



**ANÁLISIS COMPARATIVO MEDIANTE MODELOS DINÁMICOS DE TRES SISTEMAS
DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: BATERÍAS LI-ION, VOLANTES DE INERCIA
(FLYWHEELS) Y BOBINAS SUPERCONDUCTORAS (SMES)**

JHOAN SEBASTIÁN VALDERRAMA VÉLEZ

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2023**

**ANÁLISIS COMPARATIVO MEDIANTE MODELOS DINÁMICOS DE TRES SISTEMAS
DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: BATERÍAS LI-ION, VOLANTES DE INERCIA
(FLYWHEELS) Y BOBINAS SUPERCONDUCTORAS (SMES)**

JHOAN SEBASTIÁN VALDERRAMA VÉLEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesores

Carlos David Zuluaga Ríos

PhD en Ingeniería

Sergio Andrés Estrada Mesa

Magister en Gestión Energética Industrial

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2023

*A mi familia, especialmente a mis padres,
William y María Elena, y a Luisa, por
mantener viva la esperanza durante tantos
años de alcanzar este objetivo.
A Diana, mi admiración e infinita gratitud.*

Agradecimientos

A los docentes,

Carlos David Zuluaga Ríos, PhD en Ingeniería, por la paciencia y la dedicación entregada en todo el desarrollo del presente trabajo y en su qué hacer como docente.

Sergio Andrés Estrada Mesa, Magister en Gestión Energética Industrial, por su insistencia y constantes recomendaciones frente a aspectos prácticos del presente trabajo y al diseño metodológico.

A ambos toda la gratitud por su apoyo y orientación.

Este proyecto se realizó en el marco del semillero titulado "Análisis comparativo de tres sistemas de almacenamiento de energía con base en la simulación de sus modelos dinámicos. Baterías de litio, volantes de inercia y bobinas superconductoras." con código SM202123.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE ANEXOS.....	5
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
GLOSARIO	8
INTRODUCCIÓN	10
1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1 Descripción	14
1.2 Formulación	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	18
3.1 Objetivo general.....	18
3.2 Objetivos específicos	18
4. REFERENTES TEÓRICOS.....	19
4.1 Sistemas de almacenamiento de energía.....	19
4.2 Tipos de Almacenamiento de Energía	20
4.3 Definiciones y Modelos de los ESS de interés	22
4.3.1 Batería Li-Ion	22
4.3.2 Volantes de inercia (Flywheels)	32
4.3.3 Bobinas superconductoras (SMES).....	37
4.4 Modelado de sistemas dinámicos	42
4.4.1 Dos modelos matemáticos.....	44
4.4.2 Modelo de circuito equivalente de Thévenin para baterías: Un sistema dinámico variante en el tiempo.....	47
5. METODOLOGÍA.....	52
5.1 Actividades	52
5.2 Instrumentos de recolección de información	53
5.3 Metodología aplicada por cada ESS de interés.....	54
5.4 Criterios para un análisis comparativo	56

6. RESULTADOS	57
6.1 Batería Li-Ion.....	57
6.2 Volante de inercia (Flywheel)	64
6.3 SMES	76
6.3.1 SMES $R_{\text{coil}} = 0 \, \Omega$	76
6.3.2 SMES $R_{\text{coil}} \neq 0 \, \Omega$	82
6.4 Análisis comparativo	85
7. CONCLUSIONES.....	90
8. RECOMENDACIONES	92
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
10. ANEXOS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aumento de la capacidad de almacenamiento en todo el mundo, de 2010 a 2020.	11
Figura 2. Aplicaciones de almacenamiento de energía en el sistema eléctrico..	22
Figura 3. Celda electroquímica conectada a una carga..	23
Figura 4. Circuito equivalente del modelo R_{int}	25
Figura 5. Circuito equivalente del modelo de Thévenin..	26
Figura 6. Modelo de Thévenin Resistivo..	27
Figura 7. Modelo de Thévenin Reactivo..	28
Figura 8. Perfil de la tensión de descarga a corriente constante para un elemento C-NCA.	29
Figura 9. Histéresis de tensión entre carga y descarga a corriente constante (C/10 durante la carga y la descarga) de un elemento C-LiFePO ₄ de 10 Ah en función del SOC.	31
Figura 10. Esquema eléctrico del volante de inercia: equilibrio del torque en el sistema de almacenamiento de energía del volante..	32
Figura 11. (a) Circuito equivalente de un PMSM; (b) diagrama de fasores para un factor de potencia retardado.	34
Figura 12. Emulación de Flywheel por máquina PMDC..	36
Figura 13. SMES (superconductive magnetic energy storage system)..	38
Figura 14. Circuito RL en serie equivalente a un diagrama simplificado de un SMES..	39
Figura 15. (a) Modo de Cargar SMES. (b) Modo de Descarga SMES..	40
Figura 16. Modo de Almacenamiento SMES.	41
Figura 17. Sistema Dinámico..	42
Figura 18. (a) Modelo de Sistema Dinámico de una Flywheel. (b) Modelo de Sistema Dinámico de una SMES..	44
Figura 19. Lithium ion cell (1-RC equivalent circuit model, isothermal).	49
Figura 20. Modelo de Sistema Dinámico de una Batería Li-Ion.	49
Figura 21. Un pulso del test de descarga Batería Li-Ion..	50
Figura 22. Metodología Batería Li-Ion	54
Figura 23. Metodologías Flywheel y SMES. (a) Modelo de espacios de estado Flywheel. (b) Modelo de funciones de transferencia SMES. (c) Solución analítica de la ODE para la SMES.....	55
Figura 24. Condiciones iniciales para la optimización Batería Li-Ion.	58
Figura 25. Resultado de la optimización de parámetros Batería Li-Ion.	59
Figura 26. Gráficas de polinomios para E_m , R_0 , R_1 y C_1 de Batería Li-Ion	60
Figura 27. Gráficas de ciclo de descarga para E_m , V_t , I , SoC. Batería Li-Ion	61
Figura 28. Salida en los terminales de la Batería Li-Ion: potencia, corriente y tensión.	62
Figura 29. Energía en el ciclo de descarga de la batería Li-Ion..	63
Figura 30. Carga y modo de almacenamiento Flywheel.....	64
Figura 31. Autodescarga Flywheel con $V(t) = 0$	65
Figura 32. Descarga Flywheel a tensión constante $V_{out} = 48$ V	66
Figura 33. Descarga Flywheel a corriente constante $i_{out} = 30$ A.....	67
Figura 34. Autodescarga Flywheel con $i(t) = 0$	68
Figura 35. Carga y modo de almacenamiento Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$	69
Figura 36. Descarga Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $V_{out} = 48$ V	70
Figura 37. Carga, modo de almacenamiento y descarga a tensión constante Flywheel. $V_{out} = 48$ V..	71
Figura 38. Descarga Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $i_{out} = 30$ A	72
Figura 39. Carga, modo de almacenamiento y descarga a corriente constante Flywheel. $i_{out} = 30$ A.	73
Figura 40. Carga Flywheel con variación de J . $V_{in} = 48$ V constante	74
Figura 41. Descarga Flywheel con variación de J . $i_{out} = 30$ A constante.....	75

Figura 42. Carga de la SMES. $i(t)$, $V(t)$. $R_{coil}=0 \Omega$	77
Figura 43. Descarga de la SMES. $i(t)$, $V(t)$. $R_{coil}=0 \Omega$	78
Figura 44. Carga y modo de almacenamiento SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{coil}=0 \Omega$	79
Figura 45. Carga, modo de almacenamiento y descarga SMES. $R_{coil}=0 \Omega$	80
Figura 46. Variación de V_{in} y L_{coil} en el ciclo de carga de la SMES. $R_{coil}=0 \Omega$	81
Figura 47. Variación de V_{out} y L_{coil} en el ciclo de descarga de la SMES. $R_{coil}=0 \Omega$	82
Figura 48. Carga y modo de almacenamiento SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{coil}=2 \times 10^{-5} \Omega$	83
Figura 49. Carga y modo de autodescarga SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{coil}=0.2 \Omega$	84
Figura 50. Ciclo de carga a 100 V y descarga con $R_L = 1 \Omega$ para la SMES.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de algunas tecnologías de almacenamiento.....	14
Tabla 2. Aplicaciones de los ESS.	20
Tabla 3. Formas físicas de energía almacenable.....	20
Tabla 4. Parámetros no lineales de Baterías Li-Ion (sin efectos de desgaste en el ciclo de vida)	48
Tabla 5. Inicialización de parámetros Batería Li-Ion.	57
Tabla 6. PulseData Experimento Batería Li-Ion.....	57
Tabla 7. Resultados estimación de parámetros Batería Li-Ion.	59
Tabla 8. Valores representativos batería Li-Ion.....	63
Tabla 9. Inicialización de parámetros Flywheel	64
Tabla 10. Valores representativos carga/descarga Flywheel. V_{out} constante.....	72
Tabla 11. Valores representativos carga/descarga Flywheel. i_{out} constante	74
Tabla 12. Inicialización de parámetros SMES. Caso $R_{coil}=0 \Omega$	76
Tabla 13. Valores representativos SMES. $R_{coil}=0 \Omega$	80
Tabla 14. Parámetros SMES. $R_{coil}=2 \times 10^{-5} \Omega$	82
Tabla 15. Parámetros SMES. $R_{coil}=0.2 \Omega$	82
Tabla 16. Valores representativos SMES. $R_{coil} \neq 0 \Omega$	84
Tabla 17. Comportamiento de los sistemas dinámicos.....	86
Tabla 18. Resultados de valores representativos	87

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Teorema del valor medio para integrales. Fuente: Stewart, et al. (2021)	96
ANEXO B. Diagrama de flujo del procedimiento de estimación de parámetros para una Bateria Li-Ion. Fuente: Gazzarri et al. (2012)	97
ANEXO C. Módulo de optimización de parámetros y de simulación de una celda de batería LiIon. Simulink/Simscape. Fuente: Gazzarri (2012-2017).....	98
ANEXO D. Script MATLAB. Regresión polinomial. Actualización de parámetros hallados y simulador modificado.	99
ANEXO E. Script MATLAB. Actualización de parámetros en el inicializador. PulseData modificado. Cálculo de Energía.....	100
ANEXO F. Lithium ion cell (1-RC equivalent circuit model, isothermal) modificado para mediciones, cálculos y gráficas. Simulink/Simscape	101

RESUMEN

El presente estudio realiza un análisis comparativo de tres tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica: Baterías Li-Ion, volantes de inercia (Flywheels) y bobinas superconductoras (SMES) mediante modelos dinámicos. Por medio del software de simulación MATLAB se hallaron las respuestas en el tiempo, para la carga y descarga de los ESS a partir de los modelos circuito equivalente de Thévenin para la batería Li-Ion, el modelo de emulación de máquina PMDC para la Flywheel y el modelo simplificado RL para la SMES. Adicionalmente analizaron las respuestas en el tiempo de potencia y energía para cada ESS. Cada sistema de almacenamiento presentó ventajas específicas: la batería Li-Ion es ideal para una entrega constante de potencia, la Flywheel destaca por su capacidad de almacenamiento y la SMES por su rápida respuesta y alta capacidad de energía. Estos resultados destacan las diferencias en el comportamiento y las características de los sistemas de almacenamiento evaluados.

ABSTRACT

This study performs a comparative analysis of three electrical energy storage systems: Li-Ion batteries, flywheels and superconducting coils (SMES) by means of dynamic models. By means of MATLAB simulation software, the time responses for the charging and discharging of the ESS were found from the Thévenin equivalent circuit models for the Li-Ion battery, the PMDC machine emulation model for the Flywheel and the simplified RL model for the SMES. Additionally, they analyzed the power and energy time responses for each ESS. Each storage system presented specific advantages: the Li-Ion battery is ideal for constant power delivery, the Flywheel stands out for its storage capacity, and the SMES for its fast response and high energy capacity. These results highlight the differences in the performance and characteristics of the storage systems evaluated.

GLOSARIO

Sistemas de almacenamiento de energía: Sistemas que reciben energía generada por el sistema eléctrico, luego la convierten en una forma adecuada para su almacenamiento, conservándola durante un tiempo determinado y finalmente devuelven la mayor cantidad posible de energía al sistema eléctrico, convirtiéndola en una forma requerida por el consumidor. Se puede encontrar en adelante como ESS (*Energy storage systems*).

Baterías Litio-Ion: Las baterías son acumuladores electroquímicos que se cargan convirtiendo la energía eléctrica en energía química y se descargan mediante una transformación inversa. La batería de litio-ion (también conocida como batería Li-ion) es un tipo de batería recargable que utiliza compuestos de litio como electrolito y material de electrodo.

Volante de Inercia: También conocido como *Flywheel* en inglés, es un dispositivo mecánico que almacena energía cinética rotacional. Consiste en un disco giratorio de gran masa y alto momento de inercia que almacena energía mediante su rotación constante.

SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*): Una SMES es una bobina superconductora utilizada para almacenar energía en forma de campo magnético. Consiste en un superconductor que, al enfriarse a temperaturas extremadamente bajas, permite un flujo de corriente sin resistencia, o aproximadamente cero, creando un campo magnético estable.

Modo de almacenamiento (*Storing mode*). Es la configuración o estado operativo de un sistema de almacenamiento de energía, en el cual el sistema se encuentra diseñado para almacenar energía de manera eficiente y segura.

Autodescarga: En sistemas almacenadores de energía, se refiere a la pérdida gradual de carga o energía que ocurre en un dispositivo o sistema de almacenamiento sin estar en uso activo.

Sistemas Dinámicos: Sistemas que cambian o evolucionan con el tiempo en respuesta a ciertas reglas o leyes. Pueden ser físicos, biológicos o abstractos y se caracterizan por tener variables que describen su estado y ecuaciones que gobiernan su respuesta en el tiempo.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica en la actualidad sigue siendo predominantemente centralizada y transportada a larga distancia. El equilibrio de estos sistemas de generación y transporte de energía eléctrica depende inicialmente en la predicción de la carga diaria y temporal, donde ingresan como modos secundarios en un momento dado unidades de generación de plantas hidráulicas y térmicas. De cierta manera también podemos hablar en este nivel de energía almacenada como agua en embalses y combustibles fósiles en plantas térmicas. La generación de energía descentralizada y la introducción de fuentes de energía renovables ocasionan problemas en el equilibrio de las redes, debido principalmente al desequilibrio entre la oferta y la demanda (Olabi, et al. 2021).

En el marco de la transformación energética global el Plan Energético Nacional (PEN) establece unos objetivos encaminados a la satisfacción de los requerimientos energéticos del país, proyectados a contribuir con una mayor sensibilidad con el medio ambiente. Esta transformación energética trae consigo una redefinición de los sistemas energéticos, el aumento de la participación de fuentes de energía renovables, la eficiencia energética y tecnologías en la provisión de servicios más confiables y más continuos (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2019). Con la incursión de microrredes eléctricas, de nuevos paradigmas de la oferta y la demanda de energía, y por el avance en tecnologías del sector energético, incluyendo las de almacenamiento de energía, se facilitan aspectos de eficiencia, gestión de los recursos energéticos y descarbonización de las fuentes de energía, contribuyendo a la transición energética para un desarrollo sostenible (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2019).

Excluyendo el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo, la capacidad de almacenamiento de energía instalada a nivel mundial en los últimos diez años ha estado dominada por el almacenamiento de energía en sales fundidas (almacenamiento térmico en centrales solares térmicas) y las baterías Li-

Ion (ver Figura 1). Aproximadamente la mitad de la capacidad de almacenamiento de energía en sales fundidas se ha construido en España, y cerca de la mitad de las instalaciones de baterías Li-Ion están en Estados Unidos (OnLocation, 2020). Se puede observar en la Figura 1 que los volantes de inercia (Flywheels) se consideran a diferencia de las bobinas superconductoras (SMES) que no aparecen ya que no tienen en la actualidad una capacidad instalada significativa.

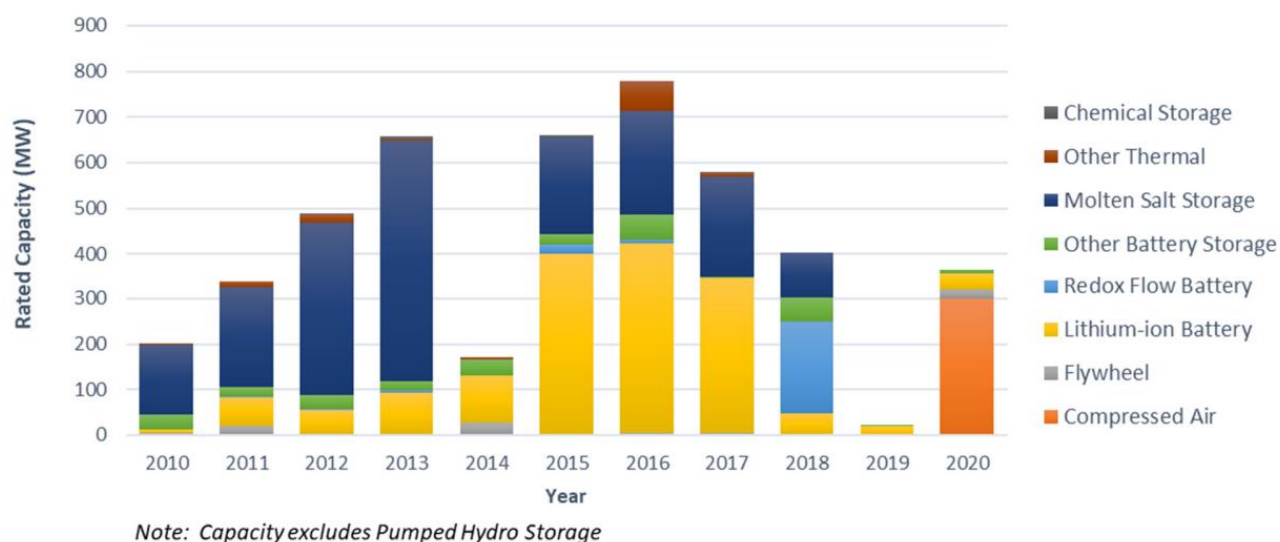


Figura 1. Aumento de la capacidad de almacenamiento en todo el mundo, de 2010 a 2020. Fuente: Sandia National Laboratories. 2021

La incorporación de sistemas de almacenamiento de energía en Colombia se encuentra en etapa de reglamentación. Recientemente la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2019), mediante resolución 098 del 30 de agosto constató en su Artículo 1:

Objeto. *Mediante la presente resolución se definen los procesos para que las personas interesadas instalen sistemas de almacenamiento de energía eléctrica con baterías, SAEB, con el propósito de mitigar inconvenientes presentados por la falta o insuficiencia de redes de transporte de energía en el Sistema de Transmisión Nacional, STN, o en un Sistema de Transmisión Regional, STR.*

En línea con la resolución de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2019), se ha llevado

a cabo un estudio que compara diversas tecnologías de almacenamiento. Este análisis se enfoca en tres tecnologías específicas: Baterías Li-Ion, volantes de inercia (Flywheels) y bobinas superconductoras (SMES) para realizar un análisis comparativo mediante modelos dinámicos propuestos desde la literatura científica. Esta delimitación se realiza a partir de algunos parámetros de su funcionamiento que corresponden a ordenes de magnitud comparables (Diez Olleros, 2018), dado que es imposible con la metodología, incluir en la comparación tecnologías como almacenamiento por aire comprimido, almacenamiento hidroeléctrico de bombeo y almacenamiento térmico.

La metodología se desarrolló en primer lugar, elaborando un estado del arte sobre las tecnologías de almacenamiento de energía de interés, donde se definieron características, parámetros y modelos circuitales. En segundo lugar, para la elaboración de modelos en software de simulación se seleccionaron los modelos más adecuados con los parámetros de interés para el modelo dinámico. Por último, se realizó el análisis comparativo a partir de los resultados de los modelos simulados y se evalúan las limitaciones del estudio.

Los resultados obtenidos revelaron diversas ventajas y fortalezas en cada uno de los sistemas de almacenamiento evaluados. La batería Li-Ion demostró un comportamiento consistente a lo largo de todo el ciclo, entregando potencia de manera sostenida hasta el final. La Flywheel destacó por su capacidad de almacenamiento y un modo de almacenamiento significativo. Por su parte, la SMES se mostró capaz de entregar energía rápidamente, alcanzando valores considerablemente altos de corriente. Cada sistema presenta características particulares que los hacen destacar en aspectos prácticos específicos. La batería Li-Ion es ideal para aplicaciones que requieren una entrega constante de potencia a lo largo del tiempo. La Flywheel es adecuada en situaciones donde se prioriza la capacidad de almacenamiento y la estabilidad en el suministro de energía. La SMES se destaca por su capacidad de respuesta rápida y la capacidad de suministrar grandes cantidades de energía.

Las limitaciones del presente estudio dependen del estado actual de investigación, del nivel de desarrollo e implementación de cada tecnología de almacenamiento de energía, además de las dificultades propias de la naturaleza de cada sistema de almacenamiento, todas presentan diferencias en estos aspectos.

1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Descripción

Los diversos sistemas de almacenamiento de energía tienen sus ventajas e inconvenientes. Su aplicación depende de muchos factores, el más representativo es su costo, que está estrictamente relacionado con el nivel de desarrollo y se refleja en la implementación que tiene en la actualidad cada tecnología (Rahman, et al., 2020).

Dejando a un lado el análisis de costos, es de fundamental interés en cuestiones prácticas, es decir de la necesidad y en el ámbito de la investigación, analizar qué tan adecuada es una u otra tecnología según otros factores como la fiabilidad, la potencia, el tiempo de descarga, tiempo de respuesta y eficiencia (Robyns et al., 2016). Por tal motivo, es de gran relevancia un análisis de sistemas dinámicos de tecnologías que sean similares en rangos de operación de los factores mencionados.

Como señala Diez Olleros (2018) comparando las diferentes tecnologías podemos ver en la Tabla 1 como algunos factores no son comparables y otros si para efectos de estudio en el campo de una aplicación concreta y de su comportamiento dinámico.

Tabla 1. Comparación de algunas tecnologías de almacenamiento. Fuente: Diez Olleros (2018)

Tecnología	Potencia [MW]	Tiempo de descarga	Tiempo de respuesta	Eficiencia [%]
Bombeo Hidráulico	100-4000	6-24 h	10 s – 3 min	65-85
Aire Comprimido	25-30000	4-24 h	3-15 min	50-85
Baterías Ion-Li	0,001-10	1 min – 1 h	30-100 ms	85-90
Supercondensadores	0,001-1	1 s – 1 min	5-10 ms	85-95
Superconductores Magnéticos	1-100	1 s – 1 min	5-10 ms	85-95
Volantes de Inercia	0,001-20	1 s – 1 h	5-10 ms	85-95

Con el objetivo de comparar las variables de funcionamiento y discernir las ventajas y limitaciones de los distintos sistemas de almacenamiento de energía, se plantea un estudio que implica analizar diversas tecnologías mediante modelos dinámicos en software de simulación. Esto se desprende al observar que estas tecnologías presentan órdenes de magnitud comparables en las variables de interés como se resalta en la Tabla 1 para las tecnologías: Baterías Ion-Li, Superconductores Magnéticos y Volantes de Inercia. Es fundamental analizar el comportamiento de cada tecnología dentro de estos rangos, teniendo en cuenta sus principios de funcionamiento, a fin de identificar tanto las ventajas como las limitaciones que puedan surgir.

1.2 Formulación

¿Qué ventajas y limitaciones presentan los sistemas de almacenamiento de energía: Baterías Li-Ion, volantes de inercia (Flywheels) y bobinas superconductoras (SMES), a partir de su modelado dinámico usando software de simulación?

2. JUSTIFICACIÓN

El consumo de energía primaria a nivel mundial continúa siendo predominante a partir de fuentes convencionales como el carbón, el petróleo y el gas natural. Estas fuentes de energía fósil son muy dañinas para el medio ambiente (Zuluaga Ríos et al., 2015). Aunque en algunos países la energía hidroeléctrica continúa desplazando estas energías no renovables, como es el caso colombiano con más del 60% de la generación eléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética de la UPME, 2015), otras opciones de fuentes de energías primarias son las energías renovables que se vienen incorporando en todo el mundo (Zuluaga Ríos et al., 2015). Este cambio estructural, que es a largo plazo, viene en aumento en los sistemas energéticos en todo el mundo y se conoce como transición energética.

La implementación de sistemas de generación de electricidad descentralizada, a partir de fuentes de energías renovables en su mayoría, incrementa problemas de estabilidad en la potencia debido al desequilibrio entre la oferta y la demanda ya que el comportamiento de la fuente primaria es de carácter fluctuante y variable (Olabi, et al. 2021). A parte de generar, transportar y distribuir la energía eléctrica, se hace necesario almacenar la energía por determinados períodos de tiempo (Ter-Gazarian, 2020).

El estudio del comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía es necesario para entender cómo se pueden emplear mejor estas tecnologías y el mayor reto se presenta respecto a su funcionamiento en condiciones reales. Como señala Ter-Gazarian (2020), cada medio de almacenamiento de energía tiene características diferentes, como la densidad energética, los tiempos de carga y descarga, el efecto de los ciclos repetidos en el rendimiento y la vida útil, el coste y los requisitos de mantenimiento. En lo fundamental, es de interés previo a su implementación y desarrollo, profundizar en sus principios básicos de funcionamiento, lo que se pretende realizar por medio de la

modelación de su comportamiento en el proceso de carga, autodescarga y descarga.

La modelación y comparación de sistemas de almacenamiento de energía desempeñan un papel fundamental en el desarrollo tecnológico, ya que ofrecen una aproximación inicial de su aplicación. Estos análisis también permiten evaluar los impactos ambientales y económicos, al proporcionar información sobre el dimensionamiento, construcción y posibles desafíos asociados a su implementación. Contar con un modelo preciso de los sistemas de almacenamiento de energía resulta esencial para comprender las opciones de diseño, investigar y predecir su comportamiento en diversas condiciones (Eladl, et al. 2022).

Este estudio tiene un valor significativo para el Sector Eléctrico Colombiano, ya que contribuye a identificar aspectos fundamentales del funcionamiento de distintos sistemas de almacenamiento de energía, lo que mejora la comprensión de sus aplicaciones y posibles desarrollos. Además, permite caracterizar su uso en condiciones transitorias específicas de los sistemas eléctricos de potencia.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Comparar tres tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica: Baterías Li-Ion, volantes de inercia (Flywheels) y bobinas superconductoras (SMES) mediante modelos dinámicos en software de simulación con el fin de encontrar características de funcionamiento.

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar un estado del arte revisando los estudios sobre las tecnologías de almacenamiento de energía para identificar los intereses específicos de la investigación.
- Elaborar modelos dinámicos para diferentes sistemas de almacenamiento de energía a partir de los modelos de circuitos equivalentes para elaborar un aplicativo en software de simulación.
- Comparar variables de funcionamiento mediante análisis dinámico para identificar ventajas y limitaciones de los diferentes sistemas de almacenamiento.

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 Sistemas de almacenamiento de energía

Las fuentes de energía renovable ya se utilizan ampliamente en muchos sistemas de energía. Sin embargo, la mayoría de las fuentes renovables, como la fotovoltaica y la eólica, dependen de instalaciones de almacenamiento de energía, ya que estas fuentes son variables a lo largo del día y del año y, por tanto, no pueden proporcionar un suministro de energía regular (Ter-Gazarian, 2020). A diferencia de los combustibles, las energías renovables no pueden almacenarse directamente, por lo que requieren sistemas de almacenamiento de energía secundarios.

Ter-Gazarian (2020) define el almacenamiento de energía secundario (SES, por sus siglas en inglés) como una instalación especialmente diseñada para aceptar la energía generada por el sistema eléctrico, convertirla en una forma adecuada para su almacenamiento, conservarla durante un tiempo determinado y devolver la mayor cantidad posible de energía al sistema eléctrico, convirtiéndola en una forma requerida por el consumidor. Su aplicación esencialmente es: La energía se almacena en los momentos en que la generación disponible supera la demanda y se devuelve cuando la demanda supera la generación. Además de su aplicación como fuentes de alimentación ininterrumpida (*Uninterruptable Power Supplies, UPS*) y como reservas operativas (*spinning reserve*), los Sistemas de Almacenamiento de energía se utilizan en Sistemas de Potencia Eléctrica para mejorar la calidad de la energía eléctrica mediante el control de la frecuencia/tensión, estabilidad de la red, protección contra la caída de tensión, y nivelación de carga a corto plazo (Rahman, et al. 2020).

Las aplicaciones en los Sistemas de Potencia Eléctrica modernos son expuestas a profundidad en el trabajo de Dhundhara & Pal Verma (2021) donde se discuten el horizonte de cada ESS, su evolución y potenciales aplicaciones abordando en específico cada tecnología de almacenamiento. En este

sentido se resaltan en general las aplicaciones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Aplicaciones de los ESS. Fuente: Dhundhara & Pal Verma (2021)

i. Apoyo a la generación	ii. Apoyo en transmisión y distribución	iii. Apoyo a los servicios energéticos para el usuario final	iv. Apoyo a la integración de Fuentes de Energía Renovables
Almacenamiento de materias primas (Commodity Storage). Aplicaciones de contingencia. Control de área. Frecuencia de red. Arranque en negro (Black Start).	Estabilidad del sistema. Estabilidad angular de la red. Soporte de tensión de red. Aplazamiento de activos.	Gestión de la energía. Compensación de cargas desequilibradas. Mejora de la calidad de la energía. Fiabilidad.	Frecuencia y reserva de giro síncrono. Reducción de las restricciones de transmisión. Desplazamiento temporal (Firming and Shaping). Supresión de fluctuaciones.

4.2 Tipos de Almacenamiento de Energía

Existen físicamente muchas formas de energía, almacenables y no almacenables. Las formas de energía física almacenable son de los tipos: Gravitacional, cinética, espacial, térmica, química, eléctrica y electromagnética. Como señala Ter-Gazarian, (2020) a cada una de ellas corresponden tecnologías unas más desarrolladas que otras como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Formas físicas de energía almacenable. Fuente: Ter-Gazarian, (2020).

Tipo	Forma	Potencial	Ejemplos de tecnología
Gravitacional	Altitud	Potencial gravitacional g_h	Represas
Cinética	Velocidad v	$v/2$	Volantes de inercia
Espacial	Presión	Presión P	Gas comprimido
Térmica	Calor	Temperatura T	Agua caliente
Química	Carga de electrones	Potencial químico G	Batería química
Eléctrica	Carga de electrones	Voltaje U	Capacitor
Electromagnética	Carga en movimiento	Tensión de autoinducción $L di/dt$	Bobina magnética

Cada tecnología de almacenamiento responde a criterios técnicos y económicos específicos, que varían considerablemente en función de las aplicaciones y necesidades. Las tecnologías son muchas, pero un estudio comparativo se dificulta por el nivel de desarrollo actual de cada una.

Se pueden plantear cuatro categorías en las cuales se pueden dividir las tecnologías de almacenamiento según su aplicación (Rahman, et al., 2020):

1. Aplicación de baja potencia en áreas aisladas, fundamentalmente para alimentar transductores y terminales de emergencia.
2. Aplicación de media potencia en zonas aisladas (sistemas eléctricos individuales, abastecimiento urbano).
3. Aplicación de conexión de red con nivelación de picos.
4. Aplicaciones de control de calidad de energía.

Las dos primeras categorías son para sistemas a pequeña escala donde la energía podría almacenarse como energía cinética (volante de inercia), energía química, aire comprimido, hidrógeno (celdas de combustible), en supercondensadores o superconductores (Rahman, et al., 2020). Las categorías tres y cuatro son para sistemas a gran escala donde la energía podría almacenarse como energía gravitacional (sistemas hidráulicos), energía térmica (sensible, latente), energía química (baterías) o aire comprimido (o acoplado con líquido o almacenamiento de gas natural).

La aplicación de los sistemas de almacenamiento también se puede dar en relación al nivel de tensión y al tipo de generación si es distribuida o no (Martínez, 2011). En la Figura 2 se puede ver la aplicación en los Sistemas de Potencia.

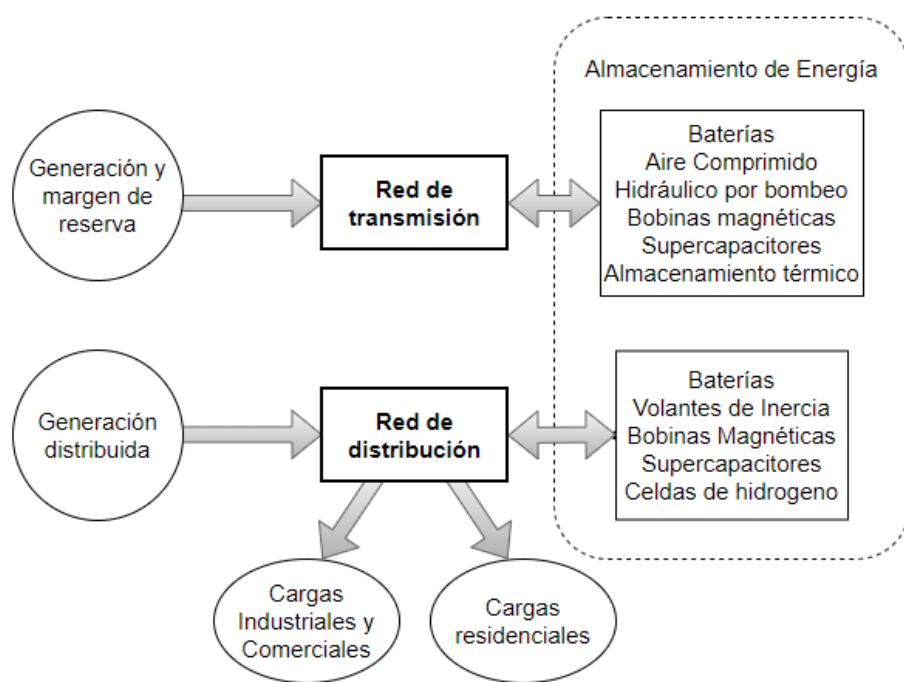


Figura 2. Aplicaciones de almacenamiento de energía en el sistema eléctrico. Fuente: Martínez (2011).

4.3 Definiciones y Modelos de los ESS de interés

4.3.1 Batería Li-Ion

Las baterías son acumuladores electroquímicos que se cargan convirtiendo la energía eléctrica en energía química y se descargan mediante una transformación inversa. Cada elemento de una batería está formado por una masa activa negativa capaz de proporcionar electrones al circuito externo durante la descarga y una masa activa positiva capaz de aceptar los electrones en dirección de retorno del circuito externo (Rufer, 2018).

La Figura 3 es una representación esquemática de una pila electroquímica. La dirección indica los flujos de iones y electrones correspondiendo al proceso de descarga de la pila. Un generador electroquímico transforma la energía química (entalpía libre) en energía eléctrica proporcionada al sistema externo en forma de corriente eléctrica.

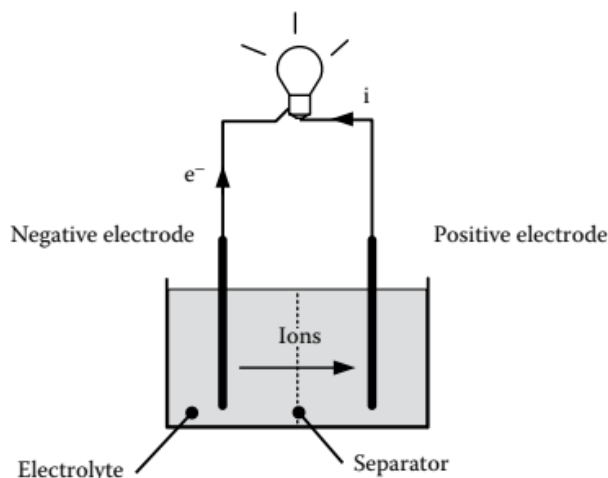


Figura 3. Celda electroquímica conectada a una carga. Fuente: Rufer, 2018.

El principio de funcionamiento según Rufer (2018) se describe de la siguiente manera: Cada una de las masas activas de una celda electroquímica contiene un par de reacciones redox, es decir, un conjunto de especies químicas en forma reducida (Red) capaz de proporcionar electrones y de transformarse en otro conjunto de especies químicas (Ox), capaz de recibir electrones. Un par redox se caracteriza por su potencial determinado por la ley de Nernst dada por la ecuación (1).

$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \cdot \ln \left[\frac{(Ox)}{(Red)} \right] \quad (1)$$

Donde n es el número de electrones necesarios para que un átomo o molécula de X pase a su forma iónica en el electrolito, y Ox y Red son la actividad en los electrodos.

Como señala Rufer (2018), el electrodo negativo de una celda elemental está conectado a la masa activa negativa que contiene un material reductor (fuente de electrones) Red1, capaz de tener una oxidación electroquímica descrita por (2).



A corriente cero, el potencial E_1 del electrodo negativo está controlado por la ecuación de Nernst relacionada con el par Red_1/Ox_1 . Simétricamente, el electrodo positivo está conectado a la masa activa positiva que contiene un material oxidante (receptor de electrones), Ox_2 , capaz de sufrir una reducción electroquímica como en (3) (Rufer, 2018).



A corriente cero, el potencial E_2 del terminal positivo está controlado por la ecuación de Nernst relacionada con el par Red_2/Ox_2 . La reacción química global se muestra en (4).



La tensión de la celda elemental es igual a la diferencia de los potenciales positivo y negativo. La transformación de un mol de reactivo en estas condiciones libera una energía eléctrica de máximo $n \times 96.500 \text{ C} \times (E_2 - E_1) \text{ Joules}$. Este máximo corresponde a la variación de la entalpía libre estándar de la reacción global (Rufer, 2018).

De manera general, el electrodo donde se produce la reducción se denomina cátodo. El electrodo donde se produce la oxidación se denomina ánodo. En el caso de una celda que funciona como generador (descarga), el cátodo será el terminal positivo y el ánodo el terminal negativo. Por el contrario (carga), el cátodo será el terminal negativo y el ánodo el terminal positivo (Rufer, 2018).

Para profundizar el estudio de las baterías a partir de modelos electroquímicos existen diversas metodologías, como la desarrollada por Li et al. (2018), donde se resalta su complejidad para aplicaciones en tiempo real. El modelamiento que pretenden los algoritmos mostrados por este estudio soluciona simultáneamente diferentes procesos electroquímicos resultando en un estimativo muy preciso de la batería y demuestra su eficacia en comparación con los datos experimentales. Los

modelos basados en circuitos eléctricos y su parametrización son los más aplicados en sistemas de gestión de baterías en tiempo real (Glaize & Geniès, 2013) y son comparables, en sus principios físicos, con los modelos de los demás ESS de interés.

Como señalan Glaize & Geniès (2013), los modelos de baterías basados en circuitos eléctricos describen los fenómenos electroquímicos que se producen utilizando componentes eléctricos activos y pasivos. El modelo R_{int} , o modelo de batería simple, es uno de los modelos más básicos de una batería, propuesto a mediados de los años 90 por el NREL (National Renewable Energy Laboratory). Este modelo está compuesto por una fuente de tensión ideal que representa una tensión de circuito abierto ideal y constante de la batería V_{oc} , conectada en serie con una resistencia R_{int} . El circuito correspondiente se muestra en la Figura 4. Este modelo puede utilizarse en aplicaciones en las que la fuente de energía se considera infinita y en las que se desprecian los fenómenos transitorios (Rufer, 2018).

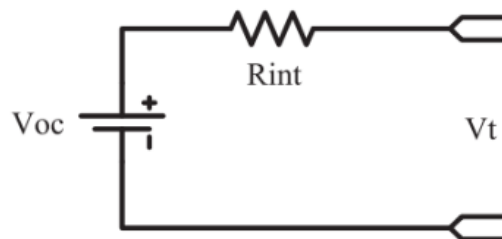


Figura 4. Circuito equivalente del modelo R_{int} . Fuente: Mousavi G. & Nikdel (2014).

En este modelo, no se considera el estado de carga (SOC) y se asume que R_{int} es constante, mientras que cambia cuando se conecta una carga a una batería. Por lo tanto, este modelo solo es adecuado para simulaciones de circuitos en las que se presupone que el SOC no es relevante. (Mousavi G. & Nikdel, 2014).

El modelo más utilizado en la actualidad, como podemos ver en Rufer (2018), Gazzarri et al. (2012), Nagi et al. (2019) y Nemes et al. (2019) es el modelo de batería de Thévenin. Para incorporar

los efectos transitorios asociados a la descarga de la batería, se agrega al modelo representado en la Figura 4 un dipolo RC paralelo quedando como en la Figura 5.

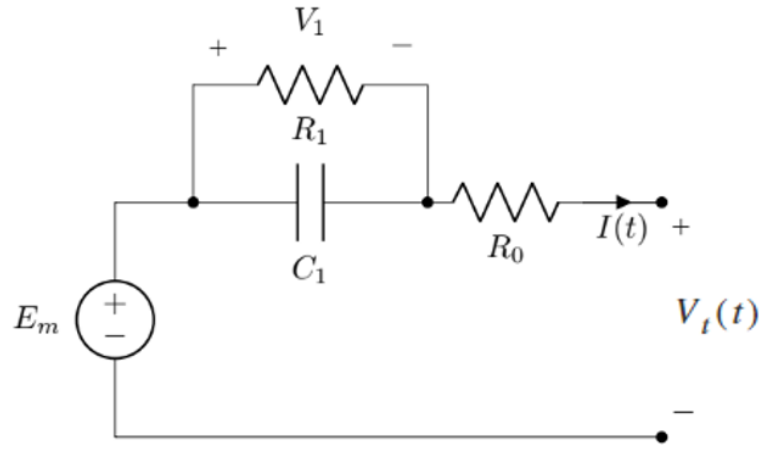


Figura 5. Circuito equivalente del modelo de Thévenin. Fuente: Nagi et al. (2019).

Como señala Nagi et al. (2019) este modelo de batería de Thévenin, o modelo de "parámetro fijo", consiste en una tensión ideal de la batería en vacío E_m , una resistencia interna R_0 , una capacitancia C_1 y una resistencia de sobretensión R_1 . C_1 representa la capacitancia de las placas en paralelo y R_1 representa la resistencia no lineal aportada por la resistencia de contacto de la placa con el electrolito. Las ecuaciones del modelo de batería de Thévenin vienen dadas por (5) y (6):

$$V_t(t) = E_m - (IR_0 + V_1) \quad (5)$$

$$V_1 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{C_1} \right) I \quad (6)$$

El principal inconveniente del modelo de batería de Thévenin es que supone que todos los elementos son constantes, pero en realidad todos los parámetros son funciones de las condiciones de la batería. En el modelo de la Figura 5, R_0 , R_1 , C_1 y E_m dependen del SOC y de la temperatura de la batería (T) (Nagi, et al. 2019).

Paralelamente al modelo de Thévenin presentado en la Figura 5, el trabajo de Mousavi G. &

Nikdel (2014) presenta los circuitos equivalentes de Thévenin Resistivo y Reactivo, éste último es de gran utilidad por representar un modelo dinámico. En su estudio, Mousavi G. & Nikdel (2014) realizan una revisión exhaustiva de diversos modelos de baterías, que incluyen modelos de batería simples, modelos basados en el enfoque de Thévenin, modelos basados en impedancia, modelos de tiempo de ejecución, modelos combinados basados en circuitos eléctricos y modelos genéricos, todos ellos de naturaleza circuital. En comparación con otros autores como Bajracharya (2013), Rufer (2018) y Nemes et al. (2019), el estudio de Mousavi G. & Nikdel (2014) aunque no proporciona información detallada sobre cómo hallar los diversos parámetros de los modelos, y sólo define los modelos por categorías, hace referencia a estudios más exhaustivos donde se desarrollan estimaciones de parámetros de la batería.

El circuito de la Figura 6 muestra el modelo de Thévenin resistivo donde i_b corresponde a la corriente que puede proporcionar bajo carga, R_d es la resistencia que modela la descarga, R_c la resistencia que modela el proceso de carga, V_O como la tensión nominal de la batería igual a V_{OC} , siendo función del SOC . y V_t como la tensión en las terminales. Los diodos solo se presentan para fines del modelo y no tienen importancia física en la batería, e implican que durante el proceso de carga o descarga sólo se utiliza una de las resistencias R_c o R_d (Mousavi G. & Nikdel, 2014). Este modelo no tiene en cuenta el efecto de la capacitancia, como las condiciones de corriente transitoria que se dan en la batería.

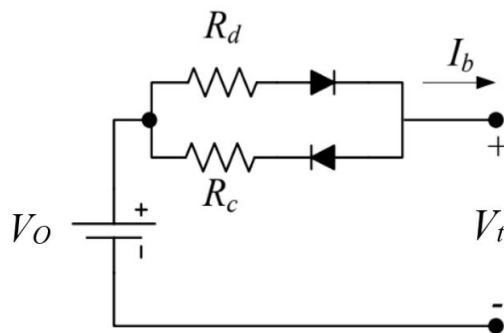


Figura 6. Modelo de Thévenin Resistivo. Fuente: Mousavi G. & Nikdel (2014).

A partir de la Figura 6 podemos deducir que la ecuación (7) describe el comportamiento de descarga del circuito. Este modelo no es dinámico, ya que se basa en la suposición de una corriente de descarga constante (Mousavi G. & Nikdel, 2014).

$$V_t = V_0 - i_b R_d \quad (7)$$

En la Figura 7 se representa el circuito del modelo de batería de Thévenin modificado, en este caso incluye un elemento reactivo, representando dos modelos dinámicos, tanto para la carga como para la descarga (Mousavi G. & Nikdel, 2014). El parámetro de la capacitancia no representa necesariamente procesos puramente eléctricos, una parte de ésta representa el proceso de difusión química dentro de la batería. Los parámetros de resistencias y capacitancia dependen de la temperatura, el *SOC* y el diseño propiamente de la batería. En comparación con el modelo de la Figura 6 la resistencia R_b representa las pérdidas de la batería.

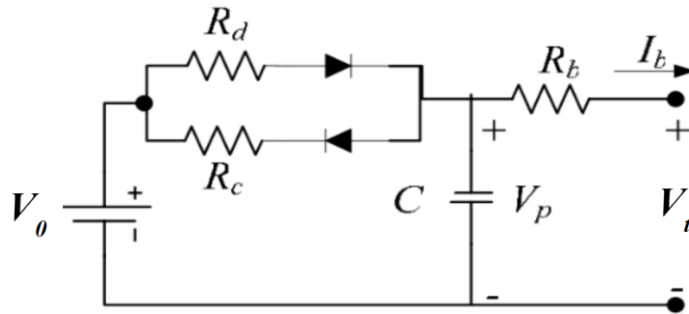


Figura 7. Modelo de Thévenin Reactivo. Fuente: Mousavi G. & Nikdel (2014).

Las ecuaciones del circuito de la Figura 7 para el proceso de carga y descarga están dados por las ecuaciones (8) y (9):

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_c C} + V_0 \frac{1}{R_c C} - i_b \frac{1}{C}, \rightarrow V_p > V_0 \quad (8)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_d C} + V_0 \frac{1}{R_d C} - i_b \frac{1}{C}, \rightarrow V_p \leq V_0 \quad (9)$$

donde

$$i_b = \frac{V_p - V_t}{R_b} \quad (10)$$

En el caso especial en que $R_b = 0$, $V_p = V_t$ y la corriente de la batería está determinada por la carga.

Adicionalmente, es importante resaltar que las baterías presentan un enorme reto en cuanto a la estimación del *SOC* y de la energía que aún permanece almacenada en un momento dado. Uno de los estimadores del *SOC* más habituales consiste en una medición de la tensión en los bornes de la batería donde el tipo de batería presente una disminución monótona de la tensión en función del *SOC*, como se muestra en la Figura 8 (Glaize & Geniès, 2013). Dado que el comportamiento de la tensión depende también de la temperatura este estimador no se considera útil para aplicaciones en tiempo real.

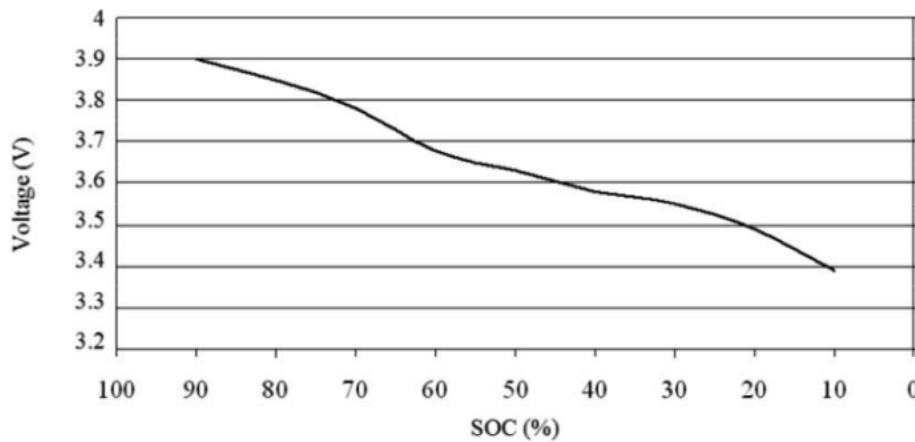


Figura 8. Perfil de la tensión de descarga a corriente constante para un elemento C-NCA. Fuente: Glaize & Geniès (2013)

Los autores Glaize & Geniès (2013) discuten en su trabajo sobre diferentes estimadores existentes, entre ellos el más utilizado que se basa en el método coulométrico que consiste, partiendo de una capacidad de referencia $C_{reference}$ [$A \cdot s = \text{Coulumb}$] conocida y medida en condiciones de referencia, en integrar la corriente $i(t)$, ya sea en el ciclo de carga o descarga. La capacidad disponible $Q_{available}$ en las condiciones de uso viene dada entonces por la ecuación (11). Donde es importante

tener en cuenta que la capacidad en las baterías se presenta comúnmente en A·h, donde $1\text{A}\cdot\text{h} = 3600\text{A}\cdot\text{s} = 3600\text{ Coulumb}$.

$$Q_{\text{available}}(t) = C_{\text{reference}}(t_0) + \int_{t_0}^t i(t)dt \quad (11)$$

La profundidad de descarga (DOD) es una indicación de la cantidad de electricidad ya extraída de una batería en relación con su capacidad. Por tanto, es la relación entre la integral de la corriente de descarga i_{disch} , constante o variable, y la capacidad, como se muestra en (12). A partir de (11) conociendo la capacidad, se puede calcular el SOC con $i(t) = -i_{\text{disch}}(t)$. El SOC para el ciclo de descarga viene dado por la ecuación (13). La DOD y el SOC son valores adimensionales que comúnmente se expresan como porcentaje y están relacionados en la ecuación (14) (Glaize & Geniès, 2013).

$$DOD = \frac{\int_0^t i_{\text{disch}}(t)dt}{\text{Capacity}} \quad (12)$$

$$SOC = \frac{\text{Capacity} - \int_0^t i_{\text{disch}}(t)dt}{\text{Capacity}} \quad (13)$$

$$SOC = 1 - DOD \quad (14)$$

Un fenómeno que resulta necesario mencionar, es una ligera histéresis de tensión o fenómeno de polarización, ligado únicamente a las sobretensiones de activación y de concentración (Glaize & Geniès, 2013). Esta histéresis está relacionada con la naturaleza de los mecanismos utilizados por el litio en los materiales de los electrodos. Los electroquímicos utilizan el término "polarización" para referirse a esta histéresis, que es la diferencia de tensión entre la carga y la descarga a un SOC dado, como se muestra en la Figura 9.

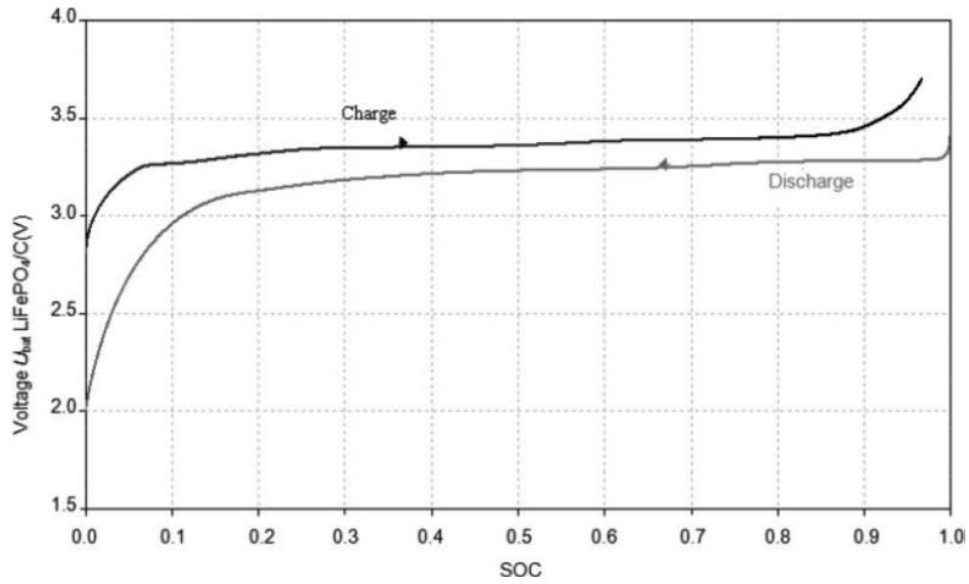


Figura 9. Histéresis de tensión entre carga y descarga a corriente constante ($C/10$ durante la carga y la descarga) de un elemento C-LiFePO₄ de 10 Ah en función del SOC. Fuente: Glaize & Geniès (2013)

El cálculo de potencia y energía, partiendo de mediciones de corriente y tensión en función del tiempo, se calculan de la manera habitual en un circuito eléctrico, y están dadas por (15) y (16).

$$P(t) = V(t) i(t) \quad (15)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (16)$$

En el caso de desconocer la energía inicial almacenada, o energía máxima de almacenamiento, se puede proceder a descargar completamente la batería y a partir de la potencia media calcular la energía contenida en la batería en el instante $t=0$ por medio del teorema del valor medio para integrales como se describe en el ANEXO A (Stewart, Clegg, & Watson, 2021).

El grado de autodescarga, en *modo de almacenamiento*, para una batería de Li-Ion depende de los electrodos elegidos. En pruebas experimentales, se ha observado que las baterías de C-LiMO₂ tienen una autodescarga de aproximadamente 0,6% al mes, mientras que las baterías de C-LiFePO₄ tienen una autodescarga de alrededor del 1,2% al mes a una temperatura de 40°C. Estos valores son para una

sola celda. Sin embargo, cuando se combinan varias celdas en un sistema de baterías junto con un sistema de gestión de baterías (BMS), la autodescarga "aparente" puede ser mucho mayor debido al consumo eléctrico de los circuitos electrónicos integrados en el BMS. Por ejemplo, para las baterías de C-LiFePO₄, esto puede resultar en una autodescarga de hasta el 3% al mes a una temperatura de 20°C. Este consumo adicional conduce a una disminución de las eficiencias faradaica y energética (Glaize & Geniès, 2013).

4.3.2 Volantes de inercia (Flywheels)

El principio de funcionamiento de un volante de inercia cuando se carga es que la máquina eléctrica funciona como motor cuando se le inyecta corriente eléctrica, mientras que cuando se descarga, la máquina eléctrica está en modo de generación, y se extrae de ella una corriente eléctrica. Según la ley de Lenz, esta corriente se opone al movimiento y crea un par opuesto conocido como torque eléctrico. Debido a este torque opuesto, como se muestra en la Figura 10, el volante de inercia funciona realmente con un torque neto que es la diferencia entre el torque mecánico y el eléctrico: $T_{net} = T_m - T_e$ (Jan C. et al., 2020).

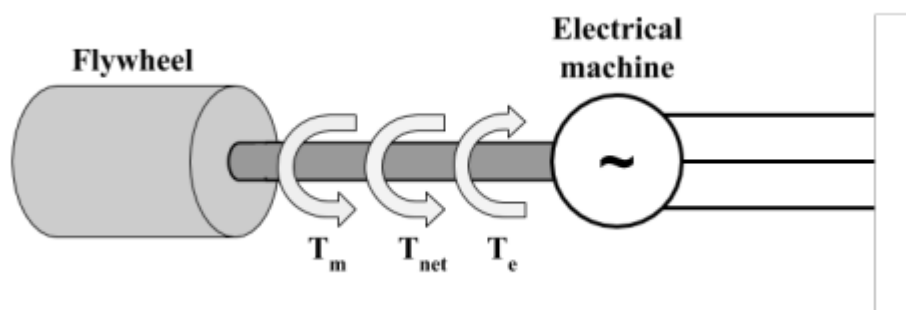


Figura 10. Esquema eléctrico del volante de inercia: equilibrio del torque en el sistema de almacenamiento de energía del volante. Fuente: Jan C. et al., 2020.

El torque neto se relaciona con el momento de inercia J , resultando:

$$T_{net} = J \frac{d\omega_d(t)}{dt} = \frac{2H}{\omega_{dr}^2 S_r} \frac{d\omega_d(t)}{dt} \quad (17)$$

En la expresión (17) H es la constante de inercia del sistema definida como la relación entre la energía cinética nominal del par volante-rotor y la potencia eléctrica de la máquina: $H = KE_r/S_r = J\omega_{dr}^2/2S_r$, siendo ω_{dr} la velocidad nominal del volante durante la fase de descarga en rads^{-1} , y S_r la potencia nominal de la máquina eléctrica en VA. Obsérvese que la constante $2H$, a menudo escrita como M , es el tiempo de arranque mecánico de todo el sistema volante-generator eléctrico y viceversa como tiempo de frenado, es decir, el tiempo que tarda una máquina eléctrica en llegar a su velocidad nominal desde cero hasta el nivel nominal de entrada de potencia mecánica (Jan C. et al., 2020).

Como señala Jan C. et al. (2020) durante la fase de descarga del volante, la velocidad inicial del volante es $\omega_s(t_s)$, a partir de la cual la velocidad decae lentamente. Pero a diferencia de la fase de almacenamiento, en la que el descenso de la velocidad se debe únicamente a la fricción, el descenso de la velocidad se ve afectado por la velocidad eléctrica $\omega_e(t)$ (que surge de la interacción magnética del rotor y el estator de la máquina eléctrica) además del decaimiento por fricción. Por lo tanto, en cualquier instante t de la fase de descarga, la velocidad de rotación del volante se representa en la ecuación (18).

$$\omega_d(t) = \frac{\omega_s(t_s) - B\alpha(t)\Delta t - \omega_e(t)}{(1 + B)} \quad (18)$$

donde B es el coeficiente de fricción equivalente de los dos cojinetes.

Para el cálculo de la aceleración instantánea $\alpha(t)$ se considera un Δt como un intervalo de tiempo corto para la medición o aproximación de la aceleración y se representa como la ecuación (19).

$$\alpha(t) = \frac{\omega_d(t) - \omega_d(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (19)$$

Como se muestra en la Figura 11, un generador eléctrico puede modelarse simplemente como una fuente de tensión ideal E_p conectada a su impedancia interna dada como $Z = j X_s = |Z|/\angle\theta$. Denotando la tensión U_s , en los bornes de la máquina, y la corriente eléctrica que circula por la máquina, I_s , entonces la potencia aparente entregada viene dada por (20) (Jan C. et al., 2020).

$$S = U_s I_s^* \quad (20)$$

Para calcular el par eléctrico producido por la máquina, oponiéndose al par mecánico proporcionado por el volante de inercia, es necesario considerar las propiedades eléctricas de la máquina, y por tanto calcular la potencia que entrega, suponiendo que la tensión en bornes U_s es un fasor de referencia, es decir, $U_s = |U_s|/\angle 0$ (Jan C. et al., 2020).

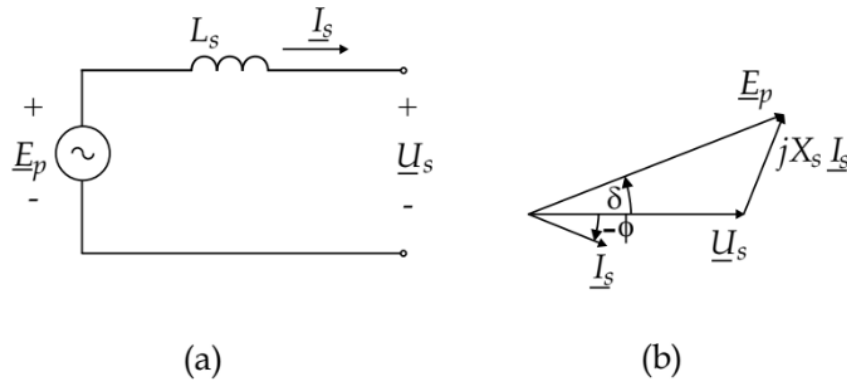


Figura 11. (a) Circuito equivalente de un PMSM; (b) diagrama de fasores para un factor de potencia retardado. Fuente: Holm (2003)

Como señala Zuluaga Ríos et al. (2015) la energía eléctrica almacenada en un volante de inercia está dada por (21), donde J es el momento de inercia y ω es la velocidad angular.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (21)$$

Como se observa en Jan C. et al. (2020) y Holm (2003), el modelo de los volantes de inercia está

completamente relacionado mecánicamente con la energía cinética de un cuerpo en rotación y eléctricamente con un motor-generador. Holm (2003) propone de manera similar un circuito equivalente simple por fase de la máquina y profundiza en su análisis fasorial, de la forma presentada en la Figura 11.b, y presenta un análisis más detallado de los parámetros involucrados.

Por otra parte, según Vafakhah et al. (2008), se puede afirmar a partir de la ecuación (17), que la masa de una Flywheel puede ser modelada como una carga activa que se conecta al eje del rotor de una máquina eléctrica de corriente continua (DC). En ese sentido el torque mecánico puede expresarse como (22). De esta manera se consigue que una máquina DC de imanes permanentes (PMDC) emule esta característica real de una Flywheel utilizando las definiciones dadas por (21) y (22).

$$\tau_F = J_F \frac{d\omega_m}{dt} \quad (22)$$

Donde τ_F , en Nm , es el torque asociado a la inercia J_F , en Kgm^2 , de la Flywheel. ω_m es la velocidad angular en rad/s .

Al considerar una PMDC como emulación de una Flywheel, ver Figura 12, se obtienen sus ecuaciones a partir de su funcionamiento como motor y como generador, para la carga y descarga del ESS respectivamente, donde se especifican la corriente de carga y descarga, $i_c(t)$ e $i_d(t)$ respectivamente.

En la Figura 12, R se considera como la resistencia de armadura en Ω , L la inductancia de la armadura en H, $i(t)$ la corriente de la armadura en A, $\omega(t)$ la velocidad angular del motor en rad/s . J es el momento de inercia de la volante de inercia en kgm^2 , B el amortiguamiento viscoso en Nms/rad , e_b es la fuerza contra electromotriz en V, dada por $e_b(t) = K_b * \omega(t)$, y τ_i es el par desarrollado Nm, dado por $\tau_i(t) = K_i * i(t)$ (Gieras & Shen, 2022). K_b es la constante de relación de la fuerza contraelectromotriz en Vs/rad y K_i es la constante de torque en Nm/A .

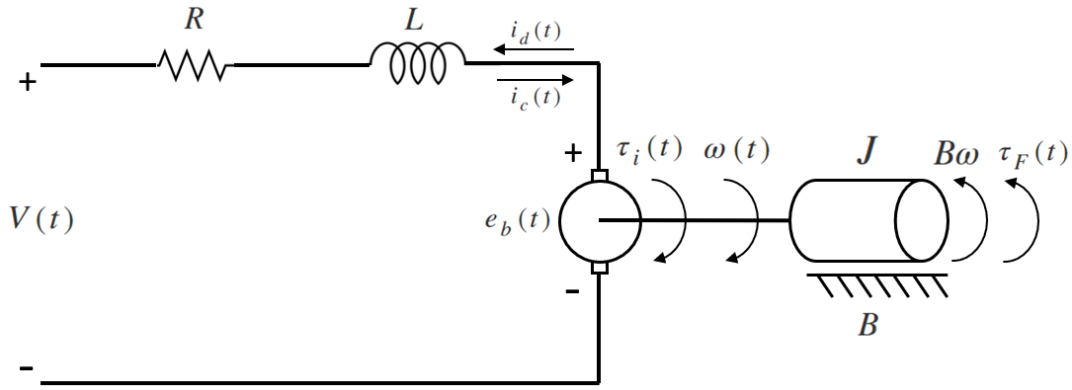


Figura 12. Emulación de Flywheel por máquina PMDC.

El modelo de la PMDC como motor que se muestra en la Figura 12, al cual corresponde la tensión $V(t)$ de entrada como motor y la $i_c(t)$ de carga, lo rigen las ecuaciones (23)-(26) que emulan el proceso de carga de una Flywheel. Cuando K_b y K_i se expresan en el mismo sistema de unidades se tiene que $K_b = K_i$ (con excepción donde se señalen valores diferentes), por lo tanto, se escribirá en adelante simplemente como K en ambos casos (Gieras & Shen, 2022).

$$V(t) = L \frac{d}{dt} i_c(t) + R i_c(t) + e_b(t) \quad (23)$$

$$V(t) = L \frac{d}{dt} i_c(t) + R i_c(t) + K \omega(t) \quad (24)$$

$$\tau_i(t) = \tau_F(t) + B \omega(t) \quad (25)$$

$$K i_c(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B \omega(t) \quad (26)$$

La ecuación (24) modela el comportamiento eléctrico de la PMDC a partir de la Ley de tensiones de Kirchhoff y la ecuación (26) el comportamiento mecánico por Ley de Newton.

Para el modelo de la PMDC como generador, en la Figura 12 corresponde la $i_d(t)$ de descarga. Se obtienen las ecuaciones (27) y (28) que modelan su comportamiento tanto eléctrico como mecánico respectivamente, manteniendo la misma polaridad de $e_b(t)$ en el mismo sentido de $\omega(t)$.

$$L \frac{di_d(t)}{dt} = -Ri_d(t) + K_b\omega(t) - V(t) \quad (27)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = -K_i i_d(t) - B\omega(t) \quad (28)$$

La potencia de demandada y entregada está dada por la ecuación (15) a partir de la corriente y la tensión de la Figura 12. Desde el punto de vista mecánico, la potencia se puede relacionar con la ecuación (22) a partir de la ecuación (29) (Muljadi & Gevorgian, 2017).

$$\tau_F(t) = \frac{P(t)}{\omega(t)} = J_F \frac{d\omega(t)}{dt} \Rightarrow P(t) = \tau_F(t) \times \omega(t) \quad (29)$$

Muljadi & Gevorgian (2017) señalan que el decaimiento de la energía almacenada en el volante de inercia a medida que éste entrega la potencia de salida puede escribirse como (30), donde E_{init} es la energía inicial en el volante de inercia, y P es la potencia de descarga que entrega el volante de inercia.

$$E(t) = E_{init} - \int P(t) dt \quad (30)$$

La pérdida de potencia de un volante de inercia puede contabilizarse a partir del modelo de la Figura 12 como en (31), donde P_{el} es la pérdida eléctrica debido a R , y P_{sp} es la pérdida que varía con la velocidad de rotación debido a B .

$$P_{loss} = P_{el} + P_{sp} \quad (31)$$

4.3.3 Bobinas superconductoras (SMES)

Las bobinas superconductoras SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) son bobinas que están en un estado superconductor a temperatura criogénica, esto significa que las pérdidas de energía durante la operación son casi cero. Las SMES almacenan energía eléctrica como energía campo magnético, tienen la capacidad de liberar rápidamente la energía almacenada, tienen muy alta

capacidad de almacenamiento, la carga es muy rápida (milisegundos) con alta eficiencia y la vida del ciclo casi infinita. Las SMES son útiles para controlar la potencia activa y reactiva, para la transmisión y la estabilidad del sistema de distribución y estabilizar la frecuencia del sistema (Assam et al., 2020).

La energía y la potencia de la SMES se expresan en las ecuaciones (32) y (33).

$$E = \frac{1}{2} L i^2 \quad (32)$$

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (33)$$

La potencia máxima P_{max} durante la carga y la descarga depende de los valores de corriente y tensión máximos que recibe la SMES (Rufer, 2018) y está dada por (34):

$$P_{max} = U_{max} I_{max} \quad (34)$$

En la Figura 13 se muestra un esquema general de un sistema SMES.

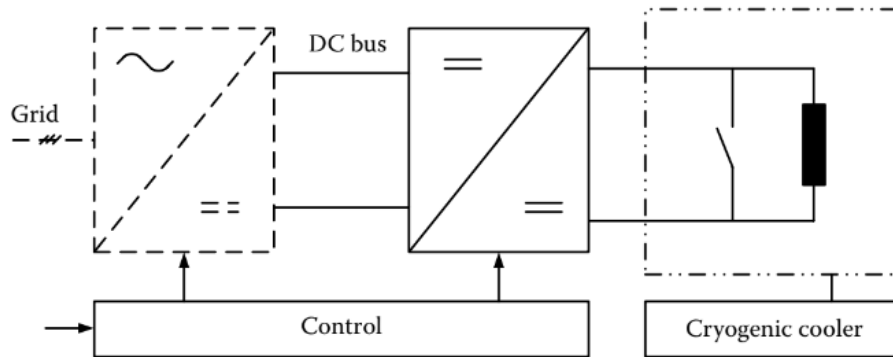


Figura 13. SMES (superconductive magnetic energy storage system). Fuente: Rufer (2018).

Como señala Rufer (2018), durante el estado de carga de un sistema SMES, hay que tener en cuenta que la corriente del inductor debe fluir siempre. Aunque no haya variaciones de esta corriente, se generan pérdidas de conducción en el propio inductor, en las interconexiones y también en el convertidor. Para un modo ralentí a largo plazo, pero también por razones de seguridad, se suele prever un interruptor de derivación.

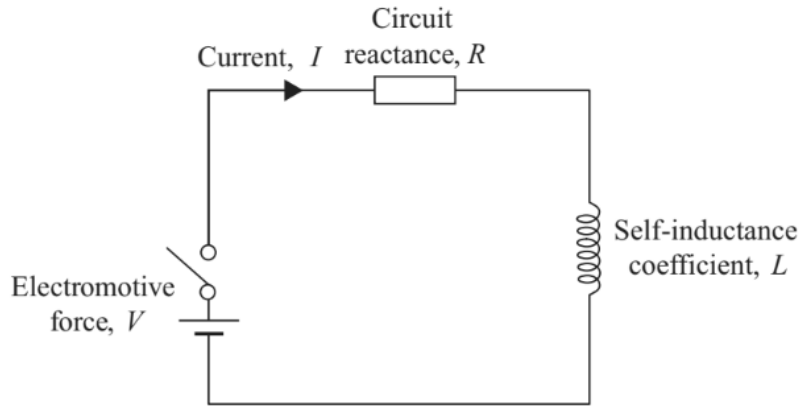


Figura 14. Circuito RL en serie equivalente a un diagrama simplificado de un SMES. Fuente: Ter-Gazarian, 2020.

Como indica Eladl, et al. (2022) y Ter-Gazarian (2020), se considera un circuito RL en serie como a un diagrama simplificado de una SMES. Como se muestra en la Figura 14 se pone en serie con el inductor L_{coil} la resistencia interna de la bobina R_{coil} (incluyendo la resistencia interna cuando entrega potencia), además en algunos casos se toma en cuenta en los modelos un circuito RLC . Siguiendo en este sentido, en el circuito de la Figura 14, el voltaje en las terminales del convertidor V_{conv} está dado por (35), donde i es la corriente que circula por la bobina.

$$V_{conv} = V(t) = L_{coil} \frac{di}{dt} + iR_{coil} \quad (35)$$

$$-V(t) = L_{coil} \frac{di}{dt} + iR_{coil} \quad (36)$$

Teniendo en cuenta el proceso de conmutación de la tensión en las terminales mostrado en la Figura 15, la ecuación (35) modela el proceso de carga de la SMES, mientras para la descarga se tiene la ecuación (36), donde se modela tanto el caso de la autodescarga, $V(t)=0$, como el de la descarga con R_{load} (Gouda, et al. 2020), $V(t)=iR_{load}$. Ambas ecuaciones corresponden a ODE de primer orden, y las soluciones vienen dadas por (37), (38) y (39) (Gouda, et al. 2020).

$$i_c(t) = \frac{V}{R_{coil}} \left(1 - e^{-\frac{R_{coil}}{L_{coil}}t} \right) \quad (37)$$

$$i_{sm}(t) = i_0 e^{-\frac{R_{coil}}{L_{coil}}t} \quad (38)$$

$$i_d(t) = i_0 e^{-\frac{(R_{coil} + R_{load})}{L_{coil}}t} \quad (39)$$

Donde $i_c(t)$, es la corriente de carga, $i_{sm}(t)$ la corriente de autodescarga o de modo de almacenamiento, e $i_d(t)$ la corriente de descarga. Para (38) y (39) se tiene la condición inicial $i_0 \neq 0$.

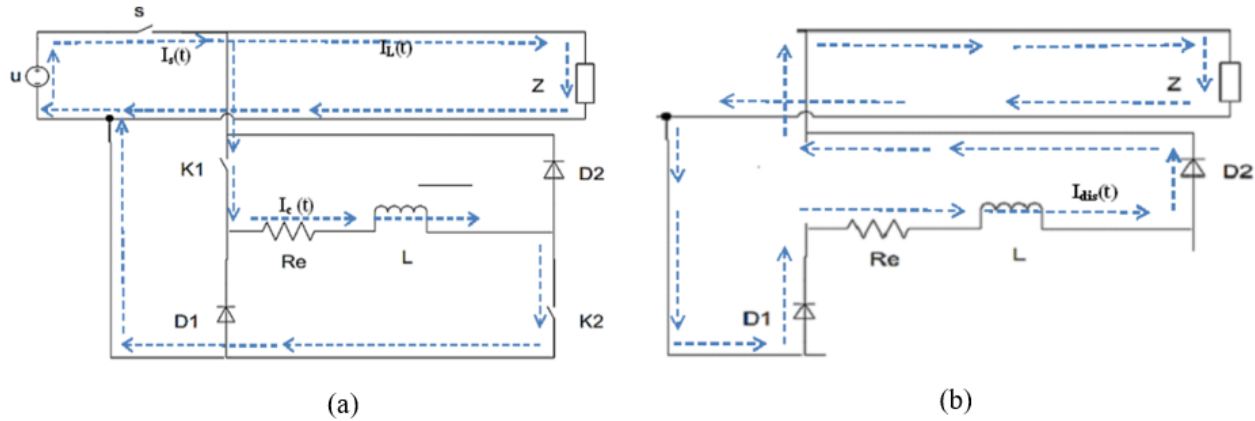


Figura 15. (a) Modo de Cargar SMES. (b) Modo de Descarga SMES. Fuente: Gouda, et al. (2020)

Además de la conmutación de tensión en los terminales durante el proceso de descarga, es importante destacar que, en el funcionamiento de una SMES, siempre debe haber flujo de corriente en la misma dirección, incluso en el modo de almacenamiento (Gouda, et al. 2020), como se ilustra en la Figura 16. En el circuito en serie resultante con $V(t)=0$ en la ecuación (36), si no hay pérdidas inherentes a la SMES con $R=0$, la corriente se mantiene constante.

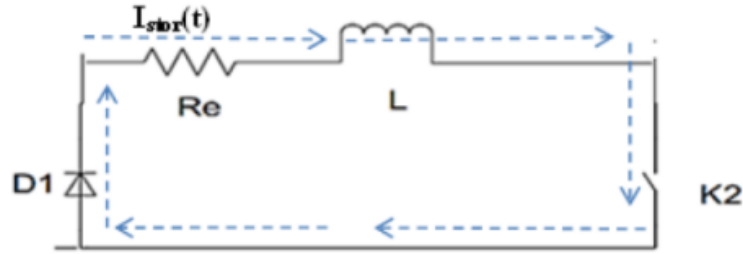


Figura 16. Modo de Almacenamiento SMES. Fuente: Gouda, et al. (2020)

Usando la expresión para la fuerza electromotriz inducida (tensión) en la bobina dada por la ecuación (40) (Ter-Gazarian, 2020).

$$e_s = -Nd\phi/dt \quad (40)$$

Se calcula la energía para efectos de dimensionamiento como lo presentado por Ter-Gazarian (2020) en la ecuación (41) donde la energía contenida en un campo electromagnético está determinada por la corriente I que pasa por las N vueltas de la bobina del imán. El producto NI se llama la fuerza magnetomotriz.

$$W_m = \int_0^\phi N i(t) \phi = \int_0^B LAH dB = \text{vol} \int_0^B H dB \quad (41)$$

Dado que existe una relación aproximadamente lineal entre H y B dada por $B = \mu H$, la solución vendrá dada por (42) y (43).

$$W_m = 0.5 \text{ vol } \mu H^2 \quad (42)$$

$$W_m = \frac{0.5 \text{ vol } B^2}{\mu} \quad (43)$$

Donde ϕ es el flujo magnético, B es la inducción, l es la longitud del campo magnético, A es el área del campo magnético, N es el número de vueltas de la bobina, μ es la permeabilidad y $\text{vol} = lA$.

La densidad de energía volumétrica puede obtenerse a partir de la ecuación (44).

$$w = 0.5\mu H^2 = 0.5HB = \frac{0.5B^2}{\mu} \quad (44)$$

4.4 Modelado de sistemas dinámicos

Un sistema se define como una combinación de componentes que actúan conjuntamente para cumplir un determinado objetivo. Como objeto de interés, podemos entenderlo como una parte conceptualmente aislada del universo que nos interesa. Los sistemas tienen entornos con los cuales interactúan con otros sistemas. Todos los sistemas existentes cambian con el tiempo, y cuando las tasas de cambio son significativas, los sistemas se denominan sistemas dinámicos (Kulakowski et al., 2007). Un sistema dinámico se muestra en la Figura 17.

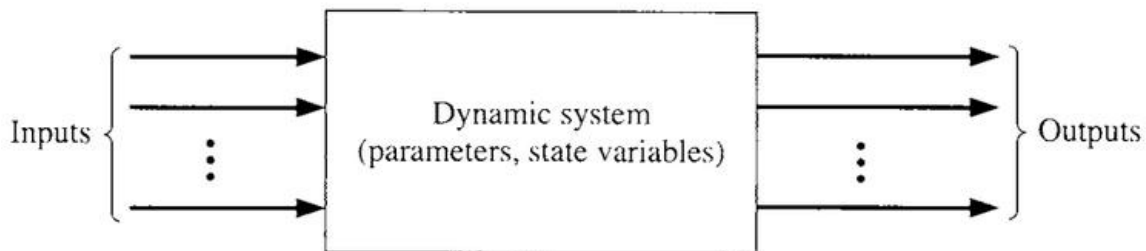


Figura 17. Sistema Dinámico. Fuente: Kulakowski et al. (2007).

Como señala Kulakowski et al. (2007), el aislamiento de un sistema del entorno es puramente conceptual. Todo sistema interactúa con su entorno a través de dos grupos de variables. Las variables de entrada que se originan fuera del sistema y no dependen directamente de lo que ocurre en él y las variables de salida que comprenden las variables generadas por el sistema al interactuar con su entorno.

Un modelo matemático es una representación matemática que describe el comportamiento de un sistema dinámico. Por lo general, se compone de un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), ya sean lineales o no lineales, que proporcionan una descripción completa de las relaciones

entre las variables del sistema (Kluever, 2015). Este modelo se utiliza como una herramienta para desarrollar diseños o algoritmos de control. La selección de un modelo del sistema depende principalmente de la tarea principal para la cual se utilizará y tiene implicaciones significativas en cuanto a la precisión con la que se representa el sistema dinámico (Kulakowski et al. 2007).

En general, como indica Kluever (2015), se pueden clasificar los sistemas dinámicos según las cuatro categorías siguientes: (1) sistemas distribuidos vs. sistemas "agrupados", (2) sistemas en tiempo continuo vs. sistemas en tiempo discreto, (3) sistemas variantes en el tiempo vs. sistemas invariantes en el tiempo, y (4) sistemas lineales frente a sistemas no lineales.

Para los modelos descritos en la sección 4.3 se cumple:

- Representan sistemas con un número finito de variables internas, por lo tanto, hablamos de sistemas “agrupados” o “globales”. Dichos sistemas se rigen por Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE) (Kluever, 2015).
- Los modelos están definidos por funciones y variables definidas para todo el tiempo, por lo tanto, son sistemas en tiempo continuo (Kluever, 2015).
- Los parámetros del sistema cambian con el tiempo para el modelo de la Batería Li-Ion de la Figura 5, mientras que los parámetros en los modelos de la Flywheel y la SMES no cambian con el tiempo. En este caso, tenemos un sistema variante en el tiempo y dos sistemas invariantes en el tiempo, respectivamente (Kluever, 2015).
- El modelo de la Batería Li-Ion de la Figura 5 no cumple propiedades de superposición, mientras que los modelos de la Flywheel y la SMES, que se modelan a partir de ODE, cumplen superposición (Kluever, 2015). Por lo tanto, el modelo de la Batería Li-Ion es no lineal, mientras que para la Flywheel y la SMES se tienen modelos lineales.

4.4.1 Dos modelos matemáticos

Los modelos para la Flywheel y la SMES descritos en la sección 4.3.2 y 4.3.3, se definen y modelan matemáticamente como sistemas lineales invariantes en el tiempo por medio de ODE (Vafakhah, et al, 2008; Eladl, et al. 2022). Ambos sistemas dinámicos se representan en los diagramas de bloques mostrados en la Figura 18.

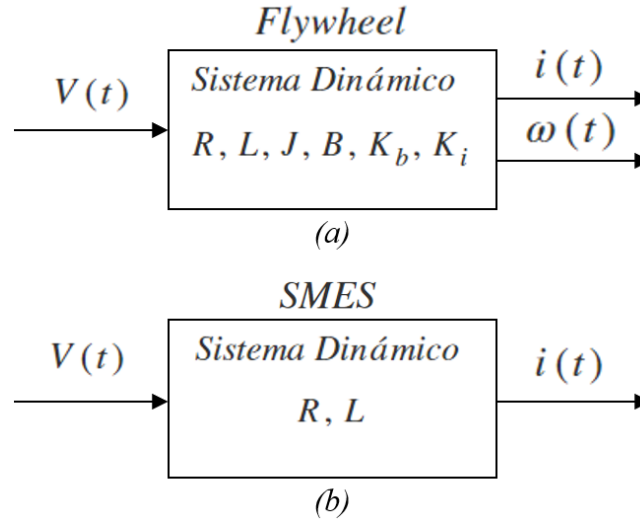


Figura 18. (a) Modelo de Sistema Dinámico de una Flywheel. (b) Modelo de Sistema Dinámico de una SMES.

Un sistema lineal invariante en el tiempo puede representarse mediante dos tipos de modelos matemáticos: el modelo de espacio de estados y el modelo de función de transferencia (Tsui, 2020).

Funciones de Transferencia

En un sistema de ecuaciones diferenciales lineales e invariables en el tiempo, la función de transferencia se define como la relación entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación), asumiendo que todas las condiciones iniciales son cero (Ogata, 2010). La función de transferencia está dada por la relación (45).

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{output}]}{\mathcal{L}[\text{input}]} \Big|_{\text{zero initial conditions}} \quad (45)$$

Para un sistema lineal e invariante en el tiempo, la función de transferencia $G(s)$ está dada por (46), donde $X(s)$ es la transformada de Laplace de la entrada al sistema y $Y(s)$ es la transformada de Laplace de la salida del sistema, donde asumimos que todas las condiciones iniciales involucradas son cero (Ogata, 2010).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (46)$$

Para el caso de la SMES, las ecuaciones (35) y (36), por medio de la transformada de Laplace se pueden convertir a funciones de transferencia. Las funciones de transferencia $I_c(s)/V(s)$ para la carga e $I_d(s)/V(s)$ para la descarga, donde $V(s)$ es la entrada del sistema y $I(s)$ la salida del sistema, son respectivamente (47) y (48).

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{sL + R} \quad (47)$$

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{-1}{sL + R} \quad (48)$$

Modelo de espacios de estado

Un modelo de espacio de estados consta de un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de primer orden con coeficientes constantes (49) y un conjunto de ecuaciones lineales (50) (Tsui, 2020).

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (49)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (50)$$

Donde

$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]'$ es el vector de estado del sistema

$x_i(t)$, $i = 1, \dots, n$ son las variables de estado del sistema

$\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_p(t)]'$ es la entrada del sistema

$\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_m(t)]'$ es la salida del sistema

Como indica Tsui (2020), las matrices del sistema (A, B, C, D) son reales, constantes y con dimensiones $n \times n$, $n \times p$, $m \times n$, y $m \times p$, respectivamente. En el modelo de espacios de estado, la ecuación (49) se denomina "ecuación dinámica", la cual caracteriza el "componente dinámico" del sistema al ilustrar cómo el estado inicial del sistema $\mathbf{x}(0)$ y la entrada del sistema $\mathbf{u}(t)$ determinan el estado del sistema $\mathbf{x}(t)$. En consecuencia, la matriz A se conoce como la "matriz dinámica" del sistema. La Ecuación (50) describe cómo el estado del sistema $\mathbf{x}(t)$ y la entrada del sistema $\mathbf{u}(t)$ determinan instantáneamente la salida del sistema $\mathbf{y}(t)$. Esto representa el "componente de salida" del sistema, que es estático (sin memoria) en comparación con la parte dinámica del sistema (Tsui, 2020).

Para las ecuaciones que modelan el comportamiento de la Flywheel para la carga y la descarga, dado que es un sistema lineal e invariante en el tiempo, se puede aplicar el modelo de espacio de estados. De las ecuaciones (24) y (26), reorganizando se obtienen las ecuaciones (51) y (52), que corresponden a las formas (49) y (50) para el ciclo de carga de la Flywheel.

$$\frac{d}{dt}i_c(t) = -\frac{R}{L}i_c(t) - \frac{K}{L}\omega(t) + \frac{1}{L}V(t) \quad (51)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K}{J}i_c(t) - \frac{B}{J}\omega(t) \quad (52)$$

El modelo de espacios de estado que modela el comportamiento de carga de la Flywheel está dado por (53).

$$\begin{Bmatrix} \dot{i}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -K/L \\ K/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V(t) \quad (53)$$

Las dos salidas del sistema vienen dadas por (54):

$$\begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V(t) \quad (54)$$

De las ecuaciones (27) y (28), del mismo modo para el ciclo de descarga de la Flywheel, se encuentra el modelo de espacios de estado dado por (55), con la misma salida dada por (54).

$$\begin{Bmatrix} \dot{i}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & K/L \\ -K/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/L \\ 0 \end{bmatrix} V(t) \quad (55)$$

Relación entre Modelo de Variables de Estado y Funciones de Transferencia

El modelo de función de transferencia del sistema $G(s)=Y(s)/U(s)$ se define a partir de la respuesta de estado cero del sistema como (56).

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (56)$$

La definición de $G(s)$ muestra que sólo refleja la relación entre la entrada del sistema $U(s)$ y la salida $Y(s)$. Esta relación implica explícitamente el estado del sistema $\mathbf{X}(s)$ y se deriva directamente del modelo de espacio de estados dado por (49) y (50). Además, el modelo de función de transferencia no refleja directa y explícitamente la respuesta de entrada cero del sistema, que es tan importante como la respuesta de estado cero.

4.4.2 Modelo de circuito equivalente de Thévenin para baterías: Un sistema dinámico variante en el tiempo

El caso particular de la Batería Li-Ion modelada como circuito equivalente de Thévenin (Figura 5), representa un sistema dinámico donde los parámetros R_0 , R_l , C_l y E_m dependen tanto del SOC como de la Temperatura (Nagi, et al 2019). Esto quiere decir que un conjunto de parámetros será completamente diferente al de otro estado presentado, ya sea a otro SOC, a otra Temperatura o a un

cambio de ambos. Supongamos tener el estado 1 $\{SOC_1, T_1\}$ y estado 2 $\{SOC_2, T_2\}$ en la descarga de una celda de batería Li-Ion, se pueden presentar casos como en la Tabla 4. Como el SOC es función del tiempo, y además tienen una relación directamente proporcional a partir de las ecuaciones (12) y (13) para una corriente constante, los parámetros R_0 , R_1 , C_1 y E_m dependen por lo tanto del tiempo. En este caso, tenemos claramente un sistema variante en el tiempo, donde además el comportamiento de los parámetros no sigue un comportamiento lineal.

Tabla 4. Parámetros no lineales de Baterías Li-Ion (sin efectos de desgaste en el ciclo de vida)

Caso	Situación	Interpretación	Parámetros
i.	$SOC_1 \neq SOC_2$ $T_1 = T_2$	Cambio de estado de carga a temperatura controlada, en una misma descarga.	$(E_m, R_0, R_1, C_1) \big _{\{SOC_1, T_1\}}$
ii.	$SOC_1 = SOC_2$ $T_1 \neq T_2$	El mismo estado de carga a dos temperaturas diferentes. Dos curvas de descarga diferentes.	\neq $(E_m, R_0, R_1, C_1) \big _{\{SOC_2, T_2\}}$
iii.	$SOC_1 \neq SOC_2$ $T_1 \neq T_2$	Cambio de estado de carga sin control de temperatura, en una misma descarga.	
iv.	$SOC_1 = SOC_2$ $T_1 = T_2$	Estado 1 igual al estado 2.	$(E_m, R_0, R_1, C_1) \big _{\{SOC_1, T_1\}}$ $=$ $(E_m, R_0, R_1, C_1) \big _{\{SOC_2, T_2\}}$

Para la situación de varianza en el tiempo para los parámetros, se debe seguir otra metodología de análisis diferente a la expuesta en la sección 4.4.1. El circuito se muestra en el esquema de simulación de la Figura 19 como elementos que emulan su comportamiento físico en el módulo SIMSCAPE de Simulink (Gazzarri J., 2012-2017).

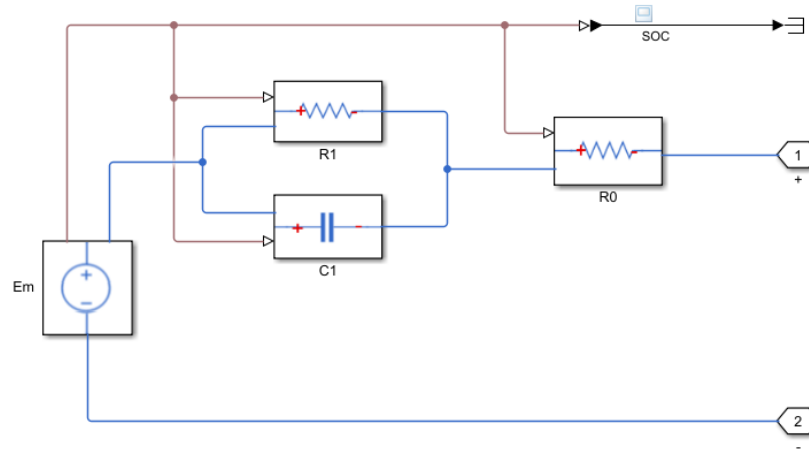


Figura 19. Lithium ion cell (1-RC equivalent circuit model, isothermal). Fuente: Gazzarri (2012-2017)

El trabajo de Gazzarri J. (2019), desarrolla una metodología a partir de datos experimentales donde a través de pulsos de corriente de descarga se logra la optimización de parámetros para SOC cada 10% en un ciclo de descarga. El modelo presentado en las Figura 5 y Figura 19, se desarrolla por Gazzarri, et al. (2012) y se encuentra en el repositorio de Gazzarri (2012-2017)* bajo los derechos de Copyright 2012-2017 The MathWorks (R).

El modelo representado por la Figura 20 se puede modelar dinámicamente para cada SOC a partir de datos experimentales, donde la respuesta es la tensión en terminales $V_t(t)$ a partir de un perfil de corriente conveniente $i(t)$ como entrada. La metodología realiza una estimación de los parámetros R_0 , R_1 , C_1 y E_m dada por el esquema mostrado en el ANEXO B para una temperatura controlada. Este modelo también podría desarrollarse utilizando más de un componente RC para obtener resultados más precisos de los parámetros de la batería (Gazzarri, et al. 2013).

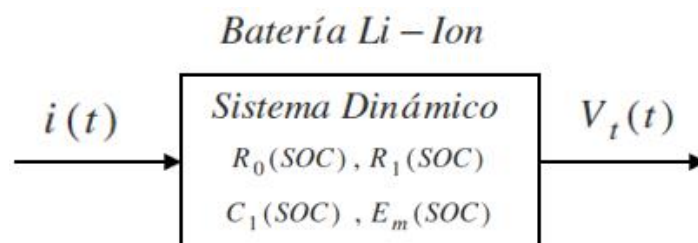


Figura 20. Modelo de Sistema Dinámico de una Batería Li-Ion.

*Gazzarri, B12-Electronic-Prognostic/Li_ion_battery/ (2012-2017). Tomado del sitio web: https://github.com/imrenagi/B12-Electronic-Prognostic/tree/master/Li_ion_battery

El objetivo de la estimación de los parámetros de la batería es hallar los valores de R_0 , R_l , C_l y E_m para minimizar el error entre los datos reales y los simulados. Utilizando datos experimentales conocidos como la corriente y el voltaje de la batería, esta técnica de estimación de parámetros entrenará los parámetros de la batería para que la corriente y el voltaje predichos puedan imitar los datos experimentales reales (Nagi, et al. 2019).

Como señalan Gazzarri, et al. (2013) y Santos, et al. (2017) cada pulso aporta información importante en la dinámica del circuito y la temperatura del electrolito se mantuvo lo más constante posible por lo cual no se pretende profundizar en la dependencia de la temperatura de cada parámetro. Separar cada pulso para el ajuste de los parámetros muestra claramente el aporte de cada elemento al comportamiento dinámico del sistema, donde R_0 es responsable de la caída o subida instantánea de tensión, y la rama R-C es responsable de los transitorios para cada SOC dado, como se muestra en la Figura 21 (Santos, et al. 2017).

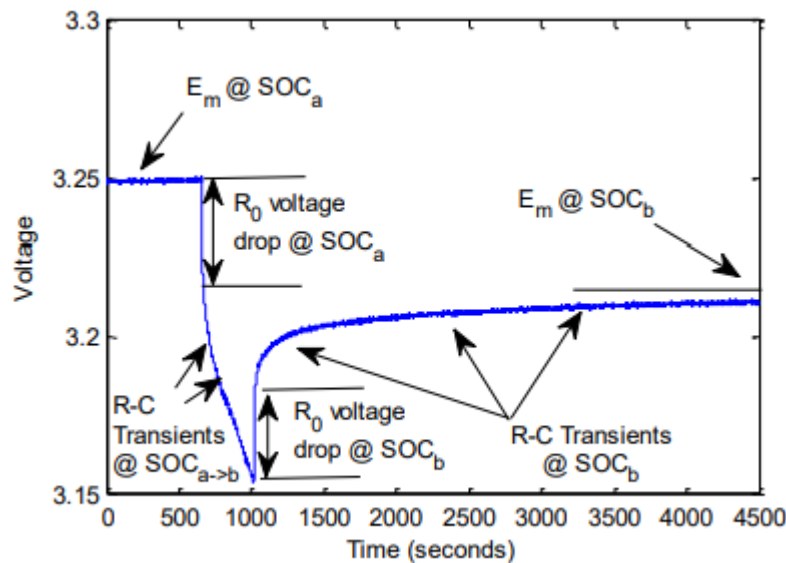


Figura 21. Un pulso del test de descarga Batería Li-Ion. Fuente: Gazzarri, et al. (2013)

Adicionalmente se puede realizar una aproximación por ajuste de curvas polinomial dado el caso que la temperatura ambiente y de la celda se hayan controlado en el experimento. Se podrán entonces

hallar ecuaciones de regresión para R_0 , R_L , C_L y E_m en función del SOC (Chin, et al. 2018), o en función del tiempo en un ciclo de descarga a una tasa de $I = 1C$, sin tomar en cuenta el efecto de variaciones de temperatura. El estudio de Panchal, et al. (2016) muestra que la incidencia de la temperatura en la tensión de la batería es apreciable cuando se exige la batería a tasas de corriente mayores a $2C$, si la tasa es menor a $1C$ la temperatura se puede mantener controlada con mayor facilidad a un valor aproximadamente constante.

5. METODOLOGÍA

Nuestro objetivo general es comparar tres tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica: Baterías Li-Ion, volantes de inercia (Flywheels) y bobinas superconductoras (SMES) mediante modelos dinámicos en software de simulación con el fin de encontrar características de funcionamiento. La metodología propuesta describe las actividades de cada uno de los objetivos específicos en orden de alcanzar el objetivo general.

5.1 Actividades

Objetivo específico 1. Elaborar un estado del arte revisando los estudios sobre las tecnologías de almacenamiento de energía para identificar los intereses específicos de la investigación.

Actividad 1.1 Realizar una revisión del estado del arte en relación a las consideraciones generales y los principios básicos de funcionamiento de las tecnologías de almacenamiento de energía de interés.

Actividad 1.2 Definir las características y parámetros más relevantes de cada tecnología de almacenamiento de energía.

Actividad 1.3 Identificar los modelos circuitales más utilizados de cada tecnología de almacenamiento de energía.

Objetivo específico 2. Elaborar modelos dinámicos para diferentes sistemas de almacenamiento de energía a partir de los modelos de circuitos equivalentes para elaborar un aplicativo en software de simulación.

Actividad 2.1 Seleccionar los modelos circuitales más apropiados de cada tecnología de almacenamiento de energía para el análisis como sistema dinámico.

Actividad 2.2 Asociar los parámetros de interés de entrada de cada modelo dinámico de la actividad

anterior.

Actividad 2.3 Elaborar al menos un modelo en software de simulación de cada tecnología de almacenamiento de energía incorporando los parámetros de interés.

Objetivo específico 3. Comparar variables de funcionamiento mediante respuesta análisis dinámico para identificar ventajas y limitaciones de los diferentes sistemas de almacenamiento.

Actividad 3.1 Definir criterios para un análisis comparativo de los sistemas de almacenamiento de energía a partir de los resultados del software de simulación.

Actividad 3.2 Realizar un análisis comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía identificando ventajas y limitaciones de cada una.

Actividad 3.3 Evaluar las limitaciones del estudio a partir de modelos dinámicos en software de simulación.

5.2 Instrumentos de recolección de información

Búsqueda detallada de información a partir de fuentes científicas como artículos de investigación, documentos de referencia y libros publicados recientemente, tanto nacionales como internacionales.

5.3 Metodología aplicada por cada ESS de interés

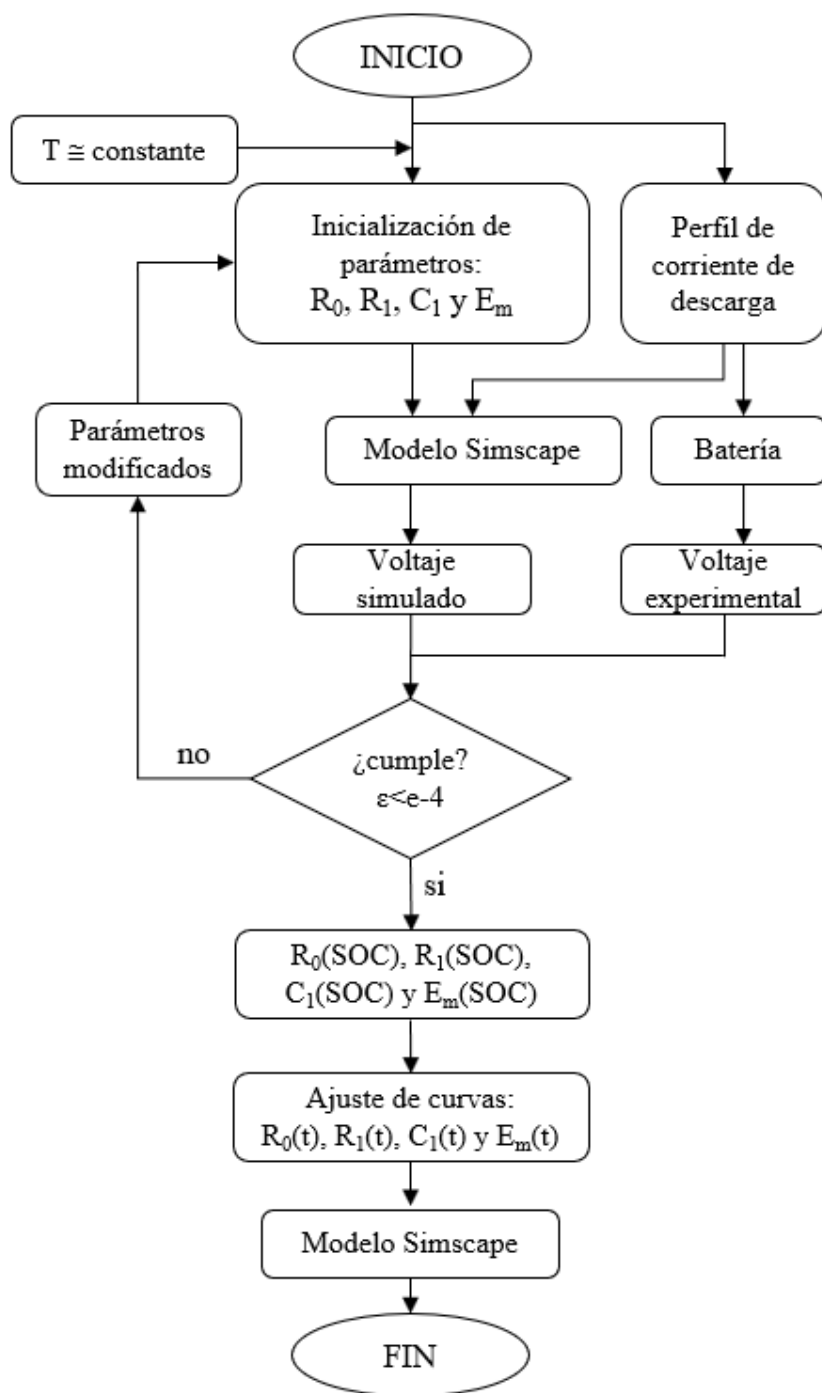


Figura 22. Metodología Batería Li-Ion

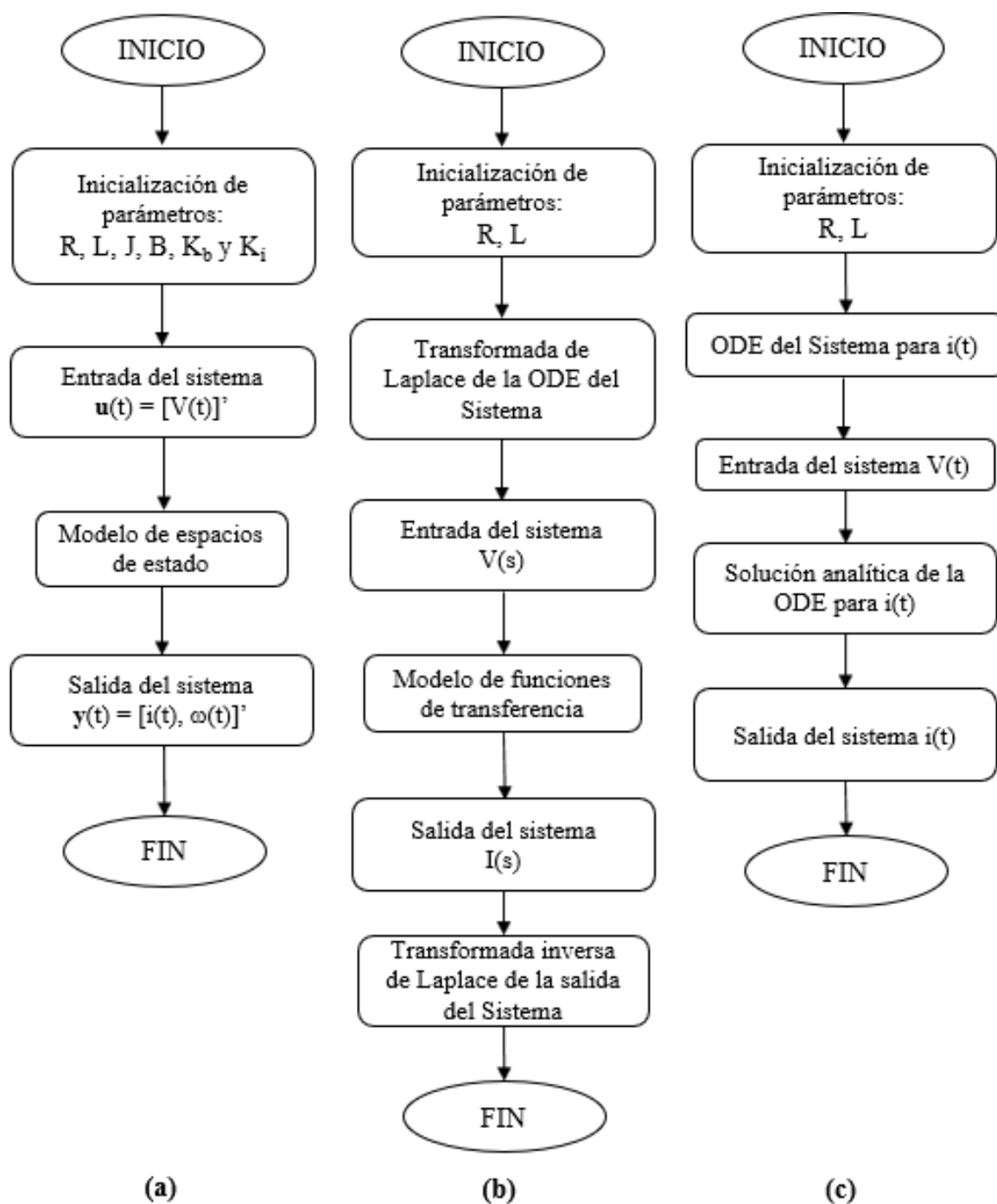


Figura 23. Metodologías Flywheel y SMES. (a) Modelo de espacios de estado Flywheel. (b) Modelo de funciones de transferencia SMES. (c) Solución analítica de la ODE para la SMES

5.4 Criterios para un análisis comparativo

- Comportamiento de las variables de entrada y salida de los sistemas dinámicos.
- Energía y potencia: Valores nominales y respuesta en el tiempo de los sistemas dinámicos.
- Ajuste de elementos almacenadores, J en la Flywheel y L_{coil} en la SMES, para una respuesta en el tiempo comparable de la energía y la potencia de los sistemas dinámicos. Variables de entrada en valores nominales.

6. RESULTADOS

6.1 Batería Li-Ion

El trabajo de Gazzarri, (2012-2017) parte de los siguientes datos iniciales: $Capacity = 27.6250$ [Ah] y $Qe_{init} = 0$ [Ah] para realizar una medición por el método coulométrico por la ecuación (11) para la curva de descarga. Adicionalmente inicializa los parámetros como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Inicialización de parámetros Batería Li-Ion.

SOC	Em [V]	C1 [Farads]	R1 [Ohms]	R0 [Ohms]
0	3.8	10000	0.005	0.01
0.1	3.8	10000	0.005	0.01
0.2	3.8	10000	0.005	0.01
0.3	3.8	10000	0.005	0.01
0.4	3.8	10000	0.005	0.01
0.5	3.8	10000	0.005	0.01
0.6	3.8	10000	0.005	0.01
0.7	3.8	10000	0.005	0.01
0.8	3.8	10000	0.005	0.01
0.9	3.8	10000	0.005	0.01
1	3.8	10000	0.005	0.01

En la Tabla 6 se muestran algunos datos del experimento para realizar la optimización de parámetros como se explicó en la sección 4.4.2. La temperatura se mantiene aproximadamente constante durante todo el experimento.

Tabla 6. PulseData Experimento Batería Li-Ion.

V[V]	i[A]	t[s]	T[°C]
4.1928	0	0	20.009
4.1928	0	37	20.009
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
4.1928	0	599	20.009
3.9580	-27.625	600	20.009
3.9243	-27.625	629	20.009
3.8984	-27.625	666	20.009
3.8809	-27.625	703	20.009
3.8667	-27.625	740	20.009
.	.	.	.
.	.	.	.

En la Figura 24 se muestra el comportamiento de la tensión del experimento como V_{in} y la tensión inicializada V_{out} , frente a los pulsos de corriente constante I_{in} a una tasa de $IC = -27.625$ A. También se muestra el SOC cada 10% correspondiente a pulsos de descarga. Como se mencionó en la sección 4.4.2. la simulación busca a partir de varias iteraciones encontrar los parámetros de la Tabla 5 que mejor aproximen la curva V_{out} a V_{in} . El estimador se encuentra en la simulación mostrada en el ANEXO C. La tolerancia preestablecida para la optimización corresponde a 10^{-4} (Gazzarri, 2012-2017).

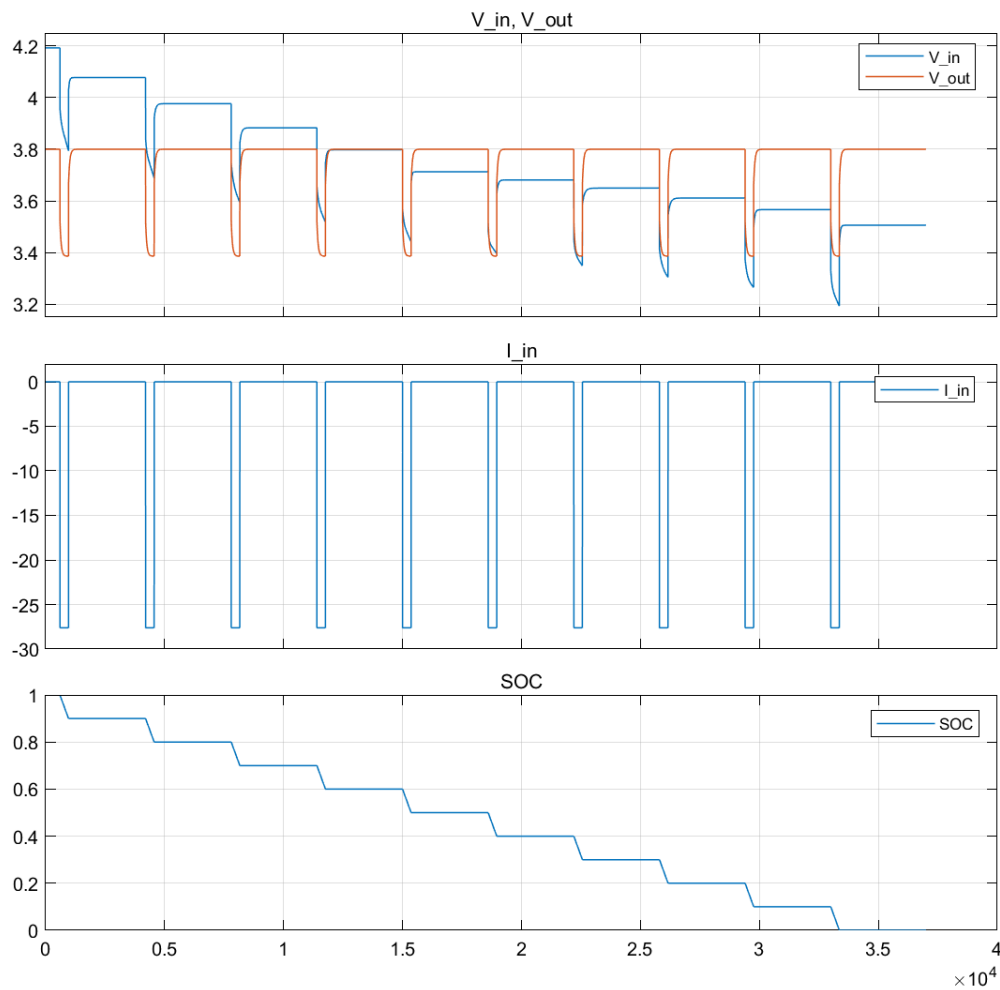


Figura 24. Condiciones iniciales para la optimización Batería Li-Ion.

Al utilizar el módulo de estimación de parámetros se cumple el valor de la tolerancia en la iteración 5 alcanzando la tolerancia de 8.4294×10^{-5} en un tiempo de convergencia de procesamiento de 13 minutos 36 segundos. El experimento y la simulación se muestran en la Figura 25.

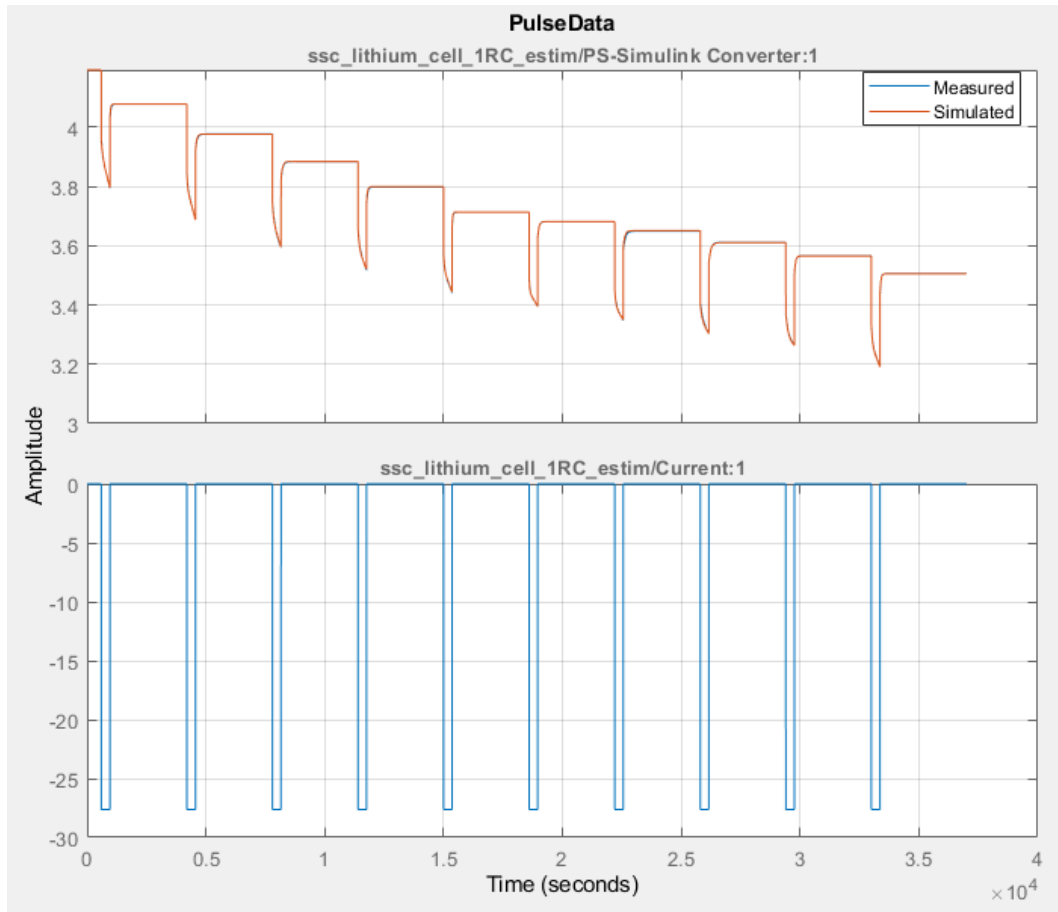


Figura 25. Resultado de la optimización de parámetros Batería Li-Ion.

Los resultados de la estimación de parámetros corresponden a los mostrados en la Tabla 7, donde la simulación con los parámetros encontrados alcanza una gran exactitud en comparación con los datos experimentales como se muestra en la Figura 25.

Tabla 7. Resultados estimación de parámetros Batería Li-Ion.

SOC_LUT	Em [V]	C1 [Farads]	R1 [Ohms]	R0 [Ohms]
0	3.5054	13916	0.0028011	0.008624
0.1	3.5653	19530	0.0023864	0.0085043
0.2	3.6107	33074	0.0026338	0.0086417
0.3	3.6503	29769	0.0021176	0.0087787
0.4	3.6809	25083	0.0020931	0.0082693
0.5	3.7131	12897	0.0018381	0.0079372
0.6	3.7991	18858	0.0019148	0.0081809
0.7	3.8838	26321	0.0022338	0.00824
0.8	3.9763	21530	0.0022661	0.0082549
0.9	4.0777	15895	0.0018784	0.0084003
1	4.1928	37437	0.0016791	0.0086739

A continuación, se procede a realizar el ajuste de curvas a partir de los parámetros de la Tabla 7.

La aproximación polinómica se realiza con el estadístico $R^2 > 0.9$ como se muestra en el ANEXO D.

Los polinomios corresponden a (56) y sus gráficas se muestran en la Figura 26.

$$\begin{aligned}
 C1(t) &= (13312395.2071)t^6 + (-38891920.1242)t^5 + (42183915.2864)t^4 + \\
 &\quad (-20527050.7163)t^3 + (4138098.4339)t^2 + (-191847.3121)t + (13943.6388) \\
 R1(t) &= (-0.0758)t^7 + (0.5889)t^6 + (-1.3395)t^5 + (1.3340)t^4 + \\
 &\quad (-0.6330)t^3 + (0.1364)t^2 + (-0.0121)t + (0.0028) \\
 R0(t) &= (-4.7092)t^8 + (18.4534)t^7 + (-29.0879)t^6 + (23.4916)t^5 + \\
 &\quad (-10.2195)t^4 + (2.2960)t^3 + (-0.2313)t^2 + (0.0070)t + (0.0086) \\
 Em(t) &= (-1.5316)t^4 + (3.5442)t^3 + (-2.1596)t^2 + (0.8333)t + \\
 &\quad (3.5041)
 \end{aligned} \tag{56}$$

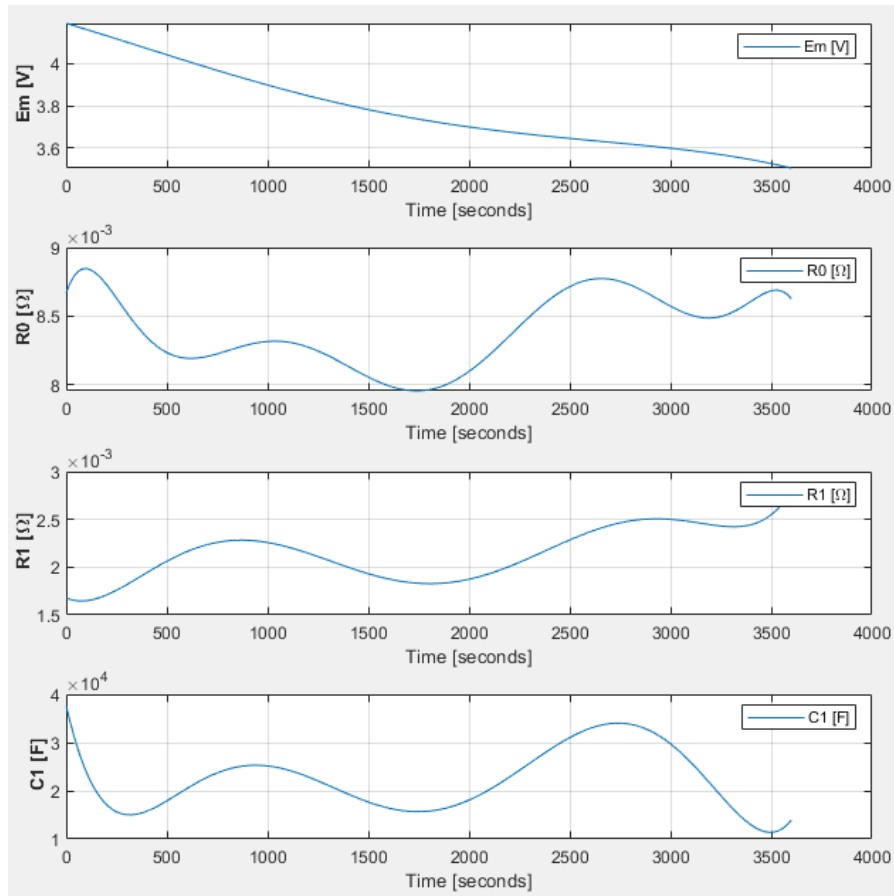


Figura 26. Gráficas de polinomios para E_m , R_0 , R_1 y C_1 de Batería Li-Ion

De la Figura 26 se puede observar el comportamiento esperado para E_m como en la Figura 8 para un ciclo de descarga de una batería, en este caso para una batería Li-Ion. Su comportamiento monótono se traduce en un ajuste polinomial de grado 4, el menor entre los cuatro parámetros. La resistencia de pérdidas R_0 también muestra una tendencia a disipar energía mayormente al comienzo del ciclo y al final. También es clara la tendencia al aumento de la resistencia de contacto de la placa con el electrolito R_l a medida que la batería se descarga.

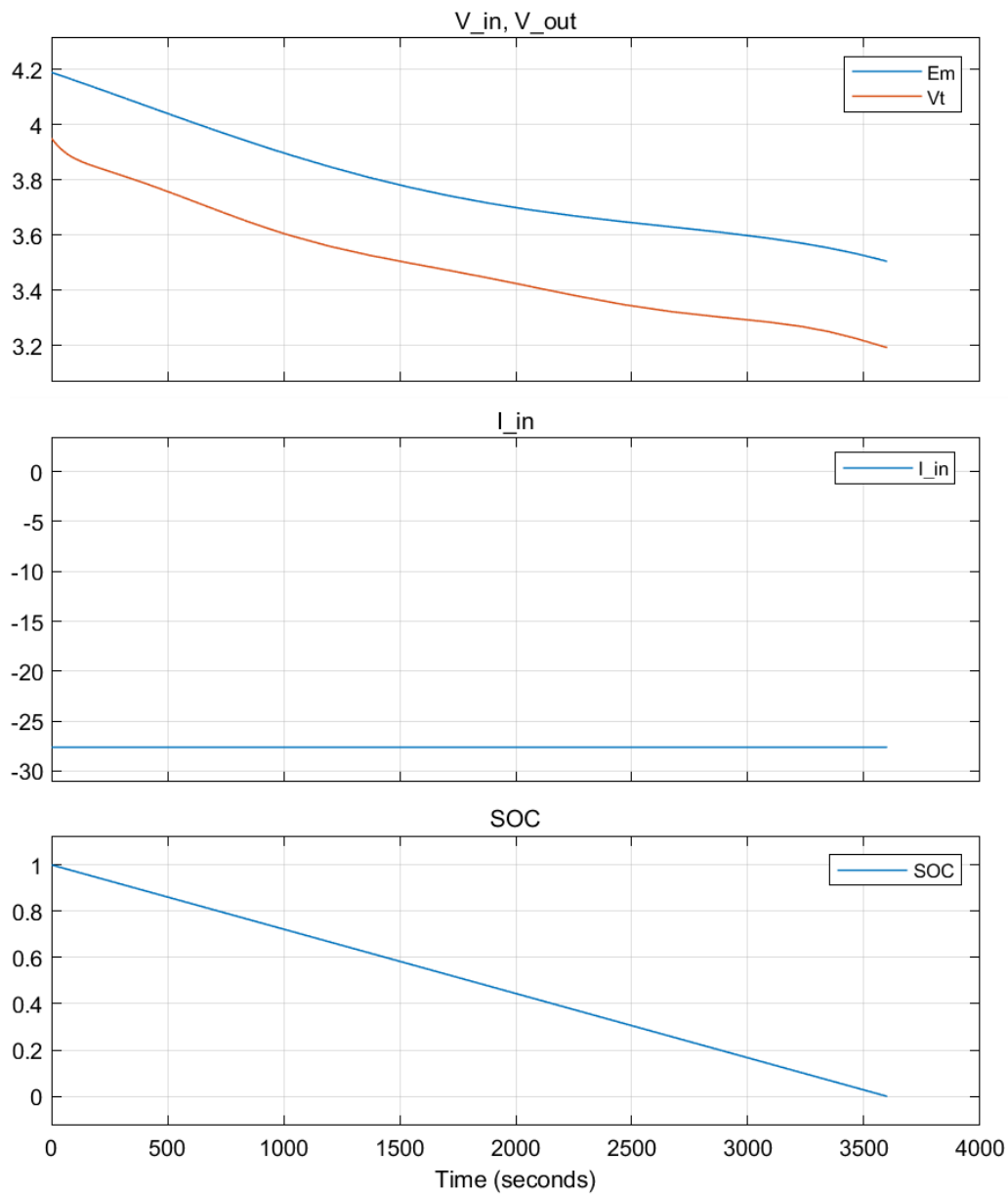


Figura 27. Gráficas de ciclo de descarga para E_m , V_t , I , SoC. Batería Li-Ion

Al actualizar los parámetros y simular nuevamente los datos de corriente y tensión E_m como se muestra en el ANEXO E y ANEXO F, se obtiene el comportamiento de la tensión en los terminales de la batería V_t mostrado en la Figura 27.

Se puede observar en la Figura 27, para el SOC, que el método coulométrico efectivamente mostró una relación lineal esperada para el ciclo total de descarga de 3600s ya que la integral de la ecuación (13) es sobre una corriente de descarga constante. Los efectos de la rama R_l-C_l y R_0 se traducen en una diferencia de la tensión entre E_m y V_t no lineal, por lo tanto, en una diferencia de potencia respecto a la fuente ideal E_m , dado los fenómenos electroquímicos que modelan estos parámetros y sus pérdidas asociadas.

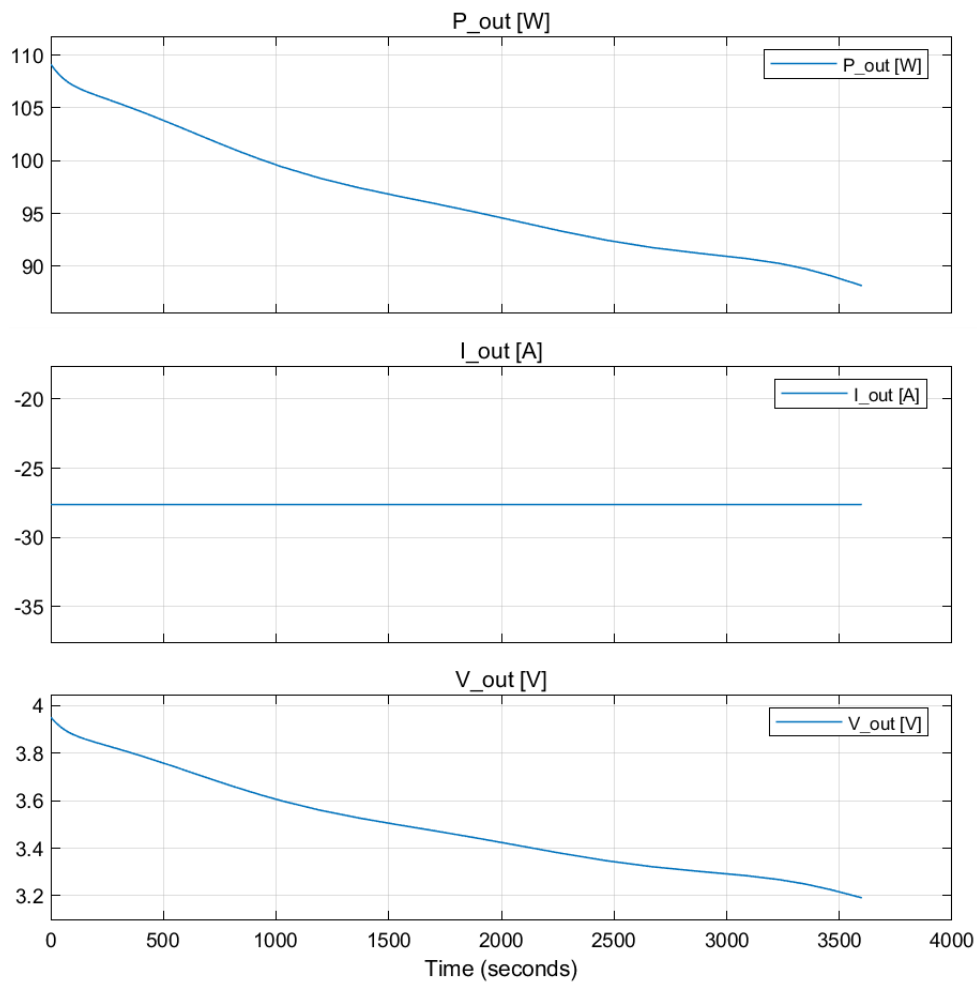


Figura 28. Salida en los terminales de la Batería Li-Ion: potencia, corriente y tensión.

La Figura 28 muestra el resultado de la potencia entregada por la batería en el ciclo de descarga a partir de la ecuación (15). Como la descarga se realizó a corriente constante de -27.625 A, su comportamiento es análogo a la tensión en las terminales de la batería. Es de anotar que la entrega de potencia de la batería se da hasta cuando llega a un valor mínimo de 88.16 W, correspondiente a la tensión mínima de funcionamiento en terminales de 3.1913 V y a una tensión de circuito abierto de 3.5042 V, como se puede ver en la Figura 27. La potencia promedio y tensión promedio en terminales se hallaron desde la Figura 28. La energía inicialmente almacenada en la batería, E_{max} , se calculó a partir del teorema del valor medio para integrales (ver *ANEXO A* y *ANEXO E*). En la Tabla 8, se pueden observar valores representativos para las terminales de la batería Li-Ion.

Tabla 8. Valores representativos batería Li-Ion

C [Ah]	$i_{out}=IC$ [A]	$t_{descarga}$ [s]	$V_{out, max}$ [V]	$V_{out, min}$ [V]	$V_{out, prom}$ [V]	P_{max} [W]	P_{min} [W]	P_{prom} [W]	E_{max} [J]
27.625	27.625	3600	3.951	3.191	3.538	109.1	88.16	97.7372	351854.1

El comportamiento de la energía para el ciclo de descarga está dado por la ecuación (16), donde la condición inicial es la $E_{max} = 351854.1$ Joules para $t = 0$ s. La Figura 29 se obtiene con integración directa sobre la potencia como se muestra en el ANEXO F.

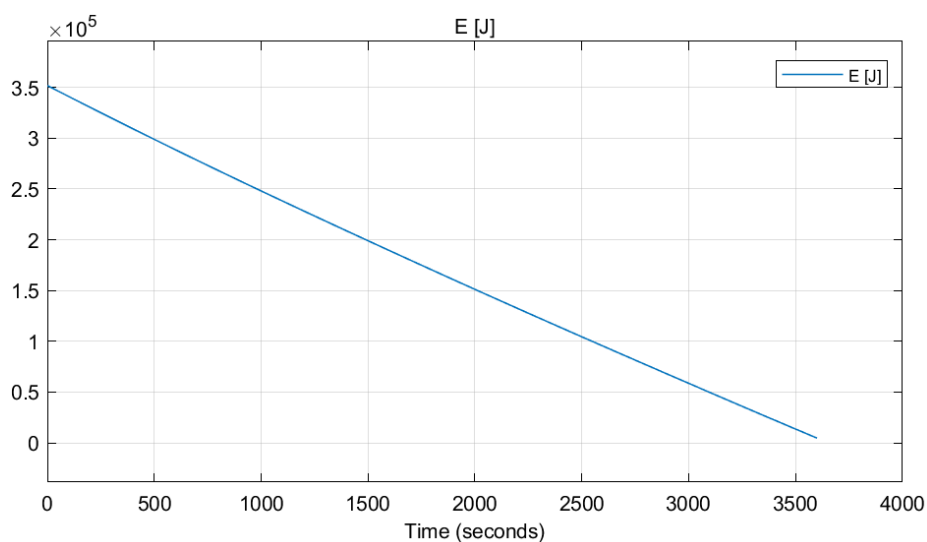


Figura 29. Energía en el ciclo de descarga de la batería Li-Ion.

6.2 Volante de inercia (Flywheel)

Para el modelo de la Flywheel, el estudio de Zhang, et al. (2013) analiza el comportamiento dinámico de las características de acoplamiento electromecánico de un sistema de almacenamiento de energía de volante de inercia (FESS) con un motor de corriente continua sin escobillas (BLDCM) de imanes permanentes (PM). Los parámetros de este estudio para la Flywheel y la entrada del sistema $V(t)$, se muestran en la Tabla 9. La solución para el modelo de la Flywheel se realiza a partir del modelo de variables de estado presentado en las ecuaciones (53), (54) y (55).

Tabla 9. Inicialización de parámetros Flywheel

R [Ω]	L [mH]	K_i [Nm/A]	K_b [V/rad/s]	J [kgm ²]	B [Nm/rad/s]	V [V]
0.5	3.6	0.066845	0.062070	0.123	0.0001	48

La respuesta en el tiempo para la carga de la Flywheel se muestra en la Figura 30*.

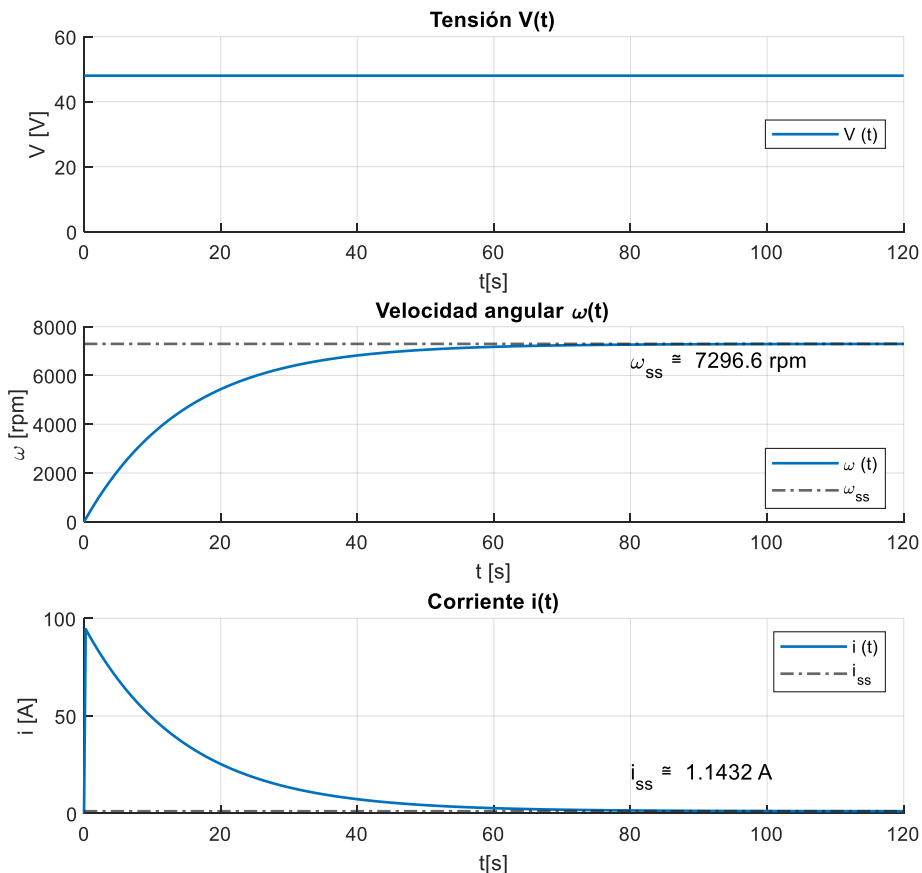


Figura 30. Carga y modo de almacenamiento Flywheel.

* En adelante todas las simulaciones de la SMES y la Flywheel se encuentran en el repositorio:
https://github.com/jvalder98/ESS_SMES-FLYWHEEL.git

Como se observa en la Figura 30, la respuesta en el tiempo para $\omega(t)$ e $i(t)$ alcanzan valores de estado estable $\omega_{ss}(t)$ e $i_{ss}(t)$, donde el pico de corriente en la armadura de la PMDC se debe al rompimiento de la inercia por la condición inicial $\omega(0)=0 \text{ rpm}$ debido al valor de la J . Este pico de 94.55 A es grande en comparación con el de los motores DC, debido al valor de J de la Flywheel, que es mucho más grande que la J propia de un motor DC. En el modo de almacenamiento, la Flywheel sigue conectada a la red para mantener la velocidad ω_{ss} consumiendo una corriente i_{ss} .

Al desconectar la Flywheel de la red y cortocircuitar las terminales eléctricas (comportamiento de motor DC en cortocircuito), la inercia J , principalmente, y las pérdidas por R y B , generan una corriente de respuesta en la armadura de la maquina PMDC y se frena el sistema por sí sólo, como se muestra en la Figura 31, describiendo un caso de autodescarga y pérdida total de energía.

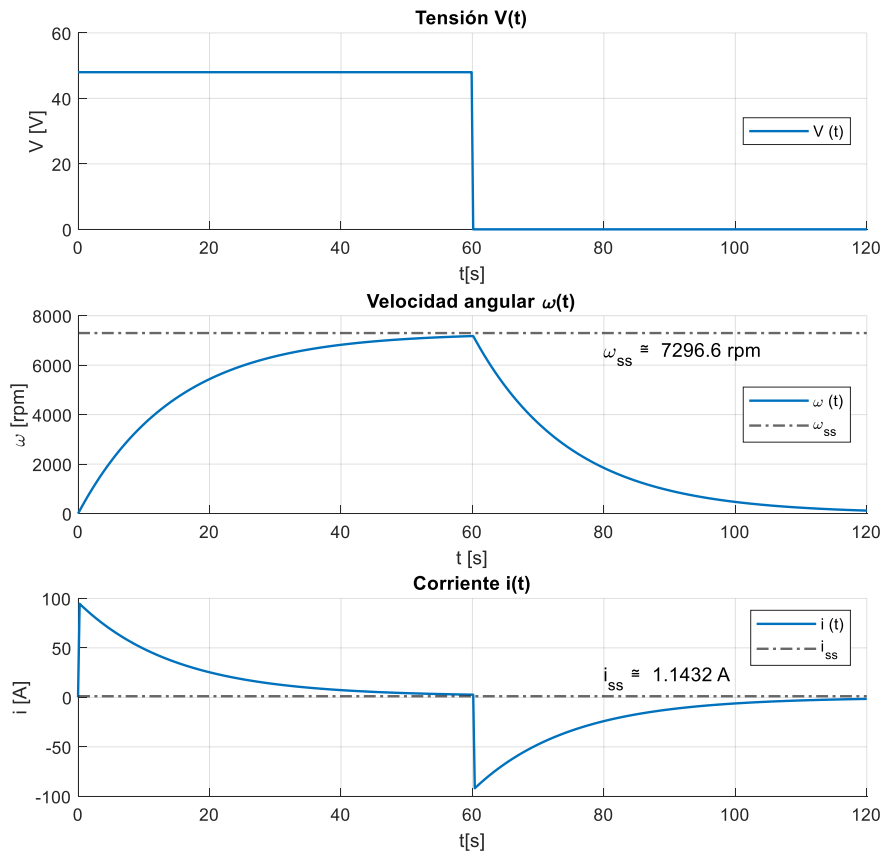


Figura 31. Autodescarga Flywheel con $V(t) = 0$

El proceso de descarga de la Flywheel se analiza en dos casos, a tensión constante y a corriente constante. A tensión constante $V_{out} = 48V$, correspondiente a la tensión de la red, la respuesta en el tiempo del sistema se muestra en la Figura 32.

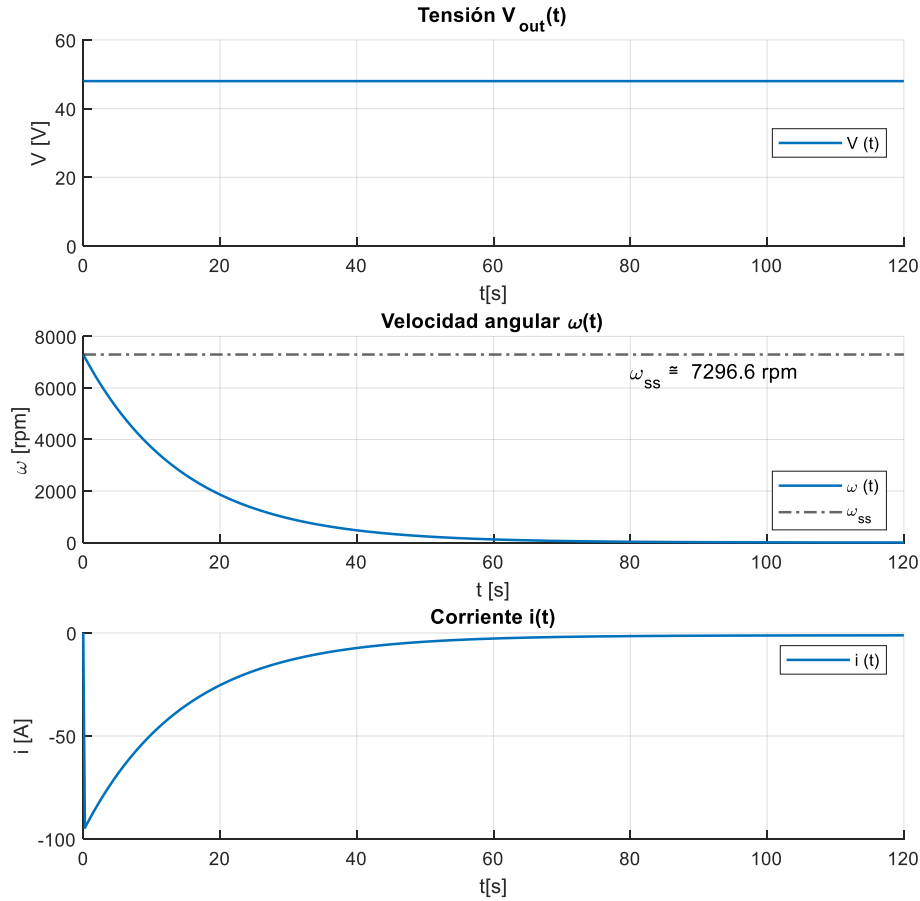


Figura 32. Descarga Flywheel a tensión constante $V_{out} = 48$ V

De la Figura 32, se puede observar que la caída de la velocidad angular $\omega(t)$ da como resultado un comportamiento exponencial similar en la entrega de corriente $i(t)$ en la PMDC debido a la condición de V_{out} constante.

El modelo matemático para la respuesta en el tiempo de la descarga de la Flywheel, a corriente constante, se halló a partir del modelo de la Figura 12, con $L di(t)/dt = 0$ por la condición i_{out} constante. Las respuestas en el tiempo se simulan a partir de las ecuaciones encontradas (57) y (58). Donde $\Omega(s)$

es la transformada de Laplace de $\omega(t)$.

$$\frac{\Omega(s)}{I(s)} = \frac{K_i}{Js + B} \quad (57)$$

$$V_d(t) = K_b \omega(t) - Ri_{out}(t) \quad (58)$$

La descarga de la Flywheel con $i_{out} = 30A$, se muestra en la Figura 33. Es importante señalar la condición de tiempo $t_{\omega=0}$, de descarga total, para la cual la velocidad angular $\omega(t)$ podría seguir disminuyendo a valores negativos, giro contrario, debido al perfil de $i(t)$. Esto se debe al modelo matemático para i_{out} constante, ya que es un modelo dinámico no causal (Ogata, 2010) y no se alcanzan valores de estado estable. También se observa en la Figura 33, que el comportamiento de la tensión $V(t)$ compensa el de la velocidad angular $\omega(t)$ para mantener la corriente i_{out} constante.

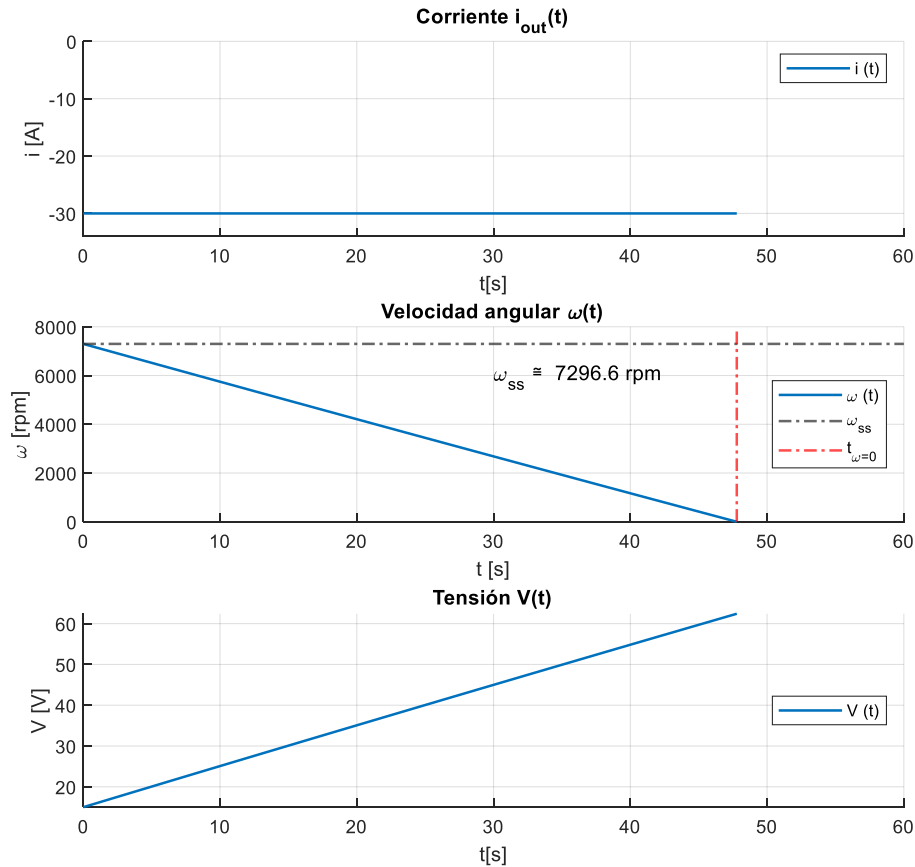


Figura 33. Descarga Flywheel a corriente constante $i_{out} = 30 A$

Otro caso de autodescarga es con $i_{out}=0A$, que corresponde al circuito abierto en las terminales de la maquina PMDC. La respuesta en el tiempo para $\omega(t)$ se halló de la ecuación (26) con la $i=0$, con la condición inicial de E_{max} . La respuesta de la tensión en el tiempo se da a partir de la ecuación (58). La Figura 34, muestra un comportamiento de autodescarga mucho más lento a comparación de la Figura 31 y corresponde a una opción de modo de almacenamiento para ordenes de 10^1 segundos.

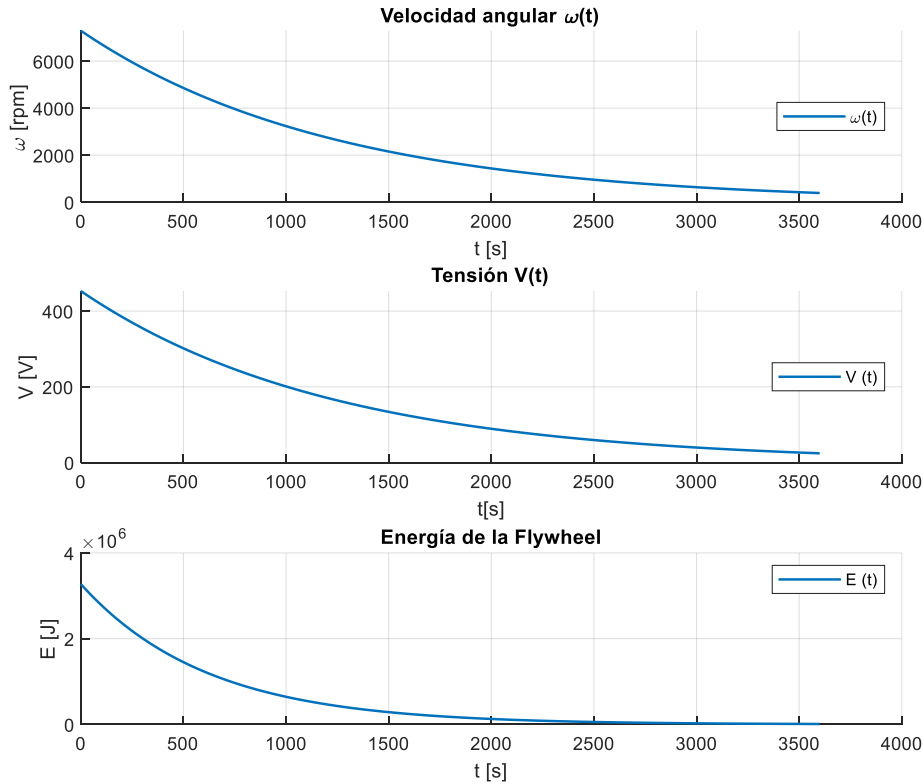


Figura 34. Autodescarga Flywheel con $i(t) = 0$

Para el proceso de carga y modo de almacenamiento, la potencia se analiza tanto para la parte eléctrica como para la mecánica (Figura 12). La potencia eléctrica se halla a partir de (15) y las potencias mecánicas como en (29), tomando en cuenta τ_F (despejando a partir de (25) y (26)) asociada el termino de J , τ_i como torque desarrollado y τ_B asociado a la fricción B . La energía almacenada en la Flywheel se calcula a partir de (21). La respuesta en el tiempo para la potencia y la energía se muestran en la Figura 35.

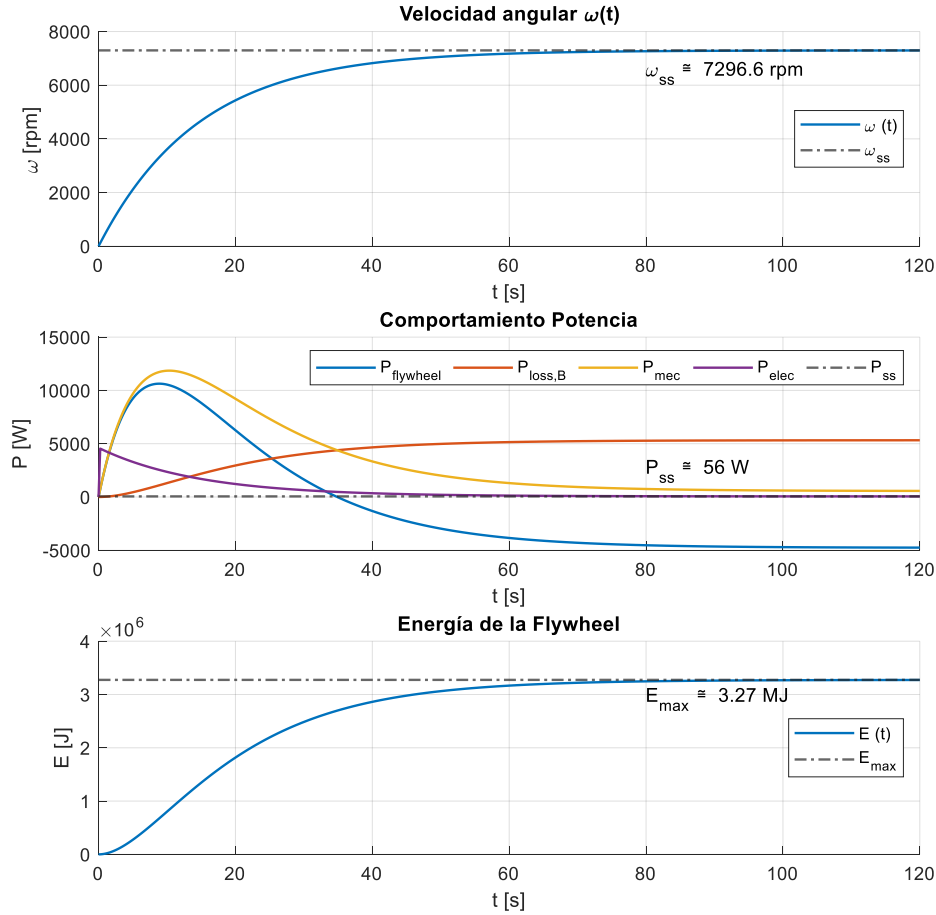


Figura 35. Carga y modo de almacenamiento Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$

La Figura 35 muestra valores extremos como el pico de potencia eléctrica al comienzo de $4.54kW$ y el máximo de potencia mecánica desarrollada de $11.85kW$. Adicionalmente muestra como la $E(t)$ depende de $\omega(t)$ en términos cuadráticos y ambas tienden a los valores de estado estable.

La parte negativa de la $P_{flywheel}$ se interpreta, a partir del estado estable, como una compensación de las pérdidas por fricción viscosa $P_{loss,B}$. La potencia mecánica P_{mec} asociada al par desarrollado τ_i es realmente la potencia neta del comportamiento mecánico de la flywheel, entendida como la suma de la $P_{flywheel}$ y la $P_{loss,B}$, a partir de la ecuación (25). La potencia eléctrica P_{elec} está asociada al comportamiento de $V(t)$ e $i(t)$ de la Figura 30, correspondiendo a la potencia entregada por la red a la Flywheel. El consumo de potencia eléctrica en estado estable, para mantener la Flywheel a la

velocidad angular $\omega_{ss}(t)$ y almacenando la máxima energía E_{max} , corresponde a $P_{ss} \approx 56 \text{ W}$.

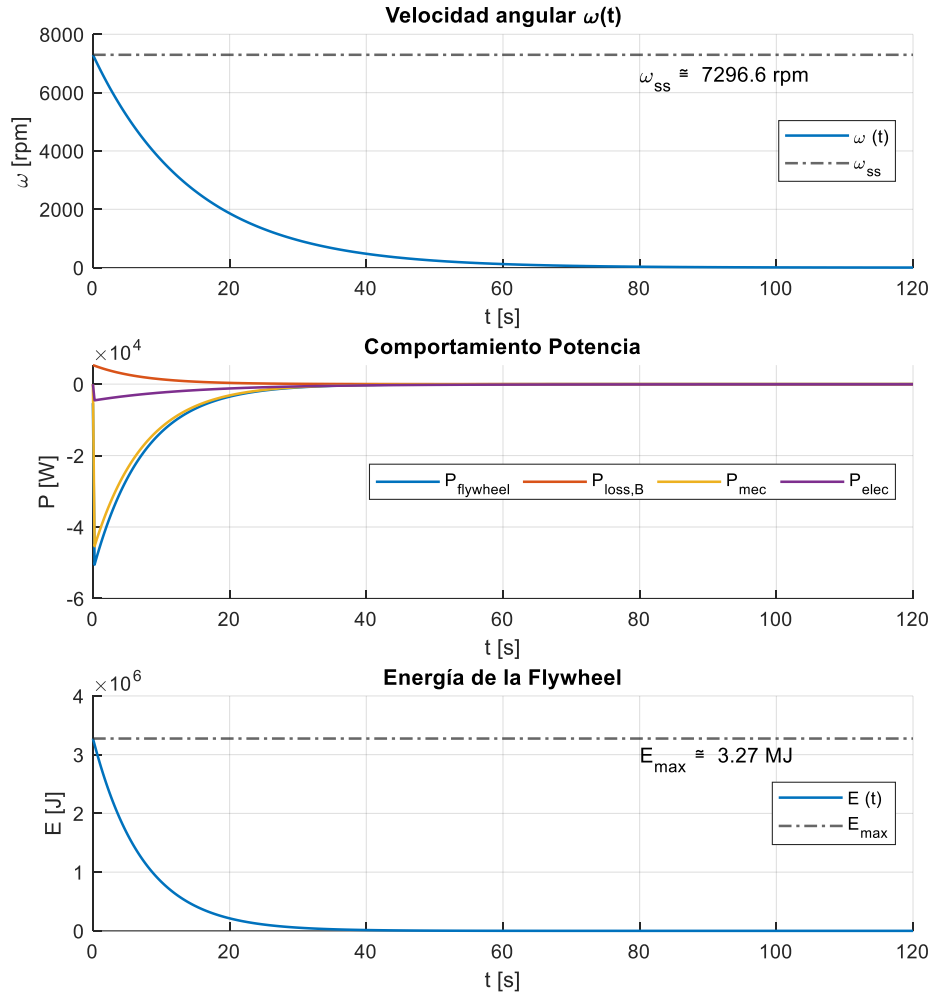


Figura 36. Descarga Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $V_{out} = 48 \text{ V}$

Análogamente como se procedió con la carga y modo de almacenamiento para hallar el comportamiento de la Potencia y la Energía, se tiene en la Figura 36 las respuestas en el tiempo para $\omega(t)$, $P(t)$ y $E(t)$ en el proceso de descarga con V_{out} constante (ver $V(t)$ e $i(t)$ en la Figura 32 para el mismo proceso).

En el comportamiento de la potencia de la Figura 36, es importante resaltar que la potencia entregada por el sistema corresponde a la potencia eléctrica P_{elec} . La potencia mecánica P_{mec} asociada al par desarrollado τ_i , es la potencia transferida a la parte eléctrica del modelo PMDC y corresponde

a la potencia neta que entrega la Flywheel, $P_{flywheel}$, menos las pérdidas por fricción, $P_{loss,B}$. Internamente el sistema solo muestra, a partir de la Figura 36, las pérdidas asociadas a la fricción viscosa B y por tal motivo se encuentran sobre el eje positivo de P [W].

La entrega de energía $E(t)$, desde una energía inicial igual a $E_{max}=3.27$ MJ, se da a una proporción cuadrática de la $\omega(t)$, como en la ecuación (21), y cae a un valor de 10 kJ en aproximadamente 42.4 segundos, disminuyendo la velocidad angular a 400 rpm en este tiempo.

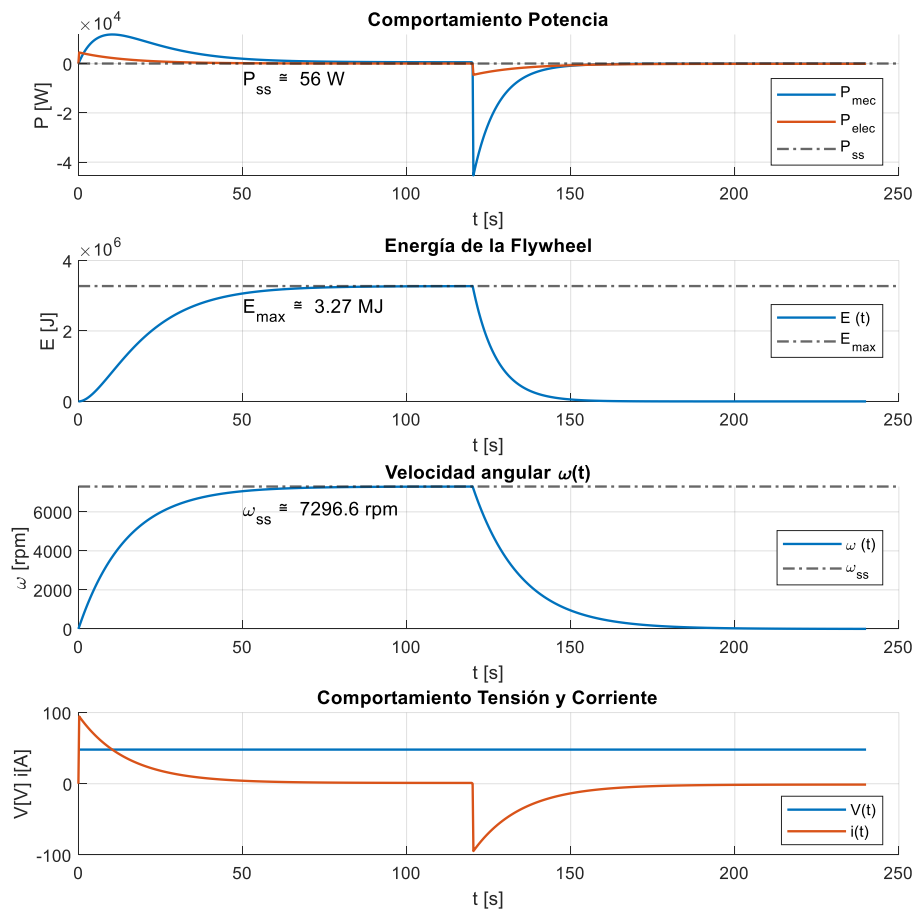


Figura 37. Carga, modo de almacenamiento y descarga a tensión constante Flywheel. $V_{out} = 48V$

En la Figura 37, se muestra la respuesta en el tiempo de $P(t)$, $E(t)$, $\omega(t)$, $i(t)$ y $V(t)$ en un ciclo de carga completo, el modo de almacenamiento y el ciclo de descarga, para una salida de tensión V_{out} constante. Los valores más representativos para esta gráfica se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores representativos carga/descarga Flywheel. V_{out} constante

J [kgm ²]	V_{in} [V]	$t_{carga,99\%}$ [s]	ω_{max} [rpm]	P_{ss} [W]	i_{pico} [A]	V_{out} [V]	$P_{elec,max}$ [W]	$P_{mec,max}$ [kW]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [MJ]
0.1230	48	78	7296.6	56	94.55	48	4538	45.39	34	3.2744

En la Figura 38, se obtienen las respuestas en el tiempo para las variables $\omega(t)$, $P(t)$ y $E(t)$, en el proceso de descarga con i_{out} constante (ver $V(t)$ e $i(t)$ en la Figura 33 para el mismo proceso). La potencia entregada por el sistema corresponde a la potencia eléctrica P_{elec} , tomando valores en aumento desde 450 W hasta 1868 W. La potencia mecánica P_{mec} asociada al par desarrollado τ_i , es la potencia transferida a la parte eléctrica del modelo PMDC y corresponde a la potencia neta que entrega la Flywheel, $P_{flywheel}$, menos las pérdidas por fricción, $P_{loss,B}$.

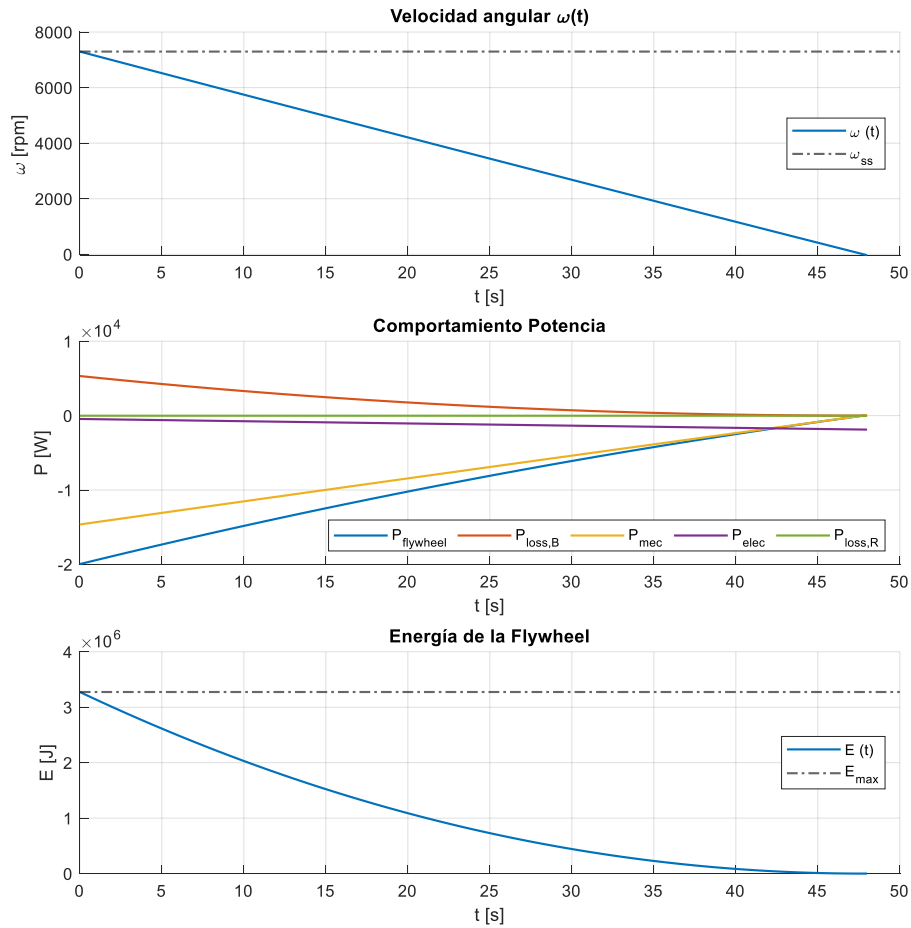


Figura 38. Descarga Flywheel. $\omega(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $i_{out} = 30$ A

Las pérdidas eléctricas asociadas a R , $P_{loss,R}$, corresponden a 15 W en todo el ciclo (Figura 38).

En la descarga a V_{out} constante, las pérdidas eléctricas alcanzan un máximo de 47.275 W con el pico de corriente de descarga $i_{max,d}=94.55\text{ A}$, mostrado en la Figura 32.

La entrega de energía $E(t)$ con i_{out} constante (Figura 38), desde una energía inicial igual a $E_{max}=3.27\text{ MJ}$, se da a una proporción cuadrática de la $\omega(t)$, como en la ecuación (21), y cae a un valor de 40 kJ en aproximadamente 42.4 segundos , un valor 4 veces mayor para la energía en el mismo instante para la descarga a V_{out} constante. En este mismo instante de tiempo, la velocidad angular alcanza un valor de 805 rpm , el doble para el caso de V_{out} constante.

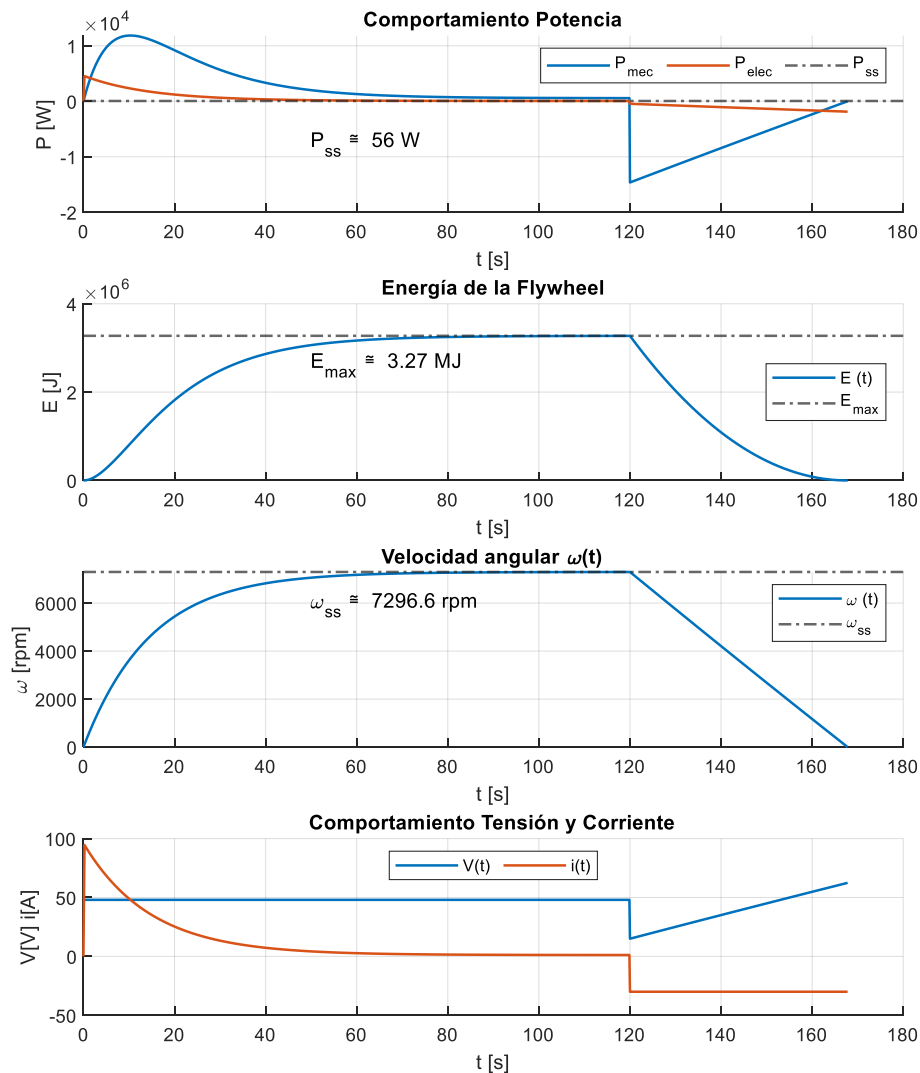


Figura 39. Carga, modo de almacenamiento y descarga a corriente constante Flywheel. $i_{out} = 30\text{ A}$

Comparando la respuesta en el tiempo para $E(t)$ y $\omega(t)$ en las Figura 36 y Figura 38, se puede apreciar un mejor comportamiento de ambas variables para el caso de la descarga de la Flywheel con i_{out} constante.

En la Figura 39, se muestra la respuesta en el tiempo de $P(t)$, $E(t)$, $\omega(t)$, $i(t)$ y $V(t)$ en un ciclo de carga completo, el modo de almacenamiento y el ciclo de descarga, para una salida de corriente constante, $i_{out} = 30A$. Los valores más representativos para esta gráfica se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores representativos carga/descarga Flywheel. i_{out} constante

J [kgm ²]	V_{in} [V]	$t_{carga,99\%}$ [s]	ω_{max} [rpm]	P_{ss} [W]	V_{pico} [A]	i_{out} [A]	$P_{elec,max}$ [W]	$P_{mec,max}$ [kW]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [MJ]
0.1230	48	78	7296.6	56	62.43	30	1873	14.632	47.55	3.2744

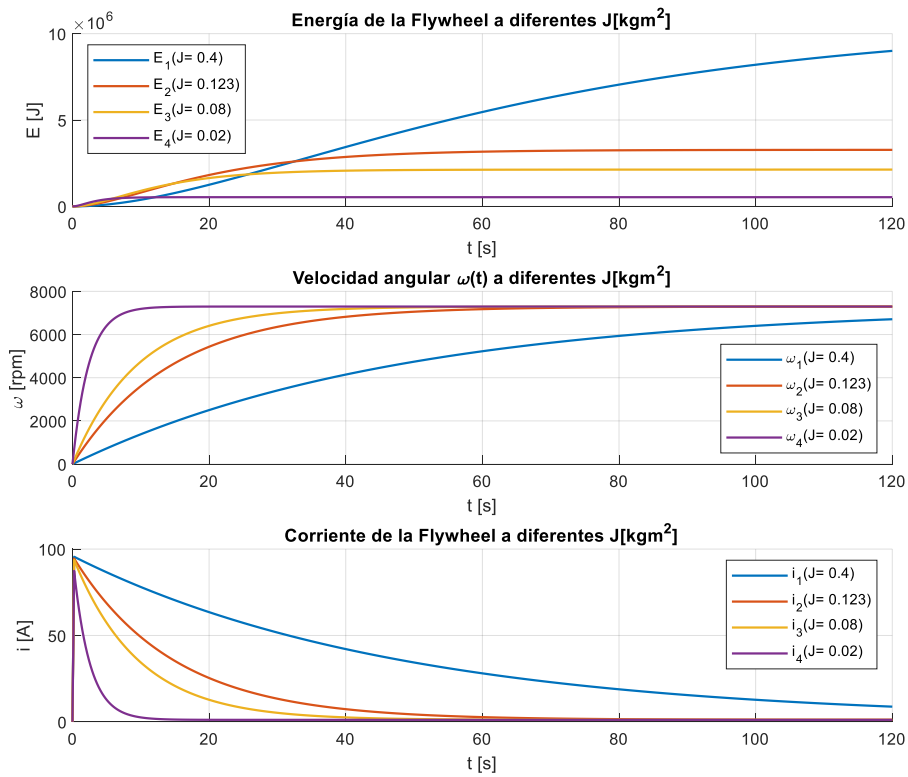


Figura 40. Carga Flywheel con variación de J . $V_{in} = 48V$ constante

La Figura 40 muestra el comportamiento de $E(t)$, $\omega(t)$ e $i(t)$, en el ciclo de carga de la Flywheel a V_{in} constante, para diferentes valores de inercia J . A partir de la ecuación (21) y de la respuesta en el

tiempo de la energía $E(t)$, se puede comprobar como la Flywheel mejora su capacidad de almacenamiento cuando J aumenta. El estado estable de la velocidad angular ω_{ss} no depende de J , pero el comportamiento de $\omega(t)$ es diferente, el tiempo de establecimiento es más rápido a medida que J disminuye y aumenta para valores grandes de J , ya que a medida que la masa de la Flywheel es más grande, la máquina PMDC toma más tiempo en llegar a su velocidad nominal.

El comportamiento de la corriente $i(t)$ en la Figura 40, está descrito por la expresión $\tau_i(t) = K_i * i(t)$, como se estudió en la sección 4.3.2., donde el par desarrollado τ_i está relacionado directamente con la velocidad angular $\omega(t)$. El comportamiento de $i(t)$, en consecuencia, presenta un comportamiento similar a $\omega(t)$, donde el pico de corriente para romper la inercia es más pronunciado para J mayores.

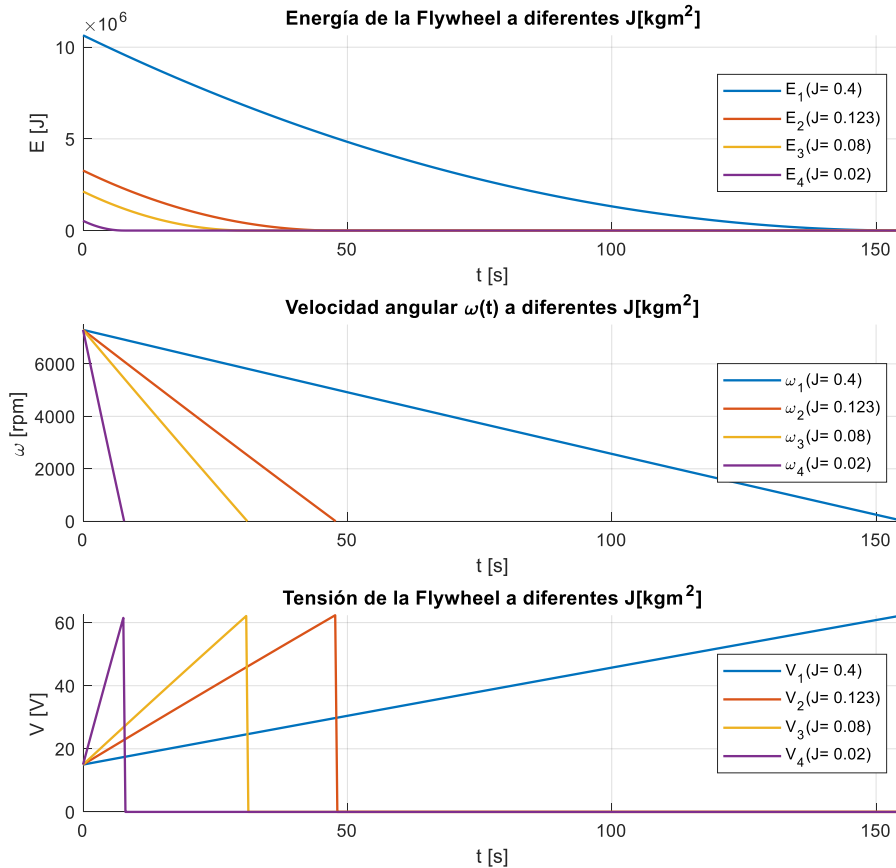


Figura 41. Descarga Flywheel con variación de J . $i_{out} = 30$ A constante

Análogamente para el proceso de descarga, la Figura 41, muestra el comportamiento de $E(t)$, $\omega(t)$

e $i(t)$, en el ciclo de descarga de la Flywheel a i_{out} constante, para diferentes valores de inercia J . A estas condiciones de descarga se puede observar como el aumento de J aumenta considerablemente el tiempo de descarga. La velocidad angular $\omega(t)$, para estas condiciones, describe un comportamiento casi lineal, aunque no lo es debido a la forma de la respuesta en el tiempo para la función de transferencia (57) que da como resultado una función exponencial.

La respuesta en el tiempo para la tensión se da hasta un valor pico donde la velocidad angular $\omega(t)$ alcanza un valor de 0 rpm . Los valores mayores de $V(t)$ no corresponden al comportamiento real del sistema. Esto se debe a la naturaleza de la salida $V(t)$ para el sistema dinámico ya que es monótonamente creciente para el proceso de descarga con la condición i_{out} constante.

6.3 SMES

6.3.1 SMES $R_{coil} = 0 \Omega$

Para la SMES, el trabajo de Gouda, et al. (2020) estudia superconductores a baja temperatura, en torno a los 4.2 K , mediante refrigeración con Helio líquido. Esta condición es importante, ya que la consecuencia principal es simplificar el modelo de la SMES mostrado en la Figura 14, considerando la $R_{coil} = 0 \Omega$. Los parámetros, la entrada del sistema $V(t)$ y la condición de energía máxima de almacenamiento se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Inicialización de parámetros SMES. Caso $R_{coil}=0 \Omega$

$R [\Omega]$	$L[H]$	$V [V]$	$E_{max}[J]$
0	1.8	100	270000

La solución para el modelo de la SMES se realiza de forma analítica a partir de la ODE que modela su comportamiento y con la nueva condición $R_{coil} = 0 \Omega$, las soluciones (37), (38) y (39) ya no son válidas. Las ecuaciones para la carga, el modo de almacenamiento y la descarga de la SMES con $R_{coil}=0 \Omega$, se hallan solucionando analíticamente las ODE (35) y (36) con $R_{coil} = 0 \Omega$. Las

ecuaciones de $i_d(t)$, $i_{sm}(t)$ e $i_d(t)$, están dadas por (59), (60) y (61). $V(t)$ se toma constante y representa $V=iR_{load}$ para la descarga, igual a la tensión del proceso de carga, ya que corresponde a la tensión de la red a la que está conectada tanto la SMES como la R_{load} .

$$i_c(t) = \frac{V}{L_{coil}} t \quad (59)$$

$$i_{sm}(t) = i_0 \quad (60)$$

$$i_d(t) = i_0 - \frac{V}{L_{coil}} t \quad (61)$$

La respuesta $i(t)$ para la carga de la SMES se muestra en la Figura 42. A partir de la ecuación (32) se puede hallar la $i_{L,critica}$, a la cual corresponde un $t_{carga, \max}$, los cuales aparecen indicados en la Figura 42.

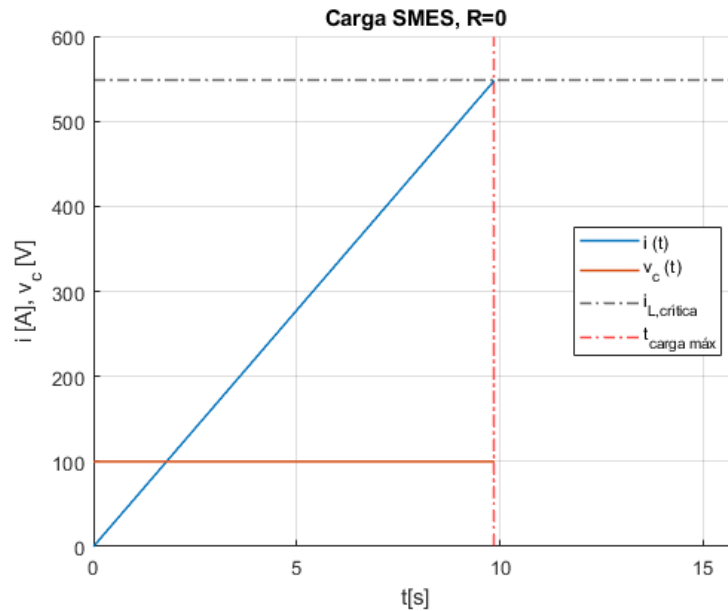


Figura 42. Carga de la SMES. $i(t)$, $V(t)$. $R_{coil}=0 \Omega$.

En la Figura 42, a partir de la ecuación (59) para el ciclo de carga, la pendiente de la corriente de la SMES está dada por V/L_{coil} . La Figura 43, muestra el proceso de descarga desde la condición inicial

de carga máxima. Análogamente, la pendiente de decaimiento está dada por $-V/L_{coil}$, descrita en la ecuación (62), donde el proceso de conmutación de la tensión en las terminales de la SMES, da como resultado una pendiente negativa por la condición de la bobina, ya que la corriente debe seguir en la misma dirección tanto en la carga como en la descarga.

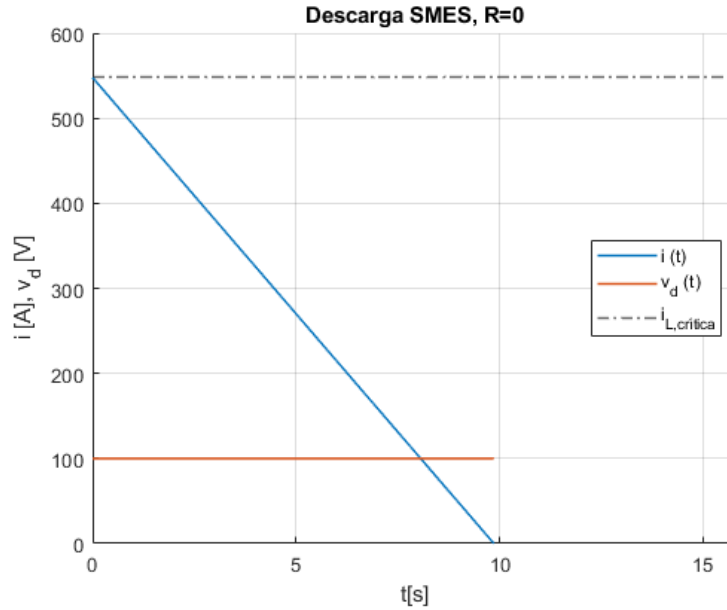


Figura 43. Descarga de la SMES. $i(t)$, $V(t)$. $R_{coil}=0 \Omega$.

El modo de almacenamiento, como estado en el cual, la SMES no recibe ni entrega potencia, se da cuando en el proceso de carga o descarga la SMES se desconecta de la fuente y almacena la energía en el tiempo sin entregar potencia a una carga R_{load} , como se expresa en la ecuación (60). En la Figura 44, se muestra el proceso de carga de la SMES hasta un tiempo menor al de carga máxima. Al desconectar la fuente, el circuito resultante es el mostrado en la Figura 16, donde en ausencia de resistencia, $R_{coil} = 0 \Omega$, la corriente se mantiene constante y por lo tanto la energía se mantiene en el tiempo.

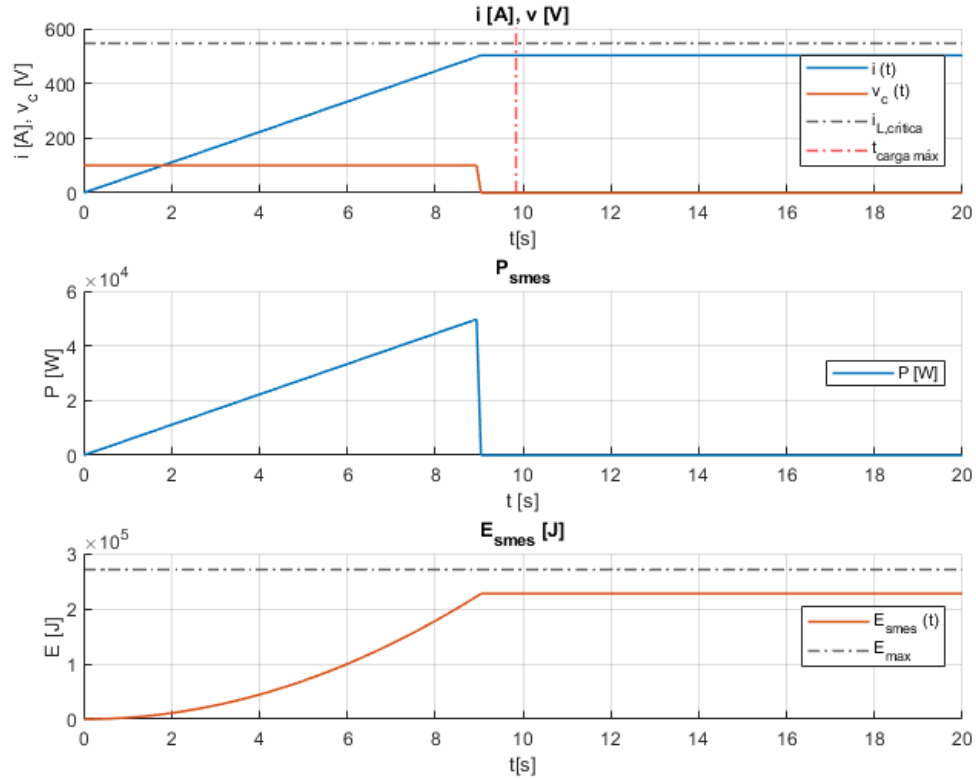


Figura 44. Carga y modo de almacenamiento SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{\text{coil}}=0 \Omega$

El comportamiento mostrado en la Figura 44 representa una condición ideal, donde el ESS queda a la espera indefinidamente de recibir o entregar potencia, lo que se interpreta como un sistema sin proceso de autodescarga. El modo de almacenamiento, idealmente, supera el comportamiento de la batería C-LiFePO₄, donde la autodescarga puede llegar hasta el 3% al mes a una temperatura de 20°C (Glaize & Geniès, 2013). Para fines comparativos de pocos segundos, resulta interesante este comportamiento, donde para la batería Li-Ion y la SMES es similar bajo estas condiciones y pueden asegurar una autodescarga en el modo de almacenamiento aproximadamente del 0%.

En la Figura 45, se muestra la respuesta en el tiempo de la corriente, la potencia y la energía en un ciclo de carga completo, el modo de almacenamiento y el ciclo de descarga seguidamente. Los valores más representativos para la respuesta en el tiempo alcanzando el valor nominal de energía y, seguidamente almacenando y descargando la SMES se encuentran en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores representativos SMES. $R_{coil}=0 \Omega$

V_{in} [V]	L [H]	$i_{crítica}$ [A]	E_{max} [J]	t_{carga} [s]	$t_{descarga}$ [s]	P_{max} [W]	P_{min} [W]	$V_{descarga}$ [V]
100	1.8	547.7226	270000	9.8590	9.8590	54770	0	100

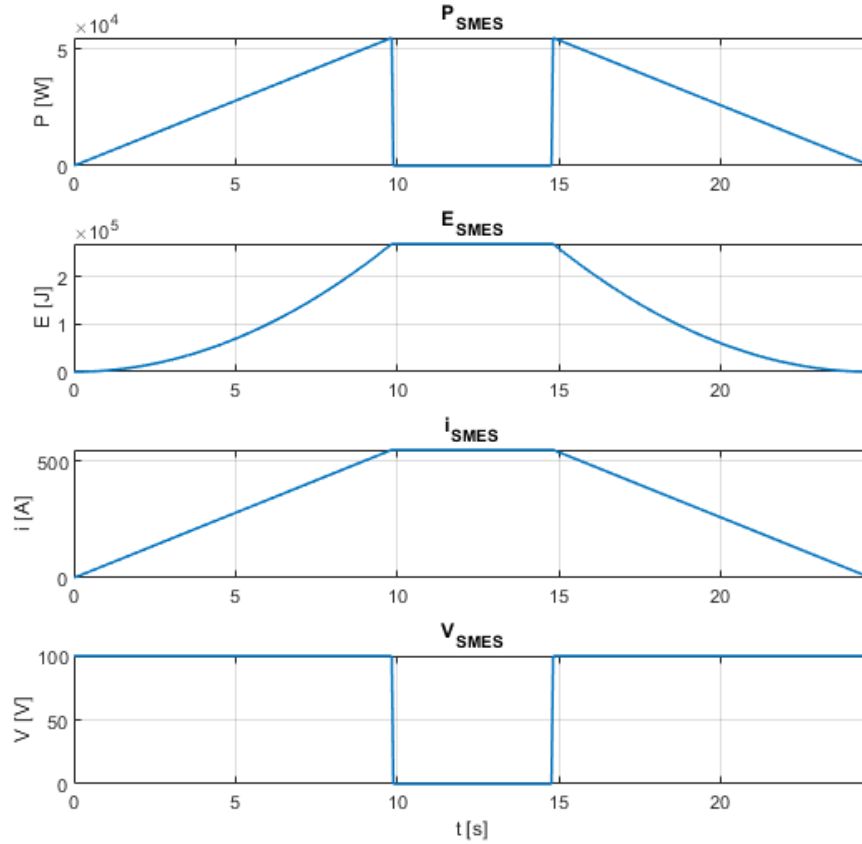


Figura 45. Carga, modo de almacenamiento y descarga SMES. $R_{coil}=0 \Omega$

Al analizar V/L_{coil} como una pendiente a partir de la Figura 42 y Figura 43 , las variaciones de V o L resultarán en diferentes respuestas del sistema. La respuesta $i(t)$ para carga de la SMES variando la tensión y L_{coil} , se presentan en la Figura 46.

Con el aumento en la tensión de entrada, la SMES se establecerá en la $i_{crítica}$ más rápidamente y a una tensión menor el tiempo de establecimiento será más alto, como se muestra en la Figura 46. También se evidencia que el tiempo en el que se alcanza la carga máxima, es mucho menor a medida que crece la tensión de entrada, ya que la tasa de crecimiento de la corriente aumenta

proporcionalmente. Este comportamiento indica una mejora del tiempo de respuesta para almacenar energía a medida que la tensión de funcionamiento es mayor ya que para una bobina el almacenamiento de energía depende cuadráticamente de la corriente.

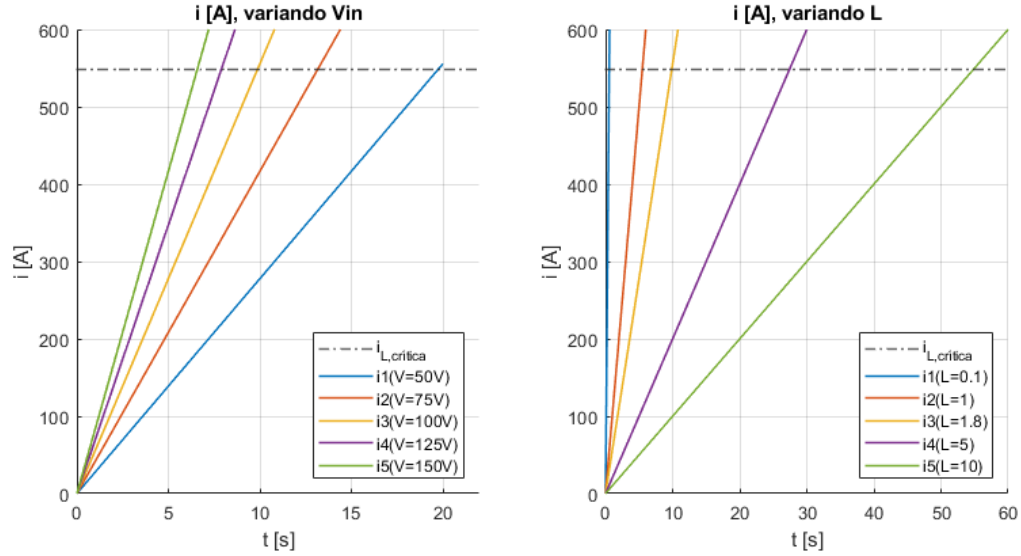


Figura 46. Variación de V_{in} y L_{coil} en el ciclo de carga de la SMES. $R_{coil}=0 \Omega$

Contrario a lo que pasa con la variación de la tensión, el aumento de la inductancia L dará como resultado un tiempo de establecimiento mucho mayor, ya que representa el elemento que almacena energía como se muestra en la Figura 46. Esto se ve reflejado en un periodo más largo para llegar a su máximo de almacenamiento. El cambio en los valores de inductancia puede verse para fines prácticos, como una nueva bobina con una L_{coil} mayor, por lo que también se tendría que considerar un nuevo valor crítico para la corriente en la bobina. En todo caso, el aumento de L_{coil} no se puede considerar solamente a partir de la ecuación (32), ya que obedece también a aspectos constructivos a partir de la ecuación (41).

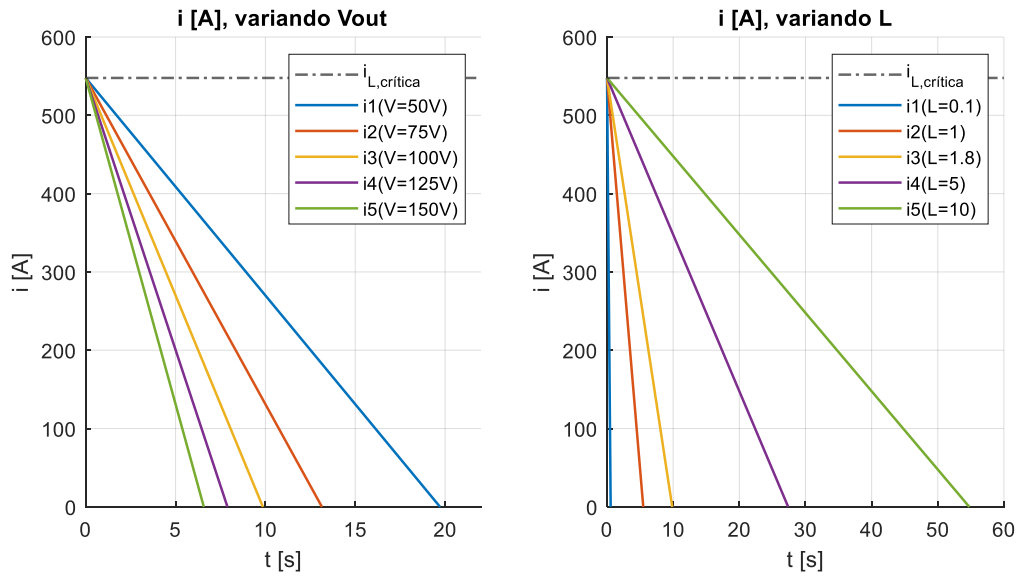


Figura 47. Variación de V_{out} y L_{coil} en el ciclo de descarga de la SMES. $R_{coil}=0 \Omega$

Para la Figura 47, se tiene para valores menores de V_{out} un tiempo de descarga mayor. Para una tensión de salida constante, si se aumenta la L_{coil} se tendrán tiempos de descarga mayores.

6.3.2 SMES $R_{coil} \neq 0 \Omega$

A continuación, se analiza el caso de una SMES con $R_{coil} \neq 0$ (Zhou, et al. 2017). Los parámetros corresponden a los mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros SMES. $R_{coil}=2 \times 10^{-5} \Omega$

$R [\Omega]$	$L[H]$	$V [V]$	$E_{max}[kJ]$
$2 \times 10^{-5} \Omega$	0.5	100	40

El valor de la resistencia mostrado en la Tabla 14 es un valor muy pequeño, como se muestra en la Figura 48, el comportamiento sigue siendo muy similar al analizado en la sección 6.3.1. Para fines de análisis del sistema dinámico de la SMES con una resistencia que conlleve a comportamientos exponenciales apreciables, se cambian los parámetros a los mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros SMES. $R_{coil}= 0.2 \Omega$

$R [\Omega]$	$L[H]$	$V [V]$	$E_{max}[kJ]$
0.2	0.5	100	62.5

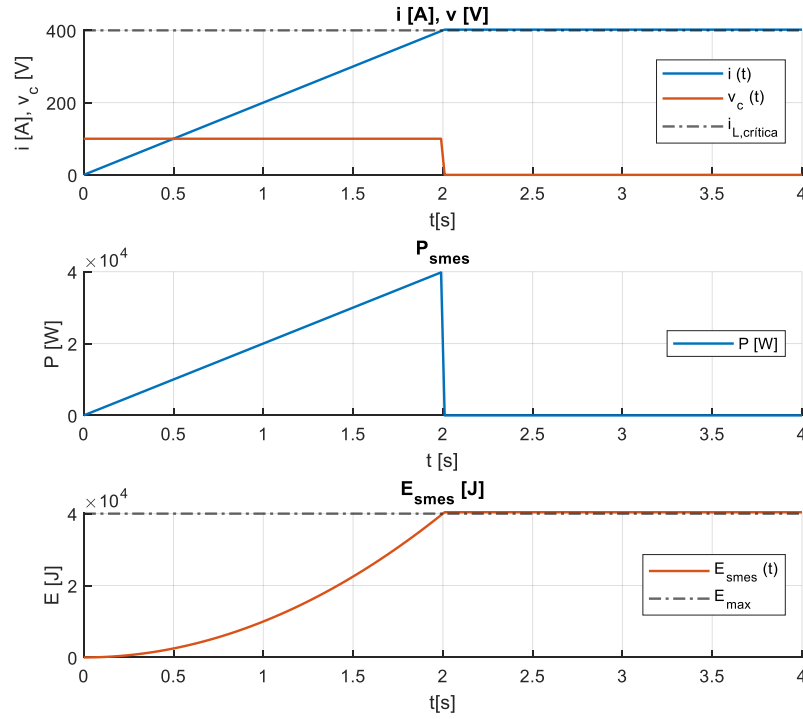


Figura 48. Carga y modo de almacenamiento SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{coil} = 2 \times 10^{-5} \Omega$.

La respuesta en el tiempo para la SMES con los parámetros de la Tabla 15 se muestra en la Figura 49. La respuesta en el tiempo para $i(t)$ está dada por las ecuaciones (37) y (38), para el ciclo de carga y para el modo de almacenamiento. En este caso el valor de la resistencia genera el comportamiento exponencial y el tiempo de carga aumenta considerablemente hasta alcanzar valores de estado estable para la corriente y la energía. Tanto el proceso de carga como el modo de almacenamiento, para de $R_{coil} \neq 0 \Omega$, el comportamiento es el equivalente a un circuito RL , solo que los valores que se están considerando presentan grandes retos constructivos

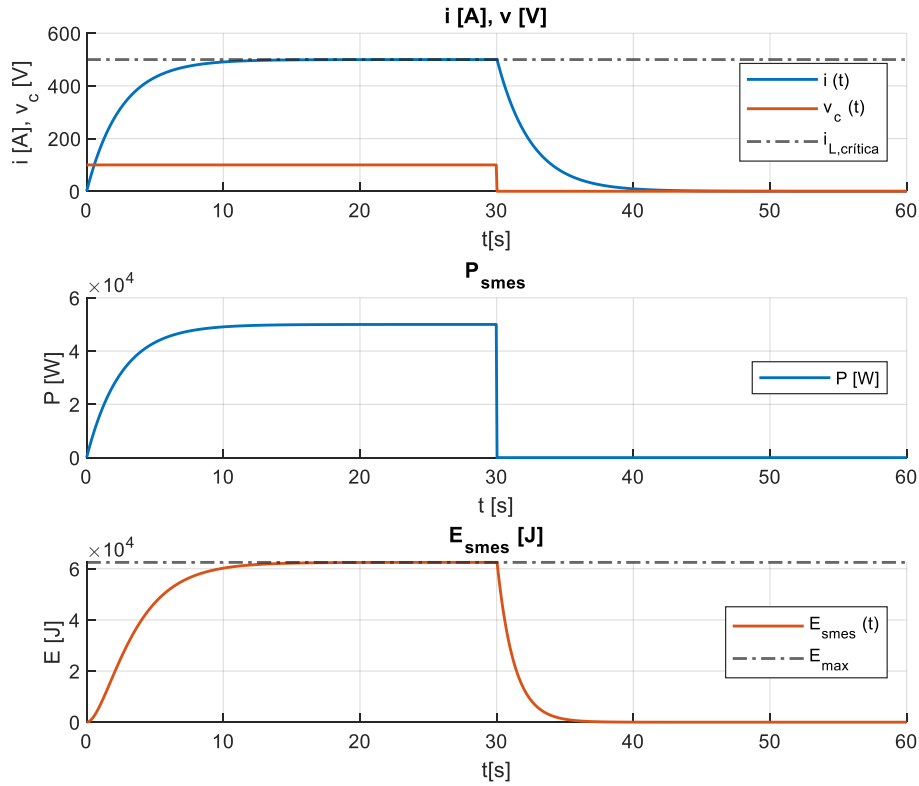


Figura 49. Carga y modo de autodescarga SMES. $i(t)$, $V(t)$, $P(t)$, $E(t)$. $R_{coil} = 0.2 \Omega$

El proceso de descarga con $R_L = 1 \Omega$, después de carga máxima, se muestra en la Figura 50. Como se observa el valor R_L al momento de entrar al circuito genera una sobretensión considerable de casi 500V, igualmente se genera un pico de potencia entregada de 249kW. El tiempo de carga y descarga se consideran a un 99% de la Energía, tanto almacenada como entregada.

Los valores representativos de la Figura 50 se consignan en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores representativos SMES. $R_{coil} \neq 0 \Omega$

L [H]	R [Ω]	R_L [Ω]	V_{in} [V]	$t_{carga,99\%}$ [s]	i_{ss} [A]	V_{out} [V]	i_{out} [A]	V_{pico} [V]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [kJ]
0.5	0.2	1	100	13.08	500	variables		499.8	1.013	62.5

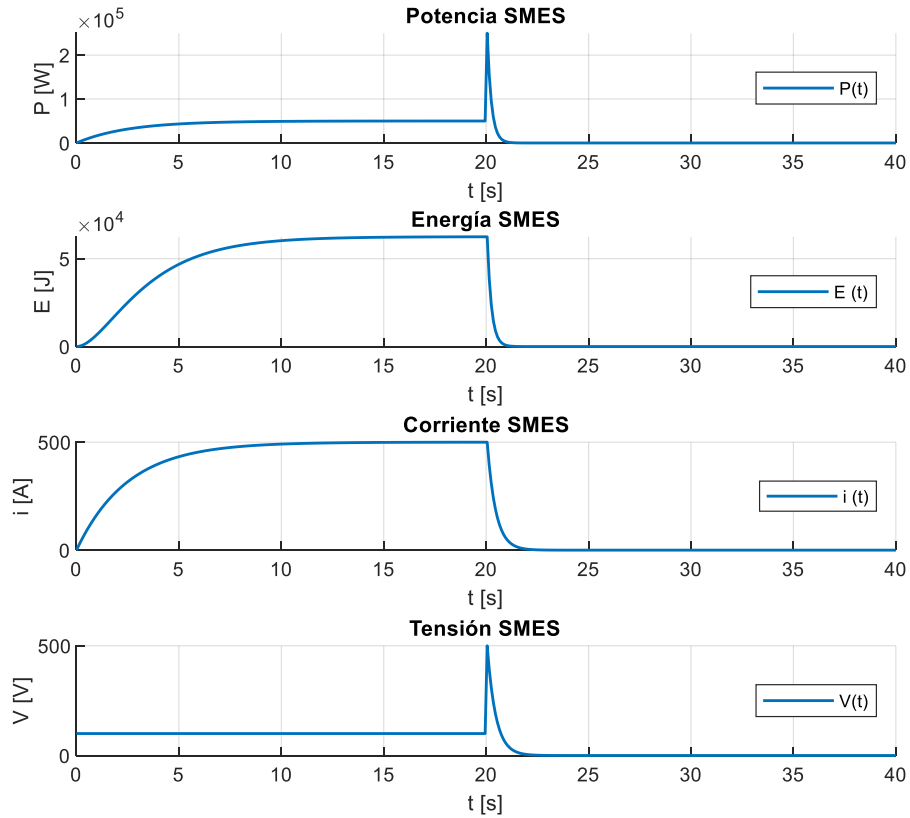


Figura 50. Ciclo de carga a 100 V y descarga con $R_L = 1 \Omega$ para la SMES.

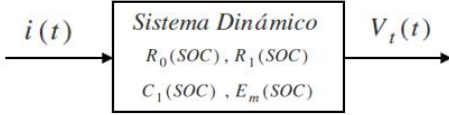
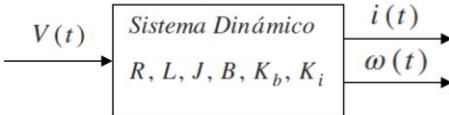
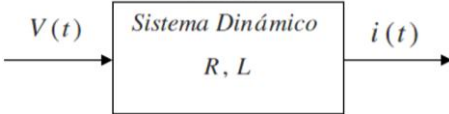
6.4 Análisis comparativo

Parámetros. Variables de entrada y Salida

Comparar las variables de los diferentes ESS mediante respuesta en el tiempo, ha sido posible dado que se está trabajando con modelos de sistemas eléctricos, por lo tanto, la presencia de la corriente y la tensión, como variables de entrada o salida de cada sistema, facilitan un análisis comparativo de los modelos estudiados.

El comportamiento de las variables de entrada y salida de los modelos dinámicos se describen en la Tabla 17.

Tabla 17. Comportamiento de los sistemas dinámicos.

Variables de entrada	Sistema Dinámico	Variables de salida
<p>$i(t)$: Las baterías Li-Ion admiten variaciones de corriente. El modelo estudiado solo funciona para el perfil una corriente dada en el ciclo de descarga. Al aumentar la corriente se generan efectos de calentamiento, para lo cual no funcionan los mismos datos de partida del modelo.</p> <p>$V(t)$: Como variable de entrada corresponde al ciclo de carga, no se modela en el presente estudio.</p>	<p><i>Batería Li – Ion</i></p>  <p>Variante en el tiempo, no lineal. Los parámetros emulan procesos electroquímicos internos de la batería aproximando su comportamiento. Se asumió un modelo isotérmico para anular una dependencia del modelo. La fuente ideal E_m como parámetro modela el potencial eléctrico. Los demás parámetros describen transitorios y pérdidas propias del sistema.</p>	<p>$V(t)$: El modelo parte de conocer valores de E_m y $V(t)$ de salida para poder parametrizar correctamente el sistema. El perfil de tensión de salida $V(t)$ se construyó a partir de 10 valores de cada parámetro en función del SOC para tener una respuesta más o menos continua en el ciclo de descarga. Las baterías Li-Ion trabajan en rangos estrechos de tensión debido al origen del potencial eléctrico, el cual está determinado por reacciones químicas. No entregan potencia fuera de este rango.</p>
<p>$V(t)$: Corresponde a la tensión de la PMDC y puede tomar valores diferentes. Es la entrada natural del sistema cuando funciona como motor.</p> <p>$i(t)$: En el modo descarga, cuando funciona como generador, describe un mejor comportamiento de las salidas, pero en ausencia de control, el sistema es inestable para una entrada constante de $i(t)$. En este caso las salidas se analizaron hasta valores consistentes con el modelo.</p>	<p><i>Flywheel</i></p>  <p>Lineal invariante en el tiempo. Los parámetros emulan procesos eléctricos y mecánicos reales que corresponden a los elementos físicos del sistema. El parámetro J es determinante para el modelo, ya que determina la respuesta en el tiempo para la energía del sistema. Los parámetros B y R están asociados a las pérdidas mecánicas y eléctricas. Modelo de segundo orden</p>	<p>$i(t)$ Como variable eléctrica asociada, su comportamiento siempre es similar con pendiente contraria a $\omega(t)$.</p> <p>$\omega(t)$: Como variable mecánica asociada, difiere en su naturaleza a los demás sistemas. Alcanza un estado estable cuando la entrada es $V(t)$ constante e inestable para una entrada $i(t)$ constante como generador. $V(t)$ Su comportamiento en el modo generador es inestable. Cuando la entrada es constante en cualquiera de las variables, las dos restantes como salidas del sistema se comportan acorde al orden del sistema y se comportan exponencialmente.</p>
<p>$V(t)$: Corresponde a la tensión de la SMES y puede tomar valores diferentes.</p>	<p><i>SMES</i></p>  <p>Lineal invariante en el tiempo. Los parámetros representan los procesos eléctricos que corresponden a los elementos físicos del sistema. L representa el elemento almacenador y R las pérdidas internas. Modelo de primer orden.</p>	<p>$i(t)$: Para que el sistema funcione como almacenador y como fuente, la corriente siempre debe tener la misma dirección. Con $R=0 \Omega$ su comportamiento es lineal, en presencia de resistencia se comporta exponencialmente.</p>

Valores representativos

Tabla 18. Resultados de valores representativos

Batería Li-Ion											
C [Ah]	$i_{out}=IC$ [A]	$t_{descarga}$ [s]	$V_{out, max}$ [V]	$V_{out, min}$ [V]	$V_{out, prom}$ [V]	P_{max} [W]	P_{min} [W]	P_{prom} [W]	E_{max} [kJ]		
27.625	27.625	3600	3.951	3.191	3.538	109.1	88.16	97.7372	351.85		
Flywheel V_{out} constante											
V_{in} [V]	J [kgm ²]	$t_{carga,99\%}$ [s]	ω_{max} [rpm]	P_{ss} [W]	i_{pico} [A]	V_{out} [V]	$P_{elec,max}$ [W]	$P_{mec,max}$ [kW]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [MJ]	
48	0.1230	78	7296.6	56	94.55	48	4538	45.39	34	3.2744	
Flywheel i_{out} constante											
V_{in} [V]	J [kgm ²]	$t_{carga,99\%}$ [s]	ω_{max} [rpm]	P_{ss} [W]	V_{pico} [A]	i_{out} [A]	$P_{elec,max}$ [W]	$P_{mec,max}$ [kW]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [MJ]	
48	0.1230	78	7296.6	56	62.43	30	1873	14.632	47.55	3.2744	
SMES. $R_{coil}=0\ \Omega$											
V_{in} [V]	L [H]	$i_{critica}$ [A]	t_{carga} [s]	$t_{descarga}$ [s]	P_{max} [kW]	P_{min} [W]	$V_{descarga}$ [V]	E_{max} [kJ]			
100	1.8	547.7226	9.8590	9.8590	54.77	0	100	270			
SMES. $R_{coil}\neq 0\ \Omega$											
V_{in} [V]	L [H]	R [Ω]	R_L [Ω]	$t_{carga,99\%}$ [s]	i_{ss} [A]	V_{out} [V]	i_{out} [A]	V_{pico} [V]	P_{max} [kW]	$t_{desc,99\%}$ [s]	E_{max} [kJ]
100	0.5	0.2	1	13.08	500	variables		499.8	249.8	1.013	62.5

A partir de la Tabla 18 se evaluaron valores anormales y comparables de algunas variables como sigue:

Tiempos de carga: Para la Batería Li-Ión no se tienen datos simulados. Según el trabajo de Glaize & Geniès (2013) el comportamiento es similar al de descarga y está condicionado por el valor de la capacidad C y la tasa de corriente $I = n \cdot C$, donde a mayor n la batería se carga o descarga más rápido. Los valores de funcionamiento exigiendo las baterías Li-Ion pueden llegar hasta $4C$ o $5C$, lo que representa un tiempo de carga en 12 o 15 minutos. Los valores para la Flywheel y la SMES (Tabla

18) son equiparables entre ellos y oscilan entre los 10s - 80s para los casos estudiados. La batería se diferencia de los demás sistemas estudiados superando el tiempo de carga en 10 veces, o hasta 60 veces con una tasa de carga de IC que corresponde a tasas nominales de funcionamiento.

Tiempo de descarga: El tiempo de descarga de 1h para la batería Li-Ion no se compara con los demás sistemas. Para la Flywheel y la SMES los tiempos de descarga oscilan entre los 10 segundos y casi 1 minuto. Los únicos tiempos iguales para la carga y la descarga corresponden a la SMES $R_{coil}=0 \Omega$ y, en teoría, a la Batería Li-Ion. La SMES $R_{coil} \neq 0 \Omega$ presenta un caso particular en los resultados, ya que su tiempo de descarga es casi 13 veces menor al de carga, esto debido al valor de carga R_L y R_{coil} escogidos aleatoriamente.

Energía: La capacidad de energía almacenada es comparable en todos los sistemas de almacenamiento y está en rangos de 10^5 a 10^6 Joules. Es importante tener en cuenta la rapidez de entrega de energía de cada ESS, que se verá reflejado en la respuesta en el tiempo para cada sistema en la potencia.

Potencia: El pico más alto de potencia entregada corresponde a la SMES $R_{coil} \neq 0 \Omega$, de aproximadamente 250 kW, seguido por la SMES $R_{coil}=0 \Omega$ con 54.77 kW. La Flywheel también presenta un pico en su potencia mecánica pero no está relacionado directamente con la potencia eléctrica que presentó un comportamiento más constante con en caso de descarga a i constante. El comportamiento menos descendente de la entrega de potencia se dio en el siguiente orden: Batería Li-Ion, Flywheel descarga a i constante, SMES $R_{coil}=0 \Omega$, Flywheel descarga a V constante y por último la SMES $R_{coil} \neq 0 \Omega$.

La potencia consumida en estado estable de la Flywheel representa una característica apreciable de baja autodescarga, que en el caso estudiado corresponde a la autodescarga $i(t) = 0 A$, es decir en circuito abierto, superando los 2000 segundos.

Modo de almacenamiento: La SMES con $R_{coil} = 0 \Omega$ y la batería Li-Ion muestran un comportamiento equiparable. Según Glaize & Geniès (2013), las baterías C-LiFePO₄ puede llegar hasta el 3% de autodescarga al mes a una temperatura de 20°C, en comparación con el caso ideal de la SMES con $R_{coil} = 0 \Omega$, estos dos sistemas muestran el mejor comportamiento de esta característica. Se resalta igualmente la situación de la autodescarga de la Flywheel a circuito abierto, donde todavía conserva energía para un tiempo mayor a los 2000 segundos.

Limitaciones del estudio

No se analizó el rango de velocidades para la energía aprovechable de la Flywheel (Gurumurthy, Agarwal, & Sharma, 2013). En el presente estudio se analizó comportamiento de entrega de energía hasta $\omega=0 \text{ rpm}$, lo que es una condición que no se cumple en la realidad. Tampoco se profundizó en la variación de los parámetros eléctricos R y L de la maquina PMDC, ni en la fricción viscosa B .

No se simuló la respuesta en el tiempo para el ciclo de carga de la batería Li-Ion ya que no se contaba con la información necesaria para inicializar el modelo dinámico.

En general, la falta de información de valores para los parámetros de los modelos representó una gran dificultad al momento de simular los sistemas dinámicos y encontrar respuestas en el tiempo acordes a implementaciones o prototipos de investigación.

En todos los estudios consultados se insinúa o es expresa la necesidad de control para los ESS. La falta de control, por ejemplo, de variables como la velocidad angular, la tensión o la corriente en la Flywheel, pueden dificultar una comprensión más detallada de la respuesta en el tiempo del sistema. La estabilidad del sistema para la Flywheel y los valores extremos analizados corresponden expresamente a los estudiados por Zhang, et al. (2013).

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron consideraciones generales y principios básicos de funcionamiento de los ESS: Batería Li-Ion, Flywheel y SMES, donde se definieron sus características y parámetros más relevantes. Se consideraron criterios como la representación precisa de los principios de funcionamiento, su aplicabilidad en situaciones reales y sus características dinámicas para seleccionar los modelos más adecuados para el análisis como sistemas dinámicos. Se utilizaron el circuito equivalente del modelo de Thévenin para la Batería Li-Ion, el modelo de emulación de la máquina PMDC para la Flywheel y el modelo simplificado RL para la SMES. Estos modelos permitieron un análisis más preciso y una comprensión profunda de los ESS evaluados.

Para cada ESS, los parámetros de interés y las variables de entrada/salida fueron definidas por medio de sistemas dinámicos y relacionadas por modelos matemáticos. Los modelos de la Flywheel y la SMES, al ser lineales invariantes en el tiempo, se representaron mediante funciones de transferencia y modelos de variables de estado para encontrar sus respuestas en el tiempo por medio software de simulación MATLAB. Por otra parte, el modelo de batería Li-Ion al ser no lineal y variante en el tiempo, requirió una metodología diferente. Se utilizó un modelo Simscape para estimar los parámetros del modelo a partir de un perfil experimental de corriente/tensión, empleando el software MATLAB/Simulink. Estas metodologías permitieron una caracterización adecuada de los ESS analizados.

Las respuestas dinámicas para cada ESS fueron analizadas para perfiles constantes de tensión/corriente de entrada del sistema durante ciclos de carga y descarga. El comportamiento en el tiempo a condiciones nominales se dio en un periodo de tiempo extenso para la batería de 1 hora, en comparación con la SMES y la Flywheel para $t < 3 \text{ minutos}$. Para la batería Li-Ion la salida del sistema se optimizó con una tolerancia de 10^{-4} a partir de los datos experimentales. Las respuestas en el tiempo

para la SMES y para la Flywheel, describieron comportamientos de los modelos matemáticos por medio de ODE de primer y segundo orden respectivamente. En ambos casos la dependencia de la variable de entrada fue exponencial, con la excepción del modelo de SMES con $R_{coil} = 0 \Omega$, para el cual se presentó un comportamiento lineal.

Se realizaron análisis de las respuestas en el tiempo de la potencia y la energía para cada ESS, basándose en el comportamiento de la tensión, la corriente y la velocidad angular. Se encontró que la capacidad de energía almacenada es comparable en todos los sistemas de almacenamiento estudiados, oscilando entre 10^5 y 10^6 Joules. Sin embargo, se observó que el comportamiento de entrega de energía de la batería Li-Ion difiere significativamente de los otros sistemas debido a su tiempo de descarga de 1 hora. El comportamiento menos descendente de la entrega de potencia se dio en el siguiente orden: Batería Li-Ion, Flywheel descarga a i constante, SMES $R_{coil}=0 \Omega$, Flywheel descarga a V constante y por último la SMES $R_{coil} \neq 0 \Omega$. Estos hallazgos demuestran diferencias importantes en el comportamiento de cada ESS.

Los resultados obtenidos revelaron diversas ventajas y fortalezas en cada uno de los sistemas de almacenamiento evaluados. La batería Li-Ion demostró un comportamiento consistente a lo largo de todo el ciclo, entregando potencia de manera sostenida hasta el final. La Flywheel destacó por su capacidad de almacenamiento y un modo de almacenamiento significativo. Por su parte, la SMES se mostró capaz de entregar energía rápidamente, alcanzando valores considerablemente altos de corriente. Cada sistema presenta características particulares que los hacen destacar en aspectos prácticos específicos. La batería Li-Ion es ideal para aplicaciones que requieren una entrega constante de potencia a lo largo del tiempo. La Flywheel es adecuada en situaciones donde se prioriza la capacidad de almacenamiento y la estabilidad en el suministro de energía. La SMES se destaca por su capacidad de respuesta rápida y la capacidad de suministrar grandes cantidades de energía.

8. RECOMENDACIONES

Profundizar en el análisis de los ESS a partir de modelos dinámicos exige implementaciones de control, simulación en sistemas de potencia y condiciones prácticas para la obtención de datos experimentales. Estos aspectos no correspondían al objeto del presente trabajo y son necesarios desarrollarlos ya que el estudio de los ESS es esencial para Colombia, posibilitando la penetración de energías renovables, mejorar la estabilidad de la red eléctrica, impulsar la eficiencia energética y promover el desarrollo de nuevos mercados energéticos. Esto contribuirá a la transición hacia un sistema energético más sostenible, confiable y resiliente en el país.

Para futuros estudios se propone profundizar en aspectos constructivos, especialmente para la Flywheel y la SMES, a partir del dimensionamiento de la volante de inercia representada por J y la bobina L respectivamente. El dimensionamiento de celdas de baterías Li-Ion demanda estudios de mucha complejidad relacionados con fenómenos electroquímicos.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assam, B., Sabir, M., & Abdelghani, H. (2020). Modeling and Control of Power System Containing PV System and SMES using Sliding Mode and Field Control Strategy. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 190-197. doi:10.14447/jnmes.v23i3.a06
- Bajracharya, Q. (2013). *Dynamic modeling, monitoring and control of energy storage system*. Karlstad: Karlstad University.
- Chin, C., Gao, Z., Chiew, J., & Zhang, C. (2018). Nonlinear temperature-dependent state model of cylindrical LiFePO₄ battery for open-circuit voltage, terminal voltage and state-of-charge estimation with extended Kalman filter. *Energies*, 11(9), 2467.
- Choudhury, S. (2021). Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(9), e13024.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (6 de septiembre de 2019). *Gestor Informativo de la CREG*. Recuperado el 18 de mayo de 2022, de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0098_2019.htm
- Dhundhara, S., & Pal Verma, Y. (Edits.). (2021). *Energy Storage for Modern Power System Operations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Diez Olleros, I. (2018). *Tecnología de los volantes de inercia. Trabajo de grado para optar por el título en Ingeniería de la Energía*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- Dumitru, C., Gligor, A., & Grif, H. (2011). Regensim-Matlab toolbox for renewable energy sources modeling and simulation. In *The International Conference Interdisciplinarity in Engineering INTER-ENG*, 117.
- Eladl, A., Sultan, Y., Kaddah, S., Abido, M., & Hassan, M. (2022). Stability Enhancement of Interconnected VSC-HVDC System Considering Efficient MPC-Based SMES. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-16.
- Gazzarri, J. (2012-2017). *B12-Electronic-Prognostic/Li_ion_battery/*. (J. Gazzarri, Productor, & The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink) Recuperado el 1 de marzo de 2023, de Modeling Batteries Using Simulink and Simscape: https://github.com/imrenagi/B12-Electronic-Prognostic/tree/master/Li_ion_battery
- Gazzarri, J. (16 de agosto de 2019). *Modeling Batteries Using Simulink and Simscape*. (The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink) Recuperado el 1 de marzo de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=eQX-iobIYmw>
- Gazzarri, J., Huria, T., Ceraolo, M., & Jackey, R. (2012). High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, 1-8.
- Gazzarri, J., Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Huria, T., & Ceraolo, M. (2013). Battery model parameter estimation using a layered technique: an example using a lithium iron phosphate cell. *SAE Technical Paper*, 2, 1-14.
- Gieras, J., & Shen, J.-X. (2022). *Modern Permanent Magnet Electric Machines. Theory and Control*. Abingdon: CRC Press.
- Glaize, C., & Geniès, S. (2013). *Lithium Batteries and Other Electrochemical Storage Systems*. (B. Multon, Ed.) London: John Wiley & Sons.
- Gouda, E. A., Abd-Alaziz, A., & El-Saadawi, M. (2020). Design modeling, and control of multi-stage SMES integrated with PV system. *Journal of Energy Storage*, 1-17.
- Gurumurthy, S., Agarwal, V., & Sharma, A. (2013). Optimal energy harvesting from a high-speed

- brushless DC generator-based flywheel energy storage system. *IET electric power applications*, 693-700.
- Holm, S. R. (2003). *Modelling and optimization of a permanent magnet machine in a flywheel*. Delf: Technische Universiteit Delft.
- Jan C, P., Ghimire, S., & Ouerdane, H. (29 de mayo de 2020). *arXiv Classical Physics*. Recuperado el 28 de mayo de 2022, de <https://arxiv.org/abs/2005.14634>
- Kluever, C. A. (2015). *Dynamic Systems: Modeling, Simulation, and Control*. Missouri: WILEY.
- Kulakowski, B., Gardner, J., & Shearer, J. (2007). *Dynamic modeling and control of engineering systems* (Third ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Li, J., Wang, L., Lyu, C., Liu, E., Xing, Y., & Pecht, M. (2018). A parameter estimation method for a simplified electrochemical model for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 275, 50-58.
- Martínez, J. A. (2011). Modeling and characterization of energy storage devices. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. doi:10.1109/PES.2011.6039321
- Mousavi G., S., & Nikdel, M. (2014). Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 477-485.
- Muljadi, E., & Gevorgian, V. (marzo de 2017). Flywheel Energy Storage-Dynamic Modeling. 2017 *Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 312-319.
- Nagi, I., Yin, D., Yousafzai, A., Tzannetos, D., Mengshoel, O., Matin, R., & Kulkarni, C. (2019). Exploring Gaussian process regression and unscented Kalman filtering for lithium-ion battery prognostics. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 0685.
- Nemes, R., Ciornei, S., Ruba, M., Hedesiu, H., & Martis, C. (2019). Modeling and simulation of first-order Li-Ion battery cell with experimental validation. 2019 *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. doi:10.1109/MPS.2019.8759769
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (Fifth ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Olabi, A., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M., & Al-Alami, A. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987.
- OnLocation. (2020). *Electricity Storage Technology Review - Prepared for U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy*. Vienna: OnLocation, Inc.
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2016). Experimental and simulated temperature variations in a LiFePO₄-20 Ah battery during discharge process. *Applied Energy*, 180, 504-515.
- Rahman, M., Oni, A., Gemechu, E., & Kumar, A. (2020). Assessment of energy storage technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.
- Robyns, B., Hissel, D., Christophe, S., Roboam, X., Sareni, B., & Pouget, J. (2016). *Electrical Energy Storage in Transportation Systems*. London: John Wiley & Sons, Inc.
- Rufer, A. (2018). *Energy Storage: Systems and Components*. New York: CRC Press.
- Sandia National Laboratories. (2021). Recuperado el 21 de mayo de 2022, de DOE Global Energy Storage Database: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/index.html>
- Santos, R., Alves, C., Macedo, E., Villanueva, J., & Hartmann, L. (August de 2017). Estimation of lithium-ion battery model parameters using experimental data. 2017 *2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, 1-6.
- Stewart, J., Clegg, D., & Watson, S. (2021). *Calculus: Early Transcendentals* (Metric Version, Ninth ed.). Electronic version: Cengage Learning.
- Ter-Gazarian, A. G. (2020). *Energy Storage for Power Systems* (3rd ed.). Londres: The Institution of Engineering and Technology.
- Tsui, C.-C. (2020). *Robust control system design: advanced state space techniques* (Third ed.). Long Island: CRC Press.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050* -

- Documento de Consulta*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia.
- Unidad de Planeación Minero Energética de la UPME. (2015). *Plan Energético Nacional. Colombia: Ideario Energético 2050*. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia.
- Vafakhah, B., Masiala, M., Salmon, J., & Knight, A. (Septiembre de 2008). Emulation of flywheel energy storage systems with a PMDC machine. *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, 1-6.
- Zhang, W., Li, Y., Chang, X., & Wang, N. (2013). Dynamical investigation and parameter stability region analysis of a flywheel energy storage system in charging mode. *Chinese Physics B*, 22(9), 098401.
- Zhou, X., Tang, Y., & Shi, J. (2017). Enhancing LVRT capability of DFIG-based wind turbine systems with SMES series in the rotor side. *International Journal of Rotating Machinery*, 1-9.
- Zuluaga Ríos, C. D., Pinto Ríos, A. D., & Garcés Ruíz, A. (Enero-Junio de 2015). Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía. *ÉPSILON*(24), 11-13.

10. ANEXOS

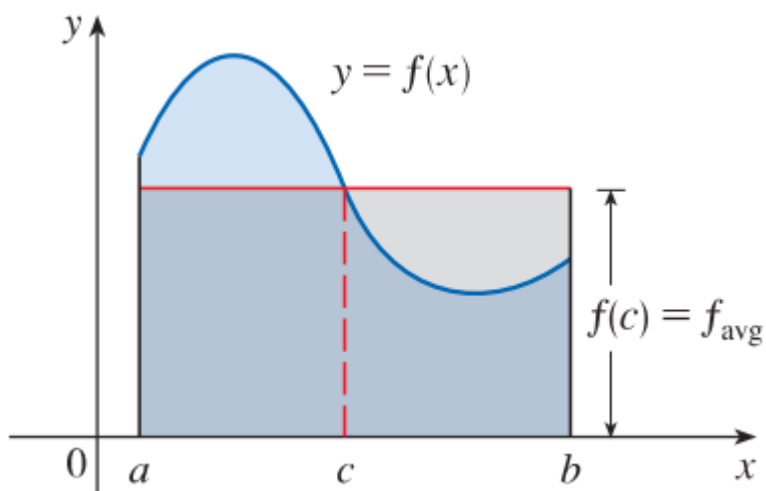
ANEXO A. Teorema del valor medio para integrales. Fuente: Stewart, et al. (2021)

Si f es una función continua en $[a, b]$, entonces existe un número c en $[a, b]$, tal que:

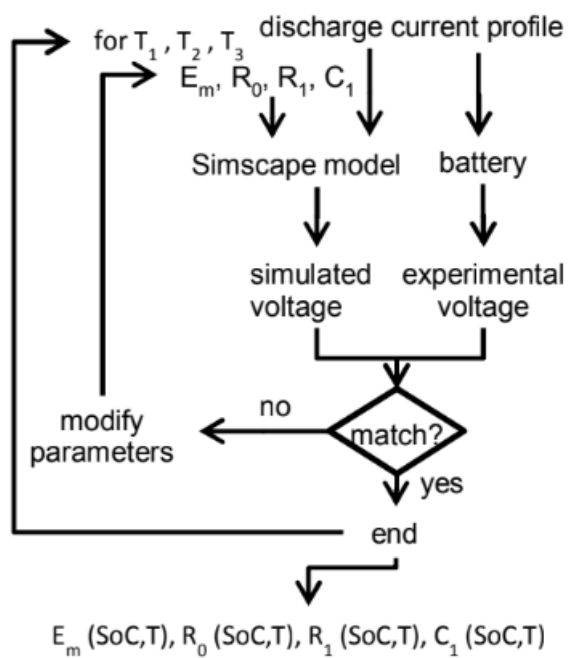
$$f(c) = f_{\text{avg}} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

es decir,

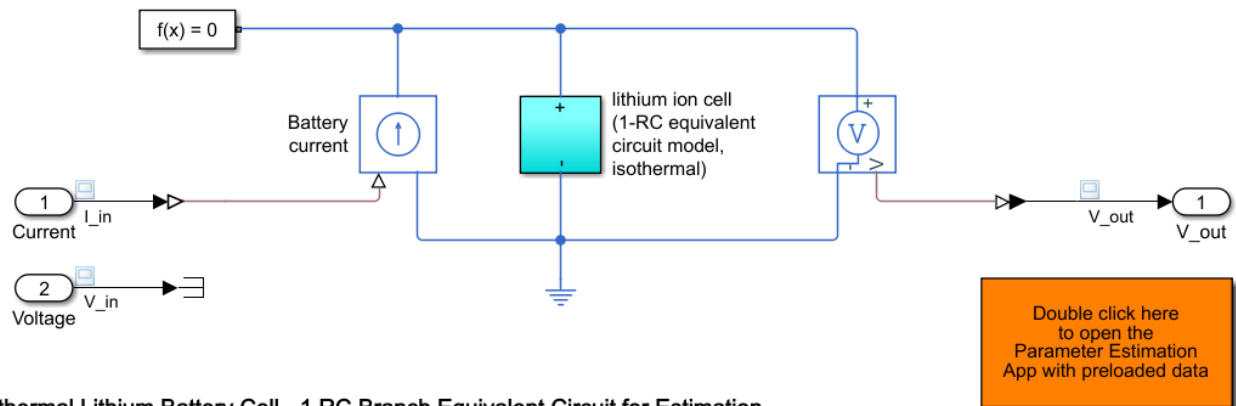
$$\int_a^b f(x) dx = f(c)(b-a)$$



ANEXO B. Diagrama de flujo del procedimiento de estimación de parámetros para una Bateria Li-Ion. Fuente: Gazzarri et al. (2012)



ANEXO C. Módulo de optimización de parámetros y de simulación de una celda de batería LiIon.
Simulink/Simscape. Fuente: Gazzarri (2012-2017).



Isothermal Lithium Battery Cell - 1 RC Branch Equivalent Circuit for Estimation

This example shows the use of Simscape(TM) and Simscape(TM) Language to perform parameter estimation on a 1-RC equivalent circuit for a lithium ion battery cell using an isothermal pulse discharge experiment.

- 1- Run the model and observe voltage response mismatch
- 2- Open and run the parameter estimation session using the orange button
- 3- Re-run model with updated parameters

For the defining equations and their validation, see T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, R. Jackey. "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," IEEE International Electric Vehicle Conference, March 2012.

ANEXO D. Script MATLAB. Regresión polinomial. Actualización de parámetros hallados y simulador modificado.

```

load('parametros.mat');

%% Regresión polinomial y cambio de SoC a t[s]

p1 = polyfit((0:0.1:1)',C1,6);
C1_S = polyval(p1,linspace(1,0,3600));
C1_S = C1_S';

p2 = polyfit((0:0.1:1)',Em,4);
Em_S = polyval(p2,linspace(1,0,3600));
Em_S = Em_S';

p3 = polyfit((0:0.1:1)',R0,8);
R0_S = polyval(p3,linspace(1,0,3600));
R0_S = R0_S';

p4 = polyfit((0:0.1:1)',R1,7);
R1_S = polyval(p4,linspace(1,0,3600));
R1_S = R1_S';

subplot(4,1,1); plot(Em_S)
grid on
legend('Em [V]')
ylabel('\bf Em [V]')
xlabel('Time [seconds]')

subplot(4,1,2); plot(R0_S)
grid on
legend('R0 [\Omega]')
ylabel('\bf R0 [\Omega]')
xlabel('Time [seconds]')

subplot(4,1,3); plot(R1_S)
grid on
legend('R1 [\Omega]')
ylabel('\bf R1 [\Omega]')
xlabel('Time [seconds]')

subplot(4,1,4); plot(C1_S)
grid on
legend('C1 [F]')
ylabel('\bf C1 [F]')
xlabel('Time [seconds]')

load('pulsedatcopy.mat');

run 'ssc_lithium_cell_1RC_estim_ini.m';

run 'ssc_lithium_cell_1RC_estim_pot2';

```

ANEXO E. Script MATLAB. Actualización de parámetros en el inicializador. PulseData modificado. Cálculo de Energía.

```
% SOC Lookup Table breakpoints
SOC_LUT = linspace(1,0,3600)';

%% Known Values

% Battery capacity
% Measured by coulomb counting the discharge curve
Capacity = 27.6250; %Ampere*hours

% Charge deficit at start of data set
% Assumption based on preparation of test
Qe_init = 0; %Ampere*hours

%% Estimated Parameters - Initial starting points before estimation

% Em open-circuit voltage vs SOC
Em = Em_S; %Volts

% R0 resistance vs SOC
R0 = R0_S; %Ohms

% R1 Resistance vs SOC
R1 = R1_S; %Ohms

% C1 Capacitance vs SOC
C1 = C1_S; %Farads

%% Load Dataset
load('LiBatt_PulseData.mat')
PulseData=PulseDataCopy;
PulseData.current=-PulseData.current;
v_out_mean = 3.538;
P_mean = v_out_mean*27.6250;
E_max = P_mean*3600;
```

ANEXO F. Lithium ion cell (1-RC equivalent circuit model, isothermal) modificado para mediciones, cálculos y gráficas. Simulink/Simscape

