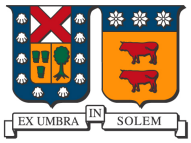
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

"MODELADO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO BASADO EN BATERÍAS DE LITIO(LiFePO4)"

ALAN BITTERLICH KONING

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO MENCIÓN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROFESOR GUIA: **JUAN CARLOS AGÜERO VÁSQUEZ**

PROFESOR CORREFERENTE: **CHRISTIAN ROJAS MONRROY**

3-3-2017

Quiero en esta sección agradecer a los que hicieron posible este trabajo. Primero agradecer al apoyo de mi familia, seguido del apoyo de mis amigos. Recalcar el apoyo del centro AC3E, el cual fue gestor de mi trabajo ademas del apoyo constante y directo de mis profesores. Como motivación recalco a Isabel Ignacia Bitterlich. Y finalmente mente méritos a Karen Lux Silva que apareció al momento final de mi vida universitaria y se transformo en un apoyo fundamental.

Resumen

En este proyecto se trata el problema de modelado de un sistema de almacenamiento de energía.

En particular, está enfocado en la dinámica correspondiente a la carga y descarga de baterías de LiFePo4.

Se estiman los parámetros de una estructura de modelos correspondientes a un ”Modelo Shepherd” utilizando datos experimentales.

El modelo es simulado utilizando el paquete de software PLECS y validado utilizando datos de experimentos de carga y descarga.

Temas relacionados: LiFePo4, modelo de Shepherd.

Abstract

This project addressees the problem of modeling an energy storage system.
In particular, we focused on the dynamics corresponding to charging and discharging of LiFePo4 batteries.
We estimate the parameters of a model structure corresponding to a ”Shepherd model” using experimental data.
We simulate the model using a softaware package PLECS to validate then by using data from charging and discharging experiments.

Keywords: LiFePo4 , Shepherd model.

Glosario

- SOC: Estado de carga de un sistema de almacenamiento.
- SOH: Estado de vida útil de un sistema de almacenamiento.
- PLECS: Software computacional, usado para simulaciones.
- ER: Energía renovable.
- ESS: Sistemas de Almacenamiento de Energía.
- BESS: Sistemas basados en Baterías electro-químicas .
- FESS: Sistemas basados en almacenamiento cinético de energía.
- EDCL: Sistemas basados en almacenamiento energía mediante súper capacitores.
- HESS: Sistemas basados en almacenamiento híbridos de energía.
- PHS: Sistemas basados en hidroeléctrico.
- CAES: Sistemas basados en aire comprimido.
- BESS: Sistemas basados en almacenamiento cinético de energía.

Índice general

Capítulo 1 Introducción **1**

1.1 Estado del arte 2

1.1.1 Uso de la energía: razón de origen de las energías renovables . . 2

1.1.2 Energías renovables con almacenamiento de energía 3

1.1.3 Tipos de almacenamiento de energía 4

1.1.4 Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS) 8

1.1.5 Modelos aplicados a baterías, parámetros 10

1.2 Elección modelo a usar 11

1.2.1 Modelo frecuencial 11

1.2.2 Modelo adaptativo conectado 12

1.2.3 Modelo fraccional 14

1.2.4 Modelo de Shepherd 15

1.3 Objetivos 16

1.4 Alcances 17

1.5 Resultados esperados 18

Capítulo 2 Modelado del banco de baterías **19**

2.1 Modelo de Shepherd 19

2.2 Parámetros 24

2.3 Análisis de sensibilidad 26

2.4 Implementación en PLECS 29

2.5 Curvas a régimen de 0.85 carga nominal 31

Capítulo 3 Banco de Pruebas Experimental **33**

3.1 Descripcion del banco 34

3.2 Procedimientos de carga 37

3.3 Procedimientos de descarga 38

3.4 Adquisición de datos 39

Capítulo 4 Resultados **41**

4.1 Resultados experimentales de carga 42

4.2 Resultados simulación de carga 43

4.3 Resultados experimentales de descarga 44

4.4 Resultados simulación de descarga 45

4.5 Comparación error de carga 46

4.6 Comparación error de descarga 49

Capítulo 5 Conclusiones, comentarios y trabajo a futuro **53**

5.1 Conclusiones 54

5.2 Comentarios 55

5.3 Trabajo a futuro 56

Bibliografía **59**

Apéndice A C-scpript, Plecs **63**

Apéndice B Datos batería **65**

Capítulo 1

Introducción

Día a día la tecnología avanza y junto a esto el desarrollo en el área de la energía avanza también. Las energías no convencionales han entrado en el sistema de generación cada vez con más fuerza. De igual forma los sistemas de transporte y artículos utilitarios en general se han visto en la necesidad de aumentar la capacidad de entrega y almacenamiento de energía. Es a partir de esto que fuentes de almacenamiento de energía mas robustas y con mayor capacidad deben ser estudiadas. En este trabajo de investigación se busca, el estudio directo de un sistema de almacenamiento de energía, esto mediante la obtención de un modelo eléctrico/matemático, que caracterice las dinámicas de carga y descarga de una batería de Litio del tipo Li-PO-Fe4 modelo BTL24A360C. Además se comprobara de manera experimental el ajuste de este modelo bajo diferentes condiciones de operación.

1.1. Estado del arte

1.1.1. Uso de la energía: razón de origen de las energías renovables

Desde principios de la humanidad la energía ha tenido un rol fundamental. Sin embargo en los últimos siglos es donde más desarrollo se ha logrado al respecto, en energía eléctrica particularmente. Con la revolución industrial se consolidó la electricidad como la forma de energía más usada a nivel mundial.

Esta energía surgió en sus inicios por la combustión, de diferentes recursos naturales, al ir requiriéndose una mayor cantidad de energía. La producción de esta empezó a convertirse en un problema, los recursos naturales empezaron a escasear y se hizo necesario buscar alternativas viables en el tiempo para la generación de energía. Es por esto que surgieron entre la mitad y final del siglo XX el desarrollo de las energías renovables.

Hoy en día hay una concientización cada vez mayor sobre la importancia de la energía renovable, la eficiencia energética y la oferta y demanda que esta genera [1]. Las cuales son críticas no solo para atender los problemas generados por la explotación de recursos naturales (como el cambio climático global), sino también para crear nuevas oportunidades económicas y proporcionar acceso a la energía a miles de millones de personas que aún no poseen acceso a ésta.

Según algunos datos extraídos de [2], Para el 2013 la producción estimada de energía renovable ascendió a un 19,1 % de la total producida a nivel mundial, en general la tendencia va al aumento.

Actualmente las energías renovables que predominan en el mercado y en su desarrollo, son la energía hidráulica, eólica y solar [3]. Junto a éstas vienen más atrás la energía geotérmica, solar por calentamiento, mareomotriz, entre otras.

Junto al desarrollo de estas energías se encuentran los temas legislativos para cada una de éstas, que proporcionan dinámicas diferentes tanto para el modelo de negocios, como para el impacto en la sociedad. El cambio que se producirá de migrar de energías

convencionales a energías renovables. Es un tema importante que queda por tratar la regularización de energías renovables a nivel mundial. Sin embargo, el panorama no resulta tan desalentador. Para el año 2015 se tiene que 164 países han definido objetivos respectos a las energías renovables.

Resumiendo, las energías renovables cada vez son más usadas y hay una mayor conciencia acerca del daño climático causado. Se espera que durante el siglo XXI las energías renovables desplacen a las energías tradicionales, pero todo este cambio sucederá de manera paulatina.

1.1.2. Energías renovables con almacenamiento de energía

Debido a la intermitente naturaleza de las energías renovables, es necesario introducir un elemento que nos permita entregar estabilidad al sistema, fiabilidad y calidad de energía eléctrica, dando paso a los Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS). Una ventaja principal de estos sistemas es que pueden ser instalados como unidades individuales o distribuidas de intercambio de energía, De este modo, la energía puede ser almacenada y descargada para obtener una mayor ganancia financiera o para periodos de alta demanda.

Las aplicaciones que usan ESS, las podemos agrupar en dos principalmente, 1) aplicaciones de transporte y 2) aplicaciones utilitarias:

1. Las aplicaciones de transporte [4], han desarrollado un avance significativo en el último tiempo, migrando de energías tradicionales como el petróleo, a vehículos con solo ESS o híbridos[9]. Para vehículos de pequeñas dimensiones, las ESS representan parte importante del valor, esto ha ido disminuyendo pero sigue retrasando o postergando el auge de estos vehículos. Para vehículos de mayor tamaño como trenes, los sistemas ESS son fundamentales para almacenar energía de frenado o en sistemas híbridos de funcionamiento de trenes donde se busca mejorar

la eficiencia con que estos funcionan.

2. En aplicaciones utilitarias las ESS [5] [6] , se usan para estabilizar la red. Es decir, entregar energía cuando la demanda es mayor de lo que entrega la fuente de energía renovable y con esto poder entregar una capacidad constante a los consumidores. Por tanto una importancia fundamental de las ESSs en el último tiempo ha sido aumentar la penetración de las energías renovables en el mercado. Las energías renovables de mayor impacto, debido a la cantidad de energía generada por éstas, corresponden a la energía eólica y solar (sin considerar la energía hidráulica). Para cada una de éstas se presentan retos tanto en su estructura de operación, montaje, construcción, como en la forma diferente de almacenar energía. Sin duda, avanzar en el desarrollo de las ESS beneficiará de gran forma al desarrollo de éstas.

1.1.3. Tipos de almacenamiento de energía

El tipo de ESS que se utilice dependerá de la aplicación, la potencia, el tiempo de respuesta, el peso, el volumen y la temperatura de operación, costo entre otros factores [11] [10]. Como ejemplo, se presenta a continuación en el cuadro 1.1, una lista de tecnologías del tipo ESS. Para más detalle ver [12].

Cuadro 1.1: Sistemas de almacenamiento de energías

Tipo	Eficiencia energía (%)	Densidad de energía (Wh/Kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Ciclos de vida (Ciclos)	Autodescarga
Pb-Acid	70-80	20-35	25	200-2000	Bajo
Ni-Cd	60-90	40-60	140-180	500-2000	Bajo
Ni-MH	50-80	60-80	220	<3000	Alto
Li-Ion	70-85	100-200	360	500-2000	Medio
Li-polimero	70	200	250-1000	>1200	Medio
NaS	70	120	120	2000	-
Flywheel	95	5-30	1000	>20000	Muy alto

En el cuadro 1.1 se ven diferentes ESS, con sus respectivas dinámicas [13], las cuales se procederán a explicar:

Eficiencia: Se refiere a la energía realmente utilizada respecto a las perdidas, es decir, lo que ingresa al sistema en relación a lo que sale nuevamente.

Densidad de energía: En las aplicaciones de almacenamiento de energía, se hace referencia a la densidad de energía másica o a densidad de la energía volúmica. Es decir, mientras mayor sea la densidad de energía, más energía habrá disponible para acumular.

Densidad de potencia: Hace referencia al volumen total de la fuente de energía en relación a la potencia que es capaz de almacenar el ESS.

Ciclos de vida: Los ESS disponen de un número limitado de ciclos de carga (ciclos de

vida) antes de que se consideren agotadas. Una vez que se agotan, es posible usar éstas pero sus dinámicas no serán predecibles, por tanto su desempeño no sera fiable.
Auto descarga: Es un fenómeno que se presenta en los ESS, básicamente se reduce el estado de carga sin haber ningún elemento conectado entre los terminales de la batería. Esto ocurre en la mayoría de las veces por reacciones químicas internas de cada ESS.

Habiendo definido las diferentes dinámicas que ofrecen por lo general cada ESS, se definirá a grandes rasgos algunas clases de ESS, disponibles actualmente, para mas información ver [12] [13].

1. Electro-químicas: Los sistemas basados en Baterías electro-químicas se denominan BESS (Battery ESS) [13]. Las baterías consisten en dos o más celdas electroquímicas. Estas celdas usan una reacción química para crear un flujo de electrones, es decir, corriente eléctrica. Una celda consiste en un recipiente con dos electrodos, ánodo y cátodo (negativo y positivo) sumergidos en un material electrolítico que se comporta como medio conductor. La corriente es generada por una reacción química entre el electrolito y los electrodos a través de reducción y oxidación. Cuando una batería se descarga, el ánodo pierde electrones(oxidación) y el cátodo capta electrones (reducción). Este proceso se devuelve ionizando el electrolito lo que recarga la batería. Sin embargo, el material de los electrodos se deteriora gradualmente debido al proceso, limitando la vida útil a cierto número de ciclos, mermando la calidad de las baterías. La cantidad de ciclos depende del material y diseño de la batería. Los materiales más comunes para baterías son: Plomo Acido, Níquel-Cadmio (NiCd), Ion Litio (Li-ion), Sodio-Azufre (NaS), Zinc-Bromo (ZnBr), Níquel-Hidruro Metálico (NiMH), entre otras.

2. Flywheels: Los sistemas basados en almacenamiento cinético de energía se denominan FESS (Flywheel ESS) [7]. Estos sistemas lo que hacen es guardar energía en forma de rotación, mediante un motor, para poder después liberar esto mediante un generador, para ambas fases es necesario usar convertidores de po-

tencia. Estos sistemas se pueden definir como de rotación rápida superando los 60.000 rpm. Estos sistemas presentan un gran número de ciclos, prácticamente ilimitados, y al verse la energía almacenada solo por la rotación directa del eje, en relación a su almacenamiento presentan gran potencia en términos de densidad/energía. Estos tipos de sistemas fueron concedidos para mejorar la calidad de la energía generada, así como para apoyar en las descargas críticas de los sistemas. Recientes avances en la ingeniería de potencia han hecho esta tecnología atractiva para otros usos tales como transporte.

3. Eléctrico: Los sistemas basados en almacenamiento energía mediante súper capacitores se denominan EDCL [8]. Los súper capacitores almacenan energía eléctrica como una carga electrostática, simplemente por separación de cargas. La capacidad de un condensador es proporcional al área de las placas y la permisividad del dieléctrico, y es inversamente proporcional a la distancia de las placas. Un arreglo de varios condensadores (Banco de condensadores) o condensadores de larga capacidad (Super condensadores), pueden ser usados para almacenar grandes cantidades de energía. Son especialmente adecuados para aplicaciones que requieran entregar alta potencia en periodos cortos de tiempo. Debido a que no hay reacciones químicas en los electrodos, los condensadores tienen una larga vida útil y pueden ser descargados completamente.

4. Híbridos: A partir de estos grupos de ESS, es posible crear grupos híbridos de ESS, combinando una o más tecnologías para así aprovechar de mejor manera su potencial y poder crear dinámicas de funcionamiento que se ajusten de mejor forma al requerimiento de los procesos. Un caso bastante utilizado en sistemas de movilidad eléctrica son los HESS (Hybrid ESS) [9], los cuales se basan en una combinación ajustada entre un banco de baterías de litio y súper condensadores. La idea es permitir la entrega de energía de forma rápida y de forma abundante, características entregadas por el condensador y el banco de baterías, respectivamente.

Se describieron 4 tipos de ESS, cada uno con sus particularidades. Adicionalmente, existen otros tipos de ESS, como por ejemplo: Bombeo hidroeléctrico (PHS), aire comprimido (CAES), entre otros. Nos centraremos a partir de este punto en el primer grupo descrito (BESS).

1.1.4. Almacenamiento de energía basado en baterías (BESS)

En el grupo BESS, la principal diferencia entre cada tipo de batería es el material con el cual están hechas, entregando dinámicas diferentes de funcionamiento. En este sentido podemos ver los siguientes grupos de batería (entre otros [12]):

1. Batería de Plomo y Ácido: Esta batería está formada por un depósito de Ácido Sulfúrico y dentro de él, un conjunto de electrodos de placas de plomo paralelas entre sí, intercaladas según su polaridad. Las placas positivas están impregnadas de Dióxido de Plomo (PbO2) y las negativas están formadas por plomo esponjoso. Esta batería la vemos comúnmente en vehículos a combustión como en los automóviles con batería de arranque, sin embargo también son usadas en muchas otras aplicaciones debido a su bajo costo.

2. Batería de Níquel-Cadmio y Níquel-Hidruro Metálico (NiCd/NiMH): Las baterías de NiCd fueron altamente usadas entre 1970 y 1990, pero recientemente han sido reemplazadas por las de Ion-Litio y NiMH para muchas aplicaciones. Estas baterías tienen una densidad de energía y ciclo de vida mayor a las de plomo ácido, pero son inferiores a las de Ion-Litio y NiMH. Otro factor a considerar es la toxicidad del Cadmio, que requiere de un complejo proceso de reciclaje. Las baterías de NiMH son mejores que las de NiCd, tienen una mayor cantidad de ciclos de vida, un efecto de memoria menos pronunciado y una mayor densidad de energía. Por estas razones recientemente las NiMH dejaron obsoletas a las NiCd. Por otro lado, tienen la desventaja de tener una tasa de auto descarga relativamente alta y cuando están sobre-descargadas las celdas pueden revertir su polaridad, reduciendo la capacidad de la misma.

3. Batería de Ion-Litio: Para estas baterías se emplea como electrolito una sal de Litio que procura los iones necesarios para la reacción. Los iones de Litio se mueven entre ánodo y cátodo produciendo un flujo de corriente. El Litio es uno de los metales más livianos, es altamente reactivo y tiene el mayor potencial electroquímico, haciéndolo un material ideal para baterías. Las principales características de este tipo de tecnología son: su alta densidad de energía; no poseen efecto de memoria y una baja auto descarga. Existen numerosos tipos de baterías de Ion-Litio , cada una con diferentes características [15]. Las más populares son Litio-Cobalto, Litio-Manganeso y Litio-Fosfato:

    - Batería de Litio-Cobalto: Es la más común, tiene alta capacidad, pero mayor costo y menor tasa de carga y descarga.
    - Batería de Litio-Manganeso: Tiene mayor tasa de carga y descarga, puede operar a una mayor temperatura y tiene una menor resistencia interna. Como desventaja tienen un ciclo de vida más corto y una menor capacidad.
    - Batería de Litio-Ferro-Fosfato (LiFePO4): Este tipo de baterías tiene una resistencia interna menor y tasa de carga y descarga mayores que la de Litio-Manganeso. Presentan una mayor longevidad respecto a las de su tipo. Presentan la mayor estabilidad química y térmica debido a que el enlace Li-Fe-P-O es más fuerte que los enlaces presentados por las otras baterías de este tipo. Por lo tanto, en caso de corto circuitos es más estable y tiene menos posibilidad de inflamación. Pueden operar a altas temperaturas y es significativamente más barato de producir, además de ser las más amigables con el medio ambiente, En contra-parte, tienen un voltaje de descarga menor y una menor capacidad de almacenamiento [14].

4. Batería de sal fundida (NaS): esta batería consiste en Azufre fundido del lado positivo y de Sodio fundido del lado negativo separados por una cerámica electrolítica. La temperatura de operación de estas es bastante alta, entre 300° y 360°

grados Celsius. Esto conlleva varias dificultades para los distintos usos que se le puede dar.

A partir de estos grupos de baterías dados podemos evidenciar que debido a su alta densidad de energía, las baterías de Ion-Litio han probado ser las más adecuadas para vehículos eléctricos, además de ser viables para energías renovables, Sin embargo, el valor es un factor limitante debido al alto precio del Litio. Además actualmente las principales aplicaciones donde son usadas las baterías de Ion-Litio son equipos portátiles, notebooks, cámaras, celulares y herramientas portátiles.

1.1.5. Modelos aplicados a baterías, parámetros

La búsqueda de un modelo matemático, que se ajuste a un proceso, es una tarea regular para diferentes disciplinas. Se desea obtener un modelo que se ajuste de manera adecuada al proceso físico, esto con la intención de no realizar el proceso físico reiteradas veces o poder predecir alguna variable de interés del proceso, de forma sencilla y con determinado grado de precisión. En nuestro caso de estudio (baterías), es un reto que ha ido ganando importancia en el último tiempo. Ésto debido al avance de la tecnología electrónica portable, la entrada de vehículos eléctricos y la necesidad de almacenamiento de energías renovables. En estas áreas de estudio, es fundamental obtener modelos que se ajusten de manera precisa, para maximizar la vida útil, el tiempo de carga y descarga, y para poder obtener modelos de control que lleven a estos sistemas a su máxima capacidad.
Para nuestro estudio, existen 2 parámetros de importancia que nos interesa predecir y controlar:

- El estado de carga de la batería actual (SOC), es el nivel de carga de la batería, normalmente expresado como un porcentaje del total de la capacidad máxima que tiene.

- El estado de vida útil de la batería (SOH), este último representa el gradual dete-

rioro de la máxima capacidad de la batería a lo largo del tiempo y el aumento de la resistencia interna, por tanto esto conlleva a un remplazo posterior de la batería [22].

1.2. Elección modelo a usar

Actualmente existen diferentes modelos, con ventajas y desventajas unos de otros debido a las variables que se consideran y al tiempo que estos modelos demoran en operar. Es decir, a más completo el modelo más tiempo computacional requerirán, pero estos serán más precisos, aparte de estas diferencias existen modelos de carácter eléctrico, matemáticos y químicos. Donde cada modelo se centra en el problema a partir de diferentes enfoques, en este estudio nos centraremos tanto en los modelos carácter matemático como de carácter eléctrico, dejando de lado la química del proceso en cuestión.

En este proyecto se busca proponer un modelo de carácter matemático-eléctrico de la batería LiFePO4, para posteriormente validarlo y ajustarlo, con el fin de poder desarrollar un control óptimo, que maximice las dinámicas de los BESS [15].

A continuación se verán modelos aplicados a baterías, con la premisa de realizar este proyecto utilizando alguno de los modelos en cuestión.

1.2.1. Modelo frecuencial

Este modelo busca describir la dinámica del sistema mediante un circuito RC, lo particular de este sistema es que se basa en un barrido de frecuencia para la eleccion de los parámetros. Esto a partir de Nyquist. Se presenta el modelo thevenin a continuacion, es posible encontrar más información de éste en [16], de igual forma las ecuaciones para las cuales se desarrollara el modelo:

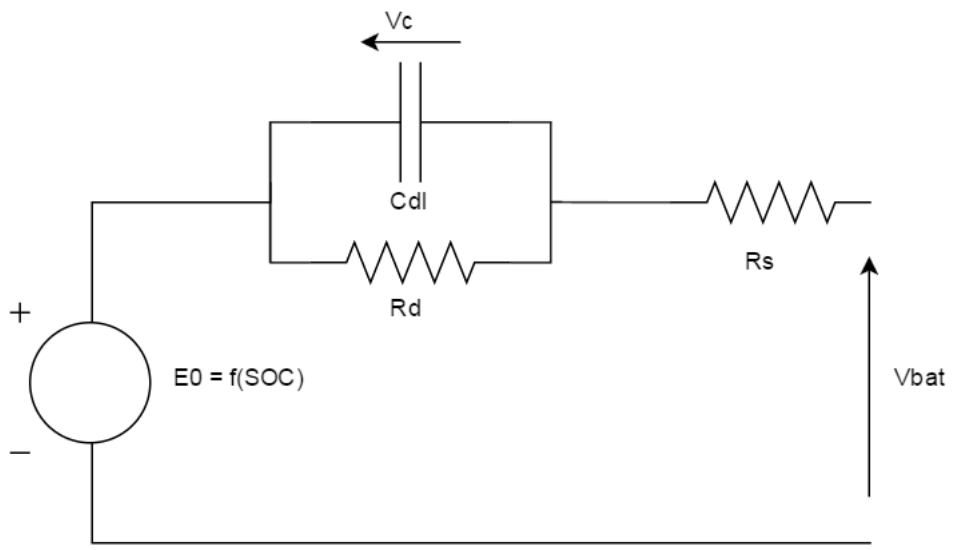


Figura 1.1: Diagrama de modelo frecuencial

A partir de este modelo es posible obtener la impedancia equivalente:

$$Z = R_s + \frac{R_d}{1 + jR_dC_{dl^w}} \tag{1.1}$$

Este modelo podría ser usado para determinar el SOH. Para mas información acerca del modelo ver [17].

1.2.2. Modelo adaptativo conectado

Este modelo surge con la necesidad de poder estimar el SOC, en un modo de no relajación de la batería, es decir, cuando esta lleva cierto tiempo indeterminado de uso. La información principal acerca del modelo, se puede encontrar en [18]. A continuación se presenta el diagrama del modelo:

En la figura 1.2, se aprecia como el modelo consiste en un circuito basado en resistencias y condensadores, el cual determina la dinámica del circuito usando un algoritmo. Éste identifica los parámetros y los actualiza en el tiempo. Para el desarrollo del modelo, es necesario considerar a la batería en diferentes estados de carga. Tendrá diferentes dinámicas. Para lo cual se considerara la siguiente ecuación:

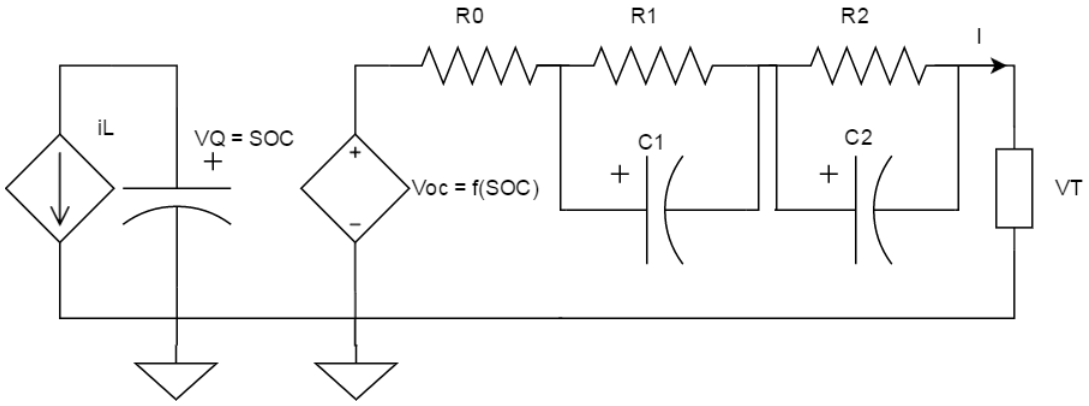


Figura 1.2: Diagrama de modelo adaptativo conectado

$$V_{oc} = F(SOC) = b_0 + b_1 * SOC \tag{1.2}$$

Donde b0 y b1, corresponde a las dinámicas de ecuación de la recta, considerando diferentes estados de ésta. Se presenta una gráfica en 1.3 de carga, donde se subdivide el SOC en 8 estados diferentes:

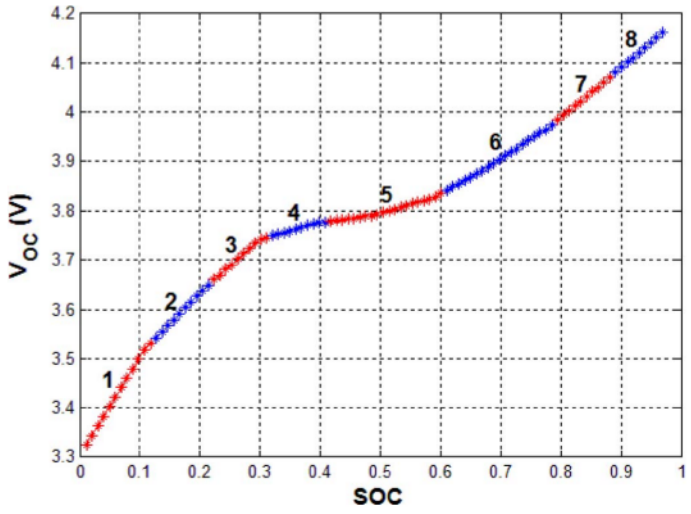


Figura 1.3: SOC dividivo en estados

Éste se basa en la idea de que los valores R0, R1, R2, C1, C2, cambian dependiendo en qué estado de SOC, se encuentra la batería. Para esto se desarrolla un algoritmo

el cual predice el estado y actualiza los valores de los componentes. Cabe notar que la complejidad de este algoritmo es avanzada y será una consideración a la hora de seleccionar el modelo.

1.2.3. Modelo fraccional

Este modelo, presenta una mezcla entre el modelo frecuencial analizado en 1.2.1, el cual busca una relación a partir de un barrido de frecuencia en forma de circuito RC, y el modelo adaptativo conectado analizado en 1.2.2. Éste busca una relación a partir de la ecuación de la recta y sus derivadas en diferentes puntos. Es él modelo más complejo propuesto, se puede ver mas informacion de éste en [19] y [20]. En la figura 1.4 se presenta el diagrama que desarrolla éste modelo:

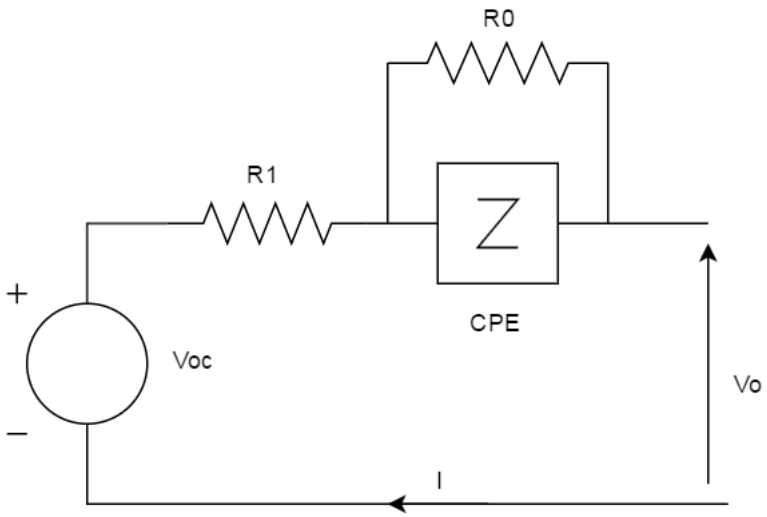


Figura 1.4: Diagrama de modelo fraccional

De la figura 1.4, se aprecia directamente la componente CPE, el cual es una componente dinámica. La cual busca para ciertos momentos comportarse como una resistencia y para otros como un condensador, expresando el sistema anterior en ecuaciones se obtiene:

$$\frac{V_{OCV}(s) - V_o(s)}{I(s)} = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 S^a} \tag{1.3}$$

En la ecuación 1.3 se aprecia directamente que para valores de α =0 se comporta como resistencia y para valores de α =1, se comporta como condensador. A partir de esto, es posible caracterizar el sistema en ecuaciones de estado según:

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{n}{3600C_n}I(t) \tag{1.4}$$

$$D^{\alpha} * u_1 = -\frac{u_1}{\tau} + \frac{I(t)R_1}{\tau} \tag{1.5}$$

En donde entra en juego las derivadas y los estados (esto valido para ciertas frecuencias, como en el caso del modelo frecuencial 1.2.1).

Finalmente notar que este modelo predice el SOC, bajo condiciones de no relajación. De igual forma este modelo presenta complejidad tanto a la hora de plantear el modelo, como para la obtención de datos (es necesario un Galvanometro). En [19] se usó un sistema Levenberg-Marquardt, que consistía en un algoritmo robusto para la búsqueda de los parámetros necesarios del modelo.

1.2.4. Modelo de Shepherd

Este modelo es el utilizado finalmente, debido a su simplicidad. Es primordial tener en consideración el tiempo de desarrollo con el cual se cuenta, él cual es limitado. Por otro lado éste modelo necesita mediciones, las cuales se pueden lograr con la implementación disponible. Sobre el modelo, se puede ver en detalle en el capitulo 2.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es proponer un modelo de un sistema de almacenamiento de la familia del Litio, específicamente de la batería BTL24A360C (figura 1.5), no existe información precisa de las curvas de descarga dadas por el fabricante [23]. Este modelo debe ser validado por pruebas experimentales. Lo cual contribuirá directamente al estudio de las baterías al realizar experimentos verídicos y originales de éstas, esto para estudio y análisis posterior de los datos obtenidos. A continuación se listan serie de objetivos secundarios que darán por culmine la obtención del modelo:

- Estudiar las características de las baterías químicas, físicas, junto a sus diferentes dinámicas y factores claves. En particular, se de hará el estudio de la batería LiFePO4, esto para identificar el problema.
- Estudiar documentación ya existentes sobre el modelamiento de baterías, es decir modelos de carácter eléctrico y/o matemáticos existentes, con el fin de poder instaurar un modelo que se ajuste de forma precisa a nuestro sistema de almacenamiento.
- Obtener datos experimentales y/o teóricos, que representen el comportamiento dinámico de la batería.
- Plantear un Modelo matemático y/o eléctrico adecuado a la problemática planteada.



Figura 1.5: Bateria a usarse en este proyecto

1.4. Alcances

Para este estudio se consideraran los siguientes alcances:

- No se considerará el efecto de la temperatura.
- No se considerará el efecto de la presión.
- Se considerarán baterías individuales para realizar mediciones.
- No se posee un sistema automatizado para realizar mediciones (Mediciones de carga y descarga de carácter manual).
- Número de pruebas limitadas debido al tiempo disponible para desarrollar este trabajo.
- Ciertos parámetros serán obtenidos o se ajustaran de manera empírica a falta de datos entregados por el fabricante.

1.5. Resultados esperados

El comportamiento de las baterías LiFePO4 es un tema latente en la actualidad. Con este proyecto se espera generar conocimiento en el ámbito de los sistemas de almacenamiento de energía específicamente en el área de las baterías de Litio, tanto a nivel de la universidad como a nivel internacional.

Al culminar este proyecto se espera contar con un modelo teórico para esta familia de baterías, el cual sea capaz de predecir diferentes dinámicas de estas.

Capítulo 2

Modelado del banco de baterías

En el modelado de baterías existen diferentes factores a considerar, carácter del modelo (matemático, eléctrico, químico), variables que predecirán el modelo, mediciones necesarias, variables físicas involucradas, complejidad del modelo, utilidad de éste, equipo necesario para implementar el modelo entre otras. El modelo escogido es el de Shepherd [26]. El Modelo de Shepherd fue escogido por las siguientes razones, éste modelo está presente desde 1960, por tanto no presenta innovación, por otro lado predice el SOC, la complejidad es abordable y la instrumentación necesaria es mínima considerando solo el proceso de carga y descarga bajo diferentes regímenes de corriente. En este capítulo se Abarcará tanto el modelo, como la implementación en el software PLECS que se realizó.

2.1. Modelo de Shepherd

El modelo de Shepherd fue visto por primera vez a finales de los 60, por tanto ya es un modelo confiable, conciso y corroborado con diferentes baterías como por ejemplo la de Niquel-Cadmio, más información se puede encontrar en [26]. Éste modelo describe el comportamiento electro-químico de la batería en términos de voltaje terminal, voltaje de circuito abierto, resistencia interna y corriente de descarga. La dinámica del modelo puede ser usado tanto para carga como para descarga. Los parámetros para

el modelo de la batería pueden ser extraídos de la curva de descarga del fabricante o experimentalmente obteniendo esta curva. Este modelo tiene limitaciones, como por ejemplo no considerar efectos de temperatura, pero dado que necesitamos un modelo dinámico, es fácil de implementar en un software de simulación, lo cual es una gran ventaja.

El modelo de Shepherd propone tener una fuente controlada de voltaje descrita por la ecuaciones 2.1 y 2.2, junto a una resistencia interna. Desprendiendo de esta forma el voltaje que representa indirectamente el estado de carga (SOC) de la batería, esta relación se evidencia en la figura 2.1, en ésta se sugiere la posibilidad de discretizar el voltaje con su respectivo estado de carga.

Modelo de descarga:

$$E(t) = E_0 - K * \frac{Q_0}{Q_0 - Q(t)} * Q(t) - Ae^{-B*Q(t)} \tag{2.1}$$

$$V_{batt}(t) = E_0 - K * \frac{Q_0}{Q_0 - Q(t)} * Q(t) - Ae^{-B*Q(t)} - R * i(t) \tag{2.2}$$

Por otro lado la obtención numérica de los parámetros no es única y existen diferentes métodos para su obtención. A continuación se describirá cada parámetro:

- $E(t)$: Representa el voltaje de fuente controlada de voltaje, utilizada en el modelo. (V)
- $V_{batt}(t)$: Representa el voltaje directo medible desde los bornes de la batería. (V)
- E_0: Representa un offset inicial en el voltaje, el cual está directamente relacionado con el régimen de corriente aplicado y la resistencia interna de ésta. (V)
- K: Constante de polarización.(V/Ah)
- Q_0: Capacidad de la batería nominal. (Ah)
- A: Pondera la zona exponencial. (V)
- B: Pondera la velocidad de la zona exponencial. $(Ah)^-1$
- R: Resistencia interna de la batería.(Ohm)

- i(t): Régimen de corriente a la cual es sometida la batería. (A)
- $Q(t)$: Carga actual de la batería, es la integral de la corriente en el tiempo $\int_0^t idt$. (Ah)
- i'(t): Corriente filtrada. (A) *Incluida solo para el modelo de carga.
- P: Constante de carga. *Incluida solo para el modelo de carga.

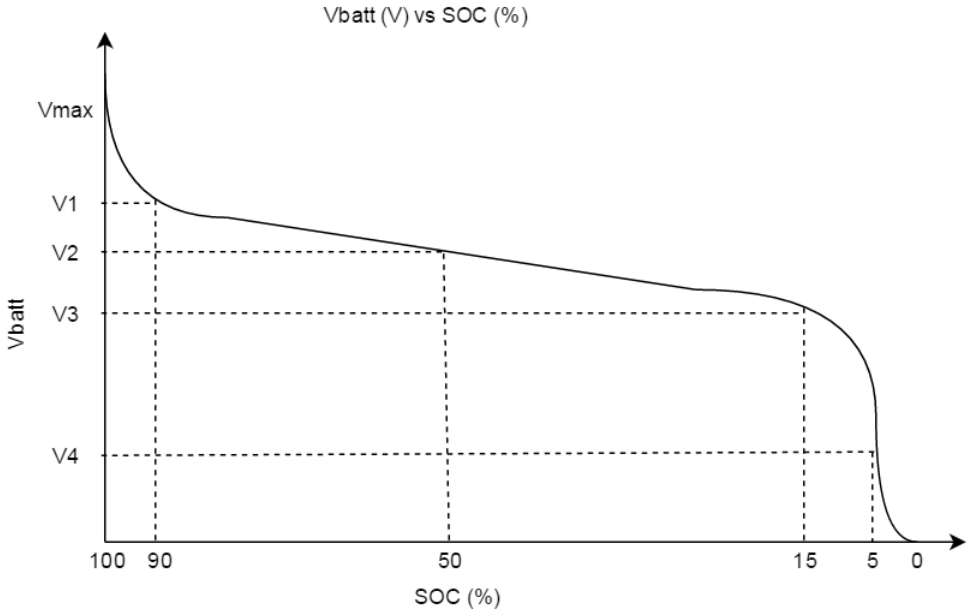


Figura 2.1: Dizcretizacion, Voltaje batería con estado de carga (SOC)

De las ecuaciones 2.1 y 2.2, E_0, K, Q_0, A y B corresponden a datos particulares y adaptables para cada batería los cuales serán descritos en la sección 2.2, en la figura 2.2 se encuentra la implementación en un diagrama de orden cero. Notar que el modelo de Shepherd, es posible implementarlo considerando el efecto de polarización para mejorar la representación del voltaje en circuito abierto (Fuente voltaje controlada), éste recibe el nombre de orden uno, figura 2.2.

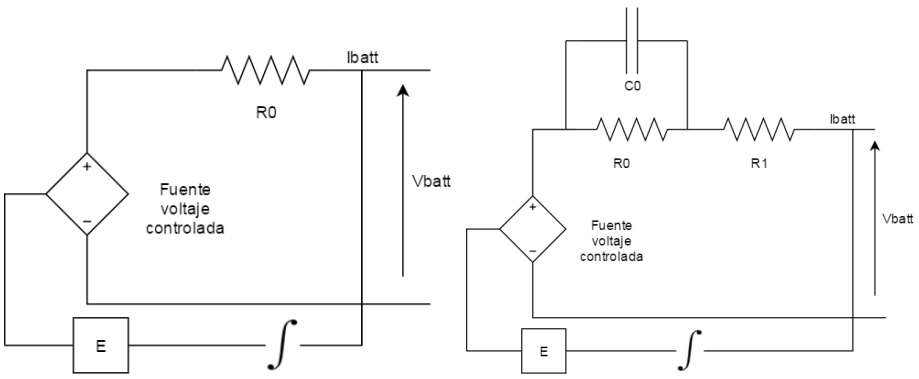


Figura 2.2: Izquierda modelo orden 0, derecha modelo orden 1.

La dinámica de carga y descarga en las baterías no es lineal, por tanto se comportan de manera diferente tanto para carga como descarga, esto queda expuesto en la figura 2.3. Si bien se podría usar el mismo modelo para carga, claramente no sería preciso es por esto que se modifican las ecuaciones para obtener un modelo de carga. La carga queda caracterizada por las ecuaciones 2.3 y 2.4.

Modelo de carga:

$$E(t) = E_0 - K * \frac{Q_0}{Q_0 - Q(t)} * Q(t) - K * \frac{Q_0}{Q(t) - PQ_0} * i'(t) - Ae^{-B*Q(t)} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} V_{batt}(t) = E_0 - K * \frac{Q_0}{Q_0 - Q(t)} * Q(t) - K * \frac{Q_0}{Q(t) - PQ_0} * i'(t) \\ - Ae^{-B*Q(t)} - R * i(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Notar que los parámetros E_0, K, Q_0, A y B corresponden a los mismos parámetros que el modelo de descarga y se agrega el parámetro P el cual corresponde a un valor inferior a 0.01, este parámetro es ajustable dependiendo de la composición química de la batería.

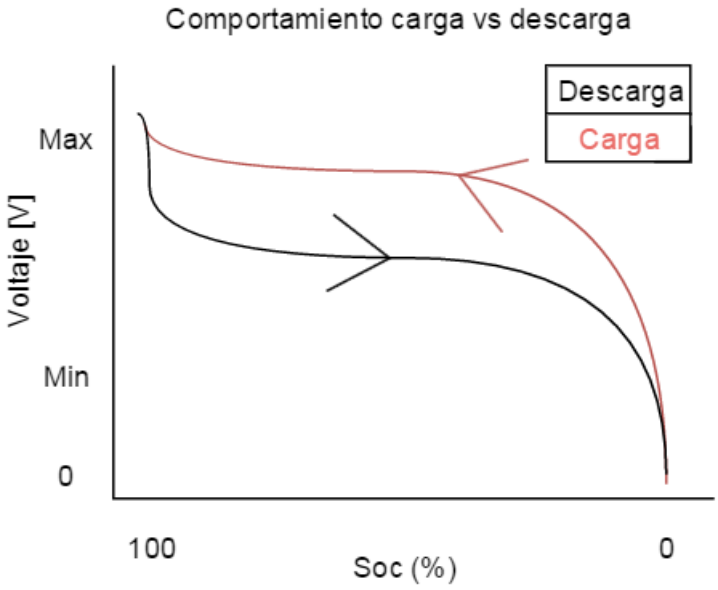


Figura 2.3: Dinámicas de carga y descarga

2.2. Parámetros

El modelo expuesto en 2.1, basa su funcionamiento a través de funciones y la ponderación de los parámetros de esta para la recreación de la curva característica en la figura 2.4, la curva típica de descarga para cualquier batería, posee una zona exponencial, una zona nominal y una zona de deceso.

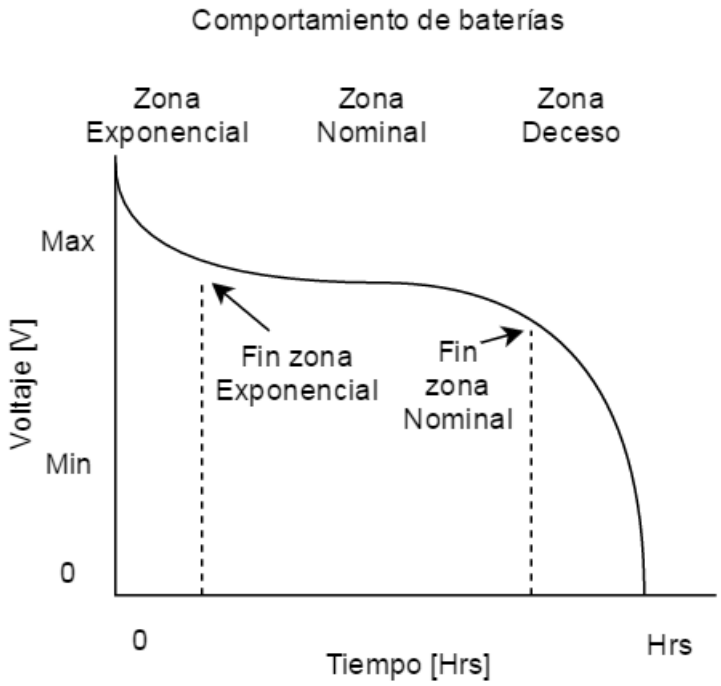


Figura 2.4: Curva típica de descarga definida por zonas

La obtención de los parámetros descritos en la seccion 2.1 no es trivial, y se basó en las curvas obtenidas de manera experimental, para esto es necesario definir nuevos parámetros obtenidos directamente de las curvas de descarga, figura 2.4.

A partir de esto se definen los siguientes parámetros:

- V_{full}: Voltaje de carga máximo.
- V_{exp}: Voltaje al final de la zona exponencial.
- Q_{exp}: Carga, al final de la zona exponencial.
- V_{nom}: voltaje al final de la zona nominal.

- Q_{nom}: Carga, al final de la zona nominal.

A partir de esto se utiliza el método sugerido en [27], para la obtención de los parámetros. Éste método implica las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8.

$$A = V_{full} - V_{exp} \tag{2.5}$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \tag{2.6}$$

$$K = \frac{(V_{full} - V_{nom} + A(e^{-B*Q_{nom}} - 1))(Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \tag{2.7}$$

$$E_0 = V_{full} + K + R * i - A \tag{2.8}$$

2.3. Análisis de sensibilidad

Se realizo un análisis del modelo dispuesto, este se realizo mediante el cambio directo en los parámetros del modelo. Este cambio se realiza en la ecuación 2.2. En las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 se varía A, B, K y E_0 respectivamente. Notar que este análisis se realizo solo sobre la descarga, debido a que para la carga influyen de manera similar los parámetros expuestos. Por otro lado este análisis fue realizado a 5[A] de corriente. En el cuadro 2.1 se encuentran las condiciones normales del modelo.

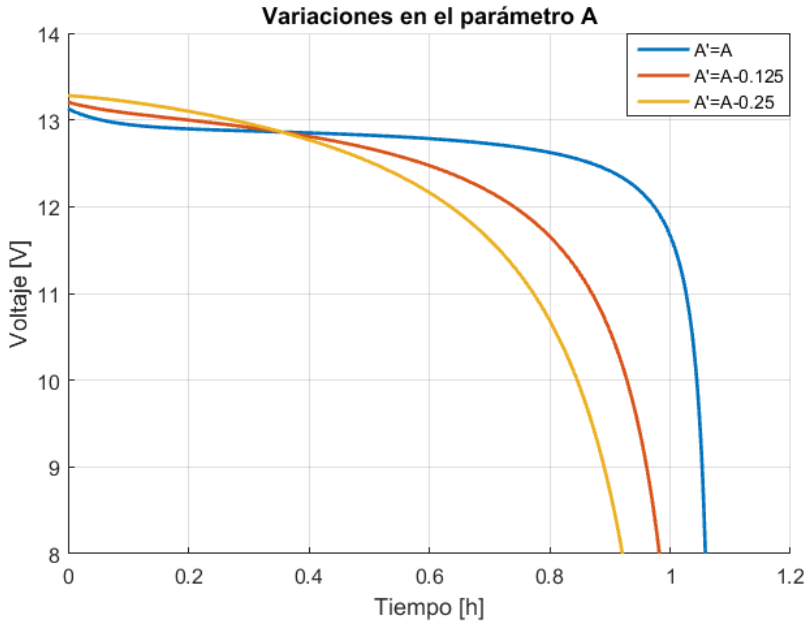


Figura 2.5: Variaciones producidas por el parámetro A

En la figura 2.5, se aprecia cómo el parámetro A, afecta directamente al valor promedio del voltaje además notar la injerencia de este en el tiempo.

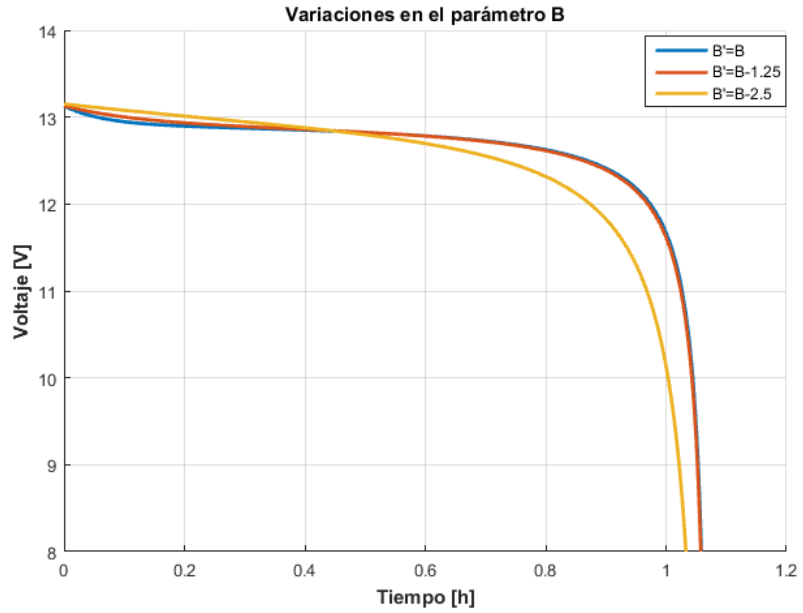


Figura 2.6: Variaciones producidas por el parámetro B

En la figura 2.6, se aprecia cómo el parámetro B, afecta directamente al comportamiento exponencial, es decir la velocidad con la que decae, acentuada de mayor forma en los primeros segundos.

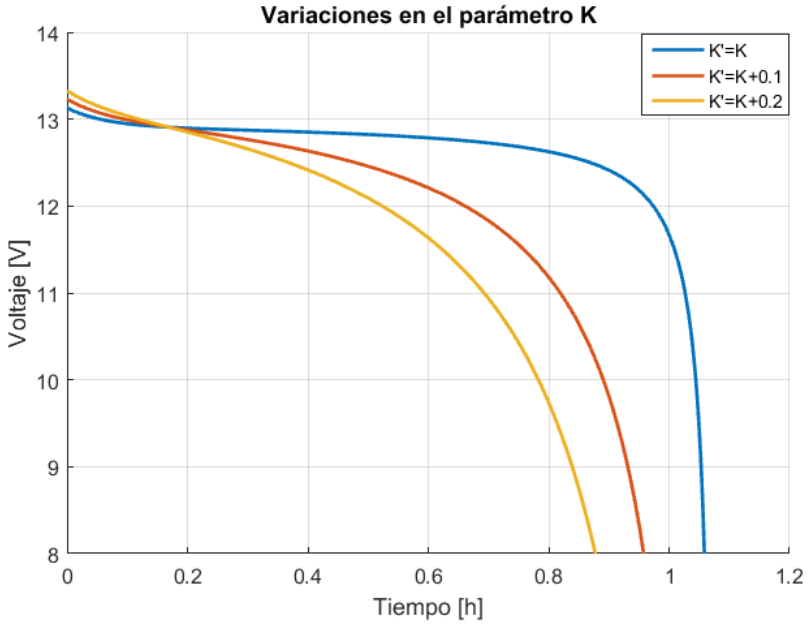


Figura 2.7: Variaciones producidas por el parámetro K

En la figura 2.7, se aprecia cómo el parámetro K, afecta directamente tanto en el valor promedio, como en el tiempo que demora la señal en descender en valor de voltaje.

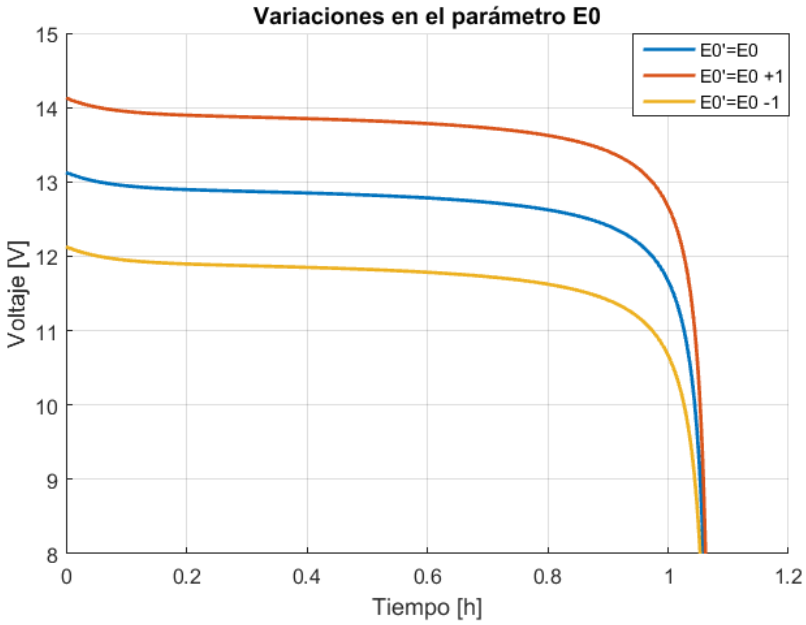


Figura 2.8: Variaciones producidas por el parámetro E_0

En la figura 2.8, se aprecia cómo el parámetro E_0, afecta como un offset, por otro lado este parámetro tiene poca injerencia en el decaimiento de la señal en el tiempo.

Cuadro 2.1: Modelo implementado en batería BTL24A360C

Parámetro	**Valor**
A	0.22
B	3.01
K	0.01
E_0	13.35
R	0.09
I	5

2.4. Implementación en PLECS

La implementación del modelo fue realizada mediante el software computacional PLECS, en la figura 2.9 se aprecia la implementación de dos bloques, uno para carga y otro para descarga. Por otro lado para la introducción de los parámetros se diseño una ventana, esta se encuentra en la figura 2.10. Notar la existencia previa de modelos de baterías en PLECS, para más información ver [21].

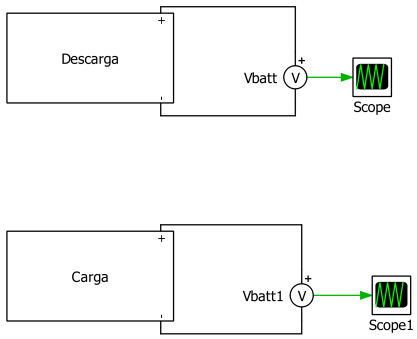


Figura 2.9: Bloques de carga y descarga

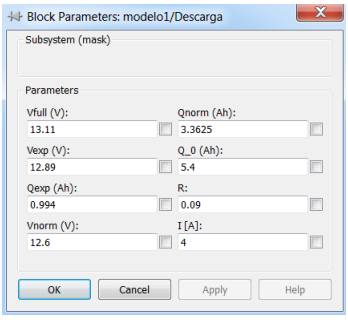


Figura 2.10: Pantalla introducción de parámetros

Para poder desarrollar el modelo se utilizó el bloque disponibles en las librerías de plecs, C-script, en las figura 2.11 y 2.12 se aprecia los bloques de carga y descarga utilizados respectivamente.

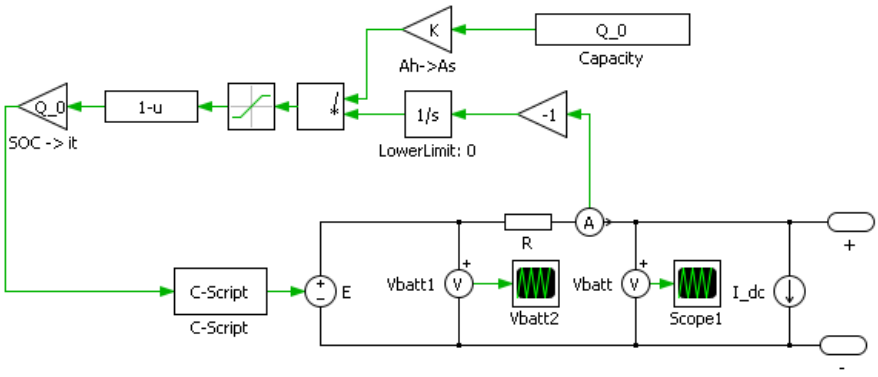


Figura 2.11: Bloques de descarga

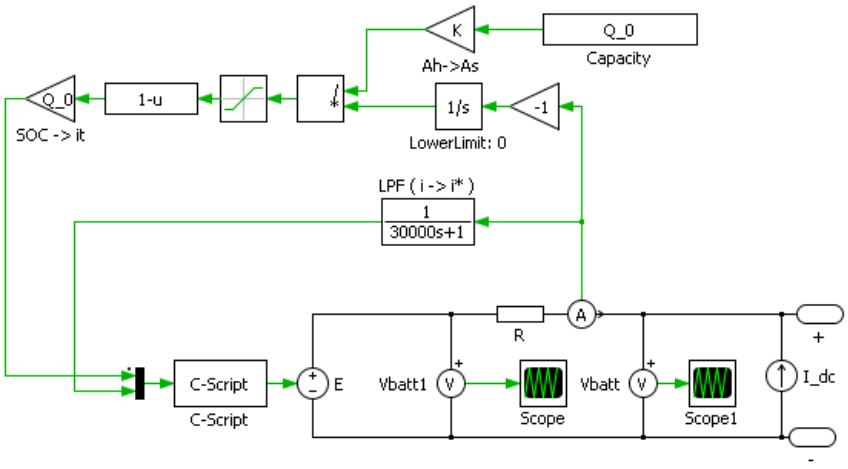


Figura 2.12: Bloques de carga

Notar que la configuración del bloque C-scripts, se encuentra en anexo A.

2.5. Curvas a régimen de 0.85 carga nominal

Es necesario definir en este punto la carga nominal, En términos sencillos, se entiende que es la cantidad de electricidad contenida en la batería y que podemos aprovechar para entregar corriente a una carga durante un cierto periodo de tiempo. Se simbolizara con la letra C. La carga nominal se obtiene a partir de la ecuacion 2.9.

$$E = P * t = V * I * t \tag{2.9}$$

El frabicante de la batería, nos entrega directamente la energía que es capaz de entregar en una hora (Energía nominal) (anexo B) y por otro lado se tiene el voltaje (Voltaje Nominal) (anexo B), a partir de esto es posible obtener la carga o corriente nominal segun ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12.

$$E = P * t = V * I * t \tag{2.10}$$

$$76{,}8[Watthrs] = V * I * t = 12{,}8[V] * I[A] * 1[hrs] \tag{2.11}$$

Despejando la variable I:

$$I = 6[A] = C \tag{2.12}$$

Mediante la implementación del modelo en plecs, es posible obtener curvas que simulan de manera efectiva el voltaje en estado de carga y descarga de las baterías a estudiar.

Se consideró como carga nominal, la máxima corriente de carga establecida por la ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12. En la figura 2.13 se simula usando corriente de 0.85 C, aproximadamente 5[A], tanto carga como descarga. Notar de igual forma que para los experimentos expuestos en 3, no es recomendable superar el máximo expuesto por el fabricante que es de 10[A], ver anexo B.

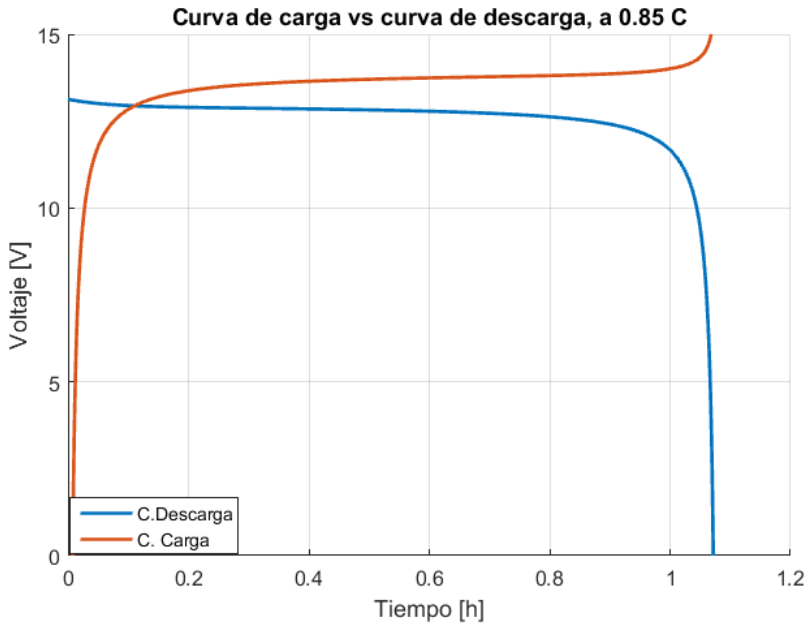


Figura 2.13: Carga y descarga a 0.85C

Capítulo 3

Banco de Pruebas Experimental

En este capítulo se establecerá la metodología que se utilizó para realizar los experimentos de carga y descarga, junto a la descripción de los equipos. Esta metodología necesita caracterizar experimentos de carga y descarga a diferentes niveles de corriente y medir el voltaje de la batería durante el tiempo que esta llegase al valor mínimo y máximo establecido. Con esto se espera poder comparar los resultados obtenidos con los resultados de simulación.

3.1. Descripcion del banco

Se realizaron pruebas de carga y descarga a diferentes regímenes de corriente, para esto se usó una carga controlada BK-MDL001, junto a una fuente controlada Keysight N5770A de igual forma se contaban con 6 baterías BTL24A360C, en la figura 3.1 se aprecian una de las baterías y las fuentes.



Figura 3.1: Arriba izquierda bateria BTL24A360C, arriba derecha fuente BK-MDL001 y abajo fuente controlada Keysight N5770A

Las principales características de la batería BTL24A360C, fuente BK-MDL001 y fuente Keysight N5770A se aprecian en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente.

Cuadro 3.1: Características batería, para información más detallada ver anexo B.

Voltaje Nominal [V]	12.8
Corriente Nominal [A]	6
Energía Nominal [Watt hrs]	76.8

Cuadro 3.2: Características fuente BK-MDL001

Rango de voltajes [V]	[0 500]
Voltaje utilizado [V]	8
Rango de corriente [A]	[0 120]
Corrientes utilizadas	4.5 5
Rango de Potencia [Watts]	[0 2400]

Cuadro 3.3: Características fuente Keysight N5770A

Rango de voltajes [V]	[0 150]
Voltaje utilizado [V]	14.8
Rango de corriente [A]	[0 10]
Corrientes utilizadas	1 2.5 5
Rango de Potencia [Watts]	[0 1500]

Para la adquisición de datos se utilizó el instrumento Fluke 434, junto a pinzas de corriente LEM, estos se aprecian en la figura 3.2.



Figura 3.2: Izquierda Fluke 434 y derecha pinzas de corriente LEM

Las características de éste instrumento se aprecian en la tabla 3.4.

Cuadro 3.4: Características Fluke434

Rango de voltajes (medición) [V]	[0 1000]
Rango de corriente (medición) [A]	[0.5 6000]
Rango de Potencia (medición) [MW]	[0 6000]
Rango de muestreo	[0,25s 2h]
Muestreo utilizado	1s
Capacidad SD	8 GB

Para los experimentos de carga realizados se utilizó un gabinete de doble puerta diseñado especialmente anti-fuego. Éste se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3: Gabinete utilizado para pruebas de carga

El sistema completo montado se aprecia en la figura 3.4.



Figura 3.4: Pruebas experimentales

3.2. Procedimientos de carga

El procedimiento de carga consistió de dos pasos. Primero, en montar el equipo, la batería, el Fluke 434, las pinzas LEM, la fuente Keysight N5770A y el gabinete, en la figura 3.2 se esboza el diagrama pertinente. Segundo, se enlistan a continuación los pasos del procedimiento de carga:

1. Encendido y configuración pertinente al Fluke 434 para toma de muestras, empezar a recolectar datos.

2. Encendido y configuración de la fuente Keysight N5770A, establecer corriente, voltajes y protecciones, empezar a entregar corriente.

3. La batería al ser cargada llegara al voltaje máximo recomendado por fabricante, ver anexo B, una vez se llega al máximo, cesar la entrega de corriente y posteriormente apagar fuente Keysight N5770A.

4. Guardar datos en Fluke 434, posteriormente apagar Fluke 434.

Para la realización de éstas pruebas se utilizó manualmente la fuente de carga, introduciendo directamente la corriente y el voltaje a los cuales se espera llegar. Notar que fue posible definir voltajes máximos, en los cuales el equipo cesaba su operación.

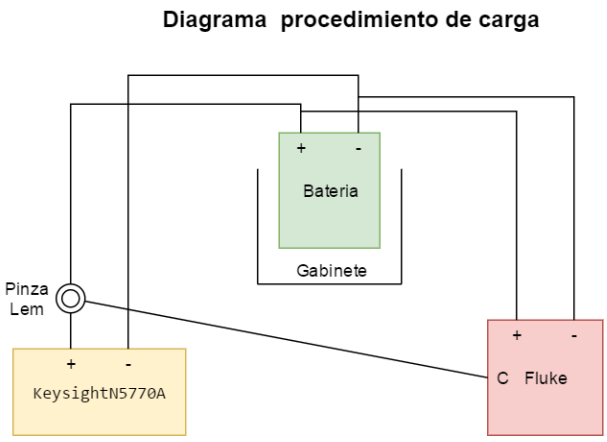


Figura 3.5: Diagrama procedimiento de carga

3.3. Procedimientos de descarga

El procedimiento de descarga consistió en dos pasos. Primero en montar el equipo, la batería, el Fluke 434, la fuente BK-MDL001 y el notebook, en la figura 3.6 se describe esta estructura. Segundo se enlistan a continuación los pasos del procedimiento de descarga:

1. Encendido y configuración pertinente al Fluke 434 para toma de muestras, empezar a recolectar datos.

2. Encendido y configuración de la fuente BK-MDL001, la configuración se realiza mediante el notebook, una vez establecido, empezar a descargar la batería.

3. La batería al ser descargada llegara al voltaje mínimo recomendado por fabricante, ver anexo B, una vez se llega al mínimo, cesar la descarga mediante el notebook y posteriormente apagar la fuente BK-MDL001.

4. Guardar datos en Fluke 434, posteriormente apagar Fluke 434.

Para realizar estas pruebas se utilizó un computador portátil el cual poseía una interfaz a través de micro-usb para conectarse a la fuente de carga. Esta interfaz utilizaba software propio proporcionado por el fabricante en entorno LabView, para más información ver [24]. Con esto fue posible definir distintos valores de corriente para la descarga.

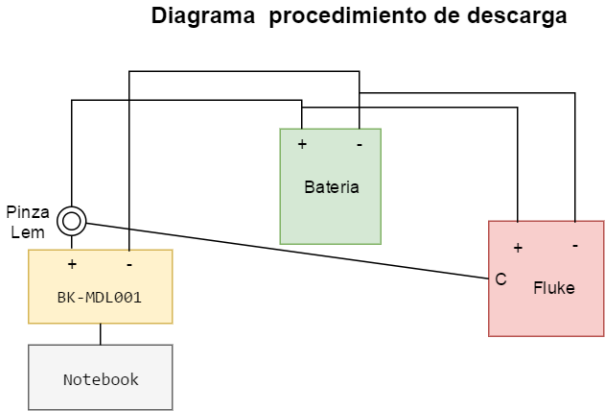


Figura 3.6: Diagrama procedimiento de descarga

3.4. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utilizó el equipo Fluke 434, con este se buscaba medir el voltaje y corriente en el tiempo. Este equipo fue configurado con tiempo de muestreo de 1[s], esto con el fin de obtener la mayor precisión en los experimentos.
Una vez realizados los experimentos, los datos fueron guardados en la tarjeta SD de este dispositivo, posteriormente eran descomprimidos y exportados mediante el software Power Log (disponible para el Fluke 434) en formato .txt para más información al respecto dirigirse a [25]. Con lo cual el manejo de los datos en el software Matlab no represento dificultad.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se buscara validar el modelo de carga y descarga obtenidos. Se establecen los resultados para el modelo propuesto y los experimentos prácticos realizados. Junto a esto se realizara una comparación directa entre los experimentos realizados y las simulaciones realizadas lo cual culminara con la obtención del error existente tanto para el modelo de carga como el modelo de descarga, a diferentes regímenes de corriente.

4.1. Resultados experimentales de carga

Se procedió con pruebas de carga, estas se realizaron a 3 regímenes distintos de corriente (1[A], 2.5[A] y 5[A]). Notar que estas pruebas realizaron con niveles de corrientes fijos, es decir no se consideró los niveles de corrientes nominales como base. Sin embargo si se consideró el máximo de corriente permitido, ver anexo 2. En la figura 4.1 se aprecian estas curvas.

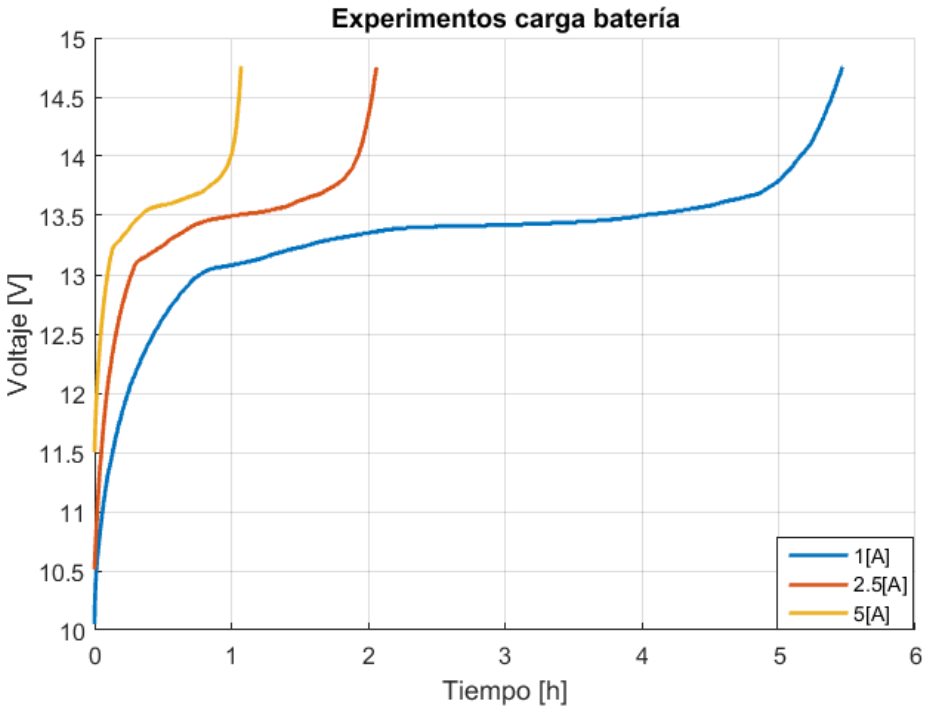


Figura 4.1: Experimento de carga a 1[A], 2.5[A] y 5[A]

El comportamiento es el esperado. Es decir, tiene una zona exponencial posteriormente zona lineal para finalizar en un decaimiento, en las 3 pruebas, ademas al haber 3 regímenes diferentes de corrientes se esperan que alcancen al voltaje máximo (14.8 volts, ver anexo 2) a diferentes tiempos. Por otro lado al realizar estas pruebas no se tuvieron mayores percances.

4.2. Resultados simulación de carga

Se simuló según los mismos regímenes experimentales, es decir, a 1[A], 2.5[A] y 5[A] de corriente. En la figura 4.2 se aprecian estas curvas.

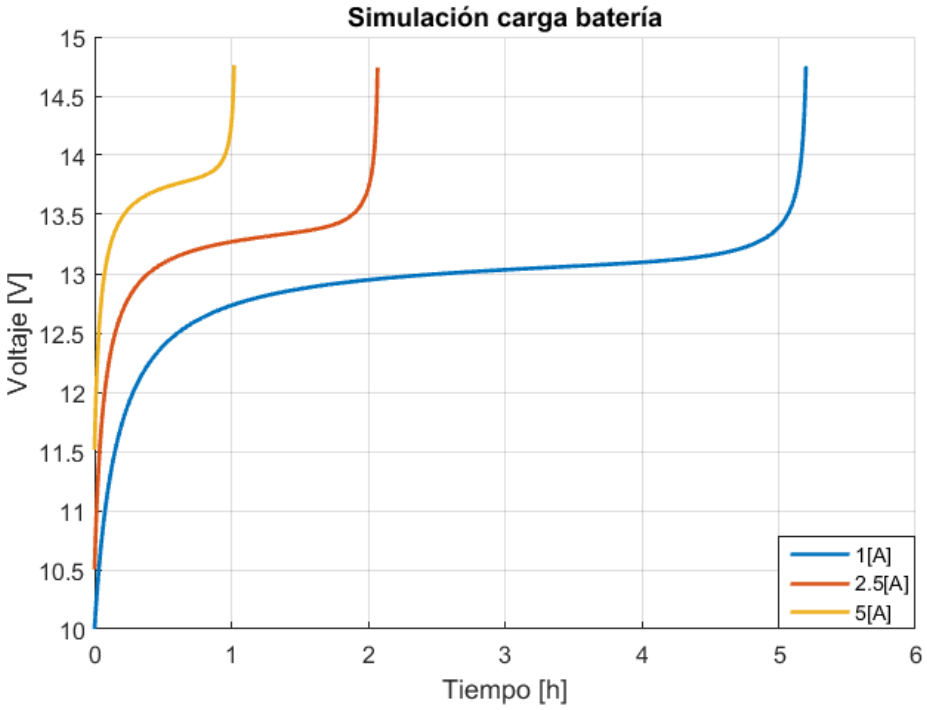


Figura 4.2: Simulación de carga a 1[A], 2.5[A] y 5[A]

El comportamiento es el esperado. Es decir, tiene una zona exponencial posteriormente zona lineal para finalizar en un decaimiento, en las 3 simulaciones. ademas al haber 3 regímenes diferentes de corrientes se esperan que alcancen al voltaje máximo (14.8 volts, ver anexo B) a diferentes tiempos.

4.3. Resultados experimentales de descarga

Se procedió con pruebas de descarga, estas se realizaron a 2 regímenes distintos de corriente, notar que estas pruebas se realizaron con niveles de corrientes fijos. Es decir, no se consideró los niveles de corrientes nominales como base, sin embargo si se consideró el máximo de corriente permitido, ver anexo B. En la figura 4.3 se aprecian estas curvas.

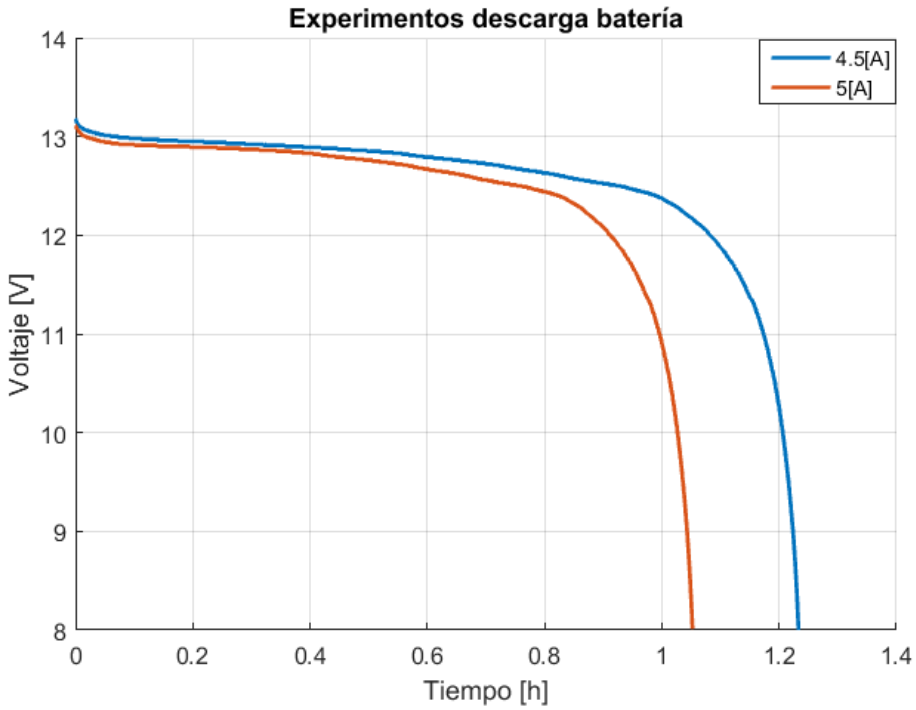


Figura 4.3: Experimento de descarga a 4.5[A] y 5[A]

El comportamiento es el esperado. Es decir, tiene una zona exponencial posteriormente zona lineal para finalizar en un decaimiento, en los 2 experimentos. ademas al haber 2 regímenes diferentes de corrientes se esperan que alcancen al voltaje mínimo (8 volts, ver anexo B) a diferentes tiempos.

4.4. Resultados simulación de descarga

Se simulo según los mismos regímenes experimentales, es decir, a 4.5[A] y 5[A] de corriente. En la figura 4.4 se aprecian estas curvas.

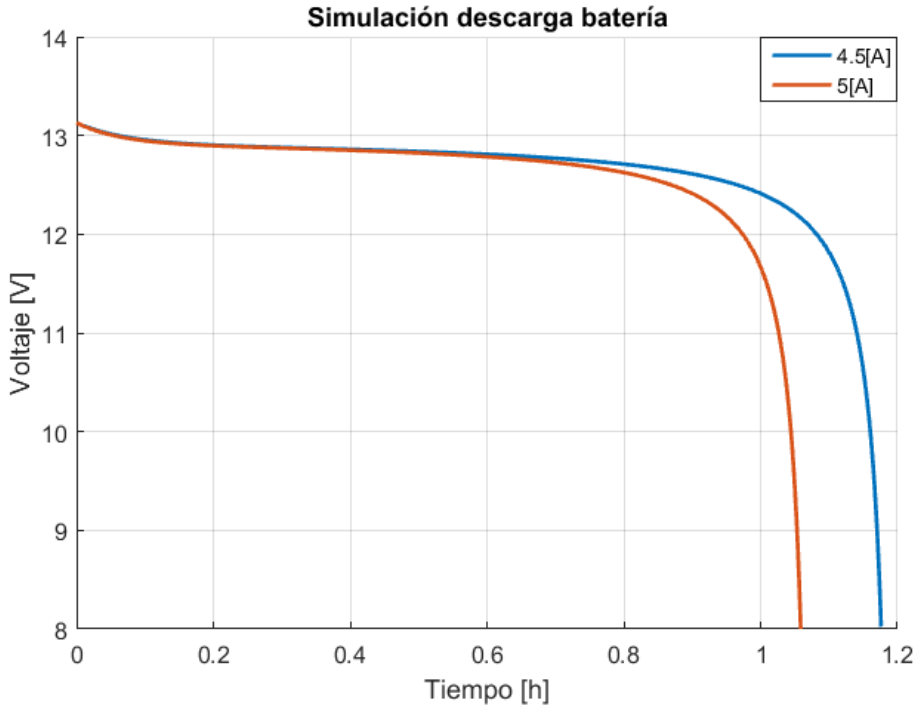


Figura 4.4: Simulación de descarga a 4.5[A] y 5[A]

El comportamiento es el esperado. Es decir, tiene una zona exponencial posteriormente zona lineal para finalizar en un decaimiento, en las 2 simulaciónes. ademas al haber 2 regímenes diferentes de corrientes se esperan que alcancen al voltaje mínimo (8 volts, ver anexo B) a diferentes tiempos.

4.5. Comparación error de carga

A continuación se presenta una breve comparación entre los resultados de simulación y resultados experimentales para el modelo de carga. De modo que se tenga una validación de éste. El error presente entre el modelo de simulación y el experimental se aprecia en las imágenes 4.5, 4.6 y 4.7 para los regímenes de 1[A], 2.5[A] y 5[A] respectivamente.

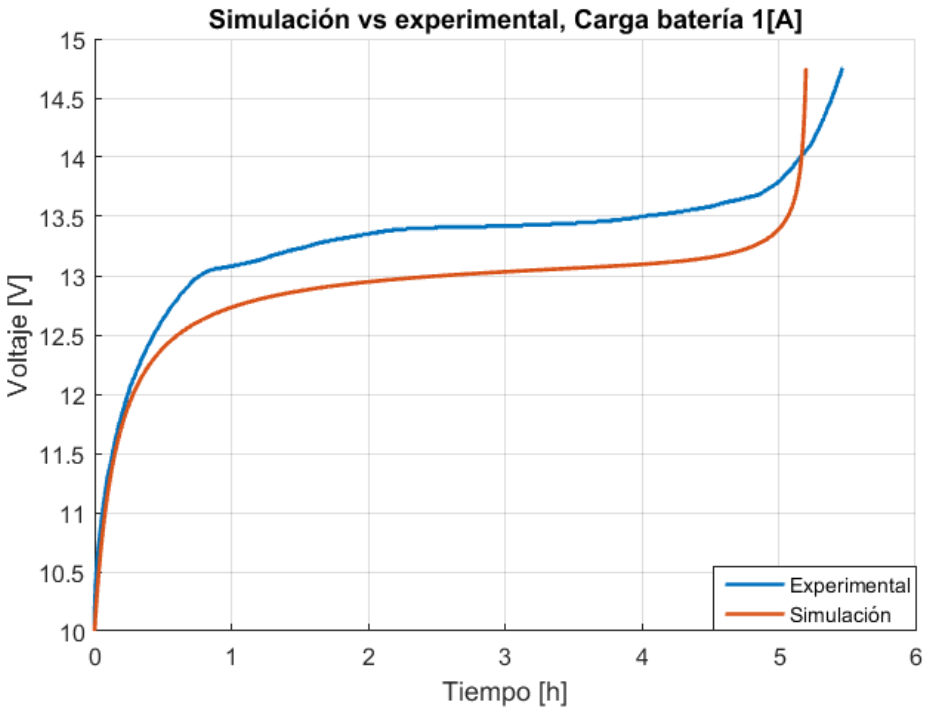


Figura 4.5: Simulación vs experimental, carga batería 1[A]

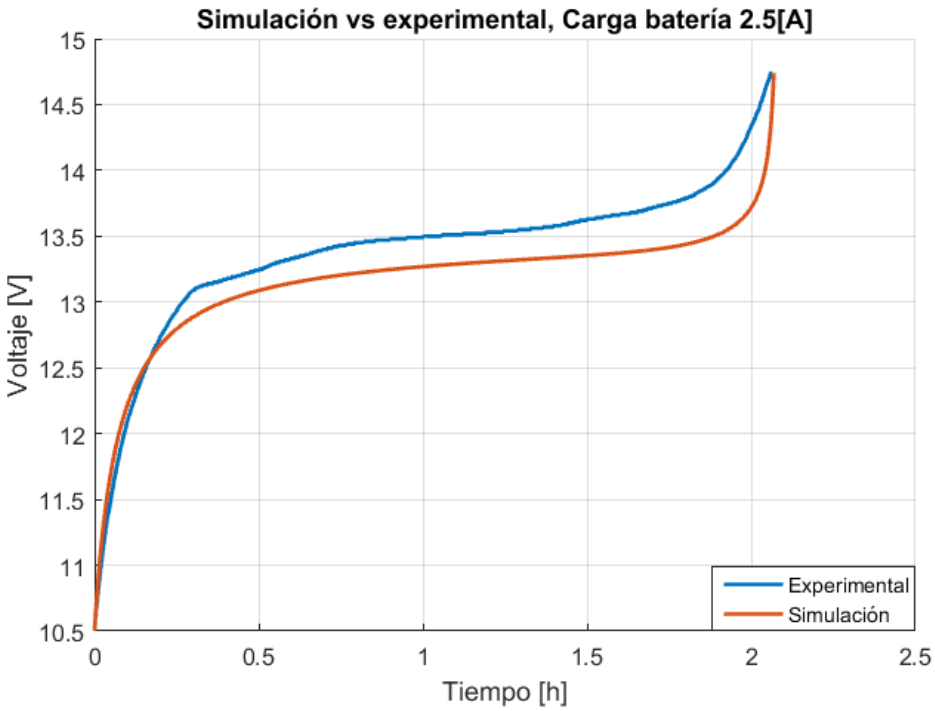


Figura 4.6: Simulación vs experimental, carga batería 2.5[A]

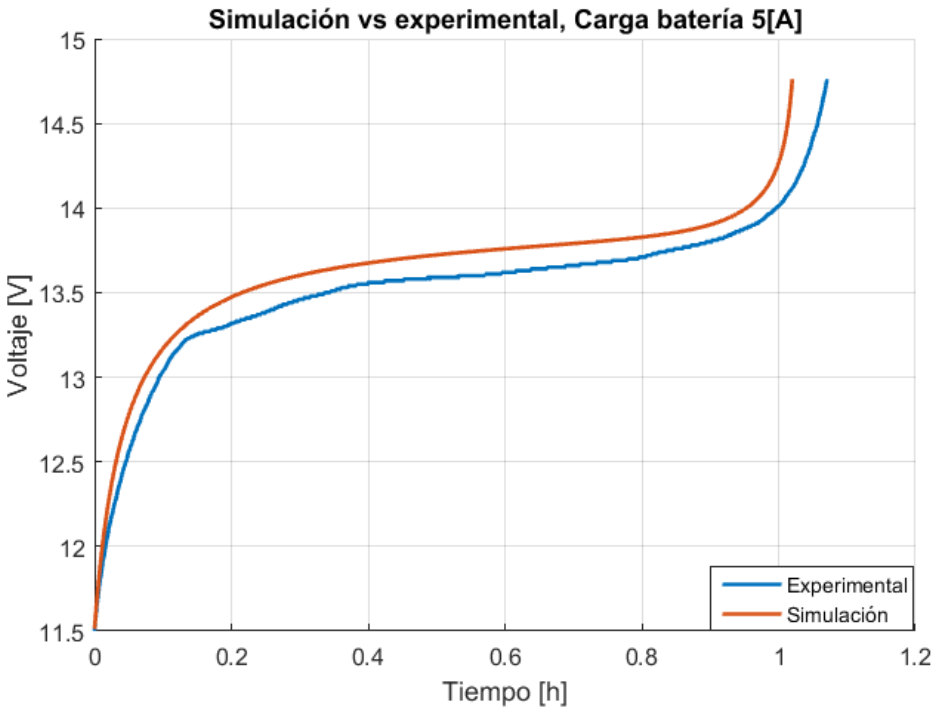


Figura 4.7: Simulación vs experimental, carga batería 5[A]

El error presente en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se aprecia directamente en la figura 4.8.

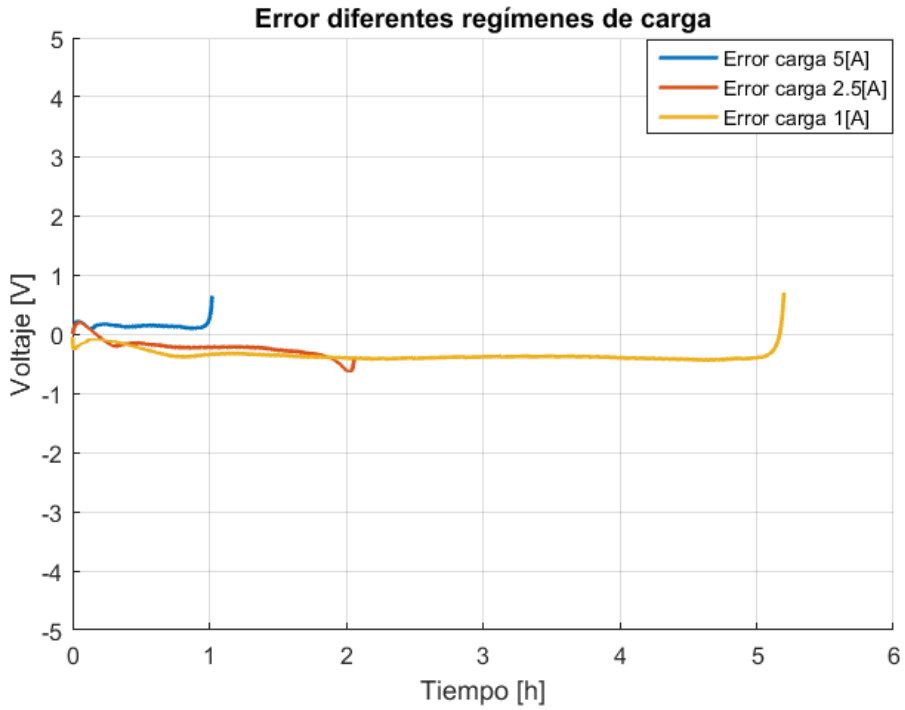


Figura 4.8: Error diferentes regímenes de carga

A partir de la figura 4.8, es posible realizar un cuadro comparativo con la suma en el tiempo de este error 4.1.

Cuadro 4.1: Error de carga

Corriente	Error	Error porcentual %
5[A]	0.0103	1.0263
2.5[A]	0.0165	1.6472
1[A]	0.0278	2.778

El calculo del error y error porcentual expuesto en los cuadros comparativos 4.1 y 4.2 se realizo según las ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente.

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^{Ndatos} x_{i_{exp}} - x_{i_{Sim}}}{Ndatos} \tag{4.1}$$

$$Error\ porcentual = Error * 100\,\% \tag{4.2}$$

Notar los parámetros:

- N_{datos}: Número de datos obtenidos.
- $x_{i_{exp}}$: Dato de experimento evaluado en i.
- $x_{i_{Sim}}$: Dato de Simulación evaluado en i.

4.6. Comparación error de descarga

A continuación se presenta una breve comparación entre los resultados de simulación y resultados experimentales para el modelo de descarga. De modo que se tenga una validación de éste. El error presente entre el modelo simulado y el experimental se aprecia en las imágenes 4.9 y 4.10 para los regímenes de 4.5[A] y 5[A] respectivamente.

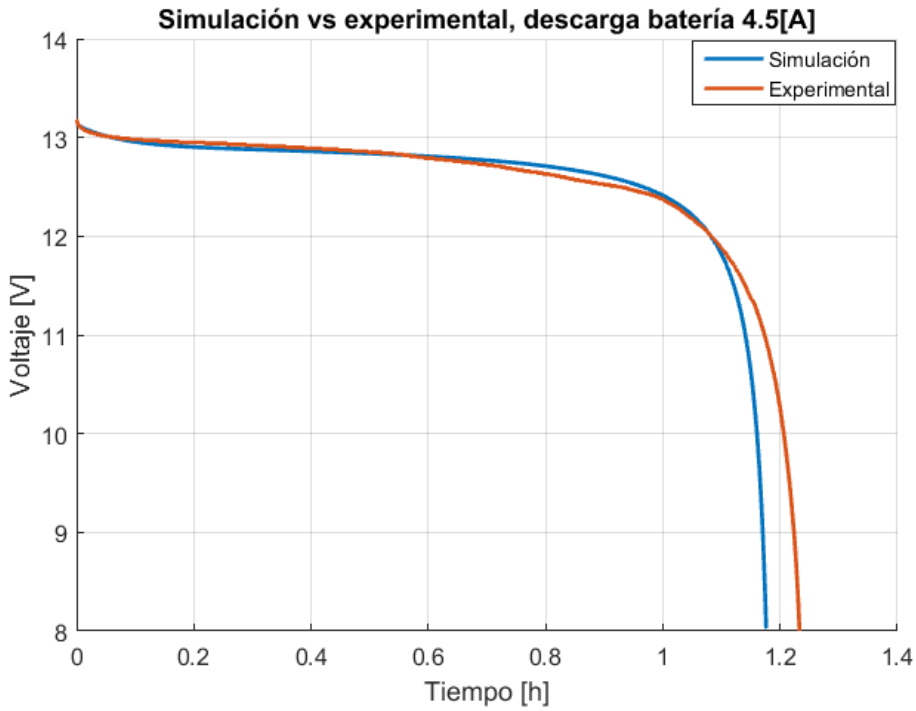


Figura 4.9: Simulacion vs experimental, descarga batería 4.5[A]

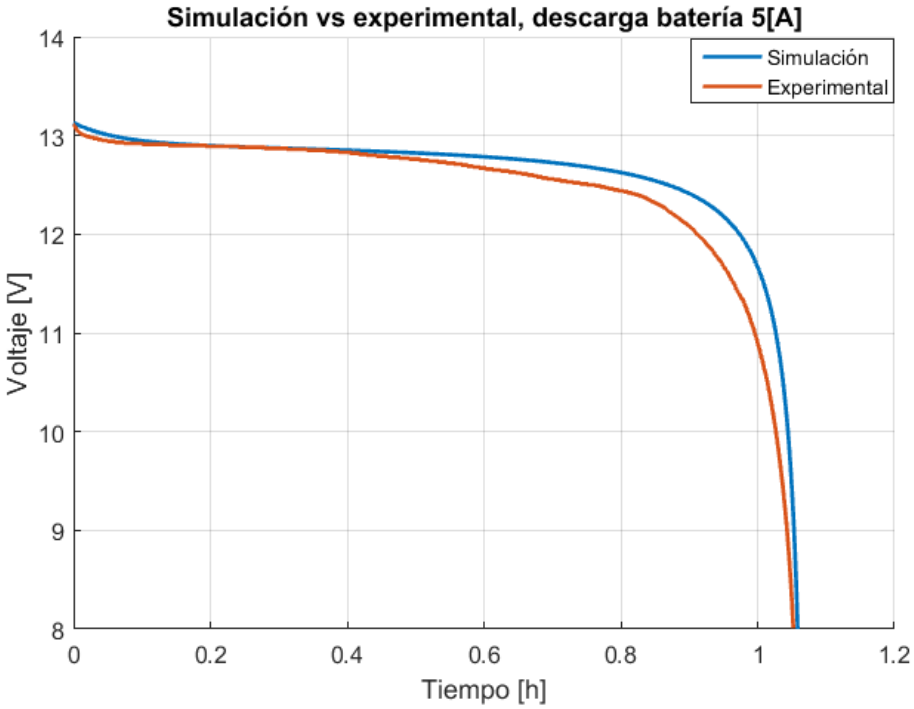


Figura 4.10: Simulacion vs experimental, descarga batería 5[A]

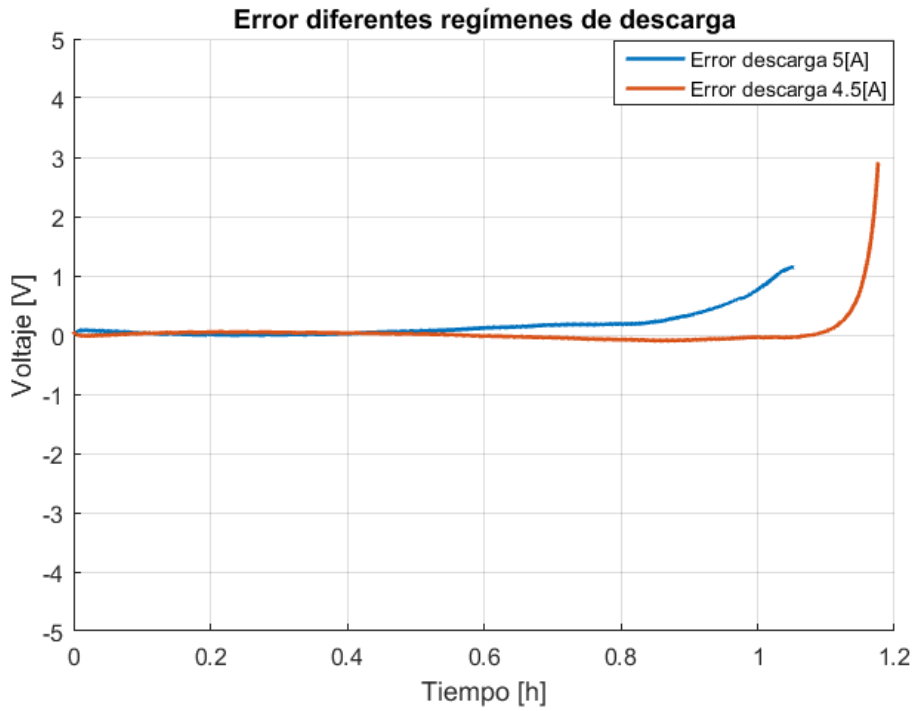


Figura 4.11: Error diferentes regímenes de descarga

El error presente en las figuras 4.9 y 4.10 se aprecia directamente en la figura 4.11.

A partir de la figura 4.11, es posible realizar un cuadro comparativo con la suma en el tiempo de este error 4.2.

Cuadro 4.2: Error de descarga

Corriente	Error	Error porcentual %
5[A]	0.0151	1.5098
4.5[A]	0.0040	0.4031

Capítulo 5

Conclusiones, comentarios y trabajo a futuro

Un proyecto de estas características deja diferentes aprendizajes y resultados. En este capítulo, se dará a conocer las conclusiones realizadas en este trabajo de título junto a los comentarios pertinentes y finalmente el desarrollo a futuro que se podría realizar siguiendo la misma línea investigadora.

5.1. Conclusiones

El modelo de Shepperd describe de buena forma el comportamiento de las baterías, sin embargo, existen diferentes formas de determinar los parámetros pertinentes a este como por ejemplo, hacer una relación entre dos curvas experimentales o estimar a partir de diferentes puntos de una curva experimental. Por tanto, no existe una forma única para estimar un modelo que se ajuste de forma precisa a la batería estudiada.

Mediante el análisis de sensibilidad realizado en la sección 2.3, el entendimiento del modelo fue llevado a su punto máximo, esto sirvió directamente para el ajuste de parámetros al tener la noción de cómo estos afectaban.

El software PLECS, permitió una sencilla implementación del modelo y ajuste de parámetros, la librería C-script fue fundamental para la correcta implementación. Es una herramienta sumamente útil para estos tipos de modelos.

Al realizar los experimentos, se vieron diferentes soluciones para la obtención de datos, es necesario destacar en este punto que se optó por la opción más sencilla de implementar, pero está no permitió una automatización de los experimentos.

La implementación obtenida, es bastante sencilla y a diferencia de otros modelos ya existentes en PLECS, esta posee ventajas al necesitar una cantidad menor de datos para su funcionamiento. Éste modelo no toma en cuenta variables como temperatura o presión, sin embargo, es útil como punto de partida para cualquier proyecto considerando que ciertos datos se desconocen a la hora de simular por primera vez un proyecto.

Mediante este proyecto se obtuvieron datos inexistentes, 7 operaciones de carga y descarga, con lo cual se espera idear algún algoritmo de ajuste en el futuro.

El modelo obtenido se comportó de manera adecuada, esto se aprecia directamente en las comparaciones realizadas entre las diferentes curvas en el capítulo 4. Se determinó posteriormente los errores entre el modelo y lo experimental esto expuesto en las tablas 4.1 y 4.2. Se aprecia que como error máximo, se obtiene un error de 2.5 % considerando diferentes niveles de carga y descarga. Este error es posible atribuirlo a la resistencia interna, de ésta no se tenía información pertinente por tanto se debió ajustar el valor de forma experimental. Además notar que la dinámica de las baterías no son del todo fiables, es decir, presentan ciertas singularidades debido a los procesos químicos internos de estas, lo anterior hace que los modelos no se ajusten perfectamente. Sin embargo, un modelo con el error expuesto anteriormente sirve de correcta forma para aplicaciones donde se requiera una simulación de un modelo en tiempo real del sistema BESS con un error relativamente bajo.

5.2. Comentarios

Es imperante mejorar los modelos existentes de los sistemas en general, con mejoras mínimas de estos es posible aumentar la eficiencia lo cual contribuye directamente en una mejora energética.

La implementación de este modelo resulto exitosa. Esto quedó demostrado con diferentes pruebas que se hicieron sobre otras baterías, es decir, con otros parámetros y este respondió de manera correcta.

Diferentes proyectos se llevaron a cabo en el sector de trabajo donde se realizó este proyecto, entre estos se realizó un proyecto con super capacitores, es necesario mencionar la cooperación que hubo para la utilización y puesta en marcha de los equipos de medición y fuentes utilizadas.

En este estudio se vieron diferentes modelos de baterías, algunos de estos presentaban dinámicas interesantes, pero el estudio no se pudo llevar a cabo debido a limitaciones mayoritariamente en la disponibilidad de equipamiento adecuado. Seria interesante contar en un futuro con un espectroscopio ademas de otros equipos de medición, lo anterior para realizar una mayor cantidad de pruebas. Como por ejemplo medir la impedancia interna de ésta, junto a otras variables útiles como la temperatura o presión. Sin embargo, cabe notar que los modelos obtenidos se ajustan muy bien a los datos experimentales.

Los experimentos realizados estaban en el rango de horas de descarga y carga, esto limitó el número de experimentos al no tener disponibilidad completa de los equipos, por otro lado el marco en que se encuentra este proyecto es limitado en tiempo. Además se sugiere obtener equipos que automaticen estas mediciones debido a que en general fueron realizadas de forma manual.

5.3. Trabajo a futuro

Posibles trabajos a futuro se describen a continuación:

1. Es posible a partir de realimentación y minimizando el error poder encontrar una resistencia que se adecue tanto a esta batería en particular como a baterías en general, esto teniendo curvas experimentales de carga y descarga al mismo régimen de corriente.

2. Seria interesante la implementación de este modelo con diferentes baterías y poder usarlo para modelar sistemas complejos es decir de orden mayor como queda expuesto en la figura 2.2.

3. Realizar una discretizacion o un algoritmo robustos que permita a partir de la característica de la curva poder obtener el SOC, esta idea se aprecia en la figura 2.1.

4. Obtener un modelo que permita conectar baterías en serie y verificar sus curvas de carga y descarga, realizando un trabajo similar al expuesto en este trabajo.

5. Obtener caracterización del SOH, de la batería estudiada. Sin embargo se necesita equipamiento no disponible en el centro AC3E.

Bibliografía

[1] C. W. Gellings, *"The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities"*, in Proceedings of the IEEE, vol. 73, no. 10, pp. 1468-1470, Oct. 1985.

[2] *"Renewables 2014 global status report"*, 2014, http://www.ren21.net/

[3] Samir Kouro, Bin Wu, Haitham Abu-Rub and Frede Blaabjerg *"Photovoltaic Energy Conversion Systems"*, 2014, Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, First Edition.

[4] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia and F. Jurado *"Fuel cell-battery hybrid system integrating two DC/DC converters for transport applications"*, 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, 2009, pp. 139-143.

[5] A. A. Hussein, N. Kutkut, Z. J. Shen and I. Batarseh *"Distributed Battery Micro-Storage Systems Design and Operation in a Deregulated Electricity Market"*, in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 3, pp. 545-556, July 2012.

[6] G. Spagnuolo et al *"Renewable Energy Operation and Conversion Schemes: A Summary of Discussions During the Seminar on Renewable Energy Systems"*, in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, no. 1, pp. 38-51, March 2010.

[7] R. Hebner, J. Beno and A. Walls, *"Flywheel batteries come around again"*, in IEEE Spectrum, vol. 39, no. 4, pp. 46-51, Apr 2002.

[8] R. Boom and H. Peterson, *"Superconductive energy storage for power systems"* in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 8, no. 3, pp. 701-703, Sep 1972.

[9] Jukka Lassila, Juha Haakana, Ville Tikka, Jarmo Partanen, *"Methodology to Analyze the Economic Effects of Electric Cars as Energy Storages"*, Smart Grid IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 506-516, 2012, ISSN 1949-3053.

[10] A. Oudalov, R. Cherkaoui and A. Beguin, *"Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application "* 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, 2007, pp. 621-625.

[11] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler and G. Linhofer, *"Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems"*, 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, 2006, pp. 2206-2211.

[12] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo and J. M. Carrasco, (1997), *"Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications"*, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, Dec. 2010.

[13] A. Oudalov, T. Buehler and D. Chartouni, *"Utility Scale Applications of Energy Storage"*, 2008 IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, 2008, pp. 1-7.

[14] D. Anseán, M. González, J. C. Viera, J. C. Álvarez, C. Blanco and V. M. García, *"Evaluation of LiFePO4 batteries for Electric Vehicle applications"*, 2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), Gijon, 2013, pp. 1-8.

[15] F. Hoffart, *"Proper Care Extends Li-Ion Battery Life"* in Power Electronics Technology, April 2008.

[16] Min Chen and G. A. Rincon-Mora, *"Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance"* in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, June 2006.

[17] N. Kularatna,*"Dynamics and modeling of rechargeable batteries: What electrochemists' work tells the electronic engineers"* Power Electronics Magazine, IEEE, vol. 1, no. 4, pp. 23–33, Dec 2014

[18] H. Rahimi-Eichi, F. Baronti, and M. Y. Chow, *"Online adaptive parameter identification and state-of-charge coestimation for lithium-polymer battery cells"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 4, pp. 2053–2061, April 2014.

[19] Norlela Ishak, Nuzaihan Mhd. Yusof, Mohd. Hezri Fazalul Rahiman, Ramli Adnan, Mazidah Tajudin, *"Identification using fractional-order model: An application overview"* Control System Computing and Engineering (ICCSCE) 2014 IEEE International Conference on, pp. 668-673, 2014.

[20] S. Yuan, H. Wu, X. Zhang and C. Yin, *"Online Estimation of Electrochemical Impedance Spectra for Lithium-Ion Batteries via Discrete Fractional Order Model"* 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Beijing, 2013, pp. 1-6.

[21] Munadir Ahmed, *"Modeling Lithium-ion Battery Chargers in PLECS"*,Plexim Inc.

[22] A. Jossen, *"Fundamentals of battery dynamics"*, Journal of Power Sources Volume 154, Issue 2, 21 March 2006, Pages 530–538

[23] Battery tender, http://www.batterytender.com/

[24] Software fuente BK-MDL001, http://www.bkprecision.com/

[25] Software Power Log, http://en-us.fluke.com/support/software-downloads/fluke-powerlog-classic-application-software.html

[26] C. M. Shepherd1,*"Design of Primary and Secondary Cells II . An Equation Describing Battery Discharge"*, Manuscript received February 4, 1965.

[27] O. Tremblay, L. A. Dessaint and A. I. Dekkiche, *"A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles"*, 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, TX, 2007, pp. 284-289.

Apéndice A

C-scpript, Plecs

Bloque C-scipt utilzado, para implemtacion modelo de carga y descarga. Code declarations:

```
#include <math.h>

#define it Input(0)
#define Vbatt Output(0)
#define Vfull ParamRealData(0,0)
#define Vexp ParamRealData(1,0)
#define Vnorm ParamRealData(2,0)
#define Qexp ParamRealData(3,0)
#define Qnorm ParamRealData(4,0)
#define Q ParamRealData(5,0)
#define R ParamRealData(6,0)
#define I ParamRealData(7,0)

static double A;
static double B;
static double K;
static double E0;
```

Start Function:

```
A=Vfull-Vexp;
B=3/Qexp;
K=((Vfull-Vnorm+A*(exp(-B*Qnorm)-1)*(Q-Qnorm))/Qnorm);
E0= Vfull+K+R*I-A;
```

Output Function (descarga):

```
Vbatt= E0-K*(Q/(Q-it))*(it)+A*exp(-B*it);
```

Output Function (carga):

```
1  Vbatt= E0-K*(Q/(Q-it))*(it)+A*exp(-B*it)-K*(Q/(it-0.001*Q))*(ir) ;
```

Apéndice B

Datos batería

Los siguientes datos fueron obtenidos de [23].

12V, 360 LCA Lithium Engine Start Battery

PN: BTL24A360C

Deltran Battery Tender's® line of Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) engine start batteries are designed to replace Flooded, AGM, and Gel cell lead acid batteries in Power Sport applications such as Motorcycles, ATVs, Personal Water Craft, Lawn Mowers, Utility Vehicles, Scooters, and Dirt Bikes.

At this time, batteries can only be shipped ground. Any other shipping options selected at checkout will not be honored.

Features:
Voltage: 12V
Lithium Cranking Amps: 360
Lead-Acid Replacement Range: 21-24(Ah)
Case Dimensions: 6.49 (165mm) length x 3.38 (86mm) width x 5.11 (130mm) height
Operating Temp: 40 - 140°(F)
Weight: 2.6 lbs
Warranty: 3 Years - Limited*
Max Charge Rate: 10A
Agency Approvals: CE, UN 38.3

18 month Shelf Life
Up to 80 % lighter than Lead Acid Equivalent
5X the Life of a Lead Acid Battery
Quad Terminal Configuration for ease of installation

2000+ Cycles at 80 % Depth of Discharge
Can be mounted in any direction
Lithium Batteries do not sulphate