



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN  
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

Tesis para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

---

**EMULACIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE  
ENERGÍA HÍBRIDO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO  
HÍBRIDO**

---

Presenta:

**Miguel Pedro Martínez Velázquez\***

Asesora:

**Dra. Liliana Cortez**

Co-asesora:

**Dra. Josefina Castañeda Camacho**

Asesor externo:

**M.I. Ernest Cortez**

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), por el apoyo y patrocinio para llevar a cabo el proyecto de tesis titulado *Emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para un vehículo eléctrico híbrido*. Además, agradezco a la Maestría en Ingeniería Electrónica, opción Instrumentación Electrónica, por la oportunidad para poder mejorar mis habilidades académicas y personales.

A mis asesores, Dra. Liliana Cortez, Dra. Josefina Castañeda Camacho, M.I. Ernest Cortez por confiarme un tema de alta importancia, por apoyarme y aconsejarme hasta la culminación del documento.

A mi madre, Sra. Leticia Velázquez Altamirano, por darme todo con amor incondicional que jamás llegaré a entender y jamás tendré la oportunidad de una explicación clara y concisa. Gracias por la oportunidad de darte todo bajo mis posibilidades, de estar contigo en el peor momento y aun así enseñarme lecciones todos los días. Eras mi apoyo moral cuando todo estaba mal y como siempre te decía, *todos desearían tener a una mamá como tu* (ironías de la vida, nunca podrás leer ésto).

A mi hermana, Srita. Eva Guadalupe Martínez Velázquez, por que siempre te tendré, por que eres “la viva imagen de la jefa” y por que aun así me enseñas lo importante para mi. Nunca será suficiente para mi agradecer por tener a la mejor e incondicional hermana.

A mi familia, por preocuparse por mi y por apoyarme de forma incondicional, por alentarme a seguir adelante en las buenas y en las malas. Además, se que puedo contar con ustedes y siempre serán el apoyo moral. Perdón por no convivir tanto como hubiera querido, buscaba como ayudar “a la jefa” en muchos sentidos.

A LISDER, por permitirme crecer personal y profesionalmente de una forma que jamás creí posible.

## Resumen

En el presente trabajo, se muestra el desarrollo de un sistema embebido, que permite realizar la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para un vehículo eléctrico híbrido.

En el primer capítulo, se muestra una revisión del estado del arte, que permitió definir los objetivos que se desarrollaron en el tema de tesis. Además, se presenta una justificación del tema, con la finalidad de establecer la relevancia del desarrollo del tema de tesis. Asimismo, se llevó a cabo el planteamiento de una metodología de trabajo, que permite describir los elementos necesarios para imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido a través de un sistema de emulación basado en un sistema embebido.

En el capítulo dos, se lleva a cabo la descripción de los elementos que conforman un tren de potencia, que considera una interacción para definir el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido. Además, se presenta la interconexión de los elementos del tren de potencia, que permite definir una topología que considera una trayectoria de energía específico. Finalmente, se muestra el modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido, que permite representar el comportamiento del tren de potencia híbrido considerando la interacción con un sistema de almacenamiento de energía.

En el capítulo tres, se establecen las características físicas y eléctricas de los elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con la finalidad de definir el comportamiento de las celdas de baterías y los supercapacitores. Además, se describen las tecnologías de fabricación de los elementos de acumulación de energía, que permite establecer un determinado comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía considerando los materiales químicos empleados en la construcción de una celda de batería y un supercapacitor. Asimismo, se realiza un análisis de las topologías de interconexión en un SAEH, que considera un mecanismo de interacción con el tren de potencia.

En el capítulo cuatro, se describe el diseño de un sistema de emulación para un sistema de almacenamiento de energía híbrido, por ello, se define el modelo matemático de los elementos de acumulación de energía, con la intención de reproducir la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

A partir del modelo matemático de cada elemento de acumulación de energía, se propone un método de caracterización que permite obtener la evolución eléctrica de una celda de batería y un supercapacitor considerando los parámetros de un modelo con resistencia interna. Por otro lado, se lleva a cabo el diseño del sistema de emulación, que considera una etapa de descarga y una etapa de identificación que permite imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

En el capítulo cinco, se aborda la implementación del sistema de emulación, considerando la etapa de descarga y la etapa de identificación desarrollada en la etapa de diseño. Con el propósito de validar la metodología de caracterización, se lleva a cabo la simulación del método de caracterización en función de una celda de batería y un supercapacitor considerando las características reales de los elementos de acumulación de energía. Posteriormente, se lleva a cabo la emulación de la metodología de caracterización, que permitió obtener en una celda de batería un error absoluto con un valor máximo de 0.34 V equivalente a un error relativo porcentual de 13.57 % y en un supercapacitor permitió obtener un absoluto con un valor máximo de 0.25 V equivalente a un error relativo porcentual de 14.58 %.

Además, a través del sistema de emulación se logró llevar a cabo la validación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido con una capacidad de 17.054 kWh para el conjunto de celdas de batería y una capacidad de 1.8 kWh para el conjunto de supercapacitores, logrando una comparación mediante el *SOC* del conjunto de celdas de batería mediante un error absoluto con un valor máximo de 1.11 % equivalente a un error relativo 5.55 % y un error absoluto en el conjunto de supercapacitores con un valor absoluto de 5.01 % equivalente a un error relativo porcentual de 8.01 %. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo de tesis en función de los resultados obtenidos y la propuesta de trabajo futuro, con la finalidad de mejorar el desempeño del sistema de emulación.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Índice general</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	5
1.4. Metodología . . . . .	5
1.5. Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2. Vehículo eléctrico híbrido</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Elementos de un tren de potencia . . . . .	8
2.2.1. Transmisión . . . . .	8
2.2.2. Motor de combustión interna . . . . .	9
2.2.3. Motor/generador eléctrico . . . . .	9
2.3. Topología del tren de potencia . . . . .	10
2.3.1. Topología serie . . . . .	11
2.3.2. Topología paralela . . . . .	12
2.3.3. Topología serie-paralela . . . . .	12
2.4. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido . . . . .	13
2.5. Conclusiones . . . . .	16
<b>3. Sistema de almacenamiento de energía híbrido</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción . . . . .	18
3.2. Características físicas de los elementos de acumulación de energía . . . . .	18
3.3. Características eléctricas de los elementos de acumulación de energía . . . . .	20
3.4. Tecnologías de fabricación de los elementos de acumulación de energía . . . . .	24

3.4.1. Baterías . . . . .	24
3.4.2. Supercapacitores . . . . .	27
3.5. Topologías de interconexión de los elementos de acumulación de energía . . . . .	29
3.5.1. Topología pasiva . . . . .	29
3.5.2. Topología activa . . . . .	30
3.6. Conclusiones . . . . .	31
<b>4. Diseño del sistema de emulación del sistema de almacenamiento de energía</b>	
<b>híbrido</b>	<b>32</b>
4.1. Introducción . . . . .	33
4.2. Modelos matemáticos . . . . .	33
4.2.1. Modelo matemático de una celda de batería . . . . .	34
4.2.2. Modelo matemático de un supercapacitor . . . . .	38
4.2.3. Discretización del modelo matemático de un SAEH . . . . .	41
4.3. Método de caracterización . . . . .	43
4.3.1. Caracterización de una celda de batería . . . . .	44
4.3.2. Caracterización de un supercapacitor . . . . .	45
4.4. Etapa de descarga . . . . .	46
4.4.1. Selección de transistor . . . . .	47
4.4.2. Circuito mínimo de caracterización . . . . .	48
4.5. Etapa de emulación . . . . .	51
4.5.1. Selección de microcontrolador . . . . .	51
4.5.2. Circuito mínimo de emulación . . . . .	53
4.5.3. Protocolo de comunicación . . . . .	55
4.5.4. Diseño de firmware . . . . .	60
4.6. Conclusiones . . . . .	61
<b>5. Implementación en un sistema embebido del sistema de almacenamiento de</b>	
<b>energía híbrido</b>	<b>62</b>
5.1. Introducción . . . . .	63
5.2. Simulación de elementos básicos de un SAEH . . . . .	63
5.2.1. Simulación de una celda de batería . . . . .	64
5.2.2. Simulación de un supercapacitor . . . . .	69
5.3. Emulación de elementos básicos de un SAEH . . . . .	73
5.3.1. Emulación de una celda de batería . . . . .	77
5.3.2. Emulación de un supercapacitor . . . . .	81
5.4. Validación del sistema de emulación de un SAEH . . . . .	86
5.5. Conclusiones . . . . .	93
<b>Conclusiones generales y trabajo futuro</b>	<b>94</b>
<b>Referencias</b>	<b>97</b>

## Lista de figuras

2.1. Elementos de una transmisión. . . . .	8
2.2. Mapa BSFC. . . . .	9
2.3. Algunos tipos de motor/generador eléctrico [43–48]. . . . .	9
2.4. Un mapa de eficiencia para un motor/generador eléctrico [49–52]. . . . .	10
2.5. Topología serie de un vehículo eléctrico híbrido. . . . .	11
2.6. Topología paralela de un vehículo eléctrico híbrido. . . . .	12
2.7. Topología serie-paralela de un vehículo eléctrico híbrido. . . . .	12
2.8. Comportamiento de los ciclos de conducción estándar. . . . .	13
2.9. Modelo de un vehículo. . . . .	14
2.10. Transformación del comportamiento convencional de una transmisión. . . . .	14
2.11. Transformación del comportamiento convencional de una máquina eléctrica. . . . .	14
2.12. Modelo de un SGE. . . . .	14
2.13. Transformación del comportamiento convencional de un SAEH. . . . .	15
2.14. Transformación del comportamiento convencional de un generador. . . . .	15
2.15. Transformación del comportamiento convencional de un MCI. . . . .	15
2.16. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido. . . . .	15
3.1. Elementos de una celda de una batería. . . . .	19
3.2. Elementos de un supercapacitor. . . . .	19
3.3. Características eléctricas de una celda. . . . .	20
3.4. Proceso de carga en una celda de una batería. . . . .	21
3.5. Proceso de descarga en una celda de una batería. . . . .	21
3.6. Características eléctricas de un supercapacitor. . . . .	22
3.7. Proceso de carga en un supercapacitor. . . . .	22
3.8. Proceso de descarga en un supercapacitor. . . . .	23
3.9. Proceso de carga-descarga de una celda de batería plomo ácido. . . . .	24
3.10. Proceso de carga-descarga de una celda de Ni-MH. . . . .	25
3.11. Proceso de carga-descarga de una celda de Li-Ion. . . . .	26
3.12. Proceso de carga-descarga de una celda de LiPo. . . . .	27
3.13. Proceso de carga-descarga de un supercapacitor de doble capa eléctrica. . . . .	28
3.14. Proceso de carga-descarga de un supercapacitor pseudocapacitivo. . . . .	28
3.15. Topología de interconexión pasiva. . . . .	29
3.16. Topología de interconexión activa. . . . .	30
4.1. Modelo con resistencia interna de una celda de batería. . . . .	34
4.2. Modelo $RC$ de una celda de batería. . . . .	35

4.3. Modelo Randles de una celda de batería. . . . .	36
4.4. Modelo de un supercapacitor con resistencia interna. . . . .	38
4.5. Modelo $RC$ de un supercapacitor. . . . .	39
4.6. Modelo con mallas $RC$ de un supercapacitor. . . . .	40
4.7. Etapas de la metodología de caracterización de una celda . . . . .	44
4.8. Ciclo de descarga de una celda ( $SOC = 100\%$ a $SOC = 90\%$ ) . . . . .	44
4.9. Etapas de la metodología de caracterización de un supercapacitor. . . . .	45
4.10. Ciclo de descarga de un supercapacitor ( $SOC = 100\%$ a $SOC = 90\%$ ). . . . .	46
4.11. Estructura interna de un transistor. . . . .	47
4.12. Circuito mínimo del sistema de caracterización para una celda. . . . .	48
4.13. Representación del circuito mínimo de descarga. . . . .	49
4.14. Circuito mínimo del sistema de caracterización para un supercapacitor. . . . .	49
4.15. Diagrama esquemático de la etapa de descarga. . . . .	50
4.16. Placa de circuito impreso para la etapa de descarga. . . . .	50
4.17. Sistema embebido $PIC24FV32KA304$ de la empresa <i>Microchip</i> <sup>®</sup> . . . . .	53
4.18. Circuito mínimo para el microcontrolador $PIC24F32KA304$ . . . . .	53
4.19. Diagrama esquemático del sistema embebido. . . . .	54
4.20. Placa de circuito impreso para el sistema embebido . . . . .	54
4.21. Modelo OSI del protocolo de comunicación . . . . .	55
4.22. Convertidor serial a USB F232RL del fabricante <i>FTDI</i> <sup>®</sup> . . . . .	55
4.23. Diagrama de flujo de la generación del CRC. . . . .	56
4.24. Diagrama de flujo de la implementación del módulo CRC en el $PIC24FV32KA304$ . . . . .	57
4.25. Máquina de estados para conversión a datos flotantes. . . . .	59
4.26. Máquina de estados para el sistema embebido. . . . .	60
5.1. Bloque de batería de <i>Simulink</i> <sup>®</sup> [68]. . . . .	64
5.2. Modelo para simulación de la metodología de caracterización de una celda. . . . .	64
5.3. Elementos que conforman la etapa de caracterización. . . . .	65
5.4. Elementos que conforman la etapa de identificación. . . . .	65
5.5. Curva de estado de carga y demanda de corriente de una celda de batería. . . . .	66
5.6. Curva de voltaje de celda caracterizada. . . . .	66
5.7. Curva de voltaje discretizada. . . . .	67
5.8. Diferencia entre el voltaje del modelo de <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo matemático de una celda. . . . .	68
5.9. Curva de diferencias de voltaje entre el modelo <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna. . . . .	68
5.10. Curva de error relativo porcentual entre el modelo <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna. . . . .	69
5.11. Bloque de supercapacitor de <i>Simulink</i> <sup>®</sup> [69]. . . . .	69
5.12. Modelo para simulación de la metodología de caracterización de un supercapacitor. . . . .	70
5.13. Curva de estado de carga y demanda de corriente de un supercapacitor. . . . .	70
5.14. Curva de voltaje de supercapacitor caracterizado. . . . .	71
5.15. Curva de voltaje discretizada del supercapacitor. . . . .	71
5.16. Comparación entre el voltaje del modelo de <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor. . . . .	72

5.17. Diferencia entre el voltaje del modelo de <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor. . . . .	72
5.18. Curva de error relativo porcentual entre el modelo <i>Simulink</i> <sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor. . . . .	73
5.19. Placa de circuito impreso para la etapa de descarga . . . . .	73
5.20. Placa de circuito impreso para la etapa de identificación . . . . .	74
5.21. Implementación del valor de verificación del CRC para los datos de la celda . . .	75
5.22. Implementación del valor de verificación del CRC para los datos del supercapacitor	76
5.23. Celda de batería marca <i>Zippy</i> . . . . .	77
5.24. Curva de estado de carga y curva de corriente obtenida a través del sistema de emulación. . . . .	77
5.25. Curva de voltaje discretizado obtenido del sistema de emulación. . . . .	78
5.26. Implementación del sistema de emulación para una celda. . . . .	78
5.27. Comparación entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda. . . . .	79
5.28. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda. . . . .	80
5.29. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda. . . . .	80
5.30. Supercapacitor marca <i>Green-Cap</i> . . . . .	81
5.31. Curva de estado de carga y curva de corriente del supercapacitor obtenida a través del sistema de emulación. . . . .	82
5.32. Curva de voltaje discretizado del supercapacitor obtenida a través del sistema de emulación. . . . .	82
5.33. Implementación del sistema de emulación para un supercapacitor. . . . .	83
5.34. Comparación entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de un supercapacitor. . . . .	84
5.35. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga del supercapacitor. . . . .	84
5.36. Medición de error porcentual entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga del supercapacitor. . . . .	85
5.37. Ciclo de conducción real de un vehículo eléctrico híbrido. . . . .	86
5.38. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido desarrollado en <i>Simulink</i> <sup>®</sup> . . .	87
5.39. Demanda de corriente para el SAEH en función del ciclo de conducción real. . .	88
5.40. Aplicación para validar el comportamiento del sistema de emulación en función del tren de potencia. . . . .	89
5.41. Comparación entre los datos del <i>SOC</i> de la simulación y los datos del <i>SOC</i> de la emulación del SAEH . . . . .	90
5.42. Error absoluto entre los datos del <i>SOC</i> de la simulación y los datos del <i>SOC</i> de la emulación del SAEH . . . . .	91
5.43. Error relativo porcentual entre los datos del <i>SOC</i> de la simulación y los datos del <i>SOC</i> de la emulación del SAEH . . . . .	92

## Lista de tablas

3.1. Características energéticas de los elementos de acumulación de un SAE. . . . .	18
4.1. Características de los modelos de una celda de batería . . . . .	37
4.2. Características de los modelos de un supercapacitor . . . . .	41
4.3. Características del transistor SiHP15N65E . . . . .	48
4.4. Características de algunos microcontroladores para la etapa de identificación . .	52
4.5. Características de algunos recursos de los microcontroladores . . . . .	52
5.1. Parámetros de configuración. . . . .	64
5.2. Parámetros de configuración del supercapacitor. . . . .	70
5.3. Parámetros de configuración del protocolo de comunicación. . . . .	74
5.4. Comparación del tiempo requerido para descargar una celda de batería. . . . .	79
5.5. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de la celda de batería . . . . .	81
5.6. Comparación del tiempo requerido para descargar un supercapacitor. . . . .	83
5.7. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de un superca- pacitor. . . . .	85
5.8. Parámetros de un vehículo eléctrico híbrido [70]. . . . .	86
5.9. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de un SAEH. . .	93

# Capítulo 1

## Introducción

En el presente capítulo se realiza un estudio del estado del arte, con el propósito de introducir a la situación actual de la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido. A partir del estado del arte, se realiza la justificación de la emulación de un sistema de emulación. Con base en el estado del arte y la justificación, se han definido diversos objetivos para el desarrollo de la presente tesis. Posteriormente, se presenta la metodología que ha sido planteada para lograr los objetivos establecidos. Finalmente, se describe la estructura de la tesis.

Contenido:

- 1.1 Estado del arte
- 1.2 Justificación
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Metodología
- 1.5 Estructura de la tesis

## 1.1. Estado del arte

En la actualidad, ha aumentado la preocupación por el deterioro ambiental, como consecuencia de la contaminación a causa del cambio climático. Una gran parte de la contaminación ambiental es producida por el consumo de combustible durante el tráfico vehicular, que provoca una alta emisión de gases de efecto invernadero [1,2]. Con el fin de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero provenientes del sector automotriz, se ha propuesto la electrificación de vehículos con la intención de reducir el consumo de combustibles fósiles.

La electrificación de vehículos permite minimizar el consumo de combustible fósil, dado que se incorpora un sistema de almacenamiento de energía (SAE) como fuente principal para la tracción de un vehículo eléctrico (VE) y un vehículo eléctrico híbrido (VEH) [3,4]. No obstante, el vehículo eléctrico híbrido se ha colocado como una alternativa eficiente, ya que no depende de una infraestructura para realizar el abastecimiento de energía para incrementar la autonomía de conducción [5–8].

En consecuencia, surge la necesidad de aumentar la energía suministrada en un tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido, considerando la interacción de los elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía. Por lo tanto, se ha propuesto utilizar un SAE que considera un elemento de acumulación de energía, con el propósito de suministrar energía en un tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido [9–11]. Por ejemplo, en [12], se propone emplear un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías, con el fin de suministrar energía en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido con topología paralela. Además, en [13], se propone utilizar un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de polímeros de litio para un vehículo eléctrico híbrido, con el fin de cubrir la demanda de energía de un VEH. Sin embargo, el suministro de energía de un vehículo eléctrico híbrido basado en un solo elemento de acumulación está restringido por las propiedades físicas de cada elemento de acumulación, lo cual genera un impacto en la eficiencia del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido.

Tomando en cuenta las limitaciones que manifiesta un SAE basado en un elemento de acumulación comercial, se ha propuesto el uso de un sistema de almacenamiento de energía híbrido (SAEH), con el propósito de cubrir la demanda de energía que requiere un vehículo eléctrico híbrido. Por ésto, se han propuesto diferentes sistemas de almacenamiento de energía híbrido basados en dos o más elementos de almacenamiento de energía comercial, con el propósito de suministrar energía en un tren de potencia [14, 15, 6]. Por ejemplo, en [16], se ha empleado un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercapacitores, con el objetivo de satisfacer la demanda de energía, en función de un sistema de gestión de energía. Además, en [14], se propone el empleo de un SAEH basado en baterías y supercapacitores, con la finalidad de cubrir la demanda de energía, considerando un sistema de gestión de energía para incrementar el ciclo de vida. No obstante, es necesario tomar en cuenta el comportamiento de los distintos elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con el fin de analizar el suministro de energía en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido.

En función de la necesidad de analizar el comportamiento de las baterías y supercapacitores en un tren de potencia de un sistema de almacenamiento de energía, se proponen diversos modelos matemáticos que describen la evolución eléctrica. En consecuencia, para representar las diversas reacciones químicas que caracterizan a los elementos de acumulación de energía, se han empleando modelos electroquímicos no lineales [17–19]. Por ejemplo, en [20], se propone un mo-

delo electroquímico para una celda de batería, con la finalidad de representar el comportamiento eléctrico durante el consumo de energía de un vehículo eléctrico híbrido.

Además, en [21], se ha planteado un modelo electroquímico de un supercapacitor, con el objetivo de determinar la evolución eléctrica durante un suministro de energía. No obstante, la representación electroquímica de los elementos básicos del sistema de almacenamiento de energía híbrido requieren un equipo especializado, que permita relacionar las reacciones químicas involucradas en el suministro y acumulación de energía.

Considerando los inconvenientes que presenta el modelo electroquímico de cada elemento de acumulación, se propone utilizar un modelo eléctrico que represente el comportamiento de cada elemento de acumulación de energía que conforman a un SAEH [22–24]. En consecuencia, el modelo eléctrico permite reproducir un determinado comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido considerando la interconexión de baterías y supercapacitores, con el fin de representar diversas características electroquímicas que definen el suministro de energía [25, 26]. Por ejemplo, en [27], se utiliza un modelo eléctrico para una celda de batería y un modelo eléctrico para un supercapacitor, con la finalidad de imitar el suministro de energía en el tren de potencia de un vehículo eléctrico. Sin embargo, se necesita analizar la evolución eléctrica durante la demanda de energía de un tren de potencia mediante una simulación, con el objetivo de llevar a cabo una validación del modelo eléctrico de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

La simulación del modelo eléctrico de un sistema de almacenamiento de energía híbrido ha permitido reproducir la evolución eléctrica de acuerdo a una determinada demanda de energía relacionada con un ciclo de conducción, con la finalidad de disminuir el tiempo de cálculo que requiere la solución numérica [28–30]. Por ejemplo, en [31], se emplea el modelo eléctrico de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con el fin de cubrir la demanda de energía en un vehículo eléctrico híbrido. Además, en [6], se emplea el modelo eléctrico para un paquete de baterías y un conjunto de supercapacitores, con el propósito de reproducir la evolución eléctrica durante la demanda de energía de un vehículo eléctrico híbrido. No obstante, aunque se ha tomado en cuenta el modelo eléctrico de cada elemento que integra un sistema de almacenamiento de energía híbrido para reproducir un comportamiento en función de una demanda de energía del tren de potencia, la simulación requiere un elevado costo computacional, que dificulta la validación de un diseño en tiempo real.

Con la finalidad de evitar el elevado costo computacional que requiere una simulación de un SAEH, se ha realizado la emulación de los elementos que conforman a un sistema de almacenamiento de energía híbrido considerando una determinada demanda de energía [32–37]. Por ejemplo, en [38], se ha realizado la emulación de un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías, con la intención de imitar la evolución eléctrica mediante un gabinete de pruebas. Además, en [39], se ha realizado la emulación de un SAE para un VE/VEH mediante un modelo matemático y un gabinete de pruebas, con la finalidad de validar la demanda de energía en función de un ciclo de conducción. Sin embargo, la emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido se ha realizado mediante hardware especializado con un enfoque denominado *Hardware-in-the-loop*, que incrementa el costo de la experimentación requerida para obtener los parámetros eléctricos.

A partir de las diversas técnicas empleadas para imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en tiempo real, surge la necesidad de desarrollar la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido de un vehículo eléctrico híbrido. Además, la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en un sistema embebido

permitirá obtener las características de los elementos básicos de energía, con el propósito de reproducir la evolución eléctrica en función de una determinada demanda de energía de un tren de potencia.

## 1.2. Justificación

Actualmente, se ha incrementado el interés por reducir la emisión de gases de efecto invernadero en la industria automotriz, en consecuencia, se ha propuesto la migración de vehículo con motor de combustión interna hacia la electrificación de vehículos.

A partir de la electrificación de vehículos ha surgido el vehículo eléctrico que considera un nivel de autonomía en función de un sistema de almacenamiento de energía que restringe la autonomía de conducción. En consecuencia, el vehículo eléctrico híbrido se ha posicionado como una alternativa eficiente de solución debido a un incremento en la autonomía de conducción, a partir de la incorporación de un motor de combustión interna y un sistema de almacenamiento de energía.

Hoy en día, la eficiencia del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido radica principalmente en el motor de combustión interna y el sistema de almacenamiento de energía, debido a las propiedades eléctricas del sistema de almacenamiento de energía. Además, el sistema de almacenamiento de energía suministra energía en el tren de potencia, con el propósito de incrementar la eficiencia de energética en función de la tecnología de fabricación. No obstante, un suministro de energía demandante provoca una degradación en la evolución eléctrica del sistema de almacenamiento de energía, que impacta mediante un daño irreversible en la estructura interna del elemento de acumulación de energía.

Debido a las limitaciones que presenta el sistema de almacenamiento de energía, se ha propuesto el empleo de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, que permite incrementar el suministro de energía que demanda un tren de potencia. Sin embargo, el sistema de almacenamiento de energía híbrido exhibe diversos comportamientos en función de la tecnología del elemento primario y el elemento secundario, por consiguiente, se han desarrollado diversas propuestas para determinar la evolución eléctrica del sistema de almacenamiento de energía híbrido, a partir de los fenómenos físicos que rigen a los elementos básicos.

Con el propósito de determinar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido se han propuesto diversas metodologías de caracterización, que requieren de una simulación para analizar la evolución eléctrica de un elemento primario y un elemento secundario. Sin embargo, la simulación requiere de un elevado tiempo de cómputo, que incrementa el costo de experimentación requerida para determinar una solución numérica. Además, los modelos empleados en la representación eléctrica del sistema de almacenamiento de energía híbrido carecen de precisión, debido a un elevado consumo de recursos reflejado en el tiempo de procesamiento de datos.

A partir de la necesidad de eliminar los problemas y limitaciones que presenta la naturaleza de una simulación, se han propuesto diversas metodologías para emular el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en tiempo real. No obstante, en diversos artículos de investigación se ha realizado la emulación de diversos sistemas de almacenamiento de energía a través de equipo especializado, con el propósito de imitar la evolución eléctrica de elementos de acumulación de energía comerciales en función de condiciones ideales.

Considerando las limitaciones que presenta la simulación y las desventajas que experimenta actualmente la emulación, surge la necesidad de desarrollar un sistema de emulación capaz imitar la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

## 1.3. Objetivos

### Objetivo General

Emular el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para un vehículo eléctrico híbrido.

### Objetivos Específicos

- Realizar el estudio del estado del arte enfocado a sistemas de almacenamiento de energía híbridos.
- Definir el comportamiento para un tren de potencia híbrido con topología serie.
- Definir la topología de interconexión para un sistema de almacenamiento de energía híbrido.
- Determinar una técnica de caracterización para un sistema de almacenamiento de energía híbrido.
- Desarrollar un sistema de emulación para un sistema de almacenamiento de energía híbrido.
- Validar el sistema de emulación en función de un tren de potencia híbrido.

## 1.4. Metodología

En la presente tesis se plantea una metodología para la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para un vehículo eléctrico híbrido.

La metodología consiste en definir diversos aspectos de un vehículo eléctrico híbrido, con la intención de analizar la importancia de un sistema de almacenamiento de energía híbrido durante la generación de la tracción. En consecuencia, se proponen los elementos de una determinada topología, con el propósito de especificar un modelo de un tren de potencia que permita establecer una determinada energía.

Con base en un ciclo de conducción real de un vehículo convencional, se establece una demanda de energía que deberá cubrir un sistema de almacenamiento de energía híbrido. Por consiguiente, se procede a definir un modelo eléctrico, con el fin de determinar una aproximación

del comportamiento electroquímico de los elementos que conforman un SAEH. Además, se procede a determinar los parámetros eléctricos del modelo eléctrico, con el fin de imitar la evolución de los elementos básicos de acumulación.

A partir de la identificación de los parámetros del modelo eléctrico, se procede a discretizar el modelo matemático del SAEH, con el propósito de realizar una transformación en el dominio discreto que permita implementar en un sistema embebido. Además, se procede a realizar una validación del comportamiento del SAEH, a través de una emulación con la interacción del modelo cuasi-estático de un vehículo.

## 1.5. Estructura de la tesis

Con el fin de lograr los objetivos establecidos, el presente trabajo se ha organizado con base en la siguiente estructura:

- **Capítulo 1:** Se realiza un análisis del estado del arte, que permite definir los objetivos para el desarrollo de la presente tesis. Además, se presenta la justificación del tema de tesis en función del estado del arte. Asimismo, se plantea la metodología que ha sido empleada para lograr los objetivos establecidos.
- **Capítulo 2:** Se describen los elementos que conforman un tren de potencia, así como la interacción de los elementos para definir un tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido.
- **Capítulo 3:** Se presentan las diversas características de los elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, que permiten definir el comportamiento de los elementos básicos de acumulación. Adicionalmente, se establece la topología del SAEH, con la intención de determinar un mecanismo de interacción con el tren de potencia.
- **Capítulo 4:** Se presenta el modelo matemático de los elementos de acumulación de energía, que permitirá reproducir la evolución eléctrica de un SAEH. Además, se establece el diseño de un sistema de caracterización, que permite obtener las características eléctricas que conformarán a un SAEH. Asimismo, se muestra el diseño de un sistema de emulación, con el propósito de imitar la evolución eléctrica de un SAEH.
- **Capítulo 5:** Se muestra la validación del comportamiento de los elementos de acumulación, con la intención de demostrar el correcto funcionamiento de la metodología de caracterización. De igual manera, se muestra la validación del sistema de emulación, con el propósito de establecer el correcto funcionamiento del sistema de emulación. Asimismo, se muestra la validación con el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido, con la intención de demostrar el correcto funcionamiento de la metodología de emulación.

## Capítulo 2

# Vehículo eléctrico híbrido

En este capítulo, se describen los elementos que conforman un tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido, considerando la relación con un sistema de almacenamiento de energía híbrido. Posteriormente, se define la interconexión de los elementos de un tren de potencia eléctrico híbrido mediante una determinada topología. Finalmente, se considera el modelo cuasi-estático que permite describir el comportamiento del tren de potencia.

Contenido:

- 2.1 Introducción
- 2.2 Elementos de un tren de potencia híbrido
- 2.3 Topología del tren de potencia híbrido
- 2.4 Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido
- 2.5 Conclusiones

## 2.1. Introducción

Hoy en día, un vehículo eléctrico híbrido (VEH) se ha colocado como alternativa eficiente en la electrificación, como consecuencia del incremento en la autonomía de conducción sin la necesidad de una infraestructura para realizar la recuperación de energía.

Un VEH se caracteriza por incorporar en el tren de potencia un sistema de almacenamiento de energía (SAE) como fuente de energía principal y un motor de combustión interna (MCI) como fuente de energía secundaria, con la intención de suministrar una energía eléctrica combinada para realizar la tracción.

Sin embargo, el comportamiento de un vehículo eléctrico híbrido se determina mediante la interconexión de los elementos del tren de potencia. Por otro lado, el modelo cuasi-estático del tren de potencia permite describir un flujo de energía.

## 2.2. Elementos de un tren de potencia

Un vehículo eléctrico híbrido se conforma por un tren de potencia que incorpora una transmisión, un motor de combustión interna, un motor/generador eléctrico y un sistema de almacenamiento de energía, que permiten llevar a cabo la tracción.

### 2.2.1. Transmisión

La transmisión es un elemento del tren de potencia (Figura 2.1), que integra un clutch (transmisión manual), una caja de engranes, diferencial y llantas [40].

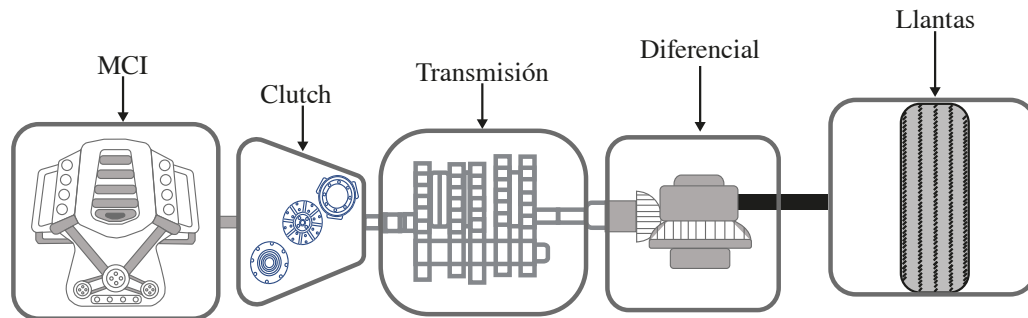


Figura 2.1. Elementos de una transmisión.

Además, la transmisión permite realizar la transformación de un torque ( $\tau_{in}$ ) y una velocidad angular ( $\omega_{in}$ ) de entrada a un torque ( $\tau_{out}$ ) y una velocidad angular ( $\omega_{out}$ ) de salida, en función de la relación ( $\gamma$ ) de la caja de cambios de la transmisión. Asimismo, la potencia de salida ( $P_{out}$ ) de la transmisión (2.1), está relacionada con el torque y la velocidad angular de entrada.

$$P_{out} = \frac{\tau_{in} \cdot \omega_{in}}{\gamma} \quad (2.1)$$

### 2.2.2. Motor de combustión interna

El motor de combustión interna (MCI) es un elemento del tren de potencia, que tiene la función de convertir una energía electroquímica a una energía mecánica. Existen diversas representaciones para reproducir el comportamiento de un motor de combustión interna.

Con la intención de determinar el consumo de combustible de un motor de combustión interna en un tren de potencia híbrido, se ha propuesto emplear un mapa estático no lineal denominado *mapa BSFC (Brake Specific Fuel Consumption)* (Figura 2.2) [41].

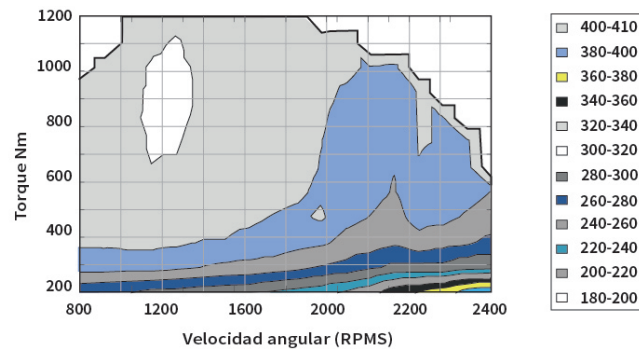


Figura 2.2. Mapa BSFC.

### 2.2.3. Motor/generador eléctrico

El motor/generador eléctrico (MGE) es una máquina eléctrica, que permite transformar una energía eléctrica a una energía mecánica (modo motor) o permite realizar una transformación de energía mecánica a energía eléctrica (modo generador) [42].

Se han empleado diversos motores/generadores eléctricos en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido (Figura 2.3), sin embargo, el motor/generador síncrono de corriente alterna (AC) se ha destacado debido a que suministra una elevada eficiencia y una elevada densidad de potencia.

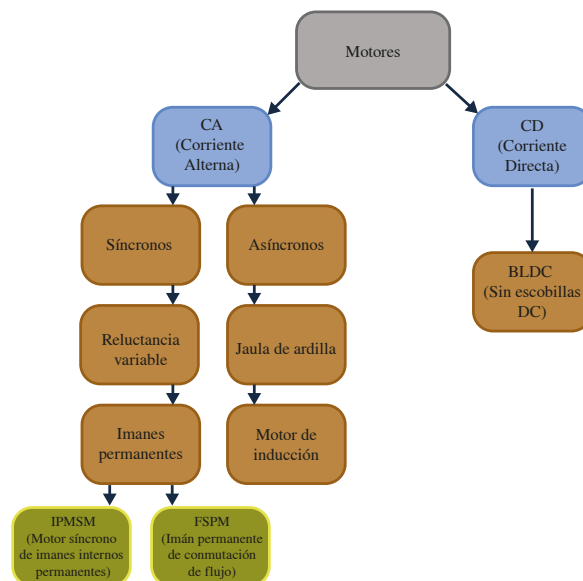


Figura 2.3. Algunos tipos de motor/generador eléctrico [43–48].

Con la intención de representar el comportamiento de un motor/generador eléctrico, se ha propuesto emplear una eficiencia puntual para generar un mapa de eficiencia (Figura 2.4).

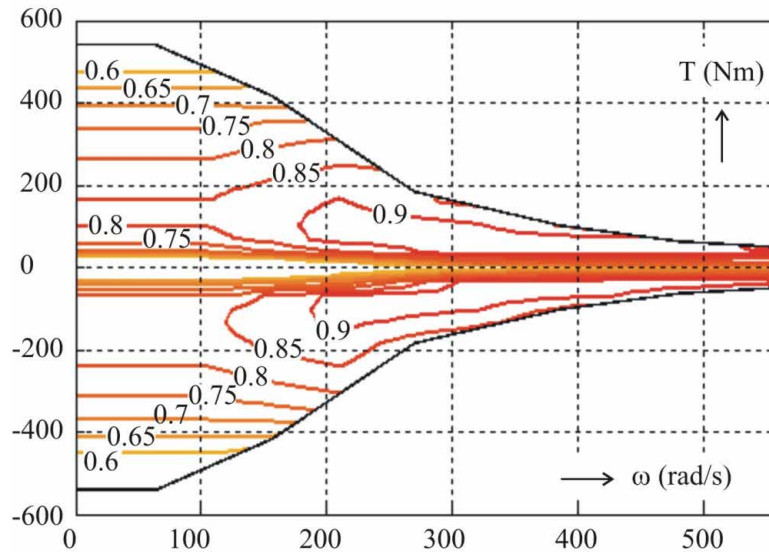


Figura 2.4. Un mapa de eficiencia para un motor/generador eléctrico [49–52].

### 2.3. Topología del tren de potencia

La interconexión de los elementos que conforman el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido (VEH) se clasifica en tres topologías:

- Topología serie.
- Topología paralela.
- Topología serie-paralela.

La topología del tren de potencia permite definir una trayectoria energética, con el propósito de establecer un determinado comportamiento en función de las características de los elementos.

### 2.3.1. Topología serie

La topología serie (Figura 2.5) establece la interconexión de diversos elementos, que definen un trayecto único para la transferencia de energía en el tren de potencia [53].

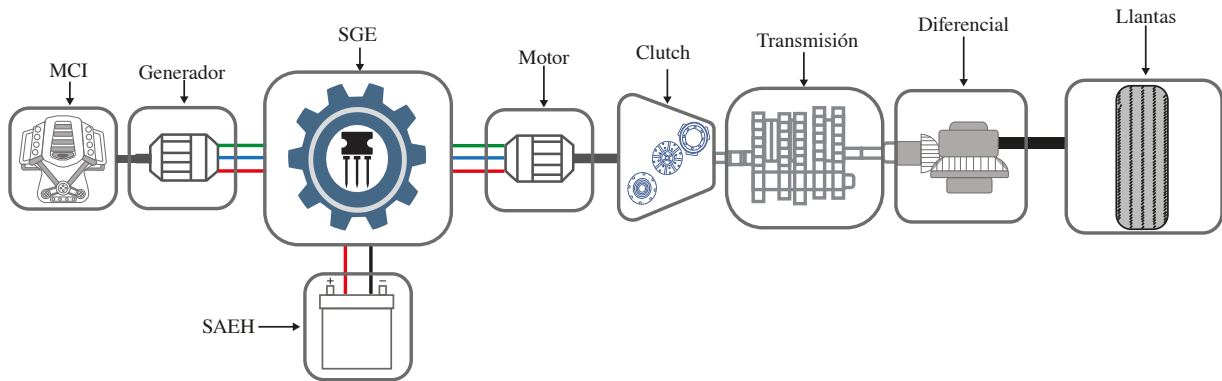


Figura 2.5. Topología serie de un vehículo eléctrico híbrido.

Un VEH con topología serie provee un mayor rendimiento durante una conducción intermitente (conducción en ciudad), debido a que no existe una conexión mecánica entre el motor de combustión interna (MCI) y las ruedas [54]. Por consiguiente, es posible establecer el comportamiento del MCI en un punto óptimo de operación para lograr una determinada velocidad. Por otra parte, un vehículo eléctrico híbrido con topología serie requiere un MCI con mayor potencia, para lograr una elevada velocidad durante una conducción continua (conducción en carretera).

### 2.3.2. Topología paralela

La topología paralela (Figura 2.6) establece la interconexión de diversos elementos, que definen dos trayectos para la transferencia de energía en el tren de potencia [55].

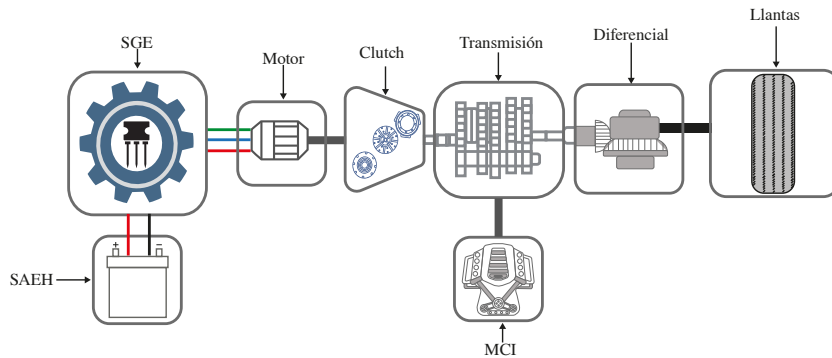


Figura 2.6. Topología paralela de un vehículo eléctrico híbrido.

Un VEH con topología paralela presenta una pérdida de energía, debido a que elimina una doble conversión de energía realizada en la topología serie. Por otra parte, en un vehículo eléctrico híbrido con topología paralela el MCI y el MGE se conectan a una transmisión mecánica con el objetivo de generar energía de forma independientemente.

### 2.3.3. Topología serie-paralela

La topología serie-paralela (Figura 2.7) establece la interconexión de diversos elementos, que definen más de dos trayectos para la transferencia de energía en el tren de potencia [56].

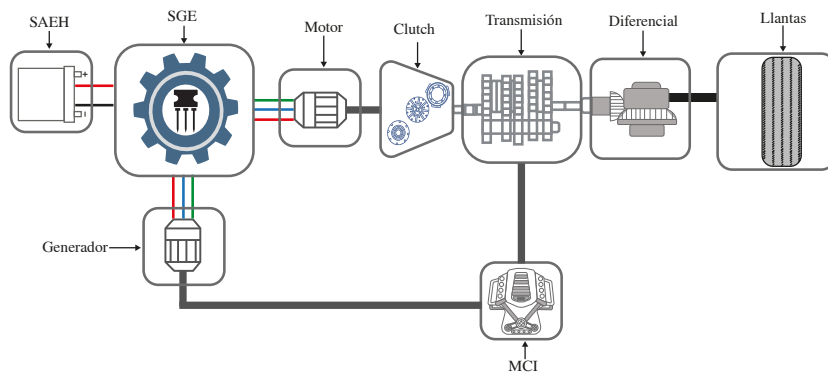


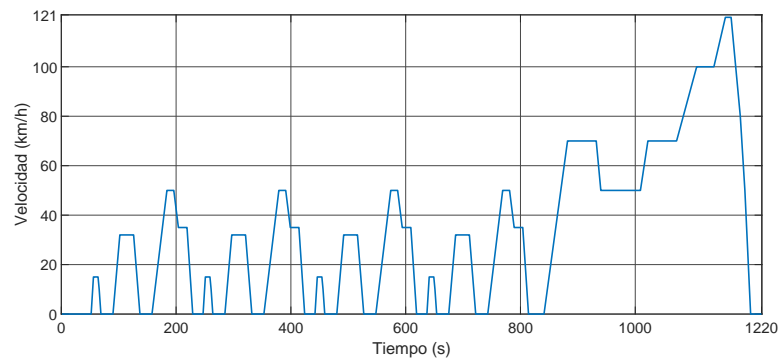
Figura 2.7. Topología serie-paralela de un vehículo eléctrico híbrido.

Un VEH con topología serie-paralela combina las características de la topología serie y de la topología paralela, asimismo, posee una conexión mecánica directa adicional entre el generador y el motor de tracción. Por otra parte, un vehículo eléctrico híbrido con topología serie-paralela requiere estrategias de control con un nivel de complejidad mayor, con el propósito de incrementar la autonomía de conducción.

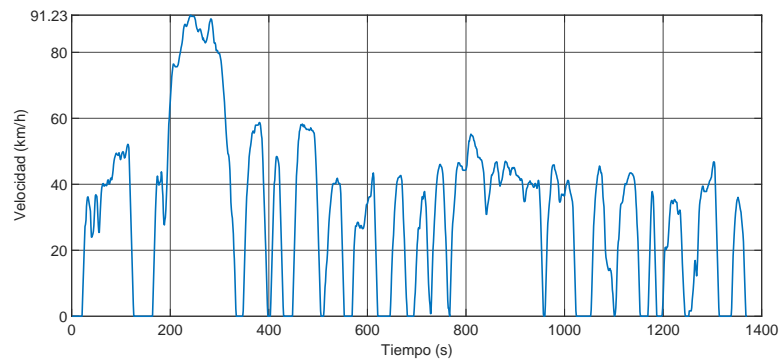
## 2.4. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido

El modelo cuasi-estático permite definir el comportamiento del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido [57]. Además, el modelo proporciona un método para determinar el consumo de combustible mediante un ciclo de conducción [58].

Un ciclo de conducción está conformado por un conjunto de datos, que permiten representar la velocidad de un vehículo. Los ciclos de conducción se clasifican en ciclos modales (Figura 2.8(a)) y ciclos de conducción transitorios (Figura 2.8(b)) [59]. No obstante, un ciclo de conducción transitorio provee información de un trayecto acotado, que limita un análisis de manejo agresivo y repetitivo [60].



(a) Ciclo modal NEDC



(b) Ciclo transitorio UDSS

Figura 2.8. Comportamiento de los ciclos de conducción estándar.

Considerando la naturaleza de un ciclo de conducción, se define un bloque que permite representar el comportamiento de un vehículo eléctrico híbrido (Figura 2.9), con el propósito de establecer la evolución del torque y la velocidad angular.

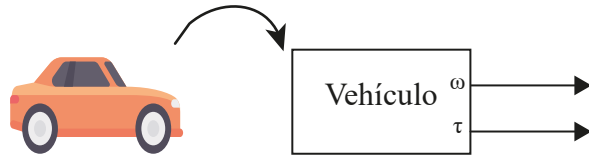


Figura 2.9. Modelo de un vehículo.

Posteriormente, es posible definir el comportamiento de una transmisión a partir de una transformación de un comportamiento convencional, que considera la evolución de un torque y una velocidad angular en función de una relación de engranes ( $\gamma$ ), Figura 2.10.

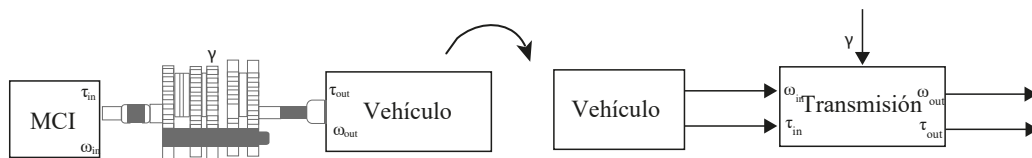


Figura 2.10. Transformación del comportamiento convencional de una transmisión.

Considerando el comportamiento convencional que define a una máquina eléctrica (motor/generador), es posible realizar una transformación para representar una evolución mecánico-eléctrica en función de un mapa de eficiencia, Figura 2.11.

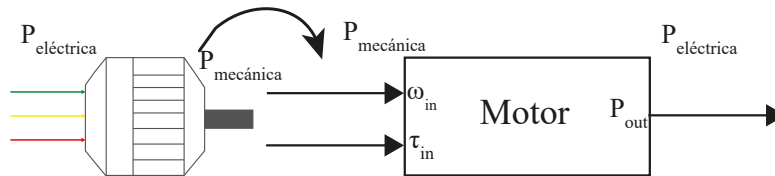


Figura 2.11. Transformación del comportamiento convencional de una máquina eléctrica.

Con el propósito de establecer la fuente de energía que puede cubrir una demanda del tren de potencia, es posible definir el modelo de un sistema de gestión de energía (SGE) (Figura 2.12).

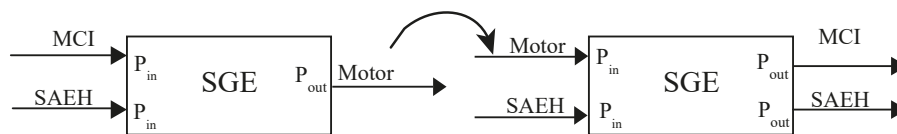


Figura 2.12. Modelo de un SGE.

A partir del comportamiento convencional de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, es posible realizar una transformación para representar una evolución eléctrica en función de la tecnología de los elementos básico de acumulación de energía, Figura 2.13.

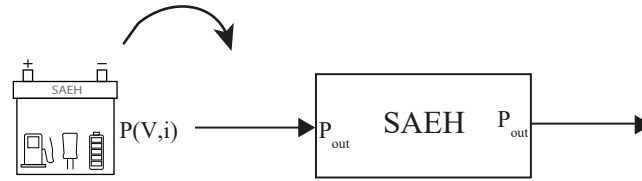


Figura 2.13. Transformación del comportamiento convencional de un SAEH.

Considerando el comportamiento convencional de un generador eléctrico, es posible establecer una transformación del comportamiento eléctrico-mecánico, Figura 2.14.

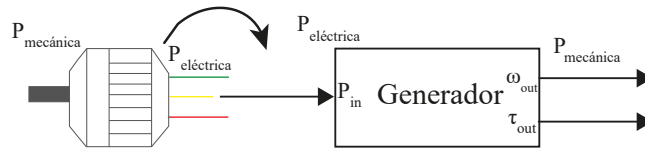


Figura 2.14. Transformación del comportamiento convencional de un generador.

A partir del comportamiento convencional que define la naturaleza de un motor de combustión interna, es posible llevar a cabo una transformación para representar el consumo de combustible puntual a través de un mapeo de un torque y una velocidad angular considerando un mapa *BSFC*, Figura 2.15.

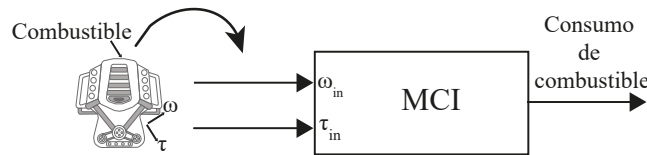


Figura 2.15. Transformación del comportamiento convencional de un MCI.

Finalmente, se define el modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido con una topología serie (Figura 2.16), a través de la interconexión de los elementos del tren de potencia.

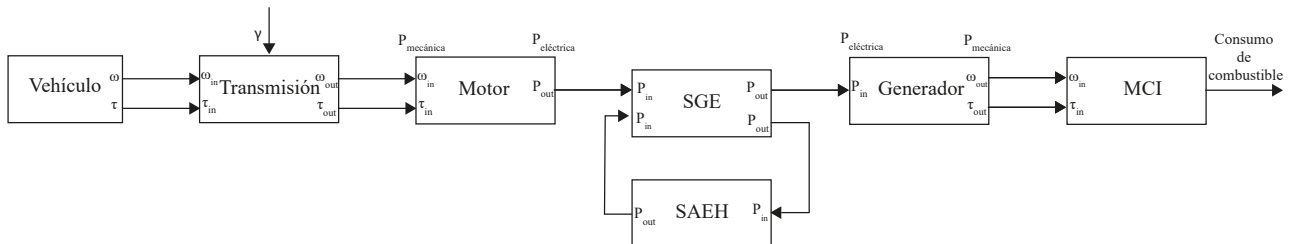


Figura 2.16. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido.

## 2.5. Conclusiones

Considerando los elementos de un tren de potencia, es posible determinar la demanda de energía que se requiere un vehículo eléctrico híbrido en función de un ciclo de conducción.

A partir de las características los elementos de un tren de potencia en función de una interconexión, fue posible determinar que existen diversas topologías que establecen una determinada trayectoria de energía. Sin embargo, la topología serie del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido es una opción viable, debido a que presenta una menor complejidad en la interconexión de los elementos, que permitirá llevar a cabo la validación de la emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

Debido a la naturaleza del comportamiento convencional de los elementos del tren de potencia, se ha determinado emplear un modelo cuasi-estático para reproducir la interacción de los elementos que conforman el tren de potencia, con la intención de realizar el análisis de un vehículo eléctrico híbrido en aplicaciones de tiempo real.

## Capítulo 3

### Sistema de almacenamiento de energía híbrido

En este capítulo se presentan diversas características físicas y eléctricas de los elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido (SAEH), que permiten establecer el suministro de energía en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido. Considerando las características generales de cada elemento de acumulación, se procede a definir las características específicas de las principales tecnologías empleadas en la fabricación de un SAEH. Finalmente, se describen las topologías de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

Contenido:

- 3.1 Introducción
- 3.2 Características físicas de los elementos de acumulación de energía
- 3.3 Características eléctricas de los elementos de acumulación de energía
- 3.4 Tecnologías de fabricación de los elementos de acumulación de energía
- 3.5 Topologías de interconexión de los elementos de acumulación de energía
- 3.6 Conclusiones

### 3.1. Introducción

El sistema de almacenamiento de energía (SAE) es un elemento que realiza las acciones de almacenamiento y suministro de energía eléctrica, en función de un proceso químico producido por diversos compuestos. Un SAE está conformado por diversos elementos de acumulación como baterías, supercapacitores o celdas de combustible, que generan diversas características energéticas (Tabla 3.1) [61].

Tabla. 3.1. Características energéticas de los elementos de acumulación de un SAE.

Elemento	Energía específica $\frac{\text{W}\cdot\text{hr}}{\text{kg}}$	Densidad de energía $\frac{\text{W}\cdot\text{hr}}{\text{l}}$	Costo de fabricación $\frac{\$}{\text{kW}\cdot\text{hr}}$
Batería	50 – 280	60 – 200	$\geq 125$
Supercapacitor	2.5 – 15	10 – 30	300 – 2000
Celda de combustible		500 – 3000	1900 – 5000

Un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías y supercapacitores permite incrementar el suministro de energía, con el propósito de cubrir la demanda de energía de un tren de potencia. Además, un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías y supercapacitores permite prolongar la autonomía de conducción, debido al aporte de las características físicas y energéticas de las tecnologías empleadas en la fabricación de un elemento de acumulación.

### 3.2. Características físicas de los elementos de acumulación de energía

Una batería es un elemento electroquímico que se conforma por un conjunto de elementos básicos denominados celdas, que permite genera energía electroquímica durante el proceso de carga-descarga a partir de un proceso químico reversible. Una celda se compone de los siguientes partes (Figura 3.1) [61, 62]:

- **Ánodo:** es un elemento denominado electrodo negativo, que cede electrones y se oxida durante la generación de electricidad.
- **Cátodo:** es un elemento denominado electrodo positivo, que admite electrones y se reduce durante la generación energía.

- **Electrolito:** es una sustancia denominada conductor iónico, que permite establecer una interfaz entre cátodo y ánodo.

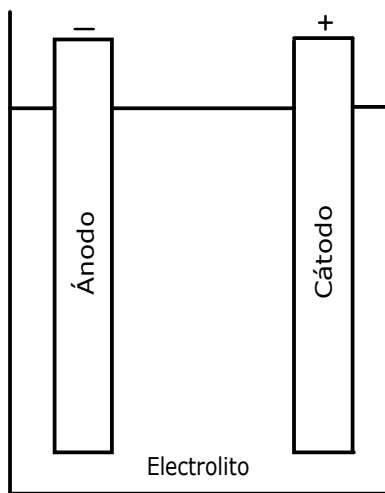


Figura 3.1. Elementos de una celda de una batería.

Por otro lado, un supercapacitor es un elemento que presenta un comportamiento electrostático, con la finalidad de convertir la energía eléctrica en energía electrostática durante la carga y convertir la energía electrostática en energía eléctrica durante la descarga. Un supercapacitor se compone de los siguientes elementos (Figura 3.2) [61, 62]:

- **Electrodo:** es un medio que establece una interfaz entre una carga y el supercapacitor.
- **Electrolito:** es una sustancia que permite interactuar con el electrodo.
- **Dieléctrico:** es un medio físico que establece una separación para incrementar la capacidad de almacenamiento.

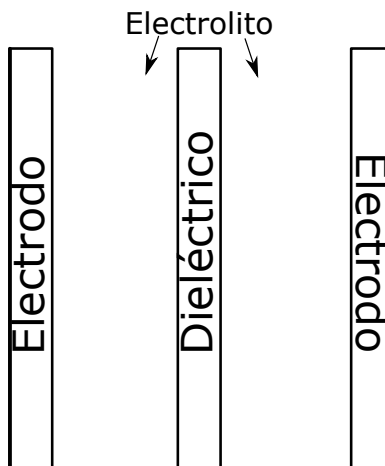


Figura 3.2. Elementos de un supercapacitor.

### 3.3. Características eléctricas de los elementos de acumulación de energía

La interacción entre los elementos de una celda de batería genera un determinado comportamiento (Figura 3.3), que permite establecer las siguientes características eléctricas [61, 62]:

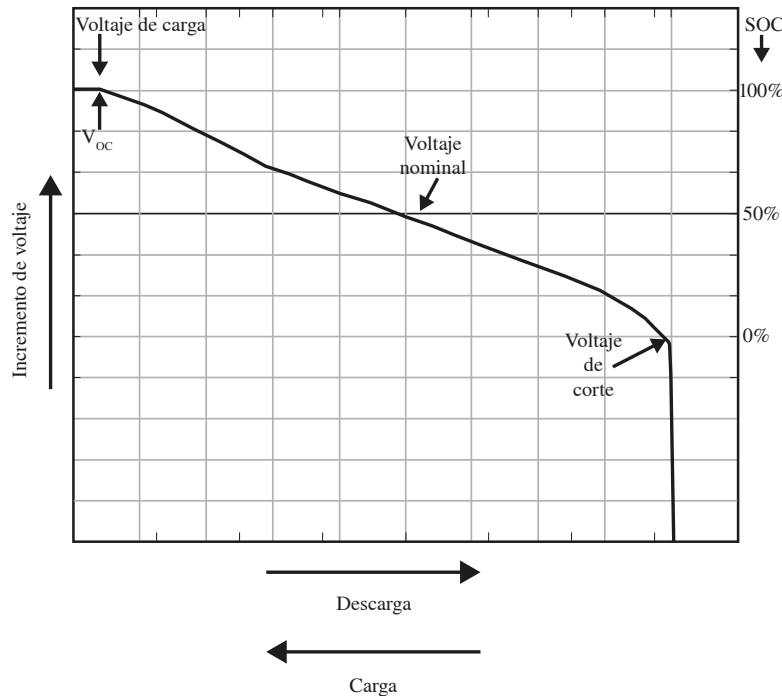


Figura 3.3. Características eléctricas de una celda.

- **Capacidad:** cantidad de energía en  $A \cdot h$  que contiene una celda.
- **Carga:** es un proceso eléctrico que almacena energía mediante un flujo de electrones, que proviene del electrodo negativo hacia el electrodo positivo, Figura 3.4.
- **Descarga:** es un proceso eléctrico que suministra energía mediante un flujo de corriente, que proviene del electrodo positivo hacia el electrodo negativo, Figura 3.5.
- **Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** voltaje que presenta una celda en función de la ausencia de una carga.
- **Voltaje nominal:** voltaje característico que experimenta en función de la tecnología de fabricación de la celda.
- **Voltaje de carga:** voltaje máximo que presenta la celda al finalizar el proceso de carga.
- **Voltaje de corte:** voltaje mínimo que experimenta una celda al finalizar el proceso de descarga completa.
- **Estado de carga (SOC):** porcentaje de energía disponible en una celda.

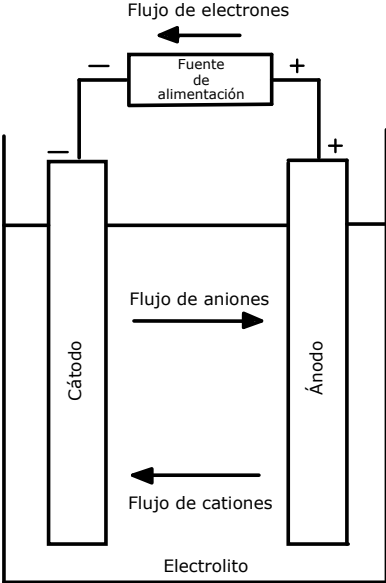


Figura 3.4. Proceso de carga en una celda de una batería.

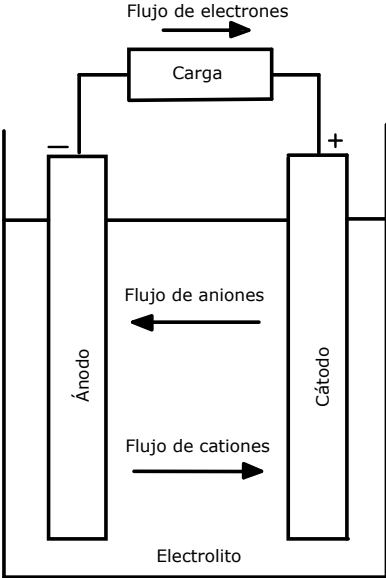


Figura 3.5. Proceso de descarga en una celda de una batería.

Las características eléctricas están en función de la tecnología que se utiliza para la fabricación de una celda de batería, actualmente, las celdas fabricadas con tecnologías como plomo ácido, níquel-metal hidruro (Ni-MH), iones de litio (Li-Ion) y polímeros de litio (LiPo) se emplean en el sistema de almacenamiento de energía de vehículos eléctricos híbridos [61,62].

Por otro lado, la interacción entre los elementos de un supercapacitor genera un determinado comportamiento (Figura 3.6), que permite establecer las siguientes características eléctricas:

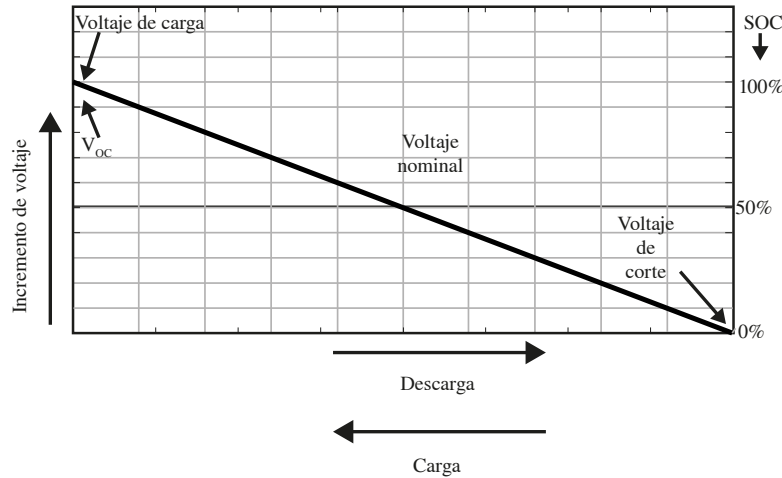


Figura 3.6. Características eléctricas de un supercapacitor.

- **Capacitancia:** cantidad de energía en faradios ( $F$ ) que contiene un supercapacitor.
- **Carga:** es un proceso eléctrico que suministra energía mediante un flujo de corriente entre los electrodos y el electrolito (Figura 3.7).

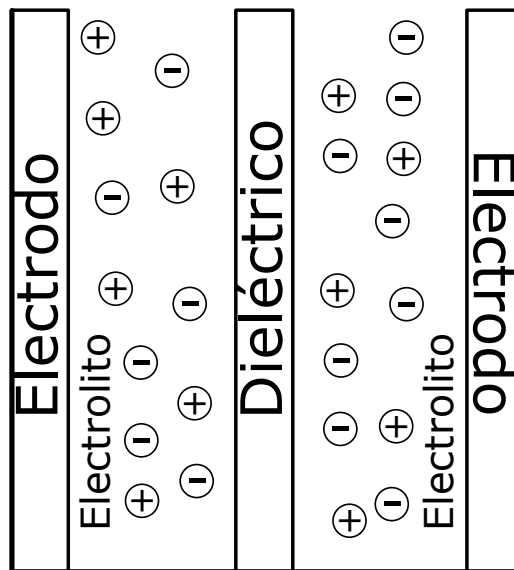


Figura 3.7. Proceso de carga en un supercapacitor.

- **Descarga:** es un proceso eléctrico que suministra energía a través de un flujo de electrones entre los electrodos y el electrolito (Figura 3.8).

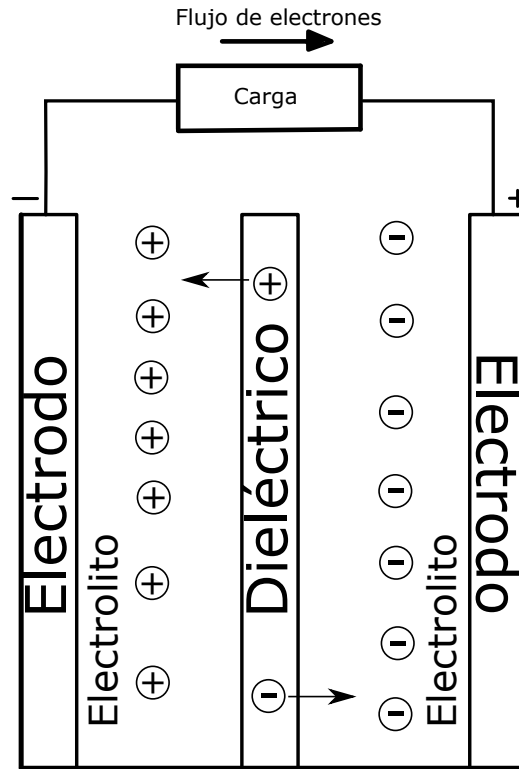


Figura 3.8. Proceso de descarga en un supercapacitor.

- **Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** voltaje que presenta un elemento básico en función de la ausencia de una carga
- **Voltaje de carga:** voltaje máximo que presenta el elemento básico al finalizar el proceso de descarga.
- **Estado de carga (SOC):** porcentaje de energía disponible en un elemento básico.

Las características eléctricas están en función de la tecnología que se utiliza para la fabricación de un supercapacitor, hoy en día, los supercapacitores con tecnología como doble capa eléctrica y pseudocapacitivos se emplean en el sistema de almacenamiento de energía de vehículos eléctricos híbridos [61–63].

### 3.4. Tecnologías de fabricación de los elementos de acumulación de energía

Considerando las características generales que rigen el comportamiento de una batería y un conjunto de supercapacitores, es posible establecer un suministro de energía específico en un tren de potencia en función de las diversas tecnologías de fabricación de las celdas de una batería y de supercapacitores.

Hoy en día, las tecnologías de plomo ácido, níquel-metal hidruro, iones de litio y polímeros de litio se emplean en la fabricación de celdas de batería, debido a las características eléctricas y energías que presentan en función de diversas reacciones químicas. Además, las tecnologías de doble capa eléctrica y pseudocapacitancia se emplean en la fabricación de supercapacitores, debido a las características que suministra en un tren de potencia en función de procesos electrostáticos y químicos. No obstante, a pesar de las propiedades eléctricas y energéticas que puede experimentar un supercapacitor existe un dispositivo en fase de desarrollo denominado supercapacitor híbrido, que combina las características electrostáticas y químicas de los elementos de acumulación de energía híbrido que permitirá incrementar la autonomía de conducción de un vehículo eléctrico híbrido [61–63].

#### 3.4.1. Baterías

Una celda fabricada con tecnología plomo ácido integra diversos materiales con la propiedad de generar una superficie de alta porosidad, con la intención de producir un elemento de acumulación que se caracteriza por una alta densidad de energía. La producción del electrodo positivo está en función de la incorporación de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), que permite prevenir un daño físico durante la interacción entre el electrodo negativo y el electrolito [61–63].

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.9) se produce una reacción química, que impacta en la capacidad de almacenamiento de energía considerando la variación de la gravedad específica del electrolito. Además, durante el proceso de carga-descarga el sulfato de plomo generado en los electrodos de la celda se convierte en plomo o dióxido de plomo, que provoca un incremento en el voltaje que se experimenta entre las terminales de la celda.

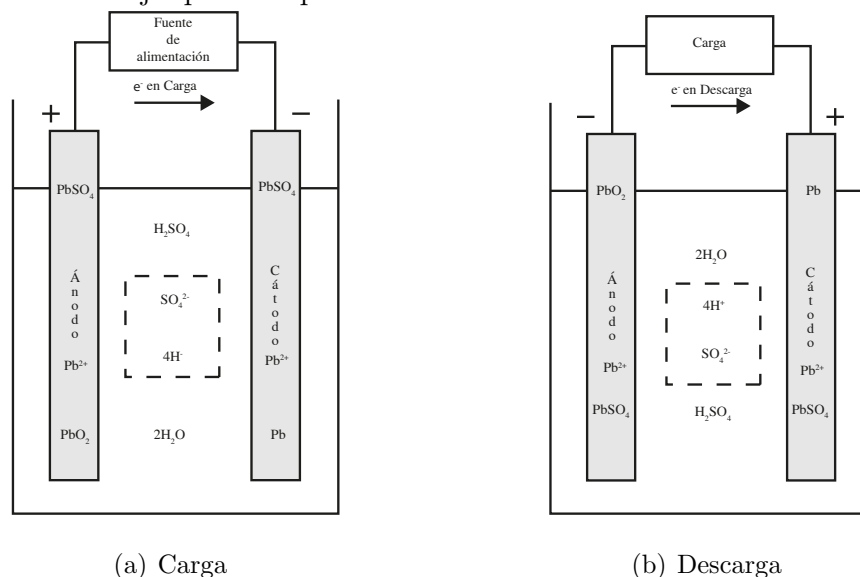
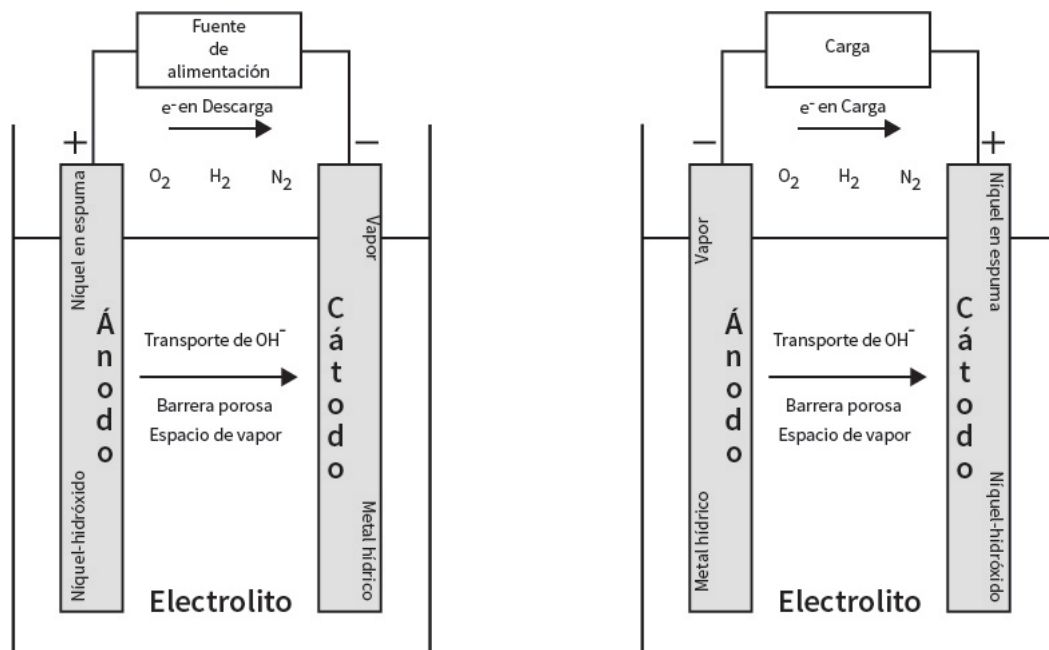


Figura 3.9. Proceso de carga-descarga de una celda de batería plomo ácido.

Una celda de plomo ácido presenta un voltaje en circuito abierto de 2.05 V a 2.125 V, un voltaje nominal de 2 V y un voltaje de corte de 1.75 V, en función de una temperatura aproximada de  $25^{\circ}\text{C}$ . No obstante, una celda de plomo ácido posee una limitada densidad de energía, debido a una restricción natural en la capacidad de almacenar energía en las celdas fabricadas con tecnología de plomo. Además, presenta una dificultad para producir celdas con un determinado tamaño, debido a la cantidad de espacio que involucra contener el electrolito.

Una celda fabricada con tecnología níquel-metal hidruro (Ni-MH) integra diversos materiales con la propiedad de producir electrodos con alta porosidad, con la intención de generar una superficie con una resistencia interna mínima. La producción del electrodo negativo considera una aleación de hidruro metálico, con el propósito de evitar una reacción química que produce una liberación de desechos tóxicos [61–63].

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.10) se produce una recombinación de oxígeno, que permite prevenir un aumento en la presión del sistema de acumulación de energía. Además, se produce una reacción química, debido a la recombinación de elementos entre los electrodos y el electrolito.



(a) Carga

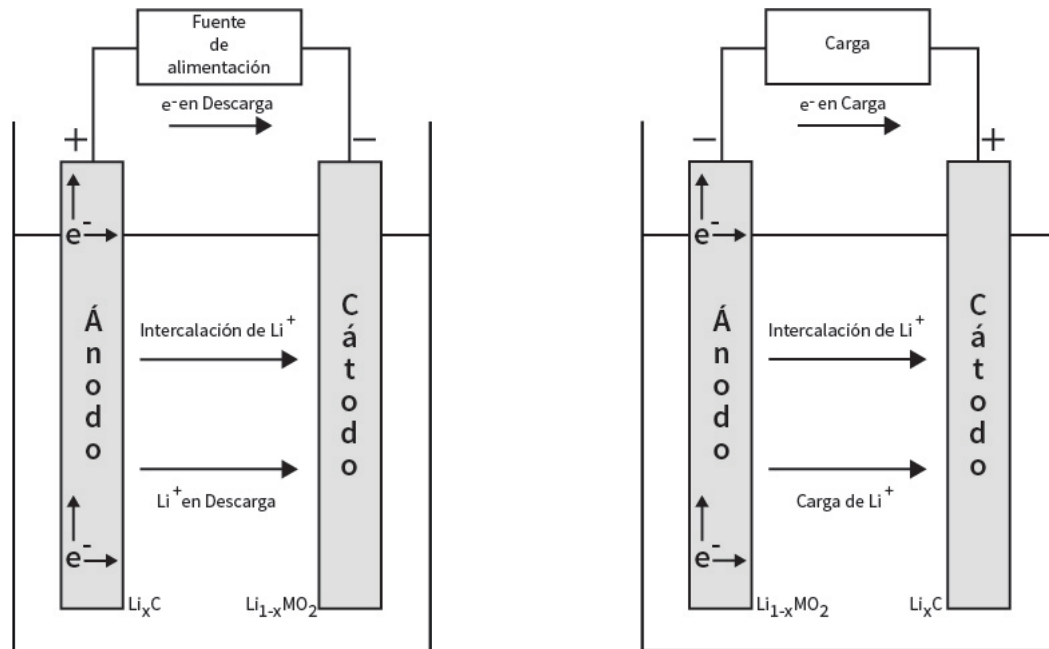
(b) Descarga

Figura 3.10. Proceso de carga-descarga de una celda de Ni-MH.

Una celda de Ni-MH presenta un voltaje en circuito abierto de 1.25 V a 1.35 V, un voltaje nominal de 1.2 V y un voltaje de corte de 1.0 V en función de una temperatura aproximada de  $25^{\circ}\text{C}$ . En específico, una celda con tecnología níquel-metal hidruro manifiesta un incremento de la capacidad de almacenamiento de energía, debido a la densidad de energía del electrodo basado en metal hídrico. No obstante, una celda de níquel-metal hidruro que experimenta una elevada demanda de energía impacta en un bajo desempeño, debido a la dificultad para completar ciclos de carga-descarga en función de ciclos de descarga agresivos.

Una celda fabricada con tecnología iones de litio (Li-Ion) integra diversos materiales, con el propósito de almacenar energía a través de un proceso denominado intercalación. El proceso de intercalación permite acumular energía de forma eficiente, a partir de un mecanismo de transferencia de elementos en los electrodos que considera un mínimo impacto en la estructura electroquímica [61–63].

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.11) el material del electrodo positivo se transfiere a través del proceso de intercalación y el material del electrodo negativo experimenta una oxidación, que provoca el inicio de intercalación de materiales para realizar la acumulación de energía a través de un proceso electroquímico.

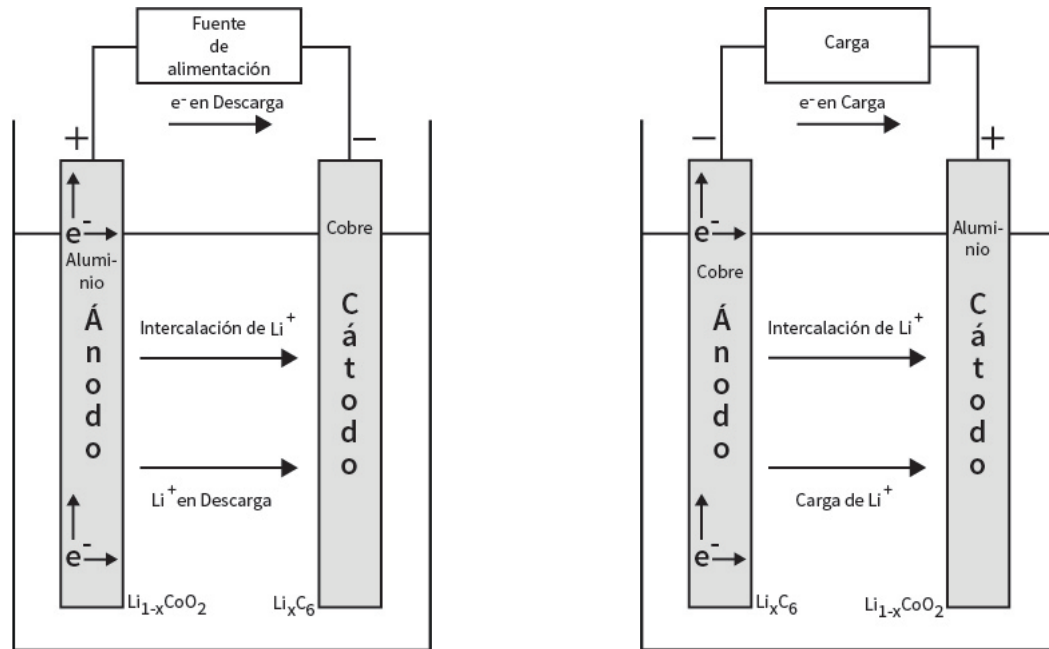


(a) Carga (b) Descarga  
Figura 3.11. Proceso de carga-descarga de una celda de Li-Ion.

Una celda de Li-ion presenta un voltaje en circuito abierto de 3.92 V a 4.1 V, un voltaje nominal de 3.6 V y un voltaje de corte de 3.0 V en función de una temperatura aproximada de  $25^\circ\text{C}$ . En particular, una celda con tecnología iones de litio se caracteriza por un incremento en el ciclo de vida respecto a otras tecnologías, debido a la degradación que se manifiesta en los componentes electroquímicos en función de una demanda prolongada de energía. No obstante, una celda de iones litio presenta una degradación en la capacidad para almacenar energía, debido a que requiere de métodos específicos para llevar a cabo la recuperación de energía, que permite evitar una sobre recarga de energía.

Una celda fabricada con tecnología polímeros de litio (LiPo) integra diversos materiales que se emplean en una celda con tecnología de iones de litio, con la característica de producir superficies con menor espesor. Los electrodos se fabrican considerando polímeros basados en carbono, que permiten ciclos de sobre carga de energía y ciclos de alta demanda de suministro de energía [61–63].

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.12) el material del electrodo positivo se transfiere en función del proceso de intercalación y el material del electrodo negativo se oxida, que permite iniciar el proceso de transporte de iones que impacta en el almacenamiento de energía a través del incremento del voltaje entre los electrodos.



(a) Carga (b) Descarga  
Figura 3.12. Proceso de carga-descarga de una celda de LiPo.

Una celda de LiPo presenta un voltaje en circuito abierto de 4.12 V a 4.23 V, un voltaje nominal de 3.7 V y un voltaje de corte de 3.0 V en función de una temperatura aproximada de 25°C. No obstante, una celda con tecnología polímeros de litio presenta un incremento en la densidad de energía y en la energía específica, debido a un aprovechamiento del espacio en función de la construcción de los electrodos con materiales basados en polímeros. Por otra parte, una celda de LiPo presenta una inestabilidad debido a una sobrecarga de energía, que impacta en el exceso de iones de litio en el electrodo receptor que provoca una perturbación en la intercalación de materiales con un incremento de temperatura.

### 3.4.2. Supercapacitores

Un supercapacitor de doble capa eléctrica integra diversos compuestos químicos, que permiten incrementar la tasa de suministro-almacenamiento de energía. Además, la interacción de los elementos de un supercapacitor de doble capa eléctrica permiten la acumulación de energía instantánea, que permite establecer una alta eficiencia durante el proceso de carga-descarga de energía.

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.13) el material de los electrodos almacena energía en función de la capacidad de absorción de iones, que permite suministrar energía en función de un intercambio de electrones mediante un proceso electrostático [61–63].

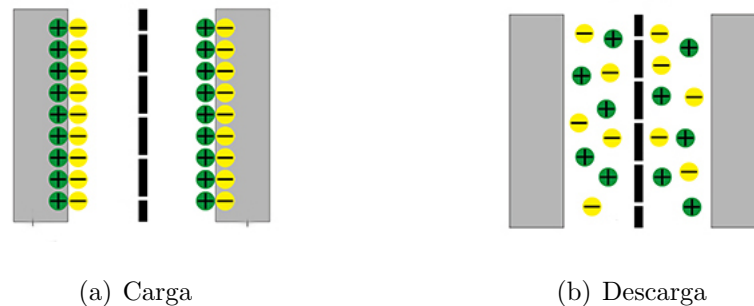


Figura 3.13. Proceso de carga-descarga de un supercapacitor de doble capa eléctrica.

Un supercapacitor de doble capa eléctrica presenta un voltaje en circuito abierto de 2.7 V (carga completa) en función de una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . No obstante, un supercapacitor de doble capa eléctrica experimenta una dependencia a las dimensiones de los materiales, que permite generar una extensa área para acumular energía. Además, un supercapacitor de doble capa produce un bajo nivel de voltaje en las terminales, debido a la tecnología que se emplea para la fabricación de los elementos del dispositivo de acumulación de energía.

Un supercapacitor pseudocapacitivo integra diversos materiales, que permiten llevar cabo una función de carga-descarga considerando el principio de funcionamiento de una batería. Además, el supercapacitor pseudocapacitivo emplea el proceso de intercalación, con el propósito de incrementar la evolución eléctrica en un espacio reducido [61–63].

Durante el proceso de carga-descarga (Figura 3.14) se produce una reacción electroquímica, que permite generar energía entre el electrodo y el electrolito. Además, durante el proceso de carga-descarga el supercapacitor experimenta una transferencia de electrones, que provoca absorber o ceder electrones entre el electrodo y el electrolito.

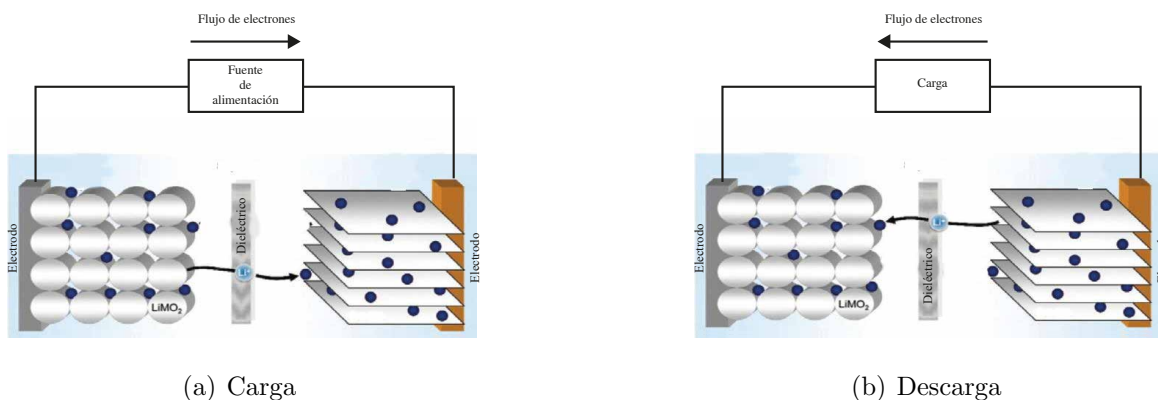


Figura 3.14. Proceso de carga-descarga de un supercapacitor pseudocapacitivo.

Una supercapacitor pseudocapacitivo presenta un voltaje en circuito abierto de 2.3 V a 2.8 V, en función de una temperatura aproximada de  $25^{\circ}\text{C}$ . No obstante, un supercapacitor pseudocapacitivo experimenta una degradación en la capacidad de acumulación-suministro, debido a la presencia de un estrés energético durante el proceso de carga-descarga. Además, presenta una baja eficiencia energética, que está relacionado con las reacciones químicas involucradas en la generación de energía.

### 3.5. Topologías de interconexión de los elementos de acumulación de energía

A partir de las características eléctricas y energéticas que suministran las baterías y supercondensadores en un tren de potencia, es posible determinar diversos mecanismos de interconexión con la intención de incrementar la autonomía de conducción de un VEH. En consecuencia, se han establecido diversas topologías de interconexión entre el SAEH y el sistema de gestión de energía, con el propósito de incorporar la evolución eléctrica de cada elemento de acumulación [15,64,65].

Se han establecido dos principales mecanismo de interconexión de elementos de acumulación:

- Topología pasiva
- Topología activa

Con base en una determinada topología, se establece un comportamiento específico del sistema de almacenamiento de energía híbrido que impacta en el rendimiento de conducción de un vehículo eléctrico híbrido.

#### 3.5.1. Topología pasiva

Una topología pasiva (Figura 3.15) considera la interconexión de dos elementos, a partir de un acoplamiento eléctrico que evita la necesidad de un convertidor de potencia. Además, la topología considera un cierto nivel de voltaje que experimentan los elementos de acumulación, con el propósito de cubrir la demanda de energía que exige un determinado tren de potencia [15, 64, 65].

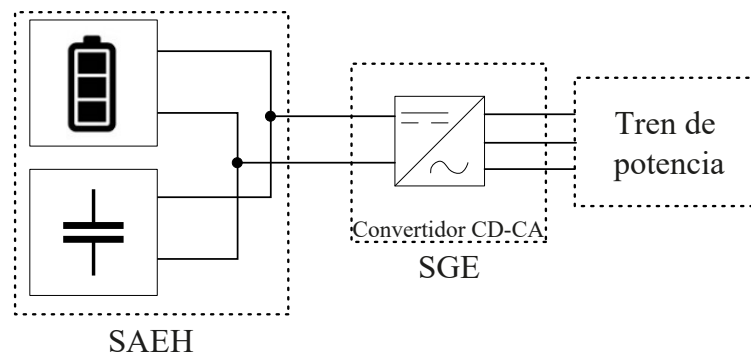


Figura 3.15. Topología de interconexión pasiva.

La interconexión de los elementos a través de una topología pasiva permite una reducción de costos en la infraestructura de interconexión, debido a la carencia de un convertidor de potencia para llevar a cabo el acoplamiento de los diversos niveles de voltaje. Además, una topología pasiva permite una reducción en el suministro agresivo de energía, debido a la posibilidad de suministro de energía durante una carga puntual demandante.

No obstante, una topología pasiva presenta una restricción en el nivel de capacidad del elemento secundario, debido a una conexión directa entre los elementos de acumulación de energía. Además, provoca una deficiencia en el uso de la capacidad de acumulación durante bajas temperaturas, debido a la restricción que presenta la topología para controlar el suministro de potencia.

### 3.5.2. Topología activa

A partir de las características eléctricas de los elementos de acumulación de energía que conforman a un SAEH, es posible determinar el impacto energético que considera la interconexión con un tren de potencia. En consecuencia, se ha establecido una topología activa, con la intención de incrementar la eficiencia energética a partir de un mecanismo de conexión-desconexión con una línea eléctrica del tren de potencia [15, 64, 65].

Una topología activa presenta diversas categorías (Figura 3.16) que consideran la interconexión de dos o más elementos de acumulación de energía, con el propósito de incrementar la autonomía de conexión a través de la incorporación de convertidores de potencia para cada elemento. Además, permite un desacoplamiento de forma funcional, debido a la incorporación de convertidores de potencia bidireccionales.

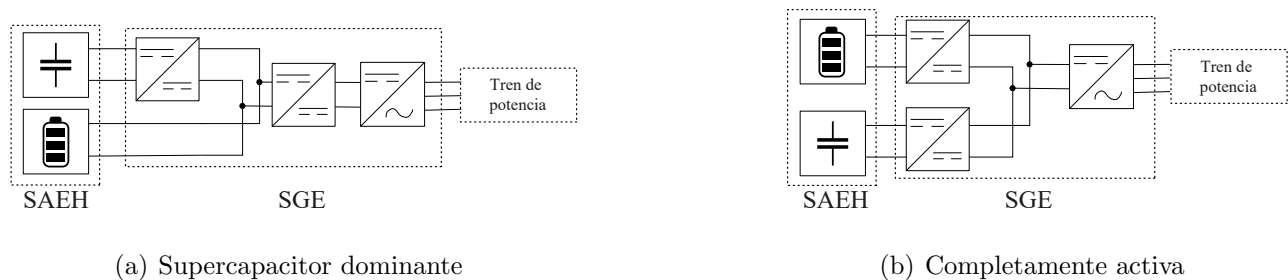


Figura 3.16. Topología de interconexión activa.

Una topología activa considera un punto de operación óptimo de los elementos de acumulación, debido a una estrategia de control empleada en cada convertidor de potencia. Además, permite el incremento del tiempo de vida de un elemento primario, debido a un nivel de controlabilidad que experimenta un sistema de gestión de energía (SGE).

No obstante, una topología activa presenta un incremento en el costo de implementación, debido a la cantidad de convertidores de potencia requeridos para el acoplamiento de los diversos niveles de voltaje. Además, requiere de una estrategia de control robusta, debido a la necesidad de controlar cada convertidor de energía asociado a los elementos de acumulación.

## 3.6. Conclusiones

Considerando las diversas características físicas y eléctricas que definen a los elementos de acumulación de energía, se ha determinado que existen diversas tecnologías que establecen la evolución eléctrica durante una determinada demanda de energía. No obstante, se ha determinado que las baterías y supercapacitores se pueden emplear en un sistema de almacenamiento de energía híbrido, debido a la densidad de energía, energía específica y suministro instantáneo que contribuyen en el redimiento de conducción de un vehículo eléctrico híbrido.

Considerando las características eléctricas y energéticas de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, se ha determinado que una celda de batería basada en tecnología LiPo es una opción viable, debido a la alta densidad de energía, energía específica y comportamiento eléctrico para el suministro de energía. Por otro lado, se ha determinado que un supercapacitor de doble capa eléctrica puede apoyar en el suministro de energía, debido a las propiedades electrostáticas que caracterizan el comportamiento eléctrico en un SAEH durante una demanda puntual de un vehículo eléctrico híbrido.

A partir de las propiedades electroquímicas y electrostáticas que suministra el sistema de almacenamiento de energía híbrido, se han determinado las topologías de interconexión de los elementos. Considerando las topologías de interconexión se ha determinado que la topología completamente activa es una opción viable para un sistema de almacenamiento de energía híbrido, debido a la posibilidad de controlar el suministro de energía de un determinado elemento de acumulación de energía.

## Capítulo 4

# Diseño del sistema de emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido

En este capítulo se presenta el modelo matemático de los elementos de acumulación de energía que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con el propósito de reproducir una evolución eléctrica. Posteriormente, se propone un método de caracterización, con el propósito de determinar los parámetros que conforman los modelos de una celda de batería y un supercapacitor. Además, se propone una etapa de descarga, con la intención de demandar energía en los elementos de acumulación de energía. Asimismo, se propone el diseño de una etapa de identificación, con el propósito de establecer los requisitos necesarios para imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido mediante un sistema embebido.

Contenido:

- 4.1 Introducción
- 4.2 Modelos matemáticos
- 4.3 Método de caracterización
- 4.4 Etapa de descarga
- 4.5 Etapa de identificación
- 4.6 Conclusiones

## 4.1. Introducción

Es necesario establecer el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido (*SAEH*), con el propósito de analizar el suministro de energía en un tren de potencia en función de una determinada demanda de energía. En consecuencia, se requiere establecer una metodología de caracterización, que permita definir la evolución eléctrica de los elementos de acumulación de energía de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

Con la finalidad de representar la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido conformado por baterías y supercapacitores, se requiere definir un modelo matemático. Por esto, se realiza un análisis de las representaciones de cada elemento de acumulación, con la intención de establecer una representación que permita llevar a cabo una implementación en tiempo real.

Considerando el modelo matemático seleccionado para representar el comportamiento de un SAEH, se requiere establecer un método de caracterización para una celda de batería y un supercapacitor. Por consiguiente, se requiere determinar los parámetros que conforman el modelo matemático de un SAEH, que permitan reproducir la evolución eléctrica de los elementos de acumulación de energía.

A partir del método de caracterización definido para una celda de batería y un supercapacitor, se propone el diseño de una etapa de descarga. Por consiguiente, se lleva a cabo un estudio de un elemento que permita demandar energía a los elementos de acumulación, con el propósito de obtener la evolución eléctrica de una celda de batería y un supercapacitor.

Con el objetivo de reproducir en tiempo real el comportamiento eléctrico de un SAEH, se requiere el diseño de un sistema de emulación para imitar la evolución eléctrica de los elementos de acumulación de energía. En consecuencia, se propone un diseño considerando un sistema embebido, a partir de las restricciones de operación de un determinado dispositivo programable.

## 4.2. Modelos matemáticos

El análisis de un sistema recurre a la aplicación de una determinada metodología, con el propósito de establecer un comportamiento que considera el empleo de una función matemática. Un sistema se conforma por la interacción de diversas señales de entrada-salida, con la intención de establecer una representación a través de una señal continua.

El comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido conformado por una batería y un conjunto de supercapacitores, se compone por un conjunto de señales con una naturaleza continua. Con el propósito de establecer la evolución eléctrica de una celda de una batería y un supercapacitor con una naturaleza continua, se requiere de un modelo matemático a través de ecuaciones en el dominio del tiempo.

Con la intención de definir el suministro de energía de una celda de batería y un supercapacitor, se emplea un modelo matemático con un comportamiento continuo. La representación del comportamiento de los elementos básicos de acumulación de un SAEH mediante una descripción matemática requiere definir una metodología, con el propósito de establecer una relación de un comportamiento que considera un modelo electroquímico, matemático o eléctrico [66,67]. No obstante, es necesario un modelo basado en propiedades electroquímicas para representar la evolución eléctrica de los elementos de acumulación, que permita llevar a cabo una aplicación en tiempo real de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

### 4.2.1. Modelo matemático de una celda de batería

Con la intención de representar el comportamiento eléctrico de una celda de batería, se han empleado modelos que consideran un circuito eléctrico. En consecuencia, se han desarrollado diversas representaciones de una celda a través de un circuito eléctrico, que permite reproducir la evolución eléctrica en función de la demanda de energía de un tren de potencia [6, 31, 15].

El modelo con resistencia interna de la celda de batería consiste en un circuito eléctrico (Figura 4.1), que está conformado por una fuente de voltaje ( $V_{OC}$ ), una resistencia interna ( $R_0$ ) y un voltaje en las terminales ( $V_L$ ) [31, 15].

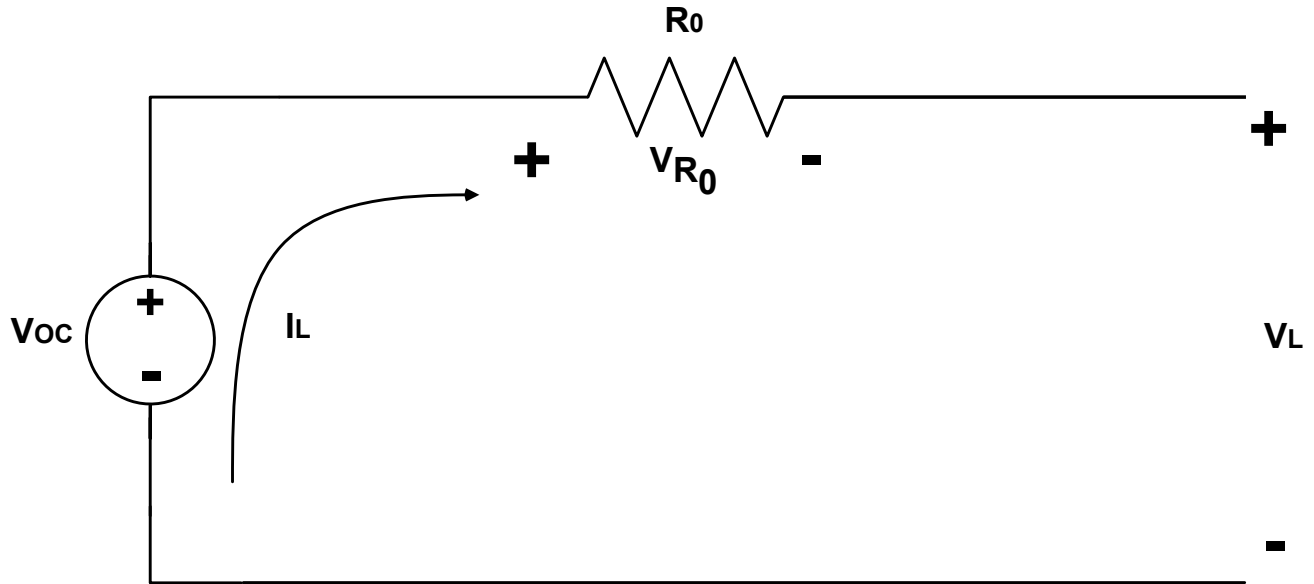


Figura 4.1. Modelo con resistencia interna de una celda de batería.

Con el propósito de modelar el voltaje en las terminales de la celda, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico del modelo con resistencia eléctrica (4.1).

$$V_L(t) = V_{OC}(t) - V_{R_0}(t) \quad (4.1)$$

Donde  $V_{R_0}(t)$  es el voltaje de la resistencia  $R_0$ .

El modelo con resistencia interna emplea dos elementos eléctricos lineales, con la intención de reproducir la evolución eléctrica de una celda. Además, el modelo requiere una cantidad mínima de parámetros, con el propósito de reducir el tiempo de cómputo requerido en aplicaciones en tiempo real. No obstante, el modelo con resistencia interna carece de una representación del comportamiento de una desconexión de carga, que limita el comportamiento del voltaje en circuito abierto. Asimismo, el modelo de resistencia interna requiere de la representación del comportamiento electroquímico de una celda, con la intención de mejorar la respuesta del modelo en función de una demanda de corriente.

Con la finalidad de modelar la variación dinámica del voltaje en las terminales de una celda, se ha propuesto emplear una representación a través de un circuito eléctrico denominado modelo RC. El modelo RC consiste en un circuito eléctrico (Figura 4.2), que está conformada por una fuente de voltaje ( $V_{OC}$ ), una resistencia interna ( $R_0$ ), una red  $R_1C_1$  y un voltaje en las terminales de la celda ( $V_L$ ) [31, 15].

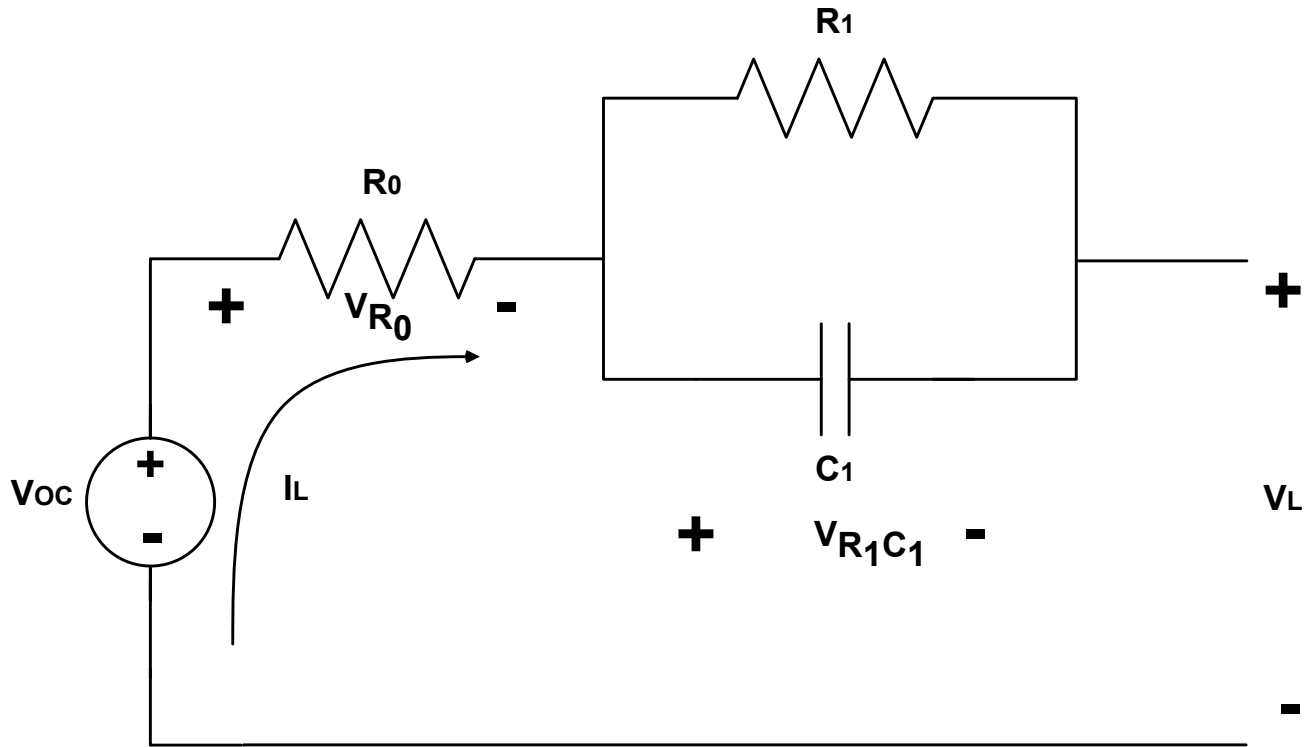


Figura 4.2. Modelo RC de una celda de batería.

Con el propósito de modelar el comportamiento del voltaje en las terminales de la celda, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico del modelo RC (4.2).

$$V_L(t) = V_{OC}(t) - V_{R_0}(t) - V_{R_1C_1}(t) \quad (4.2)$$

Donde  $V_{R_0}(t)$  es el voltaje de la resistencia  $R_0$  y  $V_{R_1C_1}$  es el voltaje de la red  $R_1C_1$ .

Con la intención de definir el voltaje en la red  $R_1C_1$ , se realiza un análisis del comportamiento del voltaje en el capacitor  $C_1$  (4.3).

$$\frac{dV_{R_1C_1}(t)}{dt} = \frac{I_L(t)}{C_1} - \frac{V_{R_1C_1}(t)}{R_1C_1} \quad (4.3)$$

Donde  $I_L$  es la corriente demandada por la celda.

El modelo RC considera el comportamiento de un elemento no lineal, con el propósito de representar un efecto de difusión electroquímico. Además, la red RC permite definir una evolución del voltaje en las terminales, con la intención de representar el comportamiento de descarga de una celda. No obstante, el modelo *RC* incrementa la complejidad en la solución numérica, debido al tiempo de cómputo requerido para resolver el modelo matemático. Además, requiere de un incremento en el número de redes *RC*, con la finalidad de mejorar la representación de la evolución eléctrica en las terminales de una celda.

Con la intención de modelar el comportamiento de una celda de batería en función de la variación de una señal de entrada, se ha propuesto emplear una representación a través de un circuito eléctrico denominado circuito Randles. El modelo Randles (Figura 4.3) está conformado por una fuente de voltaje ( $V_{OC}$ ), una resistencia interna ( $R_0$ ), una resistencia de difusión ( $R_1$ ), un capacitor de difusión ( $C_1$ ) y una impedancia ( $Z_w$ ).

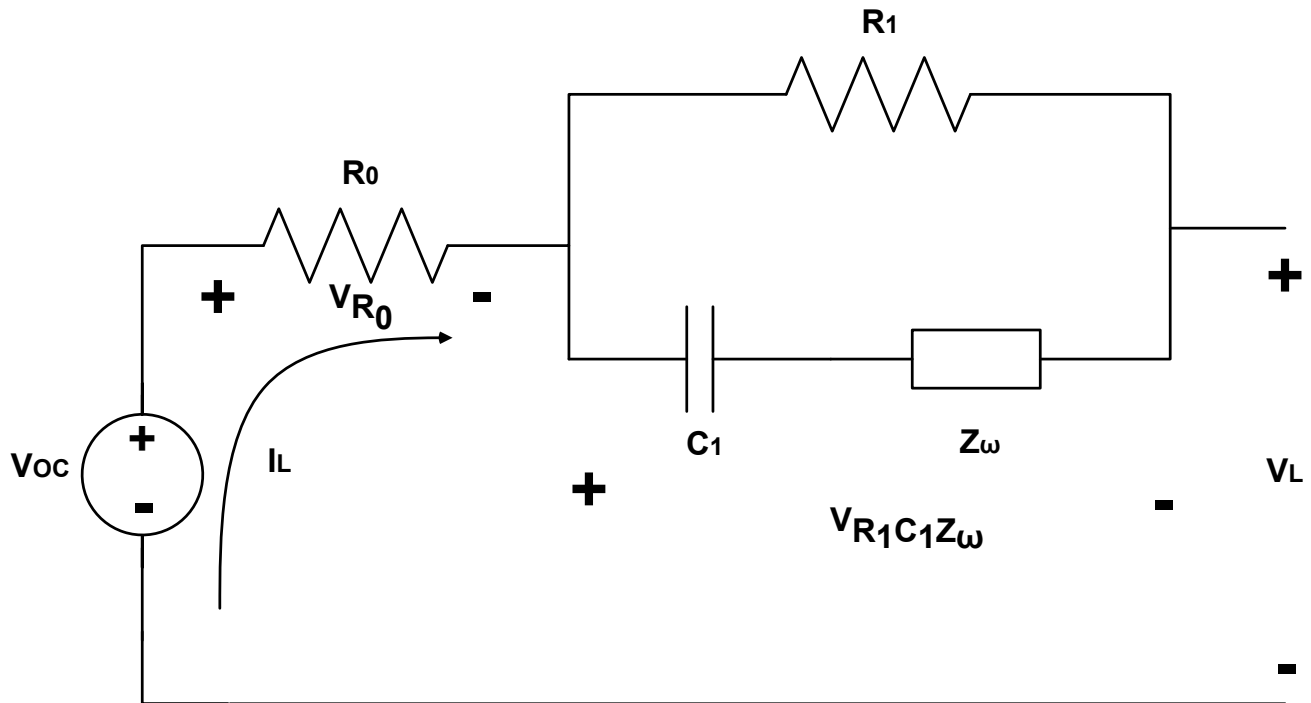


Figura 4.3. Modelo Randles de una celda de batería.

Con el propósito de modelar el voltaje en las terminales de la celda, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico del modelo Randles (4.4).

$$V_L(t) = V_{OC}(t) - V_{R_0}(t) - V_{R_1 C_1 Z_w}(t) \quad (4.4)$$

Donde  $V_{R_1 C_1 Z_w}$  es el voltaje de la red de elementos  $R_1$ ,  $C_1$  y  $Z_w$ .

El modelo Randles permite mejorar la representación electroquímica de una celda, a partir de la incorporación de elementos no lineales. Además, el elemento  $Z_\omega$  del modelo Randles permite representar la difusión de iones en el interior de una celda, a partir de un análisis en el tiempo de la respuesta del voltaje en las terminales del elemento de acumulación de energía. No obstante, el modelo Randles requiere de equipo especializado, debido a la necesidad de aplicar una señal variante de amplitud mínima. Además, la señal de amplitud mínima genera errores de medición, debido a un ingreso de una perturbación durante la experimentación.

Considerando las ventajas y desventajas de cada circuito eléctrico que permite reproducir el comportamiento de una celda de batería (Tabla 4.1), es posible determinar que un modelo eléctrico con resistencia interna permite reproducir la evolución de una celda en condiciones de operación de tiempo real.

Tabla. 4.1. Características de los modelos de una celda de batería

Modelo	Parámetros (número)	Elementos (número)		Costo computacional
		Lineal	No lineal	
Resistencia Interna	2	2	0	Bajo
Red RC	4	3	1	Medio
Randles	5	3	2	Alto

Además, el modelo de la celda con resistencia interna requiere de una cantidad mínima de parámetros, que permitirá llevar a cabo el análisis del comportamiento de una celda con un menor costo computacional. Asimismo, permitirá reproducir la evolución eléctrica de una celda, con el objetivo de imitar el comportamiento de un elemento de acumulación de energía en un SAEH.

Con la finalidad de establecer el mecanismo de carga y descarga en el modelo de resistencia interna, es necesario definir el comportamiento de la capacidad de almacenamiento. En consecuencia, se ha establecido un modelo matemático para definir el estado de carga, que considera la naturaleza de acumulación de energía de una celda.

Para determinar la cantidad de estado de carga ( $SOC$ ) disponible en la celda de batería, se emplea una relación (4.5) que considera un estado de carga inicial y una demanda de corriente.

$$SOC = SOC_{Inicial} - \frac{1}{3600C} \int I_L dt \quad (4.5)$$

Donde  $C$  es la capacidad de una celda de batería e  $I_L$  es la corriente exigida a una celda.

### 4.2.2. Modelo matemático de un supercapacitor

Con la intención de representar el comportamiento eléctrico de un supercapacitor, se han tomado en cuenta diversos modelos que consideran un circuito eléctrico. Por ello, se han desarrollado diversas representaciones mediante un circuito eléctrico, que permite reproducir la evolución eléctrica en función de la demanda de energía de un tren de potencia híbrido [6, 31, 15].

El modelo con resistencia interna consiste en un circuito eléctrico (Figura 4.4), que está conformado por una capacitancia ( $C_{SC}$ ), una resistencia interna ( $R_{0SC}$ ) y un voltaje en las terminales ( $V_{LSC}$ ) [31, 15].

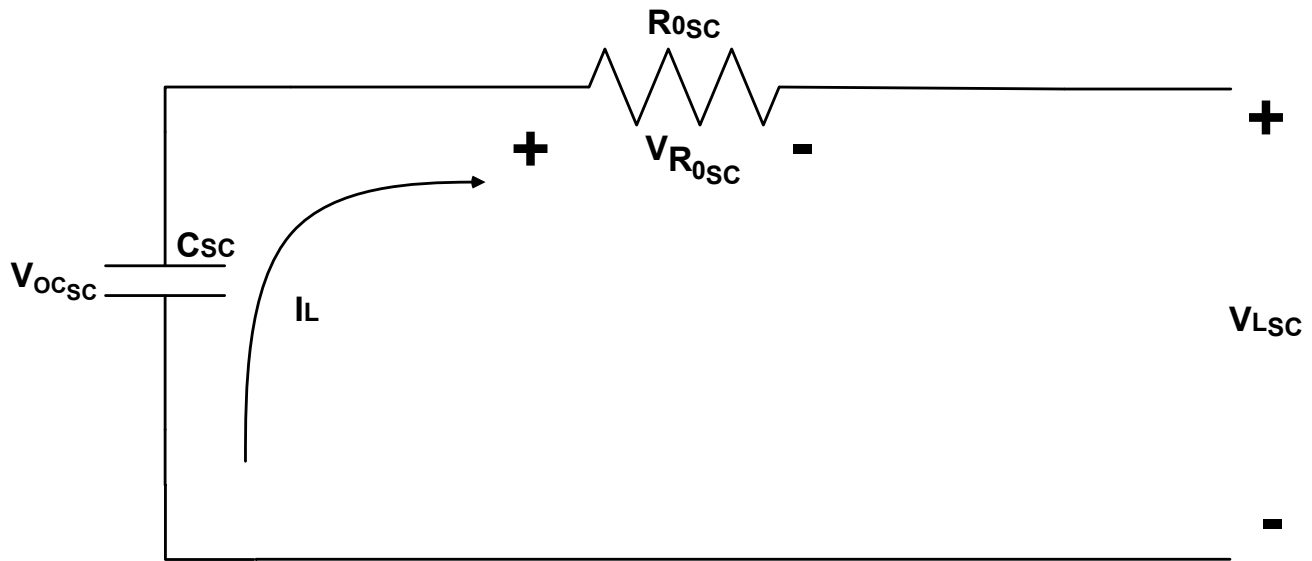


Figura 4.4. Modelo de un supercapacitor con resistencia interna.

Con la intención de modelar el voltaje en el supercapacitor, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico del modelo con resistencia eléctrica (4.6).

$$V_{LSC}(t) = V_{OCSC}(t) - V_{R_{0SC}}(t) \quad (4.6)$$

Donde  $V_{R_{0SC}}(t)$  es el voltaje de la resistencia  $R_{0SC}$ .

El modelo con resistencia interna considera el comportamiento de dos elementos lineales, con el propósito de representar la evolución eléctrica de un supercapacitor. Además, el modelo con resistencia interna de un supercapacitor requiere una cantidad mínima de parámetros, con la intención de reducir el tiempo de cómputo requerido en aplicaciones de tiempo real.

No obstante, el modelo con resistencia interna carece de una representación del comportamiento de desconexión de una carga, que limita el comportamiento del voltaje en circuito abierto. Además, el modelo con resistencia interna requiere de la representación del comportamiento electrostático de un supercapacitor, con el propósito de mejorar la respuesta del modelo en función de una demanda de corriente.

Con la finalidad de modelar el comportamiento del voltaje de un supercapacitor durante la desconexión de una demanda de corriente, se ha propuesto emplear una representación a través de un circuito eléctrico denominada modelo RC. El modelo RC consiste en un circuito eléctrico (Figura 4.5), que está conformada por una fuente de voltaje ( $V_{OC_{SC}}$ ), un capacitor interno ( $C_{SC}$ ), una resistencia interna ( $R_{0_{SC}}$ ), una red  $R_{1_{SC}}C_{1_{SC}}$  y un voltaje en las terminales del supercapacitor ( $V_{L_{SC}}$ ) [31, 15].

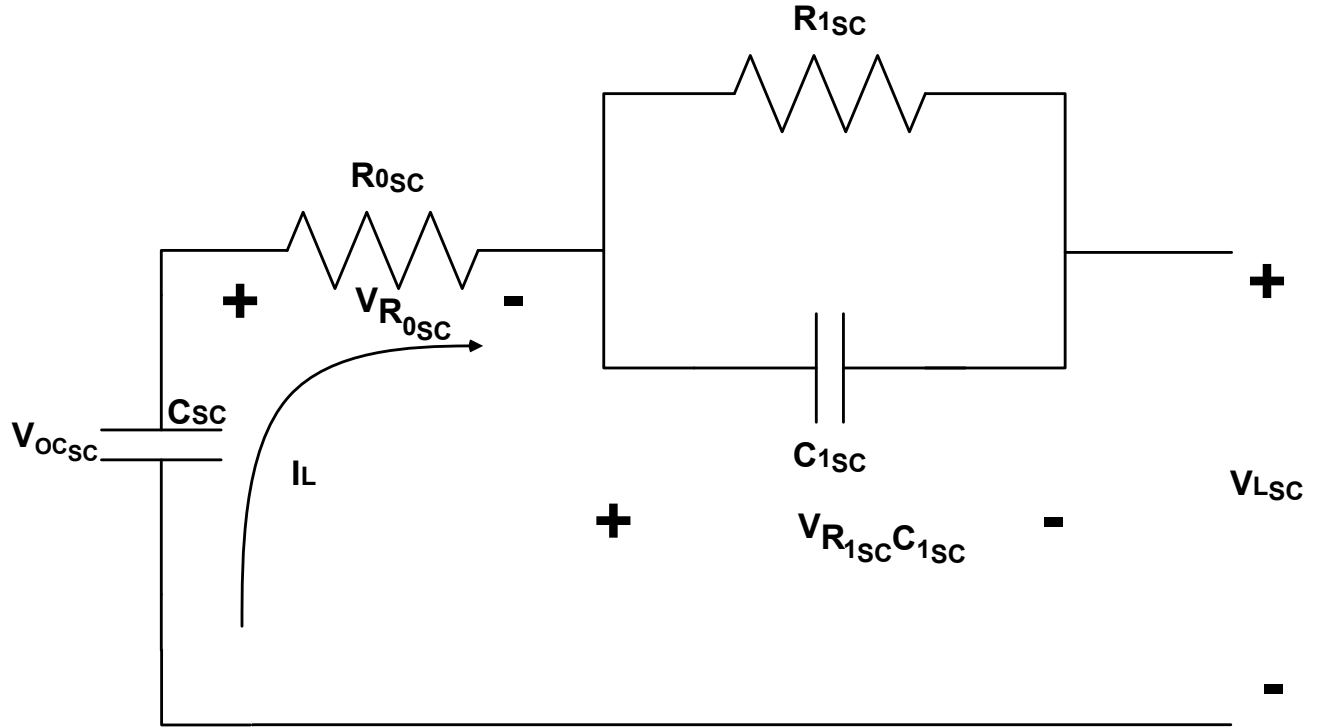


Figura 4.5. Modelo  $RC$  de un supercapacitor.

Con el propósito de modelar el voltaje en las terminales del supercapacitor, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico del modelo RC (4.7).

$$V_{L_{SC}}(t) = V_{OC_{SC}}(t) - V_{R_{0_{SC}}}(t) - V_{R_{1_{SC}}C_{1_{SC}}}(t) \quad (4.7)$$

Donde  $V_{R_{1_{SC}}C_{1_{SC}}}$  es el voltaje de la red  $R_1C_1$ .

El modelo RC permite representar el comportamiento electrostático de un supercapacitor, con el propósito de definir la evolución eléctrica en el elemento de acumulación. Además, el modelo RC define la evolución eléctrica en las terminales, con la intención de establecer el comportamiento de un supercapacitor en función de una determinada demanda de corriente.

No obstante, el modelo RC incrementa el nivel de complejidad de representación, debido al tiempo de cómputo requerido para una solución numérica. Además, el modelo RC se limita a una determinada cantidad de redes RC, que degrada el comportamiento dinámico del voltaje durante la desconexión de una carga.

Con la finalidad de modelar el comportamiento eléctrico durante la desconexión de una carga de corriente, se ha propuesto emplear una representación a través de un circuito eléctrico con mallas  $RC$ , Figura 4.6 [31, 15].

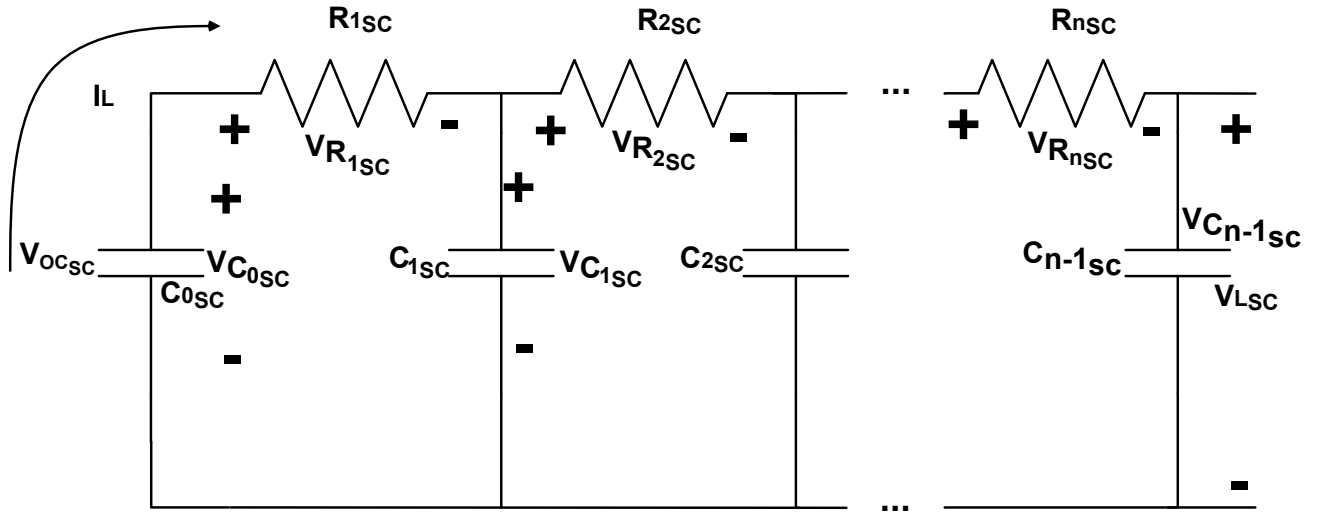


Figura 4.6. Modelo con mallas  $RC$  de un supercapacitor.

Con el propósito de modelar el comportamiento del voltaje en las terminales del supercapacitor, se emplea la ley de voltajes de Kirchhoff en el circuito eléctrico con mallas  $RC$  (4.8).

$$V_{LSC} = \sum_{k=1}^n V_{C_{k-1SC}} - V_{R_{kSC}} \quad (4.8)$$

Donde  $V_{C_{k-1SC}}$  es el voltaje de un capacitor y  $V_{R_{kSC}}$  es el voltaje de una resistencia.

El modelo con mallas  $RC$  permite establecer un comportamiento de difusión de electrones, con el propósito de representar la evolución eléctrica de un supercapacitor considerando una demanda de corriente. Además, el modelo con mallas permite definir el comportamiento temporal de un supercapacitor, a partir de un análisis eléctrico en función de la incorporación de  $n$  redes  $RC$ .

No obstante, el modelo con mallas  $RC$  requiere de una cantidad indeterminada de redes, con el propósito de representación el comportamiento electrostático de un supercapacitor. Además, requiere de la solución de  $n$  ecuaciones que consideran una indeterminada cantidad de elementos no lineales, que impacta en el tiempo de cómputo requerido durante una solución numérica.

Considerando las ventajas y desventajas de cada circuito eléctrico que permite reproducir el comportamiento un supercapacitor (Tabla 4.2), es posible establecer que un modelo eléctrico con resistencia interna permite reproducir la evolución de un supercapacitor en condiciones de operación de tiempo real.

Tabla. 4.2. Características de los modelos de un supercapacitor

Modelo	Parámetros (número)	Elementos (número)		Costo computacional
		Lineal	No lineal	
Resistencia Interna	2	2	0	Bajo
Red RC	4	3	1	Medio
Mallas RC	$2n$	$n$	$n - 1$	Alto

Además, el modelo con resistencia interna requiere de una mínima cantidad de datos, que permite definir el comportamiento eléctrico en función de una determinada demanda de energía.

Con la finalidad de establecer el mecanismo de carga y descarga en el modelo con resistencia interna de un supercapacitor, es necesario definir el comportamiento de la capacidad de acumulación de energía. Por consiguiente, se ha definido el modelo matemático para reproducir la evolución del estado de carga, que considera la naturaleza electrostática de acumulación de energía.

Para determinar la cantidad de estado de carga ( $SOC$ ) disponible en el supercapacitor, se emplea una relación (4.9) considerando una estado de carga inicial y una demanda de corriente.

$$SOC = SOC_{Inicial} - \int \frac{I_L}{C_{SC} \cdot V_{SC}} dt \quad (4.9)$$

Donde  $C_{SC}$  es la capacitancia y  $V_{SC}$  es el voltaje del supercapacitor.

### 4.2.3. Discretización del modelo matemático de un SAEH

A partir de la ecuación del estado de carga de la celda de batería (4.5) y la ecuación del estado de carga del supercapacitor (4.9), se requiere una transformación desde el dominio continuo hacia el dominio discreto. En consecuencia, se proponen transformaciones en el dominio de la frecuencia para llevar a cabo una representación matemática, con la intención de llevar a cabo la implementación en un sistema embebido.

Por esto, se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones del estado de carga (4.10), con el propósito de llevar a cabo un cambio hacia un dominio de la frecuencia.

$$SOC_{SAEH}(s) = \begin{cases} SOC_{Bateria}(s) = & SOC_{Inicial} - \frac{1}{3600C} s I_{LSC}(s) \\ SOC_{Supercapacitor}(s) = & SOC_{Inicial} - s \frac{I_L(s)}{C_{SC} \cdot V_{SC}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde  $C$  es la capacidad de la celda,  $C_{SC}$  es la capacitancia del supercapacitor y  $V_{SC}$  es el voltaje del supercapacitor.

Para evitar la pérdida de información durante la discretización y recuperación de la evolución eléctrica de los elementos de acumulación de energía, es necesario considerar el teorema de *Nyquist* (4.11) en función de una frecuencia de una frecuencia de muestreo.

$$\omega_{maxmuestreo} = 2 \cdot \omega_{muestreo} \quad (4.11)$$

Donde  $\omega_{muestreo}$  es la frecuencia de muestreo establecida para cada elemento de acumulación.

Considerando la frecuencia de muestreo requerida para llevar a cabo la discretización, se requiere de una transformación del dominio de la frecuencia a una transformación en  $z$ . Por consiguiente, se emplea la transformación de Tustin, que permite establecer una relación entre el dominio continuo y el dominio discreto.

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (4.12)$$

Donde  $T$  es el tiempo de muestreo y  $z$  es la variable del dominio discreto.

A partir de la frecuencia de muestreo y la transformación de Tustin, es posible establecer el modelo matemático de una celda de batería y un supercapacitor en el dominio discreto (4.13).

$$\begin{aligned} V_{LCelda}(z) &= V_{OCcelda}(z) - V_{R0celda}(z) \\ V_{LSC}(z) &= V_{OCSC}(z) - V_{R0SC}(z) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Donde  $V_{LCelda}$  es el voltaje de la celda y  $V_{LSC}$  es el voltaje del supercapacitor.

Además, es posible establecer una relación para definir el comportamiento de un SAEH, a partir de un dimensionamiento que considera  $N_S$  celdas de batería y  $N_{SC}$  supercapacitores (4.14).

$$\begin{aligned} V_{LBateria}(z) &= N_S V_{OCcelda}(z) - V_{Rcelda}(z) \\ V_{LSupercapacitor}(z) &= N_{SC} V_{OCSC}(z) - V_{RSC}(z) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Donde  $V_{LBateria}$  es el voltaje del paquete de celdas y  $V_{LSupercapacitor}$  es el voltaje del conjunto de supercapacitores.

Asimismo, es posible definir la transformación en el dominio discreto del SOC para el SAEH (4.15), considerando la capacidad de acumulación de energía de la celda y el supercapacitor.

$$SOC_{SAEH}(z) = \begin{cases} SOC_{Celda}(z) = & SOC_{Inicial} - \frac{2}{3600 \cdot T \cdot C} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} I_L(z) \\ SOC_{SC}(z) = & SOC_{Inicial} - \frac{2 \cdot I_{LSC}(z)}{T \cdot C_{SC} \cdot V_{SC}(z)} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \end{cases} \quad (4.15)$$

Donde  $SOC_{Bateria}(z)$  es el estado de carga del conjunto de celdas de batería,  $SOC_{Supercapacitor}(z)$  es el estado de carga del conjunto de supercapacitores,  $z$  es la variable del dominio discreto y  $T$  es el tiempo de muestreo.

### 4.3. Método de caracterización

A partir de las características energéticas de las diversas tecnología que conforman los elementos de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, es necesario definir el comportamiento eléctrico en función de una demanda de energía. Por esto, es necesario establecer un método de caracterización, que permita determinar el comportamiento eléctrico de las celdas de baterías y supercapacitores.

Debido a la necesidad de establecer el comportamiento de los elementos de acumulación de energía de un SAEH, se ha propuesto dos enfoques de caracterización que consideran una señal en el dominio de la frecuencia y una señal en el dominio del tiempo. Por consiguiente, se han definido diversas metodologías de caracterización, a partir de las restricciones establecidas para reproducir la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

Una caracterización que considera una señal en el dominio de la frecuencia requiere de la aplicación de una señal de corriente alterna, con la intención de analizar la evolución eléctrica de un elemento de acumulación de energía. Además, el análisis en la frecuencia permite llevar a cabo una representación mediante un plano complejo, con la intención analizar el comportamiento de la impedancia de los elementos que conforman un SAEH.

No obstante, una caracterización en el dominio de la frecuencia requiere de equipo especializado, con el propósito de analizar un dispositivo de acumulación de energía con una señal variante en frecuencia. Además, la señal con variación en la frecuencia se caracteriza por una magnitud despreciable, que genera errores en la medición de la respuesta de una celda de batería o un supercapacitor.

Considerando las desventajas de una caracterización en el dominio de la frecuencia, se ha propuesto el empleo de diversos métodos de caracterización que consideran una señal en el dominio del tiempo. En consecuencia, se ha propuesto una metodología denominada pulso híbrido, con la finalidad de establecer el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

La caracterización de los elementos de acumulación de energía con la metodología de pulso híbrido requiere una demanda agresiva de capacidad de almacenamiento, con el propósito de analizar la evolución eléctrica en función de un escenario demandante de corriente. Además, permite analizar un ciclo de vida de los elementos del SAEH, con la intención de mejorar la representación de los elementos de acumulación de energía. Sin embargo, la caracterización mediante un pulso híbrido impacta en el rendimiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, debido a una demandante exigencia de energía.

Considerando los inconvenientes que presenta una caracterización a través de un pulso híbrido, se ha propuesto un método de caracterización denominado *pulso incremental*. El método de caracterización de pulso incremental consiste en la ejecución de  $N$  ciclos, con la intención de determinar la evolución eléctrica de un elemento de acumulación considerando una señal de corriente con una amplitud determinada.

### 4.3.1. Caracterización de una celda de batería

Con el propósito de obtener de forma sistemática los parámetros que conforman el modelo eléctrico de una celda, se emplea un método denominado pulso incremental que consiste en una caracterización con una señal de corriente directa desde un estado completamente cargado hasta un estado completamente descargado [15].

Considerando las características del método de pulso incremental, se propone una metodología de caracterización que consiste en una etapa para realizar la descarga y una etapa para determinar los parámetros del modelo eléctrico, Figura 4.7.

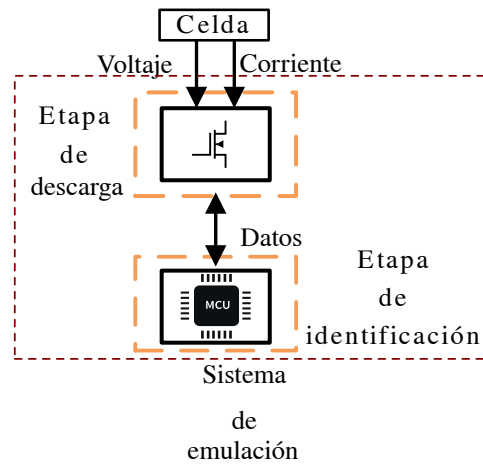


Figura 4.7. Etapas de la metodología de caracterización de una celda

La metodología contempla la demanda de energía mediante un voltaje y una corriente de la celda, considerando una etapa de descarga conformada por un transistor. Además, se requiere una etapa de identificación de los parámetros de una celda, a partir de los datos que se obtienen mediante mediciones realizadas a la etapa de descarga.

Con base en la etapa de descarga se obtiene un conjunto de datos para conformar una curva general de descarga, Figura 4.8, con la finalidad de realizar la identificación de un voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y un voltaje de carga ( $V_L$ ).

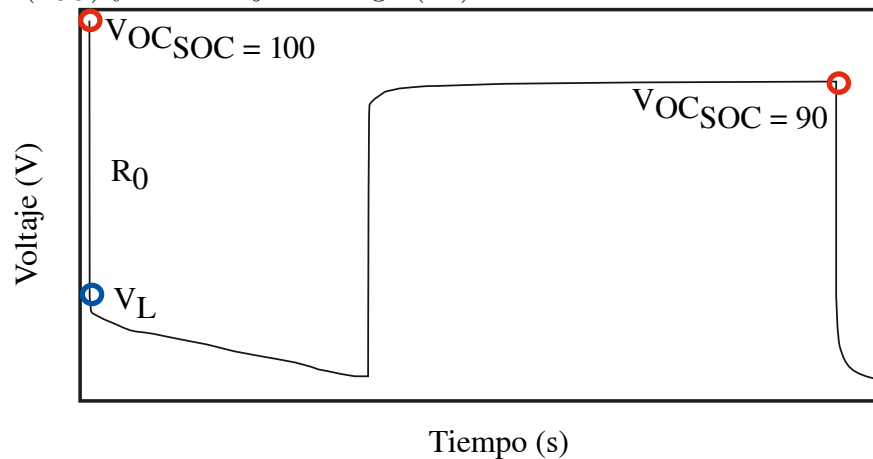


Figura 4.8. Ciclo de descarga de una celda ( $SOC = 100\%$  a  $SOC = 90\%$ )

Mediante la identificación de  $V_{OC}$  y  $V_L$  es posible realizar la estimación del parámetro  $R_0$  del modelo eléctrico de una celda (4.16).

$$R_0 = \frac{V_{OC} - V_L}{I_L}, SOC = 100, 90, 80, \dots, 0 \quad (4.16)$$

Donde  $V_{OC}$  es el voltaje en circuito abierto de una celda,  $V_L$  es el voltaje de una celda cuando se aplica la carga de corriente y  $SOC$  es el estado de carga de la celda.

### 4.3.2. Caracterización de un supercapacitor

Debido a la necesidad de obtener los parámetros del modelo eléctrico de forma sistemática, se requiere de un método de caracterización a través de un enfoque en el dominio del tiempo. En consecuencia, se propone emplear la metodología de caracterización para una celda, debido a la posibilidad de obtener los parámetros que definen el comportamiento de supercapacitor en función del modelo con resistencia interna.

La metodología de caracterización para un supercapacitor considera la evolución eléctrica en las terminales del dispositivo, con la intención de relacionar una demanda de energía con los parámetros del modelo eléctrico. Además, permite definir la evolución de la capacidad de almacenamiento de energía, en función de la ejecución de  $N$  ciclos de descarga.

Considerando la metodología de caracterización para un supercapacitor, se propone utilizar la etapa de descarga y una etapa para realizar la identificación de parámetros del modelo eléctrico, Figura 4.9.

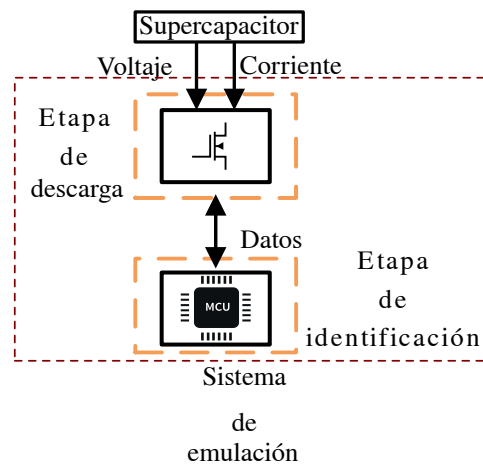


Figura 4.9. Etapas de la metodología de caracterización de un supercapacitor.

La etapa de descarga considera un dispositivo de demanda de energía, con la intención de analizar el comportamiento de un supercapacitor. Además, la etapa de descarga permite establecer una interfaz electrónica con el supercapacitor, a partir del acoplamiento de una señal para determinar los parámetros eléctricos mediante un sistema embebido.

La etapa de identificación permite determinar los parámetros de un supercapacitor, con el propósito de reproducir la evolución eléctrica. Además, la etapa de identificación permite controlar la etapa de descarga, con la intención de ejecutar el método de caracterización.

A partir de la descarga sistemática para un supercapacitor se obtiene un conjunto de datos para conformar una curva general de descarga, Figura 4.10, con el propósito de realizar la identificación de un voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y un voltaje de carga ( $V_{LSC}$ ).

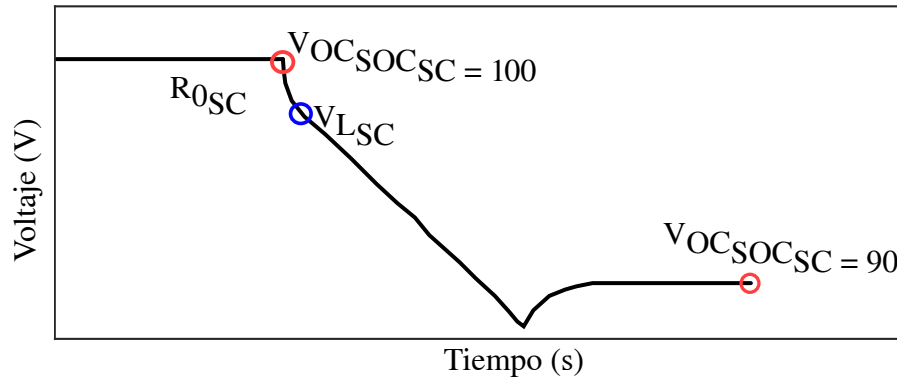


Figura 4.10. Ciclo de descarga de un supercapacitor ( $SOC = 100\%$  a  $SOC = 90\%$ ).

Mediante la identificación de  $V_{OC_{SC}}$ ,  $V_{L_{SC}}$  y un tiempo de relajación  $\tau_{SC}$ , es posible realizar la estimación del parámetro  $R_{0_{SC}}$  (4.17) y el parámetro  $C_{SC_{Basico}}$ .

$$\begin{bmatrix} R_{0_{SC}} [\Omega] \\ C_{SC_{Basico}} [F] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{OC_{SC}} - V_{L_{SC}}}{I_L} \\ I_L \cdot \frac{\tau_{SC}}{V_{L_{SC}} - V'_{L_{SC}}} \end{bmatrix} \quad SOC = 100, 90, 80, \dots, 0 \quad (4.17)$$

## 4.4. Etapa de descarga

Con la finalidad de implementar la etapa de descarga considerando la metodología de caracterización de la celda y el supercapacitor, se requiere de un dispositivo con la capacidad de demandar corriente a los dispositivos de acumulación de energía. En consecuencia, se emplea un dispositivo capaz de descargar los elementos de acumulación, a través de un sistema basado en un transistor.

Con el propósito de establecer el correcto funcionamiento de la etapa de descarga, se propone realizar la selección de un transistor para demanda de corriente. En consecuencia, se realiza la descripción de un transistor para la etapa de descarga, que permita llevar a cabo la demanda de corriente para obtener los parámetros de los elementos de acumulación de energía.

A partir del sistema mínimo requerido para emplear el sistema de caracterización, se requiere un ajuste de voltaje para determinar una demanda de corriente. Por esto, se realiza el análisis matemático para manipular la demanda de corriente, con la intención de definir la capacidad exigida a los elementos de acumulación considerando las características físicas de los dispositivos electrónicos.

#### 4.4.1. Selección de transistor

Se propone emplear un transistor debido a la posibilidad establecer una configuración que permita definir un comportamiento similar a carga de corriente, considerando una señal de voltaje para controlar una demanda de energía hacia los dispositivos de acumulación de energía. Además, el transistor está conformado por diversas estructuras de interconexión (G, D, S), que permite establecer una región de operación determinada en función de las dimensiones ( $W$ ,  $L$ ) y propiedades de los materiales ( $k$ ,  $\lambda$ ) empleados en la fabricación, Figura 4.11.

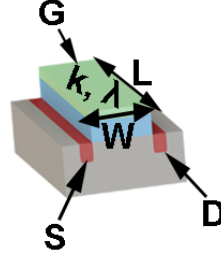


Figura 4.11. Estructura interna de un transistor.

El transistor opera en una región denominada *saturación* (4.18), que permite definir un comportamiento similar a una carga de corriente. Además, el modo de saturación exige una determinada cantidad de corriente, en función de las diferencias de voltaje en cada una de las terminales del dispositivo.

$$I_{DS} = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (4.18)$$

Donde  $I_{DS}$  es la corriente que circula a través de las terminales drenaje y fuente que permiten demandar energía a un elemento de acumulación,  $W$  es el ancho del material de fabricación,  $L$  es el largo del material de fabricación,  $k_n$  es la transconductancia del dispositivo,  $V_{GS}$  es el voltaje entre las terminales compuerta y fuente,  $V_{th}$  es el voltaje umbral que permite operar a un transistor en la zona de saturación,  $\lambda$  es un parámetro geométrico que depende de la tecnología de fabricación y  $V_{DS}$  es el voltaje entre las terminales drenaje y fuente.

A partir del comportamiento de la corriente entre las terminales drenaje y fuente del transistor, es necesario establecer un límite físico para un transistor, considerando las características energética de una celda y un supercapacitor (4.19).

$$\begin{aligned} 0 &\leq I_{DS} \leq I_{L_{Celda}} \\ 0 &\leq I_{DS} \leq I_{L_{SC}} \\ 0 &\leq V_{DS} \leq V_{L_{Celda}} \\ 0 &\leq V_{DS} \leq V_{L_{SC}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

El límite corriente para  $I_{DS}$  permitirá definir un dispositivo que controle una determinada cantidad de corriente, con el propósito de demandar energía a una celda y un supercapacitor en función de la metodología de caracterización. Además, el límite de voltaje para  $V_{DS}$  permitirá definir un dispositivo que soporte una determinada cantidad de voltaje, con la intención de manejar una cantidad de voltaje variante en el tiempo debido a la demanda de energía a una celda y un supercapacitor.

Considerando las características energéticas de los elementos de acumulación de energía, es necesario definir un transistor MOSFET que opere con señales de voltaje positivos. En consecuencia, se propone emplear un transistor tipo *MOSFET* canal *N* matrícula *SiHP15N65E*, de la empresa *Vishay* que opera con señales de voltaje positivas en función de una región de operación delimitada por las especificaciones (Tabla 4.3) establecidas en la hoja de datos.

Tabla. 4.3. Características del transistor SiHP15N65E

Parámetro	Magnitud	Unidades
Voltaje drenaje-fuente ( $V_{ds}$ )	650	V
Voltaje compuerta-fuente ( $V_{gs}$ )	30	V
Voltaje de disparo ( $V_{th}$ )	2 – 4	V
Corriente drenaje-fuente ( $I_{ds}$ )	15	A
Tiempo de encendido ( $t_{d(on)}$ )	18 – 36	ns
Potencia de disipación ( $P_D$ )	34	W

El transistor permite definir un comportamiento de saturación con señales de voltaje positivos, con el propósito de demandar una determinada corriente a los elementos de acumulación de energía. Además, permite operar diversas magnitudes de corriente y voltaje, considerando las características eléctricas y energéticas de una celda de batería y un supercapacitor. Asimismo, el voltaje entre las terminales compuerta y fuente establecen una zona de saturación específica, que permitirá demandar una cantidad de corriente en función de las características requeridas por los dispositivos de acumulación.

#### 4.4.2. Circuito mínimo de caracterización

Con el propósito de establecer la región de saturación en el transistor para definir el comportamiento de carga de corriente, se propone un circuito mínimo (Figura 4.12) que permita controlar la corriente ( $I_L$ ) en función de un voltaje de control ( $V_{Ajuste}$ ).

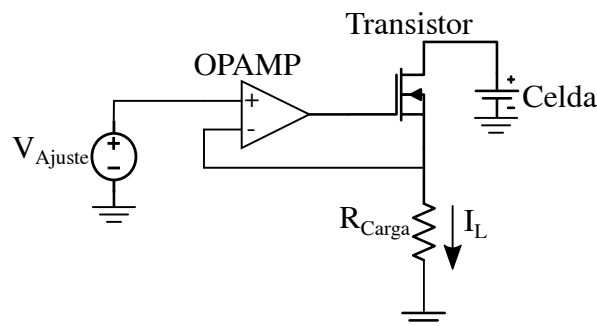


Figura 4.12. Circuito mínimo del sistema de caracterización para una celda.

Además, se requiere llevar a cabo un análisis del comportamiento del sistema de descarga a través de un circuito eléctrico (Figura 4.13), con la finalidad de establecer los elementos relacionados con la demanda de corriente de una celda.

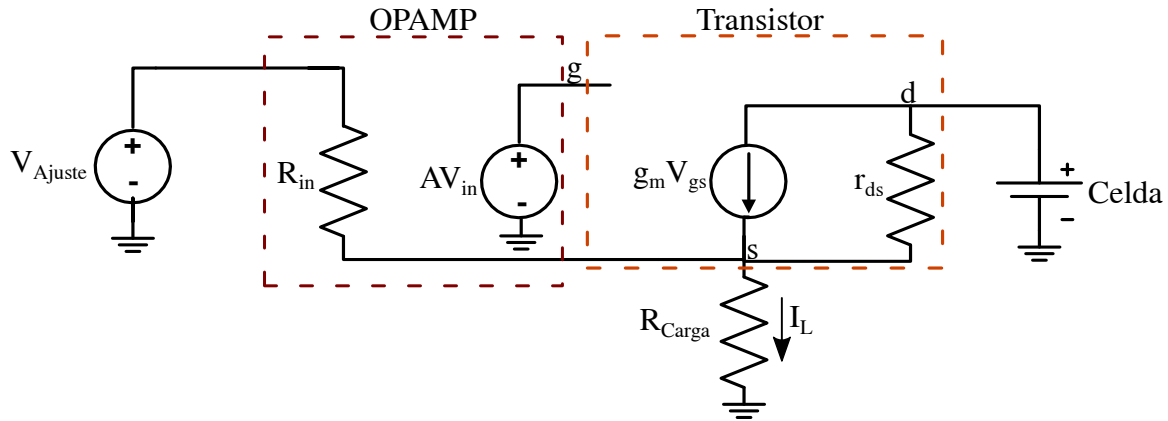


Figura 4.13. Representación del circuito mínimo de descarga.

Asimismo, el voltaje requerido para ajustar la corriente de descarga (4.20) del circuito mínimo, se calcula mediante una función matemática que establece una dependencia de los parámetros físicos de los dispositivos.

$$V_s = \frac{\frac{V_{Ajuste}}{R_{in}} - g_m V_d + \frac{V_s}{r_{ds}}}{\frac{1}{R_{Carga}} + \frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{r_{ds}} - g_m} \quad (4.20)$$

Con la finalidad de implementar la metodología de caracterización en el supercapacitor, se propone un circuito mínimo (Figura 4.14) que permita controlar la corriente ( $I_{L_{SC}}$ ) considerando un voltaje de ajuste ( $V_{Ajuste}$ )

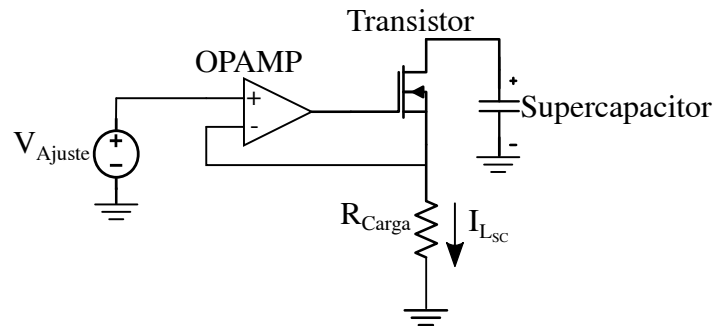


Figura 4.14. Circuito mínimo del sistema de caracterización para un supercapacitor.

A partir del circuito mínimo para el sistema de caracterización para la celda y el supercapacitor, se propone llevar a cabo el diseño de un diagrama esquemático (Figura 4.15) en un software de diseño asistido por computadora.

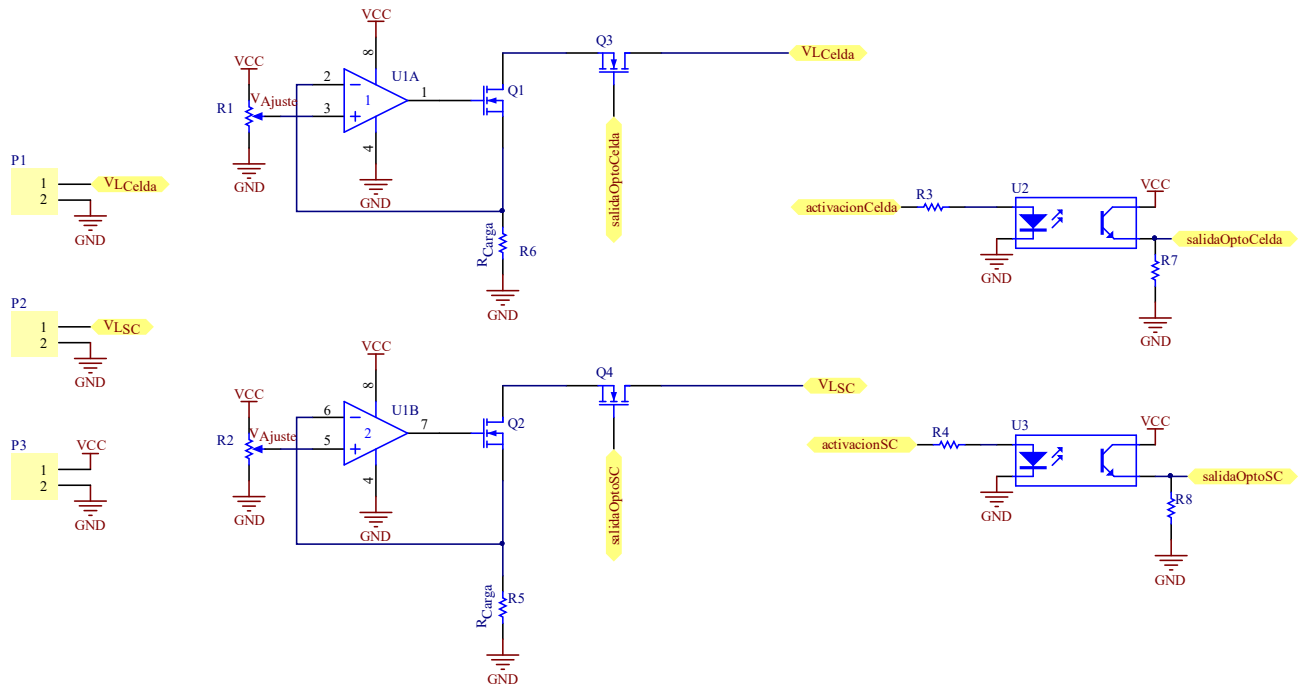


Figura 4.15. Diagrama esquemático de la etapa de descarga.

El circuito del sistema de caracterización consiste de una etapa de activación, que permitirá establecer una conexión entre el circuito de descarga y la de batería o el supercapacitor. Además, contiene una etapa de acoplamiento de voltaje, que permitirá ajustar las señales eléctricas al nivel de voltaje de operación del sistema embebido.

A partir de la propuesta del circuito del sistema de caracterización, se procede a realizar el diseño de una placa de circuito impreso, Figura 4.16, que considera la colocación de componentes *Through-Hole*

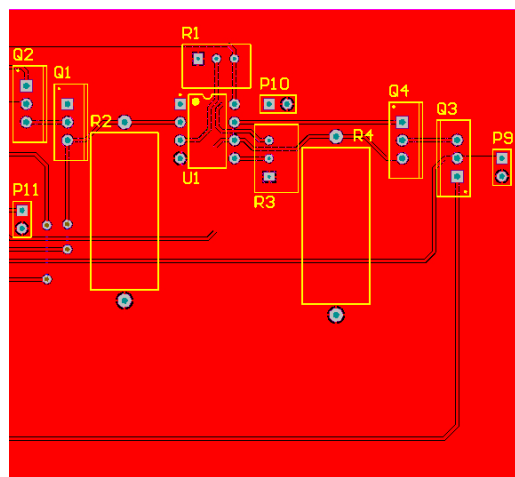


Figura 4.16. Placa de circuito impreso para la etapa de descarga.

## 4.5. Etapa de emulación

Con la finalidad de implementar la etapa de identificación y la etapa de emulación considerando la metodología de caracterización de la celda y el supercapacitor, se requiere de un dispositivo con la capacidad de imitar el comportamiento de los elementos de acumulación. Por consiguiente, se emplea un dispositivo capaz de reproducir el comportamiento de los elementos de acumulación de energía, a través de un sistema basado en un microcontrolador.

Con el propósito de definir el correcto funcionamiento de la etapa de identificación y la etapa de emulación, se propone realizar la selección de un microcontrolador, por esto, se lleva a cabo la descripción de los requerimientos necesarios para un microcontrolador, que permita llevar a cabo el proceso de identificación de parámetros del modelo de una celda, el modelo de un supercapacitor e imitar la evolución eléctrica de cada elemento de acumulación.

A partir del sistema mínimo requerido para emplear la etapa de identificación y la etapa de emulación, se requiere establecer los requerimientos del método de caracterización. Por consiguiente, se requiere un protocolo de comunicación, con la finalidad de configurar las instrucciones que requiere ejecutar el microcontrolador. Además, se requiere el diseño de un firmware, con la finalidad de modelar los procesos involucrados en la identificación de parámetros del modelo de una celda, de un supercapacitor e imitar el comportamiento de los elementos de acumulación de energía.

### 4.5.1. Selección de microcontrolador

Se propone emplear un microcontrolador debido a la necesidad de definir el comportamiento necesario para llevar a cabo la caracterización de los elementos de acumulación de energía y llevar a cabo la emulación de la evolución eléctrica de una batería y un conjunto de supercapacitores. Además, el microcontrolador está conformado por diversos recursos, que permiten interactuar con la etapa de descarga mediante la adquisición de señales analógicas.

Un microcontrolador es un dispositivo que provee un sistema mínimo, que está conformado por un microprocesador, memoria, puertos de entrada-salida y periféricos. Además, el microprocesador se diseña a partir de una arquitectura Harvard, que considera la separación de la memoria del programa en una memoria con tecnología flash y una memoria de datos con tecnología SRAM (Static Random Access Memory).

Con la finalidad de implementar las características del método de caracterización, se requiere describir los recursos con que cuenta un determinado microcontrolador. Por consiguiente, se han propuesto dispositivos de diversas capacidades de cómputo, que permitirá llevar a cabo una comparación para establecer un criterio de selección.

A partir de las características que definen a un microcontrolador se realiza una tabla comparativa (Tabla 4.4) de diferentes microcontroladores, con el propósito de llevar a cabo la etapa de identificación del sistema de emulación.

Tabla. 4.4. Características de algunos microcontroladores para la etapa de identificación

<b>Dispositivo</b>	<b>Alimentación (V)</b>	<b>Número de bits</b>	<b>Memoria de programa (kB)</b>
PIC18F4550	2.0-5.5	8	32
PIC24FJ256GA406	2.0-3.6	16	64
PIC24FV32KA304	2.0-5.5	16	32

No obstante, es necesario considerar la ejecución de la emulación de los elementos de acumulación en el sistema embebido, por consiguiente, se propone considerar la cantidad de bits empleados por los registros de operación, la implementación de un temporizador en tiempo real, la resolución del convertidor analógico-digital y la velocidad de transferencia de datos, Tabla 4.5.

Tabla. 4.5. Características de algunos recursos de los microcontroladores

<b>Dispositivo</b>	<b>Número de bits</b>	<b>Temporizador en tiempo real dedicado</b>	<b>Resolución ADC</b>	<b>Velocidad transferencia datos (UART)</b>
PIC18F4550	8	No	8/10 bits	115,200 baudios
PIC24FJ256GA406	16	Si	10/12 bits	115,200 baudios
PIC24FV32KA304	16	Si	10/12 bits	115,200 baudios

Considerando las características de los microcontroladores candidatos para implementar el sistema de emulación, se propone emplear el dispositivo *PIC24FV32KA304* de la empresa *Microchip*<sup>®</sup> (Figura 4.17) debido a la posibilidad llevar a cabo adquisición de señales analógicas cercanas a 5.0V

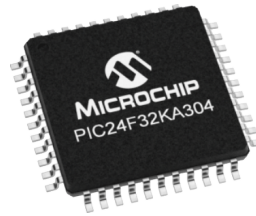


Figura 4.17. Sistema embebido *PIC24FV32KA304* de la empresa *Microchip*<sup>®</sup>.

El microcontrolador está conformado por un procesador MISP16 que opera con una señal de reloj de  $32MHz$ , una memoria con tecnología *flash* de  $256kB$  destinada a la memoria de programación. Además, el microcontrolador contiene un convertidor analógico-digital, que permite la adquisición de señales de voltaje de la celda de batería y el supercapacitor. Asimismo, contiene un módulo de comunicación *UART*, que permitirá establecer un protocolo para la transferencia de datos entre el sistema embebido y un software.

#### 4.5.2. Circuito mínimo de emulación

Con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento del microcontrolador, se propone un circuito mínimo sugerido por el fabricante, Figura 4.18.

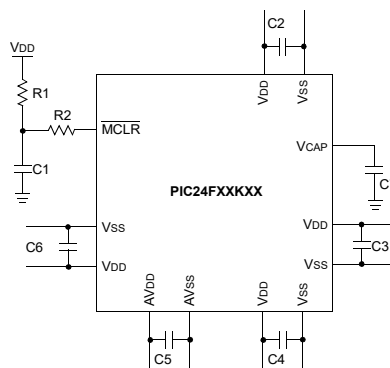


Figura 4.18. Circuito mínimo para el microcontrolador *PIC24F32KA304*.

A partir del circuito mínimo sugerido por el fabricante, se propone realizar un diagrama esquemático en un software de diseño asistido por computadora. Además, el diagrama esquemático del circuito mínimo, Figura 4.19, contempla la alimentación, un circuito de reinicio y una etapa de programación a través del protocolo *ICSP*.

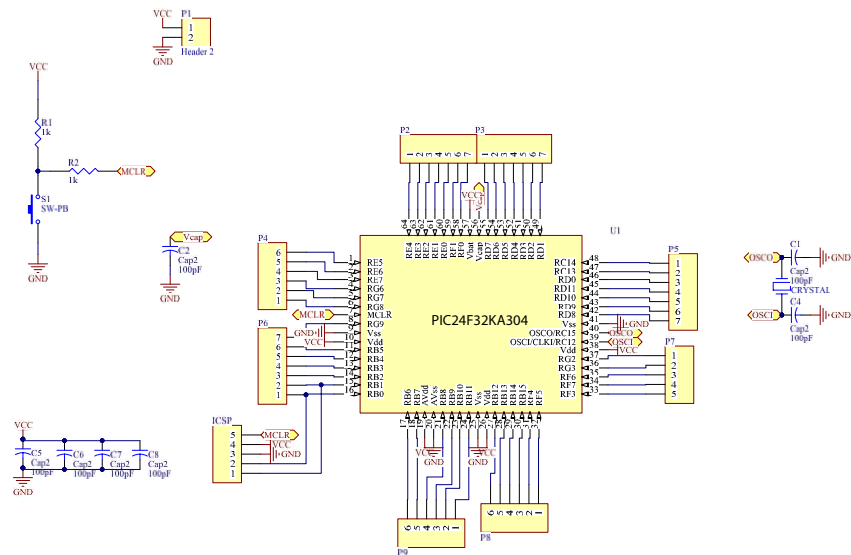


Figura 4.19. Diagrama esquemático del sistema embebido.

El circuito mínimo contempla un botón conectado a la terminal de reinicio, con el propósito reanudar las funciones del dispositivo cuando se encuentre en un estado de mal funcionamiento. Además, cuenta con dos terminales de acceso a los pines destinados a un oscilador externo, con la intención de conectar un dispositivo que permita operar al microcontrolador con una frecuencia de  $32\text{MHz}$ . Asimismo, el diagrama esquemático considera pines de entrada-salida de propósito general, con la intención de acceder a las funciones de caracterización, emulación y comunicación.

Posteriormente, se lleva a cabo el diseño de una placa de circuito impreso (Figura 4.20) en función del diagrama esquemático, que considera un encapsulado para dispositivo con tecnología *TQFP*.

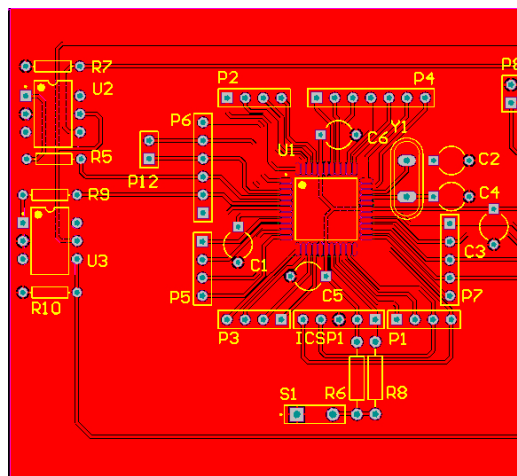


Figura 4.20. Placa de circuito impreso para el sistema embebido

### 4.5.3. Protocolo de comunicación

Con el propósito de establecer un sistema de interacción entre un software y el sistema embebido, se propone emplear un protocolo de comunicación considerando dos capas del modelo OSI, Figura 4.21.

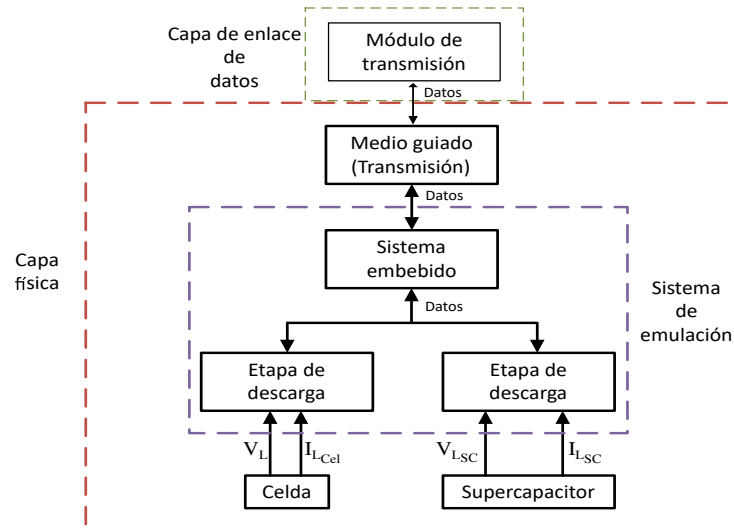


Figura 4.21. Modelo OSI del protocolo de comunicación

El modelo OSI del protocolo de comunicación contempla la capa física, que está relacionada con los elementos de acumulación, el sistema de caracterización y el medio que permite realizar la transferencia de datos desde el sistema embebido. Además, el modelo OSI considera una capa de enlace de datos, que establece el formato de la trama de datos considerando un protocolo de comunicación.

Por otro lado, el protocolo de comunicación estará basado en la interfaz RS232, que permitirá llevar a cabo la transferencia y recepción de datos. En consecuencia, se propone emplear el convertidor serial a USB F232RL del fabricante *FTDI*<sup>®</sup>, Figura 4.22.



Figura 4.22. Convertidor serial a USB F232RL del fabricante *FTDI*<sup>®</sup>

El convertidor serial a USB permite habilitar un puerto de comunicación virtual *COM*, con el propósito de establecer un canal de transferencia de datos con acceso a través del puerto USB. Además, el convertidor serial a USB soporta una tasa de transferencia de datos en un rango de 300 – 3M baudios, con la intención de enviar la información desde el sistema embebido hacia un software de forma inmediata.

Con la finalidad de establecer la correcta transferencia y recepción de datos desde el sistema embebido hacia un software, se propone emplear un algoritmo para asegurar la integridad de la información a través de una verificación por redundancia cíclica (Cyclic Redundancy Check, CRC). Además, a través del *PIC24FV32KA304* es posible emplear un CRC implementado a nivel de hardware, con la finalidad de mejorar el tiempo de cómputo requerido para la generación de un valor de verificación (Figura 4.23).

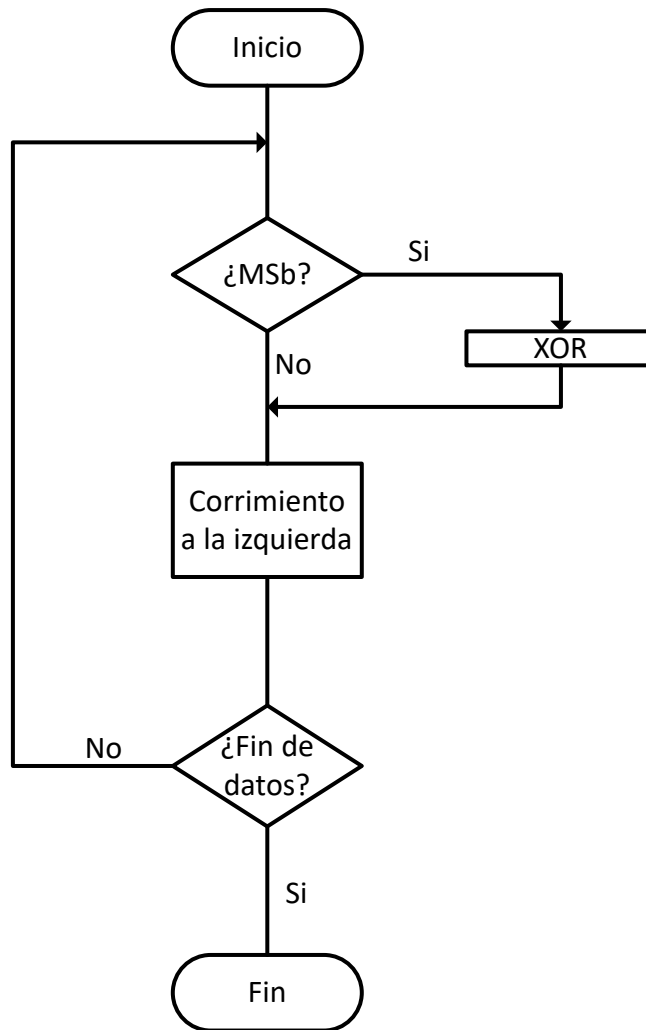


Figura 4.23. Diagrama de flujo de la generación del CRC.

El algoritmo de configuración de CRC permite procesar un conjunto de datos arbitrarios, con el propósito de resguardar la información transmitida a través de hardware binario. Además, el algoritmo requiere del bit más significativo de la trama de datos, con la finalidad de asegurar la correcta generación de un número de validación.

Posteriormente, se lleva a cabo la implementación en software del algoritmo CRC para configurar el *PIC24FV32KA304*, que permitirá determinar la integridad de los datos durante el envío y recepción de datos, Figura 4.24.

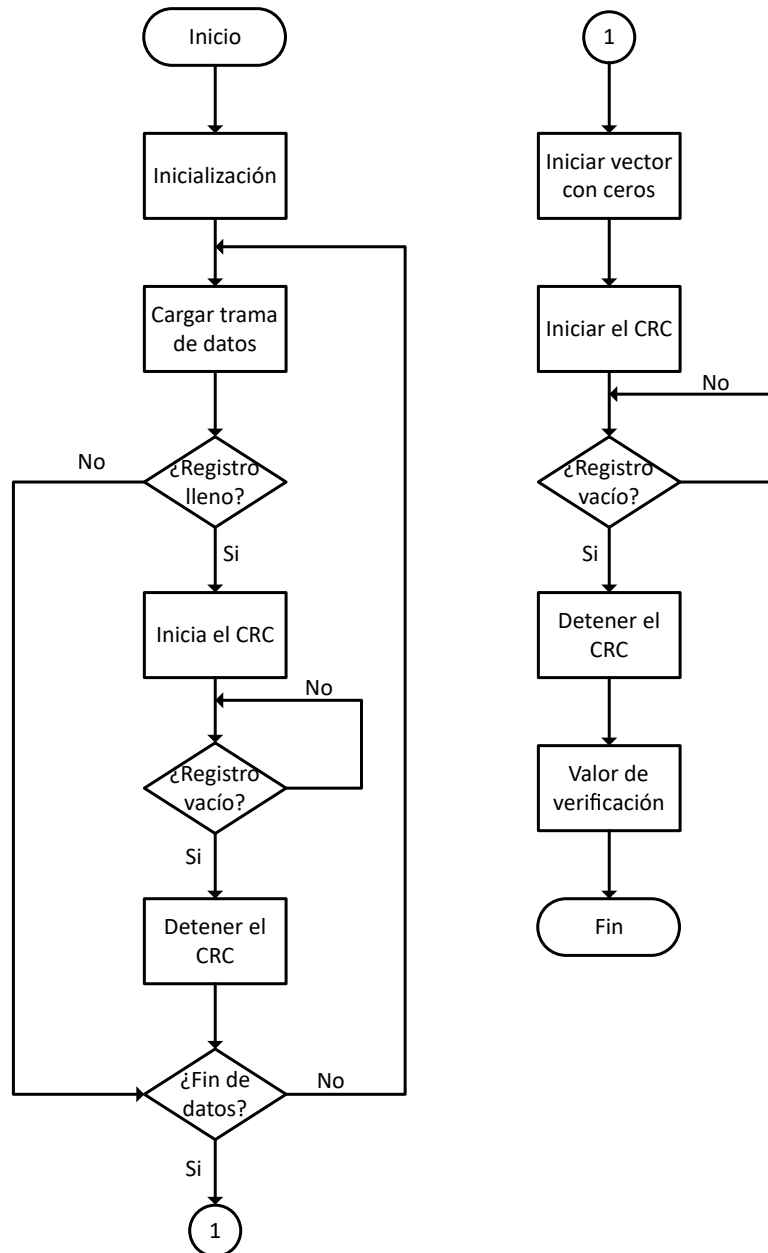


Figura 4.24. Diagrama de flujo de la implementación del módulo CRC en el *PIC24FV32KA304*.

El algoritmo para la implementación del CRC en el *PIC24FV32KA304* permitirá obtener los datos requeridos para transmitir, con el propósito de calcular un número para identificar la trama de datos original. Posteriormente, el algoritmo requiere de la verificación del contenido disponible en los registros del módulo CRC, con la finalidad de iniciar el cálculo del valor de verificación. Además, el algoritmo de CRC del microcontrolador proporcionará un valor de verificación adjunto, que permitirá validar la integración de la información transmitida a través del protocolo de comunicación.

Con el propósito de obtener los datos transferidos a través del convertidor serial a USB, se propone un algoritmo, (Pseudocódigo 1), que permite decodificar la información calculada por el sistema embebido.

**Entrada:** Datos de caracterización

**Salida:** Datos de caracterización convertido a flotante

**inicio**

```

i:=0;
N:= longitud cadena de datos;
demandaCorrienteCelda[i] := 0;
voltajeCaracterizacionCelda[i] := 0;
demandaCorrienteSC[i] := 0;
voltajeCaracterizacionSC[i]:= 0;
identificador :=0;
para  $i < N$  hacer
    si identificador == 1 entonces
        voltajeCaracterizacionCelda[i]:= convertirDatoAFlotante(datoEntrada);
        demandaCorrienteCelda[i]:= convertirDatoAFlotante(datoEntrada);
    fin
    si identificador == 2 entonces
        voltajeCaracterizacionSC[i]:= convertirDatoAFlotante(datoEntrada);
        demandaCorrienteSC[i]:= convertirDatoAFlotante(datoEntrada);
    fin
    i := i+1;
fin
información de voltaje discretizado celda;
información de corriente discretizado celda;
información de voltaje discretizado supercapacitor;
información de corriente discretizado supercapacitor;
parámetro  $V_{OC}$  de la celda;
parámetro  $R_0$  de la celda;
parámetro  $V_{OC}$  del supercapacitor;
parámetro  $R_{0_{SC}}$  del supercapacitor;

```

**fin**

### Pseudocódigo 1: Decodificación de datos

El algoritmo considera la separación de datos medidos con el sistema embebido, con la intención de realizar la identificación de parámetros de los modelos para los sistemas de acumulación de energía. Además, el algoritmo considera la información de discretización de las mediciones de voltaje de una celda y un supercapacitor, a partir de la conversión de los datos almacenados a un tipo de dato flotante.

Con la finalidad de realizar una conversión de datos a un tipo de dato tipo flotante, se propone una máquina de estados que permita una conversión a partir de un dato decodificado, Figura 4.25.

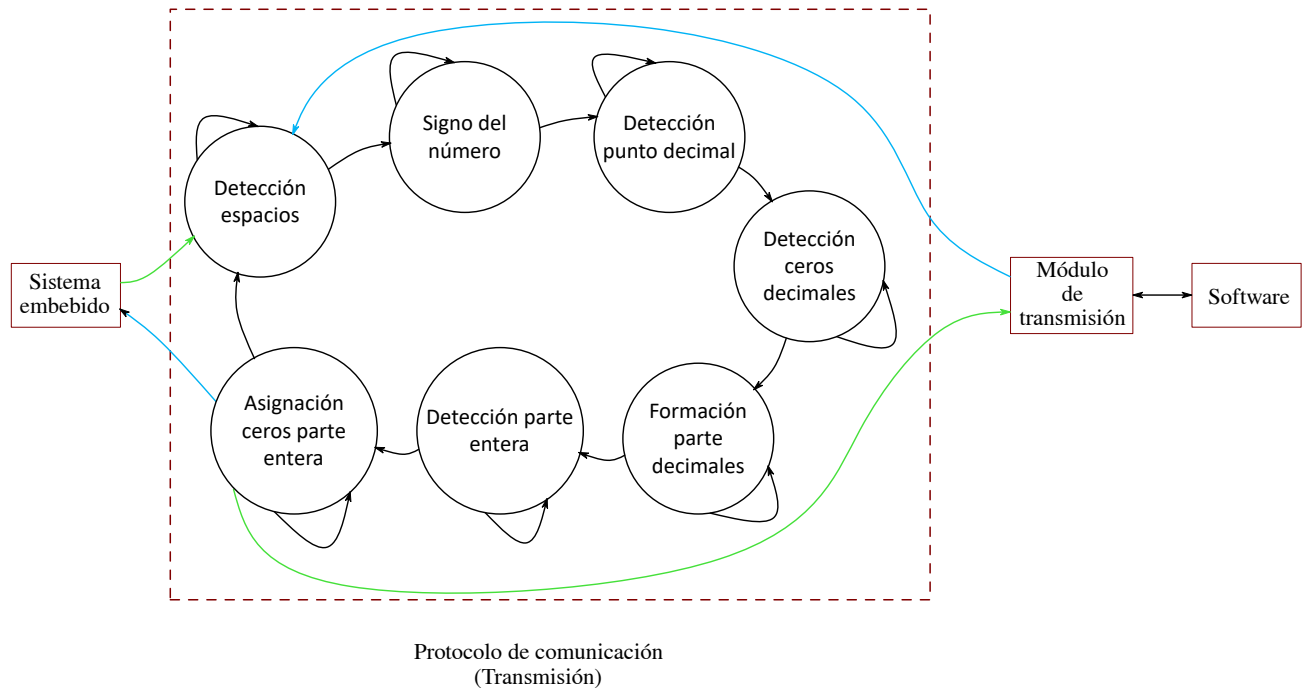


Figura 4.25. Máquina de estados para conversión a datos flotantes.

El estado de detección de espacios permite eliminar caracteres inesperados, con la intención de determinar la integridad de la información durante la etapa de decodificación. Además, el estado de detección de signo permite establecer la naturaleza de la medición realizada mediante el sistema embebido, que permitan determinar el cálculo de datos válidos para la caracterización.

Por otro lado, el estado de detección de punto decimal permite definir la magnitud de la medición realizada, con la intención de definir el cálculo de un número con punto flotante. Además, se realiza la detección de ceros ubicados después del punto decimal, con la intención de mejorar la representación del número flotante, considerando un estado para la formación del número flotante.

Finalmente, se establece un estado para la detección de la parte entera del dato convertido, con el propósito de definir la magnitud de la variable medida. Además, se considera un estado para la asignación de ceros, con la intención de definir una longitud finita del dato convertido.

#### 4.5.4. Diseño de firmware

Con el propósito de definir el comportamiento del sistema embebido, se requiere el diseño de un firmware considerando las diversas etapas de funcionamiento para la caracterización e imitación de los elementos de acumulación de energía. Por consiguiente, se propone el diseño de una máquina de estados, con la intención de gestionar la función de caracterización, identificación y emulación, Figura 4.26.

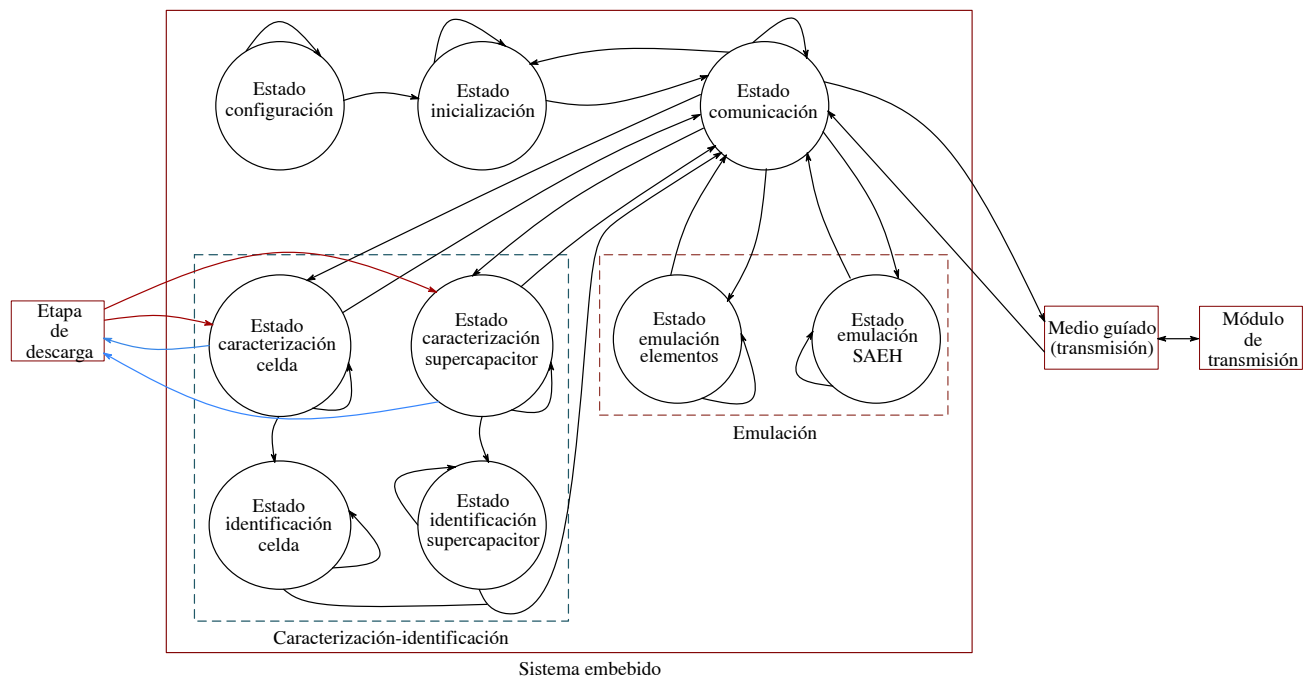


Figura 4.26. Máquina de estados para el sistema embebido.

La máquina de estados considera un estado de configuración, que permite establecer las configuraciones necesarias para definir la función de caracterización, identificación o emulación. Además, para enviar los datos entre el sistema embebido y un software, se propone un estado de comunicación para la transferencia de datos preliminares.

A partir de la configuración establecida para el sistema embebido, se realizará el arranque del dispositivo a través de instrucciones definidas en un estado del firmware. El estado de inicio tomará en cuenta los parámetros enviados a través de un software, que permitirá definir el comportamiento de caracterización o emulación en el sistema embebido.

Posteriormente, el firmware realizará una comunicación entre el sistema embebido y un software, mediante un estado de funcionamiento denominado comunicación que permitirá establecer un protocolo de comunicación para una transmisión de datos. Además permitirá determinar el comportamiento del sistema de emulación, a través del monitoreo de los datos transferidos.

Considerando el protocolo de comunicación establecido con el sistema embebido se llevará a cabo la función de caracterización de cada dispositivo de acumulación, a partir del estado de caracterización de la celda y el estado de caracterización del supercapacitor que permitirán configurar el microcontrolador en función de las condiciones de ejecución de la metodología de cada elemento de acumulación de energía. Además, se realizará la identificación de parámetros cuando finalice el ciclo de ejecución, a través de un estado denominado identificación celda y un estado denominado identificación supercapacitor, que están diseñados en función de la metodología de caracterización.

Por otro lado, con la finalidad de igualar el comportamiento de los elementos de acumulación de energía, se realizará la emulación de una celda y un supercapacitor considerando el modelo discreto de los elementos de acumulación a través de un estado denominado emulación. Además, con el objetivo de imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, se realizará la configuración mediante un estado de emulación a partir de los datos generados por el estado de identificación.

## 4.6. Conclusiones

A partir de los diversos modelos matemáticos que permiten representar la evolución eléctrica de los elementos básicos de acumulación, se ha determinado que los modelos con resistencia interna para la celda de batería y el supercapacitor permitirán describir la evolución eléctrica en un sistema de almacenamiento de energía híbrido. Además, se ha determinado que el modelo con resistencia interna para una celda está conformado por dos parámetros, que permiten establecer un comportamiento eléctrico en función de una demanda de corriente. Asimismo, el modelo con resistencia interna para un supercapacitor considera dos elementos, con la finalidad de definir la evolución eléctrica considerando una demanda de corriente.

Considerando los modelos matemáticos de cada elemento de acumulación, se determinó un método de caracterización para determinar la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido. Además, se determinó los requerimientos para caracterizar cada elemento de acumulación, a partir de la metodología de caracterización.

A partir de las metodologías de caracterización se llevó a cabo el diseño del sistema de emulación, que permitirá caracterizar a cada elemento de acumulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido. Además, se llevó a cabo el diseño del sistema embebido, que permitirá imitar el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía híbrido.

## Capítulo 5

# Implementación en un sistema embebido del sistema de almacenamiento de energía híbrido

En este capítulo se presenta la implementación de la metodología de emulación de los elementos de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con la intención de imitar la evolución eléctrica en función de la demanda de energía del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido. Además, se presenta la simulación de los elementos básicos de acumulación, con la intención de validar la metodología de caracterización. Asimismo, se presenta la emulación de los elementos básicos de acumulación de energía, con el objetivo de emular el comportamiento eléctrico de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

Contenido:

- 5.1 Introducción
- 5.2 Simulación de elementos básicos de un SAEH
- 5.3 Emulación de elementos básicos de un SAEH
- 5.4 Validación del sistema de emulación de un SAEH
- 5.5 Conclusiones

## 5.1. Introducción

A partir del diseño del sistema de emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido (SAEH), se procede a realizar una implementación para evaluar la emulación del sistema de almacenamiento de energía. En consecuencia, se establece un método de validación, con la intención de definir el correcto funcionamiento de la metodología de caracterización que permita imitar el comportamiento de un SAEH.

Con la finalidad de evaluar el correcto funcionamiento de la metodología de caracterización, se propone realizar una simulación para analizar la evolución de los elementos de acumulación de energía. Además, se evalúa el comportamiento de una celda de batería, considerando la metodología de caracterización de una celda a partir del modelo con resistencia interna. Asimismo, se evalúa el comportamiento de un supercapacitor, a partir de la metodología de caracterización en función del modelo con resistencia interna.

A partir de la simulación de los elementos básicos de acumulación de energía, se procede a realizar una emulación para imitar el comportamiento de una celda y un supercapacitor. Además, se lleva a cabo la configuración del comportamiento de los elementos de acumulación considerando las características de elementos comerciales, con la intención de comparar la evolución eléctrica de cada elemento de acumulación.

Considerando la simulación de cada elemento de acumulación de energía, se procede a realizar una conexión de celdas y supercapacitores para emular el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en función de una topología de interconexión activa. Finalmente, a partir del modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido, se realiza la validación del sistema de emulación para un sistema de almacenamiento de energía.

## 5.2. Simulación de elementos básicos de un SAEH

Con el propósito de implementar la metodología de caracterización de los elementos de acumulación de energía, se propone emplear la plataforma de simulación *Simulink*<sup>®</sup> considerando los bloques que representan el comportamiento de una celda y un supercapacitor. Además la plataforma de simulación *Simulink*<sup>®</sup> permitirá llevar a cabo la identificación de parámetros eléctricos de los elementos de acumulación, con el propósito de reproducir la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido.

A partir de las características ofrecidas por el software *Simulink*<sup>®</sup>, se propone emplear el modelo predefinido de una celda de batería. En consecuencia, se realiza la configuración del bloque de simulación considerando las características de una celda real, con la intención de llevar a cabo una comparación entre un comportamiento ideal y el comportamiento obtenido mediante la caracterización.

Además, se propone emplear el modelo predefinido de un supercapacitor de *Simulink*<sup>®</sup>, considerando las características reales de un supercapacitor. Por consiguiente, se lleva a cabo la configuración del bloque del supercapacitor considerando las características que provee el fabricante, con la intención de realizar la comparación entre un comportamiento ideal y el comportamiento obtenido a través de la metodología de caracterización.

### 5.2.1. Simulación de una celda de batería

Con el propósito de llevar a cabo la implementación de la metodología de caracterización, se empleó el bloque de celda de batería predefinido en *Simulink*<sup>®</sup> (Figura 5.1), considerando las características de una celda de batería con tecnología de polímeros de litio (LiPo), con un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad de 0.24 Ah (Tabla 5.1).

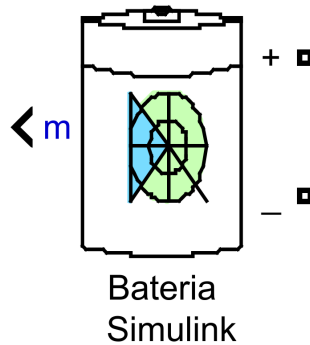


Figura 5.1. Bloque de batería de *Simulink*<sup>®</sup> [68].

Tabla. 5.1. Parámetros de configuración.

Parámetro	Cantidad
Tecnología	LiPo
Voltaje nominal	3.7V
Capacidad	0.24Ah
Capacidad inicial	100 %

Con el propósito de llevar a cabo la validación de la metodología de caracterización, se realizó una simulación que contempla un bloque para la celda de batería, un bloque para la etapa de descarga y un bloque para la etapa de identificación de parámetros, Figura 5.2.

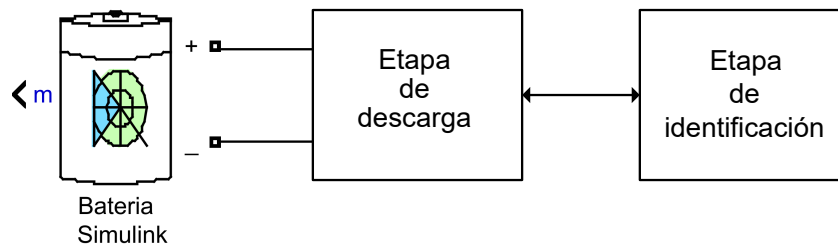


Figura 5.2. Modelo para simulación de la metodología de caracterización de una celda.

Además, la etapa de descarga considera un transistor MOSFET de canal  $N$  (Figura 5.3), con el propósito de realizar una demanda de energía a la celda de batería.

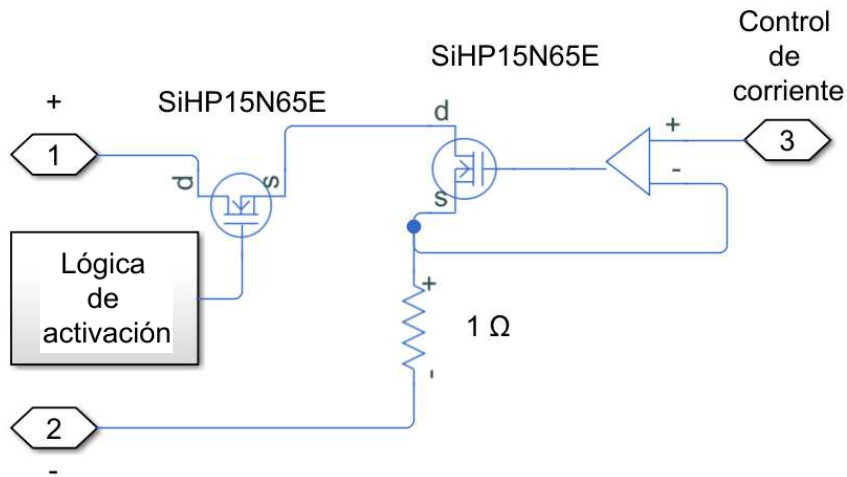


Figura 5.3. Elementos que conforman la etapa de caracterización.

Asimismo, la etapa de identificación (Figura 5.4) permite determinar los parámetros del modelo con resistencia interna, a partir de las mediciones realizadas a través del sistema de caracterización.

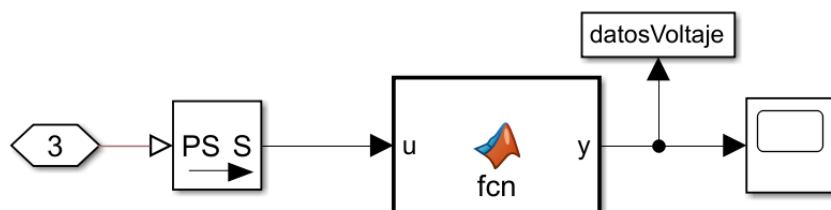


Figura 5.4. Elementos que conforman la etapa de identificación.

Considerando el ciclo de ejecución para la etapa de descarga de una celda, se obtuvo la curva de estado de carga (SOC) y la curva de corriente (Figura 5.5).

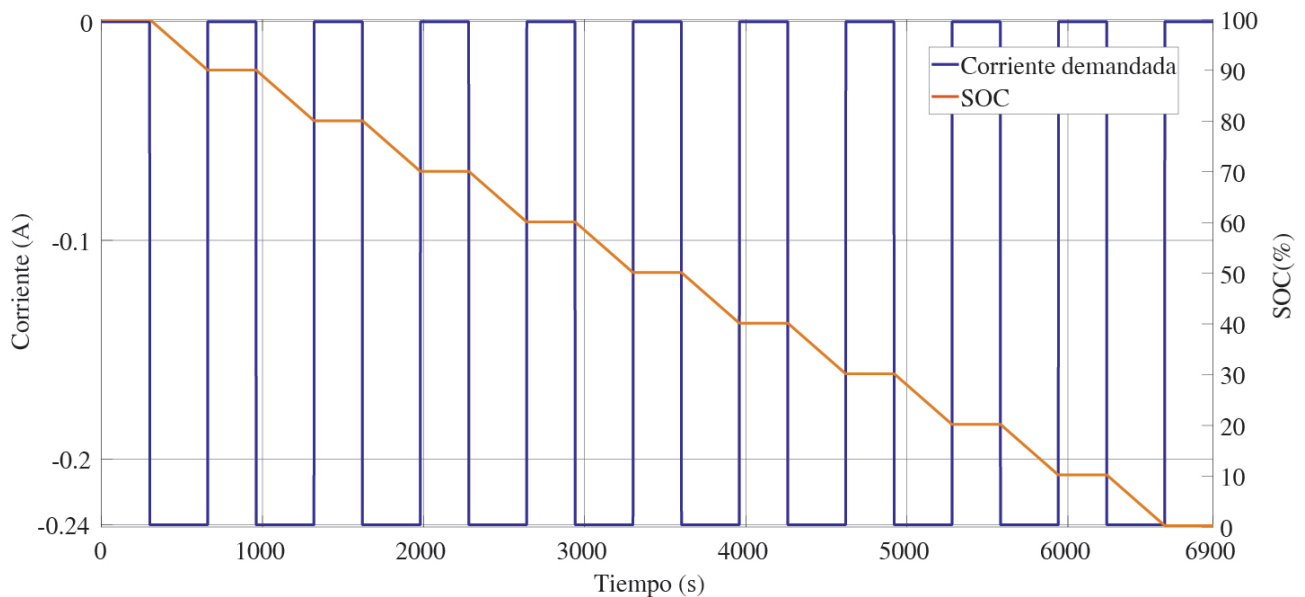


Figura 5.5. Curva de estado de carga y demanda de corriente de una celda de batería.

La curva de estado de carga y la curva de corriente permiten establecer el momento de desconexión de la carga de corriente, con la intención de identificar los elementos del modelo con resistencia interna. Además, permite determinar la capacidad de la celda, con el propósito de definir la cantidad de corriente que puede suministrar en un instante determinado.

A partir del ciclo de ejecución de descarga de una celda, se obtuvo la curva de voltaje de celda caracterizada (Figura 5.6) considerando una descarga cada 10% de SOC.

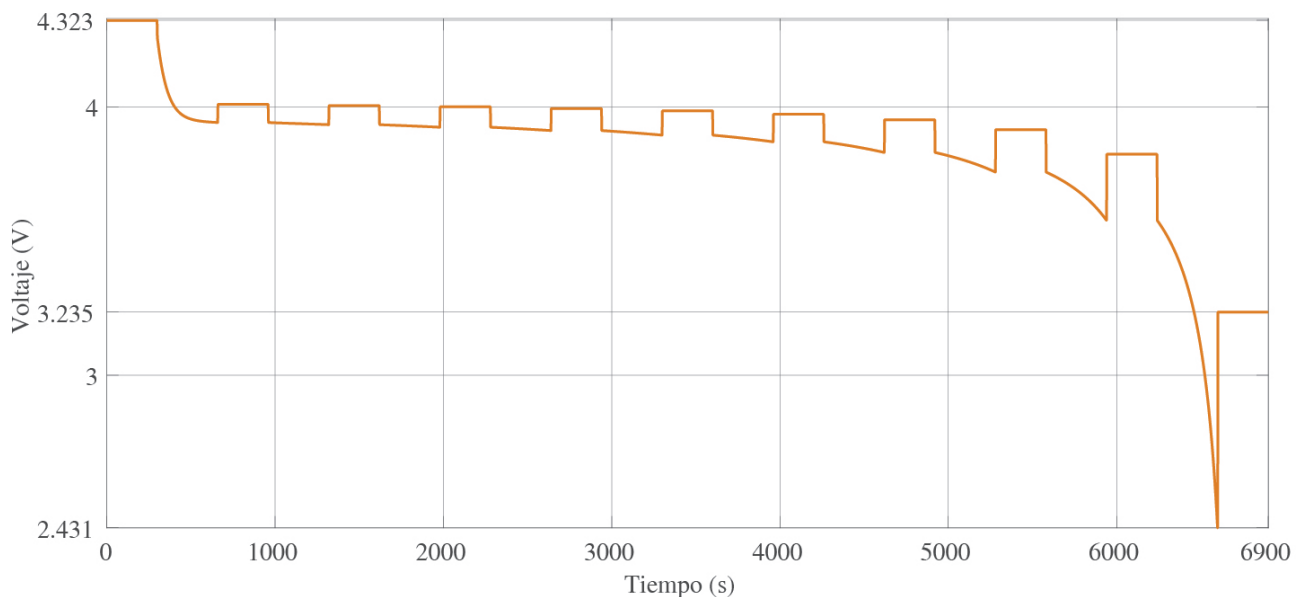


Figura 5.6. Curva de voltaje de celda caracterizada.

La curva de voltaje permite determinar los parámetros eléctricos del modelo con resistencia interna, considerando la curva de estado de carga y la curva de corriente. Además, permite establecer la evolución eléctrica de un elemento de acumulación, considerando una demanda de energía específica. Asimismo, se realizó la discretización de la curva de voltaje de celda caracterizada (Figura 5.7), con el propósito de identificar el voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) de la celda.

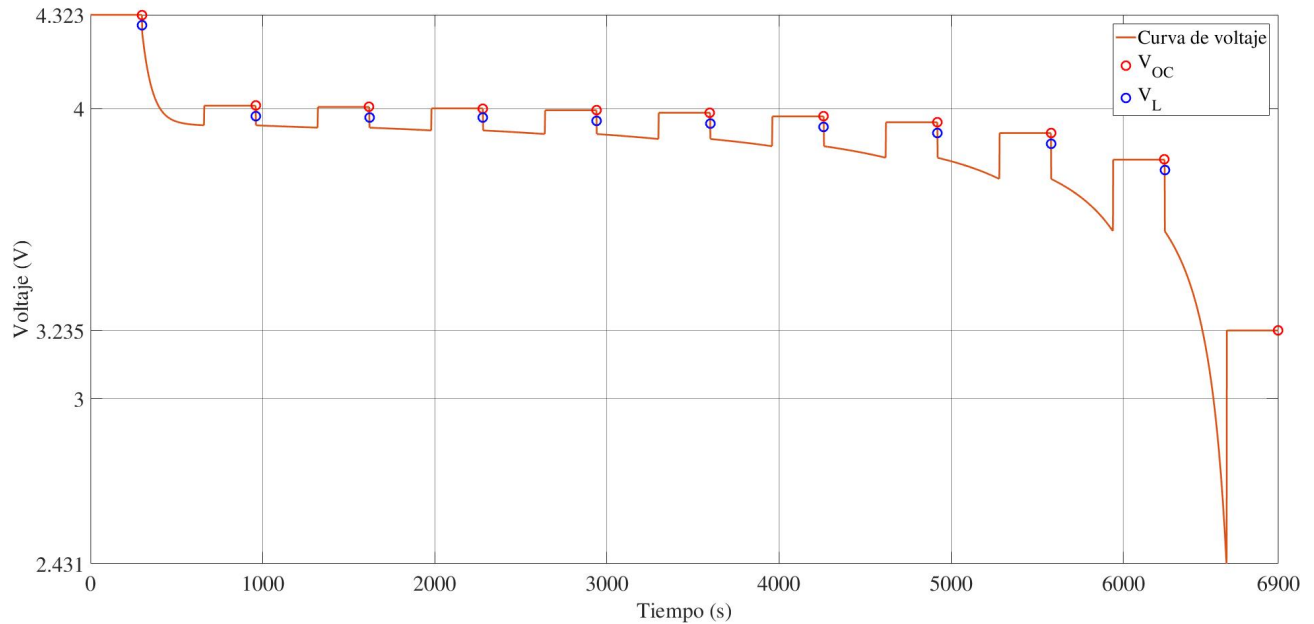


Figura 5.7. Curva de voltaje discretizada.

La curva discretizada permite determinar diversos puntos de voltaje ( $V_{OC}$ ,  $V_L$ ), con la intención de establecer los parámetros que conforman el modelo eléctrico de resistencia interna de una celda. Además, permite analizar la evolución eléctrica de una celda, en función de una demanda de corriente.

Posteriormente se realiza la identificación de cada parámetro del modelo con resistencia interna, con la intención de reproducir la evolución eléctrica de una celda. Además, se realiza la identificación del voltaje en circuito abierto de una celda, que permita determinar la evolución eléctrica considerando la desconexión de una determinada carga de corriente. Asimismo, se realiza la identificación del parámetro de resistencia interna, con la intención de analizar la evolución de la impedancia de un elemento de acumulación en función de una determinada demanda de energía.

Con la finalidad de establecer el correcto funcionamiento de la metodología de caracterización, se llevó a cabo una comparación entre el modelo de *Simulink*<sup>®</sup> configurado como una celda de tecnología LiPo marca *Zippy*, con un voltaje nominal 3.7 V y una capacidad de 0.24 Ah y el modelo con resistencia interna. Por consiguiente, se obtuvo una curva de descarga de voltaje (Figura 5.8), que permitió llevar a cabo una comparación en la evolución eléctrica.

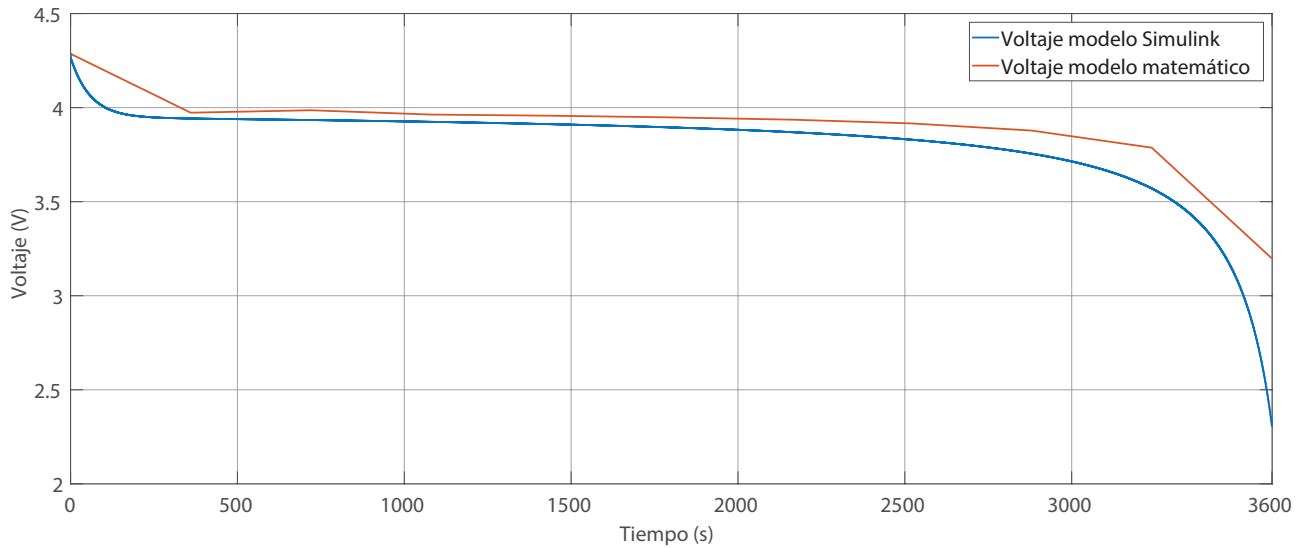


Figura 5.8. Diferencia entre el voltaje del modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo matemático de una celda.

Por consiguiente, se obtuvo una curva de diferencia de voltajes (Figura 5.9), que permitió establecer la diferencia de evolución eléctrica entre el modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna que se obtuvo a través de la metodología de caracterización.

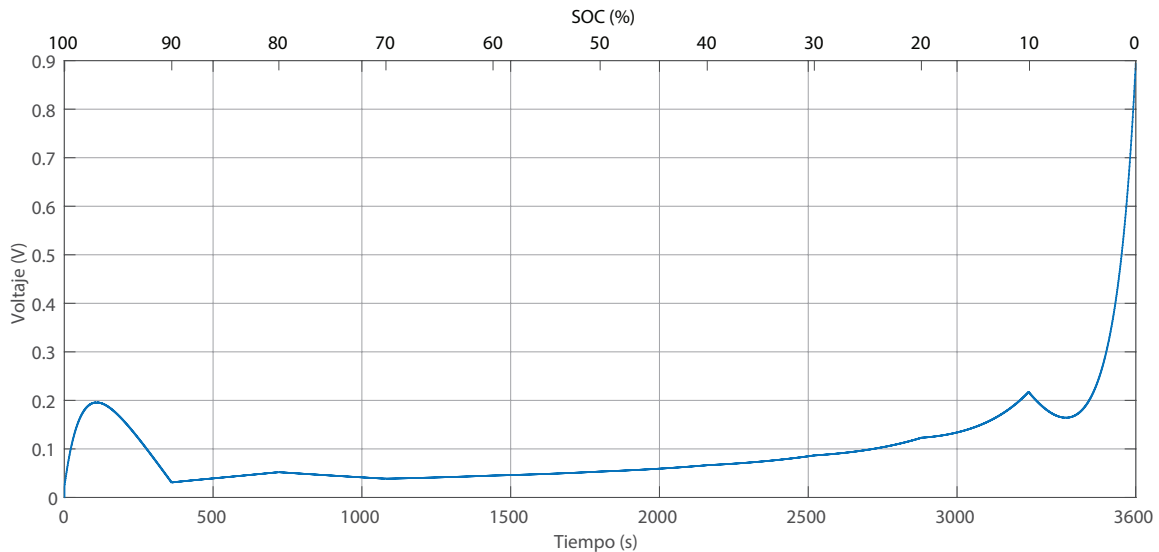


Figura 5.9. Curva de diferencias de voltaje entre el modelo *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna.

Además, se determinó un error relativo entre el voltaje de la celda de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna, Figura 5.10, que experimenta un valor máximo de 38.86 % a los 3600 s. No obstante, presenta un error relativo con un valor máximo de 6.09 % cuando la celda experimenta un SOC entre 80 % y 20 %.

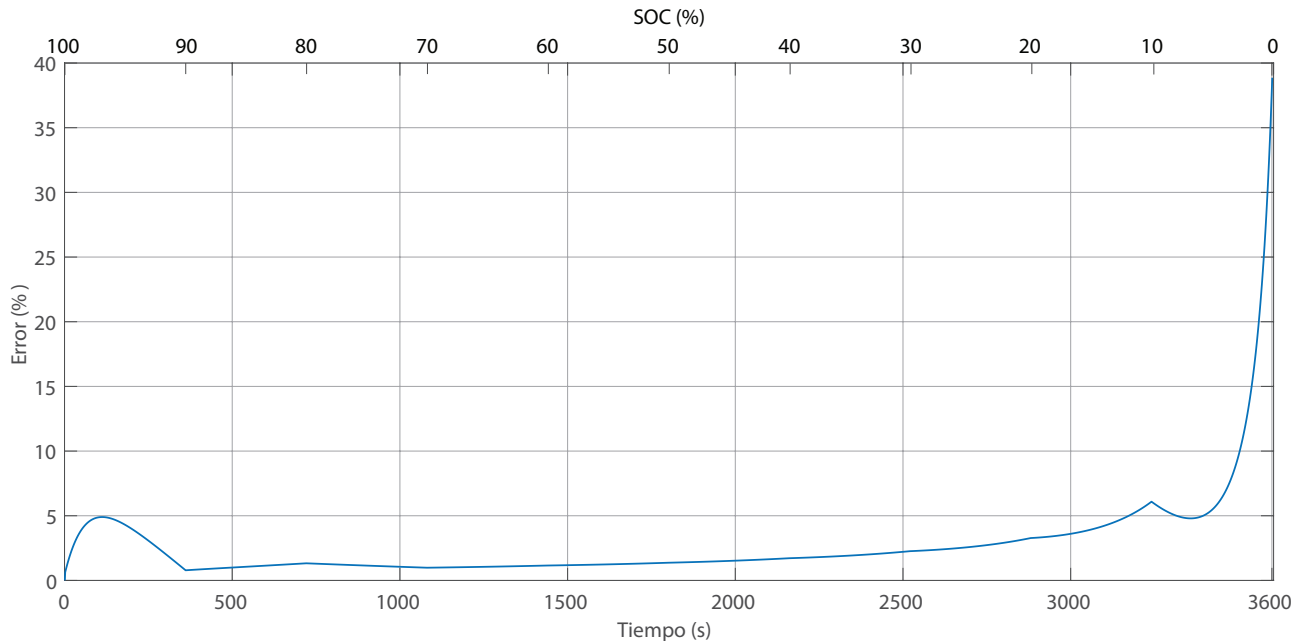


Figura 5.10. Curva de error relativo porcentual entre el modelo *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna.

### 5.2.2. Simulación de un supercapacitor

Con el propósito de llevar a cabo la implementación de la metodología de caracterización para un supercapacitor, se empleó el bloque predefinido en *Simulink*<sup>®</sup> (Figura 5.11), considerando las características de un supercapacitor con tecnología de doble capa eléctrica (EDLC) con un voltaje nominal de 2.7 V y una capacitancia de 100 F (Tabla 5.2).

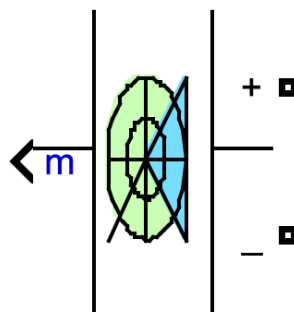


Figura 5.11. Bloque de supercapacitor de *Simulink*<sup>®</sup> [69].

Tabla. 5.2. Parámetros de configuración del supercapacitor.

Parámetro	Cantidad
Tecnología	EDLC
Voltaje nominal	2.7V
Capacitancia	100F
Capacidad inicial	100 %

Con la intención de llevar a cabo la validación de la metodología de caracterización para un supercapacitor, se realizó una simulación que contempla un bloque de supercapacitor, un bloque para la etapa de descarga y un bloque para la identificación de parámetros, Figura 5.12.

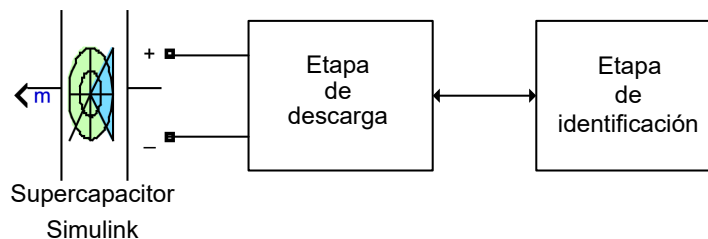


Figura 5.12. Modelo para simulación de la metodología de caracterización de un supercapacitor.

Considerando el ciclo de ejecución para la caracterización de un supercapacitor, se obtuvo la curva de estado de carga y la curva de corriente (Figura 5.13).

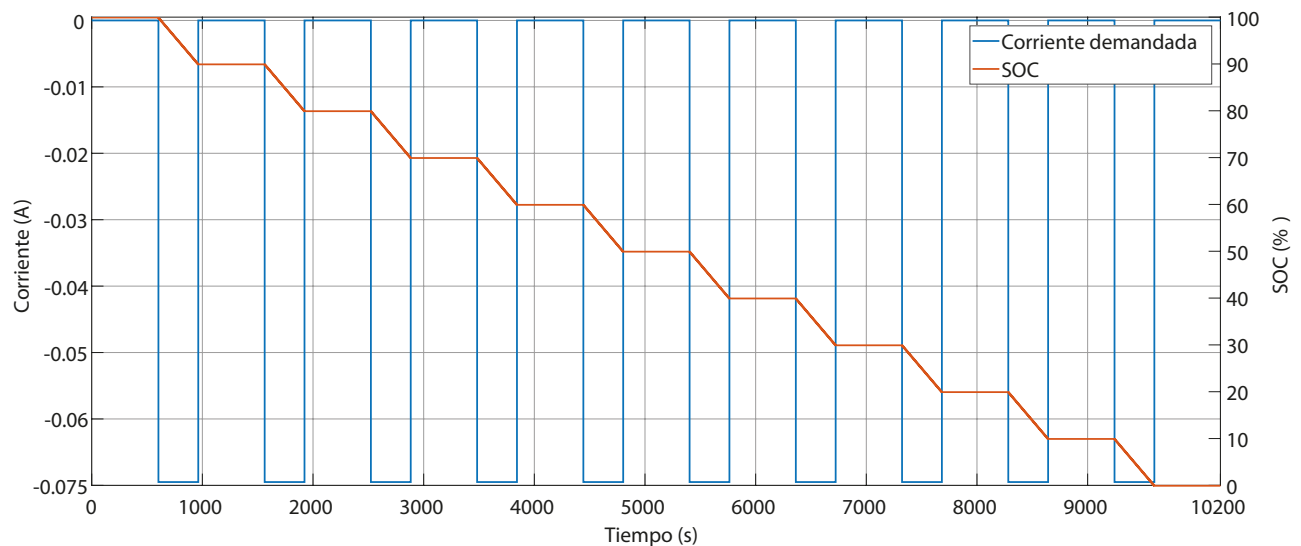


Figura 5.13. Curva de estado de carga y demanda de corriente de un supercapacitor.

La curva de estado de cargar y la curva de corriente permiten determinar el instante de desconexión de la etapa de descarga, con la intención de determinar los parámetros del modelo con resistencia interna del supercapacitor. Además, se obtuvo la curva de voltaje del supercapacitor caracterizado (Figura 5.14).

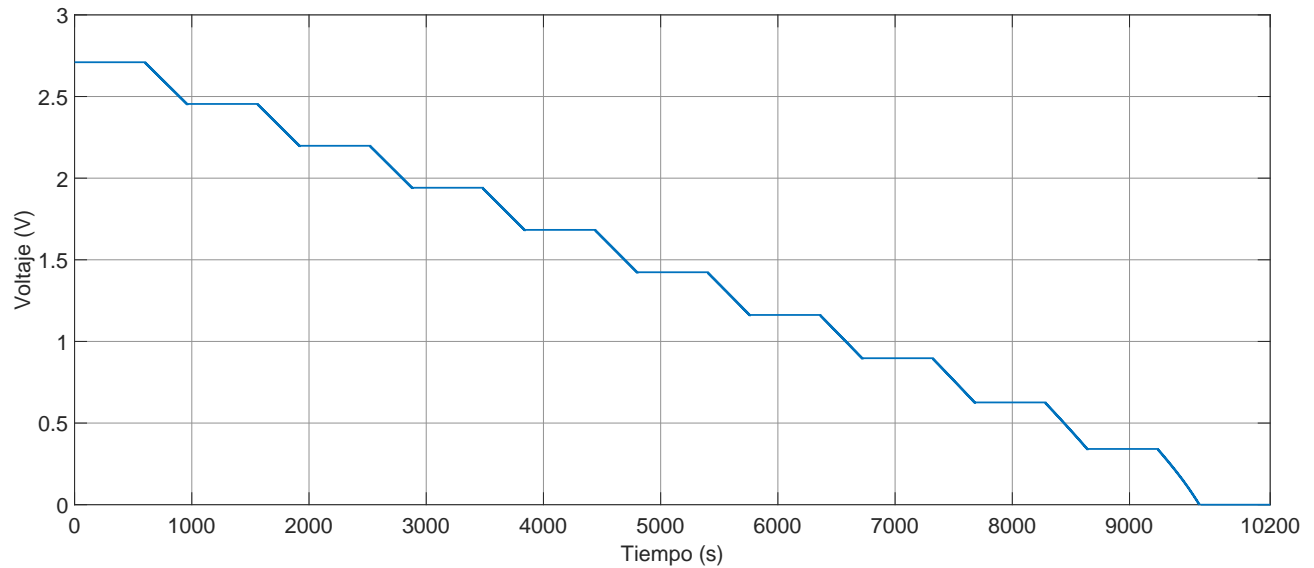


Figura 5.14. Curva de voltaje de supercapacitor caracterizado.

La curva de voltaje del supercapacitor caracterizado permite identificar la evolución del elemento de acumulación, con la intención de establecer el comportamiento eléctrico en función de una determinada demanda de energía.

Asimismo, se llevó a cabo la discretización de la curva de voltaje del supercapacitor (Figura 5.15), con la intención de identificar el voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) del supercapacitor.

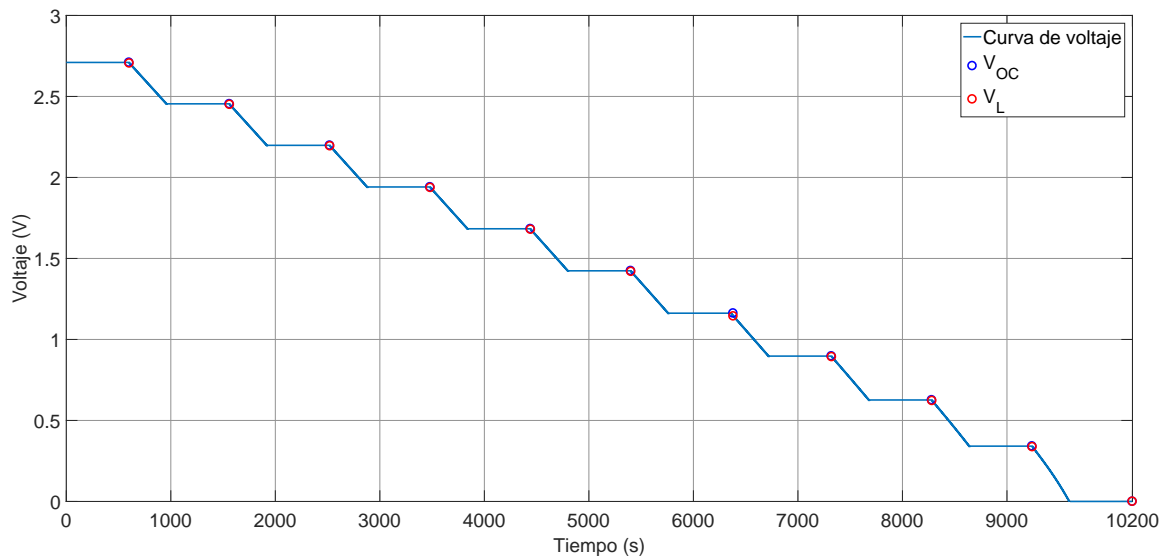


Figura 5.15. Curva de voltaje discretizada del supercapacitor.

Con la finalidad de establecer el correcto funcionamiento de la metodología de caracterización para un supercapacitor, se llevó a cabo una comparación entre el modelo de *Simulink*<sup>®</sup> configurado como un supercapacitor de tecnología doble capa eléctrica marca *Green-Cap*, con un voltaje nominal de 2.7 V y una capacitancia de 100 F y el modelo con resistencia interna, Figura 5.16.

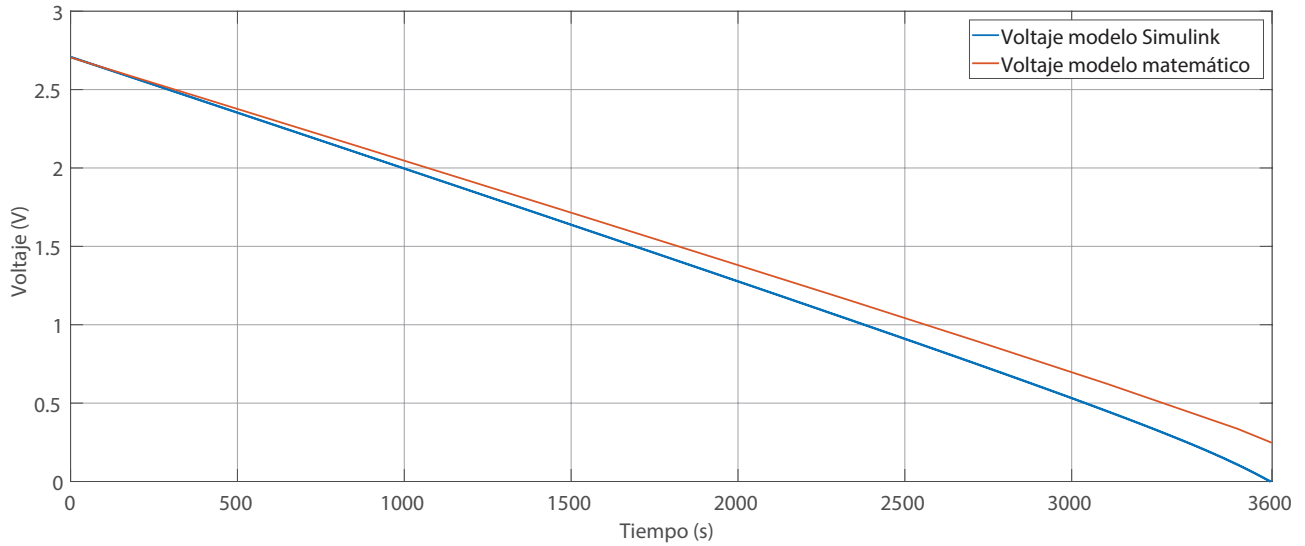


Figura 5.16. Comparación entre el voltaje del modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor.

En consecuencia, se obtuvo una curva de diferencia de voltaje (Figura 5.17), que permitió establecer la diferencia de evolución eléctrica entre el supercapacitor de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna que se obtuvo a través de la metodología de caracterización.

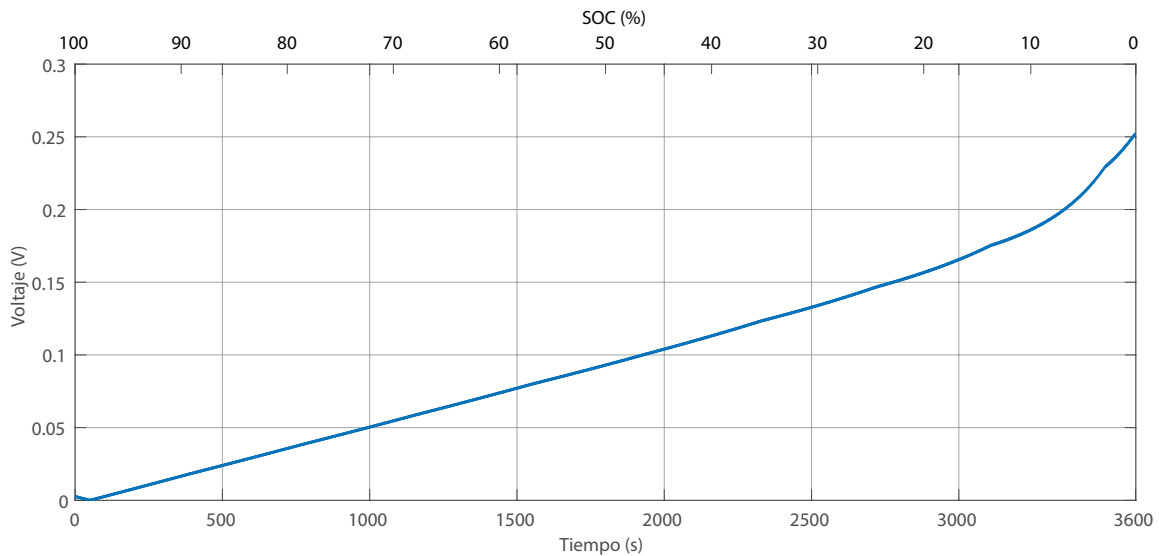


Figura 5.17. Diferencia entre el voltaje del modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor.

Además, se determinó un error relativo porcentual entre el voltaje del supercapacitor de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo de resistencia interna, Figura 5.18, que experimenta un valor máximo de 12.86% a los 3600 s.

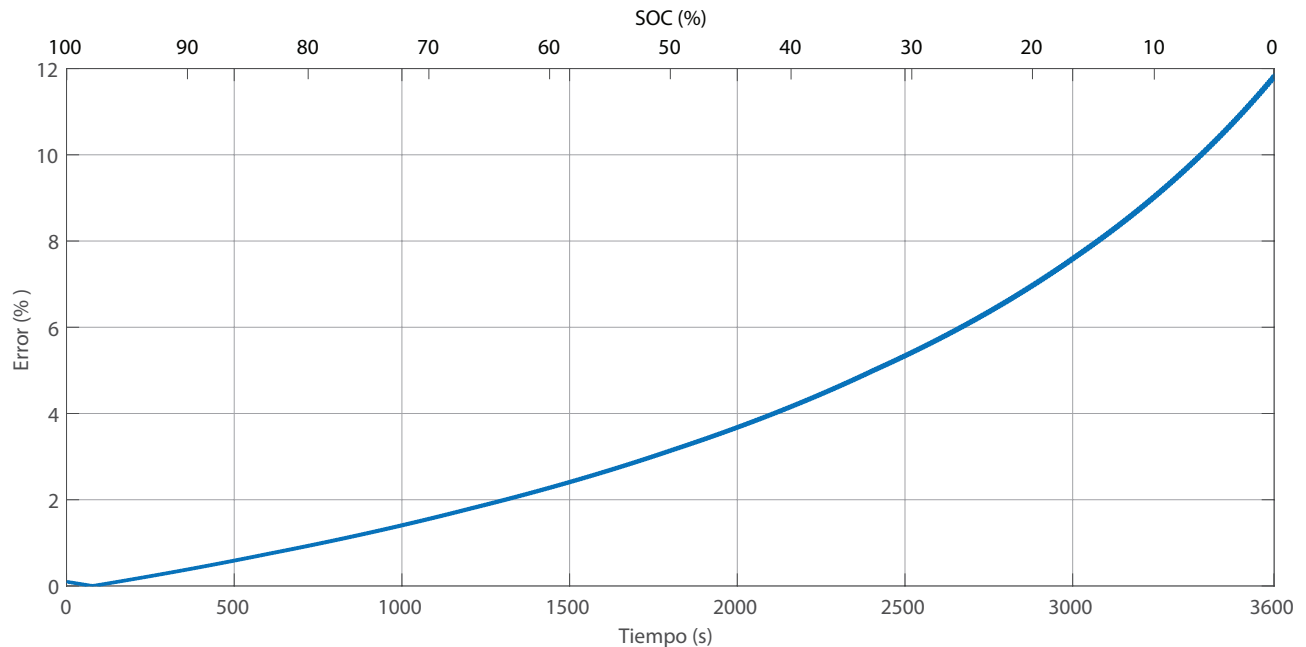


Figura 5.18. Curva de error relativo porcentual entre el modelo *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo matemático de un supercapacitor.

### 5.3. Emulación de elementos básicos de un SAEH

Con el propósito de imitar el comportamiento de los elementos básicos de acumulación de energía de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, se propone llevar a cabo la fabricación del sistema de emulación que contempla la etapa de descarga y la etapa de identificación. En consecuencia, se empleó el diagrama esquemático de la etapa de descarga (Figura 4.15) y el diagrama esquemático de la etapa de identificación (Figura 4.20), con la finalidad de producir una placa de circuito impreso.

Para llevar a cabo la caracterización de una celda y un supercapacitor, se empleó el circuito esquemático de la etapa de descarga para realizar la fabricación de la placa de circuito impreso, Figura 5.19.

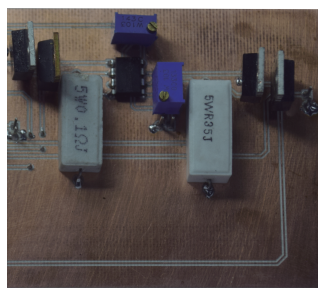


Figura 5.19. Placa de circuito impreso para la etapa de descarga

Por otro lado, para realizar la emulación de los elementos básicos de acumulación de energía, se realizó la fabricación de la placa de circuito impreso de la etapa de identificación, Figura 5.20

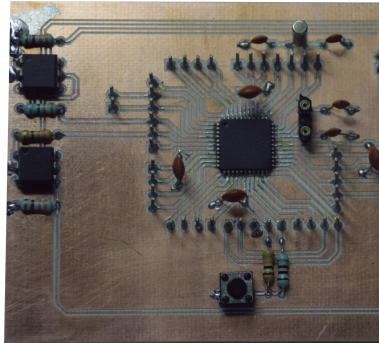


Figura 5.20. Placa de circuito impreso para la etapa de identificación

A partir del empleo del entorno de desarrollo integrado (*Integrated Interface Development, IDE*) del microcontrolador *PIC24FV32KA304*, se procede a realizar la configuración del sistema de emulación considerando una fuente de reloj.

Se contempla emplear un oscilador interno y un lazo de seguimiento de fase (Phase-Locked Loop, PLL) para definir una frecuencia de reloj de 32MHz para el microprocesador y 16 MHz para los módulos, que serán empleados para el protocolo de comunicación.

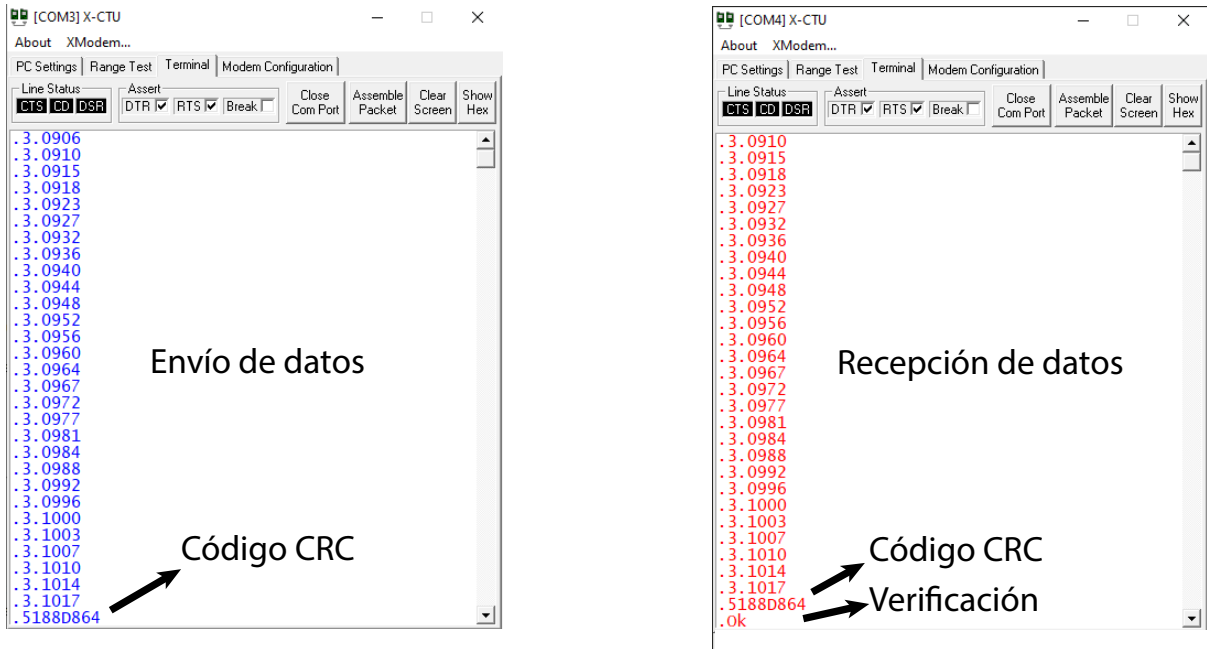
Posteriormente, se llevó a cabo la programación del microcontrolador con un firmware, que permite realizar la función de caracterización, la función de identificación y la función de emulación.

Con el propósito de acceder a los datos que se generan a través de la función de identificación y la función de emulación, se procede a iniciar el puerto de comunicación y definir una configuración del módulo UART, considerando algunos parámetros necesarios para la transmisión y recepción de datos, Tabla 5.3.

Tabla. 5.3. Parámetros de configuración del protocolo de comunicación.

Parámetro	Cantidad
Reloj del sistema	32 MHz
Reloj de los módulos	16 MHz
Método de comunicación	Serial (RS232)
Velocidad de transferencia	115,200 baudios

Con el propósito de establecer el correcto funcionamiento del protocolo de comunicación entre el sistema embebido y el software, se realizó el envío de datos de la etapa caracterización y la etapa de identificación de una celda considerando un valor de verificación adjunto durante la transmisión (Figura 5.21(a)) y recepción (Figura 5.21(b)) de información.



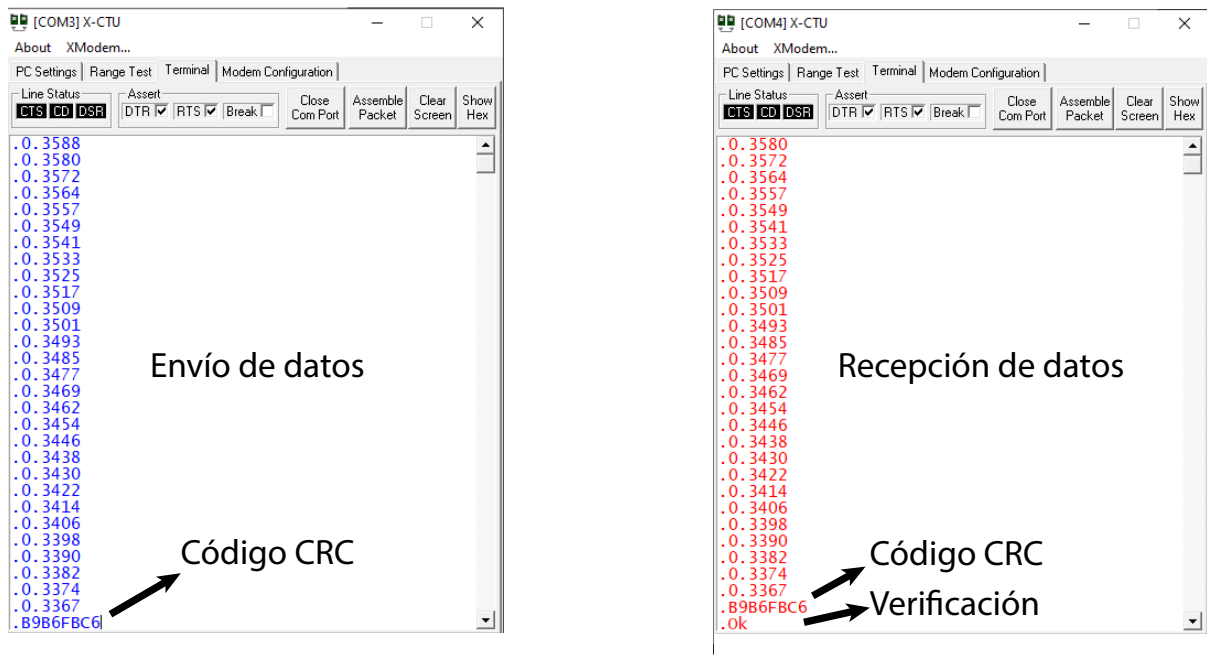
(a) Transmisión

(b) Recepción

Figura 5.21. Implementación del valor de verificación del CRC para los datos de la celda

El valor de verificación generado por el algoritmo CRC (Figura 4.23) permitió establecer la integridad de los datos obtenidos mediante el sistema embebido, con el propósito de validar la información transmitida mediante el protocolo de comunicación. Además, el valor de verificación generador a través del algoritmo CRC en el microcontrolador (Figura 4.24) permitió llevar a cabo un cálculo dedicado, con la finalidad de establecer una transferencia de datos única.

Por otro lado, con la finalidad de establecer el correcto funcionamiento del protocolo de comunicación entre el sistema embebido y el software, se realizó el envío de datos de la etapa de caracterización y la etapa de identificación de un supercapacitor considerando un valor de verificación adjunto durante la transmisión (Figura 5.22(a)) y recepción (Figura 5.22(b)) de información.



(a) Transmisión

(b) Recepción

Figura 5.22. Implementación del valor de verificación del CRC para los datos del supercapacitor

El valor de verificación generado mediante el algoritmo CRC (Figura 4.23) permitió realizar la transferencia de datos del supercapacitor mediante el sistema embebido, con el propósito de llevar a cabo un procesamiento de información mediante un software. Además, mediante la implementación del algoritmo CRC en el microcontrolador (Figura 4.24) permitió asegurar la integridad de los datos, a partir de la generación de un dato único de la trama de datos de la información eléctrica del supercapacitor.

### 5.3.1. Emulación de una celda de batería

Con la finalidad de realizar la emulación de una celda de batería, se llevó a cabo la caracterización de una celda de LiPo de la marca *Zippy*, con una capacidad de 0.24 Ah y un voltaje nominal de 3.7 V, Figura 5.23.



Figura 5.23. Celda de batería marca *Zippy*

Considerando el ciclo de ejecución para la caracterización de una celda, se obtuvo la curva de estado de carga (SOC) y la curva de corriente a través de la implementación del sistema de emulación, Figura 5.24.

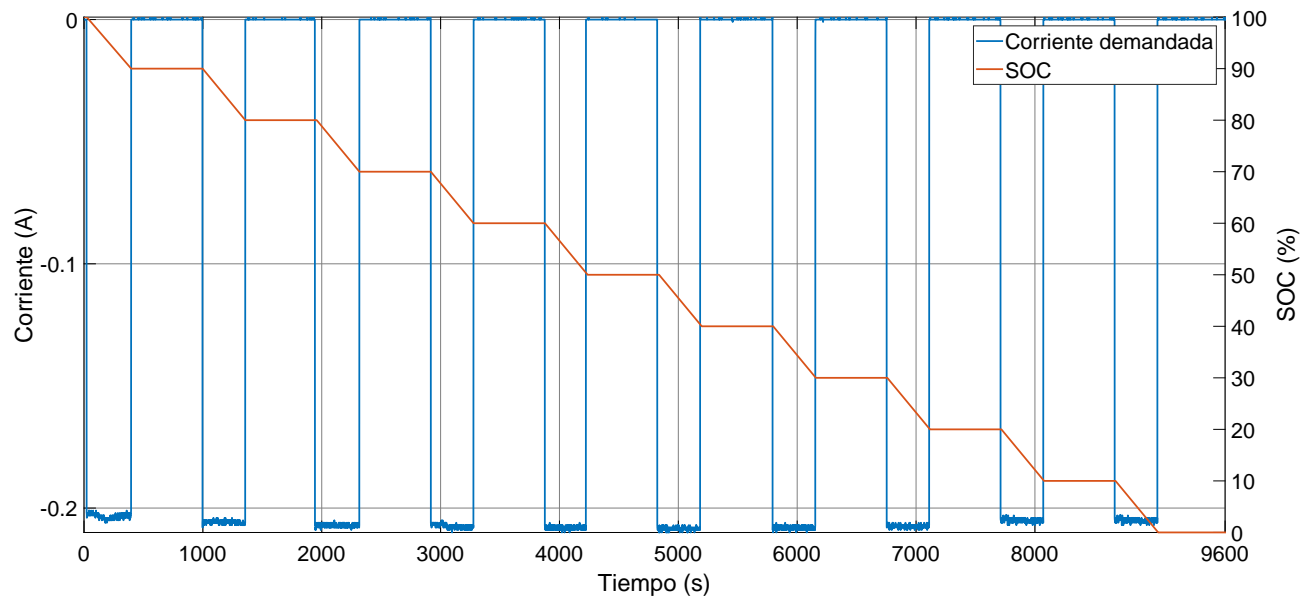


Figura 5.24. Curva de estado de carga y curva de corriente obtenida a través del sistema de emulación.

La curva de estado de carga y la curva de corriente permiten establecer el instante de desconexión de la etapa de descarga, con el propósito de determinar los parámetros del modelo con resistencia interna de una celda. Además, se obtuvo la curva de voltaje discretizado, Figura 5.25.

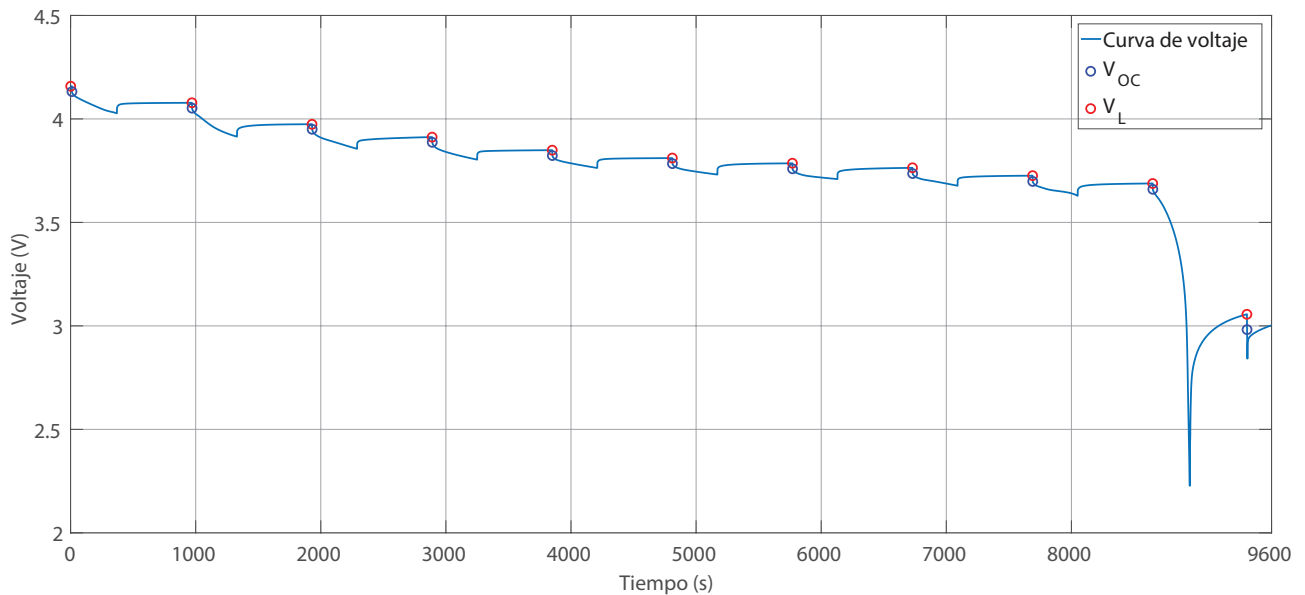


Figura 5.25. Curva de voltaje discretizado obtenido del sistema de emulación.

La curva de voltaje discretizado de la celda permite identificar la evolución del elemento de acumulación, con la intención de definir el comportamiento eléctrico considerando una determinada demanda de corriente a partir de puntos específicos de voltaje. Además, permitió definir un conjunto de datos, con la finalidad de configurar el estado de emulación del sistema embebido.

Posteriormente, se llevó a cabo la emulación de una celda de batería, que considera la carga de corriente aplicada a la celda real, Figura 5.26

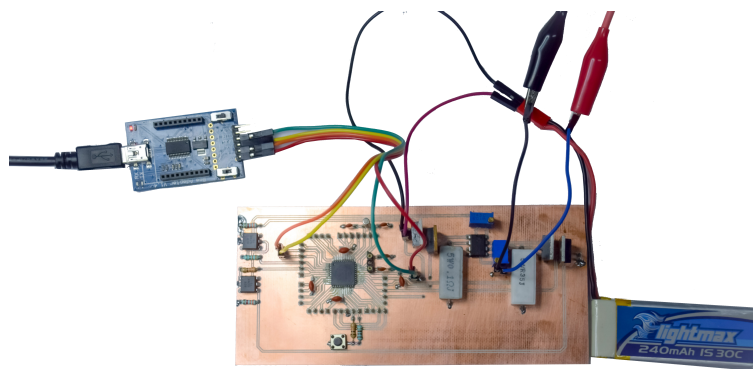


Figura 5.26. Implementación del sistema de emulación para una celda.

Además, se realizó una comparación del tiempo requerido para descargar una celda real y el sistema de emulación para una celda, donde se determinó que la emulación permite analizar el comportamiento de una celda con una duración de 16.50 s, Tabla 5.4, equivalente a una reducción de 99.54 %.

Tabla. 5.4. Comparación del tiempo requerido para descargar una celda de batería.

Método	Datos	Tiempo (s)
Descarga real	3,600	3,600
Emulación	3,600	16.50

Para llevar a cabo la validación de los datos del sistema de emulación, se realizó una comparación (Figura 5.27) entre la medición eléctrica del comportamiento de la celda de LiPo ( $V_{Celda}$ ) con los datos obtenidos durante la emulación ( $V_{Celda_{emulacion}}$ ).

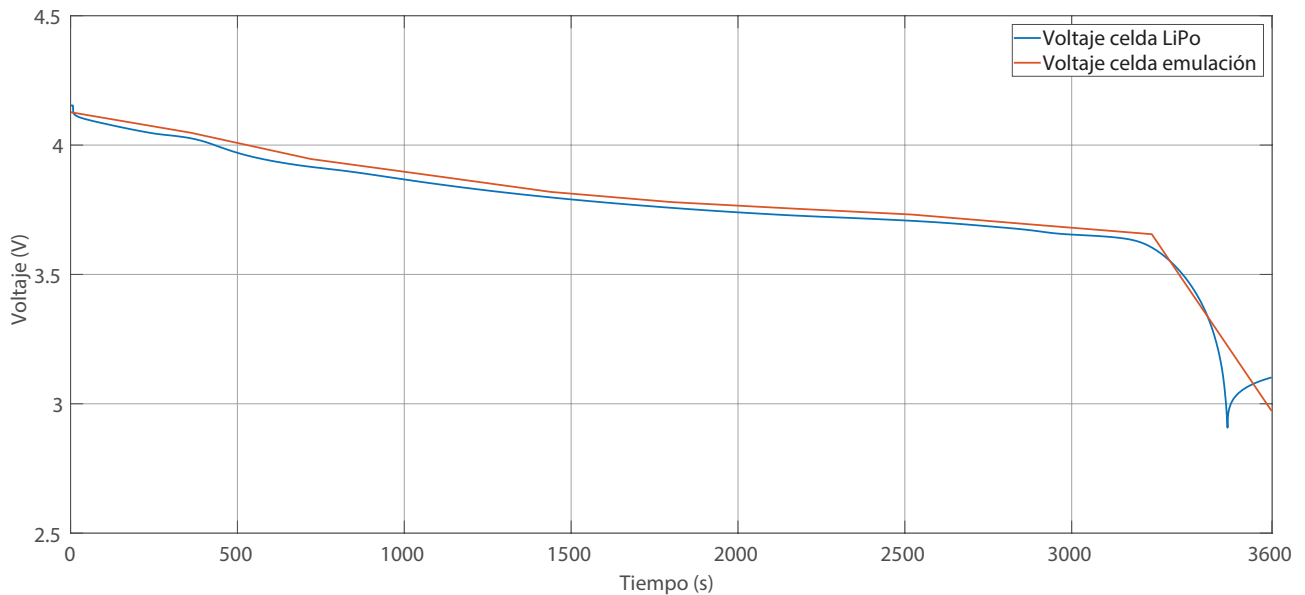


Figura 5.27. Comparación entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda.

A partir de la comparación de la evolución eléctrica entre la celda real y la emulación, se obtuvo una medición de error absoluto durante 3,600 s, con un valor máximo de 0.34 V cuando el *SOC* tiene un valor de 3.72 %, Figura 5.28.

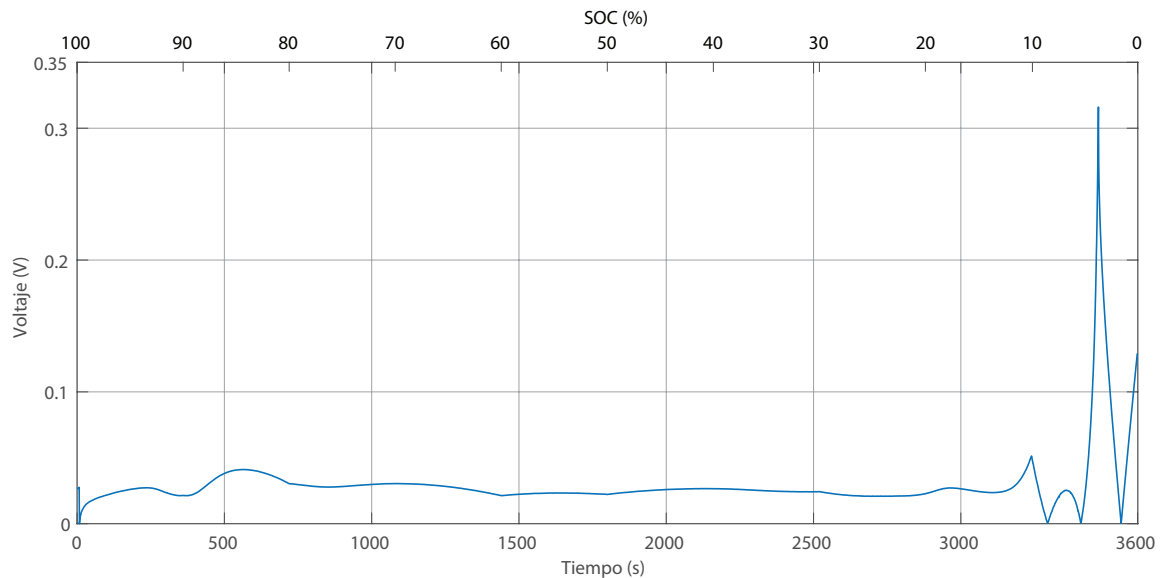


Figura 5.28. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda.

Además, se determinó un error relativo porcentual entre las mediciones eléctricas realizadas a la celda de LiPo y los datos obtenidos a través de la emulación, Figura 5.29, que experimenta un valor máximo de 13.57 % a los 3,467 s. Sin embargo, presenta un error relativo con un valor máximo de 1.42 % cuando la celda experimenta un SOC entre 80 % y 20 %.

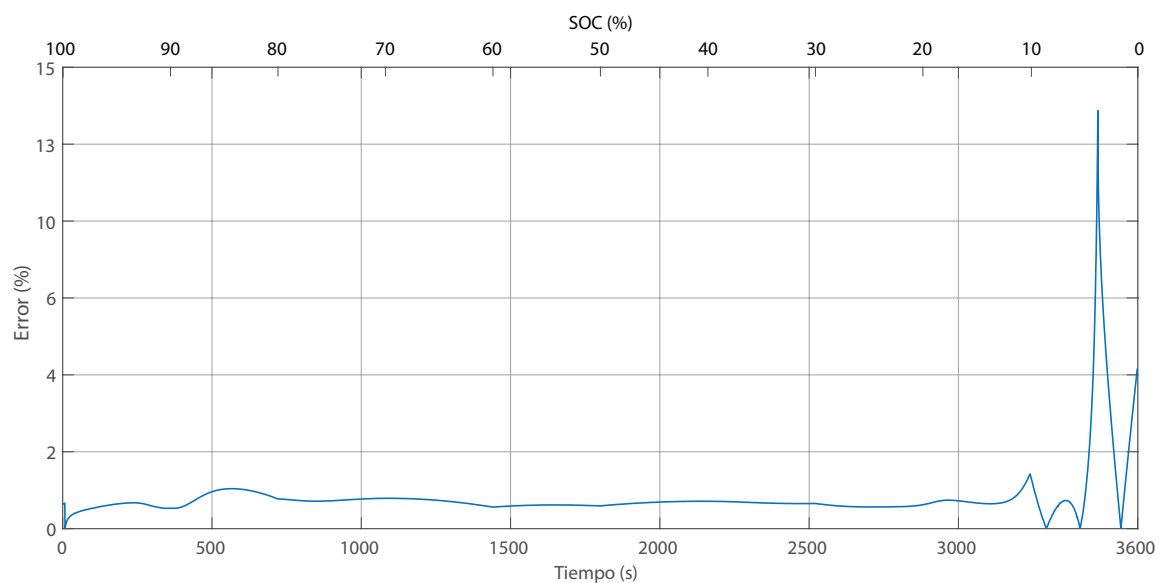


Figura 5.29. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de la celda.

Por otro lado, se llevó a cabo la comparación entre el tiempo requerido para llevar a cabo la simulación y el tiempo requerido para llevar a cabo la emulación, donde se determinó que la emulación permite determinar el comportamiento de la celda con una duración de 16.50 s, Tabla 5.5, equivalente a una reducción de 2.998 %

Tabla. 5.5. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de la celda de batería

Método	Datos	Tiempo (s)
Simulación	3,600	17.01
Emulación	3,600	16.50

Considerando los resultados que presenta el tiempo de cómputo requerido por la plataforma de simulación y tiempo de cómputo requerido por el sistema de emulación configurado con una celda, es posible concluir que la técnica para imitar el comportamiento de un elemento de acumulación es adecuada, debido a la posibilidad de realizar la emulación de una celda con una medición máxima de error absoluto de 0.34 V equivalente a un error relativo porcentual de 13.57 %.

### 5.3.2. Emulación de un supercapacitor

Con el propósito de realizar la emulación de un supercapacitor, se llevó a cabo la caracterización de un supercapacitor marca *Green-Cap*, con una capacitancia de 100 F y un voltaje nominal de 2.7 V, Figura 5.30.



Figura 5.30. Supercapacitor marca *Green-Cap*.

Considerando el ciclo de ejecución para la caracterización del supercapacitor, se obtuvo la curva de estado de carga (SOC) y la curva de demanda de corriente a través de la implementación del sistema de emulación, Figura 5.31

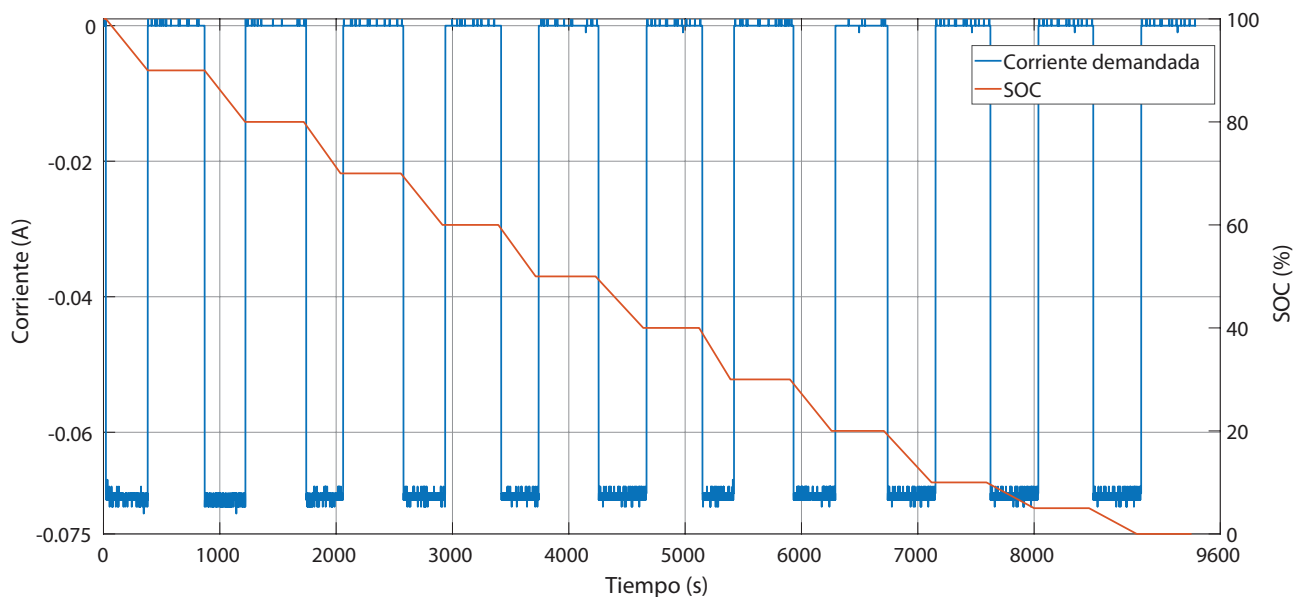


Figura 5.31. Curva de estado de carga y curva de corriente del supercapacitor obtenida a través del sistema de emulación.

La curva de estado de carga y la curva de demanda de corriente permiten definir el instante de desconexión de la etapa de descarga, con la intención de determinar los parámetros del modelo con resistencia interna del supercapacitor. Además, se obtuvo la curva de voltaje discretizado, Figura 5.32.

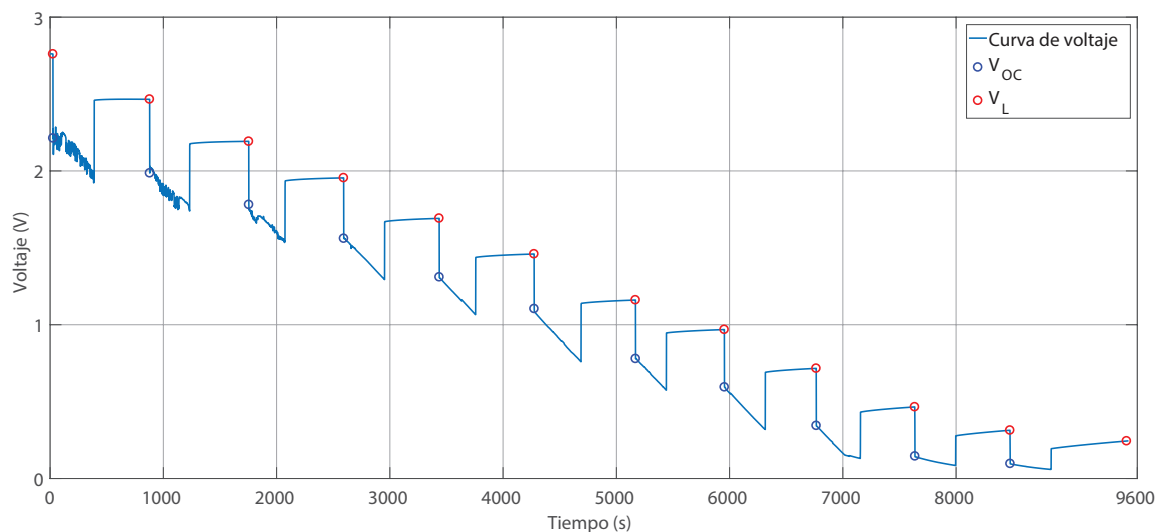


Figura 5.32. Curva de voltaje discretizado del supercapacitor obtenida a través del sistema de emulación.

La curva de voltaje discretizado del supercapacitor permite identificar la evolución del elemento de acumulación, con el propósito de establecer el comportamiento eléctrico considerando una determinada demanda de corriente en función de puntos específicos de voltaje. Además, permitió definir un conjunto de datos, con el propósito de configurar el estado de emulación del sistema embebido.

Posteriormente, se llevó a cabo la emulación del supercapacitor, que considera la carga de corriente aplicada a un supercapacitor real, Figura 5.33.

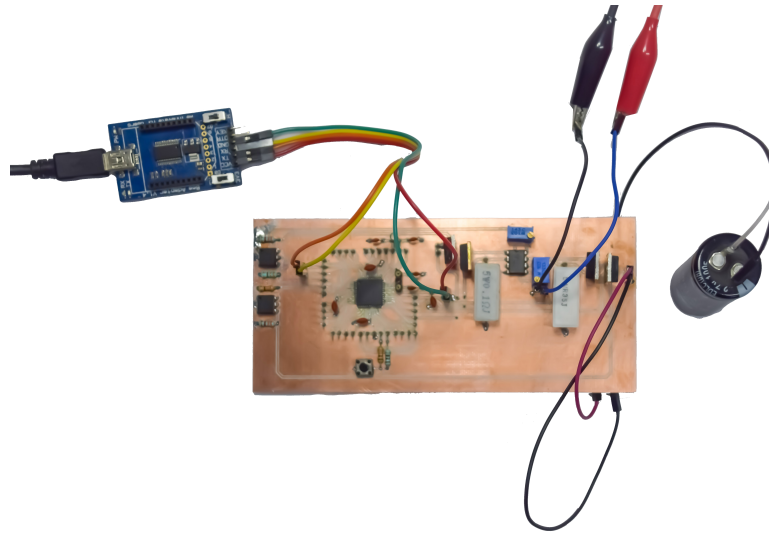


Figura 5.33. Implementación del sistema de emulación para un supercapacitor.

Asimismo, se realizó una comparación del tiempo requerido para descarga un supercapacitor real y el sistema de emulación para un supercapacitor, donde se determinó que la emulación permite analizar el comportamiento de un supercapacitor con una duración de 14.20 s, Tabla 5.6, equivalente a una reducción de 99.605 %

Tabla. 5.6. Comparación del tiempo requerido para descargar un supercapacitor.

Método	Datos	Tiempo (s)
Descarga real	3,600	3,600
Emulación	3,600	14.20

Para realizar la validación de los datos del sistema de emulación, llevó a cabo una comparación entre la medición eléctrica del comportamiento del supercapacitor ( $V_{SC}$ ) con los datos que se obtuvieron durante la emulación ( $V_{SC_{emulacion}}$ ), Figura 5.34.

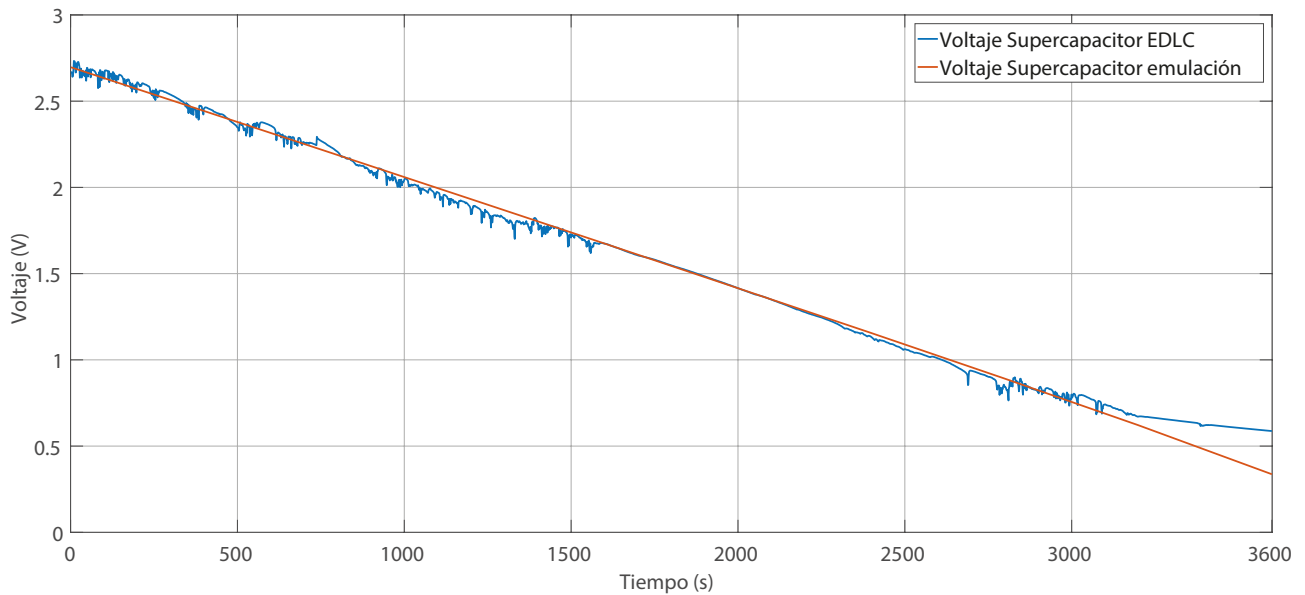


Figura 5.34. Comparación entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga de un supercapacitor.

A partir de la comparación de la evolución eléctrica entre el supercapacitor real y la emulación, se obtuvo una medición de error absoluto durante 3,600 s, con un valor máximo de 0.25 V cuando el  $SOC$  tiene un valor de 0%, Figura 5.35.

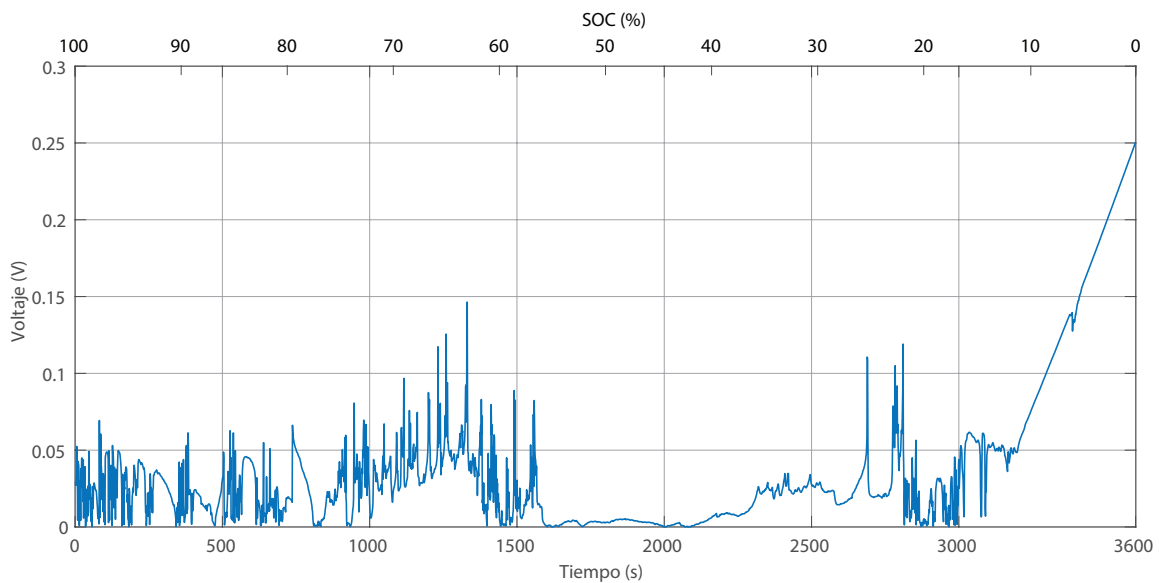


Figura 5.35. Medición de error entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga del supercapacitor.

Además, se determinó un error relativo porcentual entre las mediciones eléctricas realizadas al supercapacitor EDLC y los datos obtenidos a través de la emulación, Figura 5.36, que experimenta un valor máximo de 14.58 % a los 3,600 s.

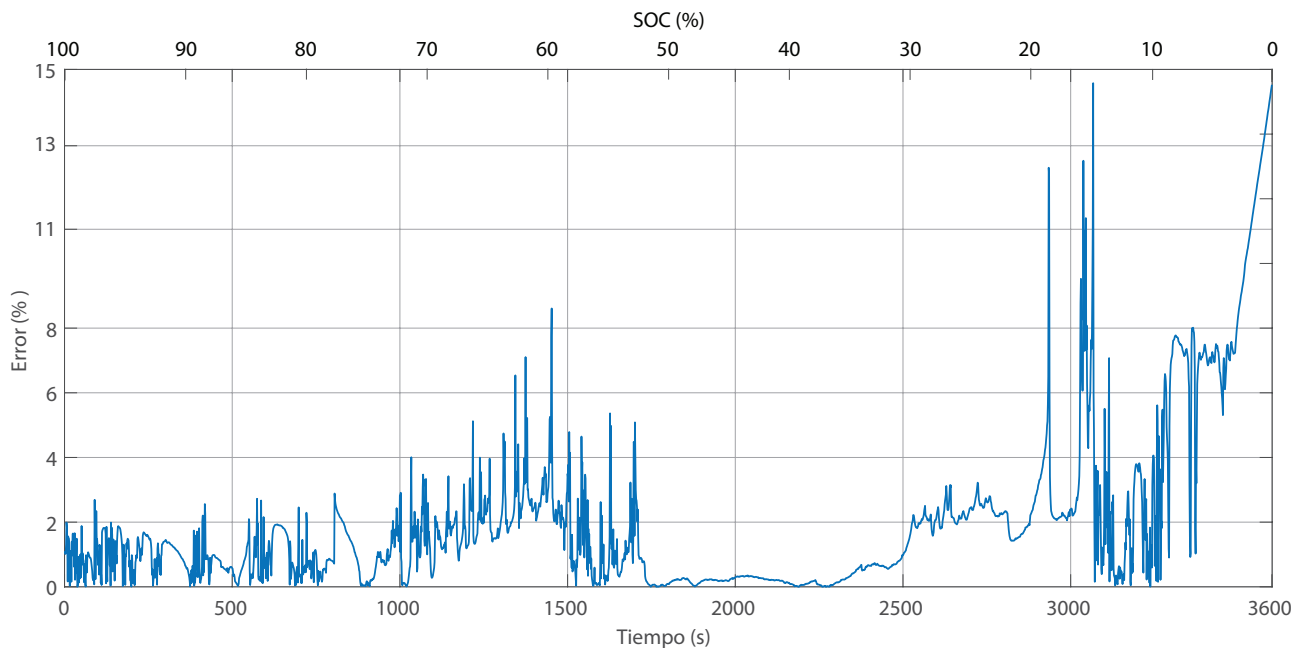


Figura 5.36. Medición de error porcentual entre los datos de emulación y los datos de medición de descarga del supercapacitor.

Por otro lado, se llevó a cabo la comparación entre el tiempo requerido para llevar a cabo la simulación y el tiempo requerido para llevar a cabo la emulación, donde se determinó que la emulación permite determinar el comportamiento del supercapacitor con una duración de 14.20 s, Tabla 5.7, equivalente a una reducción de 7.250 %

Tabla. 5.7. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de un supercapacitor.

Método	Datos	Tiempo (s)
Simulación	3,600	15.31
Emulación	3,600	14.20

Considerando los resultados que presenta el sistema de emulación configurado con las características de un supercapacitor, es posible concluir que la técnica para imitar el comportamiento de un elemento de acumulación es adecuada, debido a la posibilidad de realizar la emulación de un supercapacitor con una medición máxima de error absoluto de 0.25 V, equivalente a un error relativo porcentual de 14.58 %.

## 5.4. Validación del sistema de emulación de un SAEH

Con el propósito de analizar el suministro de energía de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en un tren de potencia, se propone emplear el modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido con topología serie (Tabla 5.8) [70].

Tabla. 5.8. Parámetros de un vehículo eléctrico híbrido [70].

Parámetro	Magnitud	Unidades
Motor de combustión interna	200	kW
Engranajes	6	
Relación de engranajes	1(4.59), 2(2.25), 3(1.54), 4(1.0), 5(0.75), 6(0.65)	
Masa	15,000	kg
Área frontal	7.5	$m^2$
Coefficiente de arrastre	0.621	
Resistencia de rodamiento	0.009	
Neumático (Llanta)	315/80/R22.5 (0.5455m)	
Potencia SAEH	18.884	kWh
Tiempo de muestreo	0.1	s

Además, para analizar el comportamiento del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido, se requiere determinar la demanda de energía durante un ciclo de operación. En consecuencia, se propone utilizar un ciclo de conducción real, con la intención de determinar la demanda de energía de un vehículo eléctrico híbrido en condiciones reales de manejo, Figura 5.37.

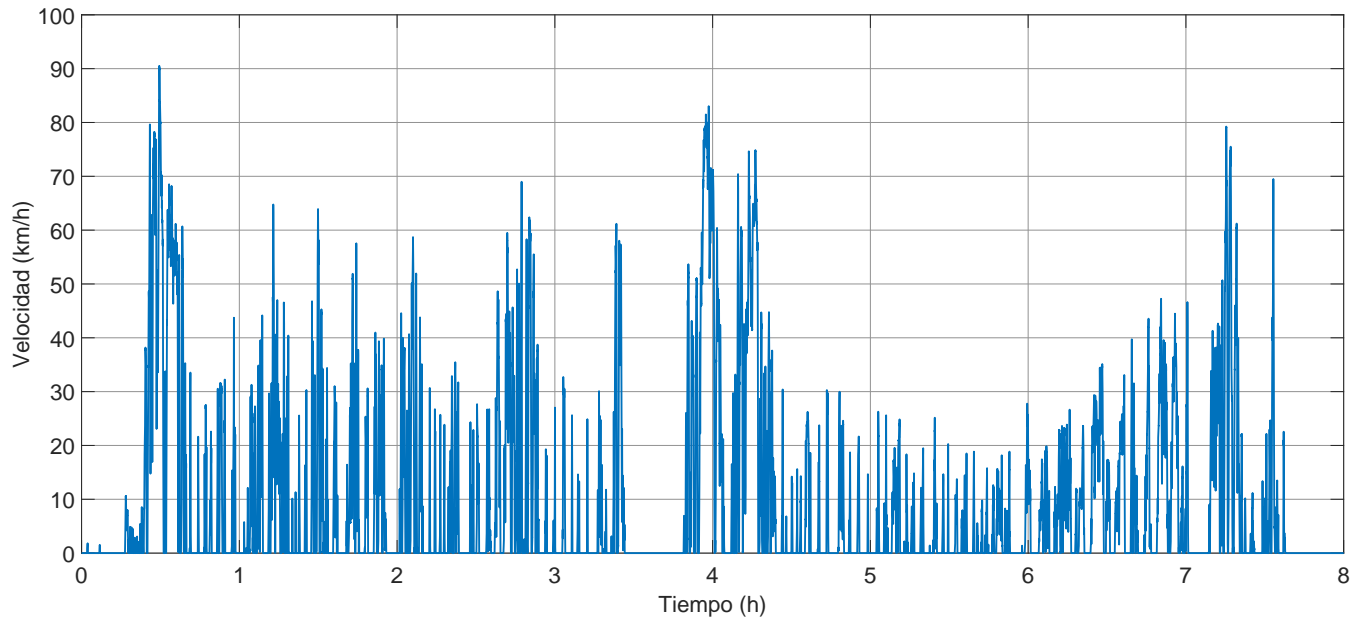


Figura 5.37. Ciclo de conducción real de un vehículo eléctrico híbrido.

Por ello, se empleará el modelo de un SAEH en el modelo de un VEH, que considera un sistema de almacenamiento de energía híbrido con una capacidad de 17.054 kWh para un conjunto de celdas de batería de LiPo y una capacidad de 1.8 kWh para un conjunto de supercapacitores de doble capa eléctrica.

Con el propósito de controlar el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía híbrido con una topología activa, se propone un sistema de gestión de energía basado en reglas, Ecuación 5.1.

$$P_{fuente} = \begin{cases} Bat & \text{Si } (P_e \leq P_{Bat}), P_e \leq 0 \parallel (P_e \leq P_{Bat}), P_e > 0 \\ Bat + SC & \text{Si } (P_e > P_{Bat} \text{ y } P_e \leq P_{SC}), P_e \leq 0 \parallel (P_e > P_{Bat} \text{ y } P_e \leq P_{SC}), P_e > 0 \\ Bat + SC + MCI & \text{Si } (P_e > P_{Bat} \text{ y } P_e > P_{SC}, P_e \leq 0) \end{cases} \quad (5.1)$$

El sistema de gestión de energía permitirá determinar el elemento de acumulación que suministre energía en el tren de potencia, con la intención de incrementar la autonomía de conducción del vehículo eléctrico híbrido. Además, permitirá reducir la demanda de energía agresiva a la batería, considerando las características energéticas de los elementos de acumulación de energía.

Por otro lado, el modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido, Figura 5.38, permite analizar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido considerando la evolución del estado de carga (*SOC*).

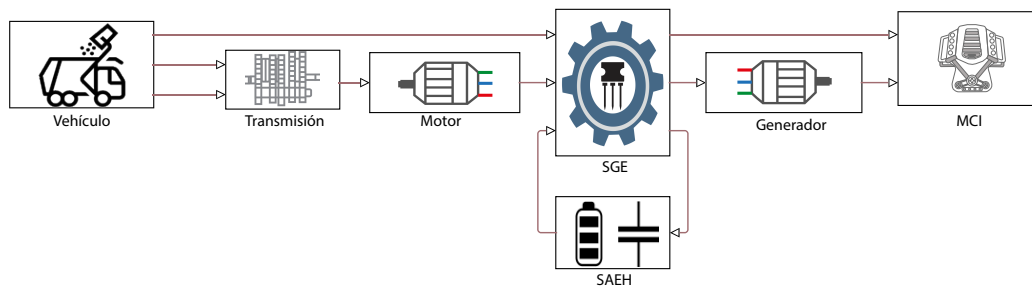
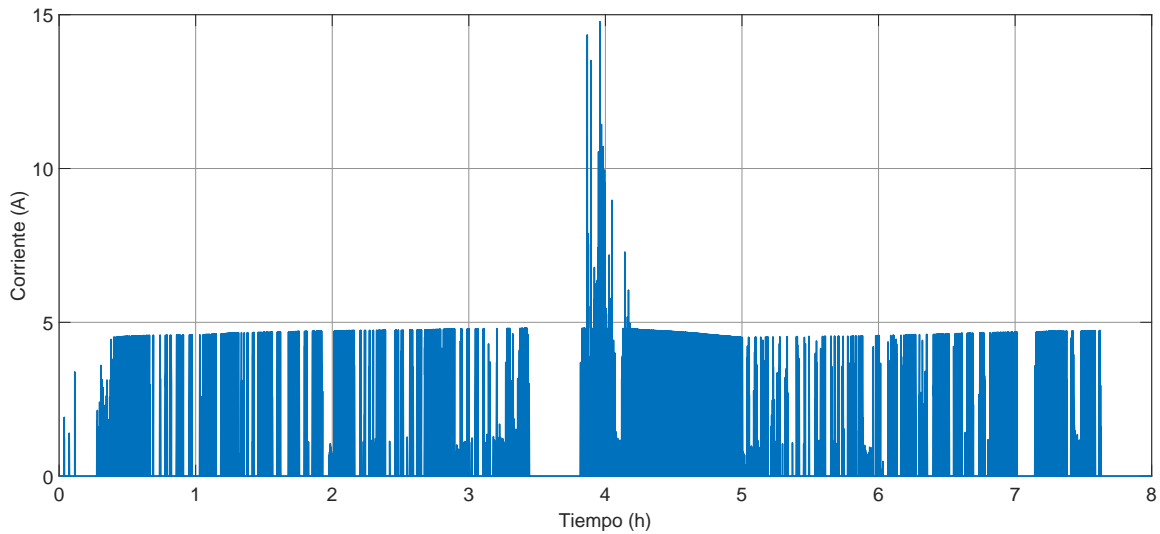


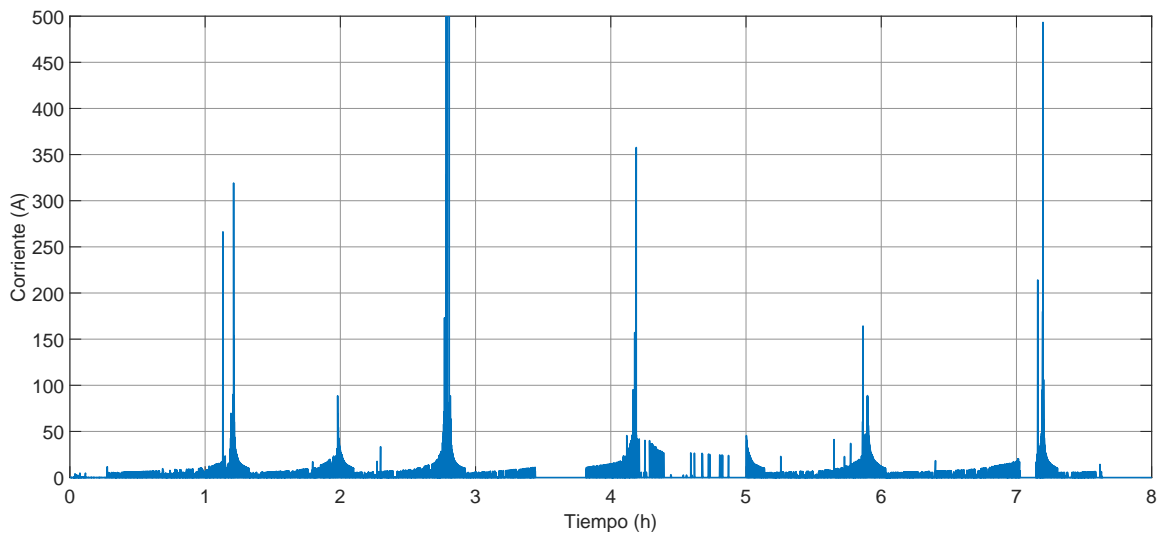
Figura 5.38. Modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido desarrollado en *Simulink*®.

Además, con la finalidad de analizar el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía con topología activa basado en celdas y supercapacitores basado en la interconexión de  $N_S$  celdas y  $N_{SC}$  supercapacitores, se llevó a cabo una simulación con el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido considerando el sistema de gestión de energía basado en reglas.

Posteriormente, se llevó a cabo la emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido, considerando la demanda de corriente para un conjunto de celdas de batería (Figura 5.39(a)) y la demanda de corriente para un conjunto de supercapacitores (Figura 5.39(b)) en función del ciclo de conducción real. La demanda de corriente para cada elemento de acumulación se determinó a partir del tren de potencia, que considera los datos obtenidos a través de la ejecución de la simulación del modelo del vehículo eléctrico híbrido.



(a) Demanda de corriente para el conjunto de celdas de batería



(b) Demanda de corriente para el conjunto de supercapacitores

Figura 5.39. Demanda de corriente para el SAEH en función del ciclo de conducción real.

El sistema de emulación considera la interconexión de  $N_S$  celdas de la marca *Flightmax*, con un voltaje nominal de 3.7 V, una capacidad de 0.24 Ah y la interconexión de  $N_{SC}$  supercapacitores de la marca *Green-Cap*, con un voltaje nominal de 2.7 V y una capacitancia de 100 F.

Finalmente, se llevó a cabo el diseño de una aplicación, con el propósito de interactuar con el sistema embebido para imitar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido en función del comportamiento del tren de potencia, Figura 5.40.

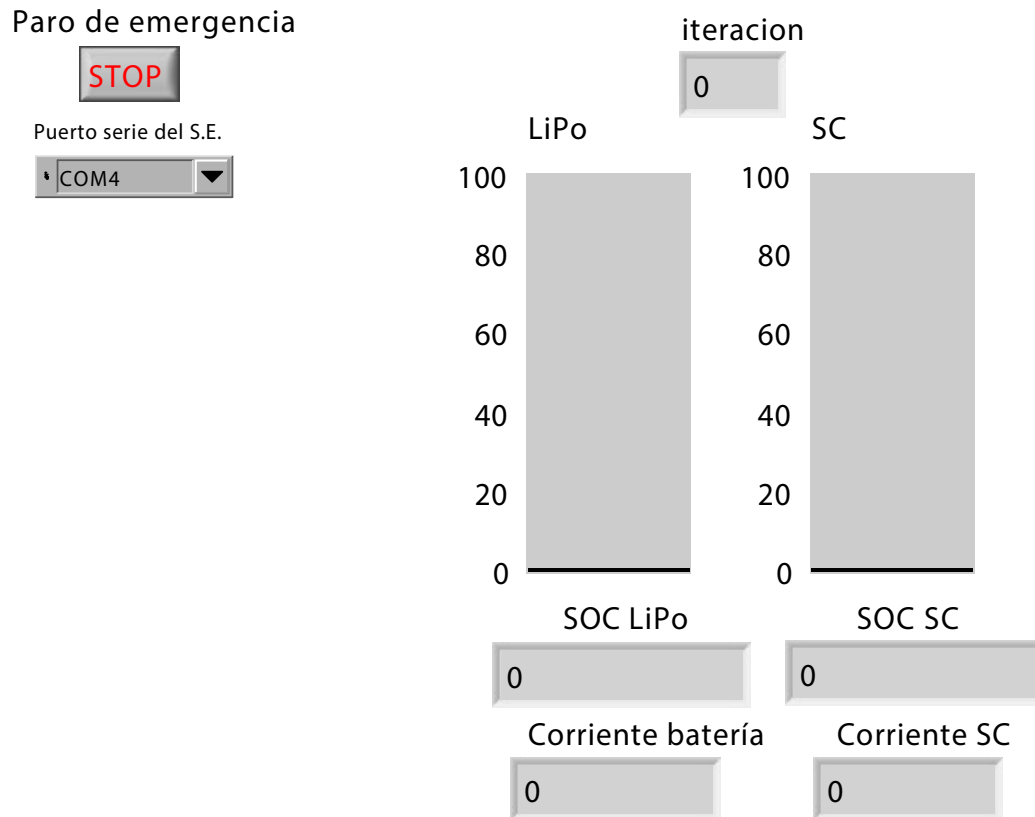
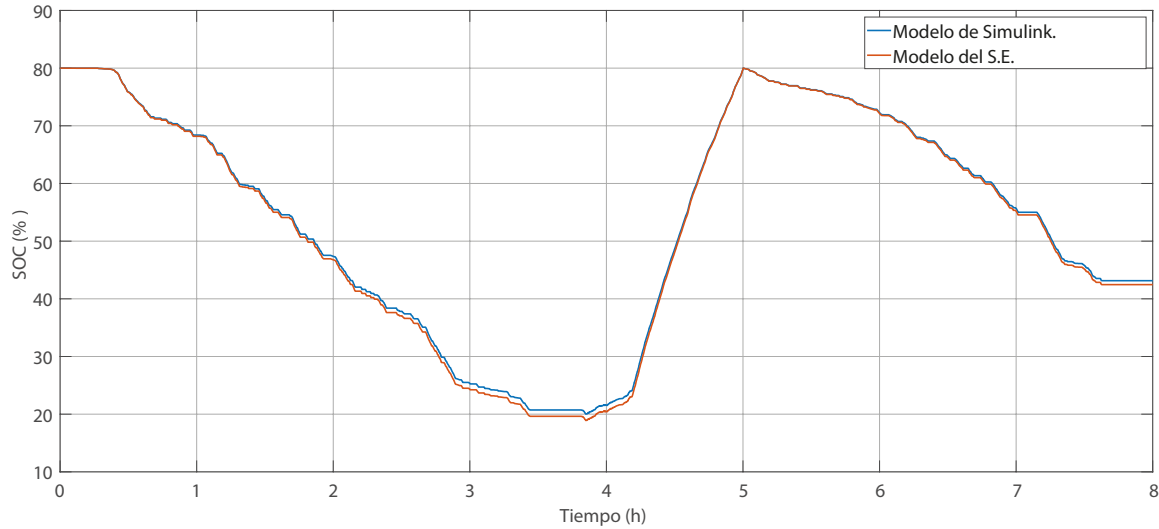


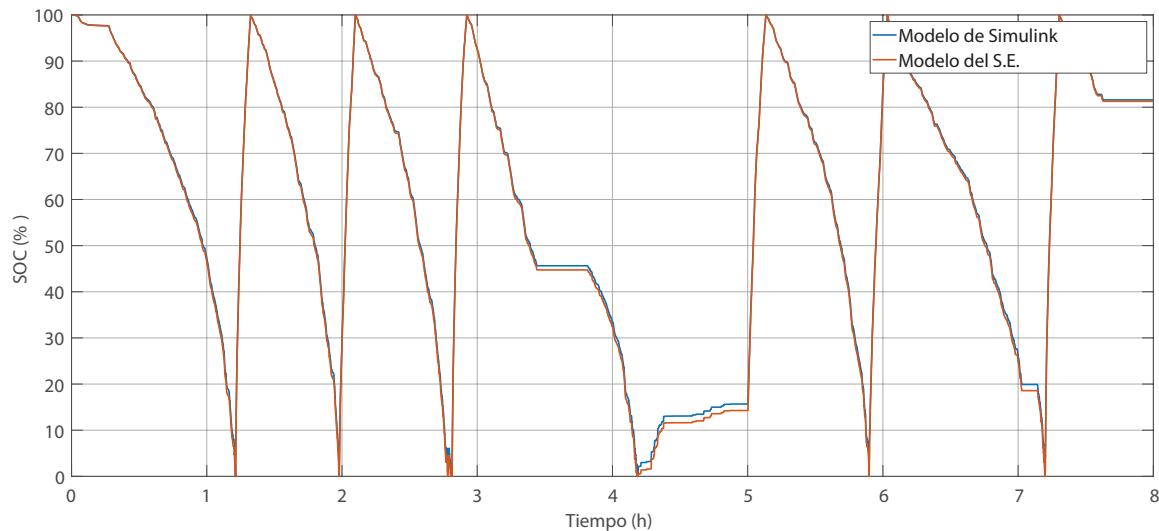
Figura 5.40. Aplicación para validar el comportamiento del sistema de emulación en función del tren de potencia.

La aplicación permitirá establecer una comunicación con el sistema embebido, con la finalidad de llevar a cabo una validación en función del ciclo de conducción real. Además, la aplicación establece una interfaz de usuario gráfica, a partir de la implementación de indicadores para visualizar en tiempo real la emulación del SAEH.

Posteriormente, se realizó la comparación del  $SOC$  obtenido mediante la simulación ( $SOC_{referencia}$ ) y el comportamiento del  $SOC$  obtenido a través de la emulación ( $SOC_{aproximado}$ ), Figura 5.41.



(a) Comportamiento del SOC de las celdas de batería

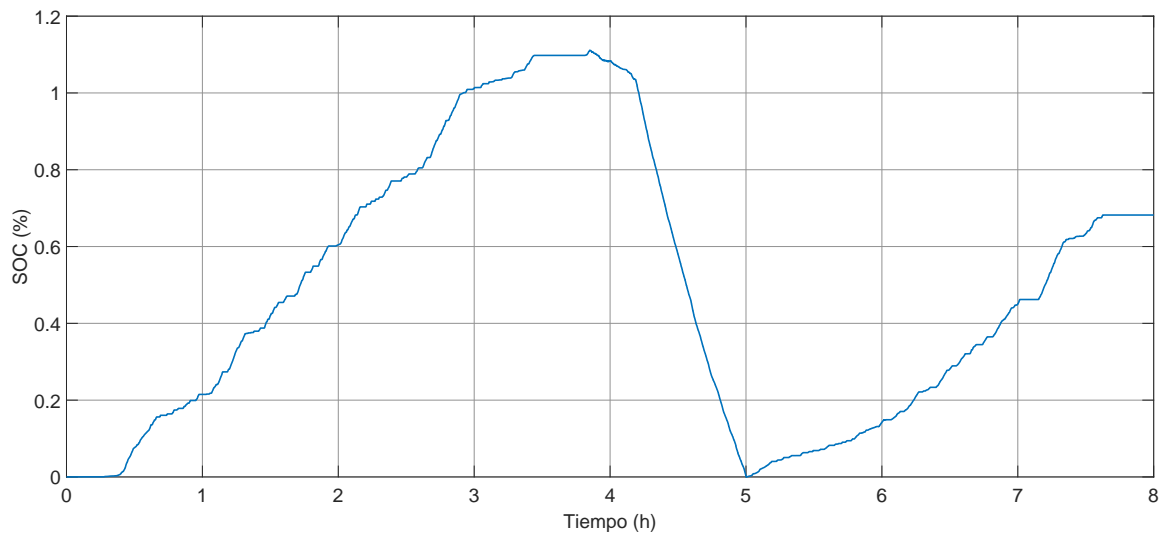


(b) Comportamiento del SOC del conjunto de supercapacitores

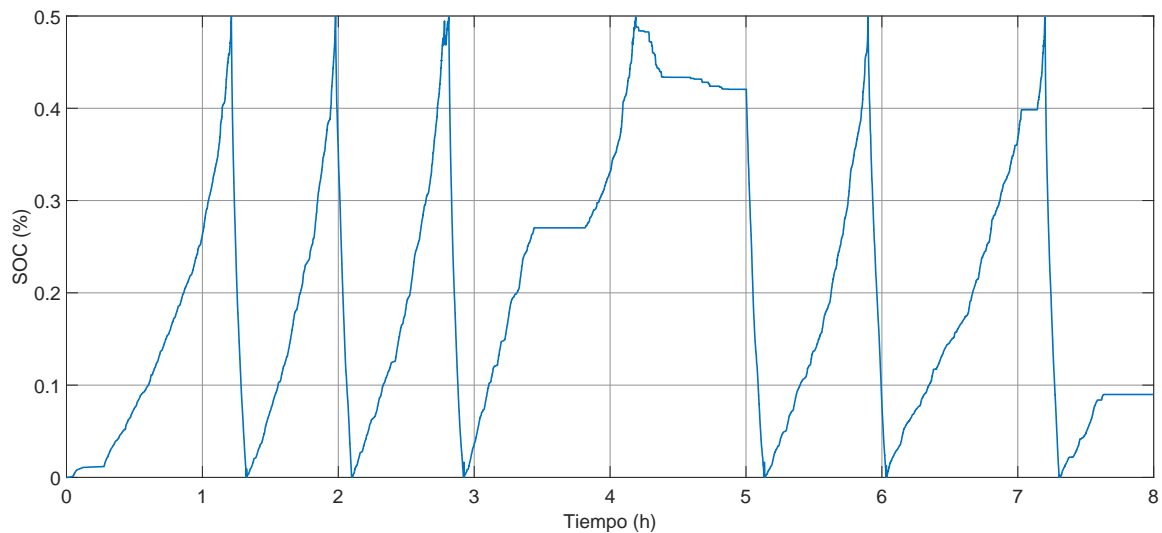
Figura 5.41. Comparación entre los datos del  $SOC$  de la simulación y los datos del  $SOC$  de la emulación del SAEH

La comparación permitirá determinar el correcto funcionamiento del sistema de emulación, a partir de la interpretación de los resultados. Además, permitirá validar la metodología de caracterización, mediante el análisis de una variable del SAEH en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido.

A partir de los datos obtenidos mediante la simulación y los datos obtenidos mediante la emulación del estado de carga del sistema de almacenamiento de energía híbrido de un vehículo eléctrico híbrido, se obtuvo en el conjunto de celdas de batería un error absoluto con un valor máximo de 1.11 %, a las 3.851 h del ciclo de conducción real (Figura 5.42(a)), y se obtuvo en el conjunto de supercapacitores un error absoluto con un valor máximo de 5.01 %, (Figura 5.42(b))



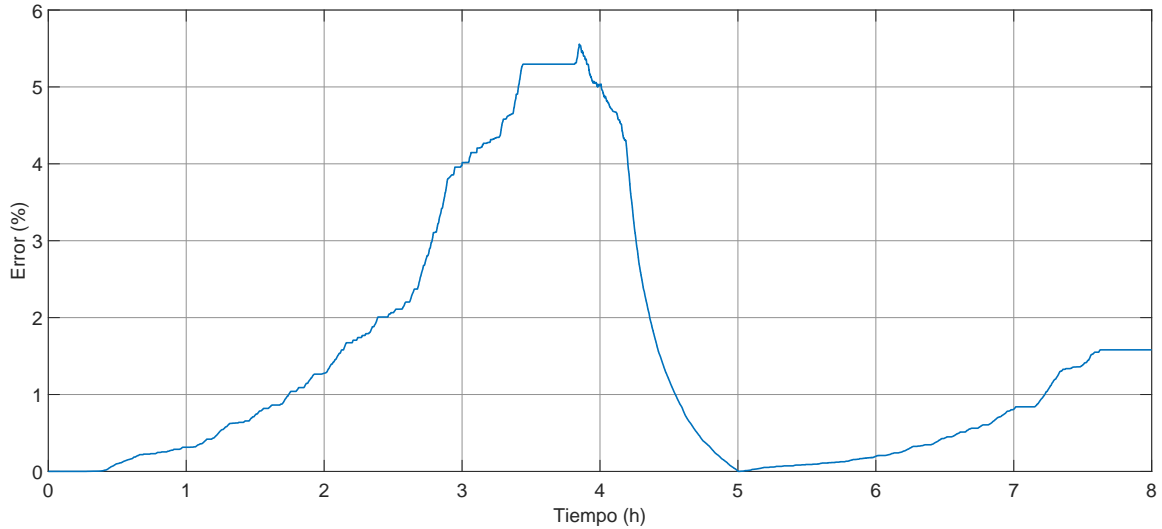
(a) Error absoluto de las celdas de batería



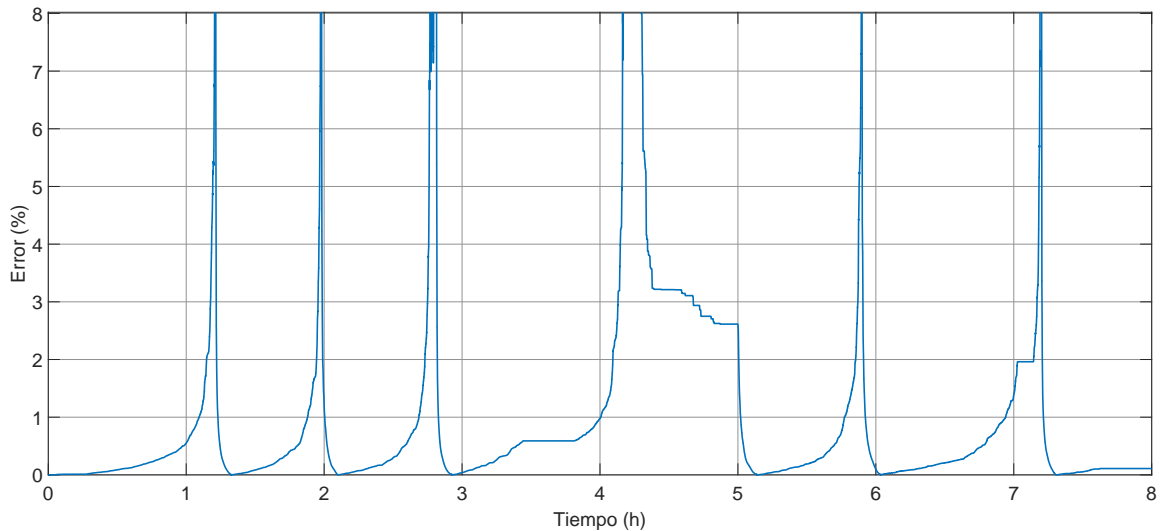
(b) Error absoluto del conjunto de supercapacitores

Figura 5.42. Error absoluto entre los datos del *SOC* de la simulación y los datos del *SOC* de la emulación del SAEH

Asimismo, se obtuvo un error relativo porcentual entre los datos obtenidos de la simulación y los datos obtenidos de la emulación, con un valor máximo en el conjunto de celdas de batería de 5.555 % a las 3.851 h del ciclo de conducción real (Figura 5.43(a)) y un valor máximo en el conjunto de supercapacitores de 8.01 % (Figura 5.43(b)).



(a) Error relativo porcentual del conjunto de celdas de batería



(b) Error relativo porcentual del conjunto de supercapacitores

Figura 5.43. Error relativo porcentual entre los datos del *SOC* de la simulación y los datos del *SOC* de la emulación del SAEH

Considerando los diversos métodos para analizar el comportamiento de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en celdas de batería y supercapacitores, se determinó que la emulación permite analizar la evolución eléctrica de cada elemento de acumulación con un bajo tiempo de procesamiento de datos, Tabla 5.9 con una reducción de tiempo del 52.85 %.

Tabla. 5.9. Comparación entre los métodos de análisis del comportamiento de un SAEH.

Método	Datos	Tiempo (s)
Simulación	288,000	1,595
Emulación	288,000	752

## 5.5. Conclusiones

A partir de la propuesta de la metodología de caracterización de una celda y un supercapacitor, se llevó a cabo la simulación de la metodología de caracterización de cada elemento de acumulación. Además permitió llevar a cabo la validación de la metodología de caracterización, a partir de la comparación de los datos de una celda y un supercapacitor con el modelo matemático con resistencia interna.

Con la finalidad de implementar la metodología de caracterización de los elementos que conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, se llevó a cabo la emulación de una celda y un supercapacitor considerando el sistema de emulación. Además, se llevó a cabo la comparación del tiempo requerido para llevar a cabo la descarga de un elemento de acumulación y la emulación, que permitió obtener un tiempo de ejecución de 16.50 s para llevar a cabo el procesamiento de los datos para una celda de batería y 14.20 s para realizar el procesamiento de los datos para un supercapacitor. Asimismo, se llevó a cabo una comparación del tiempo de cómputo requerido para analizar el comportamiento de los elementos básicos, que permitió definir que la emulación requiere de un reducido tiempo de cómputo.

Finalmente, considerando los datos obtenidos durante la emulación de los elementos básicos de acumulación de energía, se llevó a cabo la interconexión de los elementos de acumulación de energía para definir un sistema de almacenamiento de energía híbrido en el sistema de emulación. Además, se llevó a cabo la comparación del tiempo requerido entre una simulación, y la emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido con una capacidad de 17.054 kWh para las celdas de batería y 1.8 kWh supercapacitores de doble capa eléctrica, que permitió determinar que la emulación requiere de 752 s para procesar los datos correspondientes a un ciclo de conducción real con una reducción de tiempo del 52.85 %.

## Conclusiones generales y trabajo futuro

En el presente trabajo de tesis se desarrolló una metodología de emulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para un vehículo eléctrico híbrido, en consecuencia, se realizó lo siguiente:

- Un estudio enfocado en los elementos que conforman un vehículo eléctrico híbrido, con la finalidad de determinar la relación que existe durante la tracción de un vehículo. En consecuencia, se determinó que una topología serie permite una interconexión de los elementos del tren de potencia, con la intención de analizar el flujo de energía que contribuye en la generación de la tracción. A partir de la topología de interconexión de los elementos del tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido se propuso emplear el modelo cuasi-estático de un VEH, con el objetivo de definir el comportamiento de un tren de potencia híbrido con topología serie.
- A partir del modelo cuasi-estático de un vehículo eléctrico híbrido con topología serie, es necesario definir el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía híbrido, en consecuencia, se llevó a cabo el estudio de las características físicas de una celda de batería y un supercapacitor, con el propósito de establecer los elementos que intervienen en la generación y acumulación de energía. Además, se realizó el estudio de las características eléctricas de una celda de batería y un supercapacitor, con la intención de analizar la respuesta de cada elemento de acumulación de energía.
- En función de las características físicas y eléctricas de una celda de batería y un supercapacitor, se determinó que existen diversas tecnologías que contribuyen en el comportamiento de un tren de potencia híbrido, por ello, se concluyó que la tecnología de LiPo para una celda de batería y la tecnología de doble capa eléctrica para un supercapacitor son una solución para el suministro de energía, debido a que impactan en la autonomía de un vehículo eléctrico híbrido. Considerando el comportamiento de una celda de batería LiPo y un supercapacitor de doble capa eléctrica, se determinó que existen diversas topologías de interconexión, por ello, la topología de interconexión activa de un sistema de almacenamiento de energía híbrido permite controlar los dispositivos de acumulación de energía, a partir de una estrategia de control de energía.
- Considerando la topología de interconexión de una batería y un supercapacitor, se requiere determinar una representación matemática para representar la evolución eléctrica de un sistema de almacenamiento de energía híbrido. En consecuencia, se realizó un análisis de los modelos matemáticos de los elementos de acumulación de energía, que permiten definir el comportamiento de una celda de batería y un supercapacitor. A partir del análisis

de los modelos matemáticos se determinó que el modelo con resistencia interna para la celda de batería y para el supercapacitor permiten representar la evolución eléctrica de cada elemento de acumulación, debido a que requiere un tiempo mínimo de cómputo para reproducir las características eléctricas de un SAEH.

- Considerando el modelo matemático para un sistema de almacenamiento de energía híbrido, es necesario determinar el comportamiento real de una celda de batería y de un supercapacitor, por esto, se realizó un estudio de los métodos de caracterización de los sistemas de almacenamiento de energía híbrido. Que permitió determinar que la metodología de pulso incremental permite obtener el comportamiento de una celda de batería. A partir de la metodología de pulso incremental, se propuso una metodología de caracterización que considera una etapa de descarga y una etapa de identificación. Finalmente, se propuso emplear la metodología de caracterización de una celda de batería en un supercapacitor, con la finalidad de obtener la evolución eléctrica.
- A partir del diseño del sistema de emulación del sistema de almacenamiento de energía híbrido, se propuso llevar a cabo la implementación del sistema de emulación. Para esto, se realizó la simulación de los elementos de acumulación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido, con el propósito de validar la metodología de caracterización.
- Se llevó a cabo la simulación de la metodología de caracterización de una celda de batería en MATLAB *Simulink*<sup>®</sup>, considerando las características reales de una celda de batería LiPo, logrando un error absoluto cercano a 0.9 V entre el modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna, equivalente a un error relativo cercano a 38.86 %. Sin embargo, la comparación presenta un error relativo con un valor máximo de 6.09 % cuando la celda de batería experimenta un *SOC* entre 80 % y 20 %.
- Posteriormente, se realizó la simulación de la metodología de caracterización de supercapacitor en MATLAB *Simulink*<sup>®</sup>, considerando las características reales de un supercapacitor de doble capa eléctrica, logrando un error absoluto cercano a 0.25 V entre el modelo de *Simulink*<sup>®</sup> y el modelo con resistencia interna, equivalente a un error relativo cercano a 12.86 %.
- En función de los resultados que se obtuvieron mediante la simulación de los elementos de acumulación de energía, se llevó a cabo la emulación de una celda de batería y de un supercapacitor mediante el sistema de emulación. Por consiguiente, se realizó la emulación de una celda, considerando las características de una celda de LiPo de la marca *Zippy*, con una capacidad de 0.24 Ah y un voltaje nominal de 3.7 V. Se determinó un error absoluto entre las mediciones eléctricas realizadas a la celda de LiPo marca *Zippy* y los datos obtenidos a través de emulación, logrando un error absoluto con un valor máximo de 0.34 V equivalente a un error relativo porcentual máximo de 13.57 % cuando el *SOC* tiene un valor de 3.72 %. No obstante, presenta un error relativo con un valor máximo de 1.42 % cuando la celda experimenta un *SOC* entre 80 % y 20 %.
- Se realizó la emulación de un supercapacitor, considerando las características de un supercapacitor de doble capa eléctrica de la marca *Green-Cap*, con una capacidad de 100 F y un voltaje nominal de 2.7 V. Se determinó un error absoluto entre las mediciones eléctricas realizadas al supercapacitor de la marca *Green-Cap* y los datos obtenidos a través de

emulación, logrando un error absoluto con un valor máximo de 0.25 V equivalente a un error relativo porcentual máximo de 14.58 % cuando el *SOC* tiene un valor de 0 %.

- Considerando los resultados que se obtuvieron a través de la emulación de los elementos básicos de acumulación de energía, se llevó a cabo la validación del sistema de almacenamiento de energía híbrido con topología activa a través del sistema de emulación. Por esto, se emplearon las características reales de un vehículo de recolección de basura, con la finalidad de determinar la demanda de energía del tren de potencia.
- A partir de la demanda de energía del vehículo de recolección de basura, se empleó un sistema de almacenamiento de energía híbrido con una capacidad de 17.054 kWh para el conjunto de celdas de batería y una capacidad de 1.8 kWh para el conjunto de supercapacitores. Posteriormente, se propuso un sistema de gestión de energía basado en reglas, con la finalidad de controlar el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía híbrido con una topología activa.
- Finalmente, se llevó a cabo una comparación entre los datos obtenidos a través de la simulación del SAEH en el tren de potencia de un vehículo eléctrico híbrido con topología serie y los datos obtenidos a través del sistema de emulación, que permitió hacer una comparación entre el *SOC* del conjunto de celdas de batería con un error absoluto de 1.11 % equivalente a un error relativo porcentual de 5.555 % a las 3.581 h del ciclo de conducción y error absoluto en el conjunto de supercapacitores equivalente a 5.01 % proporcional a un error relativo de 8.01 %

Con el propósito de mejorar el desempeño del sistema de emulación del sistema de almacenamiento de energía, se ha propuesto los siguientes puntos a través de un **trabajo futuro**:

- Implementar un protocolo de comunicación de datos alternativo, con la finalidad de incrementar el tiempo de respuesta del sistema de emulación
- Emplear otra representación matemática del sistema de almacenamiento de energía híbrido, con la intención de mejorar la precisión de la evolución eléctrica de una celda de batería y un supercapacitor.
- Mejorar el algoritmo de detección de parámetros, con el propósito de obtener los parámetros del modelo matemático con una mayor precisión.
- Realizar una comparación entre diversos fabricantes de microcontroladores, con el propósito de mejorar el tiempo de cómputo del sistema de almacenamiento de energía híbrido.

## Referencias

- [1] S. Kocman, T. Hrubý, P. Pečínka, and A. Neumann. Fem model of asynchronous motor for analysis of its parameters. In *2016 ELEKTRO*, pages 315–319, May 2016.
- [2] O. Dobzhanskyi, E. Amiri, and R. Gouws. Comparison analysis of electric motors with two degrees of mechanical freedom: Pm synchronous motor vs induction motor. In *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, pages 14–17, Oct 2016.
- [3] S. Akita, T. Higuchi, Y. Yokoi, T. Abe, T. Shirotani, and S. Makino. Design analysis of a line-start permanent magnet linear synchronous motor. In *2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, pages 1–4, Sept 2017.
- [4] A. Castagnini, T. Känsäkangas, J. Kolehmainen, and P. S. Termini. Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications. In *2015 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*, pages 121–126, May 2015.
- [5] S. Noguchi, K. Suzuki, and H. Dohmeki. The efficiency comparison by exciting waveform of the square-wave brushless dc motor. In *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pages 1407–1413, Oct 2015.
- [6] Ananthababu B, Ganesh C, and Pavithra C V. Fuzzy based speed control of bldc motor with bidirectional dc-dc converter. In *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, pages 1–6, Nov 2016.
- [7] S. Stipetic and J. Goss. Calculation of efficiency maps using scalable saturated flux-linkage and loss model of a synchronous motor. In *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pages 1380–1386, Sept 2016.
- [8] M. H. Mohammadi and D. A. Lowther. A computational study of efficiency map calculation for synchronous ac motor drives including cross coupling and saturation effects. In *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, pages 1–1, Nov 2016.
- [9] M. Novak, J. Novak, and Z. Novak. Methodology for efficiency mapping of permanent magnet synchronous motors. In *2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, pages 205–210, Oct 2017.
- [10] S. Van Sterkenburg, E. Rietveld, F. Rieck, B. Veenhuizen, and H. Bosma. Analysis of regenerative braking efficiency — a case study of two electric vehicles operating in the rotterdam area. In *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–6, Sep. 2011.

- [11] MathWorks. Generic battery model - simulink.
- [12] MathWorks. Implement generic supercapacitor model - simulink.
- [13] Ernest Cortez, Manuel Moreno-Eguilaz, and Francisco Soriano. Advanced methodology for the optimal sizing of the energy storage system in a hybrid electric refuse collector vehicle using real routes. *Energies*, 11(12), 2018.
- [14] Mudassar Hussain, Guijian Liu, Balal Yousaf, Rafay Ahmed, Faiza Uzma, Muhammad Ubaid Ali, Habib Ullah, and Abdul Rahman Butt. Regional and sectoral assessment on climate-change in pakistan: Social norms and indigenous perceptions on climate-change adaptation and mitigation in relation to global context. *Journal of Cleaner Production*, 200:791 – 808, 2018.
- [15] İlhami Yıldız. 1.12 fossil fuels. In Ibrahim Dincer, editor, *Comprehensive Energy Systems*, pages 521 – 567. Elsevier, Oxford, 2018.
- [16] Hongchuan Dong, Wenjie Xu, Bin Cao, L. Wang, and Z. Guan. Natural contamination deposition characteristics based on natural contamination testing station. In *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pages 403–406, Oct 2015.
- [17] C. Gu, G. Lu, M. Yi, and J. Li. Study on artificial contamination test of typical transmission line insulators. In *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pages 1624–1627, Nov 2015.
- [18] B. L. Lawu, S. Fuada, S. Ramadhan, A. F. Sabana, and A. Sasongko. Charging supercapacitor mechanism based-on bidirectional dc-dc converter for electric atv motor application. In *2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, pages 129–132, Oct 2017.
- [19] P. Kollmeyer, M. Wootton, J. Reimers, T. Stiene, E. Chemali, M. Wood, and A. Emadi. Optimal performance of a full scale li-ion battery and li-ion capacitor hybrid energy storage system for a plug-in hybrid vehicle. In *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 572–577, Oct 2017.
- [20] G. Grusso. Optimization and management of energy power flow in hybrid electrical vehicles. In *5th IET Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2014)*, pages 1–5, Nov 2014.
- [21] A. Saleki, S. Rezazade, and M. Changizian. Analysis and simulation of hybrid electric vehicles for sedan vehicle. In *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pages 1412–1416, May 2017.
- [22] M. S. A. Chowdhury, K. A. A. Mamun, and A. M. Rahman. Modelling and simulation of power system of battery, solar and fuel cell powered hybrid electric vehicle. In *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, pages 1–6, Sept 2016.

- [23] V. N. Anosov and M. V. Yaroslavtsev. Evaluation of hybrid electric bus energy storage device capacity. In *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, pages 65–67, June 2016.
- [24] Y. Zhang, M. E. Haque, and M. A. Mahmud. Control and charge management of a grid-connected photovoltaic system with plug-in hybrid vehicle as energy storage. In *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, July 2015.
- [25] S. A. Zulkiffi, S. Mohd, A. J. Jamali, Y. Kurniawan, N. Saad, and A. R. A. Aziz. Implementation of energy management system for a split-parallel hybrid electric vehicle with in-wheel motors. In *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, pages 1–6, May 2015.
- [26] M. Padmanabh and M. M. Desai. Performance and dynamic charge acceptance estimation of different lithium-ion batteries for electric and hybrid electric vehicles. In *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, pages 1–5, Dec 2017.
- [27] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, and P. Le Moigne. A new energy management strategy of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicular applications. In *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, pages 1–7, April 2014.
- [28] S. T. Sisakat and S. M. Barakati. Fuzzy energy management in electrical vehicles with different hybrid energy storage topologies. In *2015 4th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS)*, pages 1–6, Sept 2015.
- [29] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, S. R. Raman, Y. C. Fong, and X. L. Wang. Investigation of energy distribution and power split of hybrid energy storage systems in electric vehicles. In *2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)*, pages 1–7, Dec 2016.
- [30] Á. Ortega and F. Milano. Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(5):3369–3380, Sept 2016.
- [31] T. Blank, J. Badeda, J. Kowal, and D. U. Sauer. Deep discharge behavior of lead-acid batteries and modeling of stationary battery energy storage systems. In *Intelec 2012*, pages 1–4, Sept 2012.
- [32] K. Neuhaus, C. Alonso, and P. Taberna. Adaptable equivalent circuit model for electrochemical storage elements as a part of energy system modeling for zeb. In *2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence Computing, Advanced Trusted Computed, Scalable Computing Communications, Cloud Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, pages 1–6, Aug 2017.
- [33] Maan Al-Zareer, Ibrahim Dincer, and Marc A. Rosen. Electrochemical modeling and performance evaluation of a new ammonia-based battery thermal management system for electric and hybrid electric vehicles. *Electrochimica Acta*, 247:171 – 182, 2017.
- [34] S. Barcellona, S. Grillo, and L. Piegari. A novel current dependent lithium ion capacitor model: Analysis and experimental driving cycle test validation. In *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, pages 585–590, June 2017.

- [35] Y. Cao, R. C. Kroeze, and P. T. Krein. Multi-timescale parametric electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4):432–442, Dec 2016.
- [36] T. Xia, M. Li, P. Zi, L. Tian, X. Qin, and N. An. Modeling and simulation of battery energy storage system (bess) used in power system. In *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pages 2120–2125, Nov 2015.
- [37] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, T. W. Farrell, San Shing Choi, and N. T. Tran. An equivalent circuit model of li-ion battery based on electrochemical principles used in grid-connected energy storage applications. In *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, pages 959–964, June 2017.
- [38] R. Kanapady, K. Y. Kyle, and J. Lee. Battery life estimation model and analysis for electronic buses with auxiliary energy storage systems. In *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pages 945–950, March 2017.
- [39] H. Keshan, J. Thornburg, and T. S. Ustun. Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems. In *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, pages 1–7, Nov 2016.
- [40] Jiayi Cao and Rui Xiong. Reinforcement learning-based real-time energy management for plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system. *Energy Procedia*, 142:1896 – 1901, 2017. Proceedings of the 9th International Conference on Applied Energy.
- [41] M. Parchomiuk, R. Strzelecki, K. Zymmer, and A. Domino. Modular power converter with superconducting magnetic energy storage for electric power distribution system — analysis and simulation. In *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, pages P.1–P.6, Sept 2017.
- [42] Á. Ortega and F. Milano. Stochastic transient stability analysis of transmission systems with inclusion of energy storage devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1):1077–1079, Jan 2018.
- [43] C. Yuan, C. Liu, T. Zhao, X. Xiao, and N. Tang. Energy storage configuration strategy for virtual synchronous machine. In *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 1–6, Sept 2016.
- [44] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, and P. Le Moigne. Improved model of battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on thermo-electrical and aging behaviors. In *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, pages 1–8, April 2014.
- [45] P. Moreno-Torres, G. Navarro, M. Blanco, and M. Lafoz. Multifunctional test bench for the emulation and testing of electric vehicle fast-charging from urban railway power lines. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 1081–1087, March 2015.

- [46] N. P. Chaithanya and M. K. Mishra. Inertia emulation using hess in a microgrid environment by droop control. In *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 280–285, Oct 2017.
- [47] Y. WU, A. Ravey, D. Chrenko, and A. Miraoui. A real time energy management for ev charging station integrated with local generations and energy storage system. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pages 1–6, June 2018.
- [48] K. Yuan, Y. Song, Y. Zhang, Z. Huang, C. Sun, and Z. Xing. An energy storage capacity determination model of electric vehicle aggregator considering the real-time response state. In *2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, pages 123–127, May 2018.
- [49] O. Gomofov, J. P. F. Trovão, X. Kestelyn, and M. R. Dubois. Adaptive energy management system based on a real-time model predictive control with nonuniform sampling time for multiple energy storage electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7):5520–5530, July 2017.
- [50] E. Kim, K. G. Shin, and J. Lee. Real-time discharge/charge rate management for hybrid energy storage in electric vehicles. In *2014 IEEE Real-Time Systems Symposium*, pages 228–237, Dec 2014.
- [51] Haifeng Dai, Xiaolong Zhang, Xuezhe Wei, Zechang Sun, Jiayuan Wang, and Feng Hu. Cell-bms validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 52:174 – 184, 2013.
- [52] A. Castaings, A. Bouscayrol, W. Lhomme, and R. Trigui. Power hardware-in-the-loop simulation for testing multi-source vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):10971 – 10976, 2017. 20th IFAC World Congress.
- [53] Q. Xu, X. Jiang, J. Sun, and S. Cui. Comparison analysis of power management used in hybrid electric vehicle based on electric variable transmission. In *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, pages 1–7, Aug 2016.
- [54] R. Luís, J. C. Quadrado, and J. F. Silva. Optimal brake specific fuel consumption trajectory for stand-alone variable speed diesel gen-set. In *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, pages 289–294, June 2015.
- [55] S. D. V. R. Vadlamudi, V. Kumteveli, S. Ozcira, and A. Tripathi. Hybrid energy storage power allocation and motor control for electric forklifts. In *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, pages 1–5, Oct 2016.
- [56] K. Itani, A. De Bernardinis, Z. Khatir, and A. Jammal. Energy management of a battery-flywheel storage system used for regenerative braking recuperation of an electric vehicle. In *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2034–2039, Oct 2016.

- [57] Xi Zhang, Chris Chunting Mi, and Chengliang Yin. Active-charging based powertrain control in series hybrid electric vehicles for efficiency improvement and battery lifetime extension. *Journal of Power Sources*, 245:292 – 300, 2014.
- [58] Y. Li, Y. Wang, and S. Jiao. Simulation research on control strategy of single-axle parallel hybrid electric vehicle. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 9390–9395, July 2017.
- [59] R. Cheng and Z. Dong. Modeling and simulation of plug-in hybrid electric powertrain system for different vehicular application. In *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pages 1–7, Oct 2015.
- [60] C. Naxin, L. Fengxia, W. Jian, and W. Xiaoxia. Optimization of hev energy management strategy based on driving cycle modeling. In *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 7983–7987, July 2015.
- [61] Y. Wang, S. Niu, and W. Fu. Electrical-continuously variable transmission system based on doubly fed flux-bidirectional modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(4):2722–2731, April 2017.
- [62] X. Li, S. Kher, and S. Lin. Multi-domain system level behavioral hev library using vhdl-ams. In *2013 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pages 1–5, Oct 2013.
- [63] M. F. M. Sabri, K. A. Danapalasingam, M. F. Rahmat, and M. R. M. Yusof. Fuel economy analysis of a through-the-road hybrid electric vehicle. In *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, pages 1–6, May 2015.
- [64] Bin Wang, Jun Xu, Binggang Cao, and Xuan Zhou. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 281:432 – 443, 2015.
- [65] L. Zhang, X. Xia, and F. Barzegar. Control of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 9560–9565, July 2017.
- [66] Fanning Jin, Mengqi Wang, and Changjian Hu. A fuzzy logic based power management strategy for hybrid energy storage system in hybrid electric vehicles considering battery degradation. In *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pages 1–7, June 2016.
- [67] K. A. Kanhav and M. A. Chaudhari. A bidirectional multiport dc-dc converter topology for hybrid energy system. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pages 3427–3432, Aug 2017.
- [68] J. J. Jose and U. B. Manthathi. Two-input bidirectional converter controlled hybrid energy storage system (hess) for micro grids. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pages 1–4, July 2016.

- [69] P. A. Bachurin, V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, S. V. Kuchak, D. G. Metalnikov, G. B. Nesterenko, A. M. Potapenko, and G. A. Prankevich. Mathematical model of the energy storage system in the power system. In *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, pages 41–47, Oct 2018.
- [70] W. Chai, X. Cai, and Z. Li. A multi-objective optimal control scheme of the hybrid energy storage system for accurate response in the demand side. In *2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, pages 300–305, Nov 2017.