



Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Electrónica

Área de Gestión de Proyectos

Ingeniería Electrónica

Proyecto Final

Estudio e Implementación de un Sistema de Administración de
Baterías de Li-Ion de baja y mediana potencia

Autores:

Federico Ceccarelli (C-6241/3)

Martin Moya (M-6132/8)

Lucio Santos (S-4966/2)

Directora:

Dra. Monica Romero

Asesor:

Ing. Edgardo Arnejo

Firma:

Resumen

En el presente trabajo se detalla el proceso de desarrollo e investigación de un administrador de baterías o, también conocido como, BMS (del inglés *Battery Management System*) compatible con un pack de baterías de iones de litio, capaz de estimar el estado de carga utilizando filtros cuadráticos, balancear, proteger, cargar y comunicar, a través del protocolo CAN, todas las variables del mismo. El dispositivo es orientado a vehículos eléctricos de baja y mediana potencia, como por ejemplo, bicicletas/monopatines hasta triciclos de transporte con carga y busca resolver mucha de las problemáticas intrínsecas de la tecnología litio-ion, como por ejemplo, su volatilidad ante operaciones fuera del área segura de operación, como también la falta de proyectos abiertos de esta índole en el mercado. A pesar de estar caracterizado para vehículos eléctricos, el mismo puede ser aplicado a almacenadores de energía, tales como los paneles solares, incluso hasta sistemas de alimentación ininterrumpida, o UPS (del inglés, *Uninterruptible Power Supply*).

DRAFT

Índice

1. Introducción	3
1.1. Motivación del proyecto	3
1.1.1. foxBMS	4
1.1.2. openBMS	4
2. Descripción	5
2.1. Objetivos Generales	5
2.2. Especificaciones	5
3. Aspectos Teóricos	6
3.1. Batería de Litio-Ion	6
3.1.1. Principios básicos	6
3.1.2. Litio	7
3.1.3. Principio de funcionamiento	8
3.2. Modelado de baterías de litio-ion	11
3.2.1. Modelos Físicos	11
3.2.2. Modelos empíricos	13
3.2.3. Modelos abstractos	13
3.2.3.1. Circuito simple	13
3.2.4. Modelos basados en el espectro de impedancia	14
3.2.4.1. Comparación de modelos y su evaluación para aplicaciones en vehículos eléctricos	16
3.2.5. Batería Seleccionada	16
3.3. Sensado de Corriente	18
3.3.1. Resistencia Shunt	19
3.3.2. Sensor de efecto Hall	19
3.3.3. Tecnología Seleccionada	19
3.4. Algoritmos de Estimación del Estado de Carga	20
3.4.1. Método de estimación por FEM	22
3.4.2. Estimación basada en modelos (Mecánicos, Térmicos y electroquímicos)	22
3.4.3. Estimación por resistencia interna	23
3.4.4. Espectroscopía Dieléctrica (EIS)	24
3.5. Filtros de Kalman	24
3.5.1. Filtro de Kalman: resumen	27
3.6. Simulaciones	28
3.6.1. Simulación Filtro de Kalman	28
3.7. Técnica de Carga	33
3.7.1. Corriente Constante CC - Voltaje Constante CV	33
3.7.2. Tecnología Seleccionada	36
3.8. Ecualización de celdas	37
3.8.1. Desbalance del estado de carga (SoC)	37
3.8.2. Diferencias entre impedancias internas	38
3.8.3. Diferencias en la Capacidad de las celdas	38
3.9. Plan de Trabajo	40
3.10. Extensión a futuros proyectos	40
4. Desarrollo	41
5. Ensayos	41
6. Conclusiones	42
Tabla de Abreviaturas	43

1. Introducción

A partir de la relevancia que ha comenzado a tomar el calentamiento global en las últimas décadas y el inquietante impacto que el mismo tiene sobre la calidad de vida de las personas, se han intentado buscar distintas soluciones para apaciguar las principales causas que generan un deterioro del medio ambiente, entre ellas, se encuentra el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovables y su aprovechamiento.

El vehículo eléctrico (VE) (*fig. 1*) es considerado una de las transiciones tecnológicas más importantes de los últimos años debido a que no emiten dióxido de carbono (CO_2) al medio ambiente y no utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, esto los convierte en uno de los avances tecnológicos más atractivos de los últimos tiempos teniendo en cuenta el avance del calentamiento global y el crecimiento del valor del petróleo.

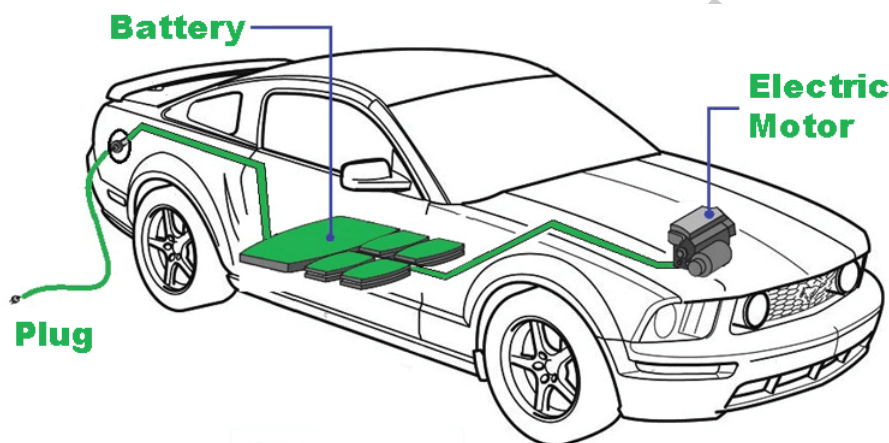


Figura 1: Esquemático de un vehículo eléctrico

Siendo las baterías eléctricas la única fuente de energía en los vehículos eléctricos (VVEE), éstas tienen un gran impacto en la performance de los mismos determinando la autonomía del vehículo. En base a este criterio, las baterías de iones de litio (*Li-Ion*) resultan las más adecuadas para esta aplicación debido a su alta densidad energética, es decir, que éste tipo de baterías tienen una gran capacidad para su reducido volumen a comparación de otras tecnologías. Para poder ser utilizados en VVEE, las baterías de *Li-Ion* son conectadas en forma de arreglos o packs de baterías en serie que permiten obtener mayores valores de tensión y, otras, en paralelo para aumentar la capacidad del pack.

1.1. Motivación del proyecto

Una de las grandes problemáticas de las baterías de Litio-ion reside en que se debe tener en cuenta ciertas precauciones a la hora de implementarlas, debido a que las mismas son propensas a fallar al ser sobrecargadas, completamente descargadas u operadas fuera del rango seguro de temperatura, tensión o corriente, además, en un pack de baterías conectadas en serie, se pueden manifestar pequeñas diferencias de capacidades a través de todas las celdas, causado por tolerancias de producción o diferentes condiciones de operación, que tienden a incrementar con cada ciclo de carga. Por último, las baterías sufren un proceso de *auto-descarga* (típicamente entre un 2-10% dependiendo de la temperatura y el estado de carga de la misma). Si la distribución de temperatura a lo largo del pack es heterogénea, las celdas con mayor temperatura tienden a una mayor pérdida de capacidad provocando un desbalanceo de carga. Esto trae varias consecuencias, entre ellas, se encuentran:

- **Seguridad:** Si el voltaje máximo de carga es excedido por unos cientos de milivoltios, puede provocar un embalamiento térmico, derritiendo el pack de baterías y, por lo tanto, el dispositivo que alimenta. En el peor de los casos puede explotar poniendo en riesgo el bienestar del usuario.
- **Salud de la batería:** La degradación de la batería es extremadamente sensible a la operación de la misma fuera de la zona indicada. Si la temperatura de operación o la tensión máxima de carga es excedida esto provoca una aceleración en la degradación de su vida útil.

- **Autonomía:** Consideremos que el circuito de protección detecta que una de las baterías se encuentra descargada a niveles cercanos de operación insegura. En este caso, la protección frena la descarga del pack por una sola celda y el resto se encuentran con voltajes más altos y, por lo tanto, con un remanente de energía para entregar a la carga desaprovechando la capacidad del pack entero.

Lo que conlleva la implementación de un sistema de administración de baterías (*BMS* por sus siglas en inglés Battery Management System). En definitiva, un BMS es un dispositivo encargado de controlar las funciones vitales de las baterías para que operen de forma correcta y segura, con el objetivo de otorgar seguridad al usuario y prolongar la autonomía del vehículo. Las funciones más relevantes que llevan a cabo estos sistemas son:

- Protección del pack para su operación en la región segura tanto en tensión, corriente como también en temperatura.
- Ecualización de las celdas individuales del pack, es decir, controlar que la carga entre celdas sea uniforme
- Estimación del estado de carga del pack de batería (*SoC* por sus siglas en inglés State Of Charge).
- Estimación del estado de salud del pack de batería (*SoH* por sus siglas en inglés State Of Health).
- Informar a la computadora central del vehículo los distintos parámetros del pack de baterías.

Además de las problemáticas mencionadas anteriormente, en el mercado actual se venden una gran variedad de BMS con escasa documentación sobre el mismo, dificultando su implementación con otros dispositivos, tales como computadoras centrales de vehículos eléctricos hasta UPS.

Por su contraparte, existen solamente dos proyectos de código/hardware abiertos relacionados al desarrollo de BMS, detallados a continuación.

1.1.1. foxBMS

foxBMS es un proyecto desarrollado por el Instituto de Sistemas Integrados y Tecnologías de Dispositivos de la sociedad *Fraunhofer* o también llamado *Fraunhofer IISB* (del inglés *Institute for Integrated Systems and Device Technology (IISB)*), una organización de investigación alemana que comprende 72 institutos esparcidos por todo el territorio alemán.

El desarrollo de este proyecto es el resultado de 15 años de investigación en el área de energías renovables y es diseñado para administrar innovadores prototipos de sistemas de baterías basados en la tecnología iones de litio, desde pocas celdas conectadas en serie hasta centenares de kWh y kW, especialmente para sistemas que requieren altos niveles de fiabilidad.

El proyecto no tiene intenciones de ser usado de forma comercial en productos ya que no cumple con estándares específicos y requieren determinados certificados para ser vendidos en el mercado. Solamente cumple con el propósito de ser una plataforma de ensayo y desarrollo que provee todas las funcionalidades del manejo de la complejidad y tamaño de los sistemas de almacenamiento más avanzados al día de la fecha.

Si bien el mismo tiene extensa documentación, originalmente fue desarrollado para manejar packs de 12 a 18 celdas en serie, lo cual excede el propósito de la aplicación en cuestión por lo que no resulta viable para ser implementado de forma directa. También el hardware del proyecto es extensivamente costoso y complejo, ya que implementa varios microcontroladores e integrados dedicados hasta FPGAs (del inglés, *Field Programmable Gate Arrays*).

1.1.2. openBMS

A diferencia de *foxBMS*, este proyecto fue desarrollado por ingenieros independientes con el objetivo de diversificar los proyectos abiertos relativos al tema en cuestión.

Este proyecto busca desarrollar un BMS capaz de manejar un pack de baterías de 4 a 96 celdas en serie, realizar el balanceo de las mismas y comunicar las variables del pack a través del protocolo CAN.

Si bien, se encuentran todos los archivos del proyecto a disposición del público, la documentación es muy escasa para ser implementado fácilmente para un proyecto relacionado.

En definitiva, la complejidad en el manejo de grandes packs de baterías basadas en celdas de litio-ion y la falta de proyectos abiertos disponibles relacionados al tema, son la fuente de motivación para llevar a cabo el presente trabajo.

Finalmente, el informe se encuentra dividido en varias secciones, en la sección 2 se realiza una descripción en alto nivel del proyecto, detallando los objetivos generales, las especificaciones y requerimientos del trabajo, a continuación de esa sección, se encuentra el fundamento teórico (Sección 3), donde se detalla el funcionamiento de una celda de litio-ion, desarrollo del modelo de las celdas elegidas, los algoritmos utilizados en el proyecto en conjunto con todo su desarrollo matemático, por último se presentan las secciones 4 y 5 donde se describe el desarrollo tanto del firmware y hardware del dispositivo en conjunto con los ensayos realizados para validar el dispositivo respectivamente. Finalmente, en la sección 6 se desarrollan las conclusiones y futuros proyectos a continuar sobre el eje de estudio.

2. Descripción

2.1. Objetivos Generales

Como solución a los problemas planteados en la sección anterior, se propone desarrollar un BMS que cumpla con los siguientes requisitos:

- Proteger el pack de baterías evitando que el mismo salga de su zona de operación segura, tanto en tensión, corriente como en temperatura evaluando los umbrales correspondientes de operación para las celdas de Litio-Ion.
- Estimar el estado de carga en tiempo real utilizando estos datos con el fin de llevar al sistema al punto de operación óptima.
- Balancear la carga entre celdas priorizando el menor costo energético posible del sistema y la mayor autonomía final del pack.
- Comunicar los parámetros fundamentales del pack a una computadora central a través de algún protocolo estandarizado.

Para lograr estos objetivos, se plantea un estudio pormenorizado del estado del arte de la temática en cuestión procurando seleccionar las prácticas y metodologías más adecuadas para la solución del problema planteado, a partir de un estudio teórico. Finalmente se validará la solución elegida a partir de la implementación y ensayo de la solución desarrollada.

2.2. Especificaciones

El sistema a implementar debe ser capaz de poder administrar un pack de baterías de 6 módulos conectados en serie, donde cada módulo está compuesto por 3 celdas en paralelo encargado de:

- Sensar la tensión de las celdas individuales del pack y de la corriente que circula desde y hacia el pack así como también la temperatura media.
- Realizar el balanceo de los módulos que componen a la batería.
- Proteger el mismo, desconectando el pack de baterías de la carga frente a operaciones fuera de la zona segura.
- Estimar el estado de carga y detectar las celdas que se encuentran en desbalance utilizando una unidad de cómputo como por ejemplo, un microcontrolador o MCU (del inglés *Microcontroller Unit*).
- Controlar el proceso de carga del pack de baterías.
- Comunicar las variables del sistema a una computadora central a través de un protocolo especificado

La descripción anterior se puede visualizar en el Diagrama de Bloques (DB) de la Figura 2. Como puede observarse, el microcontrolador es el encargado de comunicarse y comandar los módulos de protección, equalización

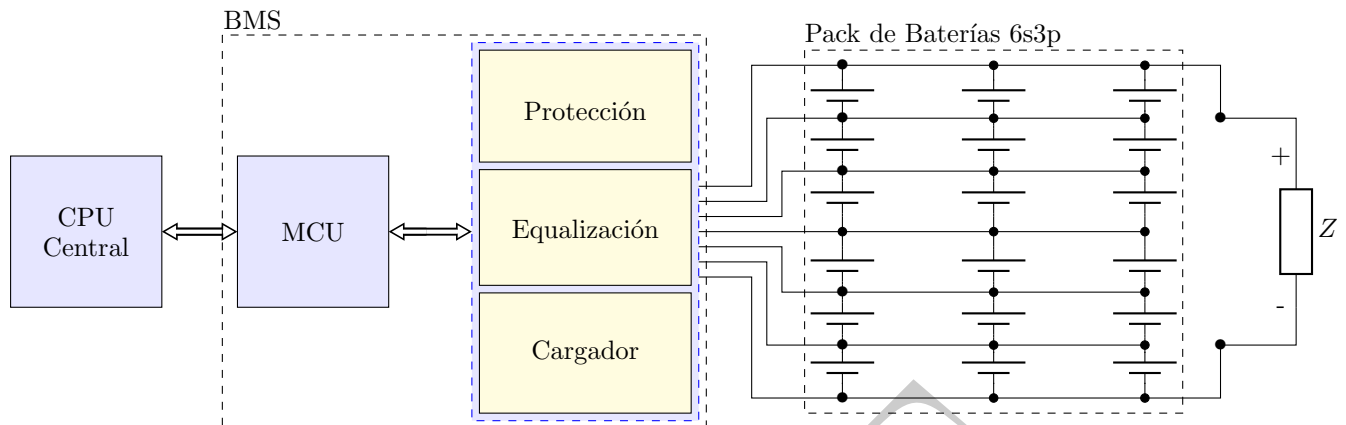


Figura 2: Diagrama en Bloques del BMS y el pack de baterías

y carga de la batería, como también obtener variables de los mismos para poder estimar el SoC, determinar el desbalanceo de una o más celdas y tomar acción al respecto, y por último, pero más relevante, comandar las protecciones en caso de una falla y/o alerta de la batería. De forma simultánea, el mismo debe estar a cargo de comunicar las distintas variables del sistema a una computadora central.

3. Aspectos Teóricos

3.1. Batería de Litio-Ion

La energía eléctrica ha empoderado a la sociedad desde su descubrimiento y, gracias a sus avances tecnológicos, el acceso a la misma se ha convertido mas facil y mas eficiente, aun así con la ausencia de conexiones eléctricas en la cercanía. Sumado a eso, tambien nos dirigimos a una sociedad que aprovecha de la movilidad a medida que los dispositivos dependen menos de una conexión eléctrica local.

En gran parte, estos desarrollos son posibles gracias al descubrimiento del litio-ion y su aplicacion en baterías. Este tipo de batería ha revolucionado la tecnología en almacenamiento de energía y ha logrado impulsar la revolución digital empoderando los dispositivos moviles, a través de su gran capacidad y densidad energética.

3.1.1. Principios básicos

El principio básico de funcionamiento de una batería, en su configuración básica, consiste en (*fig. 3*) una celda compuesta por dos electrodos, cada una conectada a un circuito eléctrico, separado por un electrolito que es capaz de acomodar cargas dentro de sí. Frecuentemente, los electrodos son físicamente separados por una barrera que previene que estén en contacto físico entre ellos, evitando así un corto circuito en la batería. En descarga, cuando la batería entrega corriente al circuito, toma lugar un proceso de oxidación en el electrodo negativo (ánodo), resultando en un movimiento de electrones a través del circuito. Por el otro lado, en el electrodo positivo (cátodo), ocurre un proceso de reducción, reabastecido por los electrones del circuito. El voltaje de la celda depende fuertemente de la diferencia de potencial entre los electrodos, y del proceso espontaneo en su totalidad. Para baterías recargables el proceso puede ser reversible aplicando electricidad externa produciendo un proceso complementario de *redox* (reducción-oxidación) en los electrodos. Este proceso es dependiente de la energía y es no espontáneo, es decir, que sucederá si y solo si un agente externo participa en el proceso.

En base a este principio de funcionamiento, surgen una gran variedad de tecnologías, partiendo de la pila voltaica, hecha de dos discos de metales distintos, uno de zinc y otro de cobre o plata, separados por un dieléctrico (como cartón o cuero) sumergido en una solución electrolítica. Durante la operación, el disco de zinc actua como ánodo, liberando electrones al circuito y produciendo iones de metal (proceso de oxidación), mientras que la reacción en el electrodo opuesto depende de las condiciones de trabajo. En presencia del aire, el metal de cobre es parcialmente oxidado a CuO, y la reducción de CuO a Cu se da en el electrodo. En la ausencia de aire,

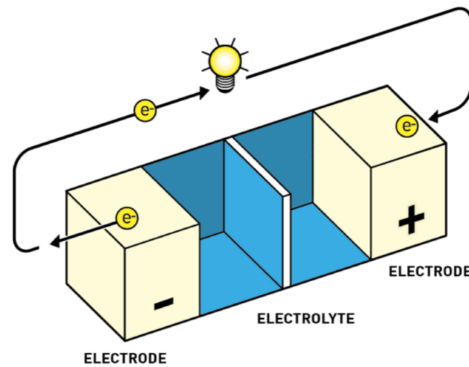


Figura 3: Diagrama del principio básico de funcionamiento de una batería en el proceso de descarga.

los protones en el electrolito son reducidos a hidrógeno en la superficie del cobre. El voltaje de la celda es de aproximadamente 0.8-1.1V, dependiendo de la exposición al aire. Esencialmente, la pila voltaica es una batería no recargable.

Después surgieron las baterías de plomo-ácido, que su principio de operación es similar a las baterías voltaicas expuestas al aire, pero con la posibilidad de ser recargadas. Esta tecnología se basa en dos electrodos de plomo, donde uno se encuentra parcialmente oxidado, en este caso es óxido de plomo (PbO_2), separado por ácido sulfúrico que contiene un electrolito. Durante el proceso de descarga, ocurre un proceso de oxidación en el electrodo de plomo (ánodo), produciendo electrones, protones y sulfato de plomo (PbSO_4), mientras que el óxido de plomo es reducido a PbSO_4 en el cátodo. En este caso, el potencial de una celda es de alrededor 2V.

Otro logro en el desarrollo de baterías, ocurrió en el 1899 cuando se desarrolló la primera batería de níquel-hierro (Ni-Fe) y níquel-cadmio (Ni-Cd) o también conocidas como baterías alcalinas, que fueron predecesoras del híbrido níquel-metal (Ni-MH) que fue comercializada en 1898.

Las baterías anteriores son basadas en soluciones acuosas, y la densidad energética de las mismas no es alta, específicamente son menores a los 100Wh/kg. Para incrementar la densidad energética de estas baterías, es necesario encontrar una estabilidad electroquímica del agua ya que juega un rol muy importante en ello. Además, cuando ambos electrodos utilizando el alto potencial del plomo, el voltaje de salida solo puede alcanzar un máximo de 2.2V. Como resultado, con la necesidad de incrementar la densidad energética de una celda, se descubrió el potencial del metal de litio y su aplicación en las celdas que llevan su nombre.

3.1.2. Litio

El litio es un metal descubierto en 1818 que tiene excelentes propiedades para servir como material para el desarrollo de baterías. Es el metal más liviano con una densidad de 0.53g/cm^3 . También tiene un potencial de reducción muy bajo, que lo hace ideal para celdas de alta densidad y alto voltaje. Sin embargo, es un metal reactivo que debe ser protegido, por ejemplo, del agua y del aire, ya que el contacto con estos provoca que el mismo sea muy complicado de dominar, imposibilitando su uso para la aplicación deseada. Esta protección al medio no es trivial, y factores, tales como su carácter inerte, punto de fusión, la estabilidad del *redox*, solubilidad de iones de litios y sales, velocidades de transferencia ion/electrón, viscosidad, entre otros deben ser considerados.

Las primeras baterías de litio alcanzaron el mercado en 1970 y la comercialización de las mismas comenzó en Japón en el año 1991, cuando *Sony Corporation* presentó el primer modelo.

Las baterías de litio-ion son definidas en **defliion** como almacenadores de energía que utilizan iones de Litio como portadores de carga. En base a esta definición, el término *batería de Litio-Ion* no se corresponde con una sola composición química, como lo son las baterías de ácido o níquel-cadmio, si no que expresa una familia de baterías que dependen de los iones de litio pero que pueden ser conformadas por distintos materiales.

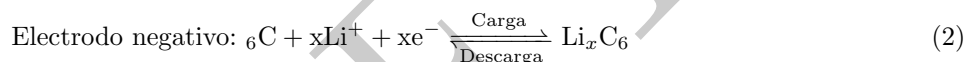
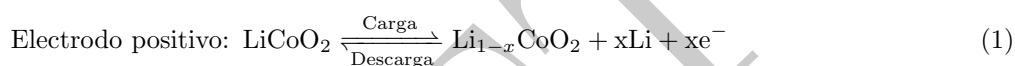
A diferencia de las baterías de ácido, hay dos razones principales por las cuales las baterías de litio-ion han crecido en popularidad en tan poco tiempo: su excelente rendimiento y la capacidad de adaptarse al creciente

mercado de la electrónica de consumo, como por ejemplo, videograbadoras, celulares y computadoras. A partir de la primer década del siglo XXI, se comenzaron a utilizar en vehículos eléctricos, como también en grandes sistemas de almacenamiento de energía, capaces de alimentar barrios residenciales enteros.

Desde el 2000 al presente, se desarrollaron varios tipos de baterías basadas en el litio. Entre ellas se encuentran las baterías de litio-sulfuro (Li-S) y litio-aire (Li-air), cuya densidad energética teórica ronda los 2600Wh/kg y 11400 Wh/kg, respectivamente. En 2012, se desarrolló una batería de litio-ion recargable acuosa o ARLB (del inglés *Aqueous rechargeable lithium batteries*), que utiliza metal de litio recubierto como ánodo en una solución de electrolitos mejorando ampliamente la densidad energética.

3.1.3. Principio de funcionamiento

El principio de los procesos de carga y descarga en las baterías de litio-ion se basan en utilizar óxido de litio-cobalto (LiCoO_2) y grafito como típicos materiales de electrodo. La Figura 4 ilustra el principio de operación, y las reacciones de los electrodos se expresan en las Ecuaciones 1, 2 y 3



El LiCoO_2 tiene una estructura reticular octaédrica con un arreglo alternativo de capas de Li^+ y Co^{3+} . Durante el proceso de carga, los iones de litio (en estado iónico) se desintercalan de la estructura de capas del material del electrodo positivo, liberando electrones, al mismo tiempo, el Co^{3+} se oxida convirtiéndose en Co^{4+} . Por el otro lado, durante el proceso de descarga, con la intercalación de Li^+ dentro de la retícula, el Co^{4+} es reducido a Co^{3+} , ganando electrones, además se obtienen electrones de la retícula para convertirse en litio en estado atómico. Durante este proceso, el estado atómico del litio pierde electrones convirtiéndose en iones de litio, este proceso se puede resumir en que el ánodo provee al electrodo positivo iones de litio. Dado que el litio se mueve entre el electrodo positivo y negativo hacia ambos lados a este tipo de baterías se las denomina, como una batería mecedora (del inglés, *rocking chair*).

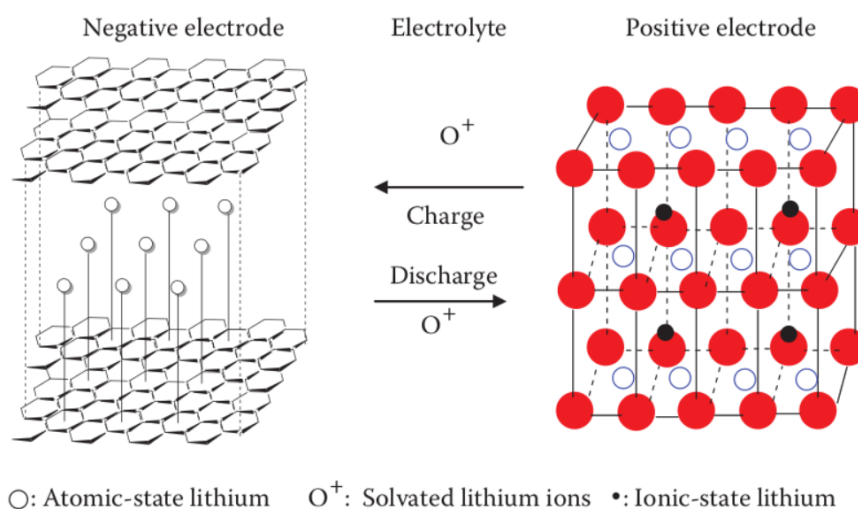


Figura 4: Esquemático del principio de operación de una batería de litio-ion.

La mayoría de estas baterías usan materiales de carbón, tales como el grafito y el carbón duro como ánodo. Otros utilizan óxidos de metales, como por ejemplo, el titanato de litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) y el pentóxido de niobio

(Nb_2O_5), debido a que pueden aceptar iones de litio cuando son cargados, y liberarlos en el proceso de descarga, éstas reacciones se denominan como inserción y extracción respectivamente. Los potenciales de reacción de estos materiales son mucho más bajos que los electrodos de hidrógeno estándares, por lo tanto, el electrolito debería ser estable inclusive para niveles de potencial tan bajos. Esta es la razón por la cual, los electrolitos orgánicos, que consisten de solventes orgánicos y sales de litio, son utilizados en las baterías de Litio-ion en vez de electrolitos acuosos.

El material activo del cátodo debe contener Litio en su composición química para proveer una fuente de iones de litio. Durante la primer etapa de desarrollo de las celdas de litio, se utilizaba óxido de litio-cobalto. También se estudió el uso de LiNiO_2 como material activo para el cátodo pero fue inmediatamente descartado debido a su inestabilidad térmica. Sin embargo, se desarrollaron y utilizaron derivados de esta composición, formulados como $\text{LiM}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_2$ (M: elemento metálico tales como, el Co, Mn, Al, Mg).

Comparada con las baterías de litio-ion originales en los principios de 1990, el rendimiento de las mismas ha sido mejorado de forma significativa con el paso del tiempo. Los últimos desarrollos tienen ventajas dominantes sobre las baterías recargables tradicionales:

- **Alta densidad energética:** La densidad energética por volumen y masa para una batería de litio modelo 18650 puede alcanzar los 500 Wh/dm^3 y 230 Wh/kg , respectivamente, que además se encuentra en continuo aumento a medida que se investigan y desarrollan nuevas tecnologías.
- **Alto voltaje de salida (3.6V):** Esto es 3 veces mayor a las baterías recargables de Ni-Cd o Ni-MH.
- **Alta potencia de salida:** Pueden alcanzar hasta 2kW/kg for un corto período de tiempo.
- **Baja auto-descarga:** La descarga media de las celdas de litio son menores a un 3 % mensuales, que es la mitad que las celdas basadas en Ni-Cd y Ni-MH.
- **Bajo efecto de histéresis** A diferencia de las celdas de Ni-Cd y Ni-MH las celdas de litio tienen un efecto de histéresis despreciable con el paso de los ciclos de carga-descarga de la misma, resultando en un mejor ciclo de vida con respecto a los otros tipos de celdas.
- **Ciclos de carga-descarga rápidos:** Las baterías de litio-ion pueden ser cargadas con corrientes de hasta un 80 % de su capacidad. Es decir, si la batería tiene una capacidad de 3Ah, la misma se puede cargar a una corriente de 3A.
- **Alta eficiencia culombica:** La Eficiencia Culombica o EC, es un parámetro que permite obtener que porcentaje del material activo se convierte en energía. Su medición es importante porque permite medir el desempeño de la batería con respecto a otras tecnologías. En el caso de las celdas de Litio-ion, la Eficiencia Culombica se mantiene casi en un 100 % inclusive después del primer ciclo.
- **Gran rango de temperaturas:** Las baterías de litio-ion pueden operar entre -25°C a $+45^\circ\text{C}$. Las investigaciones actuales quieren extender ese rango desde -40°C a $+70^\circ\text{C}$ con mejoras en el electrolito y los materiales de los electrodos.

Esto depende fuertemente del alto voltaje, porque la energía específica es el producto del voltaje de la celda y su capacidad específica, lo que hace que las celdas de litio-ion se destaquen a comparación de otras tecnologías, como por ejemplo, las celdas de Niquel-metal con un voltaje de 1.2V pero con mayor capacidad tienen menor energía específica.

- **Alta eficiencia energética:** Esto se debe a dos factores principales, por un lado se debe a la alta eficiencia de carga y descarga debido a que no hay pérdidas durante las reacciones químicas de la celda en ambos procesos y, nuevamente, esto se atribuye también a su alto voltaje. Éste último, se debe a que la eficiencia energética, es el restante de la tensión operativa en relación a la tensión en circuito abierto. Suponiendo que tenemos una celda A con una tensión de circuito abierto (V_A) mayor que otra celda B con una tensión V_B , que tiene la misma pérdida de voltaje X, la eficiencia de A va a ser mayor que la de B, dado por:

$$\frac{V_A - X}{V_A} > \frac{V_B - X}{V_B}$$

- **Larga duración:** Esto se atribuye a que las reacciones dentro de la celda, durante los ciclos de carga y descarga, no realizan cambios morfológicos significativos. Esto es bastante distinto con las baterías de

ácido, donde la reacción que se lleva a cabo involucra la disolución y deposición de materiales, lo que representa grandes cambios morfológicos durante los ciclos de carga y descarga.

Por último, las baterías de Litio-ion utilizan electrolitos orgánicos. El electrolito permite que la celda tenga altos niveles de tensión, sin embargo la combustibilidad del mismo genera problemas de seguridad. Por lo tanto, es clave para el desarrollo de estas baterías minimizar la causa y efecto de la combustión de la misma sin sacrificar rendimiento.

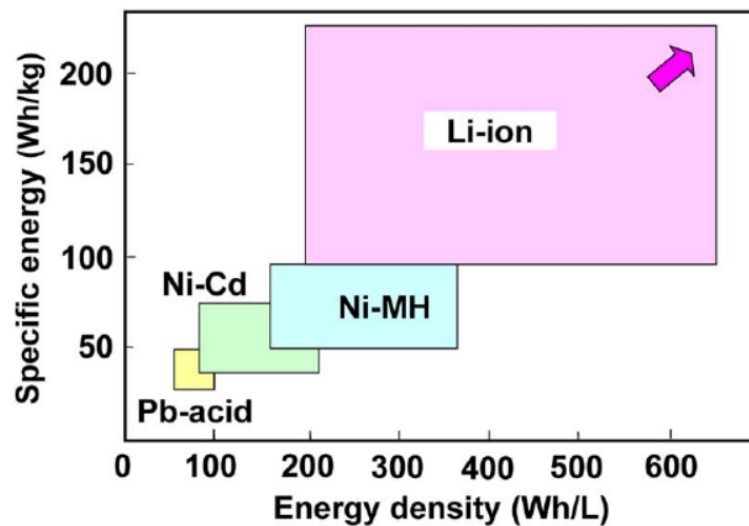


Figura 5: Gráfica comparativa entre distintas tecnologías de baterías.

El estado de las baterías de Litio-ion con respecto a las otras tecnologías se puede observar en la Figura 5, donde se puede observar la dominancia de las mismas en términos de densidad energética (Wh/L) y energía específica (Wh/kg). La flecha de la esquina derecha indica que ésta tecnología se encuentra en constante desarrollo y puede mejorar con el paso del tiempo.

La aplicación práctica de las baterías de Litio-ion involucra la integración de las mismas dentro de un sistema, involucrando un controlador central (BMS), sistemas de refrigeración, sensores y conectores entre las celdas. En tales sistemas las celdas pueden conectarse de distintas formas, por ejemplo, pueden conectarse en paralelo, para incrementar la capacidad del pack, en serie, para incrementar el voltaje, o combinadas para lograr ambos cometidos al mismo tiempo. Por ejemplo, un auto eléctrico de la marca *Tesla*, posee un pack de baterías de 85KWh compuesto por 7104 celdas, con una arquitectura de 16 módulos conectados en serie, donde cada uno posee 444 celdas conectadas en paralelo.

3.2. Modelado de baterías de litio-ion

Como se menciona anteriormente, las celdas de litio-ion son utilizadas ampliamente en el mercado de consumo electrónico para un gran espectro de aplicaciones. Sin embargo, su fiabilidad y tiempo de vida son limitados y depende considerablemente de condiciones ambientales como también su uso histórico. Por lo tanto, se necesitan modelos de baterías exactos y eficaces para que sean correctamente monitoreados por un BMS.

Una celda, como se describe en la sección ??, puede ser caracterizado como un sistema electrotermoquímico y actualmente existen una cantidad numerosa de modelos que logran describir el funcionamiento tanto estático como dinámico de una celda de litio. Un modelo exacto y eficiente de una celda de litio-ion permite optimizar al máximo el ciclo de vida de una batería ya que nos permite obtener información sobre el SoC como también conocer parámetros críticos de la batería como el perfil de descarga de la misma permitiendo ajustar los distintos algoritmos de protección y/o equalización que se apliquen en el desarrollo del BMS.

A continuación se definen y se comparan los distintos modelos disponibles en la literatura actual. Esta comparación es basada en tres criterios:

- **Precisión:** La precisión define cuan cercano un modelo puede predecir los parámetros y/o valores de las variables de interés de una batería.
- **Complejidad:** Se refiere a la cantidad de parámetros que necesita el modelo. Dependiendo de la complejidad del modelo, la computación del mismo tomara más o menor tiempo, cuestionando si es útil o no para una aplicación en tiempo real.
- **Interpretación física:** Esto se define como el nivel de interpretación analítico que el modelo puede dar con respecto al funcionamiento interno de una batería.

3.2.1. Modelos Físicos

También conocidos como cajas blancas (del inglés, *white boxes*), los modelos físicos son modelos de bajo nivel con un nivel de exactitud muy alto. Permiten describir la estructura de los materiales y logran describir los complejos fenómenos electroquímicos que suceden dentro de celda, denominados fenómenos termodinámicos, cinéticos y de transporte.

Schmidt (2013) presenta un resumen del fenómeno físico como se muestra en la Figura 6. En ella, se pueden observar cuatro procesos en tres regiones de operación: las dos fases sólidas del material de los electrodos, y la fase líquida del electrolito.

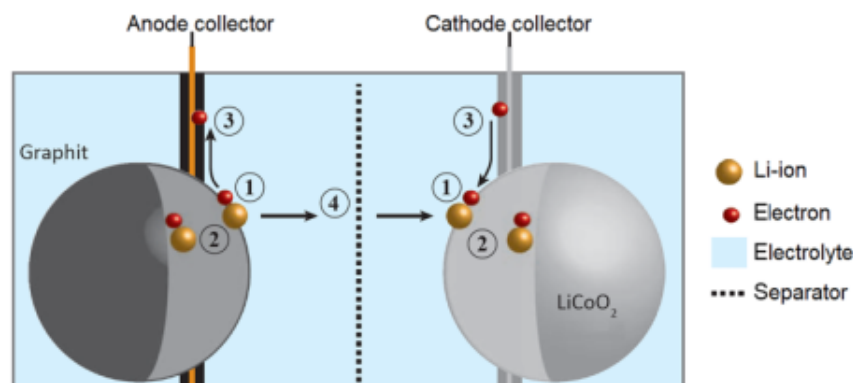


Figura 6: Descripción gráfica del proceso interno de una celda de litio ion.

El primer proceso se denomina el *pasaje* de cargas y se da en la primer región de operación: La fase sólida del electrodo. Este proceso describe la intercalación como también la desintercalación de los iones de litio dentro del material activo. El segundo proceso, ocurren en la misma región, y se la denomina la *difusión del estado sólido* de los iones de litio forzado por el gradiente de concentración de iones entre la superficie y el volumen del electrodo. El tercer proceso, se describe como la *conducción de electrones* entre un electrodo y otro a través

de un circuito externo. Por último, el cuarto proceso es la *conducción de iones* en el electrolito a través del separador, que también es forzado por un gradiente de concentración y basado en la difusión pero ocurre a mucha mayor velocidad que en los electrodos.

Estos tipos de modelos dependen de una gran cantidad de parámetros como también de ecuaciones diferenciales interdependientes para poder replicar el comportamiento de una celda, como por ejemplo, coeficientes de difusión y propiedades de los materiales son variables relevantes utilizadas en estas ecuaciones. En [3] se basa en un modelo unidimensional a lo largo de la sección de la celda, dividiéndolo en cinco secciones, aplicando las siguientes ecuaciones diferenciales:

■ **Conservación de carga en un sólido homogéneo**

$$\nabla(-\sigma \nabla \varphi_s) = -j^{Li} \quad (4)$$

■ **Conservación de masa en un sólido homogéneo**

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \nabla \cdot (D_s \nabla c_s) \quad (5)$$

■ **Conservación de masa en un electrolito homogéneo**

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_e \nabla c_e) = \left(\frac{1 - t_+^0}{F} \right) j^{Li} \quad (6)$$

■ **Conservación de carga en un electrolito homogéneo**

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \varphi_e + \kappa_D \nabla \ln c_e) = -j^{Li} \quad (7)$$

■ **Ecuación de Butler-Volmer:** Esta ecuación representa el movimiento de cargas en una unión entre un sólido conductor y una solución de iones de litio con el efecto de doble capa

$$j^{Li} = a_s i_0 \left[e^{\frac{F\eta}{2RT}} - e^{-\frac{F\eta}{2RT}} \right] + a_s C_{dl} \frac{\partial(\varphi_s - \varphi_e)}{\partial t} \quad (8)$$

En las ecuaciones 14 - 18, se utilizan las siguientes variables:

- σ : Conductividad de la fase sólida del electrodo.
- s : Potencial eléctrico de la fase sólida.
- e : Potencial eléctrico del electrolito.
- j^{Li} : Densidad de corriente producida por el consumo de iones de litio.
- t : Tiempo transcurrido.
- c : Concentración de iones de litio.
- D : Coeficiente de difusión del material.
- F : Constante de Faraday.
- ε : Fracción por volumen.
- t_+^0 : Número de transferencia.
- κ : Conductividad del electrolito.
- κ_D : Conductividad de la difusión.
- i_0 : Corriente de intercambio.
- η : Sobretenensión.
- a : Área específica de la sección.
- C_{dl} : Capacidad de la doble capa.

3.2.2. Modelos empíricos

Los modelos empíricos, o también conocidos como *cajas negras* debido a que proveen pobres conocimientos sobre el funcionamiento interno del sistema, se basan en parámetros empíricos que no tienen ningún significado físico en algunos casos. Las aproximaciones matemáticas que se utilizan para definir la función transferencia entre las entradas y las salidas de estos modelos permiten que los mismos sean fáciles de configurar como también generar predicciones y respuestas rápidas. Sin embargo, la exactitud es limitada, especialmente si el modelo es muy simple, aunque puede ser mejorado si se combina con un modelo de bajo nivel.

3.2.3. Modelos abstractos

También conocidos como *cajas grises*, los modelos abstractos proveen una representación alternativa de la entidad física a modelar. En el contexto de las baterías de litio-ion, estos modelos presentan una representación equivalente del sistema. A pesar de que hay varias formas posibles de realizarlo, la más utilizada dentro de la bibliografía es su representación en un circuito eléctrico equivalente. Los modelos basados en circuitos son simples y prácticos porque permiten que el complejo proceso electroquímico que ocurre dentro de la celda sea reemplazado por un simple circuito. La correlación con las dinámicas de la batería son preservados sin comprometer exactitud en su predicción.

El costo de configuración para tales modelos es reducido en comparación a modelos de bajo nivel, sin embargo éstos requieren de *Look-up Tables* para coincidir con los datos experimentales. La complejidad de los mismos es más flexible dependiendo de la unidad de cómputo como también de la memoria disponible. Los mismos se pueden acomplejizar utilizando efectos de segundo orden, tales como la temperatura, degradación de la capacidad como también el envejecimiento de las celdas.

A continuación se describen los modelos más utilizados dentro de la literatura actual.

3.2.3.1 Circuito simple

El circuito eléctrico más simple que representa una batería de litio ion es un circuito con constante de tiempo cero que se puede observar en la Figura 7. Si el usuario no necesita representar la dinámica de la batería, este modelo es capaz de representar el comportamiento estático del sistema.

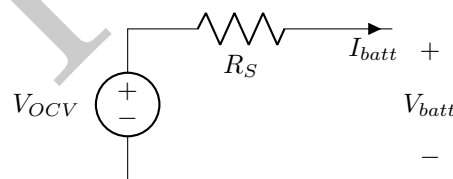


Figura 7: Modelo de constante de tiempo cero para una celda de litio ion.

El OCV se relaciona directamente con el SoC, definido en la Ecuación ??

$$SoC = \frac{C_{current}}{C_{full}} 100\% \quad (9)$$

Donde $C_{current}$ es la cantidad de carga disponible en la celda y C_{full} es la capacidad de la celda cuando está completamente cargada. La ecuación del modelo es expresada en la Ecuación 10.

$$V_{batt} = V_{OC} - R_S \times I_{batt} \quad (10)$$

La curva del OCV como función del tiempo muestra una caída del voltage para ciertas condiciones de descarga. Los importantes parámetros que afectan el proceso de descarga son la corriente de descarga, la temperatura y el historia de carga/descarga.

El efecto de la temperatura en el efecto de descarga es visto a temperaturas mucho más bajas que a temperatura ambiente, donde la actividad química disminuye y la resistencia de la batería aumenta. A temperaturas más

altas que la ambiente, la resistencia interna disminuye, mejorando la velocidad de la actividad química, por lo tanto, y desafortunadamente, induciendo un efecto de auto descarga.

La desventaja principal del modelo de constante de tiempo cero es que no contempla la dinámica de las celdas. Sin embargo, esto puede ser mitigado de forma fácil agregando un tanque RC en serie a la resistencia (fig. 8), que describe la repuesta de la batería durante el proceso de carga/descarga.

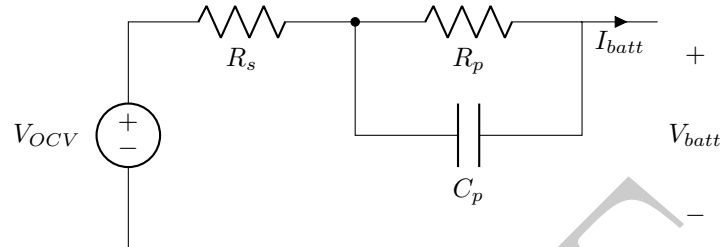


Figura 8: Modelo de primer orden para una celda de litio ion.

La exactitud del modelo y su comportamiento dinámico, pueden ser mejorados agregando más tanques RC al circuito, esto a su vez incrementa la complejidad del mismo.

3.2.4. Modelos basados en el espectro de impedancia

Para describir la dinámica de una celda a niveles de medianas y altas frecuencias, se utiliza el método de impedancia electroquímica por espectroscopía (, del inglés). Sin embargo, para aplicar este método, es necesario un sistema lineal invariante en el tiempo, por lo tanto, dado que las baterías son sistemas altamente no lineales durante el proceso de carga y descarga, el es aplicado a dados niveles de SoC cuando la batería tiene un determinado tiempo de descanso, para garantizar determinada linealidad necesaria.

La impedancia (Z) es una variable compleja representada en en el diagrama de Nyquist por una componente real y otra imaginaria. La Figura 19 muestra un típico diagrama de Nyquist, resultado de mediciones de una celda de litio-ion. Cuantitativamente, los valores dependen de varios factores, como mencionamos anteriormente, la temperatura, el SoC y la corriente de carga.

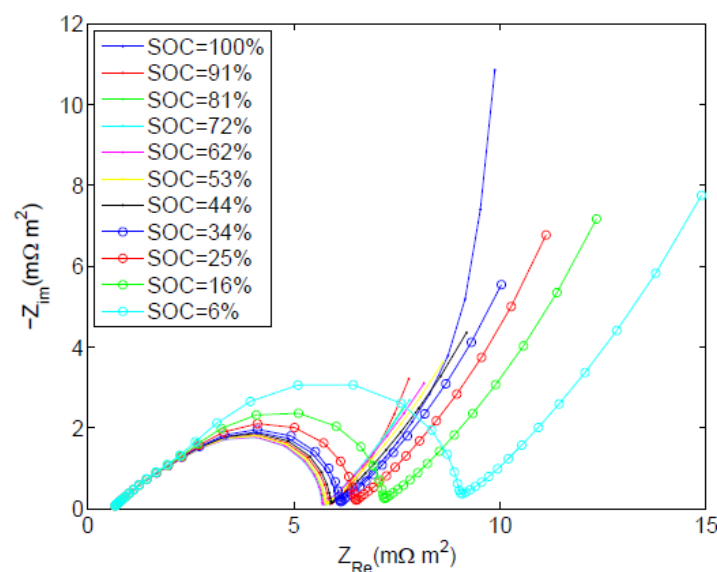


Fig. 4. Nyquist plot of cell impedance.

Figura 9: Diagrama de Nyquist - Espectroscopía Dieléctrica (EIS) de una batería de Li-Ion obtenida por barrido frecuencial.

La curva puede ser subdividida según los rangos de frecuencia en distintas secciones, como se puede observar en la Figura 10 que se pueden asociar con fenómenos físicos y electroquímicos bien definidos que ocurren dentro de la celda.

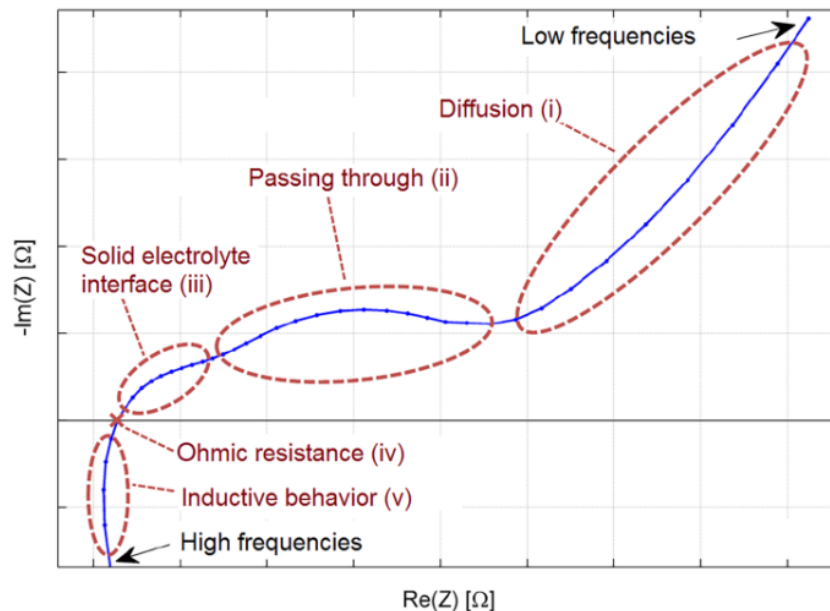


Figura 10: Secciones identificables dentro del diagrama de Nyquist.

La sección con $Z \ll 0$ consiste de tres áreas bien reconocibles. El arco a frecuencias muy bajas (cercas a DC) se asocia con el comportamiento de difusión introducido en la Sección ?? is representado por la impedancia de *estado sólido de Warburg*. El segundo arco a frecuencias un poco más altas (arco [ii] en Fig. 10) corresponde a la cinética de la transferencia de carga. El tercer y arco más pequeño arc cerca del eje real (arco [iii] en Fig. 10) representa los efectos entre capas de la interface sólida del electrolito.

El punto (iv) de la Figura 10 representa la resistencia óhmica total del sistema, incluyendo la resistencia del electrolito como también la de los electrodos. Este punto generalmente ocurre a una frecuencia dentro del rango de los KHz pero puede variar considerablemente con el diseño de la celda y los materiales utilizados.

Las altas frecuencias muestran un comportamiento inductivo con $Z \gg 0$ (sección (v) de la Figura 10) correspondiente a la estructura porosa de los electrodos y los conectores de la batería.

El circuito equivalente de la respuesta de la impedancia es introducido por Moss et al. (2008) y se puede observar en la Figura 11

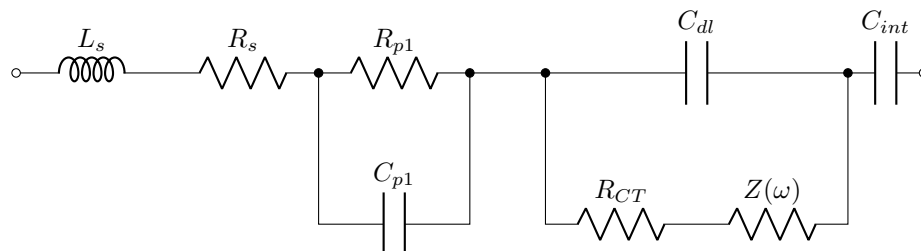


Figura 11: Modelo equivalente a la respuesta del

Donde los componentes representan las siguientes partes física de la celda:

- C_{dl} : Es la capacitancia electroquímica de doble capa de la celda.
- R_{CT} : Es la resistencia a la corriente faradáica

- C_{int} : Es la capacitancia de intercalación correspondiente a la acumulación de iones de litio dentro de la matriz del electrodo.
- $Z(\omega)$: Es la impedancia de estado sólido de Warburg que depende de la frecuencia del ensayo.

Moss et al. (2008) sugiere la substitución de la impedancia de difusión de Warburg con una cadena de tanques RC. La nueva cadena no refleja la impedancia del elemento de warburg pero representa una aproximación con una exactitud aceptable. Tomando esta aproximación en consideración, se valida el uso de modelos eléctricos para modelar celdas en un circuito compuesto por una fuente de tensión con una resistencia R_s y una cadena de tanques RC conectadas en serie. Esto es solo posible gracias a las relaciones de Kramers-Kronig (Schmidt, 2013), que pueden ser aplicadas en redes equivalentes, y sugiere que distintos circuitos puede tener una respuesta equivalente o similar sin tener la misma topología. En otras palabras, la batería puede ser modelada con una topología más simple con elementos de circuito que no tienen una directa interpretación física. Este modelo es válido, porque tiene la misma respuesta en frecuencia, y es más fácil de parametrizar.

3.2.4.1 Comparación de modelos y su evaluación para aplicaciones en vehículos eléctricos

La Tabla 1 presenta un vistazo general sobre la comparación de los modelos según el criterio previamente explicado. Los modelos simples pueden ser menos costosos desde un punto de vista computacional como también en desarrollo, a su vez, éstos son mas susceptibles a incertezas en los parámetros del modelo. Por el otro lado, modelos complejos necesitan mayor tiempo para resolver los algoritmos inherentes a ellos. Dependiendo de la aplicación, la extracción del método del modelo y usabilidad puede ser evaluado. Dentro de un ambiente de laboratorio, se puede invertir más tiempo para extraer un modelo más preciso. Sin embargo, en el campo se necesitan resultados de forma rápida para evaluar si las celdas son aptas para ser aplicadas en un vehículo, por ejemplo, en estos casos los modelos son utilizados para el desarrollo de un BMS como es lo que se busca en el presente trabajo.

Tener una extensa comprensión de la batería en estos casos no es necesario, aunque puede resultar beneficioso. Dado que el mismo es embebido dentro de una unidad de monitoreo en tiempo real, tal como un MCU y/o FPGA. Es más conveniente que el modelo sea simple, para que los tiempos de cómputo no sean muy altos comprometiendo niveles aceptables de exactitud en los mismos.

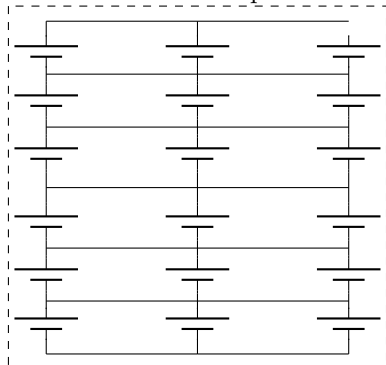
Modelos	Exactitud	Complejidad	Interpretación física	Aplicación apropiada
Físicos	Muy alta	>50 parámetros	Alta	diseño de de baterías
Empíricos	Media	2 a 3 parámetros	Baja	Predicciones
Abstractos	Media	2 a 30 parámetros	Limitada	Monitoreo y diagnóstico

Cuadro 1: Resumen de la comparación entre modelos de celdas de litio-ion.

3.2.5. Batería Seleccionada

En este caso utilizaremos celdas de Litio-ion modelo NCR18650PF para conformar el pack de baterías, integrando una arquitectura *6S3P*, es decir, 6 módulos conectados en serie donde cada uno esta compuesto por 3 celdas conectadas en paralelo. En la Figura 12 se muestra el esquemático de la arquitectura del pack como también una foto de la celda que se utilizará para conformar el pack.

Pack de Baterías 6s3p



(a) Esquemático de la arquitectura del pack de baterías.



(b) Foto celda NCR18650PF.

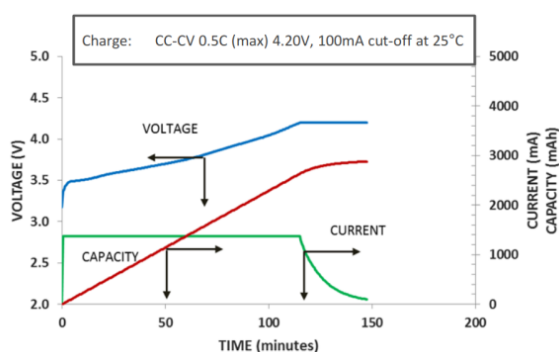
Figura 12: Pack 6s3p y Celda NCR18650PF.

Estas celdas se caracterizan por su cátodo, cuya composición química se basa en el óxido de litio níquel cobalto aluminio (LiNiCoAlO_2) y, según su hoja de datos [1], sus características eléctricas se pueden observar en la Tabla ??.

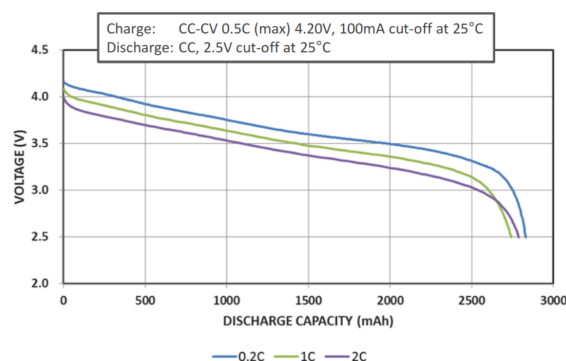
Especificaciones eléctricas	
Capacidad Específica	2700mAh
Capacidad	Mínimo: 2750mAh
	Típico: 2900mAh
Corriente de Descarga Máxima	10000mAh($\sim 3.5C$)
Rango operativo de tensión	2.5V - 4.2V
Voltaje Nominal	3.6V
Carga	CC-CV, Std. 1375mA, 4.20V, 4.0 hrs
Peso	48g
Temperatura	Carga: 0 a 45C
	Descarga: -20 a 60C
	Almacenaje: -20 a 50C
Densidad Energética	Volumétrica: 577Wh/l
	Gravimétrica: 207wh/kg

Cuadro 2: Especificaciones eléctricas de una celda de litio NCR18650PF

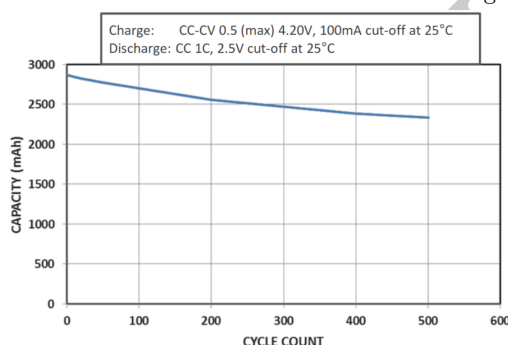
Por el otro lado, la hoja de datos también nos provee curvas significativas, como por ejemplo, la curva de carga (Fig. 13a), la curva de descarga para distintas corrientes (Fig. 13b) y la curva del ciclo de vida típico de la batería (Fig. 13c).



(a) Curva de carga.



(b) Curva de descarga en base a distintas corrientes de descarga (0.5C, 1C, 1.5C y 2C)



(c) Curva del ciclo de vida de una celda 18650

Figura 13: Curvas significativas celda Panasonic 18650PF

3.3. Sensado de Corriente

El sensado de la corriente de carga como de descarga del pack de batería juega un rol muy importante en el desarrollo exitoso de un BMS. Es a partir de conocer con precisión la magnitud de corriente que el sistema podrá mantener el pack de baterías operando dentro de la zona segura (SOA por sus siglas en ingles), monitorear la distribución de carga entre las celdas, implementar correctamente los algoritmos de equalización de carga y mantener un seguimiento preciso del estado de carga.

Existen en el mercado una gran variedad de tecnologías y soluciones para la medición de corriente en las diferentes aplicaciones. Algunas de las tecnologías mas relevantes, disponibles en el mercado son:

- Resistencia Shunt
- Transformadores de intensidad (TI)
- Bobina de Rogowski
- Sensores de Efecto Hall
- Sensores de Impedancia Magnética (MI)
- Sensores de Magnetoresistencia Gigante
- Sensores Ópticos (Experimental)

Dentro del amplio abanico de métodos y tecnologías utilizadas para la medición de corrientes los dos más elegidos e implementados en Sistemas de Administración de Baterías BMS son las mediciones a partir de resistencias Shunt y mediciones a partir de sensores de efecto hall.

3.3.1. Resistencia Shunt

La tecnología Shunt se vale del Sensado de la caída del voltaje sobre una resistencia de unos pocos mili ohmios en serie con el paso de la corriente incógnita para la medición indirecta de la corriente.

El método de sensado por resistencia tipo shunt presenta una de las mejores relaciones costos-efectividad, presentando un empaquetado compacto y aplicable en mediciones de corrientes tanto continua como alterna encontrando su frecuencia de corte por encima de las decenas de Mhz.

Las mediciones por resistencia shunt carecen naturalmente de aislación galvánica debiendo ser resuelta a partir del circuito de implementación. Generalmente, los shunts presentan bajo coeficiente de temperatura de resistencia, (Temperature Coefficient of Resistance (TCR) por sus siglas en ingles). Característica fundamental en las implementaciones de BMS en sistemas de vehículos eléctricos que permite aumentar el rango de temperatura de operación del sistema.

Aunque los shunts de corrientes operen bajo el principio de caída de voltaje ohmico, en la práctica las resistencias presentan una inductancia intrínseca que comprometen la precisión y el ancho de banda máximo de las mediciones.

3.3.2. Sensor de efecto Hall

El sensor de efecto Hall es un sensor de efecto magnético basado en el fenómeno físico homónimo que le da su nombre. El sensor de efecto Hall es un dispositivo aislado, no intrusivo que puede ser utilizado para medir corriente tanto continua como alterna de hasta unos cientos de kHz. El sensor Hall puede ser fabricado utilizando tecnología CMOS convencional pero a un costo mayor que las implementaciones con transformadores de corriente o bobinas de Rogowski.

El traductor de efecto Hall encuentra normalmente su límite de medición en los picos de corriente debido al fenómeno de saturación magnética del núcleo y encuentra su límite de ancho de banda en las frecuencias menores al MHz. A su vez, esta tecnología es sumamente sensible a la influencia de los campos magnéticos externos. Frente a estas limitaciones es común que los sensores de efecto Hall se implementen mayoritariamente con bobinas cerradas para lograr una mejor precisión y un rango mayor de operación dinámico.

El voltaje de offset presente en la medición del dispositivo es poco estable y varía fuertemente frente a las variaciones de temperatura de operación.

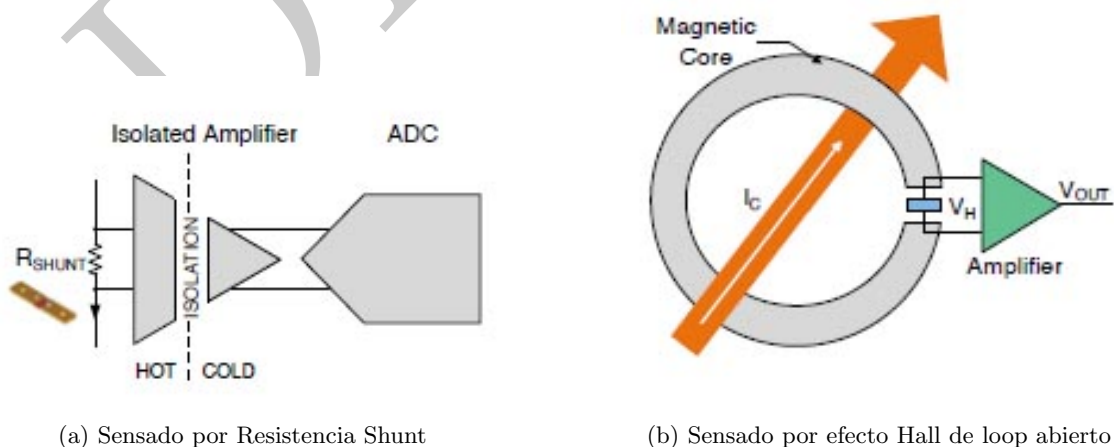


Figura 14: Diagramas - Métodos de sensado de corriente

3.3.3. Tecnología Seleccionada

Frente a los requerimientos y la naturaleza de un BMS hemos seleccionado la tecnología de sensado de corriente por resistencia Shunt. Actualmente existen en el mercado un sin número de soluciones de amplificadores

y moduladores aislados que permiten alcanzar precisas mediciones de corrientes con este método logrando minimizar las injerencias del entorno siempre y cuando se seleccione una resistencia Shunt adecuada.

Las ventajas de la medición a partir del método de resistencia shunt son:

- Bajo offset y baja susceptibilidad frente a influencias de campos magnéticos externos y variaciones de temperatura.
- Alta linealidad de la solución en todo el rango de voltaje en comparación a la solución basada en tecnología Hall, sobre todo en la zona cercana a cero y la de saturación del núcleo.
- Mejor resolución para mediciones de corriente continua frente a las soluciones basadas en mediciones de efecto Hall. Particularmente debido a la baja sensibilidad que presenta frente a las influencias de los campos magnéticos externos.
- Pueden soportar operaciones en ambientes de altas temperaturas manteniendo la linealidad debido a su bajo TCR. Los sensores de efecto Hall encuentran su rango de operación fuertemente acotado.
- Facilidad que presenta la tecnología para la integración en circuitos impresos priorizando el tamaño reducido.
- Disponibilidad en distribuidores nacionales

El integrado propuesto para el sensado de corriente es el INA226 de Texas Instruments. El INA226 es un conversor analógico digital de 16 bits (ADC) que implementa una interfaz compatible I2C para la comunicación con el módulo del control. El dispositivo monitorea simultáneamente la tensión que cae en una resistencia shunt y la del bus de alimentación. Permite múltiples calibraciones y seteos, entre ellos variar los tiempos de conversión y definir conversiones múltiples que al implementar internamente un multiplicador y divisor permite obtener lecturas directas de tensión y potencia en amperes y en Vatios.

Observamos en la figura 15 su implementación modelo.

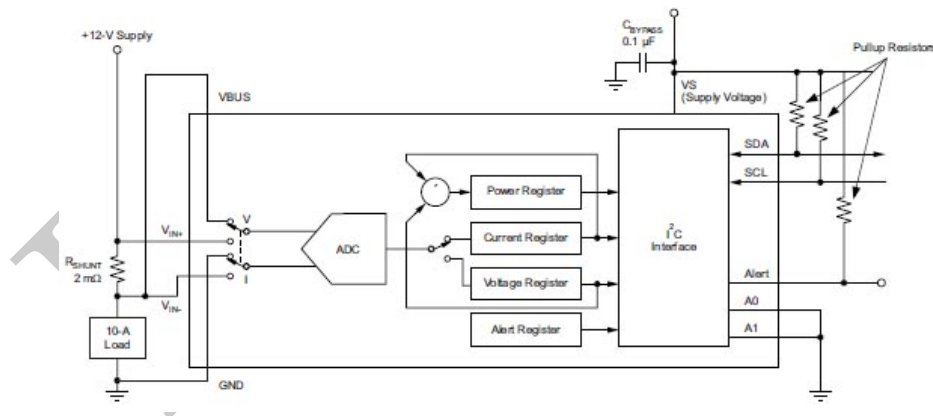


Figura 15: Implementación Tipo - INA226

3.4. Algoritmos de Estimación del Estado de Carga

La estimación del estado de carga es una de las tareas fundamentales dentro del sistema de Administración de baterías ya que en base a esta información se toman importantes decisiones, de ella dependen la optima ecualización de carga de las celdas, no exceder los límites de Zona de Operación segura, realizar acciones preventivas en caso del agotamiento de carga como ser iniciar un apagado de seguridad y por último reportar al usuario la carga restante en el pack.

A priori hay 2 métodos básicos de estimación de carga, el primero, **OCV vs SoC**, aprovecha la relación entre el Estado de Carga SoC (del ingles State Of Charge (SoC)) y el voltaje de circuito abierto o OCV (del ingles Open Circuit Voltage (OCV) éste método es económico pero tiene 2 principales desventajas, la curva OCV vs SoC tiene una región en la cual tiene valores de pendiente despreciable lo que genera que entre el 80 % de carga y el 35 % aproximadamente, haya solo unas pocas decenas de milivoltios de diferencia. Debido a esto un error de

pocos milivolts genera grandes diferencias en la estimación de la carga real. Por otro lado la estimación mediante voltaje tiene problemas a la hora de determinar el voltaje online, es decir cuando la batería esta conectada a una carga las corrientes que circulan por el pack generan caídas de tensión debido a las impedancias internas del pack, si estas no son tenidas en cuenta pueden llevar a que el ecualizador del pack desbalancee aún más el pack.

El segundo método es el **Conteo de carga** o **Coulomb Counting**, el mismo consiste en integrar la corriente a lo largo del tiempo obteniendo así la carga total en el pack o SoC mediante la ecuación 11, donde i corresponde a la corriente de la batería y C_η la capacidad nominal de la misma.

$$SOC = 1 - \frac{\int i \cdot dt}{C_\eta} \quad (11)$$

Este método funciona muy bien en la zona donde el primer método falla, sin embargo como todo proceso de integración, genera errores iterativos en cada ciclo de cálculo generando que a lo largo del tiempo el error absoluto de este método tienda a crecer. Además de la necesidad de establecer un valor inicial de carga, estos puntos de referencia pueden ser la carga total de la batería o la máxima profundidad de descarga o DOD (de sus siglas en ingles Depth of Discharge (DOD)) de manera que exigen a la batería llegar a puntos límites de carga disminuyendo su vida útil.

Debido a que nos interesa saber el SoC cuando la batería esta entregando energía o siendo cargada se deben tener en cuenta los principales factores que afectan a la estimación de carga on-line. Un modelo utilizado para relacionar la tensión entre los bornes de la batería y el OCV utilizado con gran frecuencia es el modelo eléctrico bosquejado en la Fig. 16, este modelo es coherente con el hecho de que la tensión en los bornes de la batería en reposo es igual al OCV. Pero al ser circulada por una corriente se deben tener en cuenta los fenómenos dinámicos y la pérdida por resistencias internas así como la corriente de pérdida (auto descarga) de la batería.

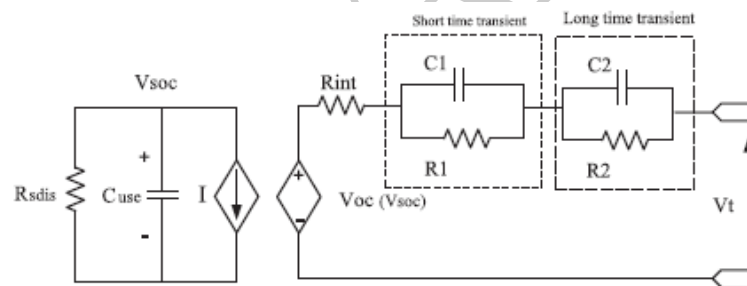


Figura 16: Modelo Eléctrico de segundo orden con corriente de pérdida.

Dada la naturaleza química de la batería, si se entra en detalle se puede observar que los componentes que modelan la batería tienen un comportamiento no lineal dependiendo del SoC y más aún se ven afectados por el efecto de envejecimiento de las celdas, es decir, estamos es un sistema no lineal no estacionario.

Como soluciones parciales fueron desarrollados varios métodos los cuales son una solución de compromiso entre aproximaciones lo suficientemente conservadoras para obtener el menor error posible y un alto costo computacional cuyas exigencias de hardware elevan el costo y el espacio necesario para su implementación, clasificándose según [2] los siguientes métodos como convencionales :

- Fuerza Electro-Motriz
- Estimación basada en modelos (Térmico y electroquímicos)
- Resistencia interna
- Espectroscopia Dieléctrica

Un gran avance en la estimación del estado de carga fue la aplicación de los Filtro de Kalman para disminuir el error. Esta es una herramienta estadística de análisis en espacio de estado que mediante las matrices de Varianza y Covarianza estiman un vector de soluciones con mayor precisión. Los Filtros de Kalman ven afectado su rendimiento a la hora de trabajar con sistemas fuertemente No Lineales, debido a esto surgen las variantes EKF, UKF y SPKF provenientes del inglés, Extended, Unscented y Sigma Point, respectivamente.

3.4.1. Método de estimación por FEM

Teniendo en cuenta la limitación del método de OCV para la estimación mientras la batería esta siendo cargada o descargada, surge como solución a esta problemática la estimación del OCV mediante el estudio de la respuesta temporal de la tensión entre los terminales de la batería dado su comportamiento temporal regido por una ecuación diferencial de primer orden como se muestra en 12, siendo k una constante, cuya solución es de la forma 13, lo cual se corresponde con la gráfica de la Fig.17.

$$\frac{df(x)}{dx} = \alpha f(x) \quad (12)$$

$$f(x) = x_{(\infty)} + (x_0 - x_{(\infty)})e^{-\alpha x} \quad (13)$$

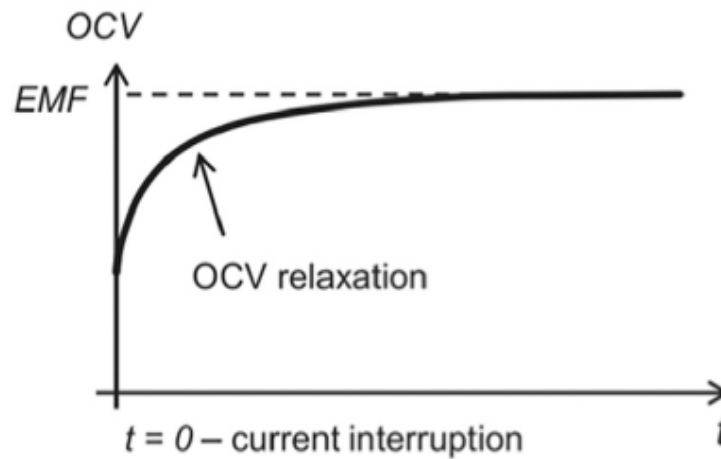


Figura 17: Curva de relajación de una Batería de Li-Ion

3.4.2. Estimación basada en modelos (Mecánicos, Térmicos y electroquímicos)

Este método requiere un profundo conocimiento de los fenómenos físicos y electroquímicos dentro de las baterías, como por ejemplo la concentración de electrolito, concentración de material, densidad microscópica de corriente. Esto constituye su principal desventaja ya que es complejo y la obtención de parámetros no es trivial para todo tipo de baterías.

Las celdas de Li-Ion se componen de 5 regiones: un electrodo negativo colector de corriente, un electrodo compuesto poroso de inserción negativo, un separador poroso, un electrodo compuesto poroso de inserción positivo y un electrodo positivo colector de corriente. Esto en conjunto con las ecuaciones 14 - 18 se detalla en [3].

Tomando como modelo un modelo unidimensional a lo largo de la sección de la batería se aplican las siguientes ecuaciones:

Conservación de carga en un sólido homogéneo:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi_s) = -j^{Li} \quad (14)$$

Conservación de masa en un sólido homogéneo:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \nabla \cdot (D_s \nabla c_s) \quad (15)$$

Conservación de masa en un electrolito homogéneo:

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_e \nabla c_e) = \left(\frac{1 - t_+^0}{F} \right) j^{Li} \quad (16)$$

Conservación de carga en un electrolito homogéneo:

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \varphi_e + \kappa_D \nabla \ln c_e) = -j^{Li} \quad (17)$$

Ecuación de Butler-Volmer de movimiento de cargas en una unión entre un sólido conductor y una solución de Iones de Litio con el efecto de doble capa eléctrica.

$$j^{Li} = a_s i_0 \left[e^{\frac{F\eta}{2RT}} - e^{-\frac{F\eta}{2RT}} \right] + a_s C_{dl} \frac{\partial(\varphi_s - \varphi_e)}{\partial t} \quad (18)$$

En las ecuaciones 14 - 18, σ conductividad de la fase sólida, φ_s el potencial eléctrico de la fase sólida, φ_e el potencial eléctrico del electrolito, j^{Li} la corriente producida por el consumo de Li, t es el tiempo, c concentración de Iones de Litio, D el coeficiente de difusión, F la constante de Faraday, ε es la fracción por volumen, t_+^0 el número de transferencia, κ la conductividad del electrolito, κ_D la conductividad de la difusión, i_0 la densidad de corriente de intercambio, η la sobretensión, a el área específica and C_{dl} la capacidad de la doble capa. El subíndice s corresponde a la fase sólida y e corresponde con el electrolito. También teniendo en cuenta la relación de Bruggeman.

3.4.3. Estimación por resistencia interna

Este método utiliza el voltaje y la corriente de la batería en conjunto para determinar la resistencia interna esta. Durante breves instantes (menores a 10 ms) se excita la batería con pulso de corriente, asumiendo que este período es lo suficientemente acotado para no que la variación de tensión sea atribuida a la resistencia interna y no a la carga/descarga de la batería la resistencia se obtendría según la formula :

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = R_\Omega \quad (19)$$

Teniendo en cuenta que si el período del pulso es mayor la medición acumula un error considerablemente mayor respecto a pulsos breves y teniendo en cuenta que este método tiene una gran precisión únicamente en valores de SOC cercanos a la descarga, debido a que varía mucho en este rango, y al bajo valor de las resistencias (del orden de los miliohm) como se muestra en la Fig. 18, extraída de [4], este método no termina siendo atractivo debido a las dificultades para obtener valores precisos de SOC, generando que sea poco utilizado de manera aislada.

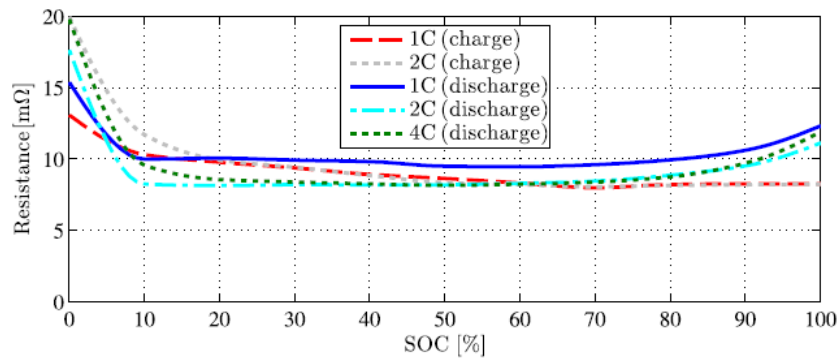


Figura 18: Resistencia en Corriente continua de una batería de Li-Ion vs. SOC obtenida por HPPC

3.4.4. Espectroscopía Dieléctrica (EIS)

Este estudio consiste en llevar a la celda a un estado de carga conocido, y luego de un período de relajación se excita los terminales con una onda senoidal de tensión o corriente y se mide la respuesta de corriente o tensión respectivamente. En la Fig. 19 se observan las curvas obtenidas por Mingheng Li basadas en un modelo físico basado en principios de conservación de masa y carga en una interfaz entre un sólido y un electrolito detallado en [3], para distintos estados de carga y en un amplio rango de frecuencias.

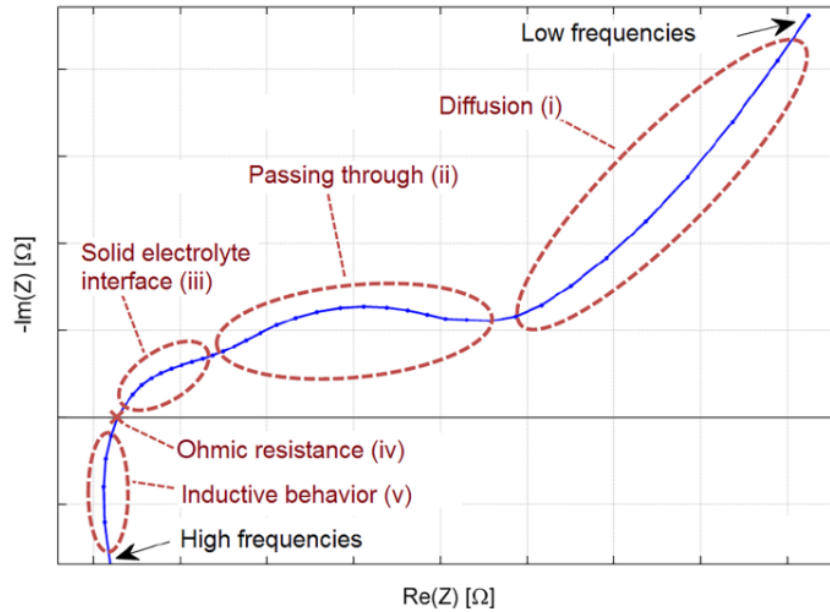


Figura 19: Secciones identificables dentro del diagrama de Nyquist.

3.5. Filtros de Kalman

Este tipo de filtros toma importancia en sistemas de naturaleza estocástica. Cuya dinámica es afectada por ruido cuya distribución de probabilidad es Gaussiana o Normal. Este es un algoritmo recursivo que corrige las estimaciones mediante la probabilidad conjunta de una o varias mediciones de un fenómeno y su estimación obtenida por modelos matemáticos generados en base al conocimiento del sistema.

Dado un sistema lineal cuya dinámica es descrita por las siguientes ecuaciones:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (20)$$

Donde x_k es el vector de estados en el instante de tiempo k , A es la matriz de transición de estados y w_k ruido aditivo gaussiano asociado al modelo del proceso con matriz de varianza Q . Además podemos expresar el vector de observación o medición z_k de los estados x_k como:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (21)$$

Donde H es la matriz de conexión entre los estados y las observaciones sin ruido, es decir que mediciones se están tomando y que estado representan. Por otro lado v_k es el ruido aditivo gaussiano asociado a la medición con matriz de varianza R .

Definiendo la función de costo al error cuadrático medio en la estimación de x_k

Definiendo al error como:

$$e_k = x_k - \hat{x}_k \quad (22)$$

De manera que podemos expresar la Matriz de covarianza del error en el instante k como:

$$P_k = E[e_k \cdot e_k^T] = E[(x_k - \hat{x}_k) \cdot (x_k - \hat{x}_k)^T] \quad (23)$$

Podemos expresar \hat{x}_k como:

$$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k(z_k - H\hat{x}'_k) \quad (24)$$

Donde K_k es la ganancia de Kalman la cual pondera según el criterio de minimización del error cuadrático medio si \hat{x}_k es próxima a \hat{x}'_k o al vector z_k .

Si reemplazamos z_k en la ecuación 24 por la expresión 21 se obtiene la expresión del error de la estimación a priori \hat{x}'_k detallada a continuación:

$$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k(Hx_k + v_k - H\hat{x}'_k) \quad (25)$$

Reacomodando los terminos,

$$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k H(x_k - \hat{x}'_k) + K_k v_k \quad (26)$$

Multiplicando por (-1) y luego sumando en ambos miembros de la ecuación 26 el termino x_k

$$x_k - \hat{x}_k = x_k - \hat{x}'_k - K_k H(x_k - \hat{x}'_k) - K_k v_k \quad (27)$$

$$x_k - \hat{x}_k = (I - K_k H)(x_k - \hat{x}'_k) - K_k v_k \quad (28)$$

Reemplazando luego en la ecuación 23 la expresión $x_k - \hat{x}_k$ por el de la ecuación 28 obtenemos la expresión de P_k como función del error de la estimación a priori:

$$P_k = E[(I - K_k H)(x_k - \hat{x}'_k) - K_k v_k][(I - K_k H)(x_k - \hat{x}'_k) - K_k v_k]^T \quad (29)$$

Aplicando propiedades de la transpuesta de una matriz e ignorando los terminos relativos a la correlación entre el ruido de la medición y el error de la estimación a priori:

$$P_k = E[(I - K_k H)(x_k - \hat{x}'_k)(x_k - \hat{x}'_k)^T(I - K_k H)^T + K_k v_k v_k^T K_k^T] \quad (30)$$

Teniendo en cuenta que la esperanza de una matriz que no es variable aleatoria es la misma matriz:

$$P_k = (I - K_k H)E[(x_k - \hat{x}'_k)(x_k - \hat{x}'_k)^T](I - K_k H)^T + K_k E[v_k v_k^T] K_k^T \quad (31)$$

Obteniéndose así la expresión de la ecuación de actualización de la matriz de covarianza:

$$P_k = (I - K_k H)P'_k(I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (32)$$

Recordando la forma de la matriz P_k y observando que su traza, es decir, la sumatoria de todos los elementos de la diagonal principal, es la suma del error cuadrático medio, de manera que podemos afirmar que minimizando la traza podemos minimizar el ECM o MSE por su sigla en inglés, *Mean Square Error*.

$$P_k = \begin{bmatrix} e_{1k}e_{1k} & e_{1k}e_{2k} & \dots & e_{1k}e_{nk} \\ e_{2k}e_{1k} & e_{2k}e_{2k} & \dots & e_{2k}e_{nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{nk}e_{1k} & e_{nk}e_{2k} & \dots & e_{nk}e_{nk} \end{bmatrix} \quad (33)$$

De manera que buscamos K_k que cumpla con este requisito, para lo cual haremos la expansión de la ecuación 32 para obtener luego una expresión de la traza.

$$P_k = P'_k - K_k H P'_k - P'_k H^T K_k^T + K_k (H P'_k H^T + R) K_k^T \quad (34)$$

Siendo la expresión de $T[P_k]$

$$T[P_k] = T[P'_k] - T[K_k H P'_k] - T[P'_k H^T K_k^T] + T[K_k (H P'_k H^T + R) K_k^T] \quad (35)$$

Ya que P'_k es simétrica y que la traza de una matriz es igual a la traza de su transpuesta.

$$P_k'^T = P'_k \quad (36)$$

Podemos escribir

$$P'_k H^T K_k^T = P_k'^T H^T K_k^T = (K_k H P'_k)^T \quad (37)$$

$$T[P'_k H^T K_k^T] = T[K_k H P'_k] \quad (38)$$

Reemplazando 38 en 35

$$T[P_k] = T[P'_k] - 2T[K_k H P'_k] + T[K_k (H P'_k H^T + R) K_k^T] \quad (39)$$

Para obtener el valor mínimo calculamos la derivada de $T[P_k]$ respecto a K_k

$$\frac{dT[P_k]}{dK_k} = -2(H P'_k)^T + 2K_k (H P'_k H^T + R) \quad (40)$$

Luego igualando la ecuación 40 a 0 y despejando obtenemos la expresión de la Ganancia de Kalman (K_k):

$$K_k = (H P'_k)^T (H P'_k H^T + R)^{-1} \quad (41)$$

Definiendo a S_k como:

$$S_k = (H P'_k H^T + R) \quad (42)$$

La ecuación 41 queda:

$$K_k = (H P'_k)^T S_k^{-1} \quad (43)$$

Reemplazando la expresión de K_k obtenido, en la ecuación 34, se cancela el tercer término con el cuarto término y queda:

$$\begin{aligned} P_k &= P'_k + P'_k H^T (H P'_k H^T + R)^{-1} H P'_k \\ P_k &= P'_k - K_k H P'_k \\ P_k &= (I - K_k H) P'_k \end{aligned} \quad (44)$$

La proyección del vector de estados x_k en el instante $k + 1$ se obtiene como:

$$\hat{x}'_{k+1} = A \hat{x}_k \quad (45)$$

Para luego proyectar la matriz de covarianza de error P_k en el instante $k + 1$.

Haciendo uso de la ecuación 23 y extendiéndola para e'_{k+1} :

$$P_{k+1} = E[e_{k+1} \cdot e_{k+1}^T] = E[(Ae_k - w_k) \cdot (Ae_k - w_k)^T] \quad (46)$$

Cabe destacar que el ruido del proceso w_k no tiene correlación alguna respecto a e_k ya que el primero es el ruido presente entre k y $k+1$ y e_k es el error resultante de todos los calculos previos hasta el instante k .

$$P'_{k+1} = E[Ae_k \cdot e_k^T A^T] + E[w_k w_k^T] = A P_k A^T + Q \quad (47)$$

3.5.1. Filtro de Kalman: resumen

Como dijimos los filtros de Kalman son algoritmos recursivos, los mismos se componen por las siguientes ecuaciones descriptas anteriormente:

Ganancia de Kalman	$K_k = (H P'_k)^T S_k^{-1}$
Actualización de la estimación	$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k (z_k - H \hat{x}'_k)$
Actualización de la matriz de covarianza	$P_k = (I - K_k H) P'_k$
Proyección en $k+1$	$\hat{x}'_{k+1} = A \hat{x}_k$
	$P'_{k+1} = A P_k A^T + Q$

Una manera intuitiva de pensar los filtro de Kalman es de la siguiente. Supongamos que tenemos la medición antes definida como z_k y corriendo en paralelo tenemos un modelo matemático calculando el estado actual o vector de estados actual de nuestro sistema el cual notaremos como \hat{x}'_k y llamaremos estimación a priori de x_t .

Ambos valores son afectados por ruido asociado, de manera que podemos ponderar ambas de manera de obtener una medición más certera.

Como se observa en la Fig. 20 en base a las distribuciones de z_k y \hat{x}'_k obtenemos una nueva \hat{x}_k la cual tiene una menor varianza.

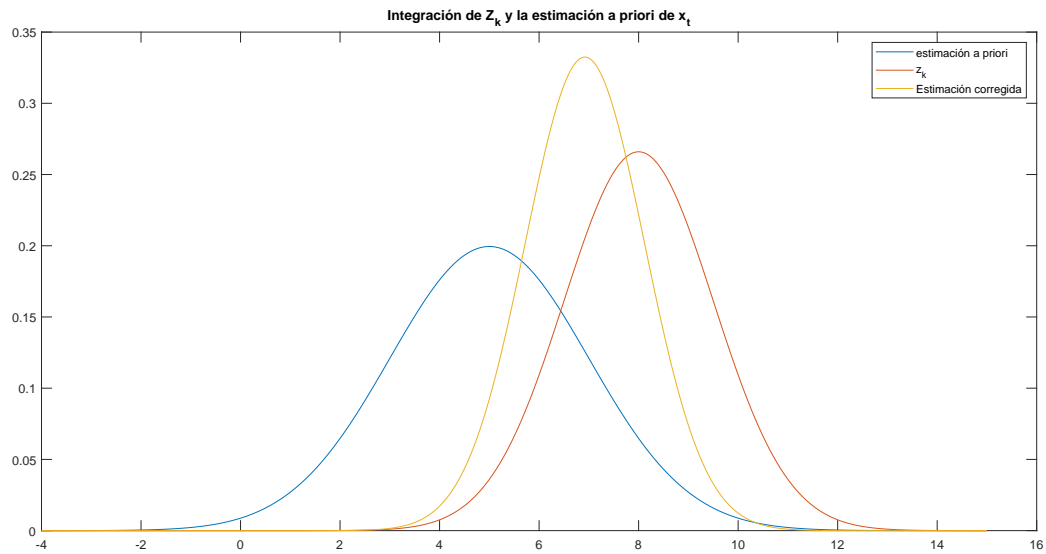


Figura 20: Gráfico ilustrativo de la estimación de x_t mediante z_k y \hat{x}'_k .

3.6. Simulaciones

3.6.1. Simulación Filtro de Kalman

Para la implementación de este filtro es necesario obtener un modelo en espacio de estados de la batería de la forma :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax + Bu \\ y(t) &= Cx + Du\end{aligned}\quad (48)$$

Para tal fin tomamos como referencia un modelo eléctrico con 2 elementos RC en serie, también conocido como modelo de Randles de segundo orden, representado en la figura 21, ya que este modelo tiene amplia aceptación debido a que ofrece un grado de ajuste alto sin resultar en un excesivo costo computacional en comparación con modelos electroquímicos de la batería.

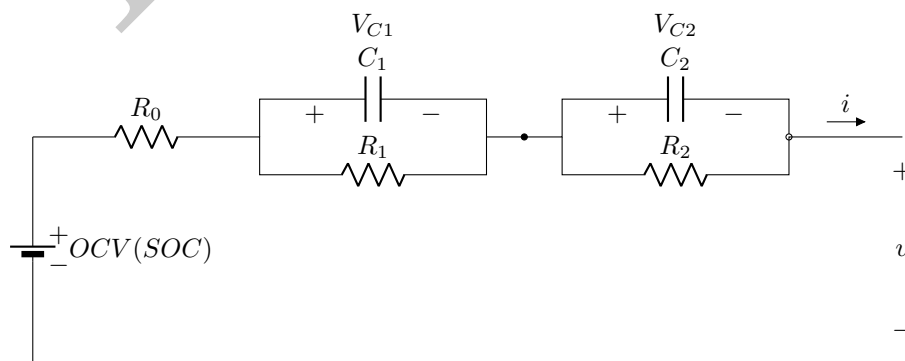


Figura 21: Circuito de Randles de Segundo Orden.

La fuente de tensión controlada $OCV(SoC)$ es linealizada para obtener un modelo lineal de la batería e ignoramos el hecho de la histéresis respecto a la carga y a la descarga.

Obteniendo una ecuación lineal de la forma 49, cuyos parametros fueron obtenidos mediante la función *polyfit* de matlab como se muestra en la figura 22.

$$OCV = SOC \times K_e + OCV_0 \quad (49)$$

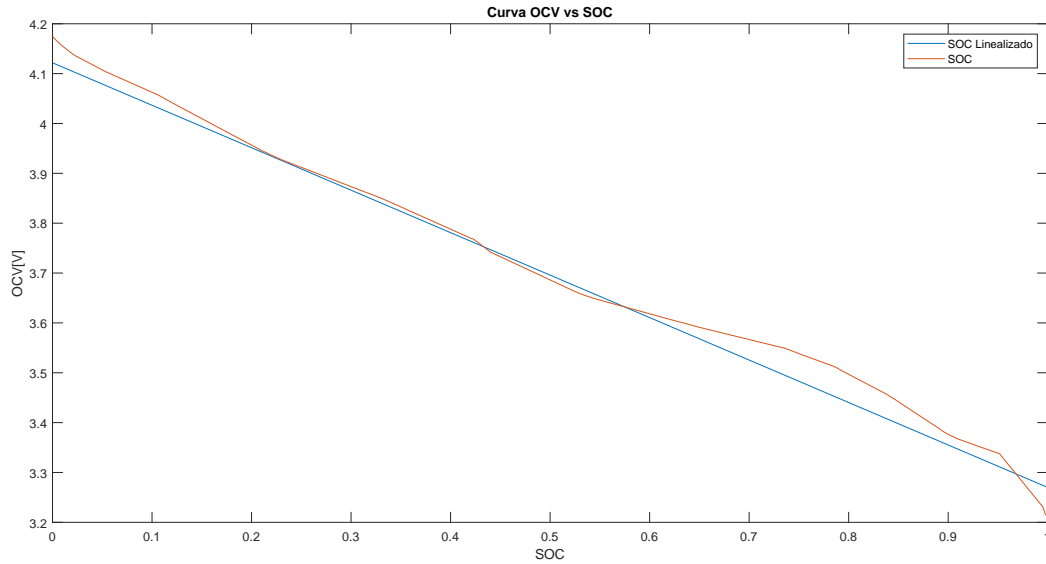


Figura 22: Curva de SOC vs OCV con su correspondiente linealización

Nuestro modelo eléctrico tiene 2 grados de libertad y se agrega una 3° variable de estado que es el estado de carga de la batería. Luego tomando la expresión diferencial de la ecuación 11, seleccionando arbitrariamente las tensiones en C_1 y C_2 , y tomando como entrada del sistema la corriente de la batería y como salida la tensión en bornes de la misma obtenemos el siguiente conjunto de ecuaciones.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} \\ -\frac{1}{R_2 C_2} \\ -\frac{1}{3600 S_{C,a}} \end{bmatrix} i \\ y &= [-1 \quad -1 \quad -K_e] x + [R_0] i \end{aligned} \quad (50)$$

Donde $S_{C,a}$ es la Capacidad Nominal en Ah de la batería.

Para hacer un ajuste de parámetros de las baterías se utilizó un dataset provisto por la universidad de Winsconsin-Madison por el Dr. Phillip Kollmeyer [5]. si bien todos los parámetros son dependientes del estado de carga, seleccionamos los correspondientes al 90 %, ya que las variaciones mas fuertes de los mismos se dan al entre el 0-10 % y en valores cercanos al 100 %

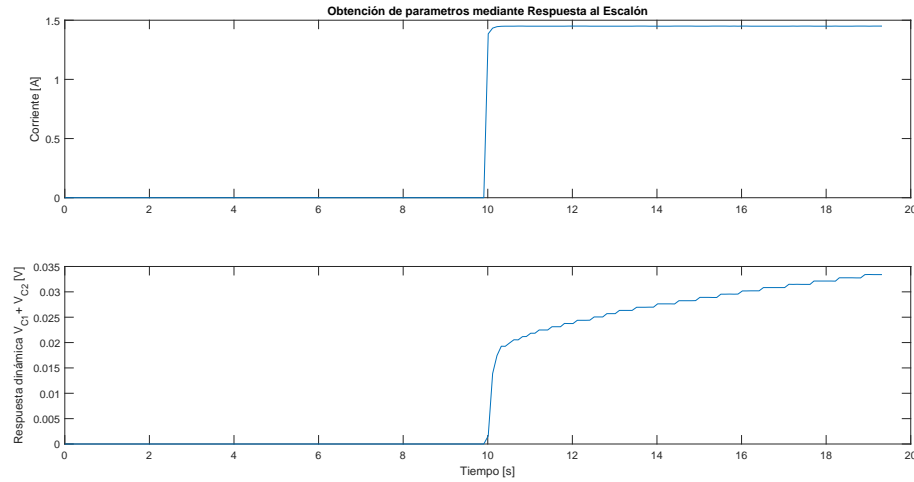


Figura 23: Estudio de la Rta al escalón para estimación de parámetros

También se necesita proporcionar valores de Varianza del modelo, ruido al que están sometidas las variables medibles, el estado inicial estimado y la varianza de esta estimación estas son denominadas Q , R , x_0 y P_0 respectivamente.

Partiendo de la base que nuestro sistema debe ser robusto ante la mala estimación inicial del estado de carga vamos a proponer un vector de estimación de estado inicial con un SoC con un error de 80 %.

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El ciclo de la batería es seleccionado comienza con la batería cargada al 100 %, por lo que un error del 80 % se corresponde con 0.2 en el estado de carga relativo.

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,2 \end{bmatrix}$$

El error en nuestra observación es del orden de los milivoltios (mV) calculado en base a la resolución del sensor.

$$R = 0,01$$

El error en nuestro modelo se estima bajo ya que los dataset nos proveen una buena fuente de información obtenida en base a ensayos de laboratorio

$$Q = \begin{bmatrix} 1 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

Por último se volcaron estos parámetros en un bloque de la librería *System Identification Toolbox* que corre el algoritmo del filtro de Kalman. Además se simuló en paralelo el circuito eléctrico equivalente, como se observa en la Figura 24.

Los resultados de la simulación se muestran a continuación en las Figuras 25 y 26 correspondientes a la tensión en bornes de la batería y a las Figuras 27 y 28, las cuales corresponden al SOC simulado y a un contraste del error tomando como valor verdadero el SOC provisto por el dataset.

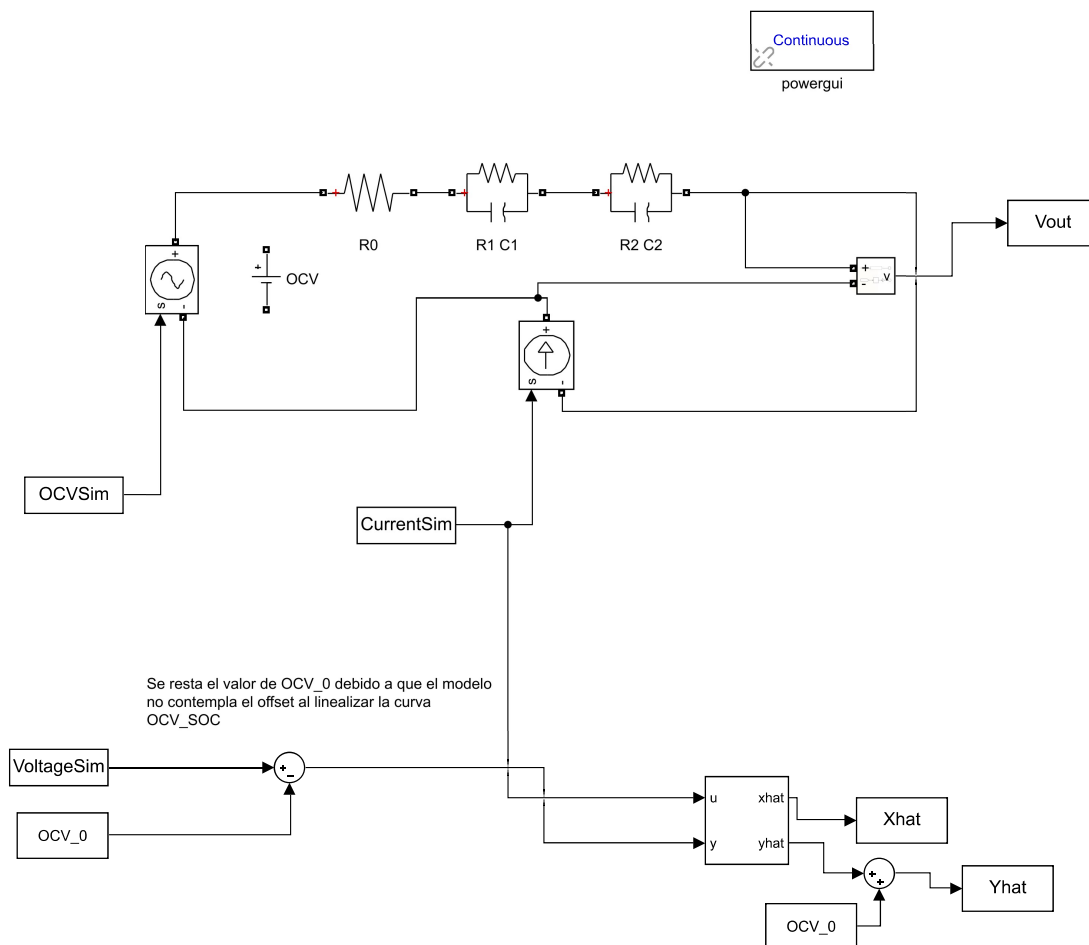


Figura 24: Diagrama de Simulink utilizado para simular el Filtro de Kalman

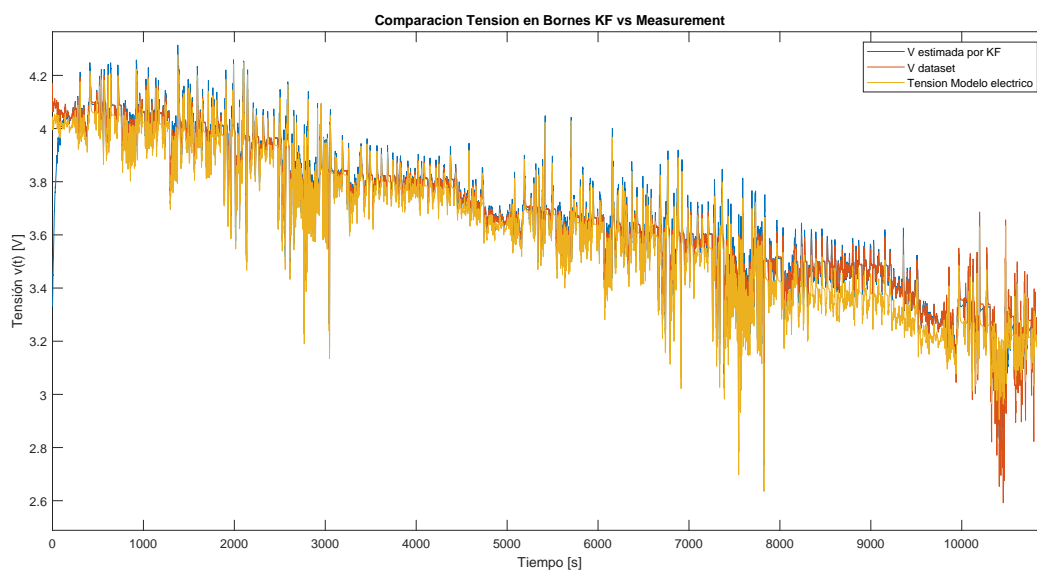


Figura 25: Resultado de la Simulación de la tensión en bornes de la batería sometida a condiciones de ciclo de manejo

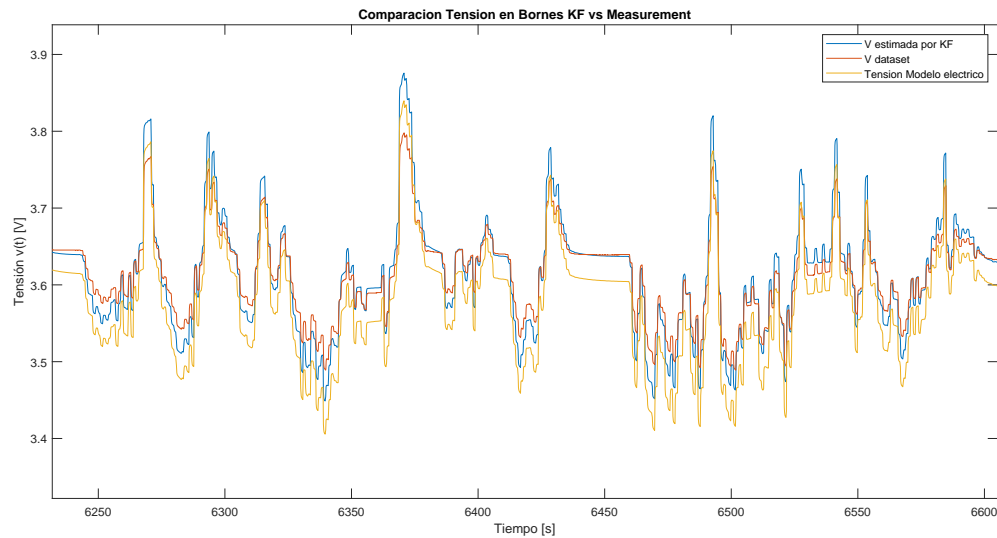


Figura 26: Detalle de la Simulación de la tensión en bornes de la batería sometida a condiciones de ciclo de manejo

Si se presta especial atención el error se mantiene en una cota del 6 % hasta que se dispara en la región de SOC menor al 15 % donde el sistema se vuelve fuertemente alineal y nuestro modelo pierde validéz. Por otro lado cumple satisfactoriamente con la corrección del SOC inicial ya que estaba seteado en 20 % y el Filtro corrige rapidamente a un valor aproximado de 100 %.

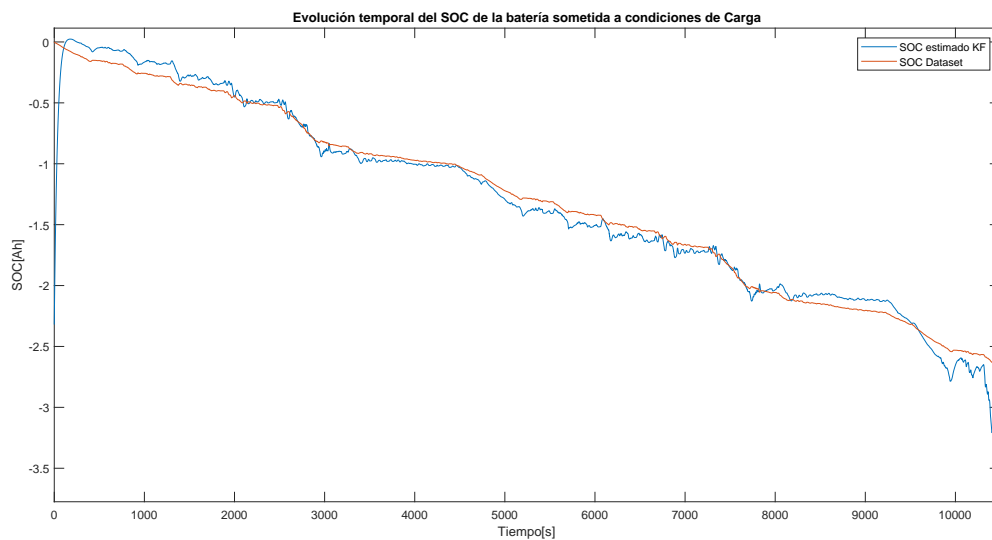


Figura 27: Resultados de la Simulación del sistema sometido a condiciones de ciclo de manejo

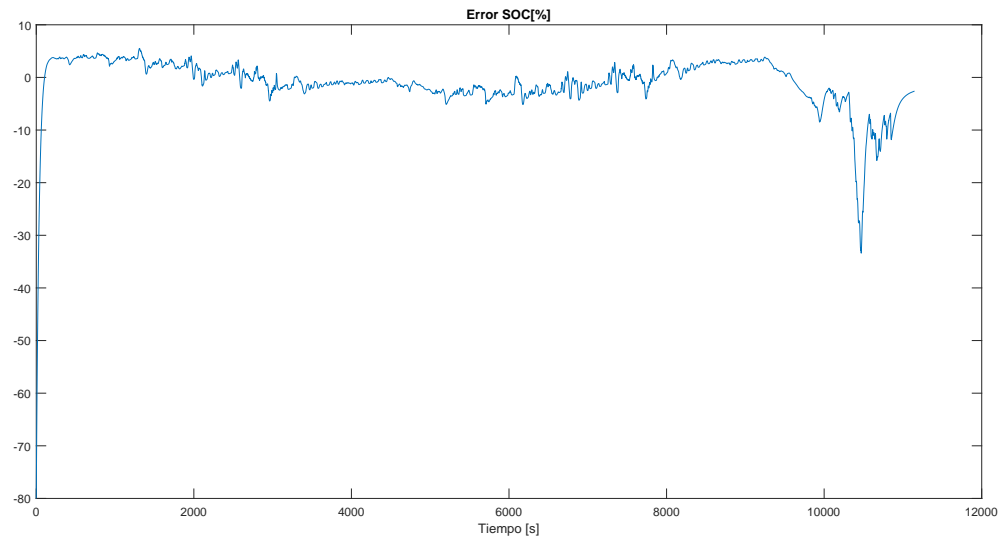


Figura 28: Resultados de Simulación del SOC de una batería sometida a condiciones de ciclo de manejo

3.7. Técnica de Carga

3.7.1. Corriente Constante CC - Voltaje Constante CV

El proceso de carga de una Batería de Ion Litio (Ion-Li) no es trivial. Aplicar una tensión constante en bornes, como podríamos proceder con baterías de plomo ácido, no es el procedimiento más adecuado en este caso. En aras de optimizar la autonomía y la vida útil del pack de baterías el proceso de carga debe responder a lineamientos particulares de acuerdo a las características constructivas de las celdas que lo componen.

El perfil de carga que se ajusta a las celdas de Ion-Li, como se observa en la figura 29, es el perfil Constant Current (CC) - Constant Voltage (CV). Este consiste en tres fases, una primera etapa de acondicionamiento o pre carga donde se inyecta a la batería una corriente constante pequeña de magnitud equivalente a la corriente de fin de carga. Una fase de carga rápida a corriente constante CC y una tercer y última fase de carga a tensión constante CV.

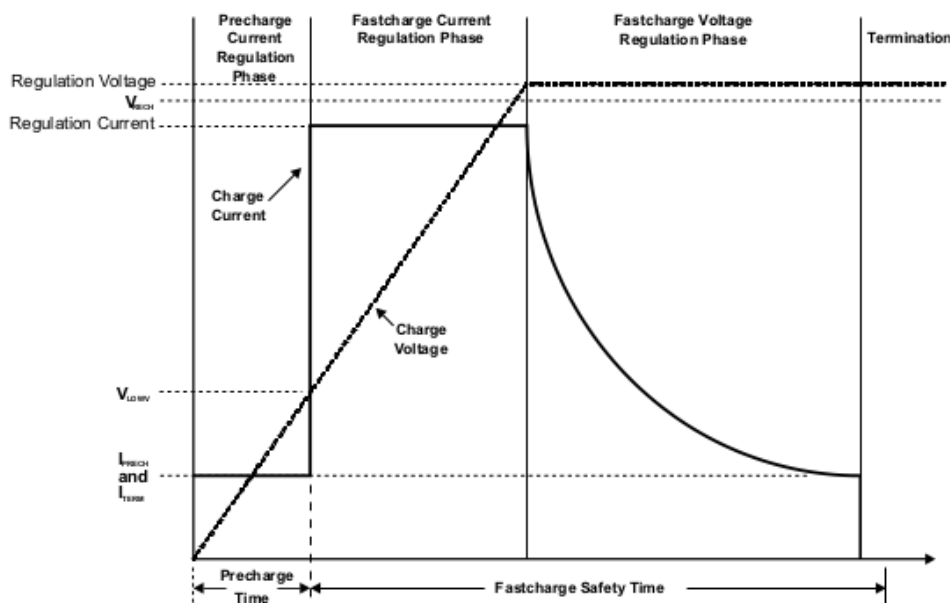


Figura 29: Perfil de carga típico de una batería de Ion-Litio

El proceso de pre carga o pre-acondicionamiento proporciona a las celdas la capacidad de recuperar su capa de pasivación, la cual puede haberse visto afectada o disuelta tras largos periodos de almacenamiento en estados de descarga profunda. A su vez permite introducir las celdas en la zona de operación segura en caso de que se encuentre profundamente descargadas. Es importante limitar el proceso de acondicionamiento en tiempo para prevenir pre cargar indefinidamente una celda que se encuentre agotada. Si tras un periodo completo de acondicionamiento la celda no alcanza el voltaje mínimo necesario puede considerarse que la misma alcanzó el final de su vida útil.

El voltaje umbral de inicio de carga rápida depende de la celda misma y en el caso de las baterías Ion-Li se ubica generalmente entre los 2,5V y 3,0V. Una vez que la celda supera su voltaje umbral mínimo el cargador debería entrar en la zona de carga rápida a corriente constante CC. La fase de carga rápida permite a la batería transformar la energía eléctrica entregada en energía electroquímica dentro de la batería en el menor tiempo posible. La magnitud de la corriente de carga rápida depende de la celda y es limitada generalmente entre 0,5C y 1C para prevenir el calentamiento del pack y su degradación prematura. El pack de batería admitirá carga rápida a corriente constante hasta alcanzar el voltaje límite de regulación.

En esta tercer y última fase la corriente drenada del pack decae exponencialmente hasta alcanzar la magnitud de fin de carga, situación que nos indica que el ciclo se completo exitosamente. La corriente de terminación de carga ronda entre 5 % y 10 % de la corriente de carga rápida. Cabe aclarar que en esta instancia del proceso de carga la corriente decae naturalmente dado que es la constante de voltaje de terminales la magnitud controlada por el cargador.

Es importante remarcar que durante todo el proceso de carga, pero fundamentalmente durante la fase de carga rápida a corriente constante, es de vital importancia monitorear la temperatura de las celdas evitando que las mismas se aparten de la zona de operación segura. Si bien el proceso de carga implica intrínsecamente una elevación de la temperatura de la celda, entre otras causas debido a su resistencia interna.

El tiempo total de carga es una variable determinante a la hora de implementar un cargador de batería que extienda al máximo la vida útil y los ciclos de carga de un pack de baterías y de sus celdas. Es la magnitud de corriente de carga rápida la variable determinante del tiempo final de carga. Por ejemplo, para una carga rápida a 1C, la batería alcanzará, durante la fase de CC, el 70 % de su capacidad total en el 30 % del tiempo de carga mientras que tardará el 70 % del tiempo total de carga para acumular el 30 % restante de su capacidad durante la fase CV.

La existencia de una resistencia interna en serie en las celdas no ideales implica que a mayor corriente de carga rápida a CC se alcance más rápido la tensión de umbral de paso a la fase de tensión constante CV acortando

el tiempo de CC pero extendiendo el tiempo de CV. Podemos inferir entonces que a menor resistencia interna menor tiempo de carga. Y que aumentar la corriente a CC también reducirá el tiempo de carga. Sin embargo, se desaconseja completamente implementar regímenes de carga rápida que superen 1C por el impacto en el número de ciclos de vida útil de las celdas del pack de batería. La figura 30 muestra como a medida que aumentamos el régimen de carga de una celda la vida útil de la misma, medido en ciclos de carga, disminuye significativamente.

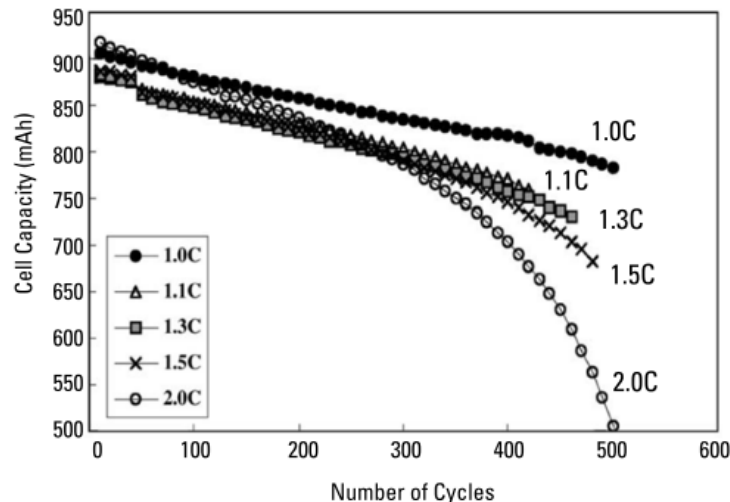


Figura 30: Relación Corriente de carga vs Ciclos de vida útil de una celda de Ion-Litio con un cátodo de $LiCoO_2$

A mayores tasas de corriente, mayor cantidad de iones de litio se depositan sobre el ánodo convirtiéndose en litio metálico al liberar sus electrones disponibles. El litio metálico es sumamente reactivo con el electrolito resultando en una pérdida permanente de Ion-Li, el elemento almacenador de la energía, acelerando el envejecimiento prematuro de la celda y en consecuencia reduciendo los ciclos de vida útiles de la misma.

Normalmente, a mayor voltaje en bornes de una celda mayor es la capacidad de la misma. Podríamos entonces vernos tentados a aumentar el voltaje límite de regulación y sobre cargar una celda para aumentar la carga almacenada. Por ejemplo, una celda cargada a 4,3V en vez de 4,2V va a permitirnos almacenar un 10 % más de carga inicial. El inconveniente aquí reside nuevamente en el impacto que tendrá este procedimiento en el número de ciclos de carga y la vida útil de la celda. La vida útil de una celda sobre cargada se verá reducida en un 50 %. Por el otro lado, cargar una celda con un voltaje menor (40mv menor) implicará una reducción aproximada de un 10 % de su carga inicial. Podemos arribar a la conclusión que el control del voltaje de carga y su precisión es de vital importancia en un circuito de carga. La figura 31 muestra la relación entre el número de ciclos de carga y los diferentes voltajes de carga.

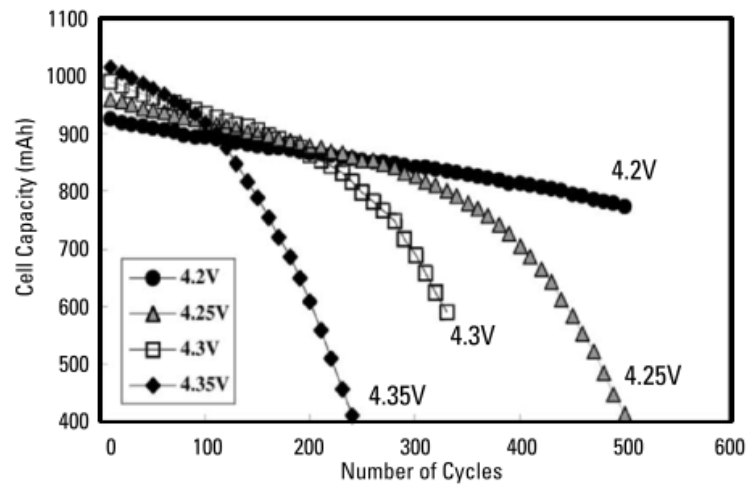


Figura 31: Relación Voltaje de carga la batería vs Ciclos de vida de una celda de Ion-Litio con un cátodo de $LiCoO_2$

A voltajes mayores el material del cátodo reacciona a mayor velocidad con el electrolito perdiéndose material en la reacción resultando en una pérdida de capacidad de almacenamiento de energía.

3.7.2. Tecnología Seleccionada

Para un completo control del perfil de carga arriba descrito es que seleccionamos circuito integrado *bq24610* de la firma *Texas Instrument*.

El *bq24610* es un circuito altamente integrado que implementa un cargador de Batería de Ion Litio (Ion-Li) o Batería de Polímero de Litio (Li-Po) y capaz de operar de forma independiente o stand-alone. Emplea un controlador de corriente y de tensión sincrónico switching PWM de frecuencia constante y de alta resolución del tipo buck cuya topología simplificada puede observarse en la figura 32.

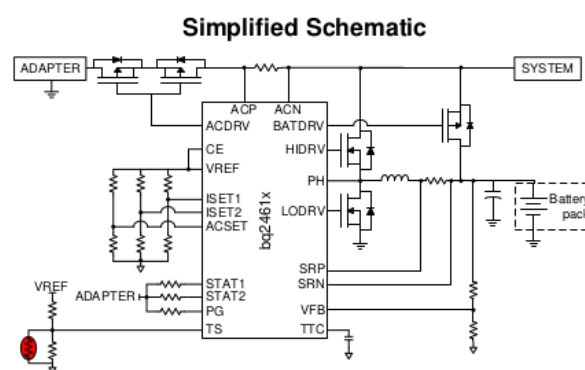


Figura 32: Esquema simplificado Cargador de Batería

El mismo admite la conexión de hasta 6 celdas en serie con una tensión y corriente máxima de entrada de hasta 28V y 10A respectivamente y una salida de hasta 26V y 10A ajustándose adecuadamente a nuestros requerimientos y a la topología de nuestro pack de baterías *6S3P* descrita en 3.2.5. El empaquetado del mismo es del tipo VQFN.

3.8. Ecuación de celdas

Como se comentó en secciones anteriores, cuando múltiples celdas se encuentran conectadas en serie, el voltaje de una celda no siempre coincide con la tensión equivalente del pack de baterías dividido por el número de celdas.

La ecuación de celdas es una técnica en la cual se trata de mantener los niveles de voltaje entre las celdas que conforman la cadena conectada en serie de un pack de baterías de forma homogénea, es decir, que los niveles de tensión entre celdas sea lo más uniforme posible, con el objetivo de maximizar la eficiencia del pack de baterías.

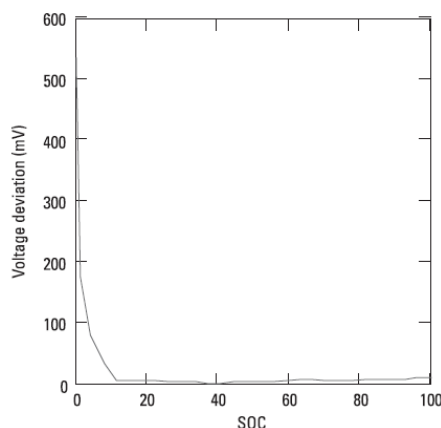
El desbalance más típico generalmente se manifiesta en una variación en el voltaje entre éstas, que puede ser corregido instantáneamente o gradualmente conectando cargas externas en paralelo, a través de sus correspondientes transistores, provocando una corriente de descarga adicional que pueden ir desde miliamperes hasta varios Amperes, dependiendo del dimensionamiento energético del pack de baterías. Sin embargo, este desbalance en tensión es, por lo general, dado por desbalances químicos o distintas dinámicas de descarga entre celdas, provocando que el objetivo del balanceo no esté claramente definido provocando más perjuicios que beneficios al sistema completo. De hecho, la mayoría de las metodologías basadas en el desbalance de voltaje, llevan a un pack de baterías más desbalanceado que sin ellos.

Por lo tanto es necesario conocer la naturaleza de los distintos tipos de desbalances, los cuales son descriptos a continuación:

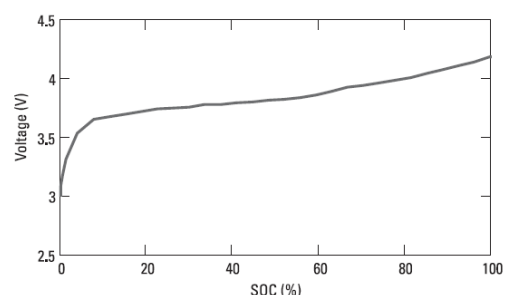
3.8.1. Desbalance del estado de carga (SoC)

El desbalanceo por estado de carga es causado por celdas que son cargadas a distintos niveles de SoC. Por ejemplo, si tenemos 3 celdas cuya carga máxima es de 2200mAh (Q_{\max}), y descargar 100mAh una de las celdas (Q_1), la segunda por 100mAh y la tercera por 200mAh, la primera y segunda celda van a estar a un SoC de $\frac{(Q_{\max}-Q_1)}{Q_{\max}} = 95,4\%$. pero la tercer celda estará, a cálculo hecho, en un 91 %. Por lo que podemos decir que la tercer celda presenta un desbalance de un 4.4 %.

Esto se traduce en distintos voltajes de circuito abierto, ya que se encuentran directamente correlacionadas con el estado de carga de las mismas, sin embargo, a pesar de esta diferencia constante de SoC, la tensión entre celdas varía con el crshortSOC debido a su variación con respecto a los distintos niveles de estado de carga. En la Figura 33a se muestra como varía la diferencia de voltaje entre las celdas ante distintos niveles de crshortSOC con un desbalance constante teniendo en cuenta la curva de la figura 33b.



(a) Diferencia de OCV a distintos estados de carga para un desbalance de 1 % de SOC



(b) OCV vs SOC

Figura 33: Variaciones del OCV según SoC

El voltaje sobre una carga puede ser aproximadamente, y rápidamente, modelada por la siguiente ecuación:

$$V = OCV(SoC) + I \times R(SoC) \quad (51)$$

Debido a que la función $R(SOC)$ incrementa rápidamente a bajos valores de SOC, la diferencia de voltajes entre celdas, con un desbalance de SOC determinado, incrementa en un estado de carga muy bajo sugiriendo que existe un incremento en la necesidad de realizar el proceso de balanceo cuando el pack de baterías alcanza su descarga completa, sin embargo, si esta diferencia de SOC es eliminada en etapas anteriores, las diferencias de tensión que ocurren cerca del fin de descarga son eliminadas sin necesidad de altas corrientes de drenaje para cada celda.

3.8.2. Diferencias entre impedancias internas

La diferencia entre impedancias internas en un bache de producción es de aproximadamente un 15 % como se puede observar en la Figura 34.

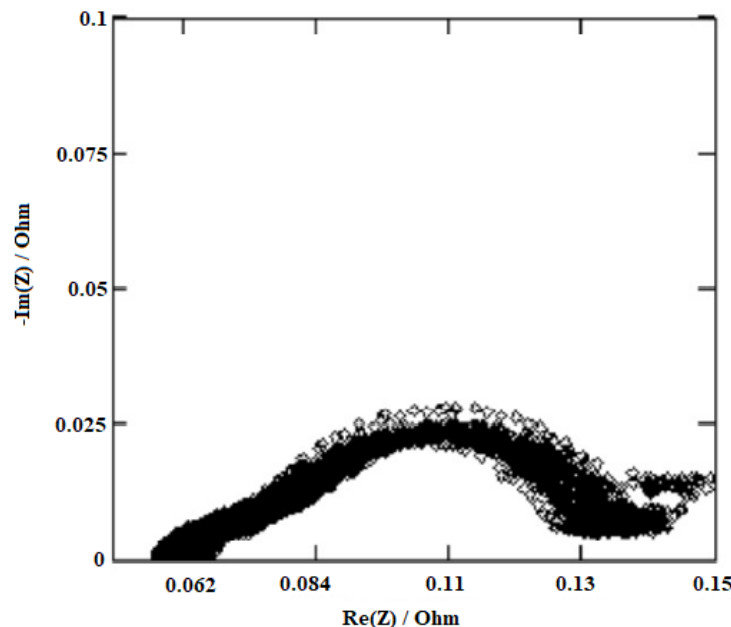


Figura 34: Diferencias de espectrometrías entre 50 celdas. El ensayo es realizado entre 1kHz a 10mHz

Desbalances en la impedancia interna de la celda no causan diferencias en el OCV, sin embargo, causará diferencias en el voltaje de la celda durante la descarga, ya que la misma viene dada por la Ecuación 51. Si la batería se encuentra descargando, es decir, si la corriente es negativa el voltaje que entrega a la carga será menor para una celda con mayor impedancia interna. Por el otro lado, si la celda se encuentra cargando, el voltaje será mayor para aquellas celdas con mayor resistencia interna.

A pesar de estas diferencias, no hay mecanismo de balanceo que permita solventar el problema del desbalanceo de impedancia interna.

3.8.3. Diferencias en la Capacidad de las celdas

Por el otro lado, puede suceder que la capacidad química de las celdas (Q_{MAX}) pueden ser diferentes en un principio, esto provoca que, a pesar de que cada celda sea descargada por la misma cantidad de corriente, el estado de carga será diferente. Por ejemplo, si las 3 celdas que nombramos anteriores son descargadas por 100mAh, pero la 3er celda tiene una capacidad distinta al resto (por ejemplo, 2000mAh en vez de 2200mAh), los estados de carga resultantes serán de 95.4 % y 95 %.

Nuevamente esto provocará una diferencia en los OCVs de las celdas. Como puede observarse, 200mAh de diferencia en Q_{MAX} causa solamente una diferencia de un 0.4 % en el SOC, causando menor diferencia de voltaje que un desbalance en el estado de carga.

Teniendo esto en cuenta las baterías no podrán estar balanceadas durante todo el ciclo de descarga o de carga ya que al quitar la misma cantidad de carga el estado de carga de las mismas será distinto. Un ejemplo algo más gráfico de esto es con 2 vasos de agua, uno con el doble de capacidad del otro pero llenos hasta la misma altura. Si se remueve la misma cantidad de agua de ambos el de mayor capacidad se habrá descargado la mitad que el de menor capacidad.

En la práctica lo más común es lo que se llama *top balancing*, que implica balancear en el período de carga todas las celdas del pack al 100 %. El mismo consiste descargar las celdas de menor capacidad permitiendo a las celdas de mayor capacidad un margen para seguir cargando sin sobrecargar las primeras, evitando lo que generaría una drástica disminución de la vida útil del pack. Esta opción es mucho más atractiva que su contra parte denominada *bottom balancing* ya que esta balancea todas las baterías a su estado de carga en 0 %, lo cual no acarrea ninguna ventaja ya que el pack de baterías va a seguir entregando a la carga la misma cantidad de energía, esto es, cuando la batería de menor capacidad se descargue como pasaría si no se realizara el balanceo inferior.

La descarga de las celdas se puede llevar a cabo disipando su energía en resistores o transfiriendo la carga a las celdas más descargadas, siendo estos métodos clasificados como balanceo pasivo o balanceo activo respectivamente. Los métodos pasivos son mucho más sencillos y económicos y en la mayoría de los casos no es justificado el uso del método activo ya que los circuitos que llevan a cabo la transferencia de energía poseen perdidas por lo que no ofrecen ventajas reales en aplicaciones de baja potencia.

Por el otro lado, puede suceder que la capacidad química de las celdas (Q_{MAX}) pueden ser diferentes en un principio, esto provoca que, a pesar de que cada celda sea descargada por la misma cantidad de corriente, el estado de carga será diferente. Por ejemplo, si las 3 celdas que nombramos anteriores son descargadas por 100mAh, pero la 3er celda tiene una capacidad distinta al resto (por ejemplo, 2000mAh en vez de 2200mAh), los estados de carga resultantes serán de 95.4 % y 95 %.

Nuevamente esto provocará una diferencia en los OCVs de las celdas. Como puede observarse, 200mAh de diferencia en Q_{MAX} causa solamente una diferencia de un 0.4 % en el SoC, causando menor diferencia de voltaje que un desbalance en el estado de carga.

Teniendo esto en cuenta las baterías no podrán estar balanceadas durante todo el ciclo de descarga o de carga ya que al quitar la misma cantidad de carga el SoC de las mismas será distinto. Un ejemplo algo más gráfico de esto es con 2 vasos de agua, uno con el doble de capacidad del otro pero llenos hasta la misma altura. Si se remueve la misma cantidad de agua de ambos el de mayor capacidad se habrá descargado la mitad que el de menor capacidad.

En la práctica lo más común es lo que se llama *top balancing*, que implica balancear en el período de carga en la que el pack se considera cargado a un 100 % o durante el periodo de Tension constante o CV (del ingles *Constant Voltage*). El mismo consiste descargar las celdas de menor capacidad permitiendo a las celdas de mayor capacidad un margen para seguir cargando sin sobrecargar las primeras, evitando lo que generaría una drástica disminución de la vida útil del pack. Esta opción es mucho más atractiva que su contra parte denominada *bottom balancing* ya que esta balancea todas las baterías a su estado de carga cercano al 0 %, lo cual no acarrea ninguna ventaja ya que el pack de baterías va a seguir entregando a la carga la misma cantidad de energía, esto es, cuando la batería de menor capacidad se descargue como pasaría si no se realizara el balanceo inferior.

La descarga de las celdas se puede llevar a cabo disipando su energía en resistores o transfiriendo la carga a las celdas más descargadas, siendo estos métodos clasificados como balanceo pasivo o balanceo activo respectivamente. Los métodos pasivos son mucho más sencillos y económicos y en la mayoría de los casos no es justificado el uso del método activo ya que los circuitos que llevan a cabo la transferencia de energía poseen perdidas por lo que no ofrecen ventajas reales en aplicaciones de baja potencia.

Por último hay que considerar que corriente es necesaria para balancear el pack, a mayor capacidad de corriente las corrientes de auto descarga y cambios en la capacidad por envejecimiento van generando pequeños desbalances, pero los mismos son acotados, las corrientes de auto descarga generan desbalances menores al 0.1 % por ciclo.

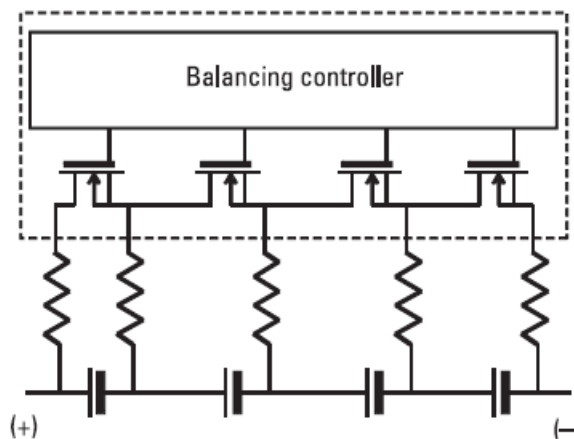


Figura 35: Esquemático de conexión de un balanceador pasivo.

El integrado BQ76PL536 de texas instrument es un Monitor de batería con protecciones para sobre y sub tensión y sobrecalentamiento así como también posee varias funcionalidades entre las cuales se destacan la posibilidad de escalar el número de celdas en serie gracias a su interfaz D2D VBUS (*device to device vertical BUS*) permitiendo la conexión en serie de varios BQ76PL536 permitiendo controlar hasta 6 celdas por integrado hasta un total de 192 celdas.

3.9. Plan de Trabajo

Se plantea el siguiente plan de trabajo con el tiempo estimado para la finalización del proyecto:

Tarea	Duración
Estudio, análisis y comparación del estado del arte de la tecnología. Estudio de los requerimientos de hardware.	2 Semanas
Modelado de baterías de Li-Ion en MatLab. Simulación de los distintos algoritmos y los circuitos de protección. Estudio y comparación. Validación y elección de los más adecuados.	4 Semanas
Desarrollo e implementación del hardware del BMS. *	6 Semanas
Desarrollo del Firmware del BMS con los algoritmos seleccionados. Implementación y depuración sobre el hardware.	4 semanas
Montaje del banco de pruebas para ensayar las protecciones y los algoritmos correspondientes. *	3 Semanas
Análisis de resultados, obtención de conclusiones y desarrollo del informe final.	3 Semanas
Total	24 Semanas

3.10. Extensión a futuros proyectos

El desarrollo del hardware y los algoritmos, tanto de ecualización como de estado de carga sirven como una buena base para futuros proyectos vinculados a la temática de energías renovables y VEs.

Como posible extensión se plantea el desarrollo de algoritmos novedosos para la estimación del Estado de Salud, su posible aplicación a sistemas de alta potencia e inclusive realizar estudios sobre nuevas tecnologías relacionadas a la composición química de las celdas.

4. Desarrollo

(Sección en desarrollo)

5. Ensayos

(Sección en desarrollo)

DRAFT

6. Conclusiones

(Sección en desarrollo)

Referencias

- [1] Panasonic, «Lithium Ion NCR18650PF Datasheet,» 2018.
- [2] M. H. M. L. A. H. A. Mohamed, «A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,» *ELSEVIER*, 2017.
- [3] M. Li, «Li-ion dynamics and state of charge estimation,» *ELSEVIER*, 2016.
- [4] J. S. Ari Hentunen Teemu Lehmuspelto, «Time-Domain Parameter Extraction Method for Thevenin-Equivalent Circuit Battery Models,» 2014.
- [5] P. Kollmeyer, «Panasonic 18650PF Li-Ion Battery Data,» 2018. dirección: <http://dx.doi.org/10.17632/wykht8y7tg.1>.

Abreviaturas

ARLB	Aqueous rechargeable lithium batteries. 8, 43
BMS	Battery Management System. 1, 4, 5, 6, 10, 11, 16, 18, 19, 40, 43
CAN	Controller Area Network. 1, 4, 43
CC	Constant Current. 33, 34, 43
CV	Constant Voltage. 33, 34, 43
DB	Diagrama de Bloques. 5, 43
DOD	Depth of Discharge. 21, 43
EC	Eficiencia Culombica. 9, 43
FPGA	Field Programmable Gate Arrays. 4, 16, 43
HRI	human-robot interactions. 43
IISB	Institute for Integrated Systems and Device Technology. 4, 43
Ion-Li	Batería de Ion Litio. 33, 34, 35, 36, 43
Li-Po	Batería de Polímero de Litio. 36, 43
LSTM	Long Short-Term Memory. 43
MCU	Microcontroller Unit. 5, 16, 43
OCV	Open Circuit Voltage. 13, 20, 21, 22, 43
RNN	Recurrent Neural Network. 43
SOA	Secure Operation Area. 18, 43
SoC	State Of Charge. 4, 6, 11, 13, 14, 20, 21, 37, 43
SoH	State Of Health. 4, 43
TCR	Temperature Coefficient of Resistance. 19, 43
UPS	Uninterruptible Power Supply. 1, 4, 43
VE	vehículo eléctrico. 3, 40, 43
VVEE	vehículos eléctricos. 3, 43