especialmente a ti señor **Jesús** por que me bendices, me iluminas, derramas en mí tu sabiduría y habitas en mi corazón.*

"Porque si hay un contrincante al que debes vencer en una carrera de larga distancia, ése no es otro que el tú de ayer".

Haruki Murakami.

Agradecimientos.

A Dios por cada una de sus bendiciones, por la fuerza de voluntad para superar las adversidades, por brindarme la salud y la felicidad que ahora tengo.

A mi madre y hermanos, por su cariño, por su apoyo, por que siempre han creído en mi. Sin ustedes esto habría sido imposible, los Amo.

A mis asesores el Dr. José Francisco Gómez Aguilar y el Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez por brindarme su confianza y amistad. Además, por guiarme durante el desarrollo de este trabajo de investigación mediante sus valiosos consejos y observaciones.

A los miembros del comité revisor: Dra. María Guadalupe López López, Dr. Manuel Adam Medina, Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez y Dr. Ulises Cano Castillo por sus acertadas correcciones y comentarios que permitieron enriquecer este trabajo.

A mis compañeros y amigos: Amairany Rosas, Alfredo Gil, Ricardo Schacht, Jorge Rivas, Patricia Vázquez, Paulina Gutiérrez, Ivonne Guerrero, Citlaly Martínez, Diana Muñoz, Dulce Serrano, Montserrat Alegría, Estela Ortiz, Isaura Hernández, Edumis Viera, Susana Sainz, Hugo Arellano, Jesús Solís, Diego Carbot, Jesús Reyes y Jashiel Pérez por cada uno de los gratos momentos compartidos dentro y fuera de CENIDET.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para poder realizar y culminar mis estudios de Doctorado.

Finalmente, agradezco de manera profunda al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por brindarme los medios necesarios para mi formación académica, así como, por cada una de las amables atenciones que recibí durante mi estancia.

Resumen.

En esta tesis se presenta el diseño y desarrollo de una estrategia de control para una fuente de energía híbrida compuesto de un sistema de celdas de combustible tipo PEM, un banco de supercapacitores y una batería LiFePO₄.

Primeramente, conforme a lo reportado en la literatura se presentan los modelos matemáticos seleccionados para cada una de las fuentes de energía. Estos modelos son de parámetros agrupados con base en un circuito eléctrico equivalente y después, se realizaron pruebas en el laboratorio con el objetivo de parametrizar y validar fuera de línea los modelos.

Posteriormente, se presenta el diseño de los convertidores de CD-CD que se encuentran interconectados a cada una de las fuentes de energía con el fin de adecuar su potencia en un rango determinado y que se conectan al bus de CD. También, se muestra a detalle el desarrollo del algoritmo para la administración de energía con base en estados de operación considerando las características propias de cada fuente de energía, así como, la demanda de potencia por parte de la carga.

Finalmente, se evalúa el desempeño de la estrategia de administración de energía utilizando tres diferentes ciclos de conducción (ECE 15, EUDC y HWFET) a nivel de simulación numérica en MATLAB. Estos ciclos de conducción se normalizaron al nivel de potencia de la fuente híbrida y los resultados se analizan puntualmente en términos de la potencia entregada a la carga y el estado de carga de las fuentes de energía auxiliares.

Abstract.

This thesis presents the design and development of a control strategy for a hybrid energy source composed of a PEM fuel cell system, a supercapacitor bank and a LiFePO₄ battery.

First, as reported in the literature, mathematical models that were selected for each of the energy sources are presented. These are lumped parameters models based on an equivalent electrical circuit, later, several tests were carried out in the laboratory with the aim of validating the models.

Subsequently, we present the design of the CD-CD converters that are interconnected to each of the power sources in order to adapt their power in a certain range and connect them to the CD bus. Also, it is shown in detail the development of the algorithm for energy management strategy based on operation states considering the characteristics of each energy source, as well as, the power demand by the load.

Finally, the performance of the energy management strategy is evaluated using three different driving cycles (ECE 15, EUDC, and HWFET) at the numerical simulation level in MATLAB. These driving cycles were normalized to the power level of the hybrid source and the results are analyzed in terms of the power delivered to the load and the state of charge of the auxiliary power sources.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes. | 3 |
| 1.2. Estado del arte. | 4 |
| 1.2.1. Conclusiones. | 10 |
| 1.3. Definición del problema. | 10 |
| 1.4. Objetivos. | 11 |
| 1.4.1. General. | 11 |
| 1.4.2. Específicos. | 11 |
| 1.5. Estructura del documento. | 12 |
| 2. Marco teórico | 13 |
| 2.1. Introducción. | 13 |
| 2.2. Celda de combustible. | 13 |
| 2.2.1. Introducción. | 13 |
| 2.2.2. Cinética del electrodo. | 14 |
| 2.2.3. Pérdidas de voltaje. | 16 |
| 2.2.4. Potencial de la celda: curva de polarización. | 18 |
| 2.2.5. Aplicaciones de la celda de combustible. | 18 |
| 2.3. Supercapacitor. | 19 |
| 2.4. Batería. | 20 |
| 3. Modelo de las fuentes de energía. | 23 |
| 3.1. Introducción. | 23 |
| 3.2. Celda de combustible. | 23 |
| 3.2.1. Modelo. | 24 |
| 3.2.2. Parámetros del modelo. | 26 |
| 3.2.3. Caracterización del modelo. | 28 |
| 3.3. Supercapacitor. | 30 |
| 3.3.1. Banco de pruebas. | 31 |
| 3.3.2. Parametrización del modelo. | 32 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.3. Validación del modelo. | 35 |
| 3.4. Batería. | 39 |
| 3.4.1. Banco de pruebas. | 41 |
| 3.4.2. Parametrización del modelo. | 42 |
| 3.4.3. Estimación del estado de carga. | 45 |
| 3.4.4. Cálculo fraccionario. | 48 |
| 3.4.5. Validación del modelo. | 50 |
| 4. Sistema de adecuación de potencia. | 57 |
| 4.1. Introducción. | 57 |
| 4.2. Celda de combustible. | 57 |
| 4.2.1. Convertidor reductor CD-CD. | 57 |
| 4.2.2. Modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI) ideal. | 58 |
| 4.2.3. Diseño del convertidor. | 60 |
| 4.2.4. Control en modo de corriente programada, CMCP. | 62 |
| 5. Estrategia de administración de energía. | 65 |
| 5.1. Introducción. | 65 |
| 5.2. Sistema híbrido. | 65 |
| 5.3. Estrategia de control para la administración de energía. | 67 |
| 5.3.1. Ciclos de conducción. | 70 |
| 5.4. Simulación de la EMS en el sistema híbrido. | 71 |
| 5.4.1. Simulación 1 - Ciclo de conducción ECE 15. | 71 |
| 5.4.2. Simulación 2 - Ciclo de conducción EUDC. | 76 |
| 5.4.3. Simulación 3 - Ciclo de conducción HWFET. | 80 |
| 6. Conclusiones. | 85 |
| 6.1. Trabajos futuros. | 87 |
| A. Hojas de datos de los equipos. | 97 |
| B. Esquema de simulación del Filtro de Kalman Extendido. | 103 |
| C. Esquema de simulación de la PEMFC y el CMCP. | 105 |
| D. Esquema de simulación del banco de supercapacitores. | 107 |
| E. Publicaciones obtenidas. | 109 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 1.1. Estrategias de control para sistemas FC, SC y B. | 7 |
| 1.1. Estrategias de control en SEH. | 8 |
| 2.1. Clasificación de celdas de combustible. | 14 |
| 2.2. Clasificación de baterías. | 21 |
| 3.1. Validación curva de polarización. | 30 |
| 3.2. Parámetros del CEE de dos ramas para el SC. | 35 |
| 3.3. Índices de desempeño - Tipo 1. | 37 |
| 3.4. Índices de desempeño - Dinámica Tipo A. | 37 |
| 3.5. Índices de desempeño - Dinámica Tipo B. | 38 |
| 3.6. Coeficientes de las funciones que modelan a las resistencias y capacitores. | 45 |
| 3.7. Paso de predicción. | 46 |
| 3.8. Paso de corrección. | 46 |
| 3.9. Parámetros para la simulación del modelo de la batería. | 48 |
| 3.10. Condiciones iniciales para la simulación tipo 1. | 50 |
| 3.11. Índices de desempeño - Tipo 1. | 51 |
| 3.12. Condiciones iniciales para la simulación tipo 2. | 53 |
| 3.13. Índices de desempeño - Tipo 2. | 53 |
| 3.14. Condiciones iniciales para la simulación tipo 3. | 53 |
| 3.15. Índices de desempeño - Tipo 3. | 53 |
| 3.16. Condiciones iniciales para la simulación tipo 4. | 55 |
| 3.17. Índices de desempeño - Tipo 4. | 56 |
| 4.1. Parámetros reales del inductor y capacitor del convertidor buck. | 62 |
| 4.2. Parámetros del controlador PI del lazo externo en el CMPC. | 63 |
| 5.1. Estados de operación del sistema híbrido, parte I. | 67 |
| 5.2. Estados de operación del sistema híbrido, parte II. | 68 |
| 5.3. Modos de funcionamiento de los convertidores CD-CD. | 68 |
| 5.4. Parámetros del ciclo de conducción ECE 15. | 72 |

| | |
|---|----|
| 5.5. Valores típicos para un vehículo compacto. | 72 |
| 5.6. Parámetros del ciclo de conducción EUDC. | 76 |
| 5.7. Parámetros del ciclo de conducción HWFET. | 80 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía. | 1 |
| 1.2. Clasificación por área temática, Total de documentos: 2349. | 9 |
| 1.3. Clasificación por tipo de documento, Total de documentos: 2349. | 9 |
| 1.4. Clasificación de documentos por año, Total de documentos: 2349. | 9 |
| 2.1. Principio de operación de la celda de combustible. | 13 |
| 2.2. Capacitor de doble-capa eletroquímico. | 19 |
| 2.3. Capacidad de almacenamiento de energía de varios sistemas. | 21 |
| 3.1. CEE para la FC. | 24 |
| 3.2. Curva de polarización con la información requerida. | 27 |
| 3.3. Bloque de celda de combustible genérico en SimPowerSystems de Matlab. | 28 |
| 3.4. Parámetros del bloque, PEMFC H-1000. | 28 |
| 3.5. Curvas de polarización, PEMFC H-1000. | 29 |
| 3.6. Circuito eléctrico equivalente para el SC. | 30 |
| 3.7. Banco de pruebas para el supercapacitor. | 31 |
| 3.8. Banco de pruebas para el supercapacitor. | 33 |
| 3.9. Inicio de la fase de carga del SC. | 33 |
| 3.10. Inicio de la fase de carga del SC. | 34 |
| 3.11. Resultados durante el proceso de carga a corriente constante. | 36 |
| 3.12. Resultados durante la prueba dinámica. | 37 |
| 3.13. Resultados durante la prueba dinámica. | 38 |
| 3.14. CEE de dos ramas RC. | 39 |
| 3.15. Banco de pruebas para la batería. | 41 |
| 3.16. Voltaje a circuito abierto, Batería LiFePO ₄ | 43 |
| 3.17. Valores de R y C con base en el SOC para la batería LiFePO ₄ | 44 |
| 3.18. Valores de R y C con base en el SOC para la batería LiFePO ₄ | 44 |
| 3.19. Resultados durante el proceso de carga a corriente constante. | 51 |
| 3.20. Resultados durante el proceso de descarga a corriente constante. | 52 |
| 3.21. Resultados durante el proceso de carga a corriente pulsante. | 54 |

| | |
|--|-----|
| 3.22. Resultados durante el proceso de descarga a corriente pulsante. | 55 |
| 4.1. Convertidor CD-CD Buck. | 58 |
| 4.2. Diagrama a bloques del control en modo de corriente programada. | 62 |
| 4.3. Diagrama a bloques del lazo interno. | 62 |
| 4.4. Diagrama a bloques del lazo externo. | 63 |
| 5.1. Diagrama a bloques del sistema de energía híbrido. | 66 |
| 5.2. Diagrama de flujo de la EMS con base en estados de operación. | 69 |
| 5.3. Ciclo de conducción UDDS. | 71 |
| 5.4. Ciclo de conducción ECE 15. | 71 |
| 5.5. Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo ECE 15. | 72 |
| 5.6. Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 1. | 73 |
| 5.7. Perfil de corriente eléctrica para el sistema híbrido FC-SC-B, simulación 1. | 73 |
| 5.8. Respuesta de voltaje y potencia que entrega la PEMFC, simulación 1. | 74 |
| 5.9. Respuesta de voltaje y SOC del banco de SC, simulación 1. | 74 |
| 5.10. Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 1. | 75 |
| 5.11. Ciclo de conducción EUDC. | 76 |
| 5.12. Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo EUDC. | 77 |
| 5.13. Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 2. | 77 |
| 5.14. Respuesta de voltaje y potencia que entrega la celda de combustible, simulación 2. | 78 |
| 5.15. Respuesta de voltaje y SOC que entrega el banco de SC, simulación 2. | 78 |
| 5.16. Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 2. | 79 |
| 5.17. Ciclo de conducción HWFET. | 80 |
| 5.18. Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo HWFET. | 81 |
| 5.19. Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 3. | 81 |
| 5.20. Respuesta de voltaje y potencia que entrega la celda de combustible, simulación 3. | 82 |
| 5.21. Respuesta de voltaje y SOC del banco de SC, simulación 3. | 82 |
| 5.22. Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 3. | 83 |
| A.1. PSL-12450 lado A. | 97 |
| A.2. PSL-12450 lado B. | 98 |
| A.3. PowerStor Series XB lado A. | 99 |
| A.4. PowerStor Series XB lado B. | 100 |
| A.5. Horizon Fuel Cell Technologies, H1000. | 101 |
| A.6. Curvas de polarización, H1000. | 102 |

| | |
|--|-----|
| B.1. Bloque de la batería de LiFePO4. | 103 |
| B.2. Bloques del CEE para la batería y Filtro de Kalman Extendido. | 103 |
| B.3. Bloques del elemento R_i del CEE para la batería. | 104 |
| B.4. Bloques del elemento R_{T_s} y C_{T_s} del CEE para la batería. | 104 |
| B.5. Bloques del elemento R_{T_l} y C_{T_l} del CEE para la batería. | 104 |
| C.1. Esquema general de conexión. | 105 |
| C.2. Convertidor CD-CD Buck. | 105 |
| C.3. Diagrama a bloques de la estrategia CMCP. | 106 |
| D.1. Esquema general de conexión. | 107 |
| D.2. Esquema general del banco de supercapacitores. | 108 |
| D.3. Esquema general del supercapacitor. | 108 |

Nomenclatura

Lista de abreviaturas

| | |
|---------------------|---|
| AFC | Celda de combustible alcalina |
| CD | Corriente directa |
| DMFC | Celda de combustible de metanol directo |
| ESS | Sistema de almacenamiento de energía. |
| EUDC | Extra urban driving cycle |
| HEV | Vehículo eléctrico híbrido |
| HWFET | Highway fuel economy test |
| LF | Seguimiento de carga. |
| LiFePO ₄ | Litio Fosfato de Hierro |
| MCFC | Celda de combustible de carbono fundido |
| MEPT | Seguimiento del punto de máxima eficiencia. |
| PAFC | Celda de combustible de ácido fosfórico |
| PEM | Membrana de intercambio protónico |
| PEMFC | Celda de combustible de membrana de intercambio protónico |
| SC | Supercapacitores |
| SFTP | Supplemental federal test procedure |
| SOFC | Celda de combustible de óxido sólido |
| SQP | Programación cuadrática secuencial. |

| | |
|------|--|
| UC | Ultracapacitores |
| UDDS | Urban dynamometer driving schedule |
| UPS | Sistema de alimentación ininterrumpible. |

Capítulo 1

Introducción

Hasta el día de hoy en el mundo, las necesidades energéticas han sido satisfechas principalmente mediante el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, las tecnologías de generación de energía con base en este tipo de combustibles han resultado ser perjudiciales para el medio ambiente, algunos efectos son los siguientes: *cambio climático, contaminación del aire y emisión de gases de efecto invernadero* [1,2]. Por consiguiente, el problema de la contaminación ambiental representa una área de oportunidad concreta para diseñar plantas más eficientes o aprovechar las fuentes alternativas de energía, [3].

Sin embargo, uno de los inconvenientes de las fuentes de energía renovables es que la cantidad de energía que generan son altamente dependientes de las condiciones ambientales (*velocidad y cantidad del viento, radiación solar, etc.*) y por lo tanto, su producción es intermitente. Es por ello que un sistema de almacenamiento de energía (ESS ¹) se vuelve un elemento clave para el uso de este tipo de fuentes de energía y la cadena de suministro, [4]. La finalidad del ESS es almacenar alguna forma de energía para que se pueda utilizar posteriormente en una situación específica, en la Figura 1.1 se muestra la clasificación para sistemas de almacenamiento de energía eléctrica:



Figura 1.1: Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía.

¹Por sus siglas en inglés.

En particular, para este trabajo de tesis se consideran los siguientes sistemas de almacenamiento de energía eléctrica: **supercapacitores y baterías**. Por un lado, los supercapacitores o ultracapacitores (SC - UC) son capacitores eléctricos de doble capa que forman parte de un subconjunto en la categoría de dispositivos de almacenamiento electroquímico y algunas de sus ventajas son: *alta eficiencia, amplio rango de temperatura de operación, alta densidad de potencia y mayor tiempo de vida útil*. Por otra parte, entre los diferentes tipos de baterías que existen en el mercado, este trabajo se enfoca en las baterías del tipo LiFePO₄ por su *alta densidad de energía, baja auto-descarga, alta eficiencia y bajo riesgo de explosión por sobrecarga o cortocircuito*.

Ambos dispositivos se estudian en su integración con una de las tecnologías de conversión de energía más prometedoras, la celda de combustible. En la última década, varios tipos de celda de combustible se han propuesto y desarrollado considerando diferentes materiales en los electrodos y electrolito, catalizadores y temperatura de operación [5]. Existen seis tipos de celda de combustible reportados en la literatura: celda de combustible alcalina (AFC¹), celda de combustible de óxido sólido (SOFC¹), celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC¹) celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC¹), celda de combustible de carbono fundido (MCFC¹) y celda de combustible de metanol directo (DMFC¹).

Las celdas de combustible presentan varias ventajas sobre los sistemas de combustión convencionales, lo que les permite ser fuertes candidatos como dispositivos de conversión de la energía del futuro. Por supuesto que también presentan ciertas desventajas, pero pueden ser vistas como áreas de oportunidad para la investigación y desarrollo. A continuación se enlistan sus principales ventajas y desventajas, respectivamente:

- Reducen las emisiones nocivas, mayor eficiencia, modularidad, diversidad de aplicaciones y flexibilidad de combustible.
- Durabilidad, costo, carga parásita e infraestructura de hidrógeno.

Las celdas de combustible tienen un potencial prometedor en el mercado, se espera que el mercado global de la industria de celdas de combustible alcance los \$19.2 billones de dólares en el año 2020 con los Estados Unidos, Japón, Alemania, Corea del Sur y Canadá, como los principales países en el desarrollo-comercialización de las celdas de combustible [6]. En este trabajo de investigación se tiene un interés particular en el estudio de la celda de combustible tipo PEM en conjunto con los dos dispositivos para el almacenamiento de energía mencionados anteriormente, con el fin de proponer una estrategia para la administración de energía.

¹Por sus siglas en inglés.

1.1. Antecedentes.

En CENIDET se han realizado diversos trabajos de investigación referentes a celdas de combustible desde la pasada década, tanto en nivel maestría como en doctorado y en sus diversas áreas: control automático, electrónica de potencia, mecatrónica y mecánica. En esta sección, se presenta un resumen de algunos trabajos para dar un contexto a esta investigación.

Modelado de celdas de combustible.

E. Escobedo y L. Zamora en [7], desarrollan un modelo semi-analítico simple de celdas de combustible tipo PEM para predecir el comportamiento en estado estacionario y/o transitorio. Para el modelo en estado estacionario determinaron experimentalmente diversos parámetros involucrados en cada una de las ecuaciones que lo integran. Mientras que para el estado transitorio proponen dos modelos: un modelo dinámico con base en un circuito eléctrico equivalente y otro modelo dinámico unificado. Cada uno de los modelos se implementó en la plataforma MATLAB/SIMULINK y para validarlos se utilizaron datos experimentales de un sistema real.

S. Cruz en [8], mejora el modelo de celdas combustible que elaboraron Escobedo y Zamora en 2006. Debido a que considera los sobrepotenciales asociados con el ánodo: *activación, óhmico y de concentración*. Además, realiza un análisis cualitativo del desempeño de la celda ante diferentes grados de inundación y diseña un emulador de celdas de combustible para poder ser utilizado en el desarrollo de dispositivos electrónicos o en aplicaciones de control.

Control de celdas de combustible.

Adicionalmente a los trabajos enfocados en el modelado, también se han realizado diversos temas de investigación relacionados con la simulación y estrategias de control para celdas de combustible. A continuación se resumen los trabajos más significativos.

A. Castellanos en [9], estudia dos problemáticas relacionadas con las condiciones de operación: la insuficiencia de oxígeno y la diferencia de presión entre los compartimientos del ánodo-cátodo. Para dar solución a estas problemáticas utiliza un enfoque de regulación basado en una función de Lyapunov y con ello, propone un controlador robusto multivariable. Para el diseño de este controlador emplea el modelo desarrollado por Pukrushpan en [10]. Por último, el controlador se compara con otras estrategias de control reportadas en la literatura (sFF, dFF+PI, LQR+I y PINL) para evaluar su desempeño.

A. Wisther en [11] y *E. González* en [12], abordan en ambos trabajos el problema del modelado y control considerando subsistemas adicionales a la celda de combustible. En

el primero se dimensiona, modela y controla el subsistema de manejo de temperatura para el aire que entra al cátodo de la celda, mientras que en el segundo el estudio se concentra en el subsistema de aire que alimenta de oxígeno a la celda. Las estrategias de control que se emplean son un regulador sintonizable por colocación de polos de grado mínimo y un controlador digital usando colocación de polos con ajuste de la función de sensibilidad perturbación a la salida, respectivamente.

Sistemas Híbridos.

R. Schacht en [13], estudia la problemática de integrar en un ambiente de simulación la dinámica de tres dispositivos (celda de combustible tipo PEM, supercapacitor y convertidores estáticos de voltaje) empleando la Representación Energética Macroscópica como metodología de modelo. Dicha metodología permite conocer los flujos de energía que el sistema posee y con ello propone una estrategia de control por modelo inverso, lo cual permite administrar y distribuir la carga entre la celda y el supercapacitor.

J. Valdez en [14], desarrolla un sistema de manejo de energía jerárquico para un vehículo eléctrico utilitario basado en celdas de combustible a hidrógeno. En primera instancia, presenta el proceso de diseño-construcción del sistema de potencia compuesto por: fuentes de energía (arreglo de celdas de combustible, banco de baterías y banco de ultracapacitores), convertidores de potencia y circuitos auxiliares. Posteriormente, propone un enfoque jerárquico para la administración de energía considerando tres subsistemas que se encargan de ejecutar tareas en diferentes escalas de tiempo. Los resultados muestran un aumento en la eficiencia del consumo de hidrógeno, así como, la mejora en el dimensionamiento del sistema de potencia (masa y volumen).

C. Sandoval en [15], se presenta una arquitectura para la coordinación de una fuente de energía híbrida compuesta por un banco de supercapacitores y una celda de combustible tipo PEM. El objetivo de la arquitectura es regular de manera efectiva la demanda de un vehículo eléctrico con un rango de operación de 1 kW. Con el fin de optimizar el funcionamiento general, la estrategia propuesta se organiza en tres niveles jerárquicos y la demanda de potencia se determina en tiempo real a partir de la distribución de frecuencias, donde la frecuencia de corte se define con base en las capacidades dinámicas de las fuentes de energía.

1.2. Estado del arte.

Este trabajo de investigación se enfoca en un sistema de energía híbrido compuesto de una fuente de energía principal (celda de combustible) y dos fuentes de energía auxiliar (supercapacitor y batería), a lo largo de la última década este tipo de hibridación ha

tomado mucha relevancia principalmente en el sector automotriz con el incremento en la producción de vehículos híbridos y el desarrollo de vehículos eléctricos. A continuación se presentan algunos de los trabajos que utilizan las herramientas del control automático para la administración de energía en este tipo de sistema.

En [16], los autores presentan una estrategia de control para la administración de energía de un sistema híbrido compuesto por una PEMFC, un banco de baterías y un banco de supercapacitores. La estrategia tiene como principio utilizar a los supercapacitores para entregar la energía al bus de CD, las baterías se controlan como fuente de alimentación para mantener cargados a los supercapacitores y la PEMFC proporciona la energía que mantiene cargadas a las baterías. Para lograr el enlace de cada uno de los dispositivos con el bus de CD se emplean convertidores CD/CD, por un lado para la PEMFC se emplea un convertidor de tipo unidireccional, mientras que para las baterías y los supercapacitores se utilizan convertidores bidireccionales de 2-cuadrantes. Ahora bien, con el propósito de regular el voltaje en el bus de CD, se diseñan lazos de control en voltaje para cada uno de los dispositivos que conforman la fuente híbrida junto con su convertidor, los controladores son del tipo proporcional (P) y proporcional-integral (PI). Una de las características más importantes del trabajo es la validación experimental que se obtienen de un sistema a escala, los resultados demuestran un excelente desempeño de la estrategia ante un ciclo de conducción.

En [17,18], se explora la idea de utilizar lógica difusa para la administración de energía en un HEV¹, compuesto por un dispositivo primario de energía (PEMFC) y dos dispositivos auxiliares de energía (batería y supercapacitor). En esta configuración híbrida, los dispositivos auxiliares están conectados al bus de CD, la batería de manera directa y el SC mediante un convertidor buck-boost. Dos importantes ventajas resultan de utilizar esta configuración, por un lado se incrementa el tiempo de vida la batería, y por el otro, los picos de potencia que demanda la carga los suministra el SC. Con la finalidad de analizar y evaluar la estrategia de administración de energía, ambos trabajos simulan el sistema completo utilizando el software MATLAB/Simulink y realizando pruebas con ciclos de manejo, en [17] de manera particular con el UDDS¹, mientras que en [18] con el SFTP-US06¹, HWFET¹, UDDS¹ y ECE+EUDC¹.

En [19], los autores presentan una estructura de un sistema híbrido (red eléctrica, PEMFC, batería, supercapacitor) en un sistema UPS¹ monofásico de baja potencia y alta frecuencia, con la finalidad de reducir costos, mejorar el desempeño y disminuir las pérdidas en el mismo. En esta aplicación, la estrategia para la administración de energía es dependiente de cuatro modos de operación: *red de suministro eléctrico, celda de combus-*

¹Por sus siglas en inglés.

tible, batería/supercapacitor y bypass. Con el objetivo de prevenir una degradación en la PEMFC y mejorar sus desempeño, se plantean cinco estrategias para la administración y control inteligente de la energía en el sistema UPS: monitoreo de la energía y potencia de la carga en el UPS, monitoreo de los cambios de potencia de la carga en el UPS y la PEMFC, monitoreo de la potencia de la carga en el UPS y la energía de la PEMFC, monitoreo de la potencia de la batería o supercapacitor y finalmente el monitoreo de la potencia de la carga en el UPS, además del voltaje y corriente de salida en el convertidor de CD/CD. Se realizan pruebas experimentales con el fin de validar el sistema UPS híbrido y los resultados indican que las estrategias para la administración de energía en el sistema son adecuadas para aplicaciones portátiles, de respaldo-emergencia y vehículos.

En [20], se lleva a cabo un estudio comparativo de cinco estrategias de control con el objetivo de evaluar y seleccionar la más adecuada para un HEV con este tipo de hibridación. Las estrategias que se consideran son las siguientes: estrategia con base en modos de operación del vehículo, estrategia con base en lazos de control cascada, estrategia con base en la minimización de consumo de combustible, estrategia con base en lógica difusa y estrategia con base en control predictivo. Cada una de éstas se implementan con las mismas restricciones y limitaciones en las fuentes de energía y buscan calcular las señales de referencia de potencia para la FC y baterías, mientras que los SC's se emplean para controlar el voltaje en el bus de CD. Además, las estrategias fueron caracterizadas, evaluadas y comparadas con los datos reales de un ferrocarril urbano. Finalmente, los resultados muestran que la estrategia con base en la minimización de consumo de combustible es la más adecuada ya que disminuye el consumo de hidrógeno y es más sencilla de implementar.

En [21], los autores diseñan una estrategia para la administración de energía para el mismo tipo de sistema híbrido mencionado al inicio de la sección. La estrategia está basada en un controlador MEPT¹ y un controlador LF¹, los cuales generan las corrientes de referencia para suministrar de manera apropiada el oxígeno y el hidrógeno a la PEMFC. Además, el principal objetivo de la estrategia de administración de energía es sostener eficientemente la demanda de carga, reducir el número de baterías y operar la celda de combustible óptimamente. Este trabajo presenta resultados de simulaciones numéricas realizadas en MATLAB/Simulink empleando un perfil de corriente de carga constante y un perfil de corriente de carga dinámico. Finalmente, se concluye que la estrategia para la administración de energía permite satisfacer la demanda de carga y logra que la celda de combustible opere de manera eficaz alrededor del MEP.

En [22], se desarrolla un sistema de propulsión híbrida para un tren compuesto por dos PEMFC, dos baterías y dos bancos de supercapacitores. Las celdas de combustible actúan como la fuente principal de energía para el tren, mientras que, las baterías y su-

percapacitores son utilizados como sistemas auxiliares de energía para complementar la potencia del tren durante su aceleración y para recuperar energía en el frenado. Para lograr esto, diseñan una máquina de estado con base en un control caído para la administración de energía y la coordinación entre sus diferentes fuentes, sus objetivos son: *distribuir la demanda de potencia, mantener condiciones seguras de operación en las celdas y garantizar una mejor eficiencia energética del sistema completo*. Para su validación, realizan una prueba real en el tren y los resultados demuestran que la estrategia garantiza una operación estable de las fuentes de energía durante el ciclo de conducción, satisface las demandas súbitas de potencia y mejora la eficiencia de todo el sistema.

En la siguiente tabla se muestran otras estrategias de control utilizadas para este sistema de energía híbrido:

Tabla 1.1: Estrategias de control para sistemas FC, SC y B.

| <i>Autor</i> | <i>EMS</i> | <i>Observaciones</i> |
|--------------|---|---|
| [23] | Programación cuadrática secuencial (SQP ¹). | <p>El algoritmo SQP se diseña con base en una estrategia del mínimo consumo equivalente.</p> <p>La función costo que utiliza el algoritmo considera el consumo de hidrógeno de tres fuentes de energía.</p> <p>La estrategia de control jerárquico propuesto consiste en un lazo de control de dos niveles: el nivel alto para la administración de energía entre las fuentes y el bajo nivel para el control de los convertidores CD/CD.</p> |
| [24] | Control retroalimentado con base en reglas | <p>El algoritmo de control decide que fuente de energía se debe activar para entregar potencia a la carga y al mismo tiempo maximizar la conservación de energía.</p> <p>La aceleración del pedal, el SOC de la batería y la velocidad del vehículo son las señales de control.</p> |
| [25] | Control con base en plaititud y lógica difusa. | <p>La estrategia de control con base en plaititud, administra la energía entre la fuente principal y los dispositivos auxiliares.</p> <p>La estrategia de control con base en lógica difusa se utiliza para compartir la potencia entre el banco de SC y el banco de baterías en el ESS.</p> <p>La estrategia permite gestionar la energía en el sistema y predecir su comportamiento, sin conmutaciones entre los algoritmos, aún en estados transitorios.</p> |

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

Tabla 1.1: Estrategias de control en SEH.

| Autor | EMS | Observaciones |
|-------|--|---|
| [26] | Control por modos deslizantes | <p>El algoritmo de control tiene como finalidad mantener una entrega de energía promedio constante mediante la FC y que la potencia transitoria sea suministrada por los SC's.</p> <p>Asimismo, pretende recuperar energía a través de la carga de los SC's durante el frenado.</p> <p>La superficie deslizante del control está en función de la corriente en el bus de CD, la corriente en la carga, el voltaje y corriente de los SC's.</p> |
| [27] | Control óptimo de flujo de potencia activa | <p>La estrategia de control se diseña con base en las limitaciones físicas de costo, masa y volumen, así como, cambios en la carga.</p> <p>También se define una función costo cuyo objetivo es minimizar el error cuadrático entre las variables deseadas y sus valores actuales.</p> <p>Para la optimización se utiliza el SOC actual de la batería, el SOC de la batería al final del ciclo y el flujo de potencia promedio como parámetros de la función costo.</p> |

Tradicionalmente, los sistemas de almacenamiento de energía se han modelado mediante el cálculo clásico. Sin embargo, en los últimos años diversos autores han propuesto un modelado alternativo que implica el uso de operadores diferenciales e integrales de orden no entero (también llamado *Cálculo Fraccionario*). Este tipo de operadores tienen la capacidad de describir el efecto de memoria, las propiedades fractales y la memoria a largo plazo de los sistemas. Además, consideran la historia, las propiedades hereditarias y los efectos distribuidos no locales que son esenciales para describir disipaciones [28]. Entre los principales libros dedicados al cálculo fraccionario destacan [29-31], con respecto al modelado de sistemas de almacenamiento de energía con el uso de estos operadores en [32-34] se pueden encontrar interesantes trabajos reportados en la literatura.

Otros trabajos de investigación relacionados con la administración de energía con base en reglas son reportados en [35-37]. Finalmente, a manera de resumen las gráficas mostradas en las Figuras: 1.2, 1.3 y 1.4 muestran la tendencia de los últimos 9 años respecto a este tópico y se obtuvieron directamente de la herramienta SCOPUS.

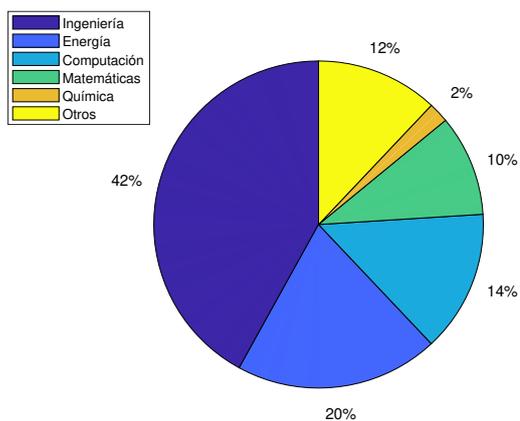


Figura 1.2: Clasificación por área temática, Total de documentos: 2349.

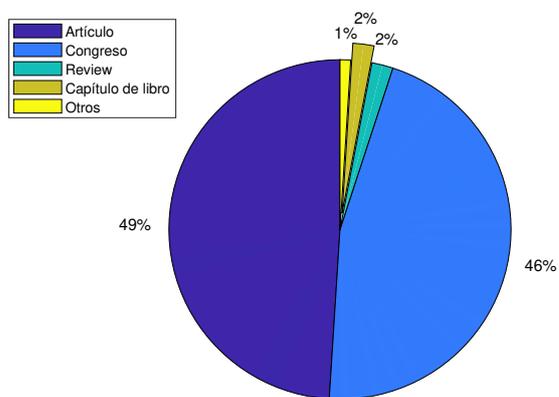


Figura 1.3: Clasificación por tipo de documento, Total de documentos: 2349.

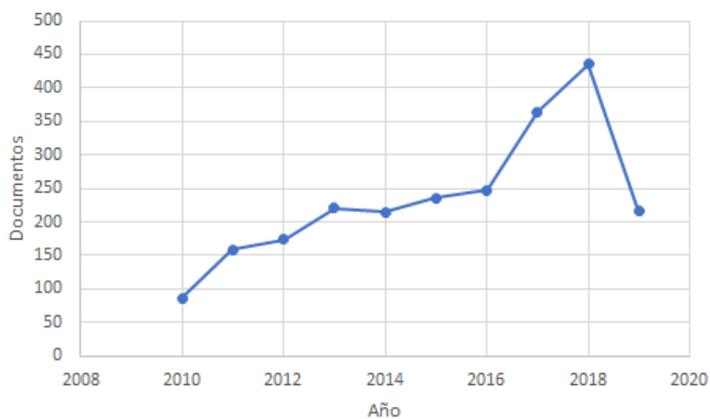


Figura 1.4: Clasificación de documentos por año, Total de documentos: 2349.

1.2.1. Conclusiones.

Con base en la revisión realizada del estado del arte, se pueden realizar las siguientes conclusiones.

- El problema de la administración de energía se ha abordado mediante los siguientes dos enfoques: por un lado, los trabajos estudian varias configuraciones en la conexión física de los elementos que conforman la fuente híbrida y, por el otro lado, los trabajos proponen estrategias de control para la administración de energía con base en una configuración específica.
- Las estrategias para la administración de energía se diseñan con base en alguno o varios de los siguientes objetivos: *mejorar la eficiencia del sistema, incrementar el tiempo de vida útil de los dispositivos, minimizar el consumo de combustible, mejorar la respuesta transitoria, distribuir y satisfacer la demanda de corriente, etcétera.*
- La administración de energía en sistemas híbridos con celdas de combustible es un tema vigente y con diversas áreas de oportunidad en términos de la aplicación de estrategias de control (orden entero y no entero) y que se pueden complementar con el desarrollo de sistemas de supervisorios para el diagnóstico de fallas.
- Además, hay retos en lo concerniente con los sistemas de almacenamiento de energía, por ejemplo: reducción y optimización del tamaño y peso del dispositivo, mejorar la eficiencia y su tiempo de vida útil, desarrollo de nuevos enfoques para la estimación del estado de carga y estimación del estado de salud, etcétera.

1.3. Definición del problema.

Uno de los principales problemas del apilamiento de celdas de combustible es su lenta respuesta dinámica con respecto a los cambios en la carga. Esta demanda de energía rápida que ocurre durante la operación del sistema provocará una caída de voltaje en un periodo de tiempo muy corto, lo cual se conoce como fenómeno de insuficiencia de combustible². Este fenómeno es una causa de operación insegura para el apilamiento de celdas de combustible ya que la degrada, lo que puede provocar un daño severo y permanente al sistema; por lo tanto, este fenómeno debe evitarse absolutamente [38].

Por consiguiente, para utilizar un apilamiento de celdas de combustible en aplicaciones dinámicas (p.ej. en automóviles) el sistema eléctrico debe tener al menos una unidad

²En inglés *fuel starvation*.

de energía auxiliar, lo cual permite mejorar el desempeño del sistema entero. Existen muchos tipos de unidades auxiliares para compensar el problema de la respuesta en la PEMFC, pueden ser **unidades de almacenamiento de energía**, o bien, pueden ser **fuentes secundarias de energía**. En este trabajo de investigación se ha decidido utilizar a los primeros como unidades auxiliares, en específico, los supercapacitores y las baterías ya que ayudan a combatir el fenómeno de insuficiencia de combustible, y además, permiten ampliar el rango en la temperatura de operación y tener tiempos de respuesta más rápidos.

Debido a las características propias de cada una de las fuentes de energía que conforman al sistema híbrido, su eficiencia y economía de combustible dependen principalmente de una estrategia de administración de energía apropiada, así como, de una topología de acondicionamiento de potencia bien diseñada. Por estas razones, el reto hoy en día está precisamente en la elaboración de la estrategia de control para la administración de energía debido a la complejidad y dificultad que resulta de la integración entre todos los elementos que conforman al sistema global, ya que se debe garantizar el buen desempeño de las fuentes de energía y proporcionar una alimentación estable ante la demanda de carga (constante o variable).

1.4. Objetivos.

1.4.1. General.

Formular una estrategia de control para la administración de energía en una fuente híbrida compuesta de un sistema de celdas de combustible tipo PEM, supercapacitores y baterías; interconectado a un sistema de adecuación de potencia.

1.4.2. Específicos.

- Definir un sistema de acondicionamiento de potencia para cada una de las fuentes de energía con la finalidad de regular el voltaje en el bus del sistema.
- Diseñar estrategias de control a nivel local para el sistema de acondicionamiento de potencia en cada una de las fuentes de energía.
- Proponer una estrategia de control global que permita administrar la energía de la fuente híbrida para satisfacer la demanda de potencia de la carga, buscando maximizar la eficiencia y el tiempo de vida de los componentes.
- Desarrollar un simulador de una fuente de energía híbrida sobre una plataforma de cálculo numérico estandarizada.

1.5. Estructura del documento.

A continuación se presenta y describe la manera en que está estructurado el documento de tesis.

En el Capítulo 2 se revisa el marco teórico de cada uno de los elementos que conforman el sistema de energía híbrido, incluyendo: definiciones, características, ventajas y desventajas. También, se considera la estructura del sistema híbrido completo.

En el Capítulo 3 se presenta el modelo matemático reportado en la literatura que se utilizó para cada una de las fuentes de energía en este trabajo, además se describe la metodología que se utilizó para calcular cada uno de los parámetros del modelo; finalmente, para el caso de los supercapacitores y baterías se muestra el desarrollo de un sensor virtual para la estimación del SOC.

El Capítulo 4 está dedicado al sistema de adecuación de potencia para cada una de las fuentes de energía, en primer lugar se elabora el modelo matemático y en segundo lugar, se diseñan los controladores locales para cada uno de los convertidores y se realizan simulaciones numéricas para evaluar su funcionamiento.

El Capítulo 5 se enfoca en el diseño e implementación de la estrategia para la administración de energía del sistema híbrido; también se muestran las simulaciones numéricas ante diversas condiciones de operación y los resultados obtenidos.

Por último, en el Capítulo 6 se evalúa el desempeño de la estrategia con base en los resultados obtenidos, y a partir de ello se presentan las conclusiones finales y trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción.

En esta sección se presentan los conceptos teóricos, características, ventajas y desventajas de cada una de las fuentes de energía que conforman el sistema híbrido con el objetivo de comprender su funcionamiento e identificar los parámetros que se tomarán en cuenta al momento de diseñar la estrategia para la administración de energía, así como, en su interconexión con el convertidor CD/CD correspondiente.

2.2. Celda de combustible.

2.2.1. Introducción.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química de un combustible directamente en energía eléctrica, consiste de un electrolito colocado entre dos electrodos como se muestra en la siguiente figura:

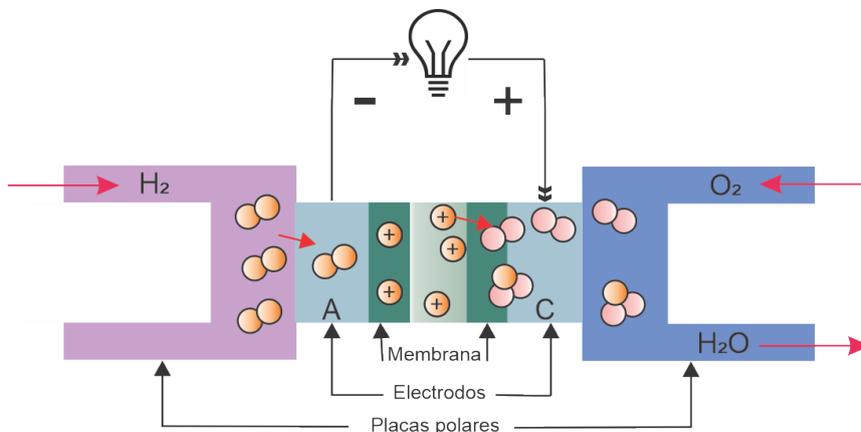


Figura 2.1: Principio de operación de la celda de combustible.

En algunos aspectos es semejante a la batería, sin embargo, se diferencia en que requiere una alimentación constante de combustible y oxidante.

Su principio de funcionamiento es el siguiente: el oxígeno pasa sobre un electrodo y el hidrógeno por el otro, cuando el hidrógeno es ionizado pierde un electrón, y al ocurrir esto, ambos se dirigen hacia el segundo electrodo por caminos diferentes. El hidrógeno viaja a través del electrolito hacia el otro electrodo, mientras que el electrón se mueve a través de un material conductor. Como resultado de este procesos se obtiene agua, corriente eléctrica y calor útil.

Tal y como se mencionó en el capítulo 1, las celdas de combustible son una familia de tecnologías que utilizan diferentes materiales en los electrodos y electrolito, además de operar a diferentes temperaturas (Tabla 2.1). Por lo tanto, cada tipo de FC tiene características que la hacen más apropiada para ciertas aplicaciones.

Tabla 2.1: Clasificación de celdas de combustible.

| Celda de combustible | Catalizador | Combustible | Oxidante | Temperatura (°C) |
|----------------------|-------------|-------------------------------------|----------------|------------------|
| PEM | Pt | H ₂ | O ₂ | 40-90 |
| AFC | Pt/Pd Ni | H ₂ | O ₂ | 60-220 |
| PAFC | Pt | H ₂ | O ₂ | 160-220 |
| MFCF | Ni | H ₂ HC _{Ligero} | O ₂ | 600-700 |
| SOFC | Ni | H ₂ HC _{Ligero} | O ₂ | 600-1200 |
| DMFC | Pt Pt-Ru | CH ₃ OH | O ₂ | 90-130 |

2.2.2. Cinética del electrodo.

La operación de la celda de combustible parte de las siguientes reacciones electroquímicas que ocurren simultáneamente en la interfaz entre el electrolito iónico conductor y el electrodo:

Ánodo.



Cátodo.



Debido a que hay presencia de gases en las reacciones electroquímicas de la celda de combustible, los electrodos deben ser porosos para permitir que éstos lleguen, así como el agua del producto salga de los sitios donde ocurre la reacción.

Velocidad de reacción.

Las reacciones electroquímicas involucran tanto una transferencia de carga eléctrica como un cambio en la energía de Gibbs, [39]. La velocidad de una reacción electroquímica está determinada por una barrera de energía de activación que la carga debe superar al pasar del electrolito a un electrodo sólido, o viceversa. Puede definirse como la velocidad con la que los electrones son liberados o consumidos.

La densidad de corriente es la corriente (de electrones o iones) por unidad de área de la superficie. A partir de la ley de Faraday se deduce que la densidad de corriente es proporcional a la carga transferida y al consumo de reactivo por unidad de área:

$$i = nFj, \quad (2.3)$$

donde nF es la carga transferida y j es el flujo de reactante por unidad de área.

En equilibrio, la corriente total es cero a pesar de que la reacción se produce en ambas direcciones simultáneamente. La velocidad a la que estas reacciones preceden al punto de equilibrio se le conoce como *densidad de corriente de intercambio*.

Densidad de corriente de intercambio.

La densidad de corriente de intercambio (i_0), es una medida de las velocidades de las reacciones anódicas y catódicas que ocurren en un electrodo cuando está en su potencial reversible, depende de la concentración y de la temperatura. Si esta densidad se da en términos de la superficie real del catalizador, la densidad de corriente de intercambio efectiva a cualquier temperatura y presión está dada por la siguiente ecuación:

$$i_0 = i_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right], \quad (2.4)$$

donde:

i_0^{ref} es la densidad de corriente de intercambio de referencia.

a_c es el área específica del catalizador.

L_c es la carga de catalizador.

P_r es la presión parcial del reactante.

P_r^{ref} es la presión de referencia.

γ es un coeficiente dependiente de la presión (0.5 a 1.0).

E_c es la energía de activación.

R es la constante universal de los gases.

T es la temperatura.

T_{ref} es la temperatura de referencia.

Si la densidad de corriente de intercambio es alta, la superficie del electrodo es más activa. En una celda de combustible hidrógeno/oxígeno, la densidad de corriente de intercambio en el ánodo es mucho mayor que en el cátodo. Cuanto mayor sea la densidad de corriente de intercambio, menor será la barrera de energía que la carga debe superar al pasar del electrolito a la superficie del catalizador, y viceversa.

2.2.3. Pérdidas de voltaje.

El voltaje teórico de una celda es 1V. Si la celda se alimenta con gases reactantes pero el circuito eléctrico no se cierra, no se genera ninguna corriente y por lo tanto, uno esperaría que el voltaje de la celda corresponda al teórico. Sin embargo, en la práctica este voltaje (*denominado voltaje a circuito abierto*) es menor que el potencial teórico. Esto da indicios de que existen algunas pérdidas en la celda aun cuando no se genera corriente eléctrica.

Existen diferentes causas que pueden provocar éstas pérdidas, por ejemplo:

- La cinética de las reacciones electroquímicas.
- La resistencia iónica y eléctrica interna.
- Dificultades de los reactantes en alcanzar los sitios donde se lleva a cabo la reacción.
- Corrientes de fuga.
- Cruce de los reactantes.

Polarización por activación.

Es la energía necesaria para que la reacción electroquímica funcione. Está asociada con una cinética lenta en los electrodos. Cuanto más grande sea la densidad de corriente de intercambio, menores serán las pérdidas por polarización de activación. Este tipo de pérdida ocurre tanto en el ánodo como en el cátodo.

La polarización de activación en la reacción de oxidación del hidrógeno es mucho menor que la polarización de activación en la reacción de reducción del oxígeno. Una manera sencilla de calcular la polarización de activación es mediante la ecuación de Tafel:

$$\Delta V_{act} = a + b \log(i), \quad (2.5)$$

donde los coeficientes a y b se determinan de la siguiente manera:

$$a = 2.3 \frac{RT}{\alpha F} \log(i_0), \quad (2.6)$$

$$b = 2.3 \frac{RT}{\alpha F}. \quad (2.7)$$

Pérdidas óhmicas.

Las pérdidas óhmicas se presentan por la resistencia al flujo de iones en el electrolito y la resistencia al flujo de electrones a través de los componentes conductores de electricidad en la celda de combustible. Estas pérdidas pueden determinarse mediante la ley de Ohm:

$$\Delta V_{ohm} = iR_i, \quad (2.8)$$

donde i es la densidad de corriente y R_i es la resistencia interna total de la celda (resistencia de contacto, electrónica e iónica).

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,c}. \quad (2.9)$$

Polarización por concentración.

Este tipo de polarización ocurre cuando el reactante se consume muy rápido en el electrodo debido a la reacción electroquímica, de manera que se generan gradientes de concentración. La concentración de reactante en la superficie del catalizador depende de la densidad de corriente, es decir: cuanto mayor sea la densidad de corriente, menor será la concentración en la superficie.

El reactivo se consume a la misma velocidad que alcanza la superficie, y como resultado, la concentración del reactante y la superficie del catalizador es igual a cero. Y por esta razón, una celda de combustible no puede producir más allá de su corriente límite.

Esta pérdida de voltaje se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right). \quad (2.10)$$

2.2.4. Potencial de la celda: curva de polarización.

Considerando que la polarización por activación y concentración pueden ocurrir tanto en el ánodo como en el cátodo. El voltaje en la celda de combustible es:

$$E_{celda} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_a - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_c - \Delta V_{ohm}. \quad (2.11)$$

Además, una relación entre el voltaje de la celda de combustible con la densidad de corriente (*curva de polarización de la celda*) es:

$$E_{celda} = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i + i_{loss}}{i_0} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) - iR_i. \quad (2.12)$$

Las pérdidas por activación y concentración se agrupan en la ecuación [2.11](#), sin embargo, la mayoría de las pérdidas ocurren en el cátodo debido a la lentitud en la reacción de reducción del oxígeno.

2.2.5. Aplicaciones de la celda de combustible.

Las celdas de combustible pueden generar desde una fracción de cientos de Watts hasta kiloWatts. Por lo tanto, pueden emplearse en casi cualquier aplicación que requiera energía eléctrica. A lo largo de los últimos años se han mostrado diferentes aplicaciones para este tipo de dispositivos y las cuales pueden agruparse en las siguientes tres áreas principales:

- Las aplicaciones portátiles para las celdas de combustible se enfocan en dos principales mercados. En primer lugar, en los generadores de energía portátiles diseñados para: *lámparas de uso personal, señalización portátil, vigilancia y sistemas de ayuda para emergencia*. En segundo lugar, para dispositivos electrónicos de consumo: *laptops, celulares, radios y videocámaras*, por mencionar algunos.
- Las celdas de combustible también pueden desempeñar un papel integral en los sectores de generación de energía estacionarios industriales, comerciales y residenciales. Pueden utilizarse para ser interconectados a la red pública eléctrica y sus aplicaciones incluyen: *fuentes de energía ininterrumpible (UPS), fuentes de energía área-remota y energía distribuida*.

- La industria del transporte es una de las principales áreas en el desarrollo de tecnologías de energía limpias, ya que este tipo de industria contribuye en un 17 % a la emisión de gases de efecto invernadero cada año. En consecuencia, es necesario el desarrollo de alternativas de transporte amigables con el medio ambiente, y es justo donde aparecen las celdas de combustible; las cuales ofrecen a la industria del transporte cero emisiones dañinas sin disminuir la eficiencia del sistema de propulsión de los vehículos.

En general, el diseño un sistema con celda de combustible depende de cada aplicación, así como, de los requerimientos en específico: eficiencia, tamaño, peso, potencia, combustible, etc.

2.3. Supercapacitor.

Los supercapacitores también llamados ultracapacitores, son capacitores eléctricos de doble capa que forman un subconjunto dentro de la categoría general de dispositivos de almacenamiento de energía electroquímicos, en particular, en los capacitores electroquímicos. Consisten de dos electrodos aislados galvánicamente por un separador sumergido en un electrolito, como se muestra en la Fig. 2.2.

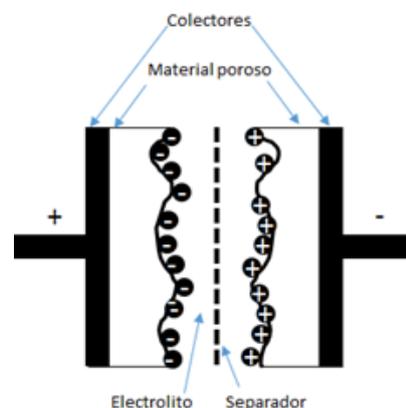


Figura 2.2: Capacitor de doble-capa electroquímico.

Los electrodos se forman al depositar un material poroso (carbón activado) sobre una película metálica (generalmente aluminio). Por otra parte, la función del electrolito es asegurar la movilidad de los iones hacia los electrodos, el electrolito puede ser sólido, pero generalmente es líquido. Su elección resulta de un compromiso entre el voltaje y la conductividad iónica.

Por último, el separador es una lámina de papel. Su finalidad es aislar y prevenir cualquier contacto galvánico entre los electrodos, sin embargo, debe ser capaz de sumergirse

en el electrolito sin reducir la conductividad iónica del mismo.

Por otra parte, las propiedades del SC dependen de su proceso de manufactura, por ejemplo, la elección de los electrolitos que permiten alcanzar las conductividades iónicas requeridas en el dispositivo conducen a voltajes máximos que no exceden los 3 V. Por lo tanto, para satisfacer las necesidades de energía en una aplicación particular se deben utilizar un banco de supercapacitores.

Sin embargo, la conexión entre un banco de supercapacitores y su aplicación no puede ser realizada directamente, ya que su voltaje varía de acuerdo a su estado de carga. Es por ello que debe emplearse un convertidor estático (CD/CD o CD/CA) de manera conjunta para adaptar los niveles de voltaje, mientras se controlan las *corrientes de carga y descarga*.

Entre las ventajas que tiene este dispositivo se pueden mencionar las siguientes:

- Alta eficiencia.
- Alto ciclo de vida útil.
- Valores grandes de capacitancia.
- Amplio rango de temperatura de operación.
- Sin desgaste electroquímico ya que no involucran la transferencia de masa.

2.4. Batería.

Es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos directamente en energía eléctrica por medio de una reacción óxido-reducción electroquímica. En el caso de un sistema recargable, la batería es recargada por un proceso inverso. Los elementos que conforman una batería son tres: ánodo, cátodo y electrolito. Las baterías pueden clasificarse de la siguiente manera, [40]:

- **Primarias:** *No son capaces de ser recargadas, por lo tanto, una vez descargadas son desechadas. Tienen una buena vida útil, son fáciles de usar y de tamaño pequeño.*
- **Secundarias:** *Pueden ser recargadas, mediante el paso de corriente en dirección opuesta a la corriente de descarga. Tienen buen desempeño, alta velocidad de descarga y alta densidad de potencia.*

En la tabla 2.2 se reporta los diferentes tipos de batería con algunas de sus características técnicas, respectivamente.

Tabla 2.2: Clasificación de baterías.

| Batería | Energía específica $\frac{Wh}{kg}$ | $R_{interna}$ | Voltaje/Celda | Toxicidad |
|---------------------|------------------------------------|---------------|---------------|-----------|
| Ácido-Plomo | 30-50 | Muy baja | 2.0 | Alta |
| NiCD | 45-80 | Muy baja | 1.2 | Alta |
| NiMH | 60-120 | Baja | 1.2 | Baja |
| LiCoO ₂ | 150-250 | Baja | 3.6 | Baja |
| LiMnO ₂ | 100-150 | Baja | 3.8 | Baja |
| LiFePO ₄ | 90-120 | Baja | 3.3 | Baja |

La máxima energía que puede ser entregada por el sistema electroquímico es con base en los *tipos* de materiales activos que son utilizados (determinan el voltaje) y en la *cantidad* de materiales activos que son utilizados (determinan la capacidad Ah).

A continuación se muestra la gráfica de Ragone, la cual nos permite comparar dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en términos de energía específica y potencia específica; es decir, la energía y potencia normalizada a la masa del dispositivo, [40]. En esta gráfica se puede observar que en general las baterías almacenan una mayor cantidad de energía en comparación con los supercapacitores; sin embargo, la tasa a la que pueden entregar ésta misma (es decir, la potencia) es menor con respecto a los supercapacitores. En otro formato, la comparación puede ser energía específica (Wh/kg) versus la densidad de energía (Wh/L).

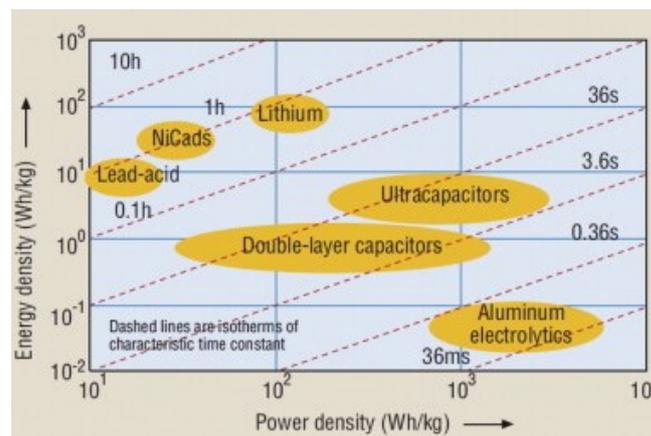


Figura 2.3: Capacidad de almacenamiento de energía de varios sistemas.

Capítulo 3

Modelo de las fuentes de energía.

3.1. Introducción.

En esta capítulo se presenta los modelos que se eligieron a partir de la revisión de la literatura para cada una de los elementos que conforman la fuente de energía híbrida. El propósito de contar con un modelo es que permite reproducir el comportamiento estático o dinámico, bajo diferentes operaciones de condición. Esto por un lado, ayuda a entender la manera en que operan tales dispositivos; y por el otro, permite realizar simulaciones numéricas sin poner en riesgo a los mismos y al operador.

3.2. Celda de combustible.

En la literatura se pueden encontrar una gran variedad de modelos para celdas de combustible, cada uno de ellos se pueden clasificar principalmente en las siguientes categorías: *químicos*, *empíricos* y *eléctricos*. Las diferentes categorías cuentan con características particulares, así como, ventajas y desventajas. Por lo tanto, la elección del tipo de modelo depende completamente de la aplicación.

La primer categoría de modelos toma en cuenta fenómenos complejos que ocurren dentro de la celda de combustible, tales como: transporte de masa, transferencia de calor y difusión. Por consiguiente, para su formulación se requiere de muchas ecuaciones y parámetros. Si bien, resultan ser muy precisos al momento de reproducir el comportamiento de la celda de combustible, el proceso de implementación en ambientes de simulación numérica es complicado. Algunos trabajos reportados con este tipo de modelo son [41-43]. Por otra parte, los modelos que pertenecen a la segunda categoría se elaboran a partir de los datos que se obtienen de experimentos realizados en laboratorio (en algunos casos con equipos muy especializados). Dichos datos permiten representar a la celda de com-

bustible mediante expresiones empíricas o tablas de búsqueda². Una de las principales desventajas que tiene este tipo de modelo es que no puede representar el efecto que tienen algunos parámetros de operación, por ejemplo: tasa de flujo, presión de los gases de entrada, temperatura. En [44–46] se puede encontrar ejemplos de trabajos pertenecientes a esta categoría.

La tercer categoría considera modelos que se obtienen a partir de un circuito eléctrico equivalente compuesto por elementos pasivos y activos, [47–49]. Este tipo de modelo no considera los fenómenos termodinámicos de la celda, pero si pueden emular las características eléctricas de la celda (voltaje y corriente). Los parámetros del modelo se pueden determinar a partir de diversas pruebas en la celda de combustible, por ejemplo: *espectroscopía de impedancia electroquímica, respuesta en frecuencia, perfiles de corriente, etc.* Una importante ventaja que tienen con respecto a los otros tipos de modelo es que su simulación numérica es más fácil de llevar a cabo.

De las tres categorías anteriores, para este trabajo de tesis se optó por emplear un modelo genérico que combina las características de los modelos químicos y eléctricos propuesto en [50]. Este modelo además de ser fácil de utilizar en ambientes de simulación numérica, tiene la ventaja de que para su parametrización sólo es necesario la hoja de datos del equipo que proporciona el fabricante.

3.2.1. Modelo.

El apilamiento de celdas de combustible se representa por medio de una fuente de voltaje controlada en serie con una resistencia constante y un diodo que evita el flujo de corriente negativa hacia la celda, en la Fig. 3.1 se muestra el esquema:

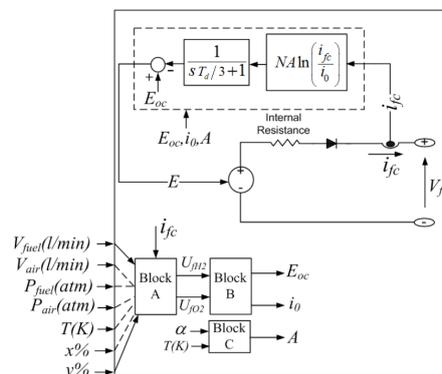


Figura 3.1: CEE para la FC.

²En inglés *look-up table*.

La fuente de voltaje controlada está descrita por la ecuación:

$$E = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \cdot \frac{1}{s \left(\frac{T_d}{3} \right) + 1}, \quad (3.1)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc}. \quad (3.2)$$

La ecuación (3.1) representa el voltaje del apilamiento de celdas de combustible tomando en cuenta únicamente las pérdidas por activación. El término de la función transferencia en dicha ecuación representa el retardo en el voltaje de salida del apilamiento cuando ocurre un cambio súbito en la corriente de la misma. La ecuación (3.2) proporciona el voltaje total del apilamiento de celdas de combustible considerando las pérdidas óhmicas.

Ahora bien, los términos de voltaje a circuito abierto (E_{oc}), la corriente de intercambio (i_0) y la pendiente de Tafel (A) en el circuito de la Fig. 3.1 dependen de las presiones, temperaturas, composición y tasa de flujo de los gases. Para determinar sus valores se utilizan las siguientes expresiones:

$$E_{oc} = K_c E_n, \quad (3.3)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} \cdot e^{\frac{-\Delta G}{RT}}, \quad (3.4)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F}. \quad (3.5)$$

Y que se calculan en los bloques A, B y C de la Fig. 3.1. En primer lugar, las tasas de conversión de hidrógeno y oxígeno se obtienen del bloque A de la siguiente manera:

$$U_{f_{H_2}} = \frac{60000RTi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{fuel}x\%}, \quad (3.6)$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000RTi_{fc}}{2zFP_{air}V_{air}y\%}. \quad (3.7)$$

Después en el bloque B, las presiones parciales y el voltaje de Nernst se calculan de la siguiente manera:

$$P_{H_2} = (1 - U_{f_{H_2}}) x \% P_{fuel} , \quad (3.8)$$

$$P_{H_2O} = (w + 2y \% U_{f_{O_2}}) P_{air} , \quad (3.9)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{f_{O_2}}) y \% P_{air} . \quad (3.10)$$

y

$$f(x) = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) & \text{si } T \leq 100 \text{ } ^\circ C \\ 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & \text{si } T > 100 \text{ } ^\circ C \end{cases} \quad (3.11)$$

Finalmente, en el Bloque C se calcula la pendiente de Tafel empleando la ecuación [3.5](#). El fenómeno de la disminución de oxígeno (retraso en el compresor de aire) en el voltaje del apilamiento se puede modelar si se conocen el pico del flujo de oxígeno y el voltaje de sobretiro, ya que se modifica el voltaje de Nernst:

$$E_n = E_n - K \left(U_{f_{O_2}} - U_{f_{O_2(nom)}} \right) . \quad (3.12)$$

Es importante mencionar que el modelo tiene las siguientes limitaciones:

- El flujo de gases o de agua a través de la membrana no se toman en cuenta.
- El efecto de la temperatura y la humedad de la membrana en la resistencia del apilamiento no se considera.

3.2.2. Parámetros del modelo.

Como se mencionó anteriormente, una de las ventajas del modelo seleccionado para la FC es que sus parámetros se pueden determinar empleando la hoja de datos del equipo. Generalmente, los fabricantes reportan las siguientes especificaciones técnicas del dispositivo en condiciones de operación nominales: número de celdas, potencia, rango de voltaje de salida, presiones de entrada, temperatura, eficiencia, etc.

Para calcular E_{oc} , R_{ohm} , i_0 , A se necesitan dos puntos de la curva de polarización, en particular, de la región de activación y la región óhmica (ver Fig. [3.2](#)). Tales puntos deben corresponder a:

- Corriente y voltaje en el punto de operación nominal, (I_{nom}, V_{nom}) .
- Corriente y voltaje en el punto de operación máximo, (I_{mx}, V_{mn}) .
- Voltaje a 0 y 1 A, (V_{oc}, V_1) .

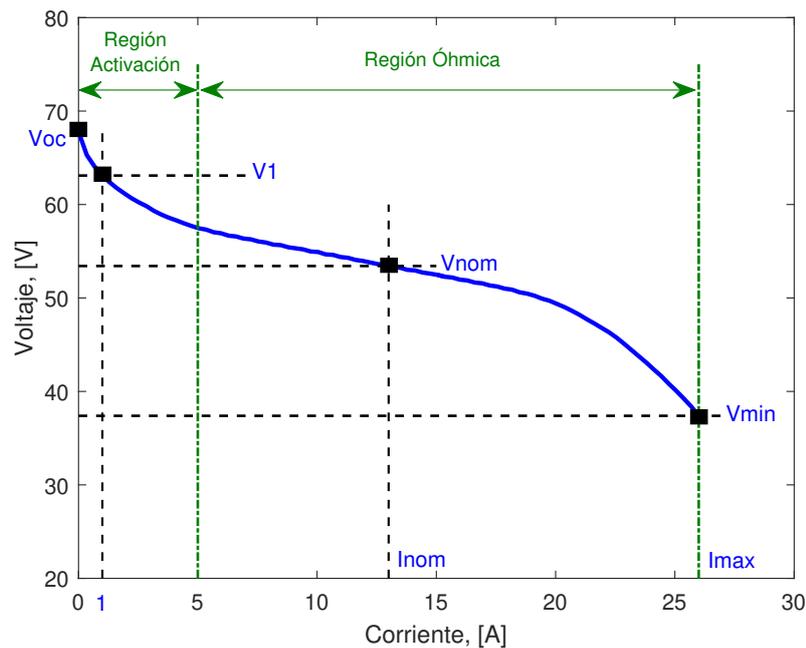


Figura 3.2: Curva de polarización con la información requerida.

Para el resto de parámetros del modelo se requiere la siguiente información:

- Número de celdas, (N) .
- Eficiencia del apilamiento nominal, (η_{nom}) en %.
- Temperatura de operación nominal, (T_{nom}) en °C.
- Tasa de flujo nominal del aire, $(V_{aire(nom)})$ en litros/min.
- Presiones de alimentación absolutas, $(P_{fuel(nom)}, P_{aire(nom)})$ en atm.
- Composición nominal del combustible y del aire, $(x_{nom}, y_{nom}, w_{nom})$ en %.

3.2.3. Caracterización del modelo.

En este trabajo de tesis se considera una celda de combustible tipo PEM de 1kW de potencia, modelo H-1000 de la marca Horizon Fuel Cell Technologies. A partir de la información que proporciona la hoja de datos del fabricante es posible caracterizar el bloque de MATLAB/Simulink (ver Fig. 3.3):

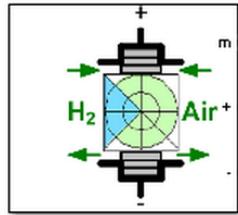


Figura 3.3: Bloque de celda de combustible genérico en SimPowerSystems de Matlab.

Los datos que se obtuvieron al seguir la metodología descrita en la sección anterior se introducen en la ventana de configuración del bloque, como se muestra en la Fig. 3.4.

Block Parameters: PEMFC H-1000

Fuel Cell Stack (mask) (link)

Implements a generic hydrogen fuel cell model which allows the simulation for the following types of cells:

- Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)
- Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
- Alkaline Fuel Cell (AFC)

Parameters Signal variation Fuel Cell Dynamics

Preset model: No (User-Defined)

Model detail Level: Detailed

Voltage at 0A and 1A [V_0(V), V_1(V)] [68 63]

Nominal operating point [Inom(A), Vnom(V)] [5.607 57.140]

Maximum operating point [Iend(A), Vend(V)] [19.5 49.91]

Number of cells 72

Nominal stack efficiency (%) 40

Operating temperature (Celsius) 65

Nominal Air flow rate (lpm) 100

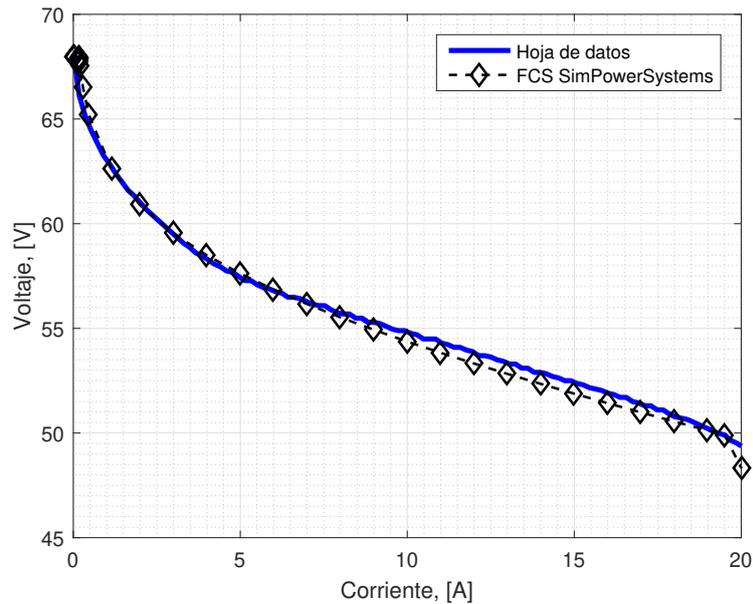
Nominal supply pressure [Fuel (bar), Air (bar)] [1.55 1]

Nominal composition (%) [H2 O2 H2O(Air)] [99.99 21 1]

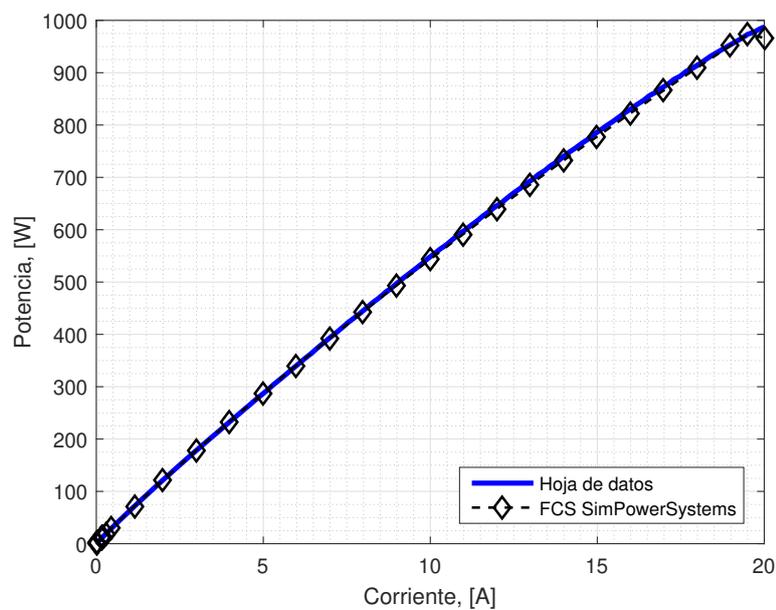
Plot V_I characteristic View Cell parameters

Figura 3.4: Parámetros del bloque, PEMFC H-1000.

A continuación se muestran los resultados de la simulación en MATLAB/Simulink del bloque Fuel Cell Stack de SimPowerSystems. Particularmente, en las Figs. 3.5a y 3.5b se comparan las curvas de polarización (voltaje y potencia) que reporta el fabricante en su hoja de datos con la respuesta del bloque.



(a)



(b)

Figura 3.5: Curvas de polarización, PEMFC H-1000.

En la siguiente tabla se muestran los índices de desempeño que se realizaron para la curva de polarización de voltaje:

Tabla 3.1: Validación curva de polarización.

| Índices de desempeño | Magnitud |
|----------------------|----------|
| Desviación estándar | 2.9985 |
| Error mín (V) | 0.0066 |
| Error máx (V) | 4.5810 |
| FIT (%) | 92.2272 |

3.3. Supercapacitor.

En esta sección se describe el modelo seleccionado de la literatura que permite reproducir las características eléctricas del supercapacitor. Además, se presenta la metodología que se utilizó para determinar cada uno de los parámetros que forman parte del modelo y finalmente, se muestran los resultados de las simulaciones numéricas ante diferentes escenarios y se comparan con datos experimentales que se obtuvieron en un banco de pruebas de laboratorio.

Con base en la revisión del estado del arte, para este trabajo de tesis se eligió un circuito eléctrico equivalente para modelar al supercapacitor. Este tipo de modelo fue propuesto por R. Faranda en [51] denominado como modelo de dos ramas (ver Fig. 3.6), ya que consta únicamente de dos ramas en paralelo que caracterizan el comportamiento a corto término y el comportamiento de mediano a largo término del supercapacitor, respectivamente.

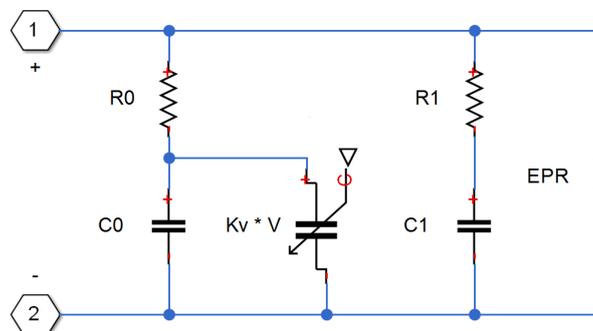


Figura 3.6: Circuito eléctrico equivalente para el SC.

De la figura anterior, se puede observar que la primera rama R-C está compuesta por una resistencia R_0 en serie con un capacitor que es responsable principalmente del almacenamiento de energía inicial. Este capacitor lo conforman un capacitor constante C_0 en paralelo con un capacitor variable dependiente del voltaje, $k_V V$. La segunda rama compuesta por R_1 y C_1 emula la redistribución de voltaje en el dispositivo sobre periodos de tiempo medianos y largos. Finalmente, la resistencia EPR permite reproducir el fenómeno de la corriente de fuga en el SC cuando éste se encuentra en auto-descarga.

3.3.1. Banco de pruebas.

Para poder determinar el valor de cada uno de los elementos que conforman el CEE es necesario contar con la curva experimental de voltaje del SC; para ello, se construyó un banco de pruebas (ver Fig. 3.7) en el laboratorio y que está compuesto de los siguientes elementos: una fuente de alimentación DC Agilent modelo E3634A, una tarjeta de acondicionamiento de señal Red Lion modelo IAMS0011, un sensor de corriente ACS712-30, un módulo relevador de 4 canales a 5V, una tarjeta Arduino Nano para controlar el relevador y una tarjeta Arduino Mega 2560 para la interfaz con MATLAB; el periodo de muestreo que se utilizó fue 0.5 segundos.

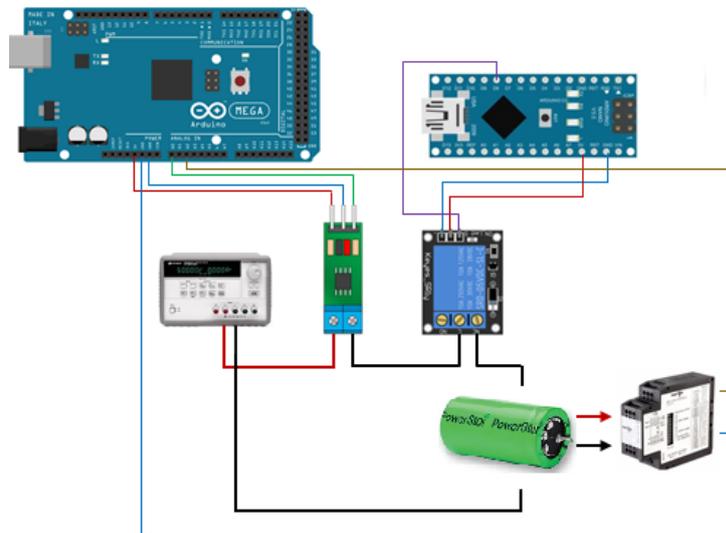


Figura 3.7: Banco de pruebas para el supercapacitor.

Para cada una de las pruebas que se realizaron en el banco de pruebas se utilizaron 7 supercapacitores de la marca PowerStor, modelo XB3560-2R5407-R. Sus características eléctricas se pueden consultar en el Apéndice [A](#).

De manera específica se realizaron los siguientes experimentos:

- *Carga con corriente constante:* Para esta experimento, se considera que el SC está completamente descargado y se le proporciona al SC una corriente constante (3A, 5A y 10A) para llevarlo desde 0 V hasta los 2.5 V (voltaje nominal); alcanzado este punto, se retira la corriente constante y se deja al SC en estado de auto-descarga por 30 minutos.
- *Dinámica tipo A:* En este experimento, la corriente constante (1A, 3A y 5A) que se suministra al SC se lleva a cabo en diferentes instantes de tiempo y con diferente duración (5, 3 y 1 min), respectivamente. Se considera que el SC está completamente descargado y se lleva desde los 0 V hasta su voltaje nominal. Después de cada proceso de carga sigue un periodo de 12.5 min de auto-descarga.
- *Dinámica tipo B:* Para este último experimento, primero se le proporciona durante 2.5 min una corriente constante de 7A, después se pone en auto-descarga al SC un periodo de 10.5 min, luego se le conecta una carga resistiva de 0.8Ω por 4 min seguido también de un proceso de auto-descarga por el mismo periodo. Al igual que los experimentos anteriores, el SC se considera que está descargado completamente.

Es importante recalcar que la condición de que el SC este completamente descargado hace referencia a que no tiene carga eléctrica, para lograr esto, es necesario poner en corto circuito las terminales del dispositivo al menos 72 Hrs.

3.3.2. Parametrización del modelo.

En esta sección se presenta de manera detallada el procedimiento propuesto en [51] para determinar cada uno de los elementos que conforman el circuito eléctrico equivalente del supercapacitor.

Para lograr esto, es necesario realizar ciertas mediciones de voltaje en diferentes instantes de tiempo en la curva de voltaje del SC ante una señal de corriente tipo escalón que le permita alcanzar su voltaje nominal, seguido de un proceso de auto-descarga como se muestra en la Fig. 3.8.

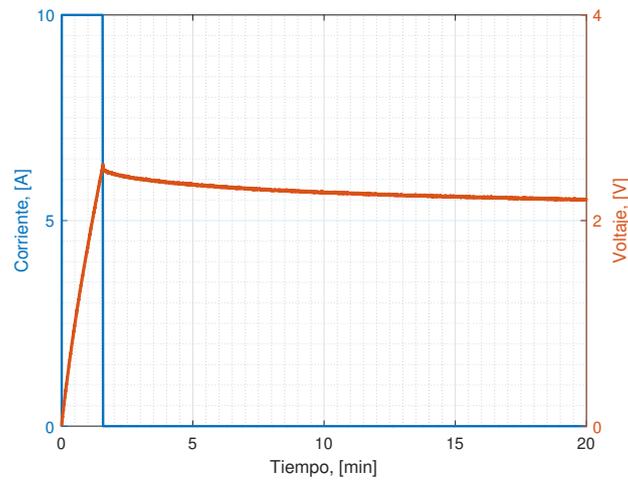


Figura 3.8: Banco de pruebas para el supercapacitor.

El primer parámetro a determinar es la resistencia R_0 , para ello es necesario medir el escalón de voltaje ΔV durante el primer instante de la fase de carga, como se muestra en la Fig. 3.9, y emplear la siguiente ecuación:

$$R_0 = \frac{\Delta V}{I_c}. \quad (3.13)$$

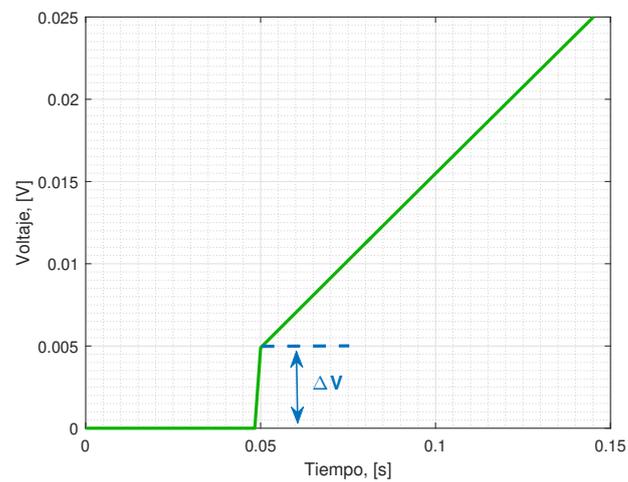


Figura 3.9: Inicio de la fase de carga del SC.

Por otra parte, los parámetros C_0 y k_v pueden calcularse con base en los coeficientes c_1 , c_2 y el valor de la corriente de I_c de la siguiente manera:

$$C_0 = c_1 I_c, \quad (3.14)$$

$$k_v = 2c_2 I_c. \quad (3.15)$$

La I_c se conoce desde un principio, por lo tanto, solo nos falta conocer el valor de los coeficientes antes mencionados. Esto se logra fácilmente al medir el voltaje en dos instantes de tiempo diferentes en la curva de voltaje durante el periodo de carga del SC como se muestra en la Fig. 3.10:

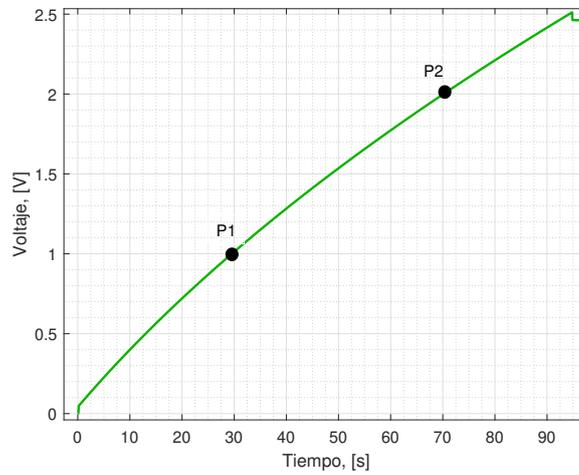


Figura 3.10: Inicio de la fase de carga del SC.

Con los puntos $P_1(t_1, V_1)$ y $P_2(t_2, V_2)$ claramente identificados, para los coeficientes c_1 y c_2 se tiene:

$$c_1 = \frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2}, \quad (3.16)$$

$$c_2 = \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_1 V_2^2 - V_1^2 V_2}. \quad (3.17)$$

Una vez que se determinaron los parámetros de la primer rama del CEE, es posible determinar los de la segunda rama mediante el procedimiento descrito en [52]. Para ello, es necesario definir la constante de tiempo $\tau_2 = R_2 C_2$ con base en la forma de onda experimental del SC y después medir (en la misma forma de onda) el voltaje justo en el instante de tiempo equivalente a $3\tau_2$. El valor de C_2 se calcula de manera simultánea mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{tot} = I_c T_c = C_2 V_{2f} + \left(C_0 + \frac{k_v}{2} V_{2f} \right) V_{2f}. \quad (3.18)$$

Es importante recalcar que cada una de las cantidades de la ecuación anterior son conocidas excepto C_2 . Ahora, sólo es necesario determinar el valor de la resistencia R_2 de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_2 = \frac{\tau_2}{C_2}. \quad (3.19)$$

Finalmente, para la última rama que está conformada por la resistencia en paralelo equivalente (EPR¹) y su valor se calcula al igual que en otros modelos reportados en la literatura, esto es:

$$EPR = \frac{V_n}{I_l}. \quad (3.20)$$

donde V_n es el voltaje nominal del SC e I_l es su corriente de fuga, ambos valores se pueden localizar en la hoja de datos del dispositivo.

Ahora bien, la siguiente tabla muestra los valores de los elementos que conforman el modelo de CEE. Cada uno de ellos se determinó con base en los datos experimentales que se obtuvieron del banco de pruebas de laboratorio y siguiendo la metodología descrita anteriormente.

Tabla 3.2: Parámetros del CEE de dos ramas para el SC.

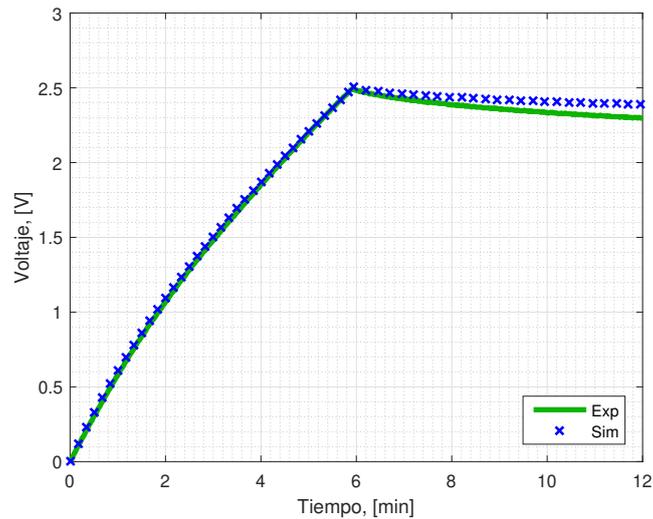
| Variable | Magnitud |
|-----------------|----------|
| $R_0, [\Omega]$ | 0.00488 |
| $C_0, [F]$ | 258.793 |
| $k_v, [F/V]$ | 110.443 |
| $R_1, [\Omega]$ | 3.94271 |
| $C_1, [F]$ | 63.4077 |
| $EPR, [\Omega]$ | 5500 |

3.3.3. Validación del modelo.

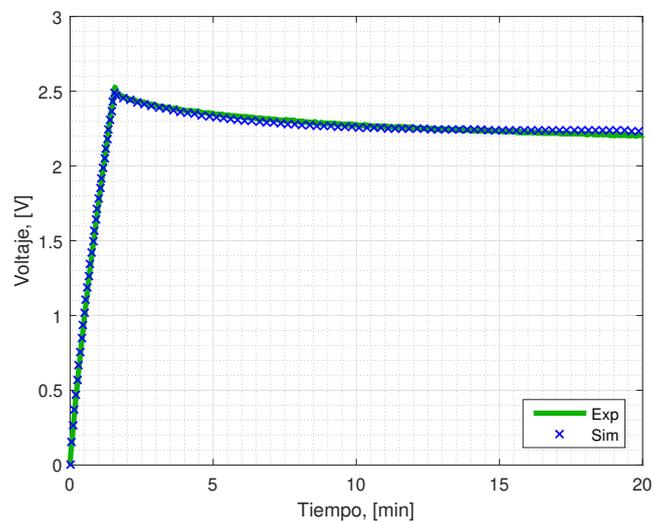
En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas que se realizaron en MATLAB y su comparación con los datos experimentales que se obtuvieron del banco de pruebas en el laboratorio con el fin de validar el modelo de CEE. Se consideran la prueba de carga constante y las pruebas dinámicas tipo A y B descritas en la sección [3.3.1](#).

¹Por sus siglas en inglés.

Carga a corriente constante. - Para este escenario se considera que el supercapacitor está completamente descargado. Se proporcionó una corriente constante al dispositivo llevarlo de 0 V a 2.5 V (Voltaje nominal). Los resultados de simulación versus los datos experimentales para una corriente de 9A se muestran en las Figuras 3.11a y 3.11b. Los índices de desempeño se presentan en la Tabla 3.3:



(a) 3A



(b) 10A

Figura 3.11: Resultados durante el proceso de carga a corriente constante.

Tabla 3.3: Índices de desempeño - Tipo 1.

| Variable | Valor 3A | Valor 10A |
|-----------|------------------------|------------------------|
| e_{max} | 0.0532 | 0.0084 |
| e_{min} | 5.672×10^{-6} | 7.625×10^{-6} |
| Sd | 0.135 | 0.0427 |
| FIT | 98.471 | 99.261 |

Dinámica Tipo A. - Para esta prueba, primero se proporciona una corriente de 5A al supercapacitor durante 5 minutos y después se inicia un proceso de auto-descarga. Posteriormente, se proporciona una corriente de 3A durante 3 minutos seguido de la auto-descarga. Y finalmente, se proporciona una corriente de 1A hasta alcanzar el voltaje nominal y después da comienzo la auto-descarga nuevamente. Cabe mencionar que el proceso de auto-descarga tiene una duración de 12.5 minutos. Los resultados de simulación versus los datos experimentales se muestran en la Figura 3.12 y los índices de desempeño se presentan a continuación:

Tabla 3.4: Índices de desempeño - Dinámica Tipo A.

| Variable | Valor |
|-----------|------------------------|
| e_{max} | 0.0628 |
| e_{min} | 4.823×10^{-6} |
| Sd | 0.147 |
| FIT | 98.753 |

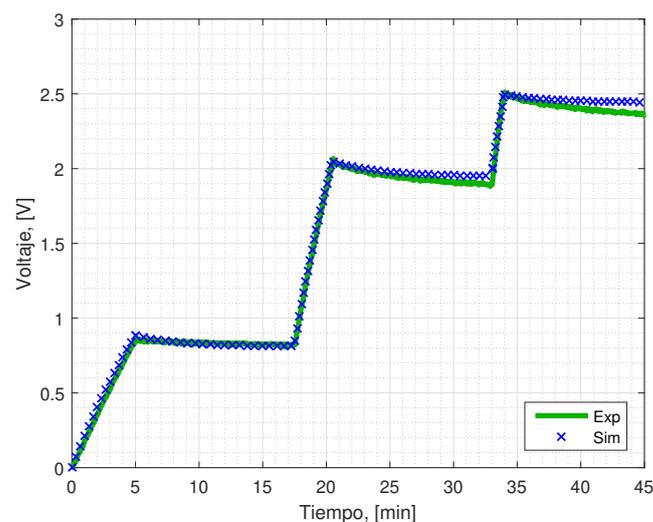


Figura 3.12: Resultados durante la prueba dinámica.

Dinámica Tipo B. - Para este último escenario, primero se proporciona una corriente de 7A al SC durante 2.5 minutos y después se inicia un proceso de auto-descarga (10.5 minutos). Posteriormente, se conecta una carga resistiva de 0.8Ω por 4 minutos seguido también de una auto-descarga por el mismo periodo. Al igual que la prueba dinámica anterior, se considera que el SC está completamente descargado. Los resultados de simulación versus los datos experimentales se muestran en la Figura 3.13 y los índices de desempeño se presentan en la Tabla 3.5.

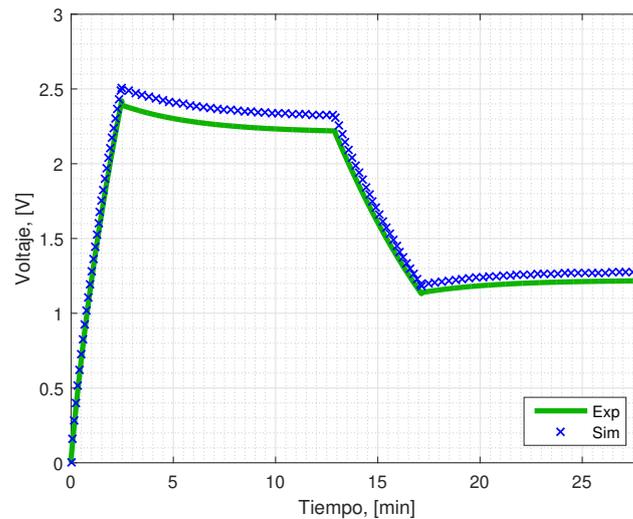


Figura 3.13: Resultados durante la prueba dinámica.

Tabla 3.5: Índices de desempeño - Dinámica Tipo B.

| Variable | Valor |
|-----------|------------------------|
| e_{max} | 0.1275 |
| e_{min} | 6.925×10^{-6} |
| Sd | 0.216 |
| FIT | 95.437 |

3.4. Batería.

Existen diferentes enfoques reportados en la literatura para modelar una batería, por ejemplo: *electroquímico, circuito eléctrico equivalente, 1D o 2D, parámetros agrupados o distribuidos, de orden entero o fraccionario*. Para este trabajo se decidió utilizar un modelo con base en circuito eléctrico equivalente ya que las ecuaciones se obtienen a partir de elementos comunes (fuentes de voltaje, resistencias, capacitores, etc.) que reproducen las características eléctricas de voltaje y corriente del dispositivo, además, puede ser utilizado fácilmente en un programa de cómputo para realizar simulaciones numéricas.

El circuito eléctrico equivalente (CEE) que se utiliza para obtener el modelo de la batería se muestra en la Figura 3.14 y fue propuesto en [53].

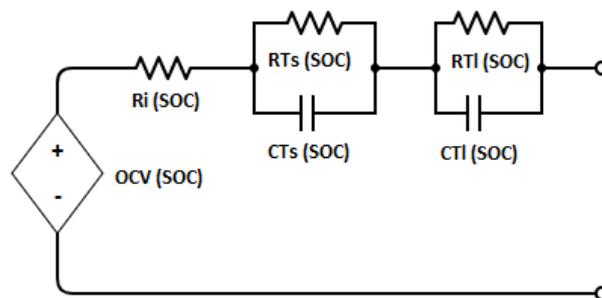


Figura 3.14: CEE de dos ramas RC.

En la figura anterior, R_i modela la resistencia interna de la batería y la caída de voltaje instantánea cuando se conecta una carga a la batería. Por otro lado, las dos ramas RC modelan el efecto de polarización y constantes de tiempo. El voltaje a circuito abierto (OCV) de la batería se modela como una fuente de voltaje ideal dependiente. Debido a la no linealidad de la batería, todos los elementos en el CEE normalmente están en función de la *temperatura, SOC, edad, corriente o número de ciclo*. De las anteriores, la principal dependencia es la asociada al SOC y por consiguiente, todos los parámetros del modelo se consideran dependientes de este término.

Utilizando las leyes de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla en el CEE, se obtienen el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\dot{SOC} = -\frac{\eta}{Q}i(t) , \quad (3.21)$$

$$\dot{V}_{C_{Ts}} = -\frac{1}{R_{Ts}C_{Ts}}V_{C_{Ts}} + \frac{1}{C_{Ts}}i(t) , \quad (3.22)$$

$$\dot{V}_{C_{Tl}} = -\frac{1}{R_{Tl}C_{Tl}}V_{C_{Tl}} + \frac{1}{C_{Tl}}i(t) , \quad (3.23)$$

$$V_{Bat} = OCV[SOC(t)] - V_{Ri} - V_{C_{Ts}} - V_{C_{Tl}} . \quad (3.24)$$

donde η y Q representan la eficiencia de Coulomb y la capacidad total de la batería, respectivamente. Los parámetros OCV , R_i , R_{Ts} , R_{Tl} , C_{Ts} y C_{Tl} se definen de la siguiente manera:

$$OCV[SOC(t)] = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot SOC^9} + a_2 \cdot SOC^7 + a_3 \cdot SOC^5 + a_4 \cdot SOC + a_5 , \quad (3.25)$$

$$R_i[SOC(t)] = \sum_{n=0}^{n=9} b_{(n)}[SOC(t)]^n , \quad (3.26)$$

$$R_{Ts}[SOC(t)] = \sum_{n=0}^{n=9} c_{(n)}[SOC(t)]^n , \quad (3.27)$$

$$R_{Tl}[SOC(t)] = \sum_{n=0}^{n=9} d_{(n)}[SOC(t)]^n , \quad (3.28)$$

$$C_{Ts}[SOC(t)] = \sum_{n=0}^{n=9} e_{(n)}[SOC(t)]^n , \quad (3.29)$$

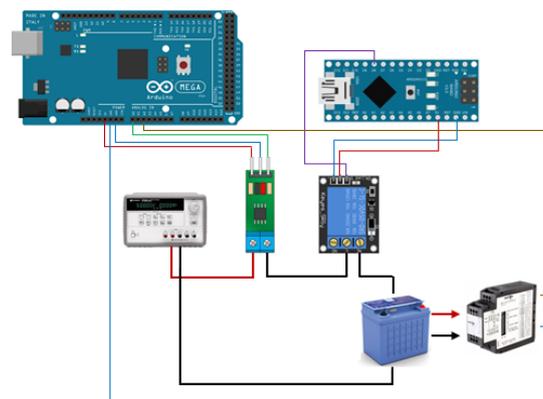
$$C_{Tl}[SOC(t)] = \sum_{n=0}^{n=9} f_{(n)}[SOC(t)]^n . \quad (3.30)$$

Los parámetros de las ecuaciones 3.25 a la 3.30 se determinan a partir de datos experimentales que se obtienen de un banco de pruebas de laboratorio, en la siguiente sección se presentan más detalles al respecto.

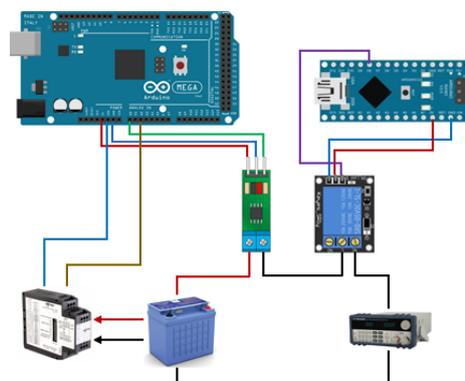
3.4.1. Banco de pruebas.

En esta sección se describe el banco de pruebas que se elaboró para obtener la respuesta en voltaje de la batería, así como, el tipo de experimentos que se realizaron para posteriormente determinar los parámetros del modelo con base en un CEE y poder realizar su validación fuera de línea.

El banco de pruebas mostrado en la Figura 3.15 consta de los siguientes elementos: una fuente de alimentación DC Agilent modelo E3634A, una carga electrónica DC BK PRECISION modelo 8500, una tarjeta de acondicionamiento de señal Red Lion modelo IAMA3535, un sensor de corriente ACS712-30, un módulo relevador de 4 canales a 5V, una tarjeta Arduino Nano para controlar el relevador y una tarjeta Arduino Mega 2560 para la interfaz con MATLAB; el periodo de muestreo que se utilizó fue de 1 segundo. Las diferentes pruebas se realizaron en una batería de LiFePO₄ de la marca PowerSonic, modelo PSL-12450 y sus especificaciones técnicas se pueden consultar a detalle en el apéndice A.



(a) Carga



(b) Descarga

Figura 3.15: Banco de pruebas para la batería.

Los tipos de pruebas que se llevaron a cabo en el dispositivo son:

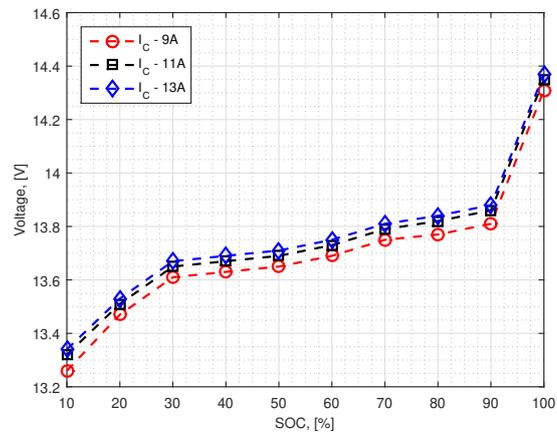
- *Carga con corriente constante*: Para esta prueba, se considera que la batería está completamente descargada y por lo tanto, el SOC es del 0%. Se le proporciona una corriente constante al dispositivo para llevarlo desde los 11V hasta los 14.5V (charging cut-off voltage).
- *Descarga con corriente constante*: En esta prueba, se considera que la batería está completamente cargada y por consiguiente, el SOC es del 100%. Se le demanda una corriente constante al equipo para llevarlo de 14.5V a 11V (discharging cut-off voltage).
- *Carga con corriente pulsante*: Para esta prueba, se considera que la batería está completamente descargada y por lo tanto, el SOC es del 0%. Se le proporciona al dispositivo una corriente pulsante con un ciclo de trabajo del 50% y un periodo de 41.5, 49 y 60 minutos dependiendo del valor de la corriente hasta alcanzar un voltaje de 14.5V en sus terminales.
- *Descarga con corriente pulsante*: En esta prueba, se considera que la batería está completamente cargada y por consiguiente, el SOC es del 100%. Se le demanda una corriente pulsante (con el mismo ciclo de trabajo y periodo del caso anterior) al equipo hasta alcanzar un voltaje de 11V en sus terminales.

Cabe mencionar que los valores de corriente que se emplearon para la señal de corriente fueron 9A, 11A y 13A. Y en el caso particular de las pruebas con corriente pulsante, el valor del periodo para la señal permite cargar/descargar a la batería de 10% en 10% desde el 0% hasta el 100% de carga y viceversa.

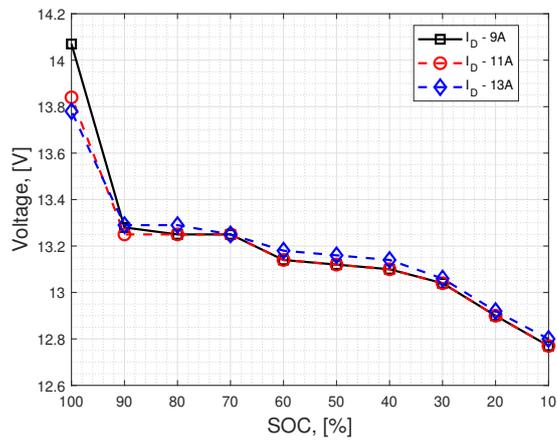
3.4.2. Parametrización del modelo.

Con base en las curvas de voltaje que se obtuvieron de las pruebas experimentales de corriente pulsante, todos los parámetros de las ecuaciones 3.25 - 3.30 se pueden determinar siguiendo la metodología descrita en [54].

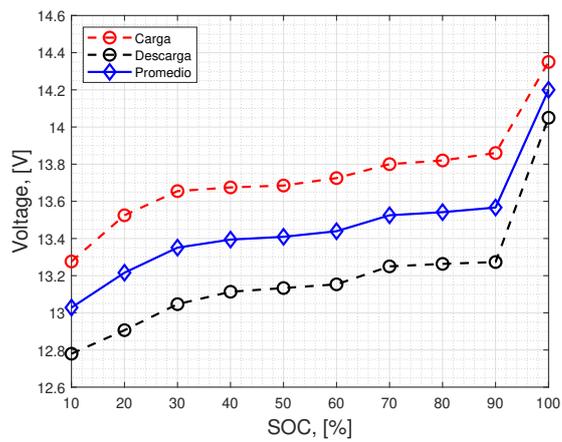
En primer lugar se determinó el voltaje a circuito abierto (OCV) de la batería, considerando tanto el proceso de carga como el de descarga. Para ello, se utilizó la señal de corriente pulsante descrita en la sección anterior. La Figura 3.16 muestra las curvas características experimentales del OCV para la batería PSL-12450.



(a) Carga



(b) Descarga



(c) Promedio

Figura 3.16: Voltaje a circuito abierto, Batería LiFePO4.

El siguiente paso consiste en determinar los valores de las resistencias y capacitores que conforman el circuito de la Figura 3.14. Para ello, también se obtuvieron sus curvas características experimentales de acuerdo al SOC. Dichos resultados se muestran en las Figuras 3.17 y 3.18:

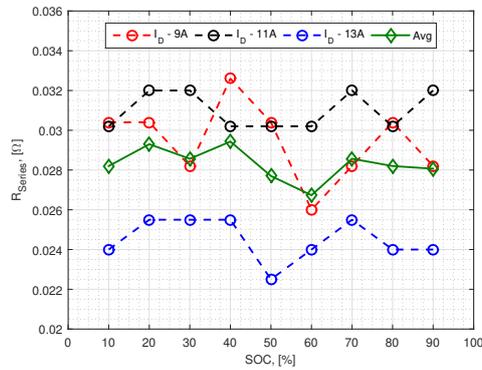


Figura 3.17: Valores de R y C con base en el SOC para la batería LiFePO4.

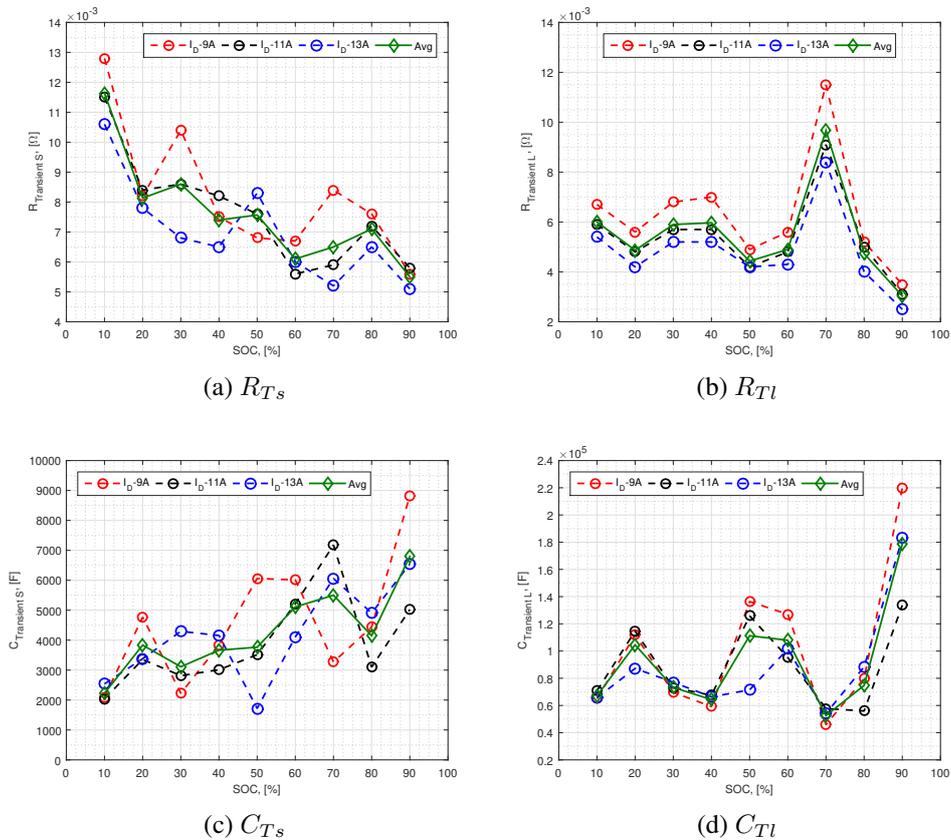


Figura 3.18: Valores de R y C con base en el SOC para la batería LiFePO4.

Ahora bien, tomando en cuenta los resultados previos se pueden determinar los coeficientes de las ecuaciones 3.25 - 3.30 que modelan a las resistencias y capacitores del CEE. Para lograr esto, se realiza un ajuste de curvas empleando mínimos cuadrados no lineales en el software de MATLAB[®]. El algoritmo que se utilizó fue el de Levenberg-Marquardt junto con la función objetivo de la suma de los errores al cuadrado. La Tabla 3.6 muestra los valores de los coeficientes que se obtuvieron al final de dicho proceso:

Tabla 3.6: Coeficientes de las funciones que modelan a las resistencias y capacitores.

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|----------|-----------|---------|----------|
| <i>OCV</i> | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | | | | | |
| | 67.43 | -0.40 | 35.42 | -13.56 | 1.44 | -54.51 | | | | | |
| R_i | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | b_6 | b_7 | b_8 | b_9 | b_{10} |
| | -0.04 | 1.58 | 14.24 | 67.56 | 198.68 | 424.43 | 748.01 | 1057.75 | 1028.77 | 574.02 | 135.58 |
| R_{Ts} | c_0 | c_1 | c_2 | c_3 | c_4 | c_5 | c_6 | c_7 | c_8 | c_9 | c_{10} |
| | 0.14 | -2.72 | 18.66 | -28.35 | -270.22 | 1706.87 | -4645.41 | 7133.84 | -6388.14 | 3116.04 | -640.71 |
| R_{Tl} | d_0 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 | d_6 | d_7 | d_8 | d_9 | d_{10} |
| | 0.03 | -0.09 | -5.82 | 91.46 | -625.31 | 2438.38 | -5859.93 | 8811.64 | -8057.34 | 4087.70 | -880.70 |
| C_{Ts} | e_0 | e_1 | e_2 | e_3 | e_4 | e_5 | e_6 | e_7 | e_8 | e_9 | e_{10} |
| 1×10^6 | -0.07 | 1.52 | -11.57 | 33.21 | 30.53 | -478.89 | 1450.05 | -2262.83 | 1993.81 | -940.74 | 184.98 |
| C_{Tl} | f_0 | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 | f_7 | f_8 | f_9 | f_{10} |
| 1×10^6 | 0.70 | -16.92 | 160.76 | -634.46 | 587.28 | 349.50 | -13463.78 | 21647.15 | -18512.62 | 8244.60 | -1507.60 |

3.4.3. Estimación del estado de carga.

Tal y como se muestra al inicio de la sección 3.4, cada uno de los elementos que conforman el CEE para modelar a la batería están en función del SOC. Sin embargo, hasta el día de hoy no existe en el mercado un sensor físico que permita realizar la medición de dicha variable en la batería; por lo que una de las alternativas para lograr este objetivo es utilizar un sensor virtual con base en un Filtro de Kalman Extendido (EKF¹).

El Filtro de Kalman Extendido es un estimador óptimo para sistemas no lineales que realiza un proceso de linealización mediante la serie de Taylor de primer orden en cada instante para aproximar el sistema no lineal con sistema lineal variante en el tiempo. En esta sección se presenta el algoritmo del EKF, así como, su diseño para la estimación del SOC en una batería LiFePO4.

¹Por sus siglas en inglés.

En primer instancia se considera un sistema no lineal en tiempo discreto con la siguiente estructura:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k, \quad (3.31)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k. \quad (3.32)$$

donde x_k es el vector de estados en el instante k , u_k es la entrada del sistema, w_k y v_k son procesos estocásticos Gaussianos con media cero y covarianza con valor conocido. Además, $f(\cdot)$ es una función de estados no lineal y $g(\cdot)$ es la función de salida no lineal.

Suponiendo que tanto $f(\cdot)$ como $g(\cdot)$ son diferenciables en cada instante k , entonces:

$$x_{k+1} \approx f(\hat{x}_k, u_k) + \left. \frac{\partial f(x_k, u_k, w_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) + w_k, \quad (3.33)$$

$$y_k \approx g(\hat{x}_k, u_k) + \left. \frac{\partial g(x_k, u_k, v_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) + v_k. \quad (3.34)$$

Las dos ecuaciones anteriores representan las ecuaciones linealizadas del sistema no lineal y se utilizan para desarrollar el algoritmo del EKF. El término de la derivada parcial en la ecuación 3.33 se define como el término \hat{A}_k y la derivada parcial en la ecuación 3.34 se define como \hat{C}_k . El algoritmo consta de dos pasos y pueden resumirse de la siguiente manera:

Tabla 3.7: Paso de predicción.

| | |
|-----------------------|--|
| Predicción del estado | $\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$ |
| Covarianza del error | $\Sigma_{\hat{x},k}^- = \hat{A}_{k-1} \Sigma_{\hat{x},k-1}^+ \hat{A}_{k-1}^T + \hat{B}_{k-1} \Sigma_{\tilde{w}} \hat{B}_{k-1}^T$ |
| Salida estimada | $\hat{y}_k = g(\hat{x}_k^-, u_k)$ |

Tabla 3.8: Paso de corrección.

| | |
|-------------------------------------|---|
| Matriz de ganancias | $L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T [\hat{C}_k \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T + \hat{D}_k \Sigma_{\tilde{v}} \hat{D}_k^T]^{-1}$ |
| Medición del estado estimado | $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - \hat{y}_k)$ |
| Medición de la covarianza del error | $\Sigma_{\hat{x},k}^+ = \Sigma_{\hat{x},k}^- - L_k \Sigma_{\tilde{y},k} L_k^T$ |

donde:

$$\hat{B}_{k-1} = \left. \frac{df(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1})}{dw_{k-1}} \right|_{w_{k-1}=\bar{w}_{k-1}}, \quad (3.35)$$

$$\hat{D}_k = \left. \frac{dg(x_k, u_k, v_k)}{dv_k} \right|_{v_k=\bar{v}_k}. \quad (3.36)$$

Ahora bien, para desarrollar el EKF para la estimación del SOC de la batería, considera el siguiente modelo de CEE en tiempo discreto que se obtiene siguiendo el procedimiento descrito en [55]:

$$f(x_k, u_k, \omega_k) = \begin{bmatrix} x_{1,k} - \frac{n\Delta t}{Q} \cdot i_k \\ e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} \cdot x_{2,k} + R_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} \right) \cdot i_k \\ e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \cdot x_{3,k} + R_2 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \right) \cdot i_k \end{bmatrix} + w_k, \quad (3.37)$$

$$g(x_k, u_k, \omega_k) = OCV_k - x_{1,k} - x_{2,k} - R_0 i_k + v_k. \quad (3.38)$$

Donde $x_{1,k} = SOC_k$, $x_{2,k} = v_{c_1,k}$, $x_{3,k} = v_{c_2,k}$ y Δt representa el tiempo de muestreo. El paso siguiente es calcular las derivadas para determinar las matrices \hat{A}_k , \hat{B}_{k-1} , \hat{C}_k y \hat{D}_k , es decir:

$$\hat{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \end{bmatrix}, \quad (3.39)$$

$$\hat{B}_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.40)$$

$$\hat{C}_k = \begin{bmatrix} -239.70x_{1,k} \cdot e^{3.95x_{1,k}^9} + 247.93x_{1,k}^6 - 67.82x_{1,k}^4 + 1.44 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (3.41)$$

$$\hat{D}_k = [1]. \quad (3.42)$$

Tomando en cuenta el modelo en tiempo discreto de la batería, las matrices calculadas en el paso anterior y los parámetros de la siguiente tabla, es posible programar el algoritmo del EKF para la estimación del SOC.

Tabla 3.9: Parámetros para la simulación del modelo de la batería.

| Variable | Magnitud |
|------------|--------------------|
| Q | 162×10^3 |
| Δt | 1.0 |
| η | 0.95 |
| Σ_w | 1×10^{-6} |
| Σ_v | 1×10^{-3} |

3.4.4. Cálculo fraccionario.

Cómo se mencionó en el capítulo 1, el término de cálculo fraccionario indica el uso de operadores diferenciales e integrales de orden no entero. Hoy en día el ramo de la ingeniería hace uso de estos operadores en muchas de sus áreas ya que son herramientas que permiten describir muchas de las propiedades o comportamientos de los materiales, dispositivos o sistemas completos, por ejemplo: efectos de memoria, filtrado y disipación por mencionar algunos, [56-59].

La primer persona en introducir las bases de la notación para el cálculo fraccionario fue Leibniz al emplear el término $D^n f(t)$ para referirse a la derivada de orden n , pudiendo ser cualquier número natural o complejo, y se define como:

$$D^n f(t) = \frac{d^n f(t)}{dt^n}, \quad (3.43)$$

Funciones especiales en el Cálculo Fraccionario.

Dentro del cálculo fraccionario existen dos funciones que es necesario conocer ya que resultan muy prácticas al momento de utilizar los operadores diferenciales e integrales de orden no entero, estas funciones son:

- La función *Gamma de Euler*, que es la generalización de los factoriales y está definida de la siguiente manera, :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx, \quad (3.44)$$

esta integral converge cuando $n > 0$, [60].

- La función *Mittag-Leffler*, que es la generalización de la función exponencial y está definida de la siguiente manera:

$$E_{\alpha,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\beta + \alpha k)}, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \quad \Re(\alpha) > 0, \quad \Re(\beta) > 0, \quad z \in \mathbb{C}. \quad (3.45)$$

Derivadas en el Cálculo Fraccionario.

En este apartado se presentan las definiciones de algunas de las principales derivadas de orden no entero. La primera de ellas es la derivada de Riemann-Liouville (RL) y que está definida para una función $f(t)$ del modo siguiente:

$${}^{\text{RL}}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t -\frac{f(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau, \quad 0 < \alpha \leq 1, \quad (3.46)$$

donde ${}^{\text{RL}}D_t^\alpha$ es la derivada de RL respecto a t , $\alpha \in \mathbb{R}$ es el orden de la derivada fraccionaria y $\Gamma(\cdot)$ representa la función Gamma. Es importante mencionar que cuando se utiliza esta derivada es necesario conocer los valores de ciertas derivadas de orden no entero de la función f en el instante de tiempo $t = 0$.

Por otra parte, la segunda derivada de orden no entero es la de Grünwald-Letnikov y que está definida para una función $f(t)$ de la siguiente manera:

$${}^{\text{GL}}D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\frac{t-t_0}{h}} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh), \quad 0 < \alpha \leq 1. \quad (3.47)$$

donde j es el incremento del tiempo, h es el paso de integración y α es el orden de la derivada fraccionaria (*definida para* $\alpha \in \mathbb{R}$).

También se tiene como tercera derivada de orden no entero al operador Liouville-Caputo (C) y que está definido para una función $f(t)$ de la siguiente manera:

$${}^{\text{LC}}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{\dot{f}(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau, \quad 0 < \alpha \leq 1, \quad (3.48)$$

donde ${}^L C D_t^\alpha$ es la derivada de Liouville-Caputo respecto a t , α es el orden de la derivada fraccionaria (*definida para $\alpha \in \mathbb{R}$*) y $\Gamma(\cdot)$ representa la función Gamma dada en la ecuación (3.44).

Finalmente, la derivada de Atangana-Baleanu-Caputo con orden ($\alpha > 0$) se define de la siguiente manera, [61]:

$${}^A B C \mathcal{D}_t^\alpha f(t) = \frac{B(\alpha)}{n - \alpha} \int_a^t \frac{d^n}{d\theta^n} f(\theta) E_\alpha \left[-\alpha \frac{(t - \theta)^\alpha}{n - \alpha} \right] d\theta, \quad n - 1 < \alpha < n, \quad (3.49)$$

donde ${}^A B C D_t^\alpha$ es la derivada de Atangana-Baleanu-Caputo respecto a t , $AB(\alpha)$ es la función de normalización y $AB(0) = AB(1) = 1$.

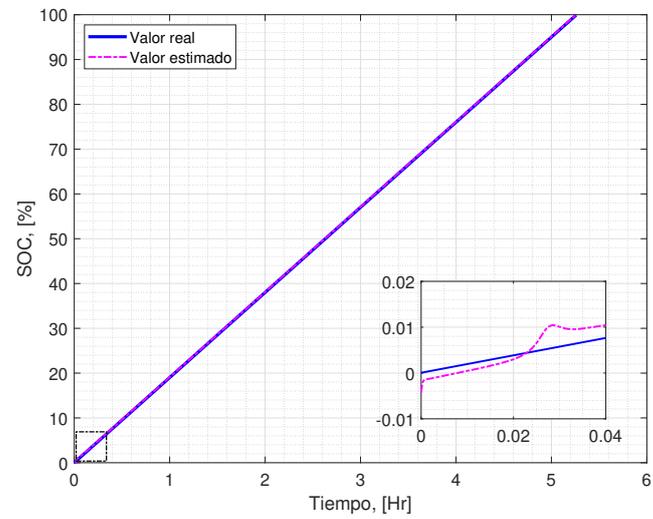
3.4.5. Validación del modelo.

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en MATLAB, así como, su comparación con los datos experimentales que se obtuvieron del banco de pruebas en el laboratorio. Se consideran las pruebas de carga/descarga con corriente constante y las pruebas de carga/descarga con corriente pulsante bajo diferentes valores de corriente (9A, 11A y 13A).

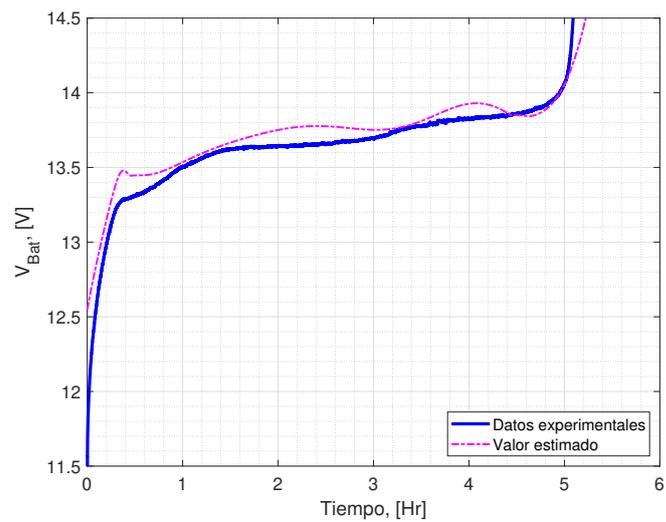
Tipo 1 - Carga a corriente constante. - Para este escenario se considera que la batería está completamente descargada y por lo tanto, el SOC es del 0%. Se proporcionó una corriente constante a la batería para llevarla de 11 V a 14.5 V (Charging Cut-Off Voltage). Los resultados de simulación versus los datos experimentales para una corriente de 9A se muestran en las Figuras 3.19a y 3.19b. Las condiciones iniciales utilizadas para la simulación se muestran en la Tabla 3.10, mientras que los índices de desempeño se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.10: Condiciones iniciales para la simulación tipo 1.

| Variable | Valor | Unidades |
|-----------------|-------|----------|
| $x_{1,i}$ | 0 | V |
| $x_{2,i}$ | 0 | V |
| $x_{3,i}$ | 0 | % |
| $\hat{x}_{1,i}$ | 0.005 | V |
| $\hat{x}_{2,i}$ | 0.005 | V |
| $\hat{x}_{3,i}$ | 0.01 | % |



(a) SOC



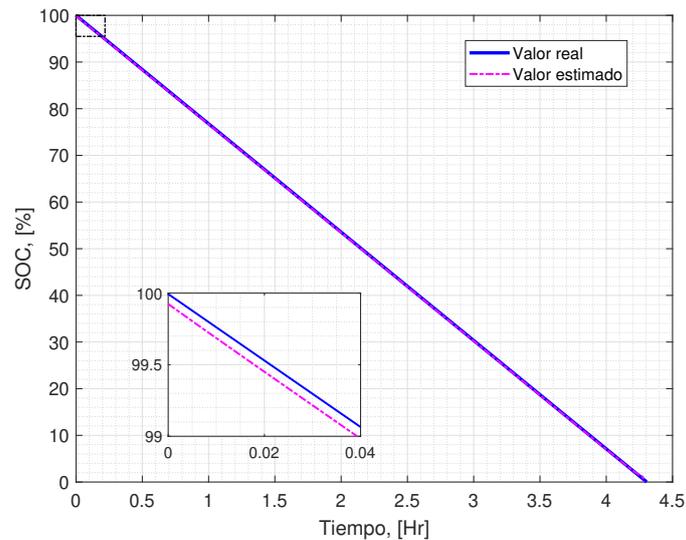
(b) Voltaje de salida

Figura 3.19: Resultados durante el proceso de carga a corriente constante.

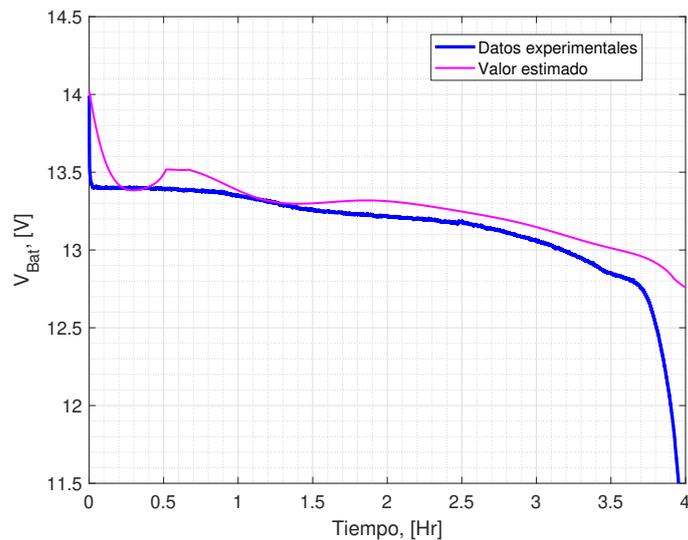
Tabla 3.11: Índices de desempeño - Tipo 1.

| Variable | Valor |
|-----------|------------------------|
| e_{max} | 1.3056 |
| e_{min} | 4.569×10^{-6} |
| Sd | 0.2191 |
| FIT | 98.9754 |

Tipo 2 - Descarga a corriente constante. - Ahora, se considera que la batería está completamente cargada y por lo tanto, el SOC es del 100 %. Se proporciona una corriente de 11A constantes a la batería para llevarla de 14.5 V a 11 V (Discharging Cut-Off Voltage). Los resultados de simulación versus los datos experimentales se muestran en las Figuras 3.20a) y 3.20b). Los parámetros empleados en la simulación son los mismos que en el tipo de prueba anterior y las condiciones iniciales se muestran en la Tabla 3.12). Finalmente, los índices de desempeño se presentan en la Tabla 3.13).



(a) SOC



(b) Voltaje de salida

Figura 3.20: Resultados durante el proceso de descarga a corriente constante.

Tabla 3.12: Condiciones iniciales para la simulación tipo 2.

| Variable | Valor | Unidades |
|-----------------|-------|----------|
| $x_{1,i}$ | 0.08 | V |
| $x_{2,i}$ | 0.04 | V |
| $x_{3,i}$ | 1.0 | % |
| $\hat{x}_{1,i}$ | 0.1 | V |
| $\hat{x}_{2,i}$ | 0.05 | V |
| $\hat{x}_{3,i}$ | 0.99 | % |

Tabla 3.13: Índices de desempeño - Tipo 2.

| Variable | Valor |
|-----------|--------|
| e_{max} | 2.046 |
| e_{min} | 0.280 |
| Sd | 0.871 |
| FIT | 95.265 |

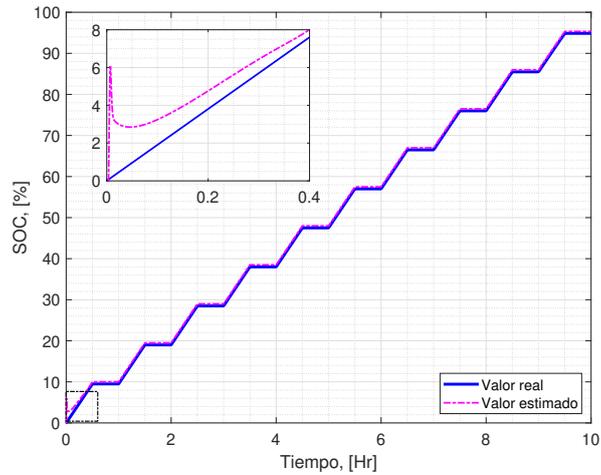
Tipo 3 - Carga a corriente pulsante. - Para esta prueba se considera que la batería está completamente descargada y por lo tanto, el SOC es del 0%. Se proporcionó una corriente pulsante de 9A con un periodo de 3600 s y un ciclo de trabajo del 50% a la batería para llevarla de 11 V a 14.5 V. Los resultados de simulación versus los datos experimentales se muestran en las Figuras 3.21a y 3.21b. Las condiciones iniciales utilizadas para la simulación se muestran en la Tabla 3.14, mientras que los índices de desempeño se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.14: Condiciones iniciales para la simulación tipo 3.

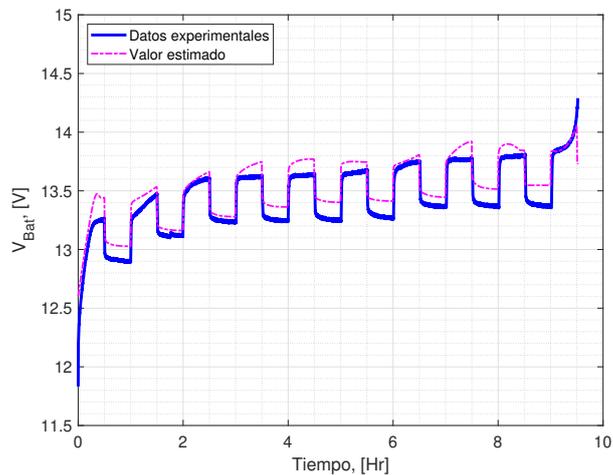
| Variable | Valor | Unidades |
|-----------------|-------|----------|
| $x_{1,i}$ | 0 | V |
| $x_{2,i}$ | 0 | V |
| $x_{3,i}$ | 0 | % |
| $\hat{x}_{1,i}$ | 0.008 | V |
| $\hat{x}_{2,i}$ | 0.005 | V |
| $\hat{x}_{3,i}$ | 0.01 | % |

Tabla 3.15: Índices de desempeño - Tipo 3.

| Variable | Valor |
|-----------|------------------------|
| e_{max} | 0.780 |
| e_{min} | 5.344×10^{-5} |
| Sd | 0.456 |
| FIT | 97.897 |



(a) SOC



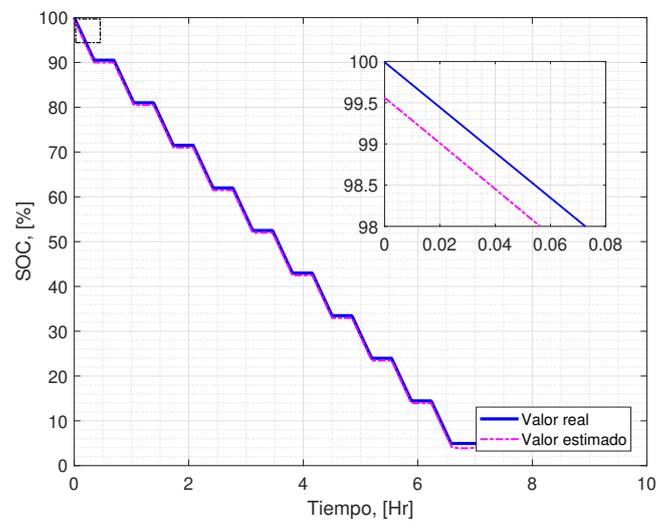
(b) Voltaje de salida

Figura 3.21: Resultados durante el proceso de carga a corriente pulsante.

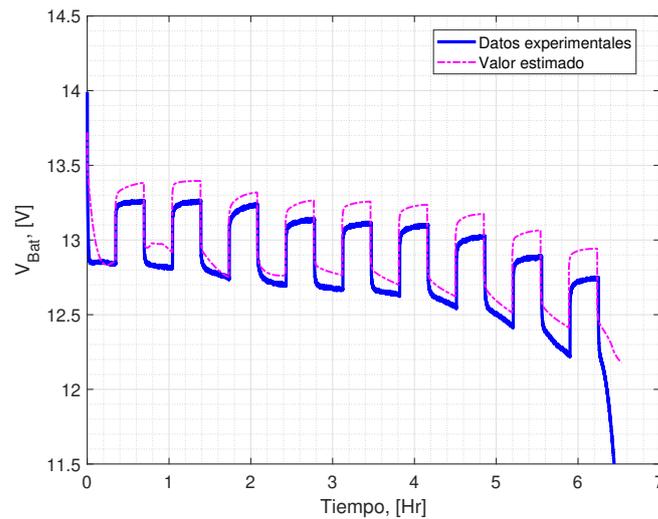
Tipo 4 - Descarga a corriente pulsante. - Ahora se considera que la batería está completamente cargada y por lo tanto, el SOC es del 100%. Se proporcionó una corriente pulsante de 13A con un periodo de 2494 s y un ciclo de trabajo del 50% a la batería para llevarla de 14.5 V a 11 V. Los resultados de simulación versus los datos experimentales se muestran en las Figuras [3.22a](#) y [3.22b](#). Las condiciones iniciales utilizadas para la simulación se muestran en la Tabla [3.16](#), mientras que los índices de desempeño se presentan en la Tabla [3.17](#).

Tabla 3.16: Condiciones iniciales para la simulación tipo 4.

| Variable | Valor | Unidades |
|-----------------|-------|----------|
| $x_{1,i}$ | 0.08 | V |
| $x_{2,i}$ | 0.04 | V |
| $x_{3,i}$ | 1.0 | % |
| $\hat{x}_{1,i}$ | 0.082 | V |
| $\hat{x}_{2,i}$ | 0.046 | V |
| $\hat{x}_{3,i}$ | 0.995 | % |



(a) SOC



(b) Voltaje de salida

Figura 3.22: Resultados durante el proceso de descarga a corriente pulsante.

Tabla 3.17: Índices de desempeño - Tipo 4.

| Variable | Valor |
|-----------------|------------------------|
| e_{max} | 0.645 |
| e_{min} | 3.375×10^{-5} |
| Sd | 0.398 |
| FIT | 97.432 |

Capítulo 4

Sistema de adecuación de potencia.

4.1. Introducción.

En esta capítulo se presentan los convertidores CD/CD que fueron seleccionados de la literatura para cada una de los elementos que conforman la fuente de energía híbrida, así como, su diseño y estrategia de control local. El propósito de estos convertidores es acondicionar la potencia de cada una de las fuentes en un rango determinado y que se conectan al bus de CD.

4.2. Celda de combustible.

Tal y como se mencionó en el capítulo anterior, la PEMFC que se considera para este trabajo de investigación es de la marca Horizon Fuel Cell Technologies, modelo H-1000. Esta PEMFC tiene un rango de salida de voltaje de los 39V a los 69V y puede entregar hasta 1kW de potencia.

Para la implementación del sistema de adecuación de potencia, se considera un convertidor de potencia reductor CD-CD y su respectivo control. La finalidad del sistema es llevar el voltaje suministrado por la celda de combustible a un voltaje menor con cierto nivel de potencia específico, a pesar de perturbaciones (*voltaje de entrada y variaciones en la carga*) sin ocasionar algún daño a la celda de combustible.

4.2.1. Convertidor reductor CD-CD.

Para este trabajo de tesis se considera un voltaje en el bus de CD de 12 volts, por esta razón, es necesario conectar un convertidor de potencia reductor CD-CD (Buck) a la celda de combustible tipo PEM. En los convertidores de potencia, los interruptores son encendidos y apagados mediante una señal de conmutación y la relación de conversión

del convertidor está dada por la razón del voltaje de entrada (V_e) - voltaje de salida (V_s), y generalmente está en función del ciclo de trabajo.

El convertidor buck utiliza un MOSFET de potencia como se muestra en la Figura 4.1. El voltaje promedio a la salida es menor que su voltaje de entrada y se considera que opera en modo de conducción continua (MCC), [62]

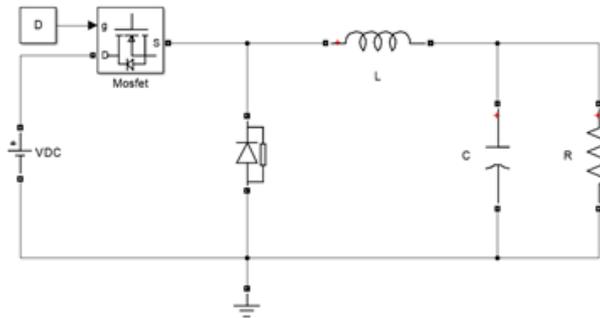


Figura 4.1: Convertidor CD-CD Buck.

En MCC, el funcionamiento del convertidor buck puede dividirse en dos circuitos, dependiendo de los estados de conmutación del MOSFET (encendido o apagado). Para obtener el modelo dinámico del convertidor, es necesario determinar el circuito para cada conmutación y mediante las leyes de teoría de circuitos eléctricos se obtiene el conjunto de ecuaciones diferenciales correspondiente. Posteriormente, se define un modelo unificado al combinar el conjunto de ecuaciones diferenciales mediante el procedimiento propuesto en [63].

4.2.2. Modelo lineal e invariante en el tiempo (LTI) ideal.

Utilizando el procedimiento propuesto en [63], se puede obtener el modelo lineal de convertidores. En este tipo de modelo, se introducen pequeñas variaciones alrededor de un punto de operación (o promedio) en las variables de estado (x_1, x_2), la variable de entrada (v_2), la variable de control (d) y la variable de salida (y).

$$\begin{aligned}
 x_1 &= X_1 + \tilde{x}_1, \\
 x_2 &= X_2 + \tilde{x}_2, \\
 v_2 &= V_e + \tilde{v}_e, \\
 d &= D + \tilde{d}, \\
 y &= Y + \tilde{y}.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Es importante mencionar, que las letras mayúsculas se refieren a los valores en el punto de operación y las letras con tilde representan las pequeñas variaciones alrededor de este punto. Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{X} + \dot{\tilde{x}} = & \left[A_1 (D - \tilde{d}) + A_2 (1 - D - \tilde{d}) \right] (X + \tilde{x}) + \dots \\ & \dots + \left[B_1 (D - \tilde{d}) + B_2 (1 - D - \tilde{d}) \right] (V_e + \tilde{v}_e) , \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\dot{Y} + \dot{\tilde{y}} = \left[C_1 (D - \tilde{d}) + C_2 (1 - D - \tilde{d}) \right] (X + \tilde{x}) .$$

Desarrollando cada uno de los términos, ignorando el producto de las pequeñas variaciones (letras con tilde) y considerando que $A = A_1 D + A_2 (1 - D)$, $B = B_1 D + B_2 (1 - D)$ y $C = C_1 D + C_2 (1 - D)$, se tiene:

$$\dot{X} + \dot{\tilde{x}} = AX + A\tilde{x} + (A_1 - A_2) X\tilde{d} + BV_e + B\tilde{v}_e + (B_1 - B_2) V_e\tilde{d} , \quad (4.3)$$

$$\dot{Y} + \dot{\tilde{y}} = CX + C\tilde{x} .$$

De lo anterior, se pueden detectar y separar una componente estática (Ec. 4.4) y una componente dinámica (Ec. 4.5). Es decir:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BV_e , \\ Y &= CX . \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{v}_e + (A_1 - A_2) X\tilde{d} + (B_1 - B_2) V_e\tilde{d} , \\ \tilde{y} &= C\tilde{x} . \end{aligned} \quad (4.5)$$

La componente estática para el convertidor buck ideal se define como:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_e , \\ Y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} . \end{aligned} \quad (4.6)$$

Con base en la Ec. 4.4, es posible calcular los valores en estado estable del convertidor. Estos valores se denominan *valores promedio* y son el punto de operación del sistema. Para ello, es necesario resolver la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} AX + BV_e &= 0, \\ X &= -A^{-1}BV_e. \end{aligned}$$

Sustituyendo las matrices correspondientes y resolviendo la ecuación, el punto de operación del sistema está dado por:

$$U \triangleq D = \frac{V_s}{V_e}, \quad X = \begin{bmatrix} \frac{DV_e}{R} \\ DV_e \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Por otra lado, la Ec. 4.5 corresponde a la componente dinámica del modelo lineal promediado (*también conocido como modelo en pequeña señal*) alrededor del punto de operación y la cual está definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{v}_e + \begin{bmatrix} \frac{V_e}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{d}, \\ \tilde{y} &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.2.3. Diseño del convertidor.

En esta sección se presenta el diseño de un convertidor reductor, donde la PEMFC es la fuente de voltaje de entrada. Como se mencionó al inicio del capítulo, el voltaje de salida de la celda Horizon H-1000 tienen un rango de salida de los 39 V — 69 V con una potencia máxima de 1 kW y su punto de operación nominal es a los 43 V con una corriente de 23.5 A, según las especificaciones técnicas del fabricante.

Para iniciar con los cálculos, se supone una pérdida a la salida del convertidor del 10 % de la potencia de entrada de acuerdo a lo reportado en la literatura. Además, se desea un voltaje a la salida del convertidor de 12 V y con una potencia de 250 W. De este modo:

$$P_e = \frac{P_s}{0.9} = 278W , \quad I_s = \frac{0.9P_e}{V_s} = 20.85A . \quad (4.9)$$

Para el nivel de potencia anterior a la entrada del convertidor, la celda Horizon H-1000 deberá operar a 57.68 V y 4.8 A, de acuerdo con los datos de la curva de polarización. Con esta información, se puede calcular el ciclo de trabajo:

$$D = \frac{V_s}{V_e} = 0.208 . \quad (4.10)$$

Con base en los valores propuestos inicialmente y con los cálculos desarrollados hasta el momento, es posible determinar los valores nominales (*o promedio*) de la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor empleando la Ec. 4.7. Así:

$$I_L = 21.05A , \quad V_c = 12V . \quad (4.11)$$

Para poder determinar el valor del inductor y el capacitor en el convertidor, es necesario definir el valor de: *el rizo de corriente, el rizo de voltaje y la frecuencia de conmutación*. Hoy en día, es posible trabajar a frecuencias de conmutación más altas en los convertidores debido al avance de la tecnología en los dispositivos electrónicos. Para este caso en particular, se elige una frecuencia de conmutación (f_c) de 25 kHz.

Por otra parte, para el rizo de corriente se utilizan porcentajes del 10 % al 20 % y para el rizo de voltaje del 1 % al 2 % del valor nominal, según se reportan en [64]. Para la aplicación en particular de este tema de tesis, se define un rizo de corriente del 10 % y un rizo de voltaje del 1 %. A partir de esto, es posible calcular los elementos almacenadores del convertidor de la siguiente manera:

$$L = \frac{(V_e - V_s) D}{\Delta i_L f_c} = 180.52 \mu H , \quad (4.12)$$

$$C = \frac{(V_e - V_s) D}{8L \Delta v_C f_c^2} = 87.82 \mu F . \quad (4.13)$$

Cabe hacer mención, que tanto el valor del inductor como el capacitor que se calcularon anteriormente, se aproximaron a los valores comerciales disponibles para ser utilizados en las simulaciones numéricas. Para este caso de estudio, los valores reales son:

Tabla 4.1: Parámetros reales del inductor y capacitor del convertidor buck.

| | |
|----------------|--------------------|
| $L = 180\mu H$ | $R_L = 0.9m\Omega$ |
| $C = 100\mu F$ | $R_C = 25m\Omega$ |

4.2.4. Control en modo de corriente programada, CMCP.

Una de las técnicas ampliamente utilizada en el control de convertidores es el control en modo de corriente programada, [64]. Esta técnica regula de manera indirecta el voltaje de salida del convertidor a través de dos lazos de control: un *lazo interno de corriente* y un *lazo externo del voltaje de salida*, [65]. La siguiente figura ilustra muestra el esquema de control:

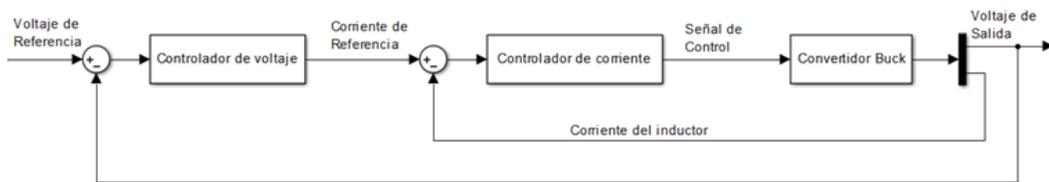


Figura 4.2: Diagrama a bloques del control en modo de corriente programada.

El tipo de controlador que se utilizó para ambos lazos de control son del tipo PI. Se decidió utilizar este tipo de controlador porque se está trabajando con un modelo lineal del convertidor alrededor de un punto de operación y también porque se encuentran reportados en la literatura diversos trabajos utilizando la técnica CMPC con buenos resultados, [66–68]. Sobre este punto, cabe recalcar que este tema de tesis como objetivo principal la propuesta de una estrategia de control global para la administración de energía.

La primera parte del CMCP, consiste en determinar los parámetros del controlador PI para el lazo de interno de corriente, el cual se puede observar en la Figura 4.3:

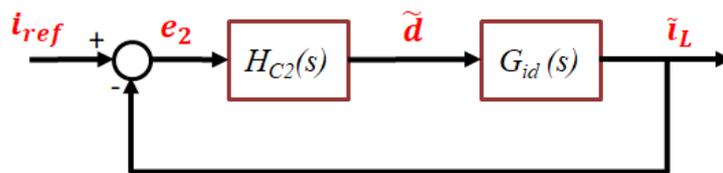


Figura 4.3: Diagrama a bloques del lazo interno.

Donde $H_{C2}(s)$ y $G_{id}(s)$ son:

$$H_{C2}(s) = \frac{\tilde{d}(s)}{e_2(s)} = K_{PC2} \left(1 + \frac{1}{T_{iC2}(s)} \right), \quad (4.14)$$

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} [(A_1 - A_2) X]. \quad (4.15)$$

Con los resultados previos y siguiendo el diagrama bloques (ver Figura 4.4) del lazo externo del CMPC, se calculan los parámetros del segundo controlador PI.

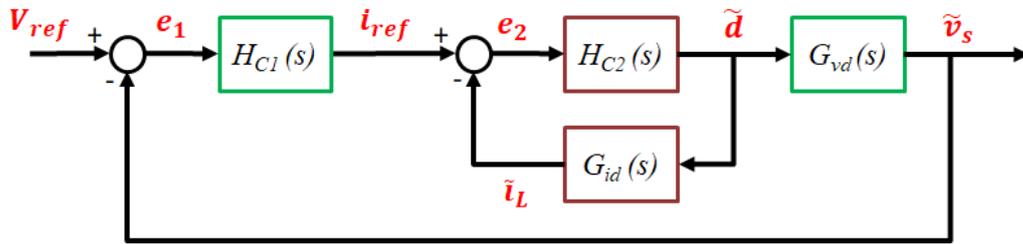


Figura 4.4: Diagrama a bloques del lazo externo.

Donde $H_{C1}(s)$ y $G_{vd}(s)$ son:

$$H_{C1}(s) = \frac{\tilde{i}_{ref}(s)}{e_1(s)} = K_{PC1} \left(1 + \frac{1}{T_{iC1}(s)} \right), \quad (4.16)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{\tilde{v}_C(s)}{\tilde{d}(s)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{R \cdot R_c}{R + R_C} & \frac{R}{R + R_C} \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} [(A_1 - A_2) X]. \quad (4.17)$$

En este lazo externo del CMCP, también se utilizó la respuesta al escalón para determinar el valor de los parámetros del controlador PI, siguiendo el método de Ziegler-Nichols y Chien-Hrones-Reswick. A continuación se presentan tales valores:

Tabla 4.2: Parámetros del controlador PI del lazo externo en el CMPC.

| | Z-N | C-H-R |
|-------|-----------|-----------|
| K_p | 0.002506 | 0.002916 |
| T_i | 473.52e-6 | 647.78e-6 |

Capítulo 5

Estrategia de administración de energía.

5.1. Introducción.

En esta capítulo se presenta la estrategia de control con base en estados de operación para la administración de energía del sistema híbrido. También se describen tres ciclos de conducción que se utilizaron para evaluar el desempeño de la estrategia a nivel de simulación numérica, así como, los resultados que se obtuvieron junto con su análisis correspondiente.

5.2. Sistema híbrido.

Para este trabajo de investigación y como se ha mencionado a lo largo de los capítulos anteriores, el caso de estudio es una fuente de energía híbrida compuesta por los siguientes elementos: una celda de combustible tipo PEM, un banco de supercapacitores y una batería de ion litio; cada uno de éstos se encuentra conectado a su convertidor de CD/CD cuya salida es regulada por su correspondiente controlador local tomando en cuenta un voltaje de referencia y la potencia que demanda la carga.

Adicionalmente, en este esquema se integra un bloque que se localiza entre el sistema híbrido y el bus de CD que tiene como finalidad implementar la estrategia de control para la administración de energía considerando las características propias de las fuentes de energía, así como, la demanda de potencia por parte de la carga. La Figura [5.1](#) permite ilustrar dicho esquema:

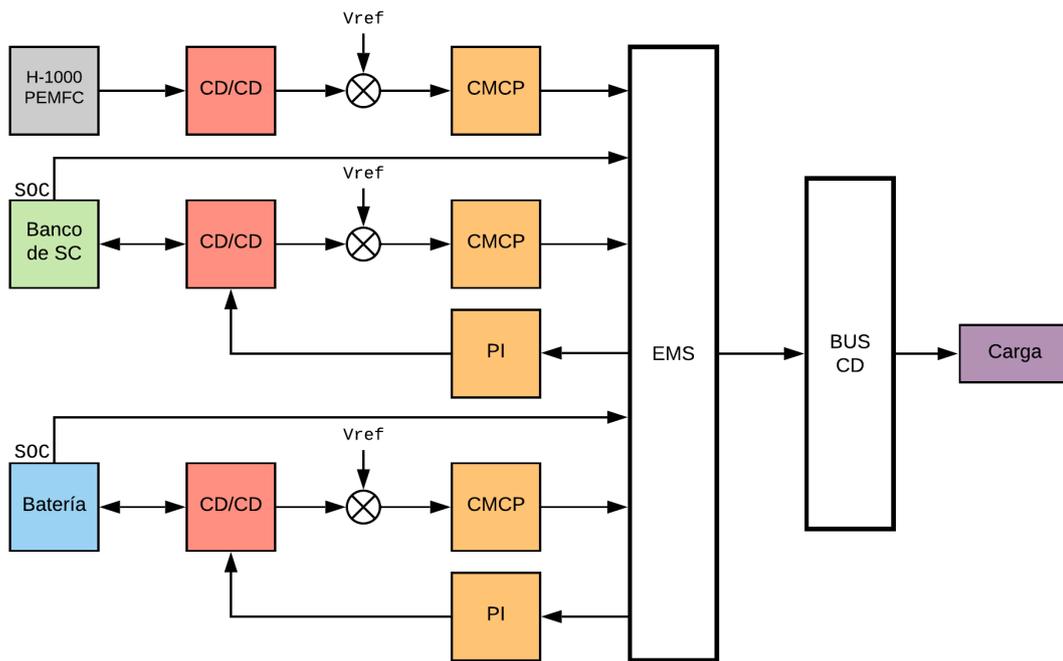


Figura 5.1: Diagrama a bloques del sistema de energía híbrido.

Cabe mencionar que la estrategia de administración de energía parte de las siguientes suposiciones:

- 1 La fuente de energía principal del sistema es la celda de combustible y cuenta con un suministro de hidrógeno continuo.
- 2 De las fuentes de energía auxiliar, el banco de supercapacitores actúa como segunda fuente de energía, mientras que, la batería lo hace como la tercera fuente de energía para completar la demanda de corriente de la carga.
- 3 Al iniciar el funcionamiento del sistema híbrido completo, tanto el banco de supercapacitores como la batería tienen su estado de carga (SOC) por arriba o igual al 95 %.
- 4 Las fuentes de energía auxiliar pasan a una condición de carga cuando el SOC se encuentra igual o por debajo del 70 %.
- 5 La celda de combustible puede entregar hasta 1kW de potencia, el banco de supercapacitores hasta 500 W y la batería hasta 250 W.

5.3. Estrategia de control para la administración de energía.

Tomando en consideración las características propias de cada una de las fuentes de energía, se propone un algoritmo para la administración de energía con base en reglas. Para lograr esto, se definieron distintos escenarios o estados de operación del sistema híbrido. Estos escenarios permitirán que el algoritmo determine que fuente(s) de energía funcionen para entregar la potencia que demanda la carga, así como, las señales de referencia para los controladores locales de los convertidores CD-CD. Las Tablas 5.1 y 5.2 muestran los posibles estados de operación de manera simplificada, junto con las condiciones a las que están sujetos y se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 5.2:

Tabla 5.1: Estados de operación del sistema híbrido, parte I.

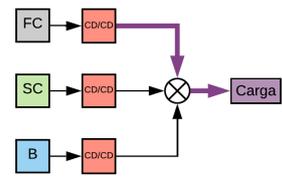
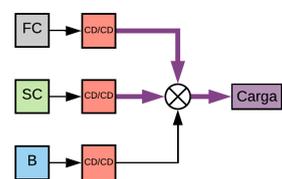
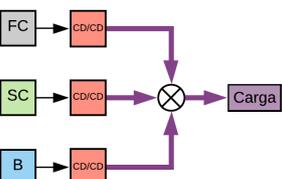
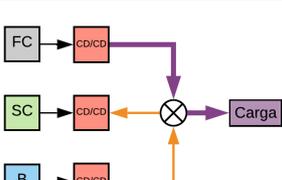
| Estado 1 | Condiciones |
|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda}$ ▪ $70\% \leq SOC_{SC} \leq 95\%$ ▪ $70\% \leq SOC_B \leq 95\%$ ▪ El banco de SC y la batería están desconectados de la carga. |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda} + P_{SC}$ ▪ $70\% \leq SOC_{SC} \leq 95\%$ ▪ $70\% \leq SOC_B \leq 95\%$ ▪ La batería está desconectada de la carga. |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda} + P_{SC} + P_B$ ▪ $70\% \leq SOC_{SC} \leq 95\%$ ▪ $70\% \leq SOC_B \leq 95\%$ |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda}$ ▪ $SOC_{SC} \leq 70\%$ ▪ $70\% \leq SOC_B \leq 95\%$ ▪ Se utiliza la batería para cargar el banco de SC. ▪ La batería y el banco de SC están desconectados de la carga. |

Tabla 5.2: Estados de operación del sistema híbrido, parte II.

| Estado | Condiciones |
|-----------------|---|
| <p>Estado 5</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda}$ ▪ $SOC_{SC} \leq 70\%$ ▪ $SOC_B \leq 70\%$ ▪ El banco de SC y la batería están desconectados de la carga. |
| <p>Estado 6</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda} + P_{SC}$ ▪ $70\% \leq SOC_{SC} \leq 95\%$ ▪ $SOC_B \leq 70\%$ ▪ La batería está desconectada de la carga. |
| <p>Estado 7</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ $P_{carga} \leq P_{celda} + P_B$ ▪ $SOC_{SC} \leq 70\%$ ▪ $70\% \leq SOC_B \leq 95\%$ ▪ El banco de SC está desconectado de la carga. |

Es importante mencionar que en los estados de operación donde se realizan tareas de carga (ya sea para la batería, el banco de SC o ambos) estas se realizan mediante dos pasos: primeramente, se proporciona una corriente constante hasta alcanzar el voltaje nominal del dispositivo, posteriormente, se mantiene un voltaje constante (con corriente mínima) hasta alcanzar un SOC del 95 % en el dispositivo.

Con respecto al modo de funcionamiento de los convertidores de CD/CD que están conectados a cada fuente de energía, la Tabla 5.3 resume dicha información tomando en cuenta el modo de operación:

Tabla 5.3: Modos de funcionamiento de los convertidores CD-CD.

| Estado | Condiciones | CD-CD FC | CD-CD SC | CD-CD B |
|--------|-----------------|----------|--------------|--------------|
| 1 | | ON | Sin Conexión | Sin Conexión |
| 2 | | ON | Buck | Sin Conexión |
| 3 | | ON | Buck | Buck |
| 4 | Carga I_{cte} | ON | Boost | Buck |
| | Carga V_{cte} | ON | Boost | Buck |
| 5 | Carga I_{cte} | ON | Boost | Boost |
| | Carga V_{cte} | ON | Boost | Boost |
| 6 | Carga I_{cte} | ON | Buck | Boost |
| | Carga V_{cte} | ON | Buck | Boost |

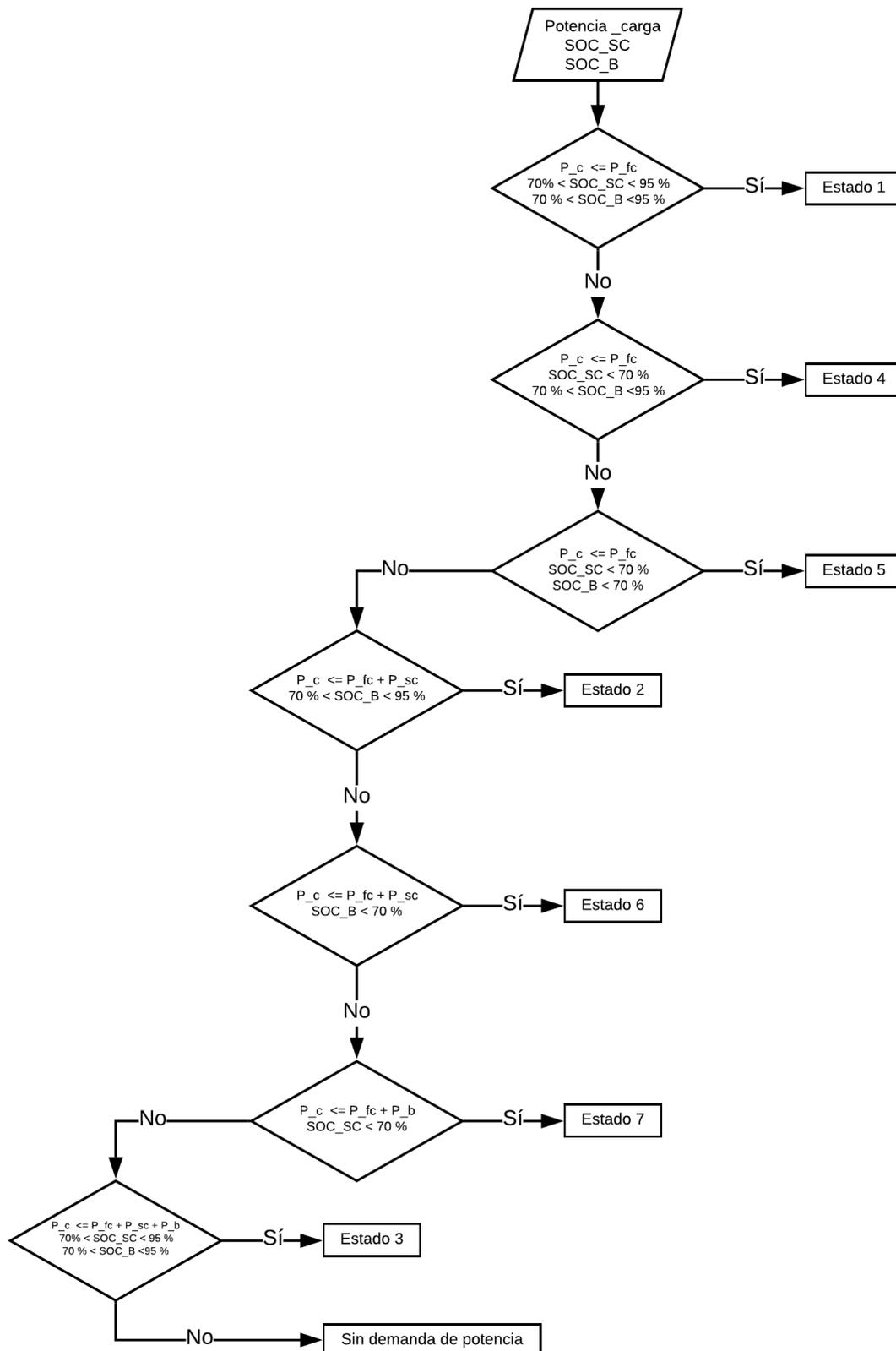


Figura 5.2: Diagrama de flujo de la EMS con base en estados de operación.

5.3.1. Ciclos de conducción.

Con el fin de validar de manera conjunta el sistema híbrido, los controladores locales y el algoritmo para la administración de energía se utilizaron tres perfiles de corriente que se obtuvieron a partir de tres ciclos de conducción.

Los ciclos de conducción son esquemas fijos de operación de un vehículo que permiten realizar pruebas de emisión de contaminantes bajo condiciones de reproducibilidad. Estos ciclos, se definen principalmente en términos de la velocidad del vehículo y selección de la marcha en función del tiempo. Es importante mencionar que los ciclos de conducción pueden emplearse para diferentes propósitos distintos a la medición de emisiones, por ejemplo: pruebas del motor o de la durabilidad de la cadena de transmisión, [69].

Dependiendo de la velocidad y los cambios de la carga en el motor, los ciclos de conducción pueden dividirse en: ciclos estables y ciclos transitorios. Para ese trabajo de investigación se consideran los segundos ya que la velocidad del vehículo y la carga en el motor cambian continuamente.

Ahora bien, los ciclos de conducción son perfiles de velocidad básicamente. Sin embargo, pueden convertirse a potencia eléctrica mediante la ecuación 5.1 propuesta en [70]; a partir de algunas características mecánicas del vehículo: masa, coeficiente de fricción, coeficiente aerodinámico, etc.

$$P = V \left[\frac{1}{2} \rho_{aire} V^2 S C_x + M g \sin \alpha + M g C_r \cos \alpha \right], \quad (5.1)$$

donde V es la velocidad del vehículo en m/s , M es la masa del vehículo en kg , S es la superficie frontal en m^2 , C_x es el coeficiente aerodinámico, C_r es el coeficiente de fricción, ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , α es el grado de inclinación del camino y g es la constante gravitacional en m/s^2 .

Después de obtener el perfil de potencia eléctrica, éste se puede expresar en un perfil de corriente eléctrica con una conversión adecuada. La Figura 5.3 muestra un ciclo de conducción y su correspondiente perfil de potencia eléctrica.

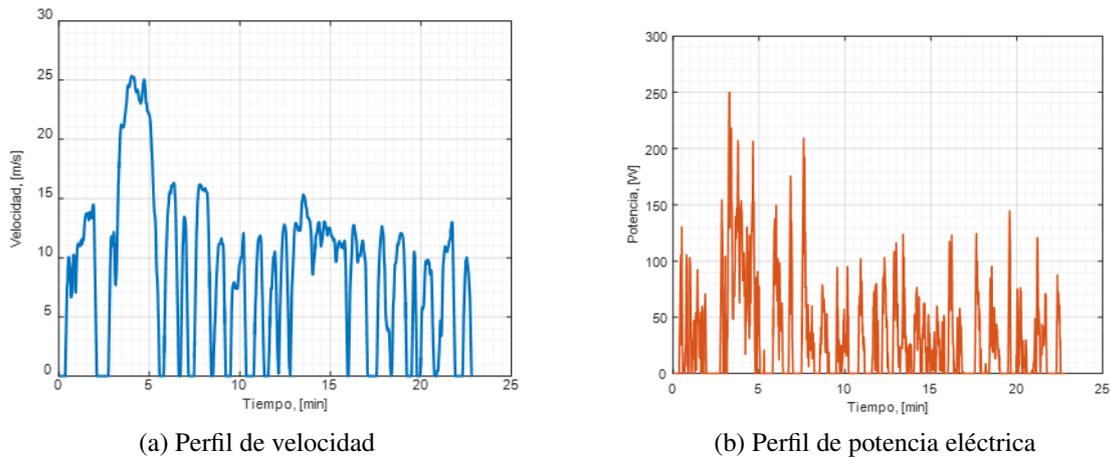


Figura 5.3: Ciclo de conducción UDDS.

5.4. Simulación de la EMS en el sistema híbrido.

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en Simulink de Matlab, así como, el análisis correspondiente. Se consideran dos tipos de prueba utilizando ciclos de conducción diferentes (ECE 15 y EUDC), ambos escalados a la potencia eléctrica total del sistema híbrido.

5.4.1. Simulación 1 - Ciclo de conducción ECE 15.

Para esta primera prueba se utiliza el ciclo de conducción ECE 15 y cuyo perfil de velocidad se presenta en la Figura 5.4:

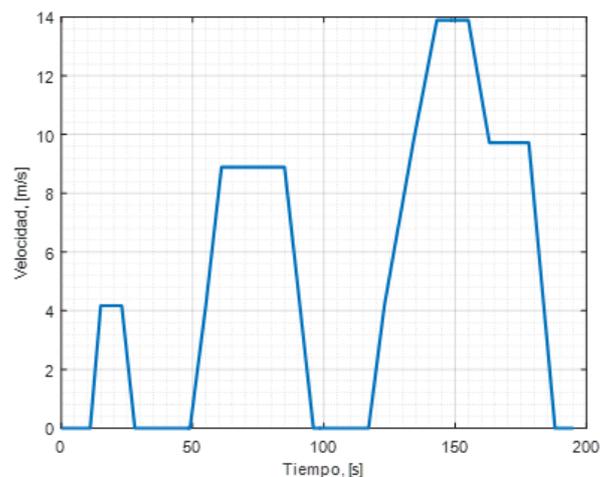


Figura 5.4: Ciclo de conducción ECE 15.

Este ciclo de conducción presenta las siguientes características:

Tabla 5.4: Parámetros del ciclo de conducción ECE 15.

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Distancia total | 994.6 m |
| Tiempo total | 195 s |
| Tiempo de conducción | 150 s |
| Velocidad promedio (recorrido) | 18.4 km/h |
| Velocidad máxima. | 50.07 km/h |
| Aceleración positiva promedio | 0.348 m/s ² |
| Aceleración negativa promedio | 0.393 m/s ² |
| Número de paradas | 4 |
| Duración promedio de parada | 11.25 s |

Para expresar el perfil de velocidad anterior en un perfil de potencia eléctrica (ver Figura 5.5) se utiliza la Ec. 5.1 con los datos de un vehículo compacto que se proporcionan en [3] y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Valores típicos para un vehículo compacto.

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Masa de vehículo | 1000 kg |
| Constante gravitacional | 9.81 m/s ² |
| Grado de inclinación del camino | 0° |
| Coefficiente de fricción | 0.01 |
| Coefficiente aerodinámico | 0.3 |
| Densidad del aire | 1.225 kg/m ³ |
| Superficie frontal | 2.5 m ² |

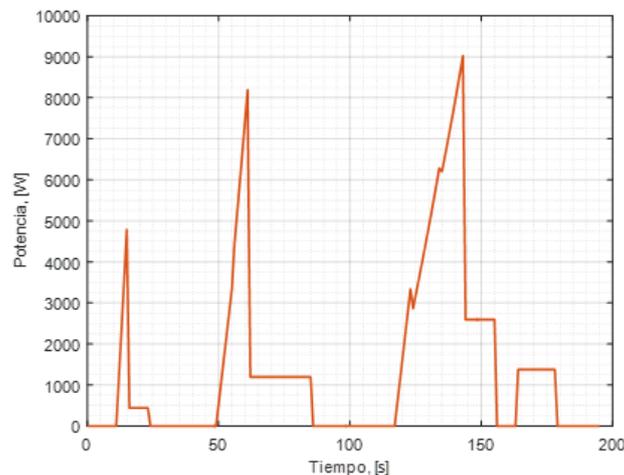


Figura 5.5: Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo ECE 15.

Ya que se tiene el perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo de conducción, el siguiente paso consiste en escalar esta potencia eléctrica de tal manera que coincida con la potencia que puede entregar el sistema híbrido, 1.75 kW (máximo). Finalmente, se expresa este nuevo perfil de potencia eléctrica (ver Figura 5.6) escalado en un perfil de corriente eléctrica mediante una conversión adecuada y que representará la carga del sistema híbrido.

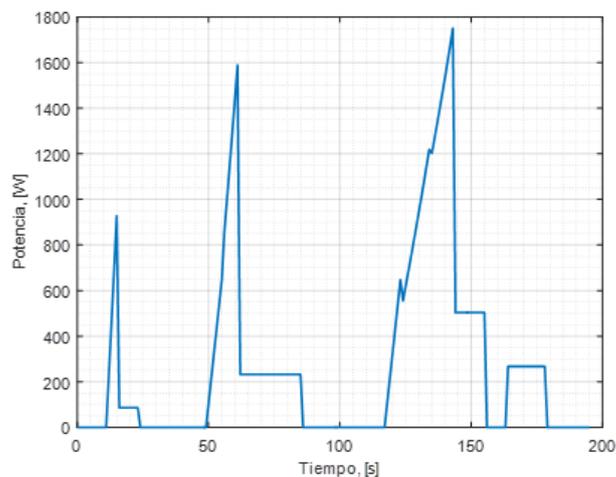


Figura 5.6: Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 1.

Y su correspondiente perfil de corriente esta dado por la Figura 5.7:

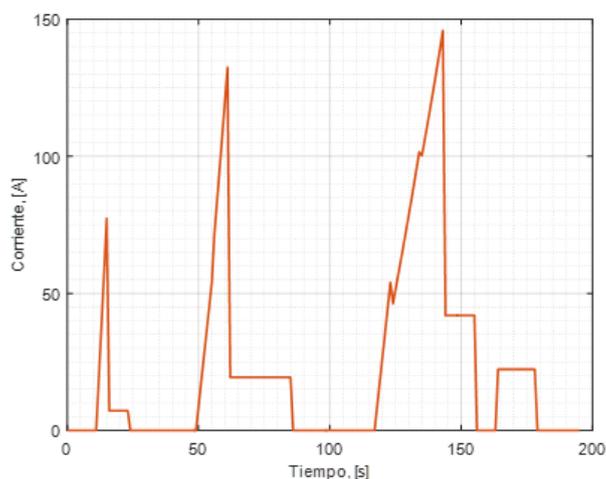


Figura 5.7: Perfil de corriente eléctrica para el sistema híbrido FC-SC-B, simulación 1.

La simulación se realizó en el ambiente de Simulink de Matlab con un paso variable y utilizando el método ode23t. El diagrama a bloques de Simulink del sistema se puede consultar en el apéndice correspondiente. El tiempo total de simulación fue de 195 segundos y los resultados que se obtuvieron de la celda de combustible tipo PEM se muestran en las Figuras 5.8a y 5.8b:

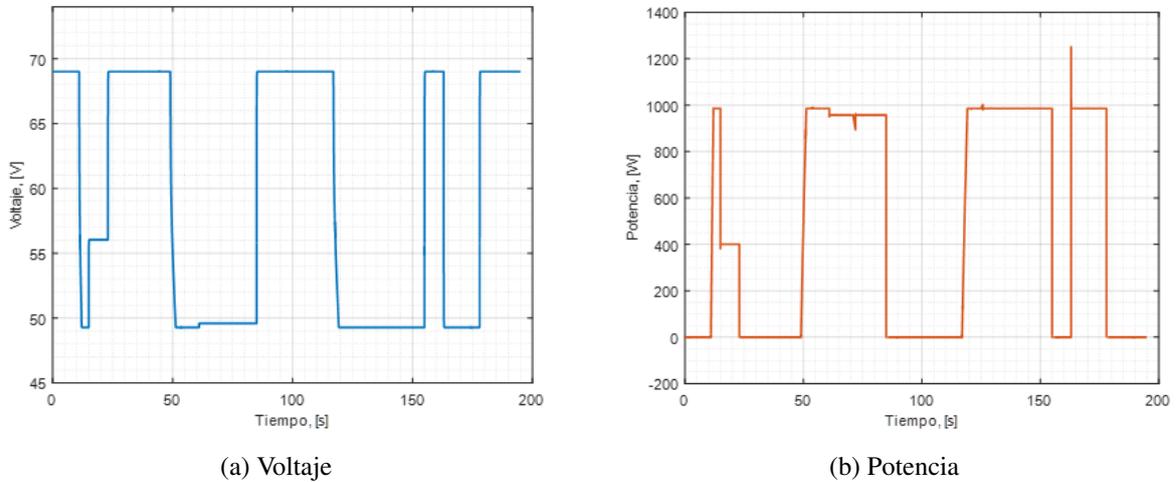


Figura 5.8: Respuesta de voltaje y potencia que entrega la PEMFC, simulación 1.

Por su parte, la respuesta en voltaje del banco de supercapacitores en sus terminales y su estado de carga a lo largo de la primera simulación se presenta en las Figuras 5.9a y 5.9b, respectivamente:

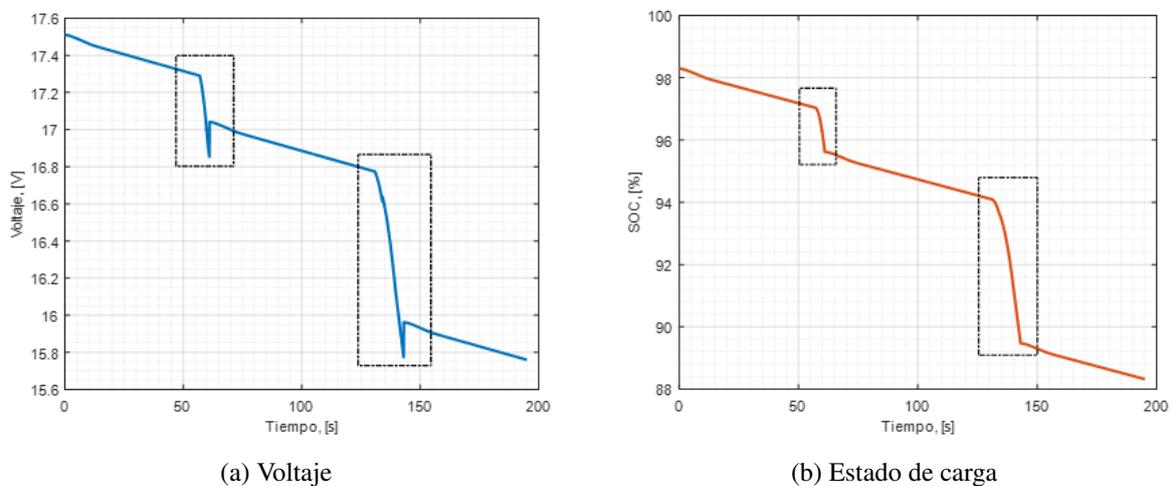


Figura 5.9: Respuesta de voltaje y SOC del banco de SC, simulación 1.

En la Figura 5.9a se puede observar que al inicio del ciclo de conducción el banco de supercapacitores no contribuye con energía para satisfacer la demanda de potencia por el ciclo de conducción, sin embargo, por el proceso de autodescarga de la propia fuente de energía se tiene una disminución de voltaje en sus terminales y por consiguiente en el SOC; este fenómeno se presenta en tres ocasiones a lo largo de todo el ciclo de conducción.

Por otra parte, en la misma figura se puede notar que existen dos intervalos de tiempo en los que se hay una disminución de voltaje más pronunciada en las terminales del banco de supercapacitores (zona punteada en la Figura 5.9a). La razón de esta disminución es que en esos intervalos de tiempo la potencia que demanda el ciclo de conducción es mayor de lo que la celda de combustible puede entregar, por lo tanto, la estrategia de administración de energía pone en funcionamiento a la primera fuente de energía auxiliar (supercapacitores) para poder complementar la demanda de potencia.

También puede observarse en la Figura 5.9b el comportamiento del SOC del banco de supercapacitores en los mismos intervalos de tiempo mencionados anteriormente. De hecho, el segundo intervalo tiene tanto una mayor duración como una mayor demanda de potencia y consiguiente el SOC disminuye súbitamente.

Finalmente, las Figuras 5.10a y 5.10b muestran la respuesta en voltaje de la batería, así como su estado de carga durante la simulación con el ciclo de conducción ECE R15.

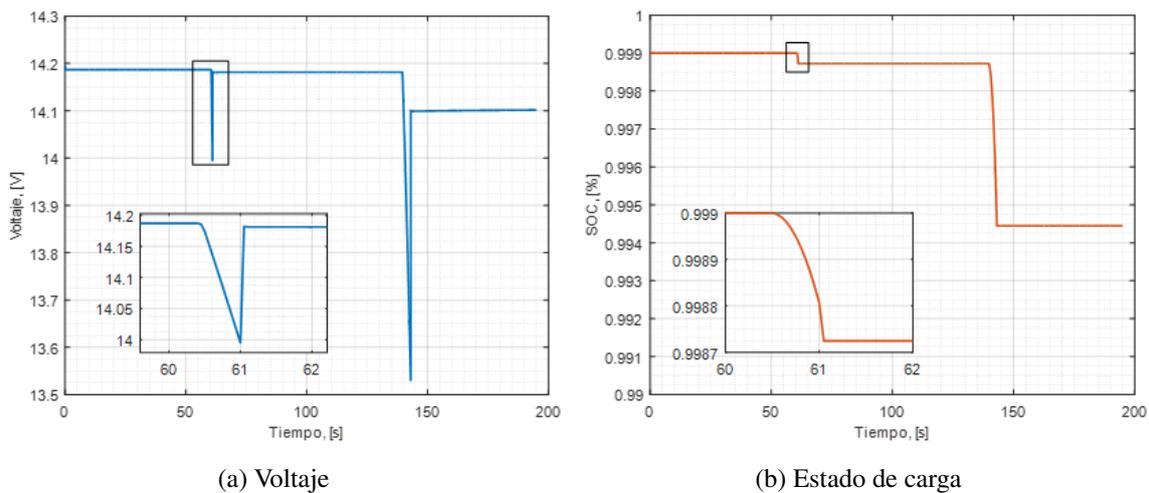


Figura 5.10: Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 1.

La Figura 5.10a presenta la respuesta en voltaje de la batería, puede observarse que su voltaje permanece casi constante durante los intervalos de tiempo en los que no contribuye con energía para satisfacer la demanda de potencia. Esto se debe a que una de las características principales de las baterías es que su proceso de autodescarga es más lento en comparación con los supercapacitores y, por ende, la energía que poseen se conserva una mayor cantidad de tiempo ante la ausencia de una carga conectada a sus terminales.

Por otro lado, con respecto al SOC de la batería se puede observar en la Figura 5.10b que la disminución es mínima en una primera instancia, ya que la potencia con la que

contribuye para satisfacer a la carga es en un intervalo de tiempo muy breve (menos de un segundo). Más adelante, en la escala de tiempo de la misma figura se observa otra disminución en el SOC de la batería debido a una segunda contribución para satisfacer la demanda de la carga.

5.4.2. Simulación 2 - Ciclo de conducción EUDC.

Para esta segunda prueba se utiliza el ciclo de conducción EUDC y cuyo perfil de velocidad se presenta en la Figura 5.11:

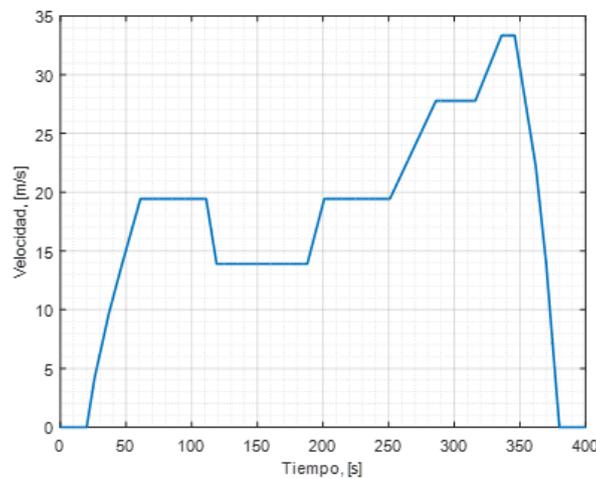


Figura 5.11: Ciclo de conducción EUDC.

Este ciclo de conducción presenta las características que se muestran en la Tabla 5.6:

Tabla 5.6: Parámetros del ciclo de conducción EUDC.

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Distancia total | 6955.07 m |
| Tiempo total | 400 s |
| Tiempo de conducción | 365 s |
| Velocidad promedio (recorrido) | 62.6 km/h |
| Velocidad máxima. | 120.09 km/h |
| Aceleración positiva promedio | 0.266 m/s ² |
| Aceleración negativa promedio | 0.420 m/s ² |
| Número de paradas | 2 |
| Duración promedio de parada | 17.5 s |

El perfil de potencia eléctrica correspondiente al perfil de velocidad anterior se obtiene de nueva cuenta con la Ec. 5.1 y la Tabla 5.5 (datos de un vehículo compacto) que se presentaron en la simulación 1. A continuación, en la Figura 5.12 se presenta el perfil de potencia eléctrica correspondiente al perfil de velocidad que se obtuvo con dicha ecuación:

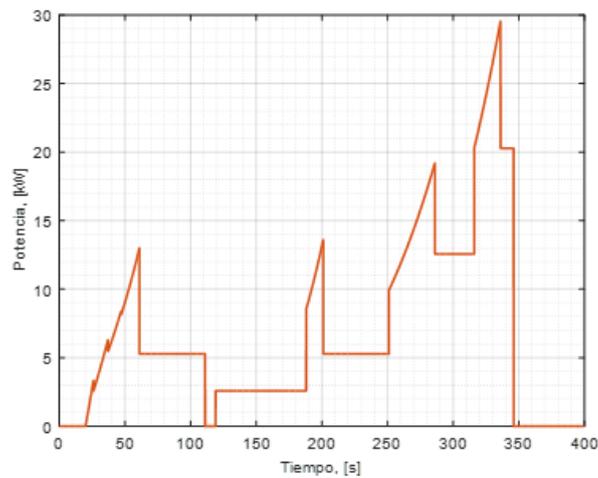


Figura 5.12: Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo EUDC.

Al igual que la simulación 1, ya que se tiene el perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo de conducción, el siguiente paso consiste en escalar esta potencia eléctrica a un valor máximo de 1.75 kW (ver Figura 5.13).

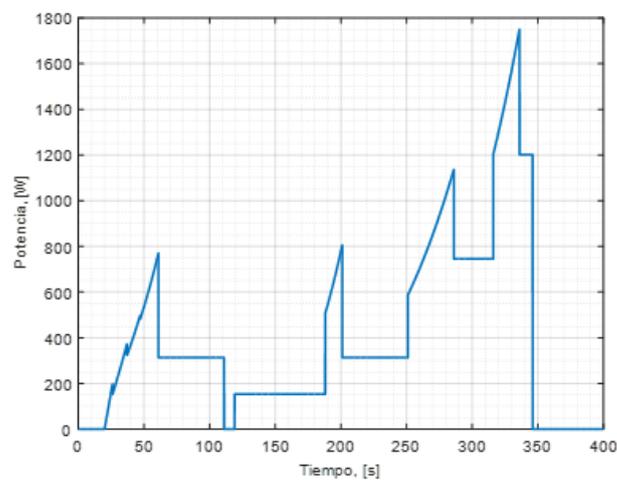


Figura 5.13: Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 2.

La simulación se realizó en el ambiente de Simulink de Matlab con el método de paso variable ode23t y un tiempo total de simulación de 400 segundos; para el caso de la celda de combustible tipo PEM los resultados se presentan en las Figuras 5.14a y 5.14b:

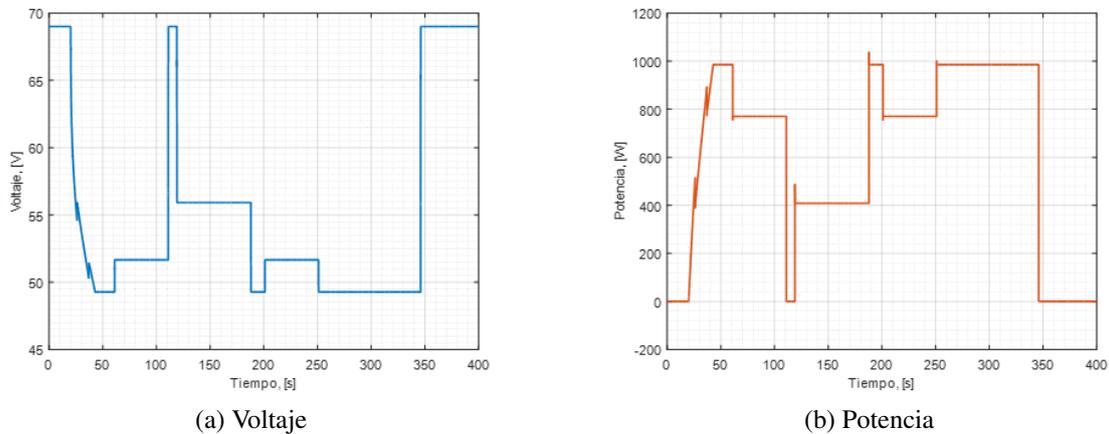


Figura 5.14: Respuesta de voltaje y potencia que entrega la celda de combustible, simulación 2.

Para esta simulación se puede observar que la celda de combustible tipo PEM en dos intervalos de tiempo contribuye con su potencia máxima de 1kW para satisfacer a la demanda de potencia total por la carga. En dichos intervalos, la estrategia de administración de energía debe poner en funcionamiento a alguna de las fuentes de energía auxiliar, o bien, ambas para lograr el objetivo.

Por otra parte, la respuesta en voltaje del banco de supercapacitores en sus terminales, así como, su estado de carga para esta segunda simulación se presenta en las Figuras [5.15a](#) y [5.15b](#):

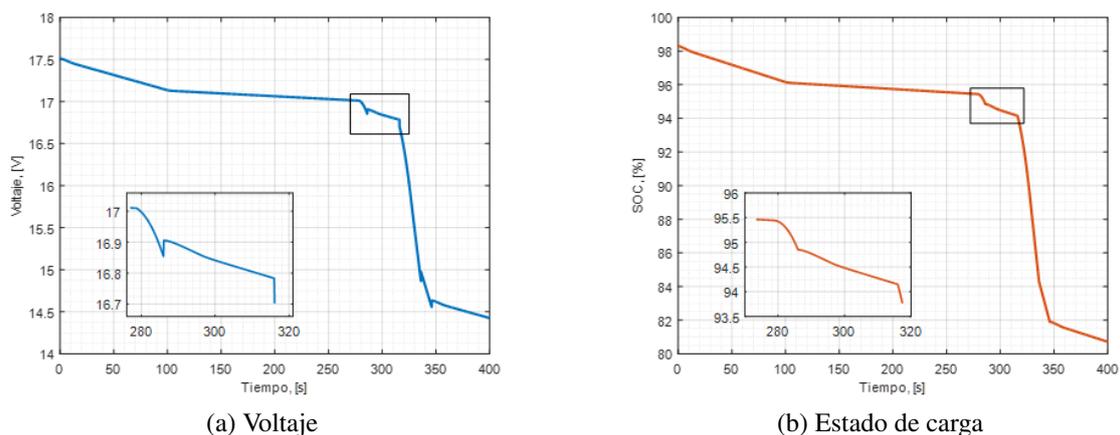


Figura 5.15: Respuesta de voltaje y SOC que entrega el banco de SC, simulación 2.

En la Figura [5.15a](#) se puede observar que el banco de supercapacitores se encuentra poco más de la mitad de tiempo del ciclo de conducción en el proceso de autodescarga, ya que sólo hacia el final del ciclo la demanda de potencia por la carga supera los

1KW que puede entregar la celda de combustible. El voltaje en las terminales del banco de supercapacitores disminuye casi en 3 volts a lo largo de todo el ciclo de conducción.

Por otra parte, se puede notar en la Figura 5.15b que el SOC del banco de supercapacitores termina en un valor cercano al 80 % al finalizar el ciclo de conducción. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del tiempo el banco está en un proceso de autodescarga. De hecho, antes de que el banco de supercapacitores aporte su parte de potencia al sistema híbrido para satisfacer la demanda de la carga el SOC disminuye apenas un 3 %. Y en el último, proceso de autodescarga el SOC baja un 2 %.

Finalmente, las Figuras 5.16a y 5.16b muestran la respuesta en voltaje de la batería, así como su estado de carga durante la simulación con el ciclo de conducción EUDC.

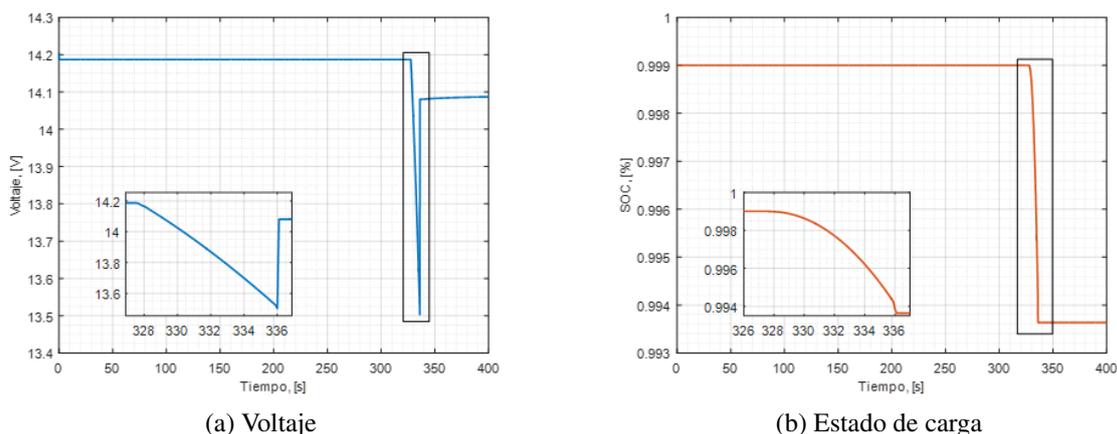


Figura 5.16: Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 2.

La Figura 5.16a presenta la respuesta en voltaje de la batería, se puede observar que la mayor parte del ciclo de conducción el voltaje en las terminales permanece casi constante. La participación de esta fuente de energía auxiliar es alrededor de 10 segundos, lo que provoca una disminución en 0.6 volts del voltaje total. Posteriormente, cuando deja de contribuir con energía al sistema híbrido su voltaje se recupera; quedando únicamente una diferencia de 0.1 volts.

En cuanto al SOC de la batería, en la Figura 5.16b se puede notar que la disminución a lo largo del ciclo de conducción es mínima (0.0055 %). La razón de esto, tal y como se mencionó anteriormente, es porque la batería contribuye en un intervalo de tiempo muy breve (del segundo 327 al 336).

5.4.3. Simulación 3 - Ciclo de conducción HWFET.

Para esta tercera prueba se utiliza el ciclo de conducción HWFET y cuyo perfil de velocidad se presenta en la Figura 5.17:

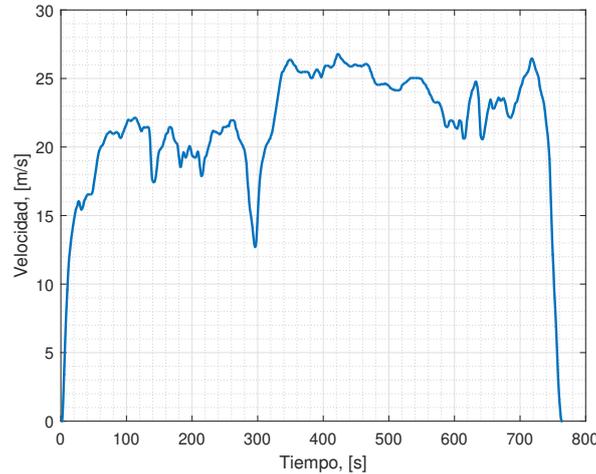


Figura 5.17: Ciclo de conducción HWFET.

Este ciclo de conducción presenta las características dadas en la Tabla 5.7:

Tabla 5.7: Parámetros del ciclo de conducción HWFET.

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Distancia total | 16503.13 m |
| Tiempo total | 765 s |
| Tiempo de conducción | 764 s |
| Velocidad promedio (recorrido) | 77.7 km/h |
| Velocidad máxima. | 96.32 km/h |
| Aceleración positiva promedio | 0.157 m/s ² |
| Aceleración negativa promedio | 0.178 m/s ² |
| Número de paradas | 1 |
| Duración promedio de parada | 1 s |

El perfil de potencia eléctrica correspondiente al perfil de velocidad anterior se obtiene de nueva cuenta con la ecuación 1 y la Tabla 3 (datos de un vehículo compacto) que se presentaron en la primera simulación. A continuación, en la Figura 5.18 se presenta el perfil de velocidad que se obtuvo con dicha ecuación:

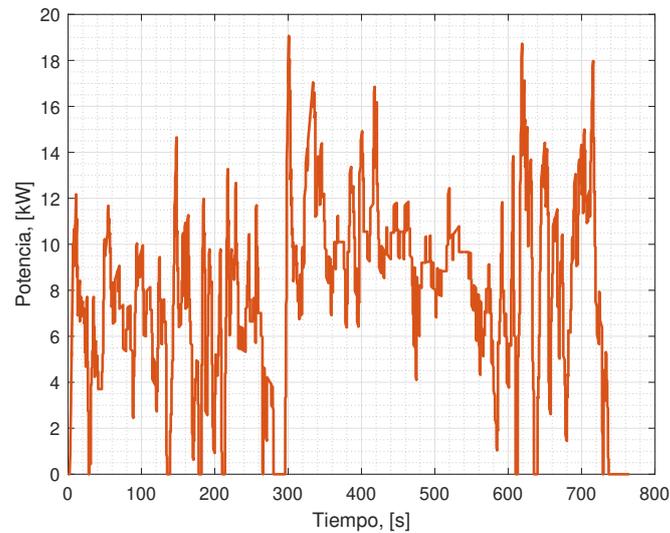


Figura 5.18: Perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo HWFET.

Al igual que la simulación 1, ya que se tiene el perfil de potencia eléctrica correspondiente al ciclo de conducción, el siguiente paso consiste en escalar esta potencia eléctrica a un valor máximo de 1.75 kW (ver Figura 5.19).

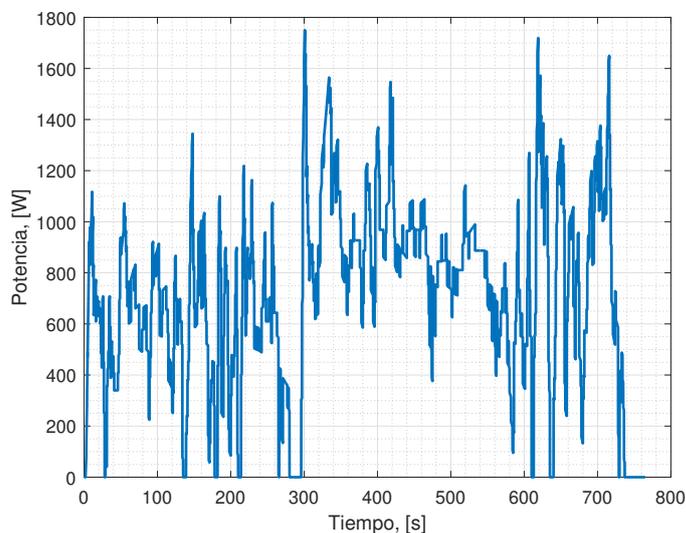


Figura 5.19: Perfil de potencia eléctrica escalado al sistema híbrido FC-SC-B, simulación 3.

La simulación se realizó en el ambiente de Simulink de Matlab con el método de paso variable ode23t y un tiempo total de simulación de 765 segundos; para el caso de la celda de combustible tipo PEM los resultados se presentan a continuación:

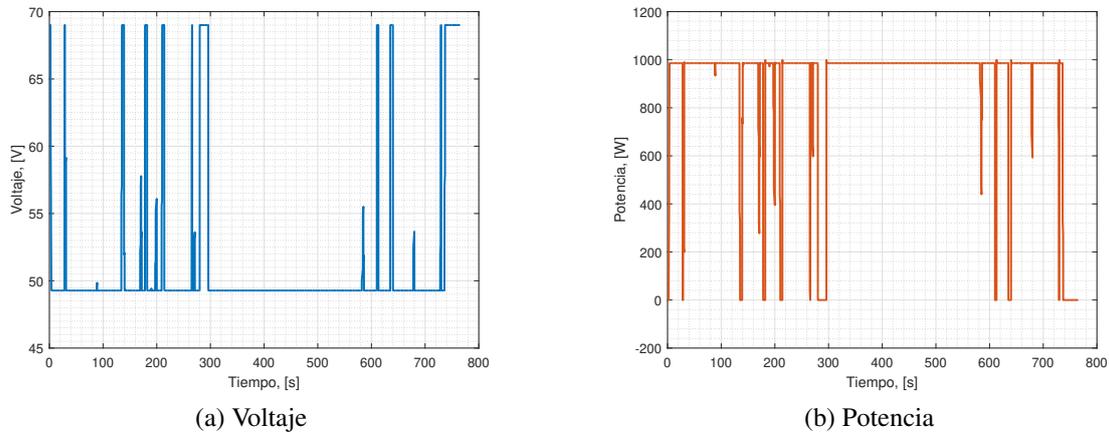


Figura 5.20: Respuesta de voltaje y potencia que entrega la celda de combustible, simulación 3.

Se puede observar en la Figura 5.20a que en comparación con las simulaciones anteriores, la contribución de la PEMFC con su potencia máxima para este caso se presenta en una mayor cantidad de veces e incluso con periodos de tiempo largos. Además, observado de manera conjunta la Figura 5.20b es notorio que para dichos instantes de tiempo, la estrategia de administración de energía debe activar a las fuentes de energía auxiliares para que de manera conjunta puedan satisfacer la demanda de potencia por parte de la carga.

Por otro lado, tanto la respuesta en voltaje como el estado de carga del banco de supercapacitores para esta tercera simulación se presentan en las Figuras 5.21a y 5.21b:

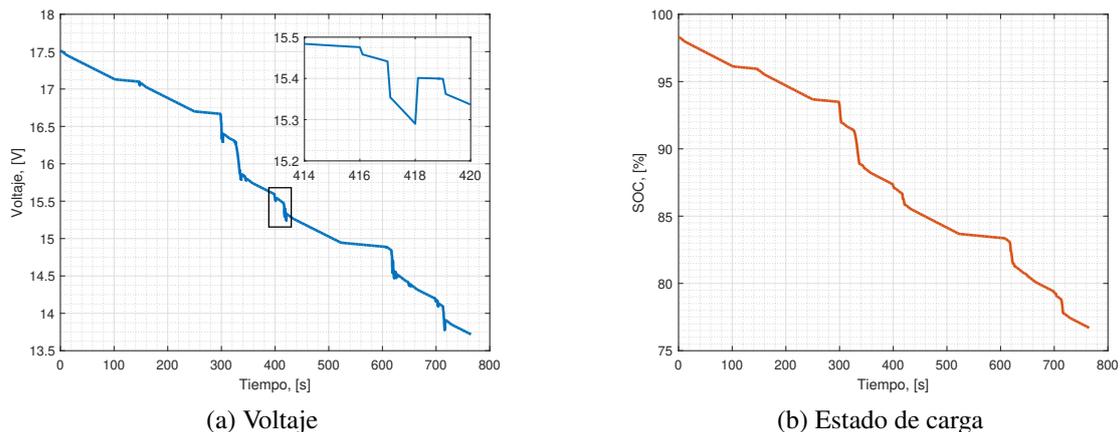


Figura 5.21: Respuesta de voltaje y SOC del banco de SC, simulación 3.

En la Figura 5.21a se puede notar que el banco de supercapacitores tiene una participación más activa en la simulación del sistema con este ciclo de conducción, ya que existen más instantes de tiempos en que la demanda de potencia supera los 1KW. Esto se

puede verificar al observar que la magnitud del voltaje en sus terminales disminuye casi hasta los 13.5 volts.

Ahora bien, con respecto al estado de carga del banco de supercapacitores se puede observar en la Figura 5.21b que para esta ciclo de conducción en particular, su disminución se debe tanto de los procesos de autodescarga como de su aportación de potencia eléctrica (ambos casi en la misma proporción). De hecho, el SOC finaliza alrededor del 75 %.

Por último, las Figuras 5.22a y 5.22b muestran la respuesta en voltaje de la batería, así como su estado de carga durante la simulación con el ciclo de conducción EUDC.

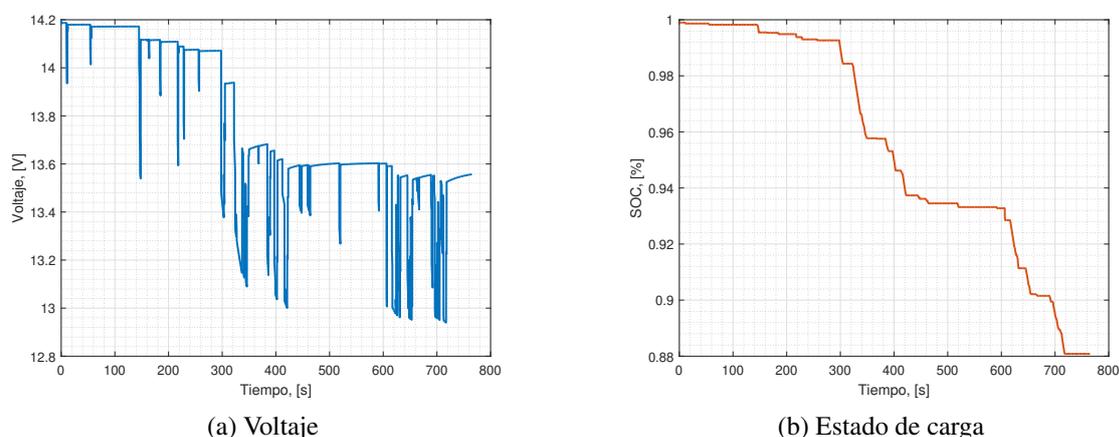


Figura 5.22: Respuesta de voltaje y SOC que entrega la batería, simulación 3.

La respuesta en voltaje de la batería se muestra en la Figura 5.22a, se puede notar que se presentan diversos instantes de tiempos en los que este dispositivo auxiliar trabaja de manera conjunta con los otros dos con el objetivo de suministrar la potencia eléctrica que demanda la carga. Incluso, prestando atención a la figura se aprecia que en la primer parte del ciclo de conducción es donde se tiene principalmente el proceso de autodescarga de la batería.

Con respecto al SOC de la batería, en la Figura 5.22b se puede observar que entre los instantes de tiempo, 200 a 400 segundos y 600 a 765 segundos, la disminución en el SOC es más notaria, ya que en dichos instantes la estrategia de administración de energía habilita su operación para contribuir en el suministro de potencia. De hecho, el SOC termina en un valor aproximado del 88 %.

Capítulo 6

Conclusiones.

En este tema de tesis se desarrolló e implementó (simulación numérica) una estrategia para la administración de energía eléctrica en una fuente híbrida compuesta por una celda de combustible tipo PEM, un banco de supercapacitores y una batería LiFePO₄; cada uno de estos dispositivos además cuenta con un convertidor CD-CD para su acondicionamiento de potencia y regulación del voltaje.

En primera instancia, fue necesario contar con un modelo matemático de cada una de las fuentes de energía que nos permita reproducir su comportamiento estático o dinámico, bajo diferentes operaciones de condición. Durante la revisión del estado del arte, se encontró que se emplean diferentes enfoques para realizar este proceso: *electroquímico, circuito eléctrico equivalente, parámetros agrupados o concentrados, etc.* Para este trabajo de investigación se decidió utilizar un modelo con base en un CEE ya que las ecuaciones se obtienen a partir de elementos eléctricos comunes que permiten reproducir las características eléctricas de voltaje y corriente.

Para cada uno de los modelos de las fuentes de energía que se eligieron, fue necesario realizar su parametrización empleando los dispositivos reales que se tienen en el laboratorio. Por un lado, para la PEMFC la ventaja de su modelo es que únicamente se necesita la información y curvas características que aparecen en la hoja de datos de la celda de combustible modelo H-1000 proporcionada por Horizon Fuel Cell Technologies. Por otro lado, tanto para el supercapacitor y la batería se llevaron a cabo pruebas experimentales con los equipos PowerStor XB360-2R5407-R y PowerSonic PSL-12450, respectivamente. Los diferentes experimentos que se realizaron en estos dispositivos se agruparon en dos tipos de pruebas: estáticas y dinámicas. En las de tipo estática se consideran procesos de carga y descarga con corriente constante, mientras que, en las de tipo dinámica los procesos de carga y descarga son con corriente pulsante.

La validación de los modelos propuestos se realizó fuera de línea, es decir, se compararon los resultados de las simulaciones numéricas en Matlab con los datos experimentales

obtenidos de cada fuente de energía. Además, se calcularon diversos índices de desempeño (*desviación estándar, error, FIT, etc.*) con el objetivo de tener información cuantitativa sobre las características eléctricas de los modelos. Los resultados para cada uno de los modelos muestran que se tiene un buen desempeño ya que sí son capaces de reproducir las características estáticas y dinámicas de las fuentes, presentando incluso valores del FIT por arriba del 92 % y hasta un 99 %.

En segunda instancia, se diseñaron los convertidores CD-CD para cada una de las fuentes de energía. Para la PEMFC se trató de un convertidor Buck y para las otras dos fuentes de energía un convertidor bidireccional con el objetivo de mantener un voltaje de salida de 12 volts junto con su potencia eléctrica correspondiente. Para lograr esto, se implementó una estrategia de control a nivel local mediante la técnica control en modo corriente programada (CMCP) ya que se regula de manera indirecta el voltaje a través de dos lazos de control. Siendo uno de ellos, el lazo de corriente (interno) que hace uso de la corriente de que suministran la fuente de energía correspondiente.

Finalmente como tercera instancia y la contribución principal del trabajo de investigación, es la propuesta de una estrategia de control que permita distribuir la demanda de potencia eléctrica por una carga entre una fuente de energía principal (PEMFC) y dos fuentes de energía auxiliar (banco de supercapacitores y batería LiFePO₄) tomando en cuenta las características extrínsecas e intrínsecas de cada una de ellas. Para lograr esto, se definieron diversos estados de operación considerando principalmente la demanda de potencia y estableciendo una cota inferior-superior para el estado de carga de las fuentes de energía.

Se debe tomar en cuenta que hoy en día no existe un sensor para medir el estado de carga, debido a esto, es necesario emplear diversos métodos para poder calcular un valor estimado de este parámetro. En este sentido, con lo que respecta al SOC del banco de supercapacitores se utilizó el método de Conteo de Coulomb debido a su fácil implementación tanto a nivel de simulación como experimental. Y por otra parte, para la estimación del SOC en la batería se diseñó un Filtro de Kalman Extendido porque era necesario un nivel de precisión mayor, ya que los parámetros del modelo de la batería están en función del SOC.

Para evaluar el desempeño de la estrategia de administración de energía se llevaron a cabo simulaciones numéricas en Matlab empleando tres ciclos de conducción diferentes: ECE 15, EUDC y HWFET. Estos ciclos de conducción se normalizaron al nivel de potencia del sistema híbrido completo, los dos primeros tienen como característica que se tratan de ciclos de conducción suave, mientras que el tercer ciclo de conducción es abrupto.

A partir de los resultados que se obtuvieron de las simulaciones mencionadas anteriormente, se concluye que la estrategia de administración de energía cumple el objetivo de distribuir la demanda de potencia por la carga entre las fuentes de energía ya que cada una de ellas aporta su potencia correspondiente siguiendo alguno de los estados de operación definidos y tomando en cuenta su nivel de SOC. En este sentido, los resultados también corroboran una buena operación de los métodos empleados para la estimación del SOC ya que se aprecia con claridad el comportamiento de este parámetro a lo largo de la simulación, ya sea cuando se demanda corriente o se presenta la autodescarga en la fuente auxiliar de energía.

6.1. Trabajos futuros.

Durante el desarrollo y la propuesta presentada en este tema de tesis, se identificaron diversas áreas de oportunidad que pudieran conducir, en el corto y mediano plazo, a nuevos temas de investigación. Algunos de éstos se muestran a continuación:

- Desarrollar un modelo con base en un CEE para el supercapacitor cuyos parámetros estén en función del estado de carga.
- Obtener la versión de orden no entero para los modelos de la PEMFC, Supercapacitor y Batería LiFePO₄ empleando operadores diferenciales e integrales de orden no entero.
- Complementar la estrategia de administración de energía con un sistema de diagnóstico de fallas para el banco de supercapacitores y la batería de LiFePO₄.
- Proponer nuevos algoritmos para la estimación del estado de carga en supercapacitores y baterías de LiFePO₄ y que su puesta en funcionamiento a nivel experimental sea sencilla.
- Implementar una estrategia de control en los convertidores CD-CD mediante algoritmos de optimización heurísticos o metaheurísticos.

Bibliografía

- [1] G. Chicco, “Sustainability challenges for future energy systems,” *Journal of Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, 2010.
- [2] G. P. Hammond, “Engineering sustainability: thermodynamics, energy systems, and the environment,” *International Journal of Energy Research*, vol. 28, no. 7, pp. 613–639, 2004.
- [3] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Marine Structures*, vol. 20, no. 4, pp. 185 – 201, 2007.
- [4] T. Mahlia, T. Saktisahdan, A. Jannifar, M. Hasan, and H. Matseelar, “A review of available methods and development on energy storage; technology update,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 532 – 545, 2014.
- [5] J. Andújar and F. Segura, “Fuel cells: History and updating. a walk along two centuries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2309 – 2322, 2009.
- [6] O. Z. Sharaf and M. F. Orhan, “An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 810 – 853, 2014.
- [7] E. Escobedo and L. Zamora, “Modelo dinámico de celdas de combustible,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Agosto 2006.
- [8] S. Cruz, “Análisis y modelado de celdas de combustible tipo pem,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Julio 2007.
- [9] A. Castellanos, “Diseño de controladores para un simulador de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Octubre 2010.

- [10] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, and H. Peng, *Control of fuel power systems: principles, modeling and feedback design*, 1st ed. Londres: Springer, 2004.
- [11] A. Wither, “Control de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible con modelado del intercambiador de calor,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Mayo 2012.
- [12] E. Gonzalez, “Control de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible con modelado de compresor,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Febrero 2013.
- [13] R. Schacht, “Representación energética macroscópica de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible,” Master’s thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Abril 2015.
- [14] J. Valdez, “Manejo de energía en el sistema de potencia de un vehículo eléctrico híbrido basado en celdas de combustible,” Ph.D. dissertation, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Febrero 2016.
- [15] C. Sandoval, “Control de una fuente de energía híbrida: celda de combustible - capacitor,” Ph.D. dissertation, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca, Morelos, Agosto 2017.
- [16] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 376 – 385, 2009.
- [17] H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, “A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle,” *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 63 – 70, 2014.
- [18] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, and J. Huang, “Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 514 – 525, 2012.
- [19] Y. Zhan, Y. Guo, J. Zhu, and L. Li, “Power and energy management of grid/pemfc/battery/supercapacitor hybrid power sources for ups applications,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 67, pp. 598 – 612, 2015.

- [20] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor,” *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 12, pp. 4791 – 4804, 2013.
- [21] N. Bizon, M. Radut, and M. Oproescu, “Energy control strategies for the fuel cell hybrid power source under unknown load profile,” *Energy*, vol. 86, pp. 31 – 41, 2015.
- [22] Q. Li, H. Yang, Y. Han, M. Li, and W. Chen, “A state machine strategy based on droop control for an energy management system of pemfc-battery-supercapacitor hybrid tramway,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 36, pp. 16 148 – 16 159, 2016.
- [23] H. Li, A. Ravey, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor,” *Journal of Power Sources*, vol. 395, pp. 262 – 270, 2018.
- [24] M. Hannan, F. Azidin, and A. Mohamed, “Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles,” *Energy Conversion and Management*, vol. 62, pp. 123 – 130, 2012.
- [25] M. Zandi, A. Payman, J. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody Tabar, “Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 433–443, Feb 2011.
- [26] M. Ayad, M. Becherif, and A. Henni, “Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries by sliding mode control,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2627 – 2634, 2011.
- [27] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, “An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351 – 2359, 2011.
- [28] J. Hidalgo-Reyes, J. Gómez-Aguilar, R. Escobar-Jiménez, V. Alvarado-Martínez, and M. López-López, “Classical and fractional-order modeling of equivalent electrical circuits for supercapacitors and batteries, energy management strategies for hybrid systems and methods for the state of charge estimation: A state of the art review,” *Microelectronics Journal*, vol. 85, pp. 109 – 128, 2019.
- [29] I. Podlubny, *Fractional Differential Equations: An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, to Methods of Their Solution and Some of Their Applications*. Academic Press, 1998.

- [30] D. Baleanu, K. Diethelm, E. Scalas, and J. Trujillo, *Fractional Calculus: Models and Numerical Methods*. World Scientific, 2012.
- [31] A. Atangana, *Derivative with a New Parameter: Theory, Methods and Applications*. Academic Press, 2015.
- [32] N. Naim, D. Isa, and R. Arelhi, “Modelling of ultracapacitor using a fractional order equivalent circuit,” *International Journal of Renewable Energy Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 142–163, 2015. [Online]. Available: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJRET.2015.068595>
- [33] Y. Ma, X. Zhou, B. Li, and H. Chen, “Fractional modeling and soc estimation of lithium-ion battery,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 3, no. 3, pp. 281–287, July 2016.
- [34] Q. Yang, J. Xu, B. Cao, and X. Li, “A simplified fractional order impedance model and parameter identification method for lithium-ion batteries,” *PLoS ONE*, vol. 12, no. 2, p. e0172424, February 2017.
- [35] H. Marzougui, M. Amari, A. Kadri, F. Bacha, and J. Ghouili, “Energy management of fuel cell/battery/ultracapacitor in electrical hybrid vehicle,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 13, pp. 8857 – 8869, 2017.
- [36] Y. Wang, Z. Sun, and Z. Chen, “Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources,” *Energy*, vol. 175, pp. 1055 – 1066, 2019.
- [37] Z. Sun, Z. Chen, and Y. Wang, “Rule-based energy management strategy of a lithium-ion battery, supercapacitor and pem fuel cell system,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2555 – 2560, 2019.
- [38] A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, and Y. Miyazaki, “Analysis of electrocatalyst degradation in pemfc caused by cell reversal during fuel starvation,” *Journal of Power Sources*, vol. 130, no. 1, pp. 42 – 49, 2004.
- [39] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, ser. Academic Press sustainable world series PEM fuel cells. Elsevier Science, 2005.
- [40] N. Kularatna, *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*. Elsevier Science, 2014.
- [41] Y. Shan and S.-Y. Choe, “Modeling and simulation of a pem fuel cell stack considering temperature effects,” *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 274 – 286, 2006.

- [42] S. S. Asl, S. Rowshanzamir, and M. Eikani, “Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behaviour of a pem fuel cell,” *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1633 – 1646, 2010.
- [43] C. Panos, K. Kouramas, M. Georgiadis, and E. Pistikopoulos, “Modelling and explicit model predictive control for pem fuel cell systems,” *Chemical Engineering Science*, vol. 67, no. 1, pp. 15 – 25, 2012.
- [44] Min Joong Kim, Huei Peng, Chan-Chiao Lin, E. Stamos, and D. Tran, “Testing, modeling, and control of a fuel cell hybrid vehicle,” in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, vol. 6, June 2005, pp. 3859–3864.
- [45] M. A. S. Al-Baghdadi, “Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations,” *Renewable Energy*, vol. 30, no. 10, pp. 1587 – 1599, 2005.
- [46] G. Squadrito, G. Maggio, E. Passalacqua, F. Lufrano, and A. Patti, “An empirical equation for polymer electrolyte fuel cell (pefc) behaviour,” *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 29, no. 12, pp. 1449 – 1455, 1999.
- [47] M. Azri, A. N. A. Mubin, Z. Ibrahim, N. ABD RAHIM, and S. R. S. Raihan, “Mathematical modelling for proton exchange membrane fuel cell (pemfc),” *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, vol. 86, no. 3, 2016.
- [48] A. A. Fardoun, H. A. Hejase, A. Al-Marzouqi, and M. Nabag, “Electric circuit modeling of fuel cell system including compressor effect and current ripples,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1558 – 1564, 2017.
- [49] S. C. Page, A. H. Anbuky, S. P. Krumdieck, and J. Brouwer, “Test method and equivalent circuit modeling of a pem fuel cell in a passive state,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 3, pp. 764–773, Sep 2007.
- [50] S. N. Motapon, O. Tremblay, and L.-A. Dessaint, “Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation,” *International Journal of Power Electronics*, vol. 4, no. 6, pp. 505 – 521, 2012.
- [51] R. Faranda, “A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 363 – 371, 2010.
- [52] L. Zubieta and R. Bonert, “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, Jan 2000.

- [53] C. Liao, H. Li, and L. Wang, “A dynamic equivalent circuit model of LiFePO₄ cathode material for lithium ion batteries on hybrid electric vehicles,” in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Sep. 2009, pp. 1662–1665.
- [54] D. Gandolfo, A. Brandão, D. Patiño, and M. Molina, “Dynamic model of lithium polymer battery, load resistor method for electric parameters identification,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 88, no. 4, pp. 470 – 479, 2015.
- [55] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Computer-controlled systems: theory and design*. Courier Corporation, 2013.
- [56] A. Oustaloup, X. Moreau, and M. Nouillant, “The crone suspension,” *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 8, pp. 1101 – 1108, 1996. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0967066196001098>
- [57] J. T. Machado, V. Kiryakova, and F. Mainardi, “Recent history of fractional calculus,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 16, no. 3, pp. 1140 – 1153, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007570410003205>
- [58] S. David and C. Valentim, “Fractional euler-lagrange equations applied to oscillatory systems,” *Mathematics*, vol. 3, no. 2, pp. 258–272, 2015.
- [59] J. Gómez-Aguilar, H. Yezpe-Martínez, C. Ramón, I. Orduña, R. Escobar Jiménez, and V. Olivares Peregrino, “Modeling of a mass-spring-damper system by fractional derivatives with and without a singular kernel,” *Entropy*, vol. 17, pp. 6289–6303, 09 2015.
- [60] K. Miller and B. Ross, *An Introduction to the Fractional Calculus and Fractional Differential Equations*. Wiley, 1993. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=MOp_QgAACAAJ
- [61] A. Atangana and J. F. Gómez-Aguilar, “Decolonisation of fractional calculus rules: Breaking commutativity and associativity to capture more natural phenomena,” *The European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 4, p. 166, Apr 2018.
- [62] S. Ang and A. Oliva, *Power-switching converters*, 2nd ed. EE.UU.: CRC press, 2005.
- [63] R. D. Middlebrook and S. Cuk, “A general unified approach to modelling switching-converter power stages,” in *1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 1976, pp. 18–34.
- [64] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, 2nd ed. EE.UU.: Springer Science and Business Media, 2007.

- [65] R. D. Middlebrook, "Modeling current-programmed buck and boost regulators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 36–52, Jan 1989.
- [66] S. Bacha, I. Munteanu, and A. L. Bratcu, *Power Electronic Converters Modeling and Control*, 1st ed. London: Springer-Verlag London, 2014.
- [67] H. Sira-Ramirez, "Nonlinear P-I controller design for switchmode DC-to-DC power converters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 38, no. 4, pp. 410–417, April 1991.
- [68] H. Sira., *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, 1st ed. London: Springer-Verlag London, 2006.
- [69] T. Barlow, *A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions: Version 3*, ser. Published project report. IHS, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=jnowMwEACAAJ>
- [70] R. Mosdale, "Véhicule électriques à pile à combustible," *Transport Électrique Routier*, 2008.

Apéndice A

Hojas de datos de los equipos.



Power-Sonic Batteries Engineered With Vision. Built With Care.



Power-Sonic Corporation has been a leading force since 1970 in the supply of high quality cost effective batteries.

We market an extensive range of rechargeable batteries worldwide. These batteries envelop a broad spectrum of electronic and industrial applications, either as the prime or standby power source.

Power-Sonic is dedicated to continual product development to improve the performance and reliability of our product range. New batteries are constantly being introduced to meet the ever evolving needs of industry.

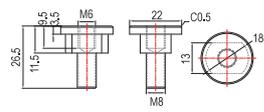
We are a 100% US owned private company. The corporation has an enviable record of growth and financial stability.

Providing our customers with reliable, yet economical, products is the corner stone of the Power-Sonic mission.

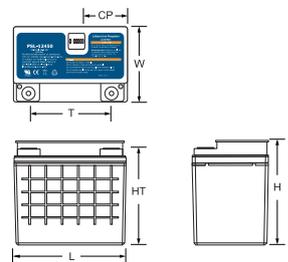
About Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)

- Compact and only 40% of the weight of comparable capacity SLA batteries. Making it much easier to handle and transport.
- Extraordinary cycle life ~ 2,500 cycles.
- 2 ½ hours recharge time with 20A current charge.
- Integrated battery management system (BMS) controls the parameters of the battery to provide optimum safety and performance. Among other functions, the BMS balances the battery cells and protects against overcharging or overdischarging.
- Safe and stable chemistry. The use of lithium iron phosphate greatly reduces the risk of combustion or explosion due to high impact, overcharging or short circuit situations.
- The battery will communicate with most smart charging (power module) systems.
- The SMBus provides access to a battery history log.
- Rugged plastic case and cover, flame retardant (FR) to UL94 V-0.
- The battery cells are manufactured with internationally patented lithium iron phosphate powder from Phostech, Canada.
- UN 38.3, UL1642, UL2054, IEC62133, FCC and CE approved, Certified compliant with EU Battery Directive 2006/66/EC.

Terminals: (mm)



Physical Dimensions: in (mm)



| | | | | | | | |
|----|------------|-----|--------------|----|------------|-----|------------|
| L: | 7.70 [195] | W: | 5.20 [130] | H: | 7.20 [183] | HT: | 7.20 [183] |
| T: | 5.35 [136] | CP: | 2.91 [73.96] | | | | |

All data subject to change without notice.

www.power-sonic.com

Figura A.1: PSL-12450 lado A.



PSL-12450 - 12.8 Volt 45.0 AH

| Performance Specifications | General Parameters | Comments |
|---|---|--|
| Nominal Voltage | 12.8 volts | |
| Rated Capacity (77°F/25°C) | 45 AH | Standard discharge 9A after standard charge 9A |
| Minimum Capacity (77°F/25°C) | 42 AH | |
| Dimensions (in./mm) | | |
| Length | 7.70 / 195 (max) | |
| Width | 5.20 / 130 (max) | |
| Height | 7.20 / 183 (max) | |
| Life Expectation | Residual capacity is about 60% of rated capacity | CC charge at 9A to 14.6V then CV until current taper to 1A, rest 30 minutes, discharge at 9A to 10V. Temperature 60±9°F (20±5°C). Carry out 2500 cycles. |
| Approximate Weight lbs./kg. | 12.8/5.8 | |
| Internal Resistance at 50% SOC | <35 mΩ | (77°F/25°C) |
| Discharge Cut-Off Voltage | 9.6V = 2.4 volts per cell | 10.0V Recommended |
| Charging Cut-Off Voltage | 14.6V = 3.65 volts per cell | |
| Terminals | M6 button (female-threaded) | |
| Standard Charge | 9A constant current (CC) charge to 14.6V, then constant voltage (CV) 14.6V charge until charge current declines to 1A | |
| Standard Discharge | Constant Current 9A, Cut-off Voltage 10.0V | |
| Cell Assembly | IFR 18650EC-1.5AH | 4S30P |
| Maximum Continuous Charge Current | 20A @ 68°F (20°C) | |
| Maximum Continuous Discharge Current | 20A @ 68°F (20°C) | Over current 40A (2S) |
| Charge Temperature Range | 32°F - 122°F (-0°C - 50°C) | 60±25% Relative Humidity at Shipment Date |
| Discharge Temperature Range | 14°F - 122°F (-10°C - 50°C) | |
| Storage Temperature Range | 40°F - 122°F (4°C - 50°C) | <3 months: 23°F-95°F (-5°C-35°C) >3 months-1 year: 32°F-77°F (0°C-25°C) |
| Specific Energy | 50.0 Wh/lb (99Wh/kg) | |
| Specific Density | 124 Wh/L | |
| Protocol | SMBus | With RJ45 |
| Over Temperature Protection | 60°±5°C Charge 65°±5°C Discharge | |
| Short Circuit Protection | 2 nd level protection 30A fuse | |
| LED Indicator | Fuel Gauge | 5 LED Indicator |

Contact Information

www.power-sonic.com

DOMESTIC SALES
Tel: +1-619-661-2020
Fax: +1-619-661-3650
nationalsales@power-sonic.com

CUSTOMER SERVICE
Tel: +1-619-661-2030
Fax: +1-619-661-3648
customerservice@power-sonic.com

TECHNICAL SUPPORT
Tel: +1-619-661-2020
Fax: +1-619-661-3648
support@power-sonic.com

INTERNATIONAL SALES
Tel: +1-650-364-5001
Fax: +1-650-366-3662
international-sales@power-sonic.com

CORPORATE OFFICE • 7550 Panasonic Way • San Diego, CA 92154 • USA • Tel: +1-619-661-2020 • Fax: +1-619-661-3650

0416 1M

© 2016, Power-Sonic Corporation. All rights reserved. All trademarks are the property of their respective owners.

Figura A.2: PSL-12450 lado B.

Technical Data 4423

Effective November 2014
Supersedes July 2014

PowerStor XB Series

Snap-in cylindrical supercapacitors



Features and benefits

- Over 10-year operating life at room temperature
- Low ESR for high power density
- Large capacitance for high energy density
- Long cycle life
- Environmentally friendly electrolyte
- UL Recognized

Applications

- Hybrid battery or fuel cell systems
- High pulse current applications
- UPS / hold up power

Description

Eaton PowerStor supercapacitors are unique, ultra-high capacitance devices utilizing electrochemical double layer capacitor (EDLC) construction combined with new, high performance materials. This combination of advanced technologies allows Eaton to offer a wide variety of capacitor solutions tailored to specific applications that range from a few micro-amps for several days to several amps for milliseconds.

EATON
Powering Business Worldwide



The PowerStor brand of supercapacitors (formerly of the Bussmann Division of Cooper Industries) is now part of Eaton's Electrical Group, Electronics Division.

PowerStor is now part of Eaton
Same great products plus even more.

Figura A.3: PowerStor Series XB lado A.

XB Series
Snap-in cylindrical supercapacitors

Technical Data 4423
Effective November 2014

Specifications

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Capacitance | 300F to 600F |
| Working voltage | 2.5V |
| Surge voltage | 2.85V |
| Capacitance tolerance | -10% to +10% |
| Operating temperature range | -25°C to 70°C |

Standard Product¹

| Capacitance (F) | Part number | Max. initial DC ESR (mΩ) (Equivalent Series Resistance) | Max continuous current (A) ² | Peak current (A) ³ | Max leakage current (mA) ⁴ | Max power (W) ⁵ | Stored energy (Wh) ⁶ | Typical mass (g) |
|-----------------|-----------------|---|---|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
| 300 | XB3550-2R5307-R | 7 | 15 | 120 | 0,30 | 220 | 0,26 | 69 |
| 400 | XB3560-2R5407-R | 4,5 | 19 | 180 | 0,45 | 350 | 0,35 | 80 |
| 600 | XB3585-2R5607-R | 3,7 | 29 | 235 | 0,70 | 420 | 0,52 | 122 |

1. Capacitance, ESR and Leakage current are all measured according to IEC 62391-1 at 20°C
2. 15°C Temperature Rise
3. Peak Current is for 1 second = $\frac{1}{2} \text{ Working Voltage} \times \text{Capacitance} / (1 + \text{DC ESR} \times \text{Capacitance})$
4. Leakage current measured after 72 hours, 20°C
5. Max. Power = $\text{Working Voltage}^2 / 4 / \text{DC ESR}$
6. Stored energy = $\frac{1}{2} \text{ Capacitance} \times \text{Working Voltage}^2 / 3600$

Performance

| Parameter | | Capacitance change (% of initial value) | ESR (% of max. initial value) |
|---------------------------------------|------------|---|-------------------------------|
| Life | | | |
| @ Max. operating voltage and temp) | 1500 hours | ≤ 20% | ≤ 200% |
| Charge/discharge cycling ¹ | 500,000 | ≤ 20% | ≤ 200% |
| Storage Life | | | |
| -25°C to +70°C | 1500 hours | ≤ 20% | ≤ 200% |
| ≤ 30°C | 3 years | ≤ 5% | ≤ 10% |

1. Cycling between max operating and 50% of max operating voltage at room temperature

Figura A.4: PowerStor Series XB lado B.



3. Technical Specification

| | |
|-------------------------------|--|
| Type of fuel cell | PEM |
| Number of cells | 72 |
| Rated power | 1000W |
| Rated performance | 43V@23.5A |
| Output voltage range | 39V-69V |
| Weight (with fan & casing) | 4.2kg(9.3lbs) |
| Size | 256 x 220 x 122 mm (12.8 x 8.7 x 4.8 in) |
| Reactants | Hydrogen and Air |
| Rated H2 consumption | 14L/min |
| Hydrogen pressure | 0.5-0.6Bar(7.2-9.4PSI) |
| Controller weight | 0.45kg (0.99lbs) |
| Hydrogen supply valve voltage | 12V |
| Purging valve voltage | 12V |
| Blower voltage | 6-12V |
| Ambient temperature | 5-30°C (41-86°F)v |
| Max stack temperature | 65°C (149°F) |
| Hydrogen purity | 99,999% dry H2 |
| Humidification | Self-humidified |
| Cooling | Air (integrated cooling fan) |
| Start up time | Immediate |
| Efficiency of system | 40%@43V |
| | <i>*the flow rate may change with the power output **system electronics need external power supply</i> |

Figura A.5: Horizon Fuel Cell Technologies, H1000.



7. Polarization curves

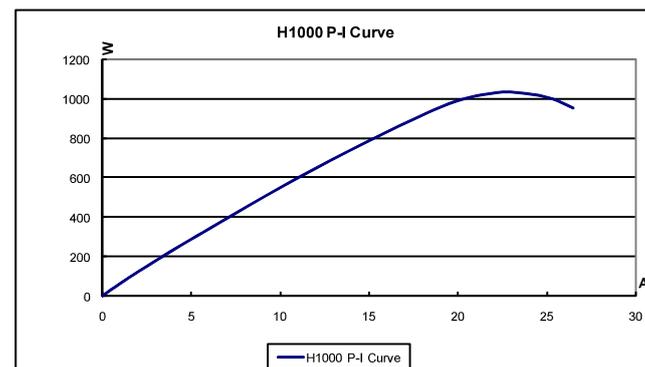
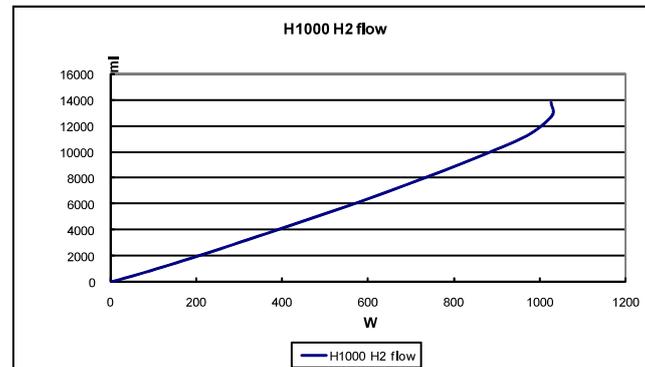
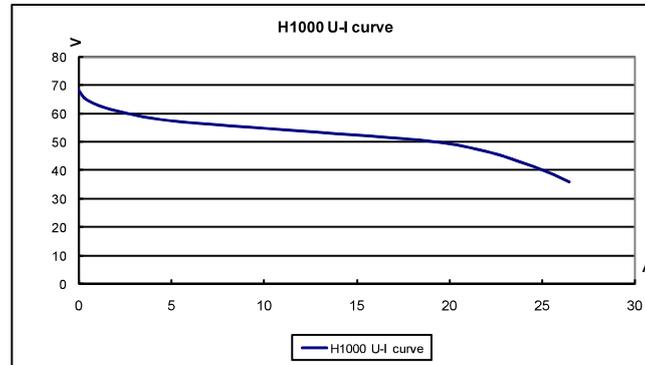


Figura A.6: Curvas de polarización, H1000.

Apéndice B

Esquema de simulación del Filtro de Kalman Extendido.

En este apartado se muestra el esquema de simulación del modelo con base en CEE y el Filtro de Kalman Extendido para la batería LiFePO4. Las simulaciones numéricas se realizaron en Simulink de Matlab.

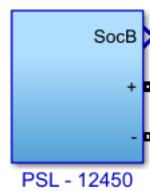


Figura B.1: Bloque de la batería de LiFePO4.

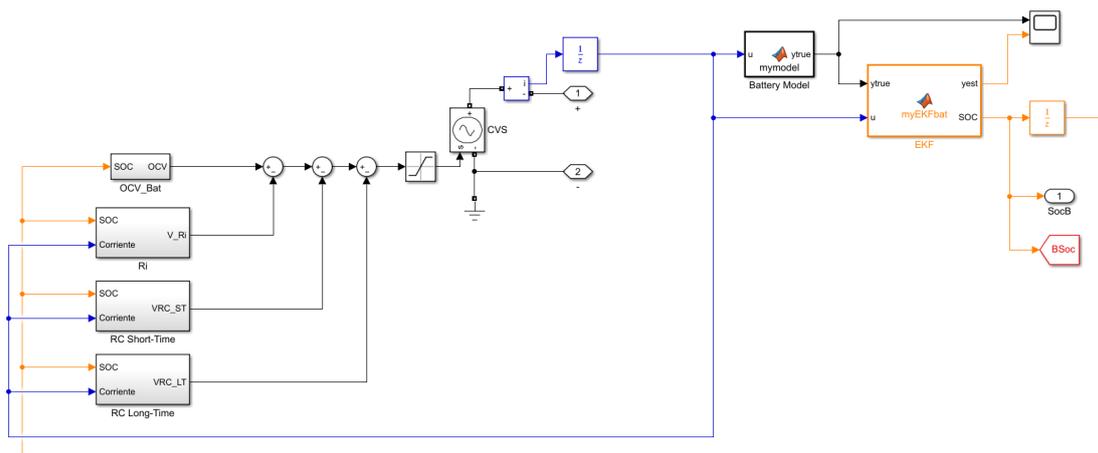


Figura B.2: Bloques del CEE para la batería y Filtro de Kalman Extendido.

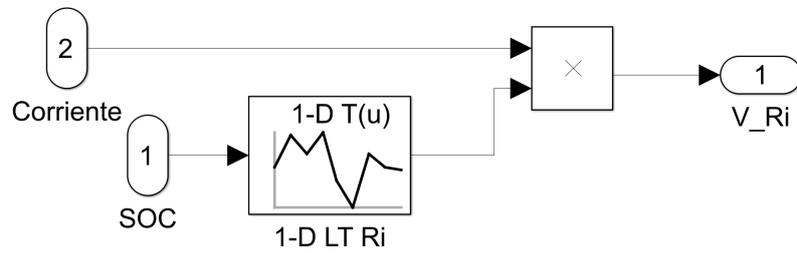


Figura B.3: Bloques del elemento R_i del CEE para la batería.

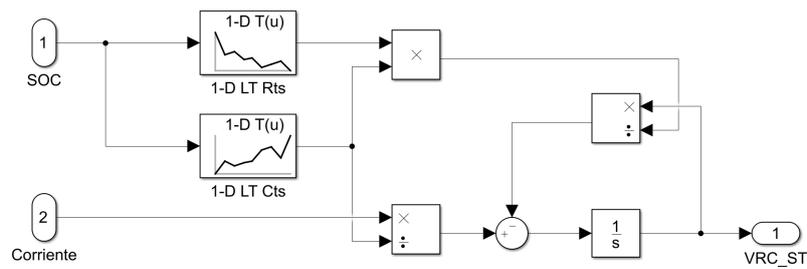


Figura B.4: Bloques del elemento R_{Ts} y C_{Ts} del CEE para la batería.

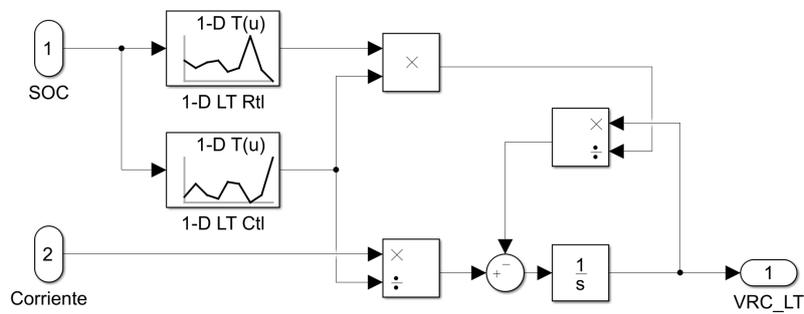


Figura B.5: Bloques del elemento R_{Tl} y C_{Tl} del CEE para la batería.

Apéndice C

Esquema de simulación de la PEMFC y el CMCP.

En este apartado se muestra el esquema de simulación del bloque de celda de combustible tipo PEM, convertidor buck y el control en modo corriente programada (CMCP). Las simulaciones numéricas se realizaron en Simulink de Matlab.

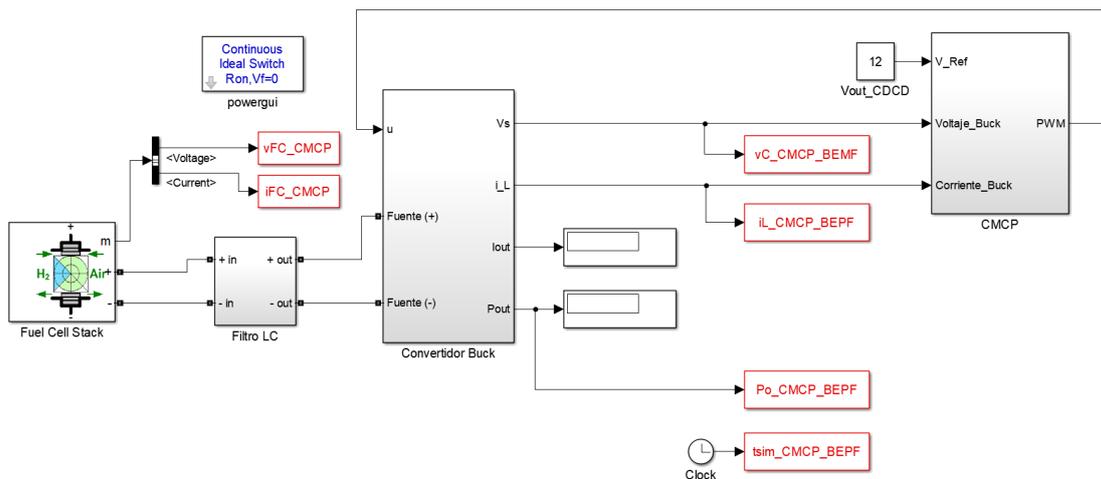


Figura C.1: Esquema general de conexión.

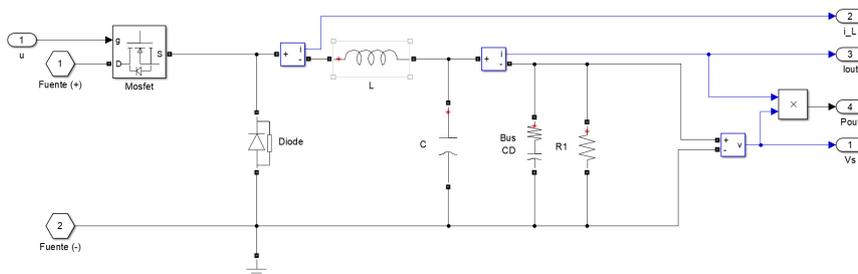


Figura C.2: Convertidor CD-CD Buck.

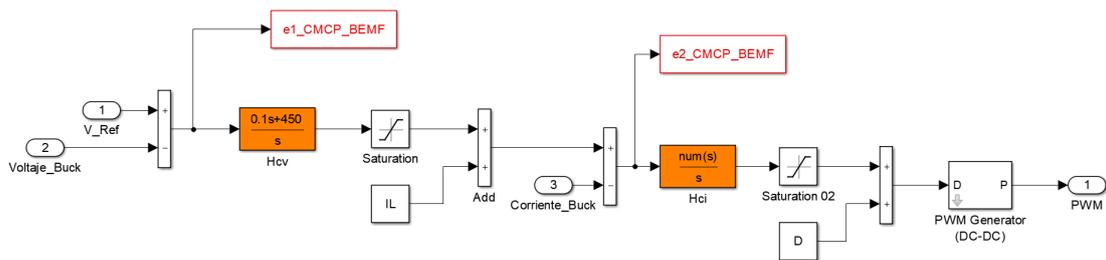


Figura C.3: Diagrama a bloques de la estrategia CMCP.

Apéndice D

Esquema de simulación del banco de supercapacitores.

En este apartado se muestra el esquema de simulación del supercapacitor, así como, el banco de supercapacitores. Las simulaciones numéricas se realizaron en Simulink de Matlab.

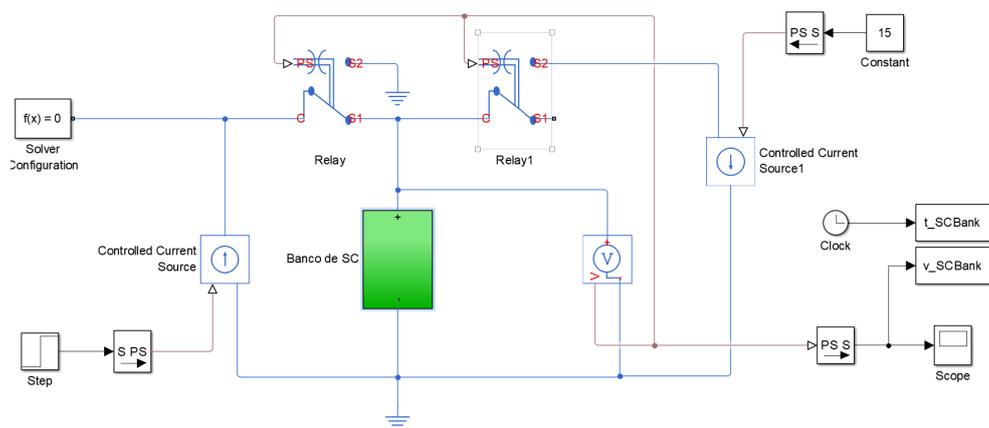


Figura D.1: Esquema general de conexión.

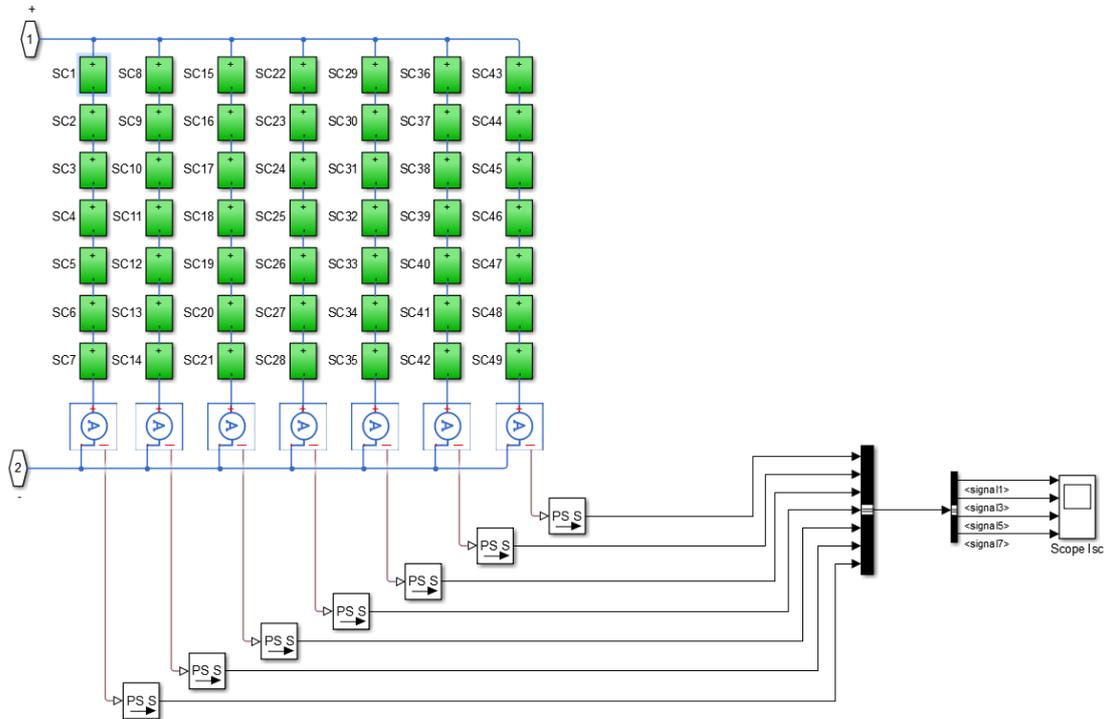


Figura D.2: Esquema general del banco de supercapacitores.

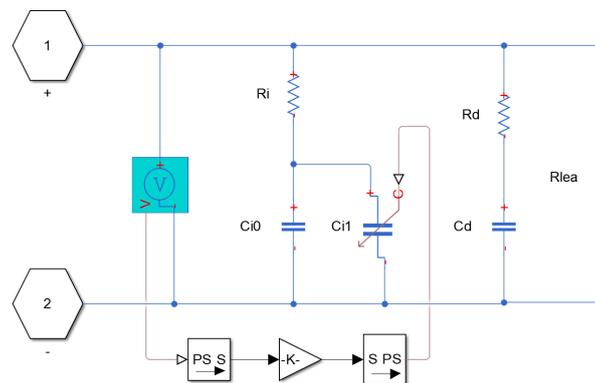


Figura D.3: Esquema general del supercapacitor.

Apéndice E

Publicaciones obtenidas.

Microelectronics Journal 85 (2019) 109–128



Contents lists available at ScienceDirect

Microelectronics Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/mejo



Classical and fractional-order modeling of equivalent electrical circuits for supercapacitors and batteries, energy management strategies for hybrid systems and methods for the state of charge estimation: A state of the art review



J.I. Hidalgo-Reyes^a, J.F. Gómez-Aguilar^{b,*}, R.F. Escobar-Jiménez^a,
V.M. Alvarado-Martínez^a, M.G. López-López^a

^a Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico
^b CONACYT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Battery
Supercapacitor
Energy storage
PEM fuel cell
Energy management
Fractional calculus

ABSTRACT

This work presents a state of the art review of energy storage systems and its applications integrating an alternative technology for the electrical energy generation known as fuel cell of PEM type. This review focus on supercapacitors and Ion-Lithium batteries as energy storage systems. The state of the art review contains an analysis of the evolution of the classical and fractional modeling based on equivalent circuits, a survey of hybrid energy systems and its control, as well as, a study of the methods proposed in the literature to estimate the state of charge. In addition, we describe some applications of the supercapacitors and batteries in hybrid energy storage systems for electric vehicles.

1. Introduction

Throughout time, energy needs have been met through the exploitation of fossil fuels. However, energy generation technologies based on these types of fuels have turned out to be harmful to the environment, some of these effects are: *climate change, air pollution and greenhouse gas emissions* [1–3]. Therefore, the problem of environmental pollution represents an opportunity area to design more efficient plants or for developing new technologies to take advantage from the alternatives sources of energy [4]. However, one of the disadvantages of renewable energy sources is that the amount of energy generated by these sources depends on the environmental conditions (speed and amount of wind, solar radiation, among others) and therefore, their production is intermittent.

In this sense, energy storage system (ESS) become essential elements to take advantage of these type of energy sources. The purpose of the ESS is to store energy, so that it can be used later face to a specific need. In literature, several works on the ESS have been reported, for example, the authors in Refs. [5–7] presented the different types of ESS, and their properties, main characteristics, development, cost, and availability. In Ref. [8] the authors described a real-life application of ESS,

and explained the challenges they faced to commercialize their system. Regarding the use of ESS in specific renewable energy sources, the following works can be mentioned. In Ref. [9], a survey on several ESS for wind energy applications was presented, the aim was to highlight the operating principles, the main components and the characteristics of the ESS. In Ref. [10] a bibliographic review concern different electrical energy storage systems (EESS) and their application in electrical vehicles (EVs), the aim was to compare their advantages, disadvantages and their main technical characteristics. In Ref. [11] the authors presented a general survey of the ESS used for wind and photovoltaic energy systems: In particular, the authors, analyzed the energy storage with batteries; they also studied their behavior through numerical simulations in MATLAB/Simulink. In Ref. [12], the authors developed a convex programming framework for optimizing the energy management and component sizing on a hybrid solar-battery power source of a smart home nanogrid with plug-in electric vehicle (PEV) load. The objective was to maximize the home economy, in spite of home power demand and PEV driving. Their results showed that the home battery energy capacity and the cost savings increase significantly as the time horizon becomes larger. Lately, in Ref. [13] the authors presented a review of fractional-order techniques applied to the formulation of equivalent circuit models

* Corresponding author.
E-mail address: jgomez@cenidet.edu.mx (J.F. Gómez-Aguilar).

<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.02.006>

Received 16 October 2018; Received in revised form 19 January 2019; Accepted 6 February 2019

Available online 13 February 2019

0026-2692/© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Received: 10 January 2019 | Revised: 5 March 2019 | Accepted: 31 March 2019
 DOI: 10.1002/cta.2640

RESEARCH ARTICLE

WILEY

Determination of supercapacitor parameters based on fractional differential equations

J.I. Hidalgo-Reyes¹ | J.F. Gómez-Aguilar²  | R.F. Escobar-Jimenez¹ |
 V.M. Alvarado-Martinez¹ | M.G. Lopez-Lopez¹

¹Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

²CONACyT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

Correspondence

J. F. Gómez-Aguilar,
 CONACyT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico.
 Email: jgomez@cenidet.edu.mx

Summary

In this paper, we estimate the parameter values of a fractional-order model of supercapacitors involving fractional derivatives of Liouville-Caputo, Caputo-Fabrizio, and Atangana-Baleanu and fractional conformable derivative in the Liouville-Caputo sense. We present the exact solution of the considered model using the properties of the Laplace transform operator together with the convolution theorem. They developed numerical simulations using each one of the fractional derivatives; the results were compared graphically with experimental data obtained from different supercapacitors using standard laboratory equipment. The nonlocal parameters involved in the equivalent electrical circuit for the supercapacitor model are recalculated for each fractional derivative using a particle swarm optimization algorithm for generating optimal solutions.

KEYWORDS

exponential decay-law, fractional calculus, fractional conformable derivative, Mittag-Leffler function, power-law, supercapacitor model

1 | INTRODUCTION

Fractional calculus (FC) has considered one of the best mathematical tools to characterize the memory property of complex systems and certain materials. The fractional derivatives have information of the past states, as well as the present states. This alternative formulation allows to model different physical processes with dissipation and long-range interaction.¹⁻⁶ Electric double-layer capacitors (EDCL), supercapacitors (SCs), or ultracapacitors (UCs) are electrical energy storage devices where the energy is stored in the double-layer capacitor as charge separation in the double-layer formed at the interface between the solid electrode material surface and the liquid electrolyte in the micropores of the electrodes.⁷ Supercapacitors are able to store a large amount of energy than that of traditional capacitors; they have the capacity to deliver more power than that of batteries and they have a large number of charge/discharge cycles.⁸ Due to these characteristics, supercapacitors have been used for various applications, for example, electric vehicles,⁹⁻¹¹ power quality,^{12,13} and renewable energy applications,^{14,15} to name a few, with applications in diverse scales from energy storage. Traditionally, the supercapacitor has been modeled using RC networks. However, recent works have employed the FC to model the behavior of this component.¹⁶⁻²³

The models based on an equivalent electrical circuit are models of lumped parameters that allow to determine the response in voltage and current of the system, using common electrical components: resistors, capacitors, and inductors.

ARTICLE IN PRESS

Alexandria Engineering Journal (2019) xxx, xxx–xxx

HOSTED BY



Alexandria University

Alexandria Engineering Journal

www.elsevier.com/locate/aej
www.sciencedirect.com


ORIGINAL ARTICLE

Battery state-of-charge estimation using fractional extended Kalman filter with Mittag-Leffler memory

J.I. Hidalgo-Reyes^a, J.F. Gómez-Aguilar^b, V.M. Alvarado-Martínez^a,
M.G. López-López^a, R.F. Escobar-Jiménez^a

^a Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, Mexico

^b CONACyT-Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, Mexico

Received 11 November 2019; revised 1 December 2019; accepted 2 December 2019

KEYWORDS

LiFePO₄ battery;
Extended Kalman filter;
Fractional calculus;
State-of-charge

Abstract In this paper, a Fractional-Order Extended Kalman Filter (FOEKF) to estimate the State-of-Charge (SOC) of a LiFePO₄ battery is proposed. Today there is no sensor to measure the state of charge, due to this, it is necessary to use various methods to calculate an estimated value of this parameter. For designing the FOEKF a battery model based on an equivalent electric circuit and the fractional derivative of Atangana-Baleanu type were used. Different numerical simulations using Matlab® were carried out in order to compare it with experimental results from a laboratory prototype and show the performance and accuracy of the FOEKF for estimating the SOC.

© 2019 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of Faculty of Engineering, Alexandria University. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Energy Storage Systems (ESS) aim to store energy to be used later for a specific purpose. Nowadays, there are different ESS available which are classified as follows [1]: mechanical systems, chemical systems, electrochemical systems, electrical systems, and thermal systems, this work focus on the Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) batteries due to their characteristics like high energy density, modularity, lightweight, fast response, controllability, geographical independence, higher cycle life, and performance [2,3].

The main objective of the Battery Management System (BMS) is to increase the cycle-life, to optimize the power delivery and the battery safety [4]. The BMS monitors and measures the cell voltages, temperature and current in order to *prevent the overcharge and overdischarge, detect unsafe operating conditions and increase the cycle life*. Besides, the BMS should consider the SOC, then this information enables the cell balance and maximizing the performance of the battery.

In the literature different techniques for estimating the battery's SOC have been reported. Summarizing, the SOC is estimated by a physical model, an empirical model, or even an abstract model [5]. In [6], the authors considered a dynamic equivalent circuit model (2-RC branch model) to describe the device electrical features. The results obtained by several simulations shown that this model represents the battery output-voltage accurately. For this reason, in this

E-mail address: jgomez@cenidet.edu.mx (J.F. Gómez-Aguilar)

Peer review under responsibility of Faculty of Engineering, Alexandria University.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.006>

1110-0168 © 2019 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of Faculty of Engineering, Alexandria University.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Please cite this article in press as: J.I. Hidalgo-Reyes et al., Battery state-of-charge estimation using fractional extended Kalman filter with Mittag-Leffler memory, Alexandria Eng. J. (2019), <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.006>