



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

”SISTEMA DE MONITOREO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN
DISPOSITIVOS MECATRÓNICOS”

AUTOR: DANNY PAÚL ORTIZ REVELO

DIRECTORA: LUZ MARÍA TOBAR SUBÍA CONTENTO

IBARRA-ECUADOR

JUNIO 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el *Repositorio Digital Institucional*, la cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401765540		
APELLIDOS Y NOMBRES:	DANNY PAÚL ORTIZ REVELO		
DIRECCIÓN:	IBARRA		
EMAIL:	ortiz_danny_@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO:	-----	TELÉFONO MÓVIL:	0998253717
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	"SISTEMA DE MONITOREO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN DISPOSITIVOS MECATRÓNICOS"		
AUTOR:	DANNY PAUL ORTIZ REVELO		
FECHA:	15-06-2021		
PROGRAMA:	PREGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA		
ASESOR/DIRECTOR:	LUZ MARÍA TOBAR SUBIA C.		

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 15 días del mes de junio de 2021.



Dany Paul Ortiz Revelo
C.I.: 0401765540



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado "SISTEMA DE MONITOREO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN DISPOSITIVOS MECATRÓNICOS", presentado por el egresado DANNY PAÚL ORTIZ REVELO, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 15 Junio de 2021

Luz María Tobar Subia Contenido
DIRECTOR DE TESIS

Agradecimiento

En primer lugar quiero agradecer a mi tutora la ingeniera Luz María Tobar Subía Contenido, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. A mis asesores Ivan Iglesias y Xavier Rosero quienes se predispusieron a revisar, guiar y ayudarme a solucionar problemas que ocurrieron en el desarrollo de este trabajo de grado.

También quiero agradecer a la Universidad Técnica del Norte y a su personal administrativo en especial a Mery Paez por brindarme todos los recursos y herramientas. No hubiese podido arribar a estos resultados, de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros, compañeras y amigos del Club de Robótica UTN por apoyarme y confiar en mis habilidades.

Muchas gracias a todos.

Danny Paúl Ortiz Revelo

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado a todas las personas que me supieron entregar su tiempo para ser un apoyo y enseñarme que en esta vida no me encuentro solo.

A Dios que siempre fue mi soporte espiritual y jamás permitió que caiga en momentos de dificultad.

A mis padres por brindarme todo lo necesario para lograr obtener este título, de manera especial a mi padre que me formo con la mejor de las lecciones de vida, quitarme el miedo a preguntar, pues al hacerlo encontraría una respuesta a mi favor y en el peor de los asuntos un no, que me afectaría en nada.

A mis hermanos Jorge y Alex, que me enseñaron que el sacrificio y la tenacidad son los pilares fundamentales para no desahuciarse mientras se persiguen nuestros sueños.

A toda mi familia que siempre encuentro en ellos cariño, sonrisas, fortaleza y comprensión, gracias tias, tios, primos, primas por su aliento que en todo momento fue indispensable y alentador.

Danny Paúl Ortiz Revelo

Resumen

En el presente trabajo de grado se detalla la importancia de elegir una fuente de energía que sea acorde a las características del sistema embebido, más aun cuando el sistema embebido esta direccionado a investigaciones de salud o dispositivos biomédicos móviles. Las baterías juegan un papel importante en el correcto funcionamiento del mismo. En el capitulo uno, se presenta un estudio sobre el funcionamiento de las baterías comerciales y sus fases de carga y descarga.

A continuación, en el capítulo dos se comparan los modelos matemáticos, con la finalidad de elegir el más adecuado para la simulación y se diseña el sistema energético.

En el capítulo tres se implementan las condiciones del medio ambiente del sistema y en el capítulo cuatro se simula el sistema embebido y su fuente de energía.

Como aporte de este trabajo, se implementa un algoritmo que a partir de conocer su voltaje y amperaje se determinen el Estado de carga (SOC por sus siglas en inglés), el cual se aplica al sistema embebido.

Como resultado de las pruebas, se obtuvo un margen de error del 8,2%, respecto al valor del SOC determinado por la simulación de la batería.

Finalmente, se concluye que el sistema simulado determina la vida útil de la batería de acuerdo a las características del dispositivo mecatrónico.

Abstract

This degree work details the importance of choosing a power source that is in accordance with the characteristics of the embedded system. Even more, when the embedded system is aimed at health research or mobile biomedical devices. Batteries play an important role in the correct functioning of the system.

In chapter one, a study of the commercial batteries operation and their charging and discharging phases is presented.

To next, in chapter two, the mathematical models are compared in order to choose the most suitable one for the simulation and the energy system is designed.

Chapter three implements the environmental conditions of the system and chapter four simulates the embedded system and its energy source.

As a contribution of this work, an algorithm is implemented to determine the State of Charge (SOC) based on the voltage and amperage, which is applied to the embedded system.

The main outcome of the study is an error margin of 8.2% was obtained with respect to the SOC value determined by the battery simulation.

Finally, it is concluded that the simulated system determines the useful battery life according to the mechatronic device characteristics.

Introducción

Hoy en día la portabilidad de los dispositivos es más exigente, las baterías tienen que abastecer a los dispositivos por más tiempo y con mayor fiabilidad en la entrega óptima de energía eléctrica. Los sistemas de carga y monitoreo permiten alargar la vida útil del dispositivo que energiza la batería, de este modo cuando la batería haya perdido su capacidad de carga, se podrá realizar un mantenimiento preventivo de la batería o reemplazándola totalmente.

El trabajo de final de carrera pretende ser un estudio de carácter general de las baterías, y más en concreto de métodos de estimación de vida útil de las baterías. En la sociedad que vivimos, cada vez más dependemos de la energía eléctrica para la mayoría de actividades que desarrollamos a diario, y para estas actividades no son posibles si no tenemos una fuente de tensión o una batería que alimente nuestros dispositivos. Así por ejemplo al utilizar nuestros smartwatches, nuestros teléfonos móviles, nuestras tabletas, computadores, entre otros. El mayor desafío que tiene que afrontar los fabricantes está relacionado con la alimentación de los mismos por medio de baterías.

Además, la gran importancia que tiene saber el estado de carga de las baterías en cualquier punto de su curva de descarga es que, así, se puede preservar y proteger tanto las mismas baterías como los circuitos y equipos que los usan.

Objetivos

El objetivo principal es simular un sistema de monitoreo energético que analice funcionalidad y estado de baterías. Los siguientes objetivos específicos son:

- Definir alternativas de hardware y software para mejorar la eficiencia de las baterías en dispositivos.
- Diseñar un sistema de monitoreo .
- Simular un sistema que monitorice la condición de la batería para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo al que alimenta.

Antecedentes

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el informe “El papel de los dispositivos médicos en la Cobertura de Salud Universal (CSU) y el de Objetivos de Desarrollo Sostenible”, uno de los aspectos técnicos relevantes es el nivel de energía que suministran las baterías a los dispositivos médicos y favorecen la portabilidad (a un alto costo de producción). Por ejemplo, las normas internacionales ISO 13849-1, Parte 1, exigen que las baterías de los desfibriladores portátiles sean capaces de funcionar a temperaturas muy bajas, incluso a -10°C . ¿Qué sucedería si las baterías de estos dispositivos no abastecen la energía suficiente para que funcione correctamente? Esta falla del suministro energético generaría mediciones de signos vitales erróneas y falsos negativos. Por lo tanto, cuando se usen los dispositivos de medición para investigaciones, no se obtendría los resultados esperados debido a esta falla de suministro de energía [1]. Análisis han demostrado que la mayoría de los problemas en dispositivos médicos están relacionados con fallas inesperadas de las baterías. La vida de la batería es impredecible y existen muchas características que van afectando su funcionamiento, como el tipo de celda, la frecuencia de uso, las curvas de carga y descarga y la edad. Un mantenimiento de las baterías puede requerir mucha mano de obra y ser costosos cuando se realizan correctamente. Si se pasan por alto, pueden poner en riesgo la calidad de rendimiento del dispositivo médico [2]. Para asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos se debe realizar una constante medición de sus propiedades eléctricas como el voltaje y amperaje para que la funcionalidad del dispositivo sea la adecuada. Según la OMS en su reporte de la gestión de la discordancia en el proyecto “dispositivos médicos prioritarios” menciona que los problemas de mantenimiento es uno de los principales motivos porque un dispositivo médico se coloca fuera de servicio.

En base a lo anterior, se pretende construir un sistema para monitorear estos valores con la finalidad de conocer su tiempo de uso máximo, los ciclos de carga que posee el dispositivo y conocer sus niveles de voltaje y amperaje [3] .

Justificación

Al desarrollar este proyecto se aprovechará los recursos y talento humano local, alineando a la política del gobierno a través de la investigación, generación y beneficio del conocimiento con finalidad social y productiva [4].

Este análisis servirá para que la capacidad de potencia proporcionada por una batería sea la adecuada y su índice de reducción no disminuya rápidamente.

Con el monitoreo de las baterías se conocerá el tiempo de uso entre cada recarga obteniendo un patrón de comportamiento de la batería. Alargando su vida útil y permitir que el dispositivo al que alimenta tenga un correcto funcionamiento.

Alcance

En este trabajo de grado se presentará una solución que monitorice la vida útil de la batería de un dispositivo de medición que pertenece al Grupo de Investigación de Sistemas Inteligentes de la Universidad Técnica del Norte. Monitorizar constantemente su voltaje y amperaje mientras se usa el dispositivo para garantizar que el suministro energético es el adecuado. A partir de estos datos generar históricos de usabilidad dando a conocer si es necesario el reemplazo de la batería o no. Se analizará una batería accesible y de uso común para estos dispositivos.

Estructura del documento

El documento está conformado por cuatro capítulos y un apéndice.

El Capítulo 1 presenta el estado del arte y en él se realiza una breve definición de los tipos de baterías y los tipos de carga, de igual manera se abarcara a los algoritmos de monitoreo.

El Capítulo 2 tiene una comparativa de sistemas energéticos. En este capítulo se seleccionará que algoritmo es el más idóneo para sistemas de monitoreo de baterías al igual del tipo de batería que se usará en el dispositivo mecatrónico.

En el Capítulo 3 se desarrolla la implementación del algoritmo que estimará la vida útil de la batería.

El Capítulo 4 se prueba el sistema y se obtienen los primeros datos. Además, se explica el análisis de rendimiento.

Finalmente, el apéndice muestra el hardware, el código implementado.

Índice general

Índice general	XVI
Índice de figuras	XIX
Índice de cuadros	XXI
1. Marco Teórico	1
1.1. Revisión Literaria	1
1.2. Baterías	3
1.3. Tipos de baterías	5
1.3.1. Litio	5
1.3.2. Níquel cadmio (Ni-Cd)	7
1.3.3. Hidruro metálico de níquel (Ni-MH)	7
1.3.4. Recargable alcalino:	7
1.3.5. Polímero de litio:	8
1.4. Propiedades de las baterías	8
1.5. Características no lineales	8
1.5.1. Nivel de corte	9
1.5.2. Efecto de recuperación	9
1.5.3. Efecto de la tasa de capacidad	11
1.5.4. Capacidad de la batería	12
1.6. Algoritmos de estimación vida útil	12

1.6.1.	Modelos Matemáticos	13
1.6.1.1.	Modelo Linear	13
1.6.1.2.	Modelo de Lei de Peukert	13
1.6.1.3.	Estimate Model Parameters Per Experiment	15
1.6.1.4.	Modelo de Rakhmatov-Vrudhula	15
2.	Metodología	18
2.1.	Comparación de modelos	18
2.2.	Diseño del sistema	20
3.	Implementación del sistema de monitoreo del nivel de batería	23
3.1.	Sección de simulación de batería	23
3.2.	Sección de implementación del algoritmo de estimación de parámetros	25
3.3.	Sección de estimación de duración de la batería	25
3.4.	Sección de visualización de resultados	26
4.	Pruebas y análisis de resultados	28
4.1.	Caracterización de la batería a simular	28
4.2.	Configuración Matlab	29
4.2.1.	Configuración de las variables en la batería	29
4.2.1.1.	Configuración de los datos de la batería	30
4.2.1.2.	Configuración de la carga	32
4.2.2.	Configuración del límite de SOC para simular	32
4.2.3.	Ajuste de variables del algoritmo de SOC	34
4.2.4.	Simulación del sistema desde 100% hasta el 20%	36
4.2.5.	Determinación del error de la simulación desde el 100% hasta el 20%	37
4.2.5.1.	Error Absoluto	37
4.2.5.2.	Error Relativo	37
4.2.6.	Simulación del sistema desde 20% hasta el 0%	38

4.2.7.	Determinacion del error de la simulacion desde el 20% hasta el 0% . . .	39
4.2.7.1.	Error Absoluto	39
4.2.7.2.	Error Relativo	39

Bibliografía		43
---------------------	--	-----------

Índice de figuras

1.1. Esquema de una celda electroquímica.	4
1.2. Comparación de la densidad volumétrica y peso de diferentes materiales de baterías.	6
1.3. Esquema de una celda electroquímica.	10
1.4. Ejemplo de un perfil de descarga racionalmente constante.	14
2.1. Diagrama de Bloques del modelo de estimación de parámetros.	20
2.2. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.	22
3.1. Variables de estado inicial de la batería.	24
3.2. Diagrama de bloques algoritmo de estimación de SOC.	25
3.3. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.	26
3.4. En morado, área de visualización de datos.	27
4.1. En azul, bloques de batería y carga	30
4.2. Panel de configuración del bloque de batería	31
4.3. Panel de configuración del bloque de batería	31
4.4. Panel de configuración del bloque de carga	32
4.5. En rosa, subsistema de configuración de SOC para simular.	33
4.6. En rojo, bloque del relé.	33
4.7. Configuración del relé de la simulación.	34
4.8. Sistema de simulación de batería, en azul subsistema <i>AlgoritmoSOC</i>	34

4.9. Configuración del bloque integral para la determinación del SOC.	35
4.10. Configuración del bloque de ganancia.	35
4.11. Resultados de la simulación.	36
4.12. Configuración de batería al 20%.	38
4.13. Configuración de paro de cronómetro de simulación.	39
4.14. Screenshot del video demostrativo	55

Índice de cuadros

2.1. Algoritmos de determinación de SOC	19
---	----

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Revisión Literaria

Las baterías están dentro de nuestras vidas cotidianas desde su invención en el siglo XIX y su venta al público en el XX. Smartwatches, teléfonos móviles, tabletas, computadores, bicicletas eléctricas, marca pasos, vehículos eléctricos y más artefactos contemporáneos utilizan baterías como suministro energético, por lo que se fabrican en diversas tamaños y voltajes. Las baterías son una de las primeras tecnologías en el campo de almacenamiento de energía. Una batería consta de varias celdas que se llaman células electroquímicas, están formadas de ánodo, cátodo y electrolito. El proceso consiste en fluir electrones del cátodo al ánodo y iones del ánodo al cátodo a través de la celda electrolítica.

El ciclo de vida corto de la mayoría de las baterías las ha convertido en un riesgo ambiental bastante alto, contaminando agua y suelos, ya que al finalizar su ciclo de vida no pueden volverse a recargar ni a reusarse y por estos motivos son desechadas. Las toxinas emanadas por las baterías son vertidas directamente al medio ambiente alterando su composición y su pH. En el sector médico su uso es muy importante, permiten la portabilidad de instrumentos como desfibriladores, medidores de pulso cardiaco, presión arterial. Para poder dar la energía suficiente estos equipos usan baterías que alimentan su sistema en emergencias fuera de los hospitales e incluso lejos de una ambulancia.

Los tipos comunes de baterías utilizadas son de celda seca, Ni-MH (hidruro de níquel-metal), iones de litio, polímero de litio y de plomo ácido. Estas se clasifican en primarias y secundarias. Las baterías primarias son las que pueden cargarse solo una vez y se debe desechar después del drenaje completo de su capacidad. Pero la batería secundaria puede ser recargada una y otra vez. El número de carga y descarga que se puede hacer en una batería se llama ciclo de vida de una batería. Los parámetros importantes de las baterías son el estado de carga. (SoC), estado de descarga (SoD), voltaje, corriente, potencia, densidad de energía, etc. La capacidad de una batería es expresada como

$$Q = I * t \quad (1.1)$$

Donde I = Corriente y t = tiempo de carga / descarga.

Una de las formas de realizar la predicción de la duración de la batería es desde experimentos físicos. Sin embargo, dependiendo del tipo de aplicación (por ejemplo, una red de sensores que generalmente está compuesta por miles de dispositivos), esta opción se vuelve económicamente inviable, debido al alto costo de estos dispositivos, además de alto costo de implementación y gestión. Otra forma, es de lapso de modelos matemáticos que representan adecuadamente el proceso, es decir, que describen la descarga de energía del sistema. Considerando este escenario, diferente. Los modelos de batería se han desarrollado a lo largo de los años. Entre ellos, algunos de los a los que se hace referencia en la literatura son: el modelo lineal, que considera solo las corrientes de descargas constantes en el tiempo y la Ley de Peukert, que considera el promedio de corrientes, lo que resulta en vidas muy cercanas a las vidas obtenidas del modelo lineal. Por otro lado, el uso de modelos lineales no permite se hacen aproximaciones apropiadas, especialmente cuando se consideran los aspectos físicos de las operaciones de descarga de la batería. Una operación de descarga es compuesta de un perfil que se puede definir como el conjunto de operaciones que un gerente el dispositivo terminado puede funcionar en un cierto intervalo de tiempo. Por ejemplo, un sensor puede recibir y transmitir información; recibir dicha información tiene una tarifa tasa de consumo diferente de la tasa de transmisión. Estudios recientes sobre baterías han revelado que las tasas de descarga son no lineales en el tiempo y depende de la capacidad residual de la batería (es decir, efecto de la tasa de capacidad), es decir, para

diferentes perfiles de descarga se varia la vida útil en cada uno de ellos, por lo que la capacidad efectiva de la batería no siempre será la misma. Además, en períodos de inactividad (es decir, cuando la corriente de descargase reduce significativamente o incluso es nulo), hay un efecto sutil pero importante de recuperación, que puede recuperar la capacidad de la batería. Además, de los modelos lineales, hay modelos electroquímicos, que consideran estas características no lineales y se consideran más precisas en relación con los modelos lineal, sin embargo, porque tienen una descripción detallada de los procesos electroquímicos que ocurrir en la batería durante el período de descarga, requiere un conjunto significativo de datos experimentales, lo que hace que estos modelos sean complejos y difíciles de implementar. También hay modelos más simples en relación con los modelos electroquímicos, que también considere las características no lineales, agregando precisión y facilidad de implementación ejemplos de esta clase son algunos modelos analíticos, donde los principales. Las propiedades de la batería se modelan a partir de un conjunto de ecuaciones diferenciales, el modelo Rakhmatov-Vrudha es uno de ellos que, además de considerar las características no lineales, tiene una implementación fácil agregada a un buen nivel de precisión. Dicho todo esto, es importante resaltar que el uso de modelos matemáticos sirve para obtener buena precisión, son fáciles de implementar con un bajo costo computacional, adquiere una importancia significativa en el reemplazo de experimentos conocimiento físico. Sin embargo, es de vital importancia que se utilice el modelo matemático considerar, entre otras características, las no linealidades de estos eventos (es decir, el efecto de recuperación y efecto de la tasa de capacidad) y sus efectos sobre la capacidad de la batería, particularmente especialmente cuando el objetivo final es predecir su vida útil. Entonces este trabajo presentará un estudio comparativo de los modelos analíticos utilizados para realizar la predicción de la vida útil de las baterías que alimentan los dispositivos móviles.

1.2. Baterías

Una batería esta formada de una o más celdas electroquímicas, conectadas en serie ya sea en paralelo o mediante una combinación de ambos. En estas células la energía la química al-

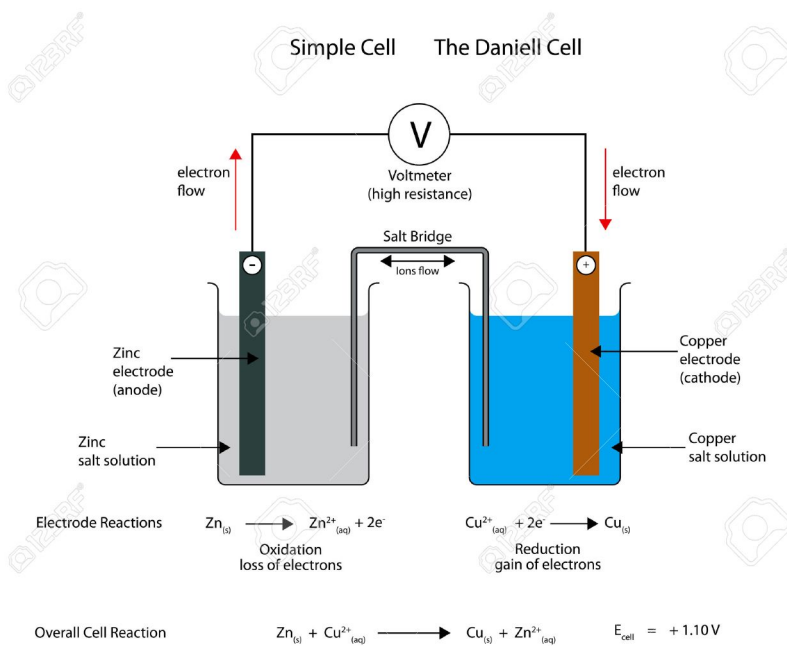


Figura 1.1: Esquema de una celda electroquímica.

Fuente: [7].

macenada se convierte en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas. La figura 1.1 muestra el esquema de una celda electroquímica, donde cada celda está formado por dos electrodos, un ánodo que tiene polaridad negativa y un cátodo que tiene polaridad positiva, separada por un electrolito. Durante la fase de descarga (es decir, cuando la batería suministra energía eléctrica a un circuito externo) el ánodo se libera electrones en el circuito, mientras que el cátodo recibe electrones del circuito. En la carga de la batería, los procesos químicos se invierten. Los electrones se originan a partir de reacciones electroquímicas y se denominan especies electro activas[8].

1.3. Tipos de baterías

Esta sección describe las tecnologías de batería que se han desarrollado. En las últimas décadas para satisfacer la creciente demanda de baterías recargables más pequeño, más ligero y con mayor capacidad para dispositivos. Al comparar diferentes tecnologías de batería, surgen varias consideraciones. Estos incluyen densidad de energía (carga almacenada por unidad de peso de la batería) véase figura 1.2, ciclo de vida (el número de ciclos de carga / descarga antes de desechar la batería), impacto ambiental, seguridad, costo, suministro de voltaje disponible y características de carga / descarga.

1.3.1. Litio

Las baterías de litio son las más utilizadas en sistemas de energía actual y vehículos eléctricos. Las compuestas de iones de litio y polímero de litio se usan ampliamente en sistemas de energía portátiles y vehículos eléctricos debido a su alta capacidad de almacenamiento. Tienen características como alta densidad de energía, alta potencia y más ciclo de vida que otros tipos comunes. Las ventajas de las baterías de litio son:

1. Sellado células: no requiere mantenimiento

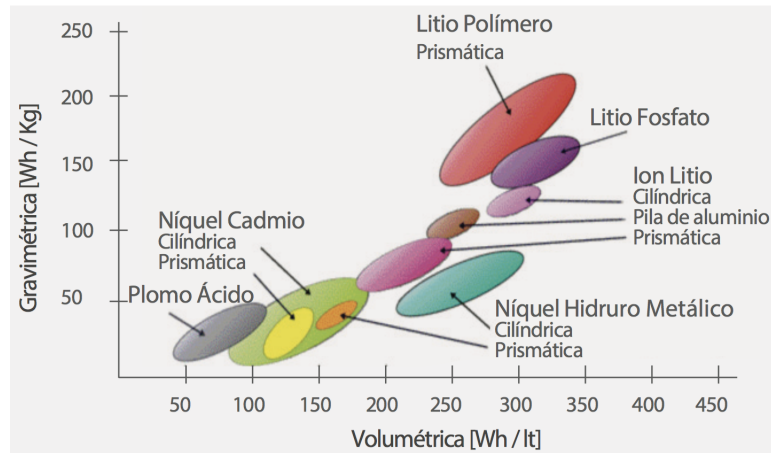


Figura 1.2: Comparación de la densidad volumétrica y peso de diferente materiales de baterías.

Fuente: [13].

2. Vida de ciclo largo
3. Amplio rango de temperatura de operación
4. Larga vida útil
5. Baja auto velocidad de descarga
6. Capacidad de carga rápida
7. Velocidad alta y alta capacidad de descarga de energía
8. Alta eficiencia energética
9. Energía específica alta y densidad de energía
10. No efecto memoria [6]

Las desventajas son su incapacidad para soportar corrientes más grandes, es decir, muchas veces más altas que su máxima capacidad de corriente. No puede soportar alto las temperaturas y el maltrato hacen que explote. La necesidad de tecnología de control de temperatura y corriente y voltaje. El circuito de control es el principal desafío en el caso del litio baterías. Uno de

los componentes cruciales de una batería de iones de litio es su sistema de gestión de batería (BMS). La tarea más trivial de un BMS está recopilando y monitoreando información sobre la batería condiciones de funcionamiento, a saber, voltaje, corriente y temperatura[5].

1.3.2. Níquel cadmio (Ni-Cd)

Esta es una tecnología consolidada y se ha utilizado con éxito durante varias décadas para desarrollar baterías recargables para electrodomésticos, electrónica portátil. Sus ventajas incluyen bajo costo y altas tasas de descarga. Aunque la tecnología Ni-Cd ha estado perdiendo terreno en los últimos años debido a su baja Densidad de energía y toxicidad, todavía se usa en aplicaciones de bajo costo, como radios portátiles y reproductores de CD.

1.3.3. Hidruro metálico de níquel (Ni-MH)

estas baterías se han utilizado ampliamente en años para alimentar computadoras portátiles. Tienen aproximadamente dos veces la densidad de energía de las baterías de Ni-Cd. Sin embargo, tienen un ciclo de vida más largo, son más caros y son ineficientes a altas tasas de descarga.

1.3.4. Recargable alcalino:

aunque se han utilizado pilas alcalinas desechable utilizado durante muchos años, la tecnología reutilizable de manganeso alcalino se desarrolló como una alternativa de bajo costo en la que se combinan la densidad de energía y el ciclo de vida prometido Aunque la densidad de energía inicial de las pilas alcalinas reutilizables es más alto que Ni-Cd, hay una disminución rápida en el ciclo de vida. Por ejemplo, después 10 ciclos, una reducción del 50 %, y después de 50 ciclos, una reducción del 75 % en la densidad de la energía es generalmente observada.

1.3.5. Polímero de litio:

esta tecnología emergente permite la fabricación de ultra-delgado (menos de 1 mm de grosor), y se espera que satisfaga las necesidades del próxima generación de computación y comunicación de dispositivos portátiles en relación con el tamaño y peso. Además, se espera que mejoren con respecto a la tecnología de iones de litio en términos de densidad energética y seguridad. Sin embargo, estas baterías tienen un alto costo de fabricación y enfrenta desafíos en la gestión térmica interna.

1.4. Propiedades de las baterías

Una batería tiene dos propiedades importantes, que son: (i) el voltaje medido en voltios (V); y (ii) capacidad, generalmente medida en amperios-hora (Ah). El producto de estas dos cantidades proporciona la cantidad de energía almacenada en la batería [9]. Por ejemplo, en teoría, una batería de 100 Ah está diseñada para suministrar 5 A por 20 horas o 100 A por 1 hora. Sin embargo, esta representación es teórica, en la práctica, generalmente la corriente de descarga no es constante en el tiempo, es decir la descarga tiene características no lineales, que influyen directamente en la vida útil de la batería. Estos efectos se describirán en la siguiente sección.

1.5. Características no lineales

Modelar el comportamiento de las baterías puede volverse complejo si se consideran. Se tienen en cuenta los efectos no lineales que ocurren durante el período de descarga. En el caso ideal, el voltaje permanece constante durante todo el período de descarga, llegando a cero cuando la batería está descargada. Idealmente, la capacidad sería constante para cualquier corriente de descarga, y que se utiliza toda la energía almacenada en la batería. Sin embargo, en un procedimiento de descarga de batería real, el voltaje se reduce lentamente durante la descarga y la capacidad efectiva se reduce para altas corrientes. Cabe señalar que, dependiendo del tipo de batería, estos efectos tienen mayores o menores consecuencias en su capacidad [10]. A conti-

nuación, se describen algunas características no lineales importantes presente en la descarga de una batería.

1.5.1. Nivel de corte

.El nivel de corte [11], Aunque no es un efecto no lineal, es un parámetro importante para entender el efecto de recuperación. Se puede definir como el valor límite menor carga (capacidad) donde la batería puede suministrar suficiente voltaje para que el dispositivo permanezca operativo. Cuando se alcanza este valor, la batería no está más capaz de suministrar energía al sistema debido a la imposibilidad de que ocurran reacciones electroquímicas En este momento, la batería no está completamente descargada, pero disponible, como se puede ver en la Figura 2.2 (E).

1.5.2. Efecto de recuperación

.La reorganización de los electrones se define por el efecto de recuperación de una batería [11]electrolito durante un período de relajación, es decir, un intervalo de tiempo en el que la corriente de descarga se reduce significativamente. En este intervalo los electrones se reorganizan de manera uniforme, para que el sistema recupere el equilibrio y el gradiente de con-la concentración es cero en el electrolito. Por lo tanto, la capacidad efectiva de la batería aumenta, porque hay una mayor cantidad de carga disponible antes de que el sistema alcance el nivel corte (es decir, cuando la batería está descargada). En la Figura 1.2, se muestran, en forma simplificada, las operaciones de una batería, donde el efecto de recuperación puede ser observado. En la Figura 1.2 (A), se puede ver que la batería está completamente cargada y la concentración de las especies electro-activas es constante a lo largo de la longitud del electrolito w . Cuando se inicia la descarga (Figura 1.2 (B)), se producen reacciones electroquímicas que resultan en reducción de especies electro-activas cercanas al electrodo, generando un gradiente de con-concentración de electrolitos Este gradiente de concentración provoca la difusión de especies electro activas hacia el electrodo. El momento en que la corriente de descargase reduce significativamente o es

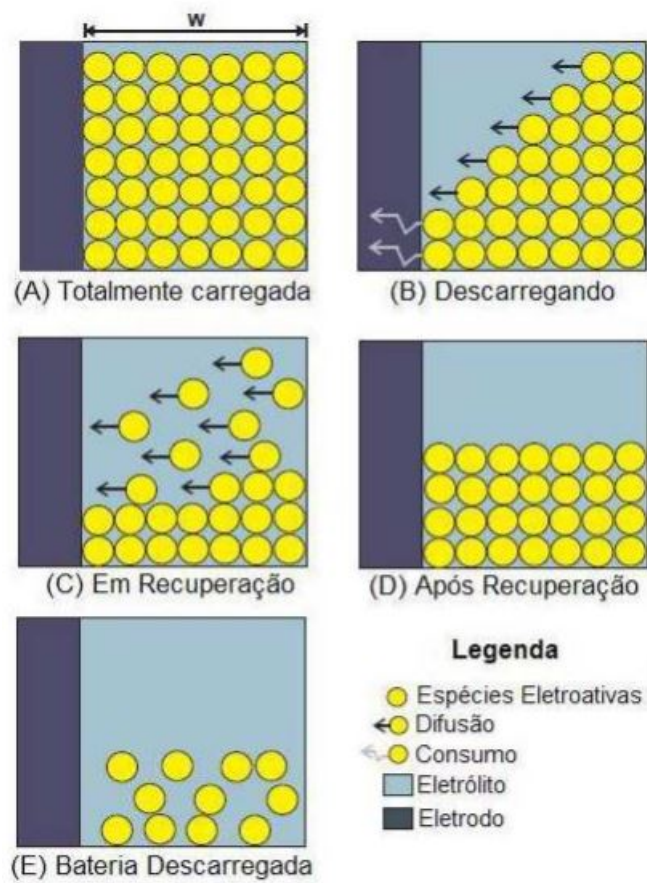


Figura 1.3: Esquema de uma celda electroquímica.

Fuente: [12].

nulo (es decir, dispositivo apagado), la batería está en un período de relajación (Figura 1.2 (C)), permitiendo que los electrones se reorganicen de manera uniforme, equilibrando el sistema. Por lo tanto, se genera un gradiente de concentración cero en el electrolito, lo que hace que haya más carga de superficie disponible electrodo, que ahora puede ser utilizado por el sistema, aumentando así la capacidad batería, como se puede ver en la Figura 1.2 (D). Sin embargo, se enfatiza que ella concentración de especies electro-activas en la superficie del electrodo será menor que la concentración tracción inicial A medida que disminuye la concentración en la superficie del electrodo, el voltaje La energía de la batería se reduce. Cuando el voltaje de la batería alcanza un límite por debajo del valor de corte (es decir, corte), las reacciones electroquímicas ya no pueden ocurrir y la batería se detiene suministrar energía al sistema. En este punto, la batería puede considerarse descargada, aunque todavía hay especies electro activas en el electrolito, como se puede ver en la Figura 1.2 (E). Para explicar mejor el efecto de recuperación, en el Capítulo 3, se presenta un informe resultado de simular la capacidad restante de una batería alcalina capturada por dos modelos analíticos: el modelo Rakhmatov-Vrudhula, que considera este efecto durante la descarga de la batería, y el modelo Lineal, que no considera, siendo posible, de este vea las consecuencias de este efecto en la vida útil de una batería.

1.5.3. Efecto de la tasa de capacidad

El efecto de la capacidad nominal [11] depende de la capacidad actual de la batería y la intensidad de la corriente de descarga, es decir, con una corriente de descarga alta a la capacidad efectiva de la batería es baja ya que no hay suficiente tiempo para la reorganización electrones en el electrolito (es decir, efecto de recuperación) y, por lo tanto, queda más carga sin ser utilizado por el sistema, reduciendo así la capacidad y la vida útil de la batería Ya con corrientes alternas, la capacidad efectiva de la batería aumenta, porque en el cambiar de una corriente alta a una corriente baja, o incluso un período sin corriente, se produce la reorganización de electrones en el electrolito, haciendo mayor cantidad de carga en la superficie del electrodo (es decir, efecto de recuperación), aumentando, por lo tanto, la capacidad efectiva de la batería. De esta manera, cuanto mayor sea la cantidad de carga (electrones) presentes en el electrolito en el momento

de relajación (es decir, reducción significativa de la carga de la cancelación actual), será posible recuperar más carga y, en consecuencia, estará disponible en la superficie del electrodo para uso del sistema. Se destaca que esta disponibilidad de carga en la superficie del electrodo nunca será mayor ni igual inicial.

1.5.4. Capacidad de la batería

La capacidad de una batería se especifica por la cantidad de materiales activos que contiene. Esta capacidad se puede expresar de tres maneras diferentes [11]:

1. Capacidad teórica: es un límite superior a la energía que se puede extraer en la práctica, estar basado en la cantidad de energía almacenada en la batería.
2. Capacidad estándar: es la energía que se puede extraer en condiciones específicas por el fabricante.
3. Capacidad actual: es la capacidad que puede superar la capacidad estándar, pero no puede exceder la capacidad teórica de una batería.

En esta disertación, el término capacidad se refiere a la capacidad actual de la batería. Conteniendo en cuenta las características y propiedades de una batería, su rendimiento en relación con el perfil de la corriente de descarga depende de dos efectos: (i) efecto de la tasa de capacidad, eso depende de la capacidad actual de la batería y de la intensidad de su corriente de descarga; (ii) efecto de recuperación, que depende de la recuperación de la capacidad durante los períodos inactivo, es decir, períodos en los que la corriente solicitada se reduce significativamente.

1.6. Algoritmos de estimación vida útil

En esta sección vamos a abordar cuatro métodos de estimación del ciclo de vida útil de una batería, de los cuales para realizar este trabajo de grado solo se abordará uno en cuestión.

1.6.1. Modelos Matemáticos

Entre los modelos matemáticos más concurridos al uso de estimación de la vida útil de la batería podemos encontrar 3 estimaciones:

1.6.1.1. Modelo Linear

Se eligió el modelo analítico lineal porque es un modelo simple y fácil de implementar, y por esta razón ampliamente utilizado y citado sin embargo, este modelo considera la batería como un contenedor de corriente lineal, sin considerar, de esta manera, los efectos no lineales que ocurren durante la descarga batería. Por lo tanto, los resultados encontrados al usar este modelo en la predicción de la vida útil la batería no es satisfactoria, ya que, como se vio en el capítulo anterior, las operaciones físicas, las características de descarga de la batería tienen características no lineales e influyen directamente en capacidad de la batería y, en consecuencia, su vida útil. El modelo lineal se describe mediante la ecuación.

$$C = C_0 - I \cdot t_d \quad (1.2)$$

que le permite calcular la capacidad restante C de una batería, donde C_0 es la capacidad al comienzo de la operación, I es la corriente de descarga constante durante la operación, y t_d es la duración de la corriente. La capacidad restante se calcula siempre que la corriente de descarga cambia. De esta manera, este modelo no es capaz de capturar el efecto de recuperación.

1.6.1.2. Modelo de Lei de Peukert

Otro modelo considerado simple para la predicción de la vida útil de la batería, que tiene en cuenta parte de sus propiedades no lineales, es la Ley de Peukert. Esta ley captura la relación no lineal entre la vida útil de la batería y la tasa de descarga, pero no considera el efecto de recuperación. De acuerdo con la Ley de Peukert, el (L) la duración de la batería puede ser aproximada por

$$L = \frac{a}{I^b} \quad (1.3)$$

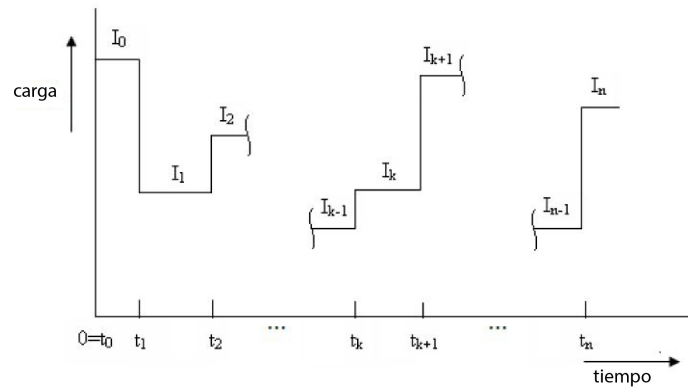


Figura 1.4: Ejemplo de un perfil de descarga racionalmente constante.

Fuente: [13].

donde I es la corriente de descarga, y a y b son parámetros que dependen de la batería y se obtienen de los experimentos. Idealmente, a debería ser igual a la capacidad de la batería y b sería igual a 1. Sin embargo, en la práctica, a tiene un valor cercano a la capacidad de la batería y b es un número mayor que 1. Estos parámetros deben estimarse utilizando alguna técnica de datos experimentales de la batería. Los resultados obtenidos al aplicar la Ley de Peukert para predecir la duración de la batería son razonablemente satisfactorios para cargas constantes y continuas. Pero el modelo no se demostró que fuera adecuado para cargas variables o interrumpidas. En [8], Rakhmatov-Vrudhula define un modelo que extiende la Ley de Peukert para cargas variables, donde I es reemplazado por el promedio de la corriente hasta un tiempo $t = L$. Para un perfil de descarga constante en sección, con puntos en el tiempo t_k , y los cambios en la corriente I_k , como se muestra en la Figura 1.4, la duración de la batería L viene dada por

$$L = \frac{a}{\left[\frac{\sum_{k=1}^n I_k (t_k - t_{k-1})}{L} \right]^b} \quad (1.4)$$

Para $n = 1$, la ecuación (1.4) se reduce a la ecuación (1.3). Aunque la extensión de la Ley de Peukert calcula la vida útil de la batería bajo perfiles de descarga variables.

1.6.1.3. Estimate Model Parameters Per Experiment

Este modelo está basado en la ecuacion (1.5).

$$E = (1 - Loss)V - KQ_{max} \frac{1-s}{s} \quad (1.5)$$

En la ecuación:

E : es el terminal de voltaje de la batería en voltios.

V : es es voltaje constante de la batería medida en voltios.

K : es la resistencia interna de la batería mediad en Ohms.

Q_{max} : es la máxima capacidad que posee la batería en Amperios-hora.

s : es el estado de carga (SOC), usamos 1 cuando está cargada completamente y 0 cuando esta descargado. El SOC de la batería se calcula integrando la corriente de la batería con una corriente positiva que nos indica descarga una corriente negativa que indica carga. El estado inicial de la carga de la batería se indica en Q_0 que se encuentra en amperios hora.

$Loss$: es la caída de voltaje durante la carga, esta se expresa como una fracción constante del voltaje de la batería. Cuando se encuentra en descarga, este valor es 0.

V , K , Q_{max} , Q_0 , y $Loss$ son variables que cambian de acuerdo a las características de la batería[14].

1.6.1.4. Modelo de Rakhmatov-Vrudhula

Rakhmatov y Vrudhula [1] han demostrado que la vida útil L (o tiempo de falla) de una batería está relacionada con la corriente $i(t)$ (la carga externa aplicada) como se muestra en (1.5), donde los parámetros α y β deben estimarse a partir de datos experimentales. El parámetro α representa la capacidad teórica de la batería, y β está relacionado con la velocidad a la que las especies electrones activa se reponen a la superficie del electrodo [4]. Las unidades de α y β son respectivamente *Coulombs* y $s - 1$.

$$\alpha = \int_0^L i(\tau) d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^L i(\tau) e^{-\beta^2 m^2 (L-\tau)} d\tau \quad (1.6)$$

En el lado derecho de (1.5), el primer término es la carga total entregado por la batería al circuito externo. El segundo plazo es la carga en la batería que no se pudo entregar a el circuito externo porque no estaba disponible en el electrodo superficie en el momento de la falla L. Rakhmatov y Vrudhula [1] consideraron un perfil de carga para $i(t)$ actual como una función de escalera de n pasos, como se muestra en Fig.2. El paso k , donde $k = 0, 1, \dots, n-1$, está representado mediante la corriente I_k , la duración Δ_k y la hora de inicio t_k . En tal caso, la corriente $i(t)$ se expresa en (2), donde $X(t)$ es la función del paso unitario.

$$i(t) = \sum_{k=0}^{n-1} I_k [x(t - t_k) - \chi(t - t_{k+1})] \quad (1.7)$$

Usando (1.6) en (1.5), entonces la vida útil L de la batería es relacionado con la corriente $i(t)$ como se muestra en (1.7), donde la función $F(L, t_k, t_{k+1}, \beta)$ se define en (1.8) [8]

$$\alpha = \sum_{k=0}^{n-1} I_k F(L, t_k, t_{k+1}, \beta) \quad (1.8)$$

$$F(L, t_k, t_{k+1}, \beta) = t_{k+1} - t_k + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 m^2 (L - t_{k+1})} - e^{-\beta^2 m^2 (L - t_k)}}{\beta^2 m^2} \quad (1.9)$$

Rakhmatov, Vrudhula y Wallach [8] también han demostrado que, para un caso especial de corriente constante I , entonces (1.5) puede ser escrito como (1.9), donde disminuye la magnitud de los términos de suma muy rápido. Por lo tanto, esos autores verificaron que los primeros 10 términos Proporcione una aproximación suficiente a la suma de $\beta^2 L \gg 1$.

$$\alpha = IL \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 L}}{\beta^2 m^2 L} \right] \quad (1.10)$$

Entonces Rao, Vrudhula y Rakhmatov [9] han definido la carga aparente perdida $\sigma(t)$ por la batería como se muestra en (1.10) y (1.11), donde $0 \leq t \leq L$.

$$\sigma(t) = \sum_{k=0}^{n-1} I_k F(t, t_k, t_{k+1}, \beta) \quad (1.11)$$

$$\sigma(t) = \underbrace{\sum_{k=0}^{n-1} I_k \Delta_k}_{l(t)} + \underbrace{\sum_{k=0}^{n-1} 2I_k \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 m^2 (t-t_{k+1})} - e^{-\beta^2 m^2 (t-t_k)}}{\beta^2 m^2}}_{u(t)} \beta^2 m^2 \quad (1.12)$$

El primer término $l(t)$ en (1.11) es el cargo entregado por la batería al circuito externo en el tiempo t , y el segundo término $u(t)$ es la carga en la batería que no se pudo entregar al circuito externo (carga no disponible). El cargo disponible en el tiempo t es $a(t) = \alpha - \sigma(t)$. En $t = 0$, cuando la batería está completamente cargados, tenemos $a(0) = \alpha$ y $\sigma(0) = u(0) = 0$. En la vida útil $t = L$, tenemos $a(L) = 0$ y $\sigma(L) = \alpha$. Rao, Vrudhula y Rakhmatov [9] han definido la carga de los padres perdió $\sigma(t)$ considerando el $i(t)$ actual como un n-Escalera escalonada. Esta restricción en la corriente $i(t)$ es útil para resolver problemas de optimización de por vida para la batería sistemas informáticos accionados. En tales sistemas la representación el tiempo suele ser discreto y las políticas de energía seleccionan estados de potencia del sistema informático para cada período de muestreo. Por lo tanto, el modelo Rakhmatov-Vrudhula como se muestra en (1.11) fue limitado por Rao, Vrudhula y Rakhmatov [9] a los casos donde la $i(t)$ actual se considera una función de escalera de n pasos, como se muestra en la Fig. 2. Si la corriente $i(t)$ se considerara una función de tiempo continuo, entonces la duración Δ_k tenderá a cero, y el índice n en (1.11) tendería al infinito. Incluso considerando un n finito, la carga computacional para evaluarla carga aparente perdida $\sigma(t)$ en (1.11) aumenta a medida que aumenta n . En este trabajo, presentamos una representación de lo aparente carga perdida $\sigma(t)$ por medio de la transformada de Laplace [10] que presenta las siguientes ventajas sobre el Rakhmatov-Modelo de Vrudhula: es útil para implementar el modelo en Simulink; no requiere almacenar en la memoria todo de los valores actuales $I_k, k = 0, \dots, n - 1$; no requieren evaluar todas las operaciones matemáticas en (1.11). Una representación similar del modelo Rakhmatov-Vrudhula fue propuesto en el dominio de la frecuencia por Rao, Vrudhula y Chang [11], pero solo lo han aplicado para analizar la viabilidad de las técnicas de optimización específicas de la batería. En nuestro trabajo, lo aplicamos directamente a la simulación. Además, el modelo propuesto en nuestro trabajo también puede usarse para predecir el tiempo de falla de las baterías.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se comparan los modelos descritos en el capítulo 1, así mismo se complementa el análisis comparativo con una matriz de decisiones que ayudará a seleccionar de mejor manera el algoritmo más adecuado y apto para su implementación en este trabajo final de pre-grado.

2.1. Comparación de modelos

Los modelos tendrán una puntuación de acuerdo a los siguientes parámetros establecidos.

- Facilidad de implementación
- Exactitud
- Precisión
- Requerimientos sistema embebido
- Requerimientos de software

Los pesos están distribuidos de la siguiente manera

1. Facilidad de implementación (40%).- El algoritmo no debe requerir configuraciones extras de hardware o software para su implementación.

2. Exactitud (20%).- El método de estimación debe ser lo más exacto posible para que no genere datos erróneos comparados con las simulaciones recreadas.
3. Precisión (20%).- La precisión también se ha tomado con un rango de importancia del 20%, los tiempos obtenidos deben ser siempre los mismo para que generen siempre concordancia con los datos obtenidos de la simulación.
4. Requerimientos sistema embebido (10%).- Es importante no aumentar el número de procesos para poder diseñar un sistema embebido óptimo para el dispositivo médico, tratando de que se ajuste a la mayoría de configuraciones de sistemas micro procesados.
5. Requerimientos de Software (10%).- El algoritmo permitirá ser reescrito e implementado en varios lenguajes de programación y que ninguna de sus funcionalidades sean exclusivas de alguno.

Se uso una escala tipo Likert de 5 niveles, donde 1 significa insatisfactorio y 5 excelente, así se obtendrá una puntuación final en donde el algoritmo con mayor puntuación sera la mejor opción de implementación. Se tomo en cuenta todas las características presentadas en el capítulo 1 de cada uno de ellos. Cada algoritmo recibirá una puntuación que sera multiplicada por el peso determinado a cada característica y al final se sumo dichas puntuaciones obteniendo una suma total, que definió que algoritmo vamos a usar. Las puntuaciones se presentan en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1: Algoritmos de determinación de SOC

Característica	Modelo linear	Modelo de Lei de Peukert	Modelo de estimación de parámetros	Modelo de Rakhmatov - Vrudhula
Implementación	200	200	200	120
Exactitud	40	60	60	80
Precisión	20	40	60	80
Hardware	50	50	50	40
Software	50	50	50	40
Total	360	400	420	360

La tabla 2.1 nos muestra como el modelo de estimación de parámetros es el más óptimo por su facilidad de implementación no requiere de un hardware con rendimiento elevado para su funcionamiento y es adaptable para todos los lenguajes de programación como Python, C# o C++, mantiene una precisión y una exactitud moderada para la finalidad de este trabajo de grado.

2.2. Diseño del sistema

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques del modelo de estimación de parámetros en el entorno de Simulink del programa Matlab, nos centraremos en los tres bloques dentro del cuadrado verde. En este se encuentran una variable $K1$ que realiza una transformación de la constante de corriente, una integral que permite obtener un SOC instantáneo y que se multiplica con un último bloque que posee información del estado inicial de carga y descarga de la batería.

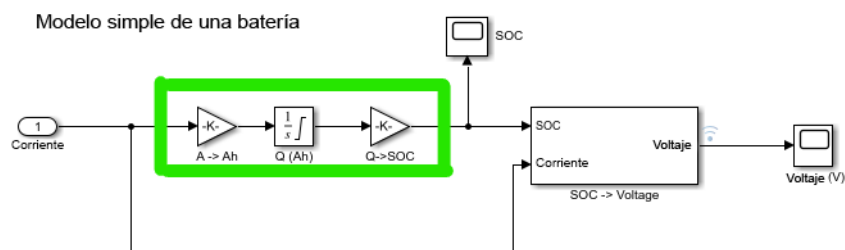
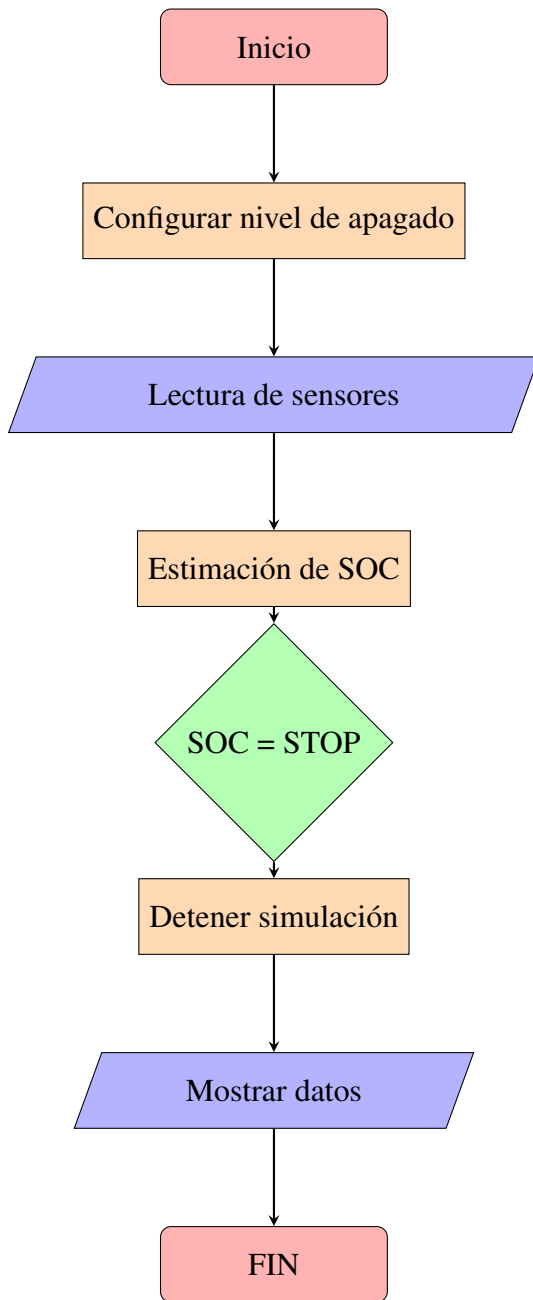


Figura 2.1: Diagrama de Bloques del modelo de estimación de parámetros.

Fuente: [14].

Los requerimientos de funcionalidad se los presenta en el siguiente diagrama de flujo que abarca todos los procesaos necesarios para cumplir con los objetivos establecidos en el presente trabajo de grado.



Para el diseño de este sistema haremos uso de la herramienta Simulink que posee el entorno de Matlab. El entorno cuenta con 4 partes fundamentales que se observa en la Figura 2.2.

1. Simulación de batería (rojo)
2. Implementación del algoritmo de estimación de parámetros (amarillo)
3. Estimación de duración de la batería (verde)
4. Visualización de resultados (azul)

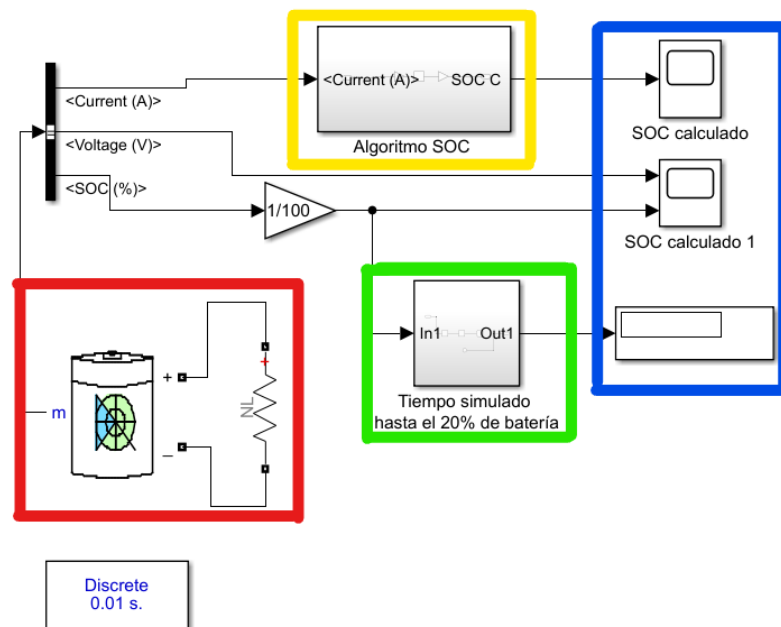


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

Fuente: [14].

Capítulo 3

Implementación del sistema de monitoreo del nivel de batería

3.1. Sección de simulación de batería

En el entorno de Simulink encontramos un bloque que nos permite realizar la simulación de comportamiento de carga y descarga de una batería, usaremos este bloque que nos representa nuestra batería donde implementaremos nuestro algoritmo de estimación de SOC. En este bloque es de vital importancia colocar los valores correspondientes a las características de la batería y que también serán usados para realizar el cálculo de estimación de parámetros, este mismo bloque me permite obtener datos de la batería como la corriente (A), el voltaje (V) y el SOC(%), este último nos ayudará a comprobar que tan exacto puede ser nuestro algoritmo. También se ha agregado una resistencia que simulará la carga a la que será sometida la batería, esta puede tomar los valores de consumo de voltaje y amperaje respectivamente del dispositivo al que alimentara. El sistema no cuenta con un sistema de auto-cargado ya que se pretende conocer el tiempo de vida útil de una carga de la batería, mismo con el que se pretende probar que tipo de batería sería la adecuada para dicho dispositivo electrónico, de este modo se deja de lado el estar probando con diversas baterías que a la larga provocarían daños en el dispositivo ya que al no tener un solo tipo de batería, su flujo energético cambia drásticamente. Para evitar estos

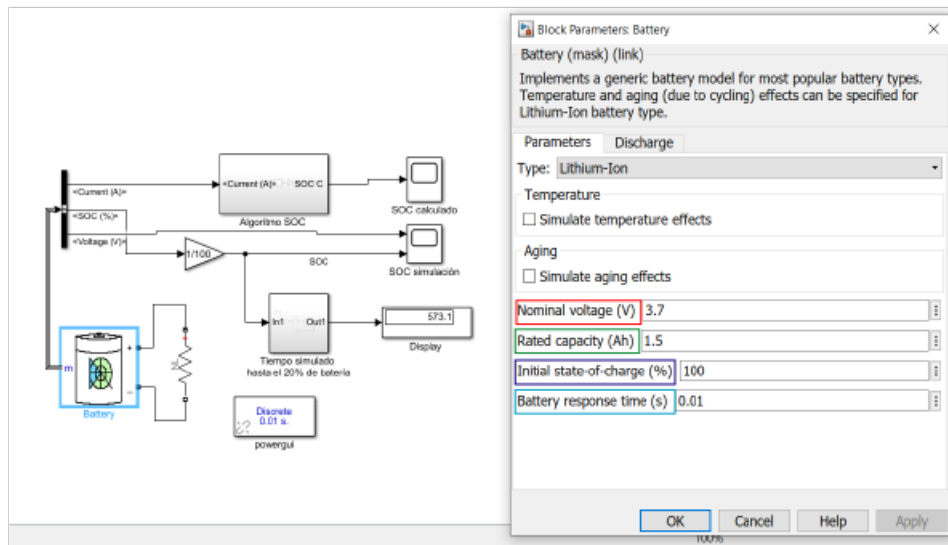


Figura 3.1: Variables de estado inicial de la batería.

Fuente: [14]

contratiempos se ha optado por utilizar el método de simulaciones con la finalidad de ahorrar tiempo y dinero en desarrollo de dispositivos biomédicos móviles.

A continuación se detallará cuales son los parámetros que se deben configurar para poder realizar una simulación adecuada.

En la figura 3.1 se muestran las variables de estado inicial de la carga de la batería que son modificables de acuerdo a las necesidades de la simulación, por ejemplo configurar el estado de carga (SOC) desde 100% que significa que la batería se encuentra completamente cargada hasta 0% que determina que la batería se encuentra totalmente descargada. A continuación en rojo el voltaje nominal, en verde la capacidad de la batería en amperios hora, en violeta el estado de carga inicial, en celeste el tiempo de respuesta de la batería. Los datos de voltaje nominal, capacidad de la batería deben ser tomado de la hoja de datos que el fabricante incluye con la batería.

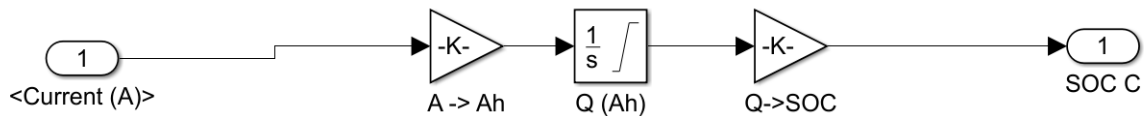


Figura 3.2: Diagrama de bloques algoritmo de estimación de SOC.

Fuente: [14].

3.2. Sección de implementación del algoritmo de estimación de parámetros

En la figura 3.2 se muestra el algoritmo a implementar, se hará uso de los datos del sensor de corriente que nos proporciona el bloque de simulación de la batería. A continuación se multiplica por el valor K que nos permite transformar la corriente de amperios a amperios-hora, en este apartado es importante el valor constante que nos permite ajustar el SOC calculado sea más preciso y acertado al SOC que obtenemos de la sección de simulación de la batería. Luego este valor es multiplicado por un integrador configurando los valores de Q_0 y Q_{max} como el estado de carga inicial de la batería en amperios-hora y la máxima capacidad de la batería en amperios - hora respectivamente.

3.3. Sección de estimación de duración de la batería

En este apartado se detalla la implementación de un cronómetro para la batería, este inicia al mismo tiempo que la simulación, y dependiendo de las necesidades que tenga el usuario podrá configurar un relé, mismo que detendrá la simulación y el cronómetro. De esta manera el usuario medirá el nivel de SOC que requiera, en la figura 3.3 se observa una configuración de un relé que su función es la de detener la simulación cuando el SOC llegue al 20%, cuando la señal de la batería ha llegado al porcentaje configurado por el usuario, los datos que se obtienen de la simulación se compararan con los datos del algoritmo implementado, este proceso se lleva a cabo con la finalidad de conocer el tiempo de duración de una descarga de la batería.

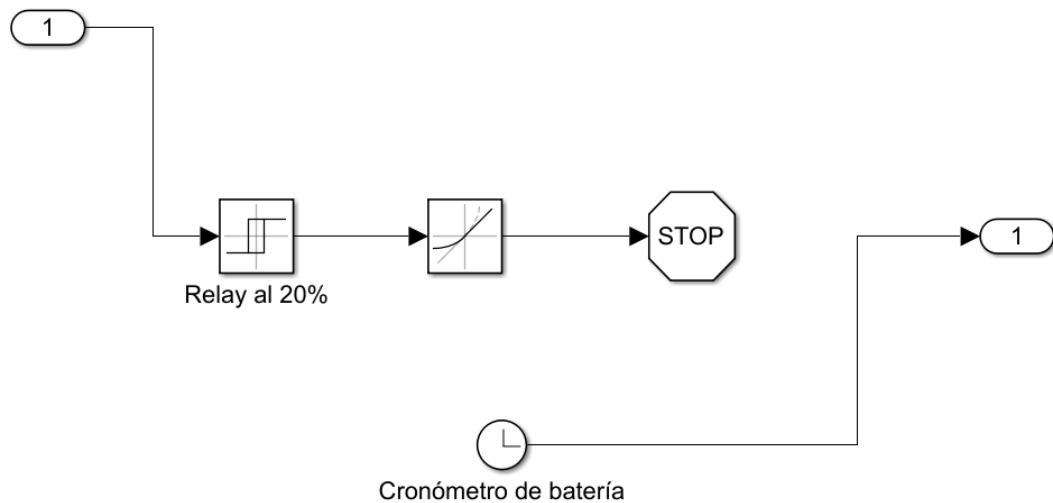


Figura 3.3: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

Fuente: [14].

3.4. Sección de visualización de resultados

En esta sección visualizan los datos que se detallan a continuación.

1. SOC calculado: En este scope se muestra la gráfica del SOC que se ha determinado usando como dato de entrada la corriente de la batería y usado el algoritmo desarrollado por Matlab.
2. SOC simulación: Muestra dos variables, una es el voltaje que sale desde la simulación de la batería y el SOC que es determinada por la simulación de la batería
3. Display: En el se muestra el tiempo que dura la simulación teniendo en cuenta el nivel mínimo configurado en la duración de la batería.

La figura 3.4 se muestra donde esta ubicada la sección de visualización de resultados, de arriba hacia abajo encontramos el SOC calculado por el algoritmo implementado, el SOC simulado acompañado del voltaje que mantiene la batería durante la simulación que servirá para analizar si la batería usada es viable para el proyecto, y abajo un display que muestra el tiempo que duro

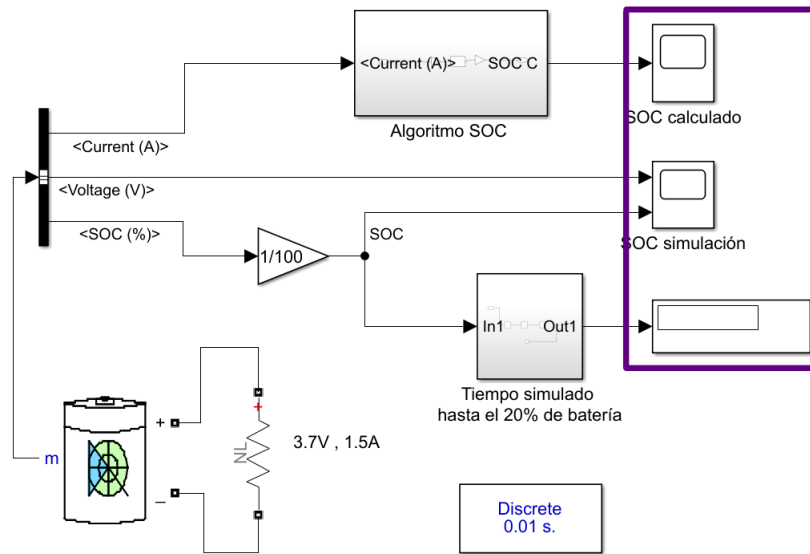


Figura 3.4: En morado, área de visualización de datos.

Fuente: [14].

la simulación y por lo tanto cuanto dura una descarga de la batería con la carga aplicada a la misma.

Capítulo 4

Pruebas y análisis de resultados

En este capítulo se detalla como realizar la simulación de duración de la batería por carga, con la finalidad de conocer su tiempo de uso, para esta simulación se usará el entorno de Simulink del programa de Matlab.

4.1. Caracterización de la batería a simular

Para probar la simulación de la batería usaremos una que se pueda encontrar fácilmente en el mercado, además se aprovechará el auge que tiene los vaporizadores ya que su comercialización se ha extendido. Estas baterías son del tipo ion de litio, mismas que en el capítulo 1 se ha señalado que tienen mejor rendimiento y una vida útil más larga. Estas baterías se usan para generar una pequeña inducción en una niquelina para evaporar esencia. El costo de estas baterías esta entre los \$12 a \$20. A continuación presentamos los datos de la batería, para mayor información revisar el anexo 1.

- Amperaje nominal: 3120mAh
- Amperios-hora: 3000mAh
- Máxima corriente continua de descarga para una temperatura hasta de 80 grados Celsius: 30A

- Máxima corriente continua de descarga: 20A
- Voltaje nominal: 3.6V/3.7V
- Voltaje máximo de carga: 4.2V
- Impedancia Interna: 13 m Ω medido por Ac 1kHz
- Diámetro: 18.45mm max +/- 0.05mm
- Longitud: 65mm max +/- 0.05mm
- Peso: 47 g aproximadamente
- Terminal Positivo: Flat top
- Color: Green
- Tipo de batería / forma: 18650 / cilíndrica
- Construida: Sony Energy

4.2. Configuración Matlab

4.2.1. Configuración de las variables en la batería

En esta sección se indicará el modo correcto para configurar la batería que se simulará, también se configurará una resistencia que simulará la carga que alimentará la batería. Para este proceso primero debemos identificar los dos elementos que se muestran en la figura 4.1. Ambos elementos se encuentran encerrados en un recuadro azul, el recuadro de la derecha representa la carga y el de la izquierda la batería.

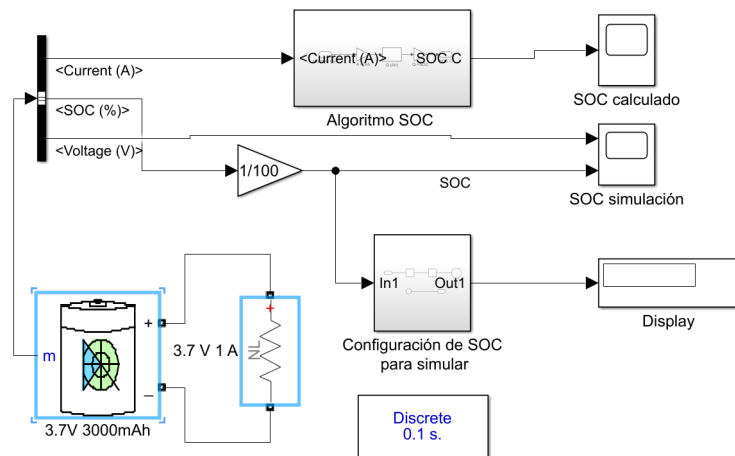


Figura 4.1: En azul, bloques de batería y carga

Fuente: Autor.

4.2.1.1. Configuración de los datos de la batería

Para realizar este proceso de configuración se identifican los datos detallados en la sección 4.1. que corresponden a una batería de iones de litio.

Como muestra la figura 4.2 el panel de configuración se puede elegir que materiales componen la batería, para este simulador, le es posible simular materiales de manufactura de baterías como:

- Iones de litio
- Níquel-Cadmio
- Níquel-hidruro metálico
- Plomo-ácido

En nuestro caso usaremos la de iones de litio, dejaremos desactivados las casillas de simulación de efectos de la temperatura ya que en esta tesis no se verá a detalle los efectos que producen las temperaturas en la baterías, pero se puede realizar dichas simulaciones en futuras investigaciones, ni la casilla de simulación los efectos del envejecimiento, ya que la simulación no posee un circuito de carga para volver a cargar la batería y proceder a realizar nuevamente la simulación inicial.

Se colocará los valores del voltaje nominal (3.8V), amperios-hora (3000 mAh), el estado inicial de carga de la batería (100), y la respuesta de la batería (0.01) como se muestra en la figura 4.2. Marcamos la casilla que nos permite determinar los parámetros de la batería a partir de los

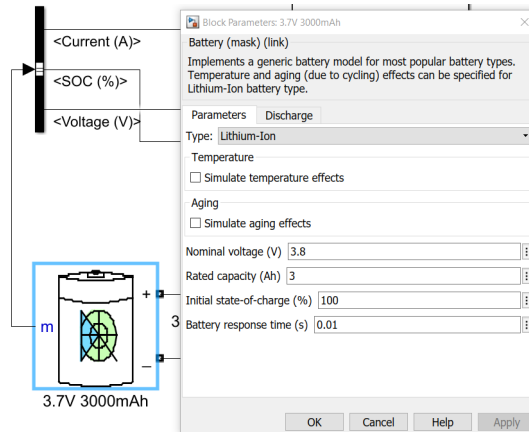


Figura 4.2: Panel de configuración del bloque de batería

Fuente: Autor.

valores nominales configurados con anterioridad, véase figura 4.3, si queremos tener un mayor control de estos datos podemos configurarlos manualmente cada uno de ellos a partir de hoja de datos de nuestra batería.

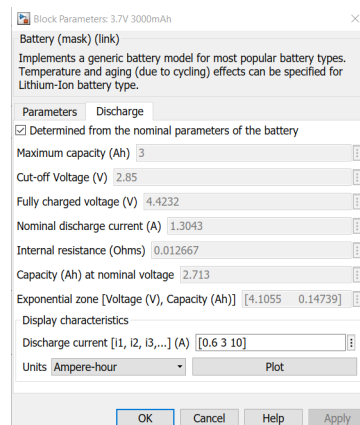


Figura 4.3: Panel de configuración del bloque de batería

Fuente: Autor.

4.2.1.2. Configuración de la carga

En la figura 4.4 se muestra el panel de configuración de la carga donde se colocará primero el voltaje que consume el dispositivo y el amperaje del mismo, para las pruebas a realizar se tomará como referencia un arduino uno que consume 5V y un amperaje de 0,8A [15].

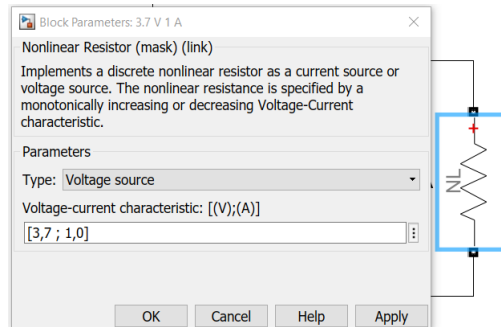


Figura 4.4: Panel de configuración del bloque de carga

Fuente: Autor.

4.2.2. Configuración del límite de SOC para simular

Para iniciar con la simulación de la batería es primordial configurar cual sera el rango de nivel de SOC para la simulación, en este trabajo de grado se realizará la simulación de la duración de una carga, esto quiere decir que empezará la simulación al 100% y se detendrá al llegar al 20%, se ha elegido este porcentaje de batería debido a que al no descargar toda la batería se puede alargar la vida útil de la misma.

- Para configurar los límites de la simulación abriremos el subsistema *Configuración de SOC para simular* que se encuentra identificado por un recuadro en rosa de la figura 4.5.
- Dentro del subsistema anteriormente descrito encontramos dos sistemas de control, uno de ellos es el encargado de cronometrar el tiempo que se tardará en descargar la batería en la simulación, y el relé que permite configurar los límites de la simulación, ambos sistemas de control se muestran en la figura 4.6.

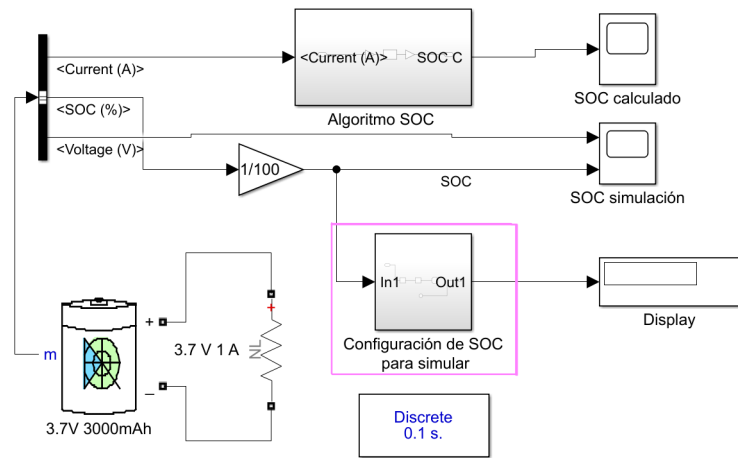


Figura 4.5: En rosa, subsistema de configuración de SOC para simular.

Fuente: Autor.

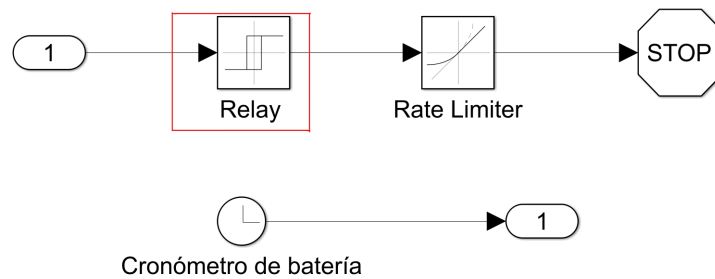


Figura 4.6: En rojo, bloque del relé.

Fuente: Autor.

- Cuando abramos la configuración del relé debemos colocar en valores numéricos que representan las muestras porcentuales de SOC, de este modo como observamos la figura 4.7 el valor inicial de la simulación lo debemos colocar en *Switch on point* y le asignamos el valor de 1 que representa el 100% de SOC. Para colocar el límite inferior de la simulación debemos colocar 0.2 en *Switch off point*. También configuramos los valores que nos dará el relé cuando este encendido o apagado, los valores por default de este apartado es de 1 cuando está en contacto y 0 cuando esta desconectado, pero para configurar la parada de la simulación es necesario activar la entrada de STOP y por este motivo, los valores son reasignados a los que necesitamos.

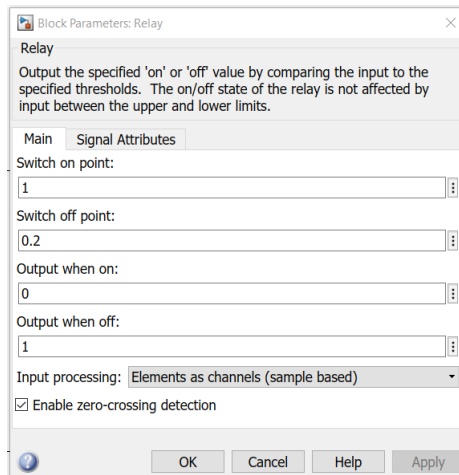


Figura 4.7: Configuración del relé de la simulación.

Fuente: Autor.

4.2.3. Ajuste de variables del algoritmo de SOC

En este apartado se detallará donde se colocan las variables obtenidas desde la hora de datos de la batería descrita en la sección 4.1

- Abrimos el subsistema *Algoritmo SOC* como se muestra en la figura 4.8 dentro del recuadro azul.

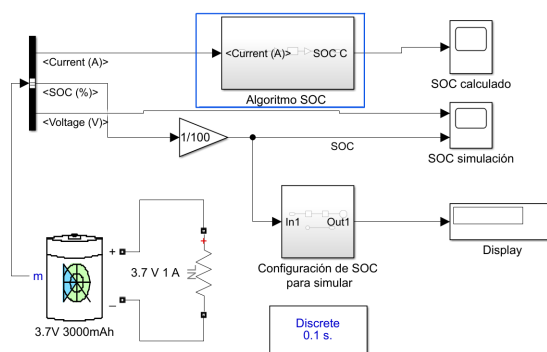


Figura 4.8: Sistema de simulación de batería, en azul subsistema *Algoritmo SOC*.

Fuente: Autor.

- En el subsistema *Algoritmo SOC*, seleccionamos el bloque $Q(Ah)$ (véase figura 4.9) y en el apartado de *initial condition* colocaremos el valor de Q_0 y en *Upper saturation*

imit, colocamos el valor de Q_{max} , los demás ítem se mantienen con la configuración por defecto.

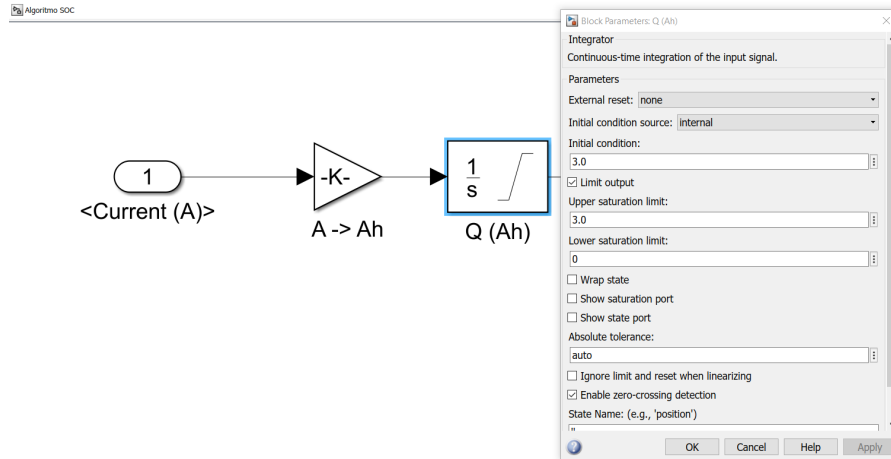


Figura 4.9: Configuración del bloque integral para la determinación del SOC.

Fuente: Autor.

- El bloque Q-> SOC (véase figura 4.10), colocamos el valor $1/Q_{max}$ que nos permitirá obtener el valor de SOC calculado final.

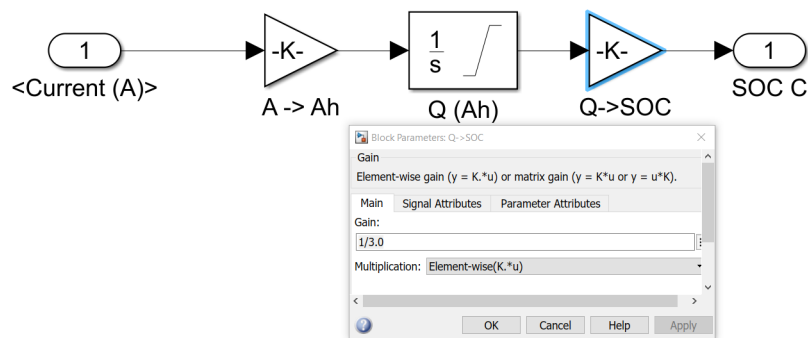


Figura 4.10: Configuración del bloque de ganancia.

Fuente: Autor.

4.2.4. Simulación del sistema desde 100 % hasta el 20 %

Al tener configurado todo el sistema para su simulación, procedemos a iniciar la simulación y esperamos que termine de ejecutarse, procedemos a revisar los scope que nos muestran tres gráficas.

1. Gráfica del comportamiento del voltaje.
2. Gráfica del SOC obtenido por la simulación de la batería.
3. Gráfica del SOC calculado con el algoritmo.

Las tres gráficas se muestran en la figura 4.11, en la derecha se muestra la gráfica que corresponde al SOC obtenido por el algoritmo implementado a partir de las lecturas de la capacidad de la batería, en la izquierda se muestran dos gráficas, arriba representa el comportamiento del voltaje de la batería con la carga y debajo el SOC que se obtiene automáticamente del bloque de la batería. En esta última se puede verificar que tiempo se tarda la batería en disminuir su SOC desde el 100% hasta el 20%, dándonos en este caso un tiempo de 5723.500s esto nos da un aproximado de 1 hora, 35 minutos y 23 segundos.

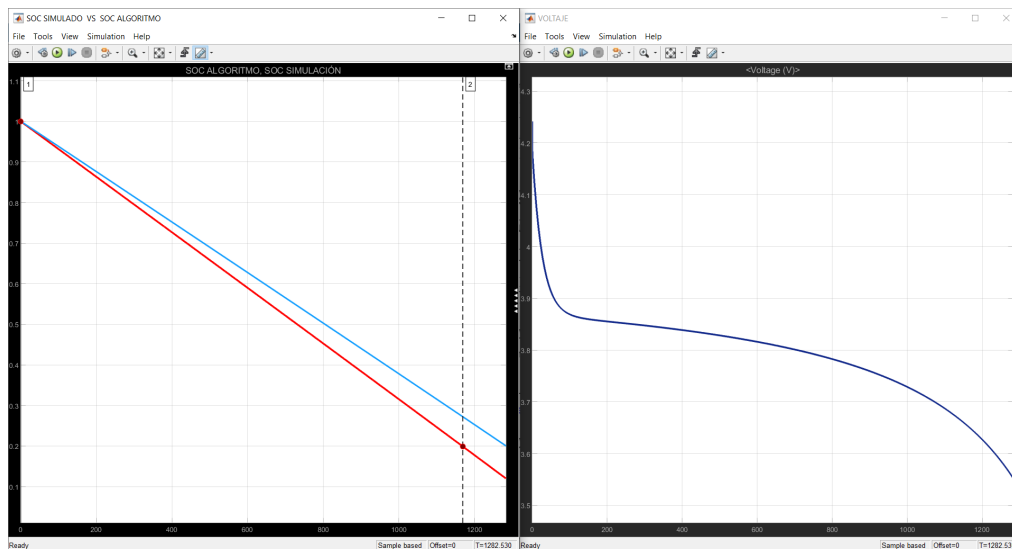


Figura 4.11: Resultados de la simulación.

Fuente: Autor.

4.2.5. Determinación del error de la simulación desde el 100 % hasta el 20 %

Para poder encontrar el margen de error entre el SOC del algoritmo de carga y el SOC del bloque de la batería de Simulink, tomaremos como referencia para ambos casos el mismo intervalo de uso de las baterías con la finalidad de conocer cual es el desfase de tiempo que existe entre estos dos métodos para obtener el SOC, los intervalos de simulación y obtención del margen de error van desde el 100 % hasta el 20 %, con los datos obtenidos se podrá calcular el error absoluto y el error relativo. En sistemas de medición se permite un 10 % de error porcentual, ya que al sobrepasar este porcentaje el sistema no tendrá una fiabilidad adecuada para ser usado en dispositivos electrónicos móviles [16].

4.2.5.1. Error Absoluto

Para determinar el error absoluto usaremos la fórmula:

$$\varepsilon_a = \bar{X} - X_i \quad (4.1)$$

Donde, \bar{X} es es valor real que nos muestra el SOC de la batería cuando esta al 20 % y X_i es el valor medido por el algoritmo implementado al 20 %, usando los datos descritos en la figura 4.11 tenemos:

$$\varepsilon_a = 5723,500 - 5252,451 \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_a = 470,049 \quad (4.3)$$

Este error absoluto de 470,049s en la práctica nos da un desfase de 7 minutos 50 segundos.

4.2.5.2. Error Relativo

Para determinar el error relativo usaremos la fórmula:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}} \quad (4.4)$$

Donde, ϵ_a es el error relativo y \bar{X} es el valor medido en segundo del tiempo que tardar en llegar el SOC del bloque de la batería desde el 100% hasta el 20%, así tenemos: Para determinar el error relativo usaremos la fórmula:

$$\epsilon_r = \frac{470,049}{5723,500} \quad (4.5)$$

$$\epsilon_r = 0,082 \quad (4.6)$$

De igual forma, se puede multiplicar por 100 el error relativo obteniéndose en tanto por ciento (%) de error.

$$\epsilon_r \% = 0,082 \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

$$\epsilon_r \% = 8,2 \% \quad (4.8)$$

4.2.6. Simulación del sistema desde 20 % hasta el 0 %

para realizar esta simulación mantendremos los datos de la batería y resistencia aplicada en la sección 4.2.4. En este apartado la simulación iniciará con un 20% de batería y se la llevará al 0%. Para esto debemos cambiar el apartado de Initial state-of-charge (%) por 20, como se muestra en la figura 4.12.

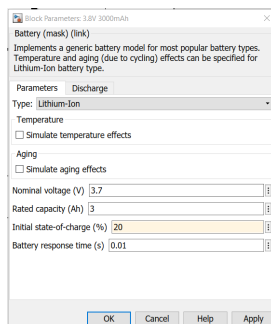


Figura 4.12: Configuración de batería al 20%.

Fuente: Autor.

De igual manera debemos cambiar el apartado del rele, donde hay que configurar para 0,2 como valor inicial y valor final 0, como muestra la figura 4.13.

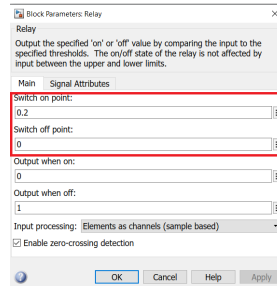


Figura 4.13: Configuración de paro de cronómetro de simulación.

Fuente: Autor.

4.2.7. Determinación del error de la simulación desde el 20 % hasta el 0 %

4.2.7.1. Error Absoluto

Para determinar el error absoluto usaremos la fórmula:

$$\varepsilon_a = \bar{X} - X_i \quad (4.9)$$

Donde, \bar{X} es el valor real que nos muestra el SOC de la batería cuando esta al 0% y X_i es el valor medido por el algoritmo implementado al 0%, usando los datos tenemos:

$$\varepsilon_a = 1591,530 - 1459,597 \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_a = 131,933 \quad (4.11)$$

Este error absoluto de 131,933s en la práctica nos da un desfase de 2 minutos 11 segundos.

4.2.7.2. Error Relativo

Para determinar el error relativo usaremos la fórmula:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}} \quad (4.12)$$

Donde, ε_a es el error relativo y \bar{X} es el valor medido en segundo del tiempo que tardar en llegar el SOC del bloque de la batería desde el 20 % hasta el 0 %, así tenemos: Para determinar el error relativo usaremos la fórmula:

$$\varepsilon_r = \frac{131,933}{1591,530} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_r = 0,082 \quad (4.14)$$

De igual forma, se puede multiplicar por 100 el error relativo obteniéndose en tanto por ciento (%) de error.

$$\varepsilon_{r\%} = 0,082 \cdot 100 \% \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_{r\%} = 8,2 \% \quad (4.16)$$

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El diseño del sistema de monitoreo cumple con los parámetros establecidos, al conocer el tiempo que durará la carga de la batería en un dispositivo embebido y el tiempo de funcionalidad que tendrá el mismo.
- El sistema embebido se complementa con sensores de amperaje y voltaje para implementar el algoritmo de determinación del SOC.
- Conociendo los tiempos de usabilidad que tendría el dispositivo y llevando un registro de estos es posible analizar el estado de la batería. Y si fuera el caso realizar un cambio de la misma.
- Se uso una configuración de tiempo discreto de 0.01s para tener una mejor respuesta de todo el sistema, aplicando el algoritmo de determinación de SOC.
- La simulación de la batería y del comportamiento del algoritmo nos permite analizar los resultados de tiempos que ayuden al diseño de mejores sistemas embebidos.
- La oportunidad de realizar este trabajo de grado ha sido una experiencia muy constructora de mi experiencia profesional, no solamente sirve estudiar, ponerlo en práctica es aún más relevante, y sin práctica el estudio está incompleto.

Recomendaciones

- Para que todo el sistema sea más automático se recomienda realizar una interfaz gráfica de usuario.
- Reducir el error absoluto y relativo agregando un sensor de corriente con nivel de precisión alto. Así, se corrija la señal que ingresa al algoritmo de aplicación.
- Disminuir el ingreso de ruido, entre mayor sea la capacidad de procesamiento del sistema embebido se puede generar procesos probabilísticos que ayuden al tratamiento de la información.
- Validar el algoritmo en casos reales ya que en el sistema diseñado no se tomaron condiciones de variación del clima, uso de diferentes cargadores con niveles de potencia diferente que reducen la vida útil de la batería, llegando a afectar directamente a su rendimiento inicial.

Bibliografía

- [1] «Un resultado del Proyecto sobre Dispositivos Médicos Prioritarios,» 2018.
- [2] Zoll, «Manejo de baterías» Zoll, [En línea]. Available: <https://www.zoll.com/es/productos-m%C3%A9dicos/desfibriladores/m-series/manejo-de-bater%C3%ADas> [Último acceso: 2020 1 15].
- [3] K. García, Evaluador Mioeléctrico Multicanal para Personas con Amputación Transtibial, Ibarra, 2019.
- [4] J. Cuasapaz, Entrenador mioeléctrico para personas amputadas del miembro superior, Ibarra, 2017.
- [5] Nima Lotfi et al, "Development of an Experimental Test bed for Research in Lithium-Ion Battery Management Systems", 15 Octubre 2013, Energies, pp 5231-5258 DOI:10.3390/en6105231
- [6] David Linden, Thomas B Reddy, "Manual de baterías", tercera edición, McGraw-Hill, 2001.
- [7] Copyright : Stephen Hill, «123RF», [En línea]. Available: https://www.123rf.com/photo_31942687_stock-vector-simple-electrochemical-or-galvanic-cell-the-daniell-cell-.html [Último acceso: 2020-1-15].
- [8] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, "An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems," National Science Foundation's State/In-

- dustry/University Cooperative Research Centers' (NSFS/IUCRC) Center for Low Power Electronics (CLPE), pp. 1–6, 2001.
- [9] P. Sausen, “Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio,” Master’s Thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, July 2008.
- [10] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, “Energy management for battery-powered embedded systems,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 2, no. 3, pp.277–324, August 2003.
- [11] M. Jongerden and B. Haverkort, “Which battery model to use?” Imperial College London, pp. 76–88, 2008.
- [12] K. Kleveston Schneider, “Modelos Analíticos de Predicción de Tiempo de Vida de Baterías Utilizadas en Dispositivos Móviles” Universidad Regional del Noroeste de Estado de Rio Grande do Sul, pp.12,2011.
- [13] Tomado de: <https://www.phineal.com/baterias-la-siguiente-revolucion-de-la-energia/> [Último acceso: 2020-1-30].
- [14] Tomado de: <https://la.mathworks.com/help/slido/ug/estimate-model-parameters-per-experiment-code.html> [Último acceso: 2020-10-1].
- [15] Tomado de: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3> [Último acceso: 2020 11 30].
- [16] Tomado de: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/unidades/medidas/medidas.htm> [Último acceso: 2020-11-30].

Anexos

- Anexo 1

Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information

Revision 0.2
30th Jun 2015

Model Number	US18650VTC6
Cell Type	Cylindrical
Cell Name	US18650VTC6
Sony Code	49939240

**Sony Energy Devices Corporation
Device Solutions Business Group / Sony Corporation**

1. General

1.1 Name and Code

1.1.1 Model Number : US18650VTC6
1.1.2 Cell Name : US18650VTC6
1.1.3 Sony Code : 49939240

1.2 Cell Shape and Weight

1.2.1 Cell Shape : Cylindrical
1.2.2 Size (with plastic tube) : Diameter 18.50mm max
Length 65.20mm max
1.2.3 Weight : 46.6g Average

1.3 Safety Regulation

: Sony acquired UL1642.
: Sony acquired IEC62133 2nd edition.
: Sony acquired Korean regulation.
: Sony acquired Taiwan Commodity
Inspection Act(CNS 15364)

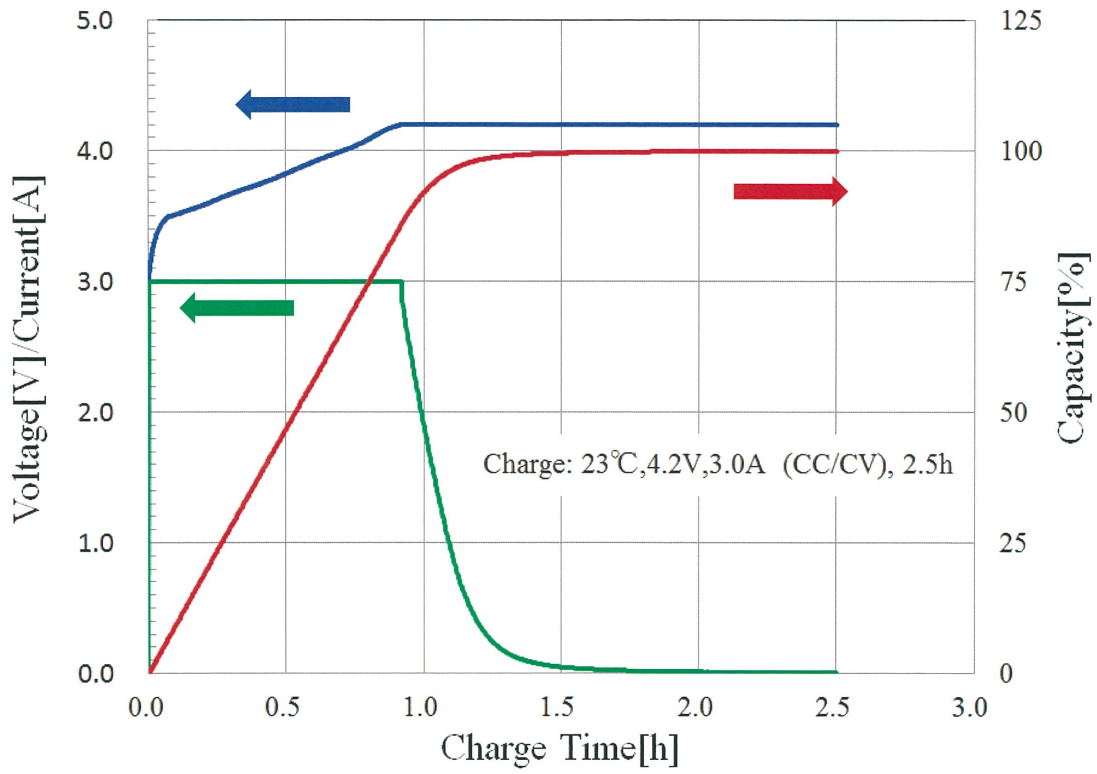
2. Performance

Nominal Capacity at 0.2ItA	3120mAh 11.23Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Rated Capacity at 0.2ItA	3000mAh 10.8Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Capacity at 1ItA (typ.)	2850mAh 10.12Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Capacity at 10A (typ.)	2700mAh 9.18Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Nominal Voltage	3.6V	
Internal Impedance	13mΩ Typ.	measured by AC1kHz
Cycle Performance	53% Min. of Initial capacity at 300 cycles	10A discharge

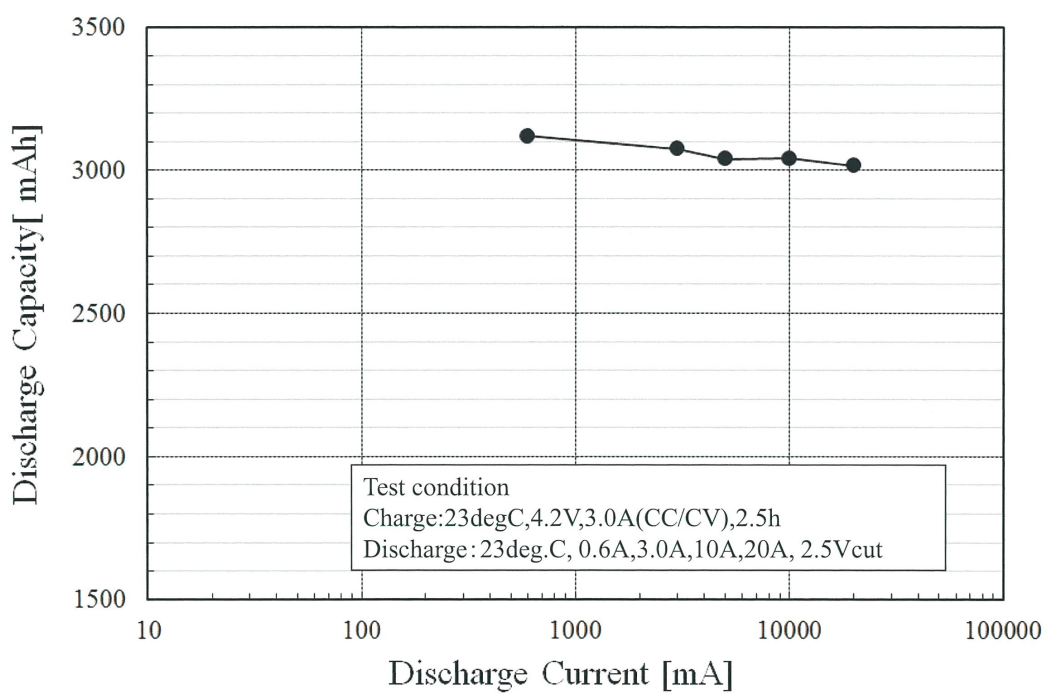
* Standard Charge Condition

Charge Method : constant current constant voltage
Charge Up Voltage : 4.2± 0.05V
Charge Current : 3.0A
Charge Time : 2.5h
Ambient Temperature : 23°C

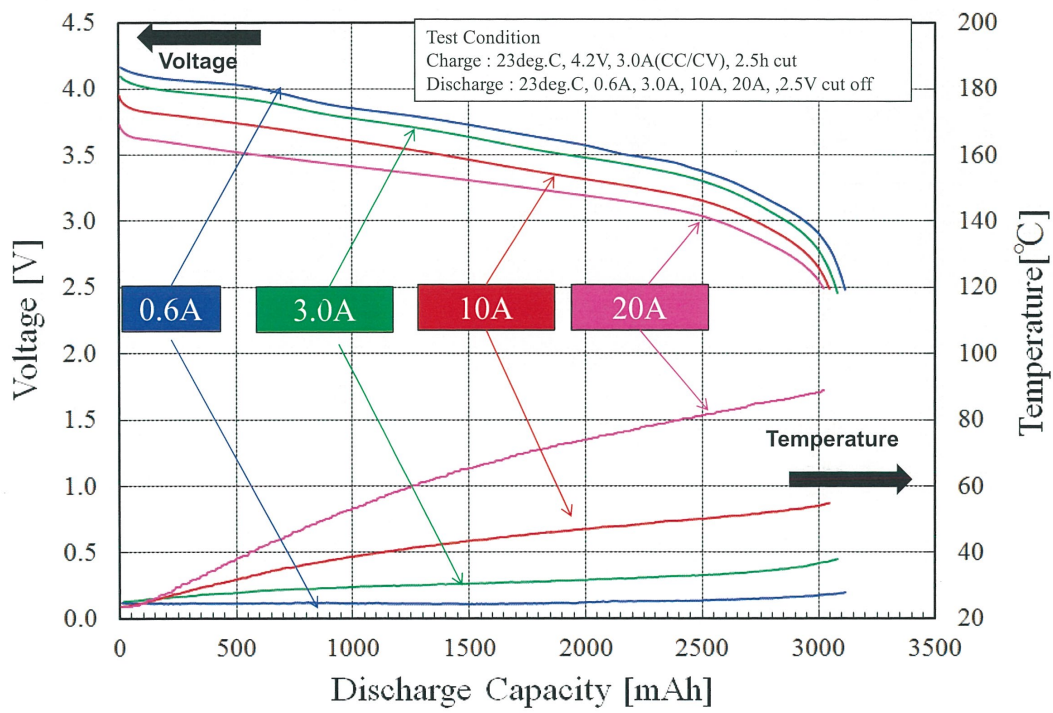
Charge Characteristics (US18650VTC6)



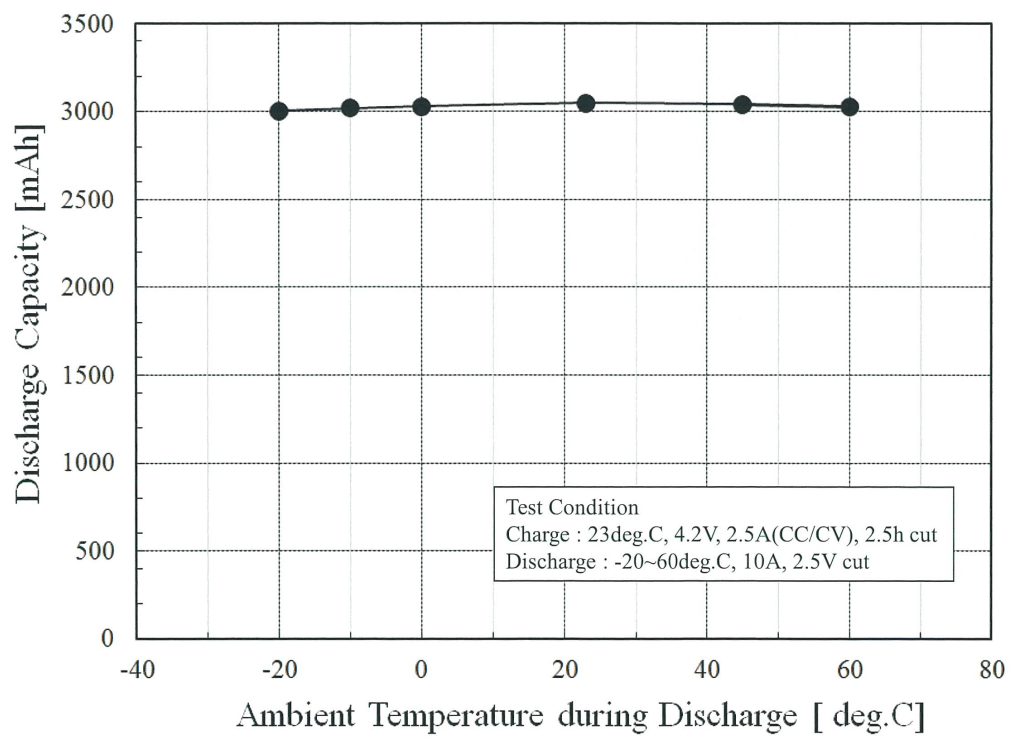
Discharge Load Characteristics (US18650VTC6)



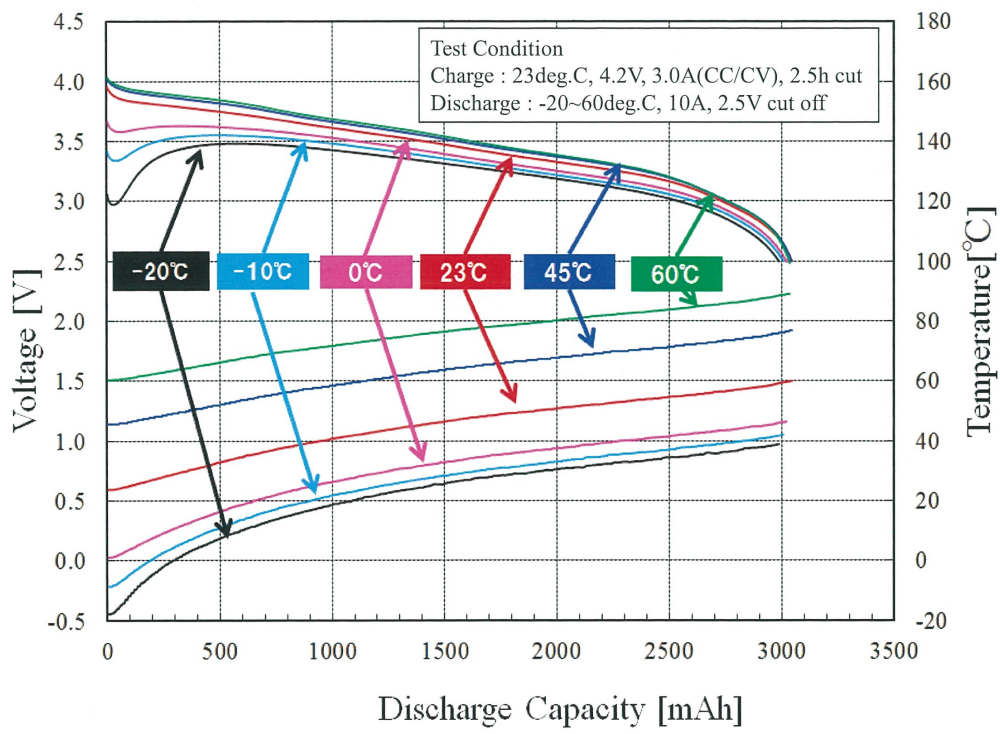
Discharge Load Characteristics (US18650VTC6)



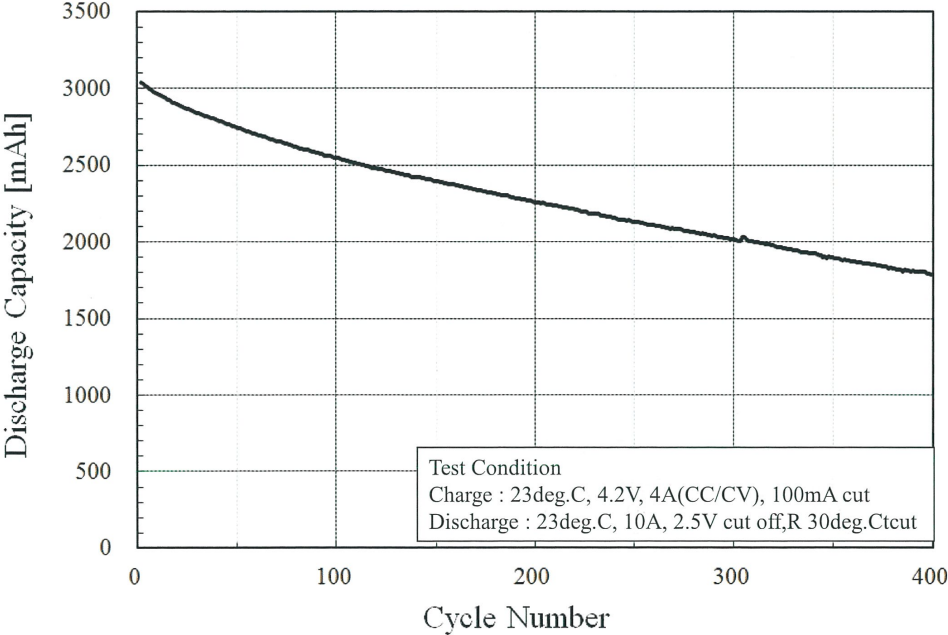
Temperature Dependence of Discharge Capacity (US18650VTC6)



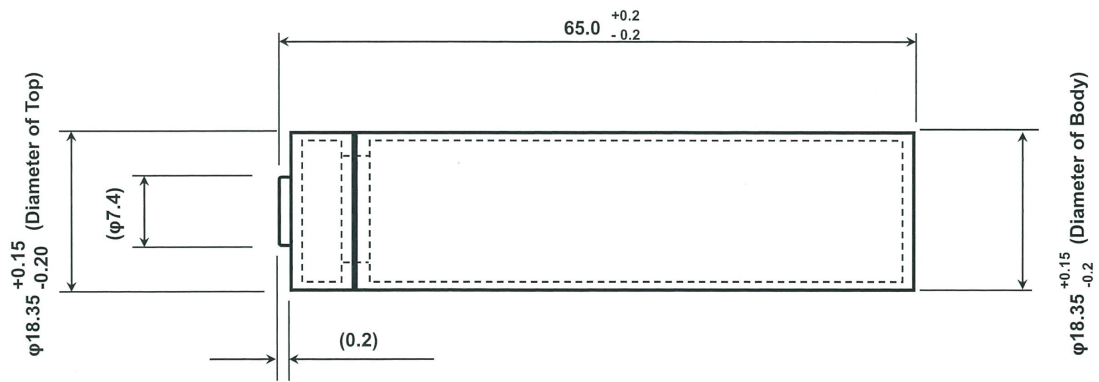
Temperature Dependence of Discharge Curves (US18650VTC6)



Cycle Life Performance (US18650VTC6)
10A discharge



Dimension with Plastic Tube: US18650VTC6



- Anexo 2

Enlace para acceder al vídeo de mostrativo de la simulación.

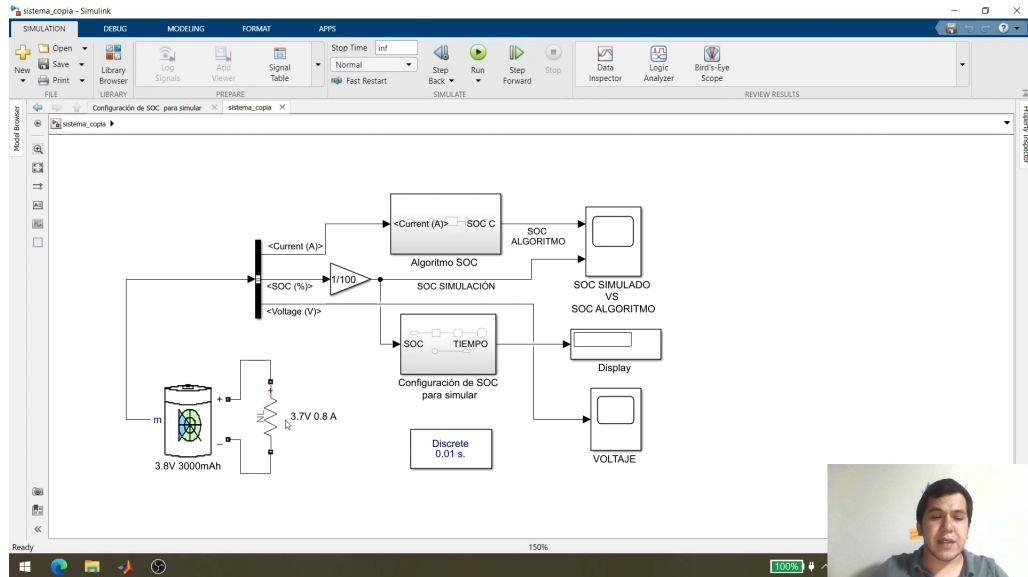


Figura 4.14: Screenshot del video demostrativo

Fuente: Autor.

https://utneduec-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/dportiz_utn_edu_ec/EaIQqINyW51Bu9hnc5ZGYfcBx3id0yEBBvjyOfWljZwKHg?e=zCA4fZ.