



RESIDENCIA PROFESIONAL

“ESTUDIO DE ALGORITMOS PARA EL MANEJO DE LAS BATERÍAS EN AUTOS ELÉCTRICOS.”

EMPRESA:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL (CINVESTAV), GUADALAJARA, MÉXICO.

RESIDENTE:

MARÍN MADRIGAL VIVIANA ESTELA

ASESOR INTERNO:

Dr. RAFAEL MOTA GRAJALES

ASESOR EXTERNO:

Dr. JUAN MANUEL RAMÍREZ ARREDONDO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. DICIEMBRE 2014.

Contenido

1. Introducción.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Estado del arte.....	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo.....	5
1.4.1 Objetivos específicos	5
1.5 Metodología	6
2. Fundamento teórico	8
2.1 Baterías.....	8
2.1.1 Baterías de Plomo-Ácido	8
2.1.2 Baterías de Ion-Litio.....	9
2.1.3 Baterías de Níquel-Cadmio.....	11
2.1.4 Baterías de Níquel Hidruro Metálico	12
2.2 Modelos de batería	14
2.3 Estado de carga (SOC).....	15
2.4 Métodos para la estimación del SOC.....	16
2.4.1 Método de Coulomb Ampere-hora.....	17
2.4.2 Método de voltaje en circuito abierto OCV.....	18
2.4.3 Método de estimación basado en el modelo de la batería.....	19
2.4.4 Método basado en el modelo de Red Neuronal Artificial	20
2.4.5 Método basada en lógica difusa	21
2.5 Sistema de gestión de la batería (BMS).....	22
2.5.1 Función	22
2.5.2 Monitoreo.....	22
2.5.3 Protección.....	23
2.5.4 Estimación	24
2.5.5 Control	24
3. Desarrollo	26
3.1 Definición de términos relacionados con el SOC de las baterías.....	26
3.2 Definición de términos relacionados con la eficiencia energética	26

3.3 Cálculo de la energía neta de las baterías	27
3.4 Modelo de la batería de Ion-Litio de Simulink	28
3.5 Experimento	29
4. Resultados y Conclusiones	33
4.1 Descarga en diferentes condiciones	33
4.2 Temperatura en función de descarga	34
4.3 Eficiencia energética bajo descarga.....	34
4.4 Eficiencia energética del modelo de la batería de Ion-Litio en Simulink.....	35
4.5 Conclusiones.....	37
Referencias bibliográficas	38
Anexos	40
Anexo A	40
Anexo B	42
Anexo C	43

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Con la rápida evolución de la tecnología en la red inteligente y los vehículos eléctricos (EVs), la batería se ha convertido en el dispositivo de almacenamiento de energía más prominente. Las discusiones recientes sobre el rendimiento de las baterías de Ion-litio (Li-ion), han confirmado hasta el momento que esta tecnología está creciendo muy rápidamente, desarrollando celdas con mayor potencia y densidades de energía. Además del desarrollo de baterías, el sistema de gestión de la batería (BMS) es un elemento clave para lograr una batería segura, confiable y eficiente.

Para cumplir estas tareas, el BMS tiene varias funciones, las cuales son: monitoreo balanceo y protección de las celdas, administración térmica, control de carga, estimación del estado de carga, (SOC) y estimación del estado de salud (SOH) (Rahimi,2013).

Una estimación precisa del SOC es necesaria no sólo para el manejo de la energía en los EVs y la smart grid, sino también para proteger la batería de sobrecarga o descarga total, que degradan la vida de la batería y pueden crear situaciones peligrosas. A pesar de la importancia de este elemento, el SOC no puede medirse directamente desde las terminales de la batería. Por esta razón, se requieren algoritmos para estimar el SOC de las baterías.

1.2 Estado del arte

En 2014 Wladislaw Waag, Christian Fleischer, Dirk Uwe Sauer (Waag,2014) realizaron una investigación de métodos de vigilancia del estado de carga de la batería, la capacidad, los parámetros de impedancia, potencia disponible, el estado de salud, y la vida restante con el enfoque de la elaboración de sus fortalezas y debilidades para el uso en aplicaciones en el BMS en-línea.

En 2013 Yanhui Zhang, Wenji Song, Shili Lin, Ziping Feng (Zhang,2014) proponen un método de estimación inteligente basada en el recuento de Coulomb, con el fin de mejorar la precisión de la estimación del SOC de la batería. Se propone un modelo mejorado para la estimación inicial de estado de carga (SOC_0), y las relaciones cuantitativas de las eficiencias energéticas son medidas y analizadas bajo la situación de descarga moderada.

En 2012 Jianqiang Kang, Fuwu Yan, Pei Zhang, Changqing Du (Kang,2012) proponen un nuevo método para calcular la eficiencia de energía para las baterías recargables. De acuerdo con el método, la eficiencia energética de las baterías eléctricas $LiFePO_4$ se mide bajo la carga de corriente moderada y condición de descarga. También se analizan las relaciones cuantitativas de las eficiencias para las baterías.

En 2012 R. Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M.J. Moure, M.D. Valdés (Iglesias,2012) analizaron un modelo electrodinámico, que posteriormente se emplea para describir y simular una batería real. Los parámetros del modelo se obtienen a partir de ciclos experimentales de descargas, que constan de periodos de descarga a corriente constante intercalados con otros en los cuales la batería está en reposo.

En 2011 Lezhang Liu (Liu,2013) analizó el modelo de sistema de la batería que es suministrado por SIMULINK que será usado para la estimación de los parámetros internos del sistema de la batería. Se diseña un observador de estado no-lineal adaptable para la estimación del SOC del sistema, y un método de procesamientos de señales es utilizado para atenuar los efectos del ruido en la estimación del SOC.

En 2011 Wang NianChun, Qin Yan (Yan,2011) discutieron la definición del SOC y los algoritmos de estimación tradicionales y algunos algoritmos de estimación del SOC mejorados fueron revisados. También se dan los principios de estos métodos. Mediante la comparación de las ventajas y desventajas de estos, proponen una nueva idea de la estimación del SOC. Esta propuesta pretende realizar la estimación del SOC precisa y simple.

1.3 Justificación

La estimación precisa del SOC es necesaria no sólo para el mejor manejo de la energía en los EVs y la smart grid, sino también para proteger la batería de sobrecarga o descarga total, las cuales degradan la vida de la batería y pueden crear situaciones peligrosas. A pesar de la importancia de este elemento, el SOC no puede medirse directamente desde las terminales de la batería. Por esta razón, se necesita desarrollar algoritmos para estimar el SOC de la batería.

1.4 Objetivo

Diseñar un estimador del estado de carga (SOC) de las baterías de Ion-Litio en base al método de Coulomb.

1.4.1 Objetivos específicos

Realizar y presentar un estudio de algoritmos para el manejo de las baterías en autos eléctricos.

Diseñar e implementar un sistema experimental para carga y descarga de las baterías de Ion-Litio.

Evaluar el método para calcular la eficiencia energética.

1.5 Metodología

a) Hardware

Para estimar los parámetros de las baterías experimentalmente, se construye un sistema capaz de someter a distintos perfiles de carga/descarga el paquete de baterías bajo análisis, monitoreando y almacenando las variables de interés (voltaje (VBatt), corriente (I) y temperatura de la batería).

El sistema experimental diseñado y construido, se muestra en la Figura 1.1. Como primer bloque se tiene el cargador inteligente modelo VANTAGE B6s+. Este cargador es multifuncional y puede equilibrar las baterías en carga y descarga. Para cargar las baterías se debe configurar el cargador con los siguientes parámetros: número de baterías, voltaje y la corriente a la cual se cargan. Estos parámetros pueden ser almacenados para una fácil programación. El cargador puede ser utilizado para varios tipos de baterías, en este trabajo se utilizara para carga de baterías de litio-ion.

Como segundo bloque se tiene la carga electrónica programable AC/DC 63800 de Chroma. Su función principal es descargar las baterías, teniendo la opción de seleccionar la corriente a la cual se descargan. Posteriormente se encuentra el sensor de corriente HX 05 P. Este adquiere la señal de corriente y la envía a la tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI USB-6008, que es la encargada de entregar mediciones de voltaje y corriente para su almacenamiento en la PC. De igual forma se monitorea la temperatura de las baterías.

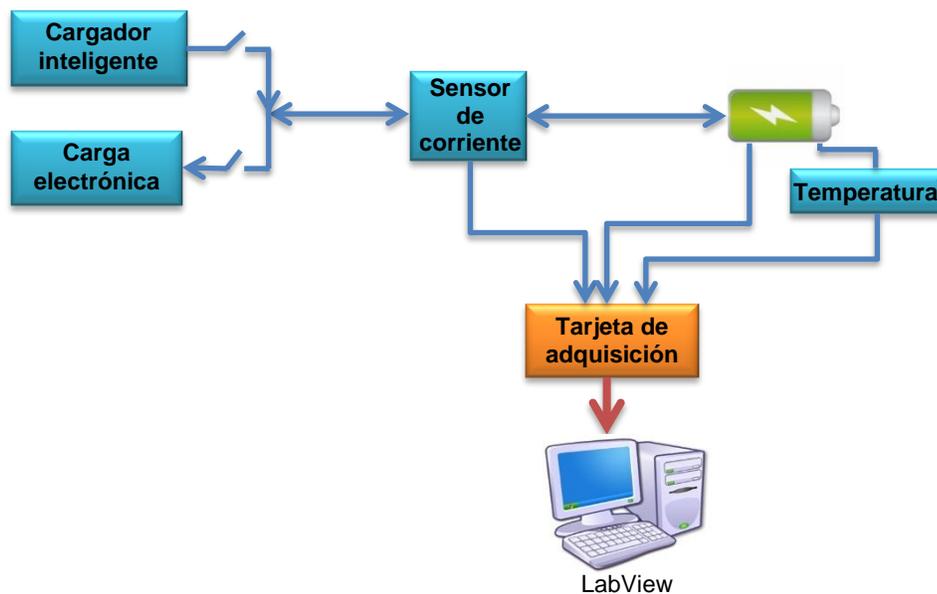


Fig. 1.1 Diagrama a bloques del hardware.

b) Software

En la figura 1.2 se presenta el diagrama a bloques del software. Primeramente, se conecta el cargador y se desconecta la carga electrónica para trabajar en el modo carga, en este modo se configura la corriente de carga de las baterías y se enciende el cargador, almacenándose las mediciones hasta cargar estas. Cuando este proceso termina, es apagado y desconectado el cargador, dejando reposar las baterías durante 1 hora, posteriormente se conecta la carga electrónica para trabajar en el modo descarga, configurándose el voltaje límite, el tipo de descarga continua o pulsante y la corriente de descarga.

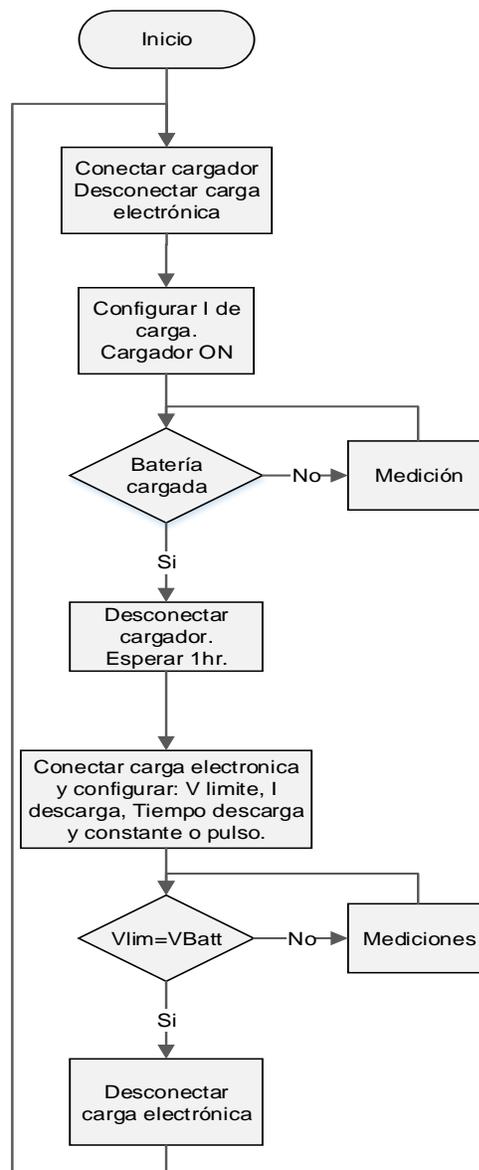


Fig. 1.2 Diagrama a bloques del software.

La carga electrónica es encendida, almacenándose las mediciones hasta alcanzar del voltaje límite programado, una vez alcanzado el límite, es apagada y desconectada la carga electrónica.

2. Fundamento teórico

2.1 Baterías

Una batería consiste en dos o más celdas eléctricas conectadas. Las celdas convierten la energía química en energía eléctrica. Estas consisten en los electrodos positivos y negativos en un electrolito. La reacción química entre los electrodos y el electrolito es la que genera electricidad en DC.

En el caso de las baterías secundarias o recargables se puede invertir la reacción química mediante la inversión de la corriente y la batería estaría en el estado de carga. La batería de plomo es el tipo tradicional recargable, pero existen otros que se están volviendo populares en EVs modernos. Los EV utilizan baterías de plomo ácido recargable, y hay un número muy grande de materiales y electrolitos que pueden combinarse para formar una batería.

Sin embargo, se han desarrollado muy pocas combinaciones como baterías recargables que son adecuadas para el uso en vehículos eléctricos. En la actualidad estos incluyen plomo ácido, níquel hierro, níquel cadmio, níquel metal hidruro (NiMH), polímero de litio y litio hierro, sulfuro de sodio y cloruro de sodio metálico.

También hay desarrollos más recientes de las baterías que pueden ser reabastecidas de combustible mecánicamente, las principales son de aluminio-aire y de zinc-aire. A pesar de todas las posibilidades y cerca de 150 años de desarrollo, recientemente se ha desarrollado una batería adecuada la cual permite la producción de vehículos eléctricos. Desde el punto de vista de los EVs la batería puede ser tratada como una “caja negra” que tiene una serie de criterios de rendimiento.

Estos criterios incluyen energía específica, densidad de energía, potencia específica, voltajes típicos, eficiencia de amperios, eficiencia energética, el costo, temperaturas de funcionamiento, tasa de descarga, número de ciclos de vida y tasa de recarga (Larminie,2003). Los principales parámetros en distintos tipos de baterías se detallan en la sección siguiente.

2.1.1 Baterías de Plomo-Ácido

Las baterías de plomo son un tipo de batería común en vehículos convencionales, no híbridos. Suelen ser de 6-12V y están constituidas internamente por celdas de 2V. Constituyen una parte importante del mercado mundial de baterías, tanto primarias como secundarias. Poseen una gran capacidad de descarga durante un breve periodo de tiempo, lo que las hace ideales para el arranque de motores de

combustión. Su forma más conocida es la batería de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente (Peña,2011).

Características funcionales de las baterías de plomo-ácido.

Las principales características funcionales de las baterías de plomo-ácido se pueden analizar considerando las ventajas y desventajas que presenta esta tecnología.

Ventajas:

- Estas baterías cuentan con voltaje elevado, mayor de 2V.
- Son capaces de suministrar una elevada intensidad de corriente y potencia.
- Al ser una tecnología madura, es el tipo de batería más barata del mercado.
- Componentes fácilmente reciclables. En España se reciclan más del 95% de todas las baterías utilizadas.

Desventajas:

- Baja energía específica. De los distintos tipos de baterías empleadas en los vehículos eléctricos son las que tienen una menor energía específica (10 – 40 Wh/Kg).
- No están preparadas para descargas profundas, el número de ciclos (1 ciclo = 1 carga y descarga) de carga y descarga de estas baterías es bajo, entre 400 y 800.
- Impacto ambiental negativo, debido a que cuentan con compuestos contaminantes como el Antimonio (Sb) y el Arsénico (As) (Anexo2,2011).

2.1.2 Baterías de Ion-Litio

Una batería de ion de litio es una batería recargable. Los iones de litio se mueven entre el ánodo y el cátodo, creando un flujo de electricidad. El litio en el ánodo (material de carbono) se ioniza y se emite al electrolito. Los iones de litio se mueven a través de un separador de plástico poroso y en el cátodo. Al mismo tiempo, los electrones son liberados desde el ánodo. Esto se convierte en una corriente eléctrica que viaja a un circuito eléctrico exterior. Durante la carga, los iones de litio pasan desde el cátodo al ánodo a través del separador. Dado que esta es una reacción química reversible, la batería puede ser recargada. Los tres componentes principales de una batería de iones de litio son el ánodo, cátodo y electrolito. Como se ilustra en la figura 2.1.

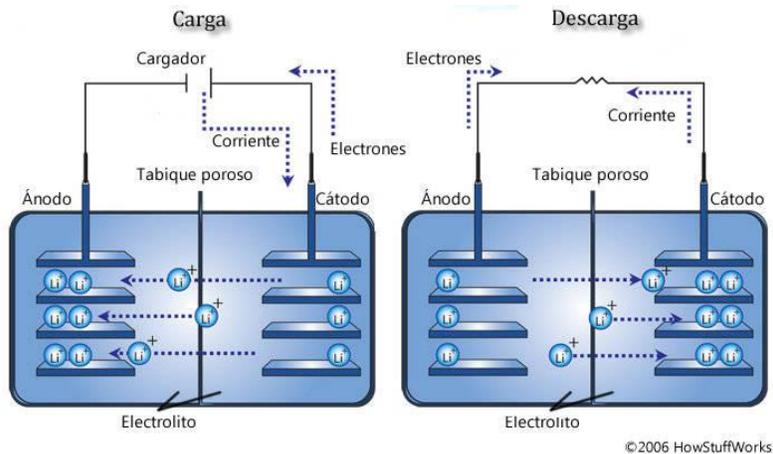


Figura 2.1 reacción química de las batería de Ion-Litio

El ánodo de una célula de iones de litio convencional está hecho de carbono, el cátodo es un óxido de metal y el electrolito es una sal de litio en un disolvente orgánico. El material del ánodo comercialmente más popular es el grafito. El cátodo es generalmente uno de estos tres materiales: una capa de óxido (tales como óxido de cobalto de litio), un polianión (como fosfato de litio hierro) o una espinela (como óxido de manganeso litio). El electrolito es típicamente una mezcla de carbonatos orgánicos. Recientemente, se han empleado nuevas arquitecturas usando la nanotecnología para mejorar el rendimiento.

Las baterías de iones de litio son más caras que las baterías de níquel-cadmio, pero operan en un rango de temperatura más amplio con densidades de energía más altas, mientras que es más pequeña y ligera. Son frágiles y así necesitan un circuito de protección para limitar picos de tensión.

Inicialmente utilizada para la electrónica de consumo, la batería de ion litio (LIB) está creciendo en popularidad para aplicaciones en EVs. La investigación está enfocándose en las mejoras de las baterías de Ion Litio, principalmente en la densidad de energía, durabilidad, costo y seguridad. Las características esenciales de la batería se muestran en la tabla 1.

Un punto importante sobre las LIBs es que se necesita un control preciso de la tensión cuando se carga. Si el voltaje es demasiado alto o bajo puede dañar la batería. Adecuados cargadores inteligentes comerciales se están desarrollando junto con la batería (Larminie,2003).

Tabla 1 Propiedades nominales de las baterías de Ion-Litio.

Energía específica	140 W kg ⁻¹
Densidad energética	250-260 W l ⁻¹
Potencia específica	300-1500 W kg ⁻¹
Voltaje nominal de la celda	3.6 V
Resistencia interna	Muy bajo
Autodescarga	muy bajo, □ 10% por mes
Número de ciclos de vida	>1000
Tiempo de recarga	2-3 horas, pero se puede cargar hasta el 80% de su capacidad en menos de 1h

2.1.3 Baterías de Níquel-Cadmio

Este tipo de acumulador, tiene al cadmio como sustancia activa en el polo positivo, mientras que en el polo negativo presenta un compuesto de níquel. La interacción de estas sustancias da como resultado una fuerza electromotriz característica de 1.3V. Esta tecnología ha sido utilizada durante décadas en la fabricación de acumuladores de energía para artículos electrónicos portátiles, también en aplicaciones industriales, como por ejemplo en BESS (*battery energy storage system*). Dentro de sus ventajas, está su bajo costo, además de su alta tasa de descarga y su bajo nivel de mantenimiento en comparación con acumuladores de plomo ácido tipo VRLA. Las baterías de níquel cadmio presentan mejor comportamiento que las baterías de plomo ácido, en relación a variaciones de capacidad con incrementos de temperatura. Este hecho se ilustra en la figura 2.2.

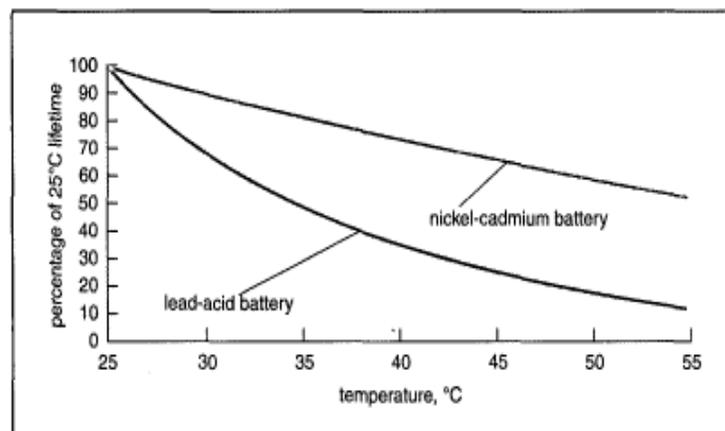


Figura 2.2 Capacidad de batería de plomo ácido y níquel cadmio en función de la temperatura (Burgos,2013).

Las características generales de la batería se muestran en la tabla 2. Al igual que con las baterías de plomo-ácido, las de níquel-cadmio deben ser correctamente cargadas. Sin embargo, ya que las celdas de NiCad son menos propensas a la auto-descarga, el problema planteado no es tan grande como con las celdas de plomo-ácido.

Normalmente, la batería se carga a una corriente constante hasta que su voltaje de celda alcanza un nivel predeterminado y en ese momento se corta la corriente. Este proceso continúa hasta que la batería se recarga (Larminie,2003).

Tabla 2 Propiedades nominales de las baterías de Níquel-Cadmio

Energía específica	140 W kg ⁻¹
Densidad energética	250-260 W l ⁻¹
Potencia específica	300-1500 W kg ⁻¹
Voltaje nominal de la celda	3.6 V
Resistencia interna	Muy bajo
Autodescarga	muy bajo, ~10% por mes
Número de ciclos de vida	>1000
Tiempo de recarga	2-3 horas, pero se puede cargar hasta el 80% de su capacidad en menos de 1h

2.1.4 Baterías de Níquel Hidruro Metálico

Las baterías de Ni-MH almacenan hidrógeno y sirven para producir energía eléctrica por energía electroquímica. Su principal noción es que uno de los electrodos almacene hidrógeno y durante el proceso de descarga este se libere como energía para producir electricidad.

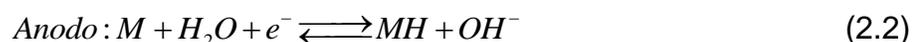
Reacciones química.

El material activo del electrodo positivo de las baterías de Ni-MH, en el estado de carga es de Ni (OH)₂. El material activo del negativo en el estado de carga, es el hidrógeno en forma de hidruro metálico (MH). Esta aleación metálica es capaz de sufrir una reacción reversible de absorción-desorción de hidrógeno según la batería se está cargando o descargando.

Una solución acuosa de KOH es el componente del electrolito. Una mínima cantidad de electrolito se utiliza en las celdas selladas, con la mayor parte del líquido absorbida por el separador y los electrodos. Esto facilita la difusión de oxígeno hacia el electrodo negativo en la reacción de recombinación de oxígeno al

final de la carga, como se verá más adelante. Se trata esencialmente de una celda de construcción en seco, siendo capaz de operar en cualquier posición.

En el proceso de carga de una celda de Ni-MH se produce, en el electrodo positivo, la combinación de Ni (OH)₂ con un oxidrilo (OH⁻) del electrolito, generándose oxihidróxido de níquel (NiOOH), agua (H₂O) y un electrón (e⁻). En la aleación metálica (M) del electrodo negativo, el agua (H₂O) del electrolito y un electrón (e⁻) reaccionan para producir el hidruro metálico (MH) en el electrodo negativo y el OH⁻ en el electrolito. En las ecuaciones (2.1) y (2.2) se muestran las reacciones químicas reversibles de carga y descarga que suceden en el electrodo positivo y negativo respectivamente. La ecuación (2.3) muestra la reacción global de la celda (→: carga; ←: descarga).



Cuando se descarga una celda de Ni-MH, las reacciones químicas son a la inversa de lo que ocurre en la carga. El hidrógeno almacenado en la aleación metálica del electrodo negativo se libera en el electrolito para formar H₂O. Así mismo, el agua libera un ion de hidrógeno que es absorbido por el electrodo positivo formando Ni (OH)₂ (Pérez,2003).

Tabla 3 Propiedades nominales de las baterías de Níquel Hidruro Metálico(Larminie,2003).

Energía específica	~65 W kg ⁻¹ dependiendo de la potencia
Densidad energética	~150 W l ⁻¹
Potencia específica	200 W kg ⁻¹
Voltaje nominal de la celda	1.2 V
Resistencia interna	Muy bajo
Autodescarga	muy bajo, ~0.06Ω por celda para celda de 1Ah
Número de ciclos de vida	~1000 a 80% descarga
Tiempo de recarga	1h, pero se puede cargar hasta el 60% de su capacidad en 20 min

2.2 Modelos de batería

Los modelos de comportamiento de batería más extendidos son los basados en las reacciones químicas que se producen en ellas, denominados modelos electroquímicos, y los que buscan definir un sistema eléctrico que se comporte como la batería real, llamados modelos de circuitos equivalentes. Los parámetros de cualquier modelo de batería deben extraerse para cada batería específica mediante experimentación.

A. Modelos electroquímicos

Basados directamente en los fenómenos electroquímicos, estos modelos predicen la energía que almacenan y proporcionan las baterías, pero ignoran fenómenos como la variación del voltaje de salida de la batería en carga, la influencia de la temperatura y las derivas por envejecimiento.

El denominado modelo de Sheperd es uno de los más conocidos y empleados para el análisis del comportamiento de baterías en vehículos híbridos. Este modelo describe el comportamiento electroquímico de la batería directamente en términos de voltaje y corriente. Suele utilizarse conjuntamente con la llamada ecuación de Peukert para obtener el voltaje y el estado de carga dadas las variaciones del consumo de energía. El modelo de Sheperd suele modificarse añadiéndose términos que describen ciertos aspectos específicos del comportamiento de la batería que son objeto de análisis, como pueden ser el comportamiento en sobrecarga y la generación de gases o el cálculo de la resistencia interna.

B. Modelos basados en circuitos equivalentes

Existe una gran variedad de modelos de circuitos equivalentes. La mayoría utiliza un condensador para representar la capacidad de almacenamiento de carga de la batería. El modelo lineal, mostrado en la figura 2.3, es el modelo más simple y se utiliza para simulaciones sencillas. Consiste en una fuente ideal con un voltaje de circuito abierto E_{OC} y un resistor equivalente en serie R , que representa la resistencia interna de la batería.

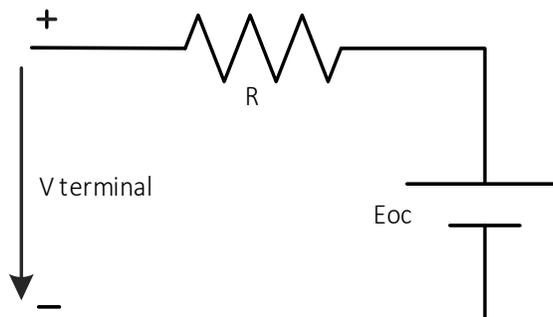


Figura 2.3 Modelo lineal de una batería.

El modelo equivalente de Thevenin figura 2.4 consiste en una fuente, dos resistores y un condensador. La fuente E tiene como valor la tensión de circuito

abierto, el resistor R modela la resistencia interna de la batería, el condensador C_o modela la capacidad en los electrodos de las celdas que componen la batería y el resistor R_o representa la resistencia no lineal entre dichos electrodos y el electrolito. Esta red modela la respuesta transitoria común a las baterías. En la forma más básica de este modelo se asume que los elementos son constantes, por lo que es un modelo muy utilizado dado su sencillez (Iglesias,2012).

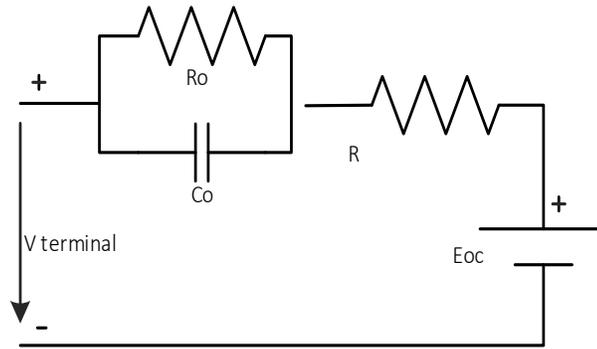


Figura 2.4 Modelo equivalente de Thevenin.

Añadiendo más elementos al modelo equivalente de Thevenin anterior se obtienen mejoras con las que se modelan fenómenos, como la respuesta a sobrecargas y el fenómeno de autodescarga cuando la batería está en circuito abierto. En los modelos anteriores se asume que todos los elementos tienen valores constantes; en realidad los valores dependen de las condiciones de funcionamiento de la batería: estado de carga, funcionamiento en carga o descarga, el tipo de carga o descarga, la temperatura de funcionamiento, etc. Para mejorar el modelo se suele utilizar un modelo de Thevenin modificado, de forma que los parámetros E_{oc} , R , C_o y R_o dependen de las condiciones de funcionamiento.

2.3 Estado de carga (SOC)

La indicación del SOC se usa para determinar el final de la carga y descarga. El exceso de carga y descarga es la principal causa de la falla de una batería. El SOC es una de las funciones más importantes de un BMS. Es necesario no sólo para conocer el tiempo de autonomía, sino también analiza el estado individual de cada celda para comprobar si se cargan o descargan de manera uniforme, a fin de verificar que las células no realicen esfuerzos excesivos de manera individual.

Muchas aplicaciones requieren un conocimiento del estado de carga de la batería o de las células individuales que forman la batería. Esto puede ser simplemente para proporcionar al usuario una indicación de la capacidad restante o podría ser necesaria en un circuito de control para garantizar un control óptimo del proceso de carga.

El SOC es particularmente importante para las baterías de litio. Son las únicas que necesitan obligatoriamente un sistema electrónico de gestión de baterías (BMS) para mantenerlas dentro de un marco de seguridad y garantizar un ciclo de vida largo.

El SOC es definido normalmente de dos maneras:

- La capacidad disponible, es expresada como un porcentaje de la capacidad que poseía la batería originalmente.
- La capacidad disponible, es expresada como un porcentaje de la capacidad actual.

Aunque habitualmente se suele utilizar la primera opción, es más útil la segunda, pues la capacidad de la batería se reduce gradualmente a medida que esta envejece. Se estima que la capacidad de una batería o celda se reduce hasta el 80% de su capacidad al final de la vida, debido a los efectos de las temperaturas y a las altas tasas de descarga, reduciendo la capacidad efectiva de las celdas (Peña,2011).

2.4 Métodos para la estimación del SOC

Para realizar el control de carga de baterías de manera eficiente, es necesario contar con un medio que permita determinar con precisión el estado de carga de las baterías. Esto puede emplearse como un sustituto de un indicador de combustible utilizado en los vehículos convencionales. Por lo tanto, la determinación del SOC en la batería es siempre una parte del BMS. A continuación se muestra la figura. 2.5 donde se muestra algunos de los principales métodos para la estimación del SOC y posteriormente se describen.

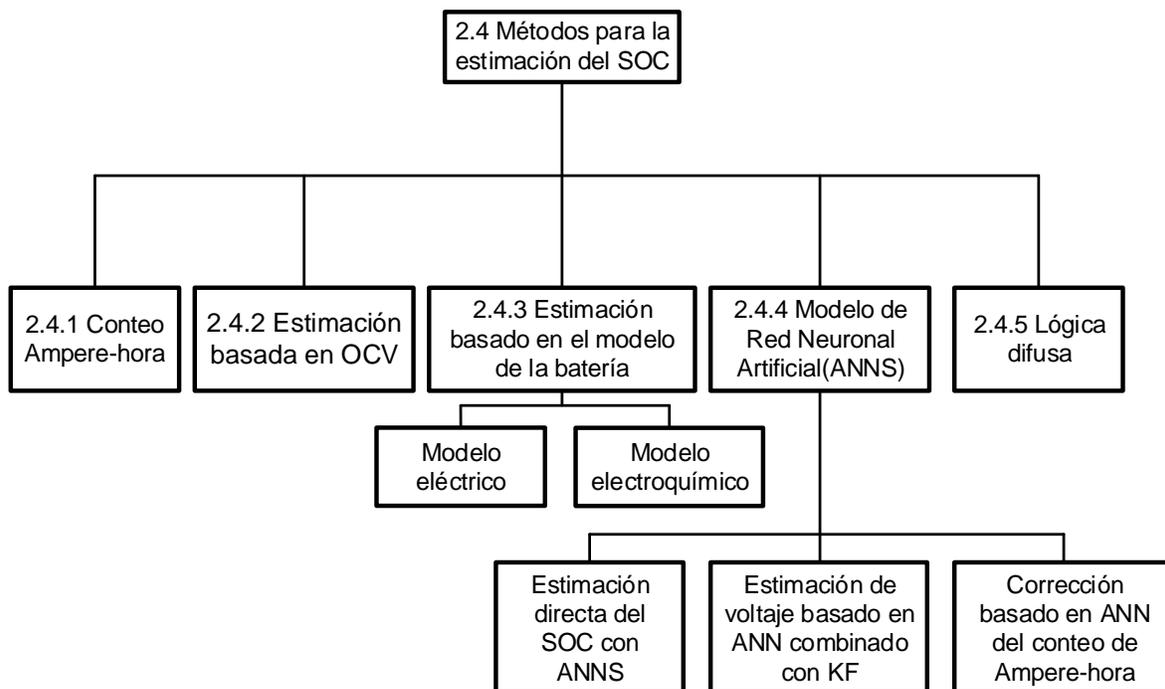


Fig. 2.5 Métodos para la estimación del SOC.

2.4.1 Método de Coulomb Ampere-hora

Este método funciona de forma precisa para las LIBs, debido a que no existen reacciones secundarias durante el funcionamiento normal. Sin embargo, para la estimación del SOC, el SOC inicial debe ser conocido. Además, cuando el recuento de amperios-hora se lleva a cabo durante un largo período de tiempo, los errores de mediciones acumulados pueden ser una fuente de inexactitud significativa y una recalibración adicional puede ser requerida. Por lo tanto, el conteo de amperios-hora sólo se utiliza en combinación con otras técnicas de apoyo, por ejemplo, con una estimación de SOC basado en voltaje en circuito abierto (OCV).

Existen otras técnicas de apoyo como es el análisis de potencia o la estimación del SOC basado en el cálculo de la resistencia de la batería.

Ambas técnicas tienen todas las desventajas de impedancia basado en la estimación del SOC. En resumen, el conteo de amperios-hora puede llegar a la conclusión de ser una buena base para la estimación del SOC de las baterías de Ion Litio (LIBs) en EVs y vehículos eléctricos híbridos (HEVs) por las siguientes razones:

- ✓ Sensores de bajo costo para la medición de corriente.
- ✓ La potencia de cálculo requerida es muy baja.
- ✓ Combinación con otras técnicas es posible (Waag,2014).

Este método es el método más simple y general para obtener el SOC de la batería. El método integral Ampere-hora puede ser representada por la ecuación (2.4).

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t \eta I dt \quad (2.4)$$

Donde, SOC_0 representa el SOC en el tiempo inicial t_0 ; Q_0 representa la capacidad nominal (la capacidad de la batería en condiciones estándar, que cambia con el tiempo de servicio); η representa la eficiencia coulombica que es igual a 1 en la descarga, y es menor que 1 durante la carga; I representa la corriente que es negativa en la carga y positiva en la descarga.

Los resultados del método de integral Ampere-hora tienen una precisión bastante satisfactoria dentro de un cierto período de tiempo (que se relaciona principalmente con la precisión del muestreo y la frecuencia del sensor de corriente) si el SOC_0 inicial es relativamente preciso (Lu,2013).

En la tabla 4 se presenta las características de este método (Burgos,2013).

Tabla 4 Características del método Ampere-hora.

Aplicación	Todo tipo de baterías.
Principio funcionamiento	Se basa en la realización de un balance de la corriente que entra de la corriente que entra y sale del acumulador.
Aplicación	Sistema donde el acumulador está permanentemente en funcionamiento.
Ventajas	Puede ser aplicado en línea. Es simple de implementar. La influencia de los errores en las mediciones de corriente puede ser disminuida combinándolo con el método del OCV.
Desventajas	Necesita un modelo para las pérdidas. Sensible a las reacciones parasitas. Costo elevado para una medición de corriente exacta. Necesidad de puntos de recalibración regulares.

2.4.2 Método de voltaje en circuito abierto OCV

La relación entre el OCV y el SOC de la batería se explota para la estimación del SOC en cualquier tipo de batería. Puede ser eficientemente utilizado para las LIBs en vehículos eléctricos de baterías (BEVs) y VH debido a las razones siguientes:

1) Muchos HEVs y BEVs son impulsados sólo algunas horas por día, y que más tarde son cargados dentro de algunas horas. Por lo tanto, la batería estará bajo condiciones de circuito abierto durante el tiempo suficiente para permitir una correcta medición del OCV.

Algunos HEVs y BEVs podrían ser conducidos por un largo tiempo y sólo habrá períodos muy cortos para medir el OCV de la batería. Por lo tanto, el OCV medido puede ser "perturbado" por sobretensiones de la batería que disminuirá lentamente después de la interrupción de la corriente. Sin embargo, existe un número de métodos para considerar el descanso del OCV y pronosticar el OCV "puro" requerido de la batería para una estimación del SOC precisa.

Una de las ventaja es que la relación del OCV y el SOC cambia sólo un poco durante la vida útil de la batería.

2) La histéresis del OCV se puede despreciar a temperaturas moderadas y altas, excepto para las baterías con un cátodo de LiFePO₄. Sin embargo, el uso de un modelo de histéresis podría requerir de un modelo complejo para la estimación del

SoC. Considerando estos aspectos y ventajas del conteo Ampere-hora, la combinación del OCV y el método conteo Ampere-hora es aparentemente un sistema muy simple y un enfoque eficiente para la estimación del SOC en las LIBs en BEVs y HEVs (Waag,2014).

2.4.3 Método de estimación basado en el modelo de la batería

La idea principal de la estimación del SOC basado en los modelos de la batería, es conectar las señales medidas (tensión, corriente y temperatura) con el SOC de esta. Mediante la medición de la batería en línea y utilizando las señales de entrada de los modelos, un modelo puede ser utilizado para calcular el SOC.

Se emplean los siguientes dos tipos de modelos de baterías: modelos eléctricos y electroquímicos.

Modelo eléctrico

Un modelo eléctrico es el tipo más popular para la estimación del SOC. Por ejemplo, se puede utilizar un modelo de circuito equivalente (ECM), como se muestra en la figura 2.6. Por otra parte, el modelo puede ser un modelo matemático puro. En ambos casos, el modelo se representa en forma de una o más ecuaciones que emplean magnitudes eléctricas.

El SOC de la batería se puede incorporar directamente en el modelo usando su relación con el OCV de la batería. Una posible variación es no incorporar el SOC de la batería, pero para estimar el OCV se utiliza el modelo de la batería y posteriormente se utiliza la relación del OCV-SOC para calcular la estimación del SOC a partir del OCV.

La desventaja común de todos los métodos de estimación del SOC basados en modelos eléctricos, es que los parámetros del modelo sólo pueden ser parametrizados de baterías nuevas. La ventaja común es que el SOC se puede estimar en cualquier condición de la batería durante la carga o descarga, siempre y cuando el modelo de batería empleado sea capaz de reproducir el comportamiento de la batería en esta condición.

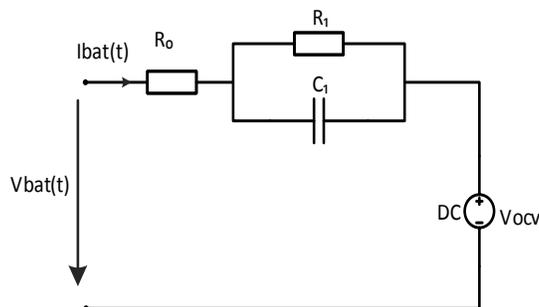


Figura 2.6 Un ejemplo del modelo de circuito equivalente (ECM) que puede ser utilizado para la estimación del SOC basado en el modelo.

Modelos electroquímicos

Como una alternativa a los modelos eléctricos, se puede utilizar el modelo electroquímico para la estimación del SOC. La ventaja de los modelos electroquímicos es que inherentemente incluyen la dependencia del comportamiento de la batería en el SOC y la temperatura, mientras que los modelos eléctricos deben almacenar sus parámetros como tablas de consulta para diversas combinaciones de SOC y temperatura. La desventaja de los modelos electroquímicos es su alta complejidad. Esta complejidad no sólo impide la aplicación de algoritmos en microcontroladores de bajo costo, sino que también reduce el número de parámetros del modelo (Waag,2014).

Por lo general, un modelo de batería, especialmente un modelo ECM (Enhanced Cycling Mat) podría expresarse como la ecuación:

$$U = U_{OC} - U_R - U_P \quad (2.5)$$

Donde U es la tensión de los bornes de la batería, U_{OC} es el OCV de la batería, U_R es la caída de tensión causada por la resistencia óhmica y U_P es la caída de tensión causada por algún proceso de polarización interna. Por lo tanto, es fácil de encontrar el OCV de la batería si se conoce los parámetros del modelo de la batería (Lu,2013).

2.4.4 Método basado en el modelo de Red Neuronal Artificial

Con este método el acumulador puede ser modelado por una red neuronal, donde las entradas de las neuronas pueden ser tensiones, corrientes y temperaturas, y la salida la tensión en bornes del acumulador o el estado de carga de éste. Luego, mediante un proceso de aprendizaje, se determinan los pesos de todas las neuronas de la red, con lo cual se tiene calibrado el modelo para ser aplicado en nuevos casos.

Las redes neuronales (NN) son capaces de aprender, adaptarse a cambios y almacenar información, además de brindar la posibilidad de ser utilizada en tiempo real, y finalmente, permiten realizar la modelación del sistema sin la necesidad de tener un conocimiento acabado de su comportamiento.

Una fuerte desventaja de este método, es la necesidad de contar con un gran número de datos experimentales del sistema en estudio para poder entrenar la red.

Este método puede ser utilizado de dos maneras, la primera de ellas es determinar el SOC directamente desde la red neuronal, mientras que la segunda es combinar este método ya sea con el filtro de Kalman o con el filtro de partículas. En la tabla 5 se presenta un resumen de este método.

Tabla 5 Método basada en el modelo de Red Neuronal Artificial.

Aplicación	Todo tipo de baterías.
Principio funcionamiento	Tipo caja negra.
Ventajas	Para su implementación no requiere un conocimiento detallado del sistema.
Desventajas	La arquitectura de la red se determina de manera empírica. Necesita una gran cantidad de datos para ajustar los pesos de la red.

2.4.5 Método basada en lógica difusa

La modelación basada en lógica difusa es una poderosa herramienta para abordar problemas no lineales a partir del conocimiento de datos experimentales. Este tipo de modelación, se ha combinado con EIS (Impedancia Electroquímica Espectroscopia) para la determinación del SOC y del SOH. Su principal ventaja radica en que para su implementación no se requiere un conocimiento detallado del sistema, además de que puede ser utilizado en sistemas no lineales. Quizás su principal desventaja se debe a que para poder determinar los conjuntos difusos, es necesaria una gran cantidad de datos. Este método puede ser combinado con redes neuronales dando origen a modelos híbridos denominados neuro difusos.

La modelación difusa para la estimación del SOC puede ser utilizada directamente para determinar el SOC desde el modelo difuso, o bien, puede ser combinada con el filtro del Kalman o el filtro de partículas, en la cual, el modelo difuso se utiliza como ecuación de observación. En la tabla 6 se presenta un resumen de este método.

Tabla 6. Método basada en lógica difusa

Aplicación	Todo tipo de baterías.
Principio funcionamiento	Tipo caja negra.
Aplicación	Tantas aplicaciones dinámicas como estáticas de la batería.
Ventajas	Para su implementación no requiere un conocimiento detallado del sistema.
Desventajas	Necesita gran cantidad de datos para determinar las reglas difusas.

2.5 Sistema de gestión de la batería (BMS)

Una batería de vehículo se enfrenta a un entorno de trabajo intenso. Por un lado, se compone de un gran número de celdas para proporcionar la potencia necesaria de accionamiento.

La tensión y la corriente de la batería son a la vez mucho más alta que en otros dispositivos electrónicos. Por otra parte, la vibración, las interferencias electromagnéticas, campos de temperaturas desiguales y otras condiciones negativas no se puede evitar en los vehículos, lo que provoca daños y peligro a la batería. Además, el costo de la batería representa una gran parte del costo del vehículo, especialmente para los vehículos eléctricos de batería (BEV), en la que representa aproximadamente la mitad del costo. Para reducir el costo de los vehículos eléctricos, es necesario proteger la batería y prolongar su ciclo de vida.

Las baterías, como un componente pasivo, no tienen capacidad de protegerse a sí misma. Por lo tanto, un BMS propone un controlador de vehículo, el cual asume la responsabilidad de administrar el sistema de la batería y la comunicación con el sistema de memoria virtual (VMS) para informar del estado del sistema de la batería (Yan,2010).

2.5.1 Función

En (Conte,2006), un BMS se define como un sistema para supervisar la operación correcta de la batería y la realización de las medidas de seguridad apropiadas en caso de situaciones peligrosas. Además de las funciones de vigilancia y protección, (Stuart,2002) sugiere que el BMS debería de controlar y equilibrar el paquete de baterías. (Klein,2006) también añade funciones de estimación de estado y comunicación. En resumen, la tabla 7 enumera las funciones generales del BMS y sus detalles.

2.5.2 Monitoreo

El monitoreo de la batería implica el muestreo de los datos relevantes de la batería a una frecuencia de muestreo. Aunque las complejas reacciones electroquímicas se producen dentro de una batería, sólo el voltaje, la corriente y la temperatura de la celda se pueden medir directamente. Las siguientes funciones de estimación, de protección y de control tienen que ser realizada sobre la base de estos datos limitados. Por lo tanto, el monitoreo es la base del BMS y debe obtener información con la mayor precisión posible.

La medición del voltaje de la celda generalmente se lleva a cabo a través de los amplificadores de operación de aislamiento o chips especiales, tales como AD7280 producido por Analog Devices, y LTC6802 producido por Linear Technology. La medición de corriente generalmente se implementa a través de la derivada de la corriente y aislamiento de operación o sensores de corriente. La

medición de temperatura se puede realizar usando un termopar, termistor, etc., típicamente un termistor de coeficiente de temperatura negativo (NTC).

Tabla 7 Funciones generales del sistema de gestión de la batería (BMS).

Monitoreo	Voltaje de celda. Tensión de la batería Corriente de la batería Temperatura de la batería
Protección	Sobrecorriente Sobretensión Fuga de electricidad (aislamiento) Sobrecarga Sobredescarga
Estimación	Estado de carga Estado de salud
Control	Control de carga Control de igualación de baterías Control térmico Control de potencia
Comunicación	SPI en el modulo CAN en vehículo COM entre BMS y PC

2.5.3 Protección

Es necesaria la detección automática de situaciones anormales para prolongar la vida útil de la batería, igualmente para reducir el costo de los vehículos eléctricos, y garantizar la seguridad de todo el sistema del vehículo, especialmente al conductor y los pasajeros. En la batería, el BMS se ocupa de cuatro anomalías.

En primer lugar, si la corriente es mayor que la capacidad de carga o descarga de la batería, conocida como sobrecorriente, causará daños permanentes en las celdas y el riesgo de explosión. En segundo lugar, si el voltaje de carga es mayor que el voltaje de desconexión de la batería, conocido como el exceso de tensión, que tiene el potencial para la ruptura de los electrodos y causaría un corto circuito interno.

Para garantizar la seguridad de los pasajeros, también es necesario asegurarse de que el sistema de la batería se encuentra totalmente aislado de la carrocería del vehículo y no tener fugas de electricidad. A nivel de la celda, la protección

principal es evitar la sobrecarga y descarga profunda. Estas funciones se implementan basadas en la detección de los estados de carga y el vacío completo de la batería, como se lo indica el SOC.

2.5.4 Estimación

La batería es típicamente un sistema de menos información, dentro de la cual algunos estados fundamentales no son directamente mensurables, tales como estado de carga (SOC) y el estado de mantenimiento (SOH). Estos estados ocultos tienen que ser estimados en base a los datos obtenidos por el monitoreo. Aplicaciones en EV, el SOC, es definido como la proporción de cargas residuales en una batería a su capacidad, es el estado más importante de la batería, lo que indica la capacidad de la celda.

Para los BEVs, el SOC se utiliza para determinar el estado de carga, mientras que para los HEV se determina cuando el motor está encendido y apagado. Además, SOC es la base para evitar que las celdas se sobrecarguen y sobredescarguen. Así mismo, el control de carga y balanceo.

El SOH es una medida que indica la condición general de esta para ofrecer las prestaciones previstas en comparación con una batería nueva, esto refleja el envejecimiento de la celda. Dado que muchos parámetros de la batería tienen una estrecha relación con el SOH. Mientras tanto, el número de ciclos de carga-descarga es generalmente una medida del SOH si no ocurre ningún abuso extremo en la batería. Por lo tanto, un libro de registro de uso de la batería es útil para estimar el SOH.

2.5.5 Control

El control de carga es una característica esencial de un BMS. Los datos estadísticos muestran que la carga inapropiada es la principal causa de daños a las baterías. Por lo tanto, el requisito básico de control de carga es asegurar la protección de la batería. Los vehículos eléctricos requieren que la batería se cargue rápidamente, de modo que esté en fuera de servicio en poco tiempo. En este sentido, el control de carga es un factor importante que determina la comercialización de vehículos eléctricos.

Una batería vehicular está formada por varias celdas, debido a la inconsistencia de las células, es imposible evitar un desequilibrio de las celdas. El desequilibrio de la celda afecta negativamente al rendimiento de la batería por dos razones, en primer lugar, existe el riesgo de sobrecarga de la celda más fuerte y descarga de la celda más débil. En segundo lugar, se reduce en gran medida la capacidad de uso de toda la batería, su capacidad de descarga se determina por la celda más débil y su capacidad de carga está limitada por la más fuerte. Por lo tanto, el control de balanceo es también una función esencial del BMS.

Se necesita un control térmico para mantener la temperatura de la batería dentro de un rango seguro y para equilibrar la temperatura. La administración térmica por lo general tiene dos pasos. El primer paso es el diseño de la disposición en el interior de la batería basada en métodos de análisis térmicos, por ejemplo análisis de elementos finitos, destinado a establecer un campo de temperatura de forma uniforme, aunque este paso no está involucrado en el diseño del BMS.

El segundo paso es el control de la temperatura de la batería. Los actuadores, tales como ventiladores, simplemente son controlados para estar encendido o apagado. El control de la energía funciona sólo en el momento en que el vehículo arranca. Su objetivo es limitar la corriente inicial dentro de un rango seguro por una resistencia conectado en serie.

Esta función permite un comportamiento de arranque suave, que es beneficioso para el motor. Después del autodiagnóstico de todo el sistema del vehículo, la resistencia se apaga y el sistema de la batería cambia a su período de servicio normal (Conte,2006).

3. Desarrollo

3.1 Definición de términos relacionados con el SOC de las baterías

El estado de carga de una batería es un número que no tiene dimensiones, el cual representa el contenido de carga de una batería y se define como:

$$\text{SOC}_{(t)} = \frac{Q_{(t)}}{Q_0} \quad (3.1)$$

Donde $Q_{(t)}$ (con unidades Ah) es la cantidad de carga en el tiempo t y Q_0 (Ah) es la capacidad nominal de la batería. El cálculo del SOC (3.2), aplicado durante el funcionamiento del vehículo, es la integración de la corriente de la batería:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) - \frac{\int_{t-1}^t I dt}{Q_0} \times 100 \quad (3.2)$$

El cálculo se realiza cada cierto intervalo de tiempo, partiendo del valor obtenido en el intervalo anterior. La ecuación varía según el proceso sea de carga o descarga debido al cambio en el signo de la corriente (se adopta el convenio de considerar la corriente positiva en descarga y negativa en carga) y al cambio en el rendimiento en amperios-hora.

Usualmente a la expresión dada por (3.2), se le agrega un factor de eficiencia coulombica (η_i), por lo cual se transforma en la expresión dada por (Bard,2001):

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) - \eta_i \frac{\int_{t-1}^t I dt}{Q_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Dónde:

$$\eta_i < 1 \quad (3.4)$$

3.2 Definición de términos relacionados con la eficiencia energética

La eficiencia energética se divide en diferentes categorías que son: eficiencia energética en la carga (η_{charge}), eficiencia energética en la descarga (η_{disch}) y la eficiencia energética en carga–descarga (η_{battery}). La eficiencia energética en carga es la relación entre la energía neta (ΔQ_n) y la energía cargada (Q_{in}).

$$\eta_{\text{charge}} = \frac{\Delta Q_n}{Q_{\text{in}}} \quad (3.5)$$

El valor de Q_{in} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{in} = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{charge} Q_0 dSOC \quad (3.6)$$

Donde, SOC (0) es el estado inicial de la carga (SOC), SOC (t) es el estado de carga en tiempo real, U_{charge} es el voltaje de la batería cuando es cargada.

La eficiencia energética en descarga es la relación entre la energía descargada (Q_{out}) y la energía neta (ΔQ_n). La ecuación para calcular la energía neta se mostrara más adelante.

$$\eta_{disch} = \frac{Q_{out}}{\Delta Q_n} \quad (3.7)$$

El valor de Q_{out} se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{out} = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{disch} Q_0 dSOC \quad (3.8)$$

En la ecuación (3.8), U_{disch} representa el voltaje de la batería cuando es descargada. En general, datos relativos a las baterías, como corriente, voltaje y tiempo, se obtienen cuando las baterías están en funcionamiento. Por lo tanto, Q_{in} y Q_{out} pueden calcularse de los datos obtenidos.

La eficiencia energética en la carga-descarga es la relación de Q_{out} a Q_{in} cuando la batería sufre un ciclo de carga-descarga en ciertas condiciones (Zhang,2014).

$$\eta_{battery} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (3.9)$$

3.3 Cálculo de la energía neta de las baterías

La energía de entrada o de salida no debe ser considerada como la energía neta atribuida a la polarización resultante de la carga o descarga. De acuerdo con la Ref. (Bard,2001), la energía libre ($|\Delta G|$) de las baterías, que representa la energía química almacenada, está dada por:

$$|\Delta G| = \text{Charge passed} \times \text{Reversible potential difference} \quad (3.10)$$

La energía libre es sustituida por la energía neta, debido a que el primero es un concepto termodinámico. La diferencia de potencial reversible es una constante de

la batería lo que es sustituido por el voltaje de circuito abierto (U_{OCV}). Debido al U_{OCV} variante con el SOC, la energía neta, ΔQ_n , viene dada por (Kang,2012):

$$\Delta Q_n = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{OCV} Q_0 dSOC \quad (3.11)$$

3.4 Modelo de la batería de Ion-Litio de Simulink

El modelo de la batería de Simulink se utiliza para determinar la eficiencia en simulación.

El bloque de la batería de Simulink implementa un modelo dinámico que se parametriza dependiendo del tipo de batería que se utiliza. En este caso, los parámetros del circuito equivalente se modifican, para representar la batería de Ion-Litio, en base a sus características de descarga. En la figura 3.1 se presenta el circuito equivalente de la batería (Tremblay,2009):

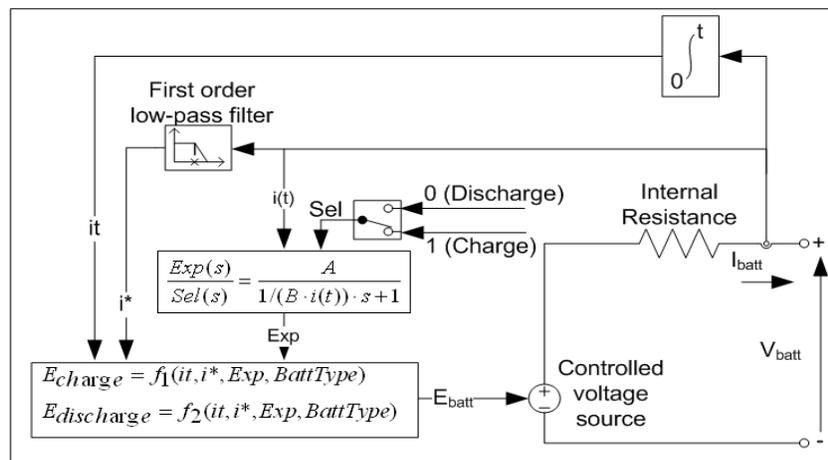


Figura 3.1 Circuito equivalente de la batería en Simulink.

Modelo de Ion-Litio

Modelo en descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K_x \frac{Q}{Q-it} x i^* - K_x \frac{Q}{Q-it} x it + A x \exp(-B x it) \quad (3.12)$$

Modelo en carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K_x \frac{Q}{it + 0.1 \times Q} x i^* - K_x \frac{Q}{Q-it} x it + A x \exp(-B x it) \quad (3.13)$$

Dónde:

E_{batt} = Voltaje no lineal (V)

E_0 = Voltaje constante (V)

Exp (s) = Zona exponencial (V)

Sel (s) = Representa el modo de la batería. Sel (s) = 0 durante la descarga de la batería, Sel (s) = 1 durante la carga de la batería.

K = Constante de polarización (Ah^{-1}) o la resistencia de polarización (Ohms)

i^* = Corriente de baja frecuencia (A)

i = Corriente de la batería (A)

i_t = Capacidad extraída (Ah)

Q = Máxima capacidad de la batería (Ah)

A = Voltaje exponencial (V)

B = Capacidad exponencial (Ah^{-1}) (Tremblay,2009).

3.5 Experimento

El estudio consiste en una serie de cargas y descargas de seis baterías de ion litio conectadas en serie, con capacidad de 2.6 Ah cada una, para investigar el desempeño del estimador del SOC implementado mediante (3.2), así como medir la eficiencia energética de las baterías, (3.7)-(3.8), bajo corrientes de descarga moderadas.

El diagrama a bloques mostrado en la sección 1.5 b) es diseñado e implementado en LabVIEW 2012 para adquirir y almacenar los voltajes y la corriente de las baterías. La interfaz desarrollada se ilustra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Sistema de adquisición de datos LabVIEW.

Esta interfaz contiene indicadores de los voltajes de las baterías, indicador de corriente de carga o descarga, indicador de tiempo de descarga indicador de encendido/apagado de la carga electrónica, control de tiempo de descarga y botón de paro. También es utilizado el siguiente equipo, cuyo montaje experimental se muestra en las Figuras 1.1 y 3.3.

Siguiendo la metodología descrita en la sección 1.5 b), para llevar a cabo un ciclo de carga y descarga de la batería, es conectado el cargador inteligente previamente configurado para cargar las baterías.



Figura 3.3 fotografía del montaje experimental.

Una vez cargadas las baterías, se conecta la carga electrónica, previamente configurada. La carga electrónica trabaja en modo encendido / apagado por señal externa, con lo cual el sistema diseñado en LabVIEW accionara dicha carga, mediante un pin de control de la tarjeta USB 6008, que se conecta al pin 9 del conector TTL I / O de la carga electrónica (ver anexo C). La referencia de tierra del TTL I / O está en el pin 1.

Se configura un tiempo de retraso para el accionamiento de la carga electrónica y posteriormente se realiza la descarga de las baterías, monitoreando y almacenando los valores cada 20 milisegundos. Al finalizar se apaga la carga electrónica y los datos se encuentran disponibles para llevar a cabo su análisis.

La primer parte del estudio consiste en obtener una aproximación de la relación no-lineal OCV-SOC, para posteriormente ser usada en el cálculo de la eficiencia energética. Esta se obtiene, realizando la descarga de la batería a corriente constante, (figuras 3.4) dejándola reposar en los puntos de interés por 30 minutos. El valor final de tensión de cada uno de los tramos de reposo se toma como el valor de tensión a circuito abierto para ese estado de carga. El cálculo del SOC es simple: dado que el perfil de descarga es rectangular, la integral necesaria para determinar el SOC se convierte en una simple multiplicación (ecuación (3.2)).

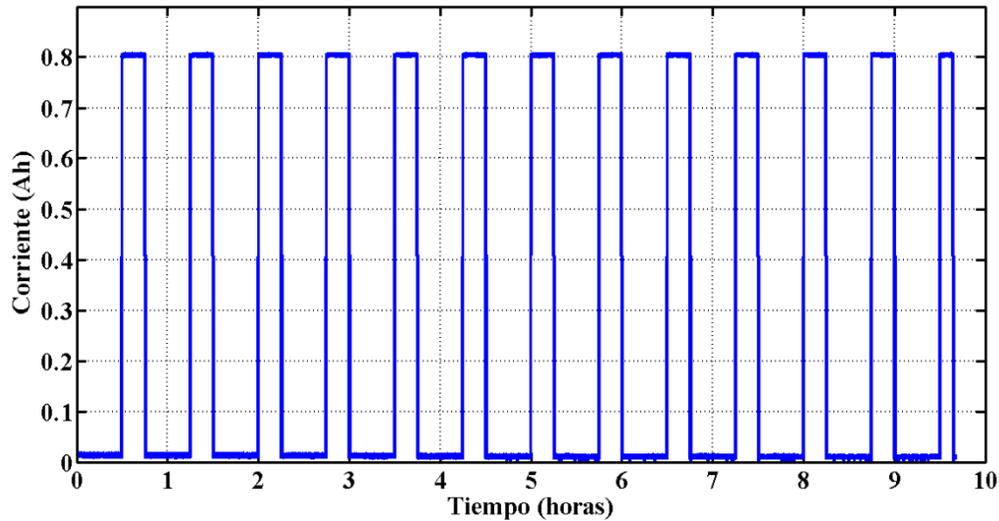


Figura 3.4 Descarga a corriente constante 0.3C (0.78Ah) con periodo de descanso.

Obtenidos los puntos, un polinomio se ajusta a ellos (figura 3.5). Este análisis se realiza en Matlab 2014, una vez adquiridos los datos en LabView.

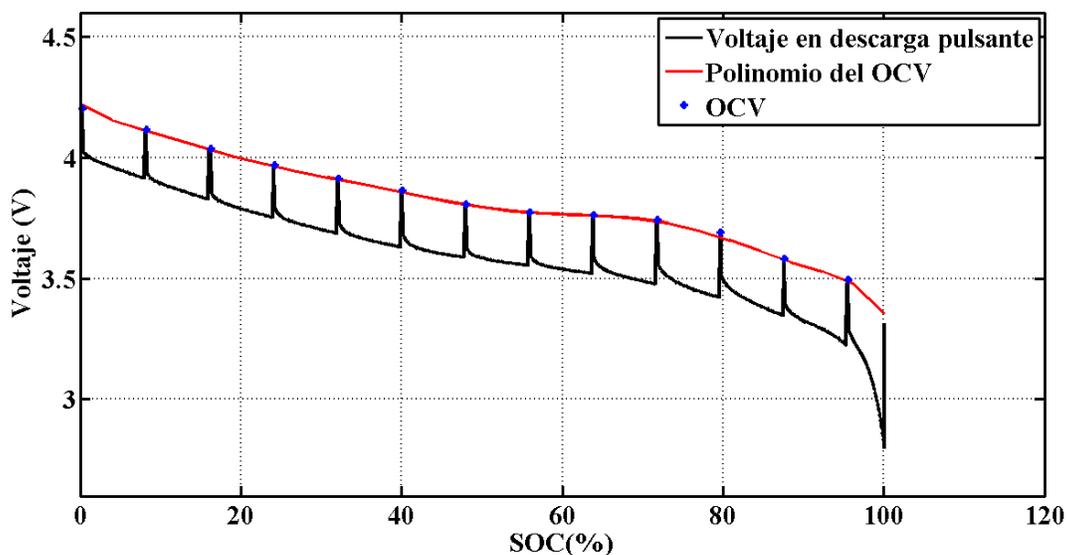


Figura 3.5 voltaje en descarga con pulsos.

La segunda parte del estudio consiste en medir la eficiencia energética de las baterías, (3.7)-(3.8), bajo corrientes de descarga moderadas. Estas descargas son sin reposo y a corriente de descarga constante. En la figura 3.6 se observa la corriente de las baterías descargadas a distintas tasas. A mayor velocidad, menor capacidad de Ah tendremos disponible y termina descargándose rápidamente, en cambio sí es descargada a una tasa muy baja como la de 0.3C es mayor la capacidad que es entregada. C es la velocidad con la que se puede descargar la batería, en otras palabras, la intensidad máxima que puede dar la batería. Esta es la capacidad de la batería en cuestión dividida por hora, es decir Amperios.

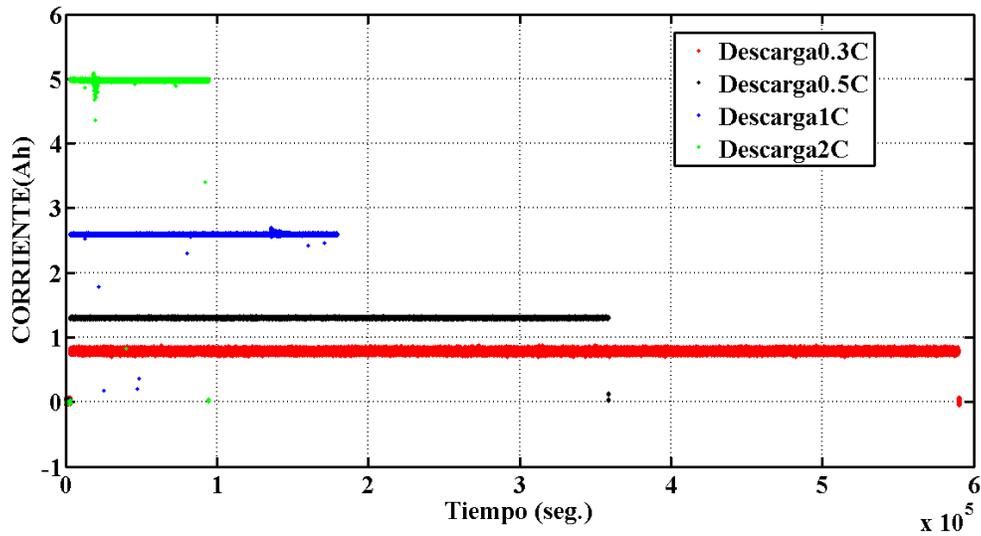


Figura 3.6 Descarga constante de la batería a diferentes tasas.

También se realiza una simulación en Simulink, utilizando el modelo de la batería que proporciona este programa, el cual es utilizado para determinar el SOC y la eficiencia energética en base al método anteriormente mencionado. El voltaje y la corriente son tomados de la batería y enviados a la función donde se calcula el SOC con la fórmula de ampere-hora (figura 3.7).

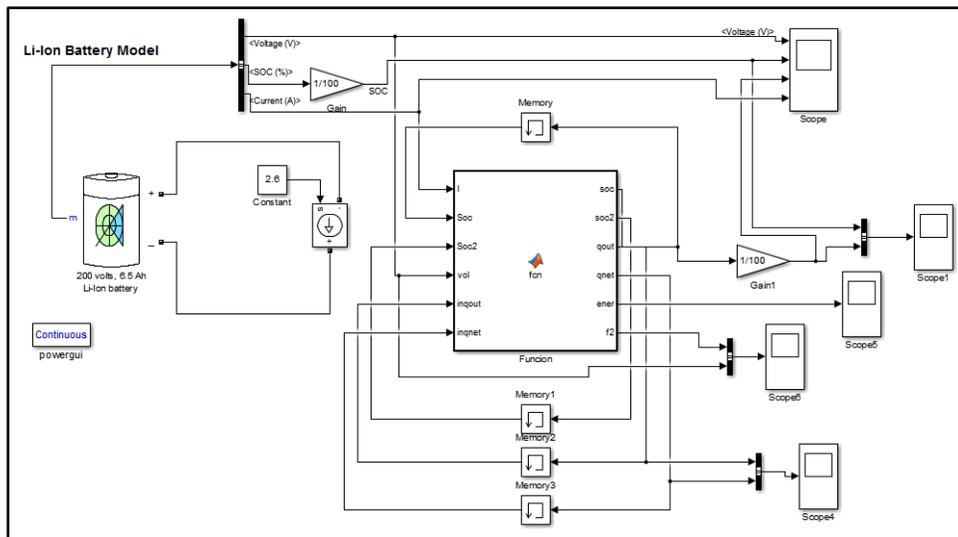


Figura 3.7 Diagrama para la determinación del SOC y cálculo de la eficiencia, usando el modelo de la batería de Simulink.

En la figura 3.8 es comparada la estimación del SOC entregada por el modelo de la batería en Simulink, con el SOC calculado a partir del método de Ampere-hora. Para el cálculo de la eficiencia, se tiene como entrada el SOC anterior y el SOC actual, además dentro de la función se tiene la relación OCV-SOC previamente calculada de una simulación anterior.

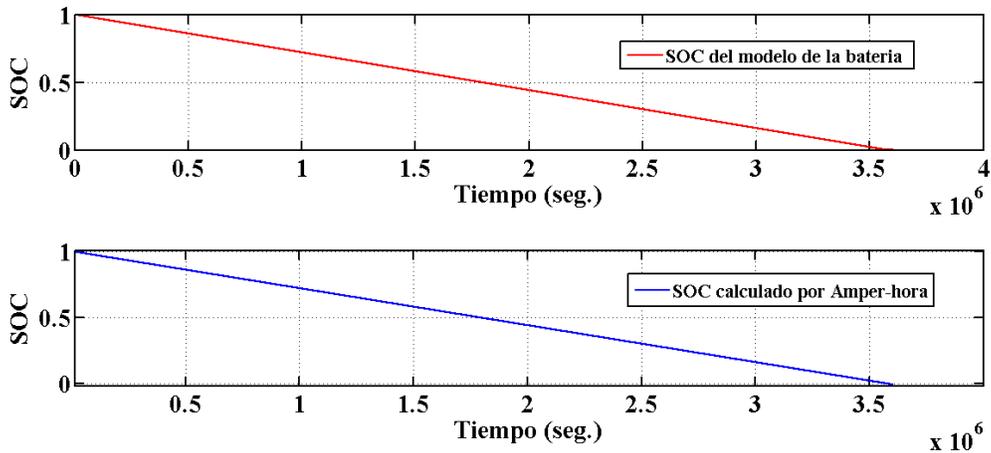


Figura 3.8 Estimación del SOC del modelo de la batería de Simulink y el SOC calculado por el método de Ampere-hora.

4. Resultados y Conclusiones

4.1 Descarga en diferentes condiciones

Usando el procedimiento del apartado anterior se realizaron una serie de descargas para determinar la curva del estado de carga de las baterías de Ion Litio a diferentes tasas, así como la curva del OCV. En la figura 4.1 es evidente que el SOC varia con la corriente a la que se descarga, más aún, se tiene que la capacidad aumenta con la disminución de dicha corriente.

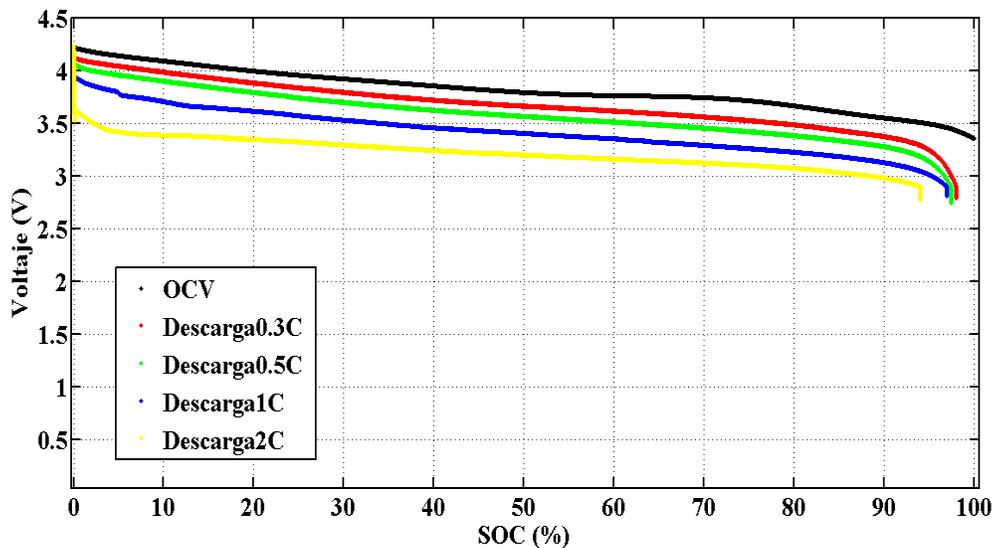


Figura 4.1 Curvas a diferentes tasas de descargas.

Por ejemplo, la línea amarilla representa la curva de descarga con una tasa de 2C (52 A-h), observándose que no se extrae la capacidad nominal de la batería.

4.2 Temperatura en función de descarga

Otro factor importante sobre la capacidad de la celda es el efecto de la temperatura. Se tiene que la capacidad de ésta disminuye si la temperatura incrementa, además, la batería es más sensible a variaciones de temperatura que a variaciones de corriente.

Para el caso de la descarga de 2C (5.2 A-h) se realizan mediciones de temperatura en intervalos de 2 minutos. Ya que la batería se descarga al doble de su capacidad, la temperatura inicial es de 23.6°C y la temperatura final de 67.0°C. En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de la temperatura a dicha corriente de descarga.

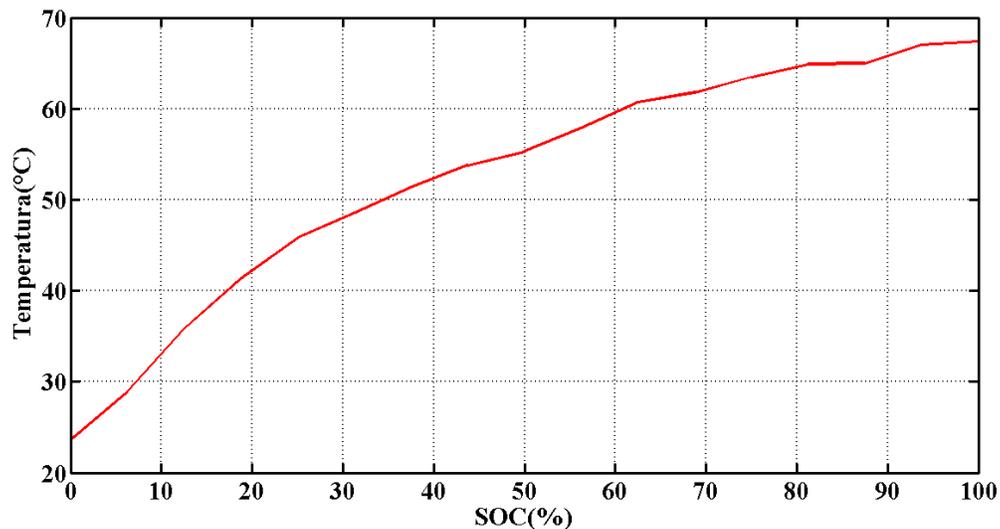


Figura 4.2 Curva de temperatura.

4.3 Eficiencia energética bajo descarga

La eficiencia energética de las baterías de Ion-Litio se mide a diferentes tasas y se calcula principalmente en base al proceso de descarga. La curva de eficiencia energética η_{dis} en diferentes SOC se muestran en la figura 4.3. Para Q_{out} de la ecuación (3.7) se define mediante la energía que es entregada.

Como se muestra en la figura, la eficiencia energética disminuye con el incremento de la velocidad de descarga. La línea azul es graficada con los resultados obtenidos de (3.7) para diferentes descargas (0.3C (0.78 A-h), 0.5C (1.3 A-h), 1C (2.6 A-h) y 2C (5.2 A-h)). Por otra parte, la línea roja denota el ajuste del polinomio de la eficiencia con la ecuación $y = 0.03072x^2 - 0.1634x + 0.9949$ con un coeficiente de correlación de 0.9885.

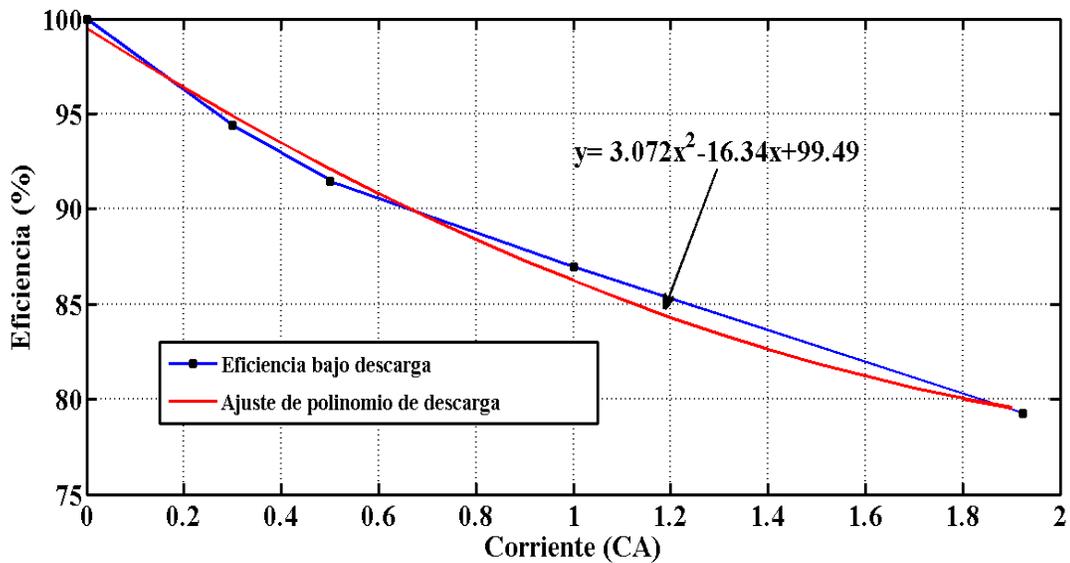


Figura 4.3 la eficiencia energética bajo descarga (η_{disch}).

En la tabla 8 se muestran los resultados del SOC (Ah) a distintas tasas de descargas con sus respectivas eficiencias energéticas.

Tabla 8 estado de carga y eficiencia en distintas tasas de descargas.

Tasas de descarga	SOC (Ah)	Eficiencia en descarga (%)
0.3C (0.78 Ah)	2.5478 Ah	93.7%
0.5C (1.3 Ah)	2.5329 Ah	90.8%
1C (2.6 Ah)	2.5204 Ah	86.3%
2C (5.2 Ah)	2.4448 Ah	78.7%

4.4 Eficiencia energética del modelo de la batería de Ion-Litio en Simulink

Para obtener el voltaje en circuito abierto del modelo de la batería de Simulink, se parametriza la batería con los datos de la curva de descarga, la cual se obtuvo anteriormente en tiempo real con una tasa de 0.3C (0.78Ah). Una vez obtenidos los datos, se toman 20 de estos para ajustar el polinomio y tomarlo como OCV. Posteriormente, se multiplica por la capacidad nominal de la batería y por el SOC real menos el inicial, como se indica en (3.11).

En el caso del cálculo de Q_{out} , se obtiene del voltaje del modelo de la batería de Simulink, de igual manera multiplicado por el SOC inicial (SOC_0) menos el SOC real ($SOC_{(t)}$). En la figura 4.4 la curva azul representa el OCV y la línea verde es el voltaje de la batería parametrizada, estas son utilizadas en el cálculo de la eficiencia energética.

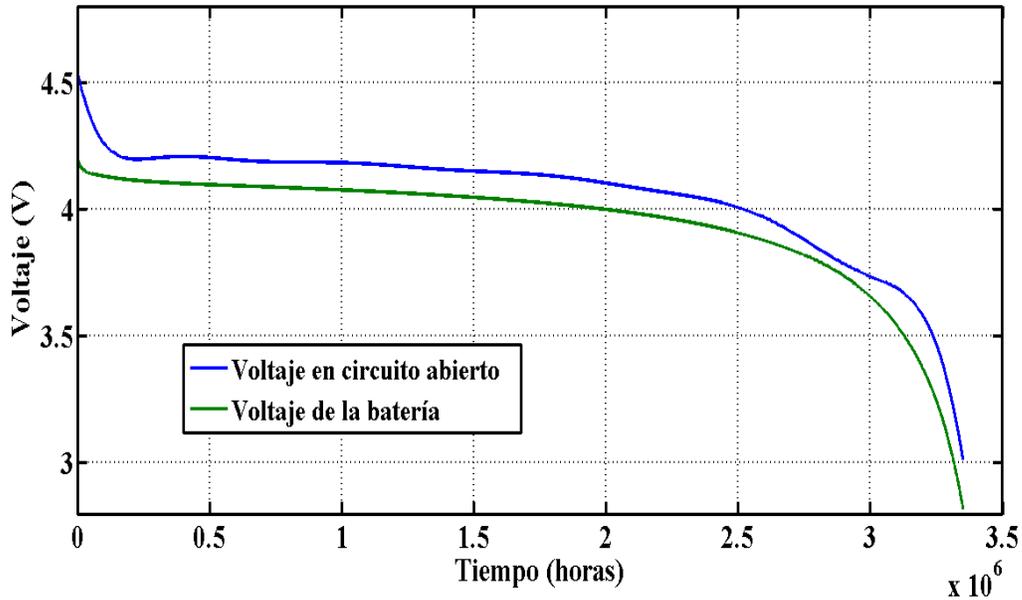


Figura 4.4 Curva del OCV y voltaje del modelo de la batería de Simulink.

Finalmente se calcula la eficiencia energética del modelo de la batería de Simulink para la descarga de 1C (2.6 Ah). En la figura 4.5 se tiene la curva de la eficiencia con respecto al tiempo. La eficiencia total calculada es de 97.32%, en comparación con la eficiencia calculada en tiempo real, la cual es de 86.3% como se observa en la tabla 8.

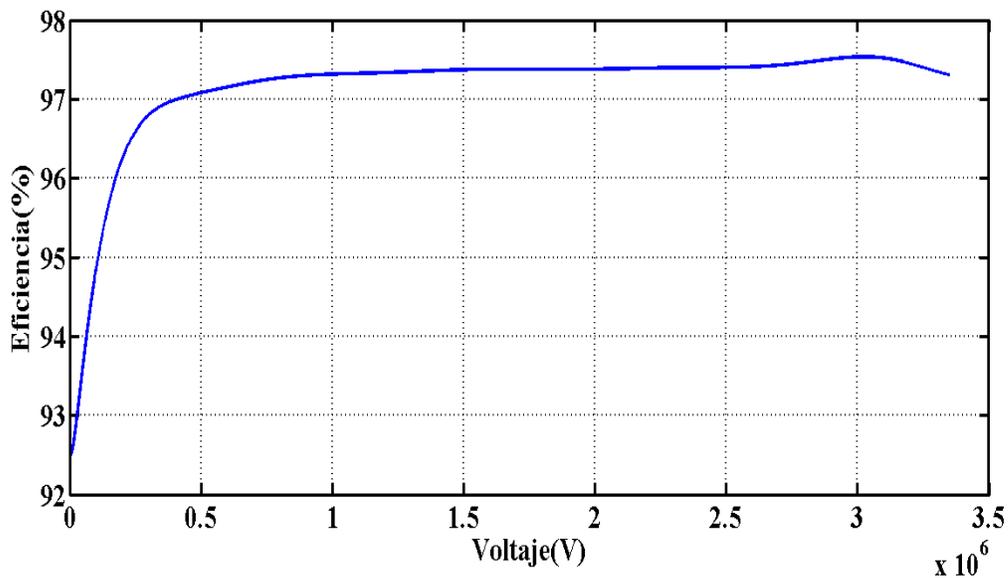


Figura 4.5 Curva de la eficiencia energética del modelo de la batería de Simulink.

4.5 Conclusiones

Se ha descrito en el presente estudio el método de Amper-hora para calcular el estado de carga (SOC) y la eficiencia energética de las baterías. La estimación del SOC se realiza para diferentes tasas de descargas. Se obtiene que si la tasa a la cual se descarga la batería es alta, el SOC (Ah) que entrega la batería es menor. En cambio sí es descargada a una tasa de 0.3C el SOC (Ah) llega hasta la capacidad nominal indicada en la batería.

La eficiencia energética de las baterías consiste en la eficiencia bajo carga, descarga, y carga-descarga. Un factor clave en el cálculo de la eficiencia energética es buscar una manera o una función que represente la energía neta de las baterías. La función del OCV y SOC que se indica en el presente estudio sigue la teoría de la electroquímica. Por lo tanto, la relación cuantitativa del OCV y SOC se calcula utilizando el ajuste no-lineal. En este estudio, la eficiencia energética de las baterías de Ion-Litio solo se calcula bajo descarga a diferentes tasas. La relación de las eficiencias energéticas y las corrientes también se analizan mediante el ajuste polinomial. Los resultados indican que la eficiencia energética para las baterías de Ion-Litio es alta bajo descarga, si se manejan a una buena tasa de utilización de energía, lo cual puede traducirse en una mayor vida útil de estas.

Referencias bibliográficas

- (Anexo2,2011) ANEXO 2 – Gestión y tratamiento de baterías de vehículo eléctrico e híbrido. “Estudio de viabilidad previo al diseño de un esquema de logística, tratamiento y reciclado de baterías de vehículos eléctricos e híbridos al fin de su vida útil” – REF. TSI-020100-2011-457.10
- (Bard,2001) A.J. Bard, L.R. Faulkner, *Electrochemical Methods–Fundamentals and Applications*, 3rd ed., Wiley, New York, 2001.19
- (Burgos,2013) Burgos Mellado, C. D. (2013). *Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman* (Doctoral dissertation, Universidad de Chile).11
- (Conte,2006) Conte, F. V. (2006). Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 123(10), 424-431.15
- (Iglesias,2012) Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C. & Valdés, M. D. (2012). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda.5
- (Kang,2012) Kang, J., Yan, F., Zhang, P., & Du, C. (2012). A novel way to calculate energy efficiency for rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 206, 310-314.4
- (Klein,2006) M.J. Klein and G.L. Plett. Advances in HEV Battery Management Systems. *Society of Automotive Engineers Conference*, 2006.17
- (Larminie,2003) Larminie, James, and John Lowry. *Front Matter*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.8
- (Liu,2013) Liu, L., Wang, L. Y., Chen, Z., Wang, C., Lin, F., & Wang, H. (2013). Integrated system identification and state-of-charge estimation of battery systems. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 28(1), 12-23.6
- (Lu,2013) Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288.13

- (Peña,2011) Peña Ordóñez, C. (2011). Estudio de baterías para vehículos eléctricos.9
- (Pérez,2003) Pérez, V., & Carlos, J. (2003). Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos.12
- (Rahimi,2013) Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. (2013). Battery management system: an overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 7(2), 4-16.1
- (Stuart,2002) T. Stuart et al. A modular battery management system for HEVs. In *Proceedings of the SAE Future Car Congress*, 2002.16
- (Tremblay,2009) Tremblay, O., Dessaint, L.-A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - © 2009 AVERE, EVS24 Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.20
- (Verzijlbergh,2013) Verzijlbergh, R. A. (2013). *The Power of Electric Vehicles—Exploring the value of flexible electricity demand in a multiactor context* (Doctoral dissertation, Ph. D. dissertation, TU Delft).18
- (Waag,2014) Waag, W., Fleischer, C., & Sauer, D. U. (2014). Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 258, 321-339.2
- (Yan,2010) YAN Jingyu. (2010). Intelligent Battery Management System for Electric Vehicles, The Chinese University of Hong Kong.14
- (Yan,2011) Yan, Q. (2011, March). Research on state of charge estimation of batteries used in electric vehicle. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific* (pp. 1-4). IEEE.7
- (Zhang,2014) Zhang, Y. H.; Song W. J; Lin, S. L.; Feng. Z. P. A novel model of the initial state of charge estimation for LiFePO4 battery. *J Power Sources* 2014, 248, 1028-1033.3

Anexo A

Cables and Accessories

Table 4 contains information about cables and accessories available for the NI USB-6008/6009. For a complete list of accessories and ordering information, refer to the pricing section of the NI USB-6008 or NI USB-6009 product page at ni.com.

Table 4. NI USB-6008/6009 Cables and Accessories

Accessory	Part Number	Description
USB-6008/6009 Accessory Kit	779371-01	Four additional screw-terminal connectors, connector labels, and a screwdriver
USB-6000 Series Prototyping Accessory	779511-01	Unshielded bread boarding accessory for custom-defined signal conditioning and prototyping. You can use up to two accessories per device.
Hi-Speed USB Cable	184125-01 184125-02	1 m and 2 m lengths
<p>Caution: For compliance with Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements, this product must be operated with shielded cables and accessories. If unshielded cables or accessories are used, the EMC specifications are no longer guaranteed unless all unshielded cables and/or accessories are installed in a shielded enclosure with properly designed and shielded input/output ports.</p>		

Pinout and Signal Descriptions

Figure 6 shows the pinout of the NI USB-6008/6009. Analog input signal names are listed as single-ended analog input name, AI x , and then differential analog input name, (AI x +/-). Refer to Table 5 for a detailed description of each signal.

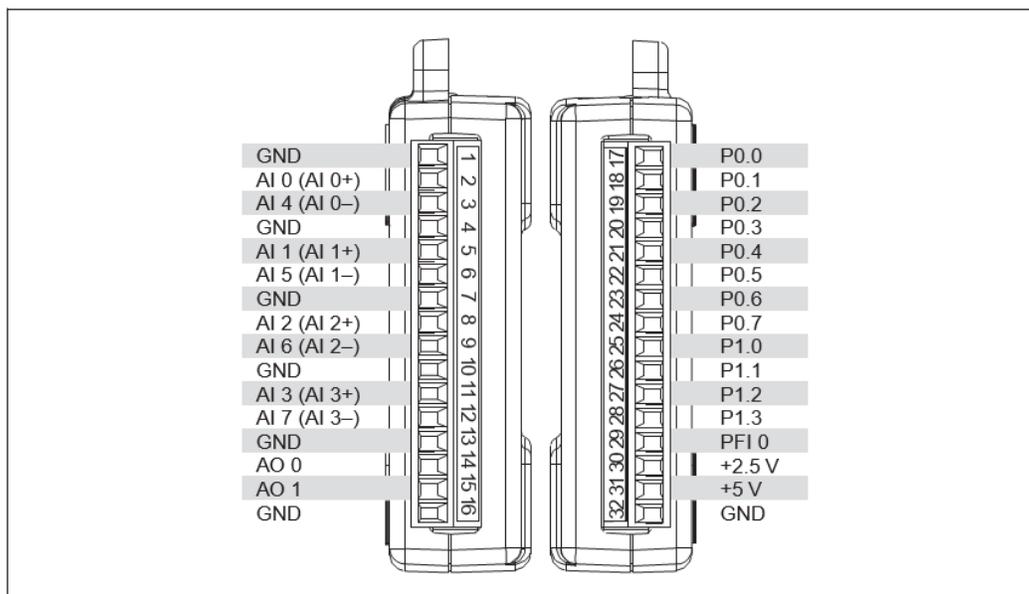
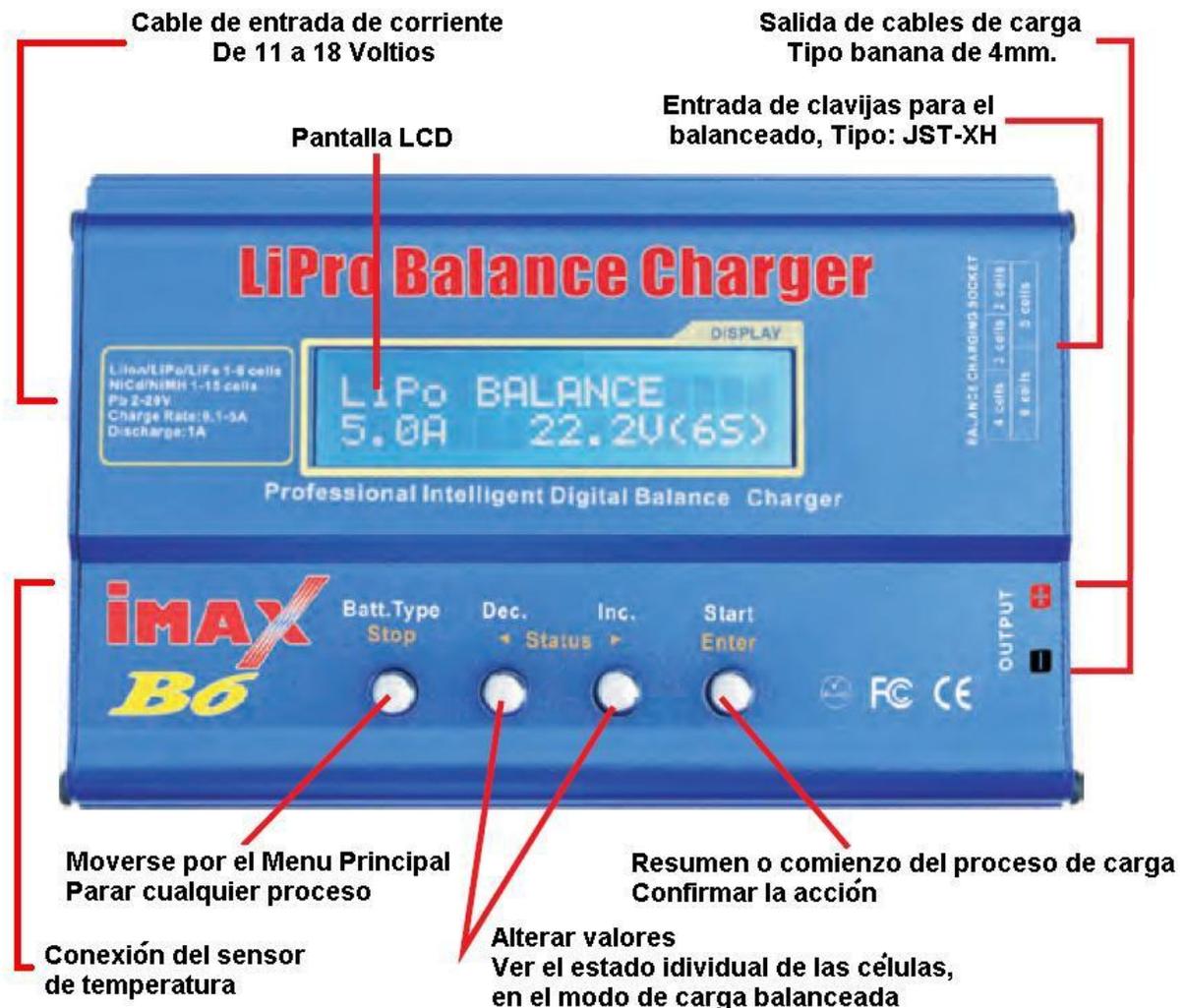


Figure 6. NI USB-6008/6009 Pinout

Table 5. Signal Descriptions

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	Ground —The reference point for the single-ended analog input measurements, analog output voltages, digital signals, +5 VDC supply, and +2.5 VDC at the I/O connector, and the bias current return point for differential mode measurements.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: AI<1, 5>, AI<2, 6>, and AI<3, 7>. Refer to the <i>Analog Input</i> section for more information.
AO <0, 1>	GND	Output	Analog Output Channels 0 and 1 —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the <i>Analog Output</i> section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
P1.<0..3>	GND	Input or Output	Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input. Refer to the <i>PFI 0</i> section for more information.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing. Refer to the <i>+2.5 V External Reference</i> section for more information.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA. Refer to the <i>+5 V Power Source</i> section for more information.

Anexo B

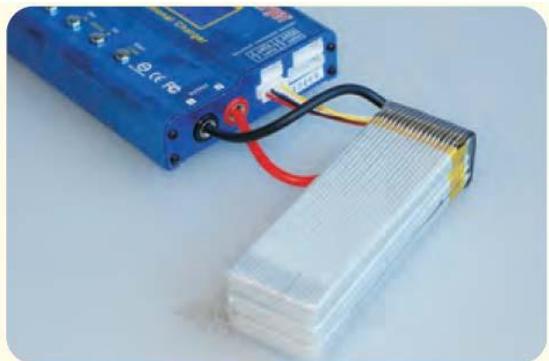


PROGRAMA DE CARGA Y DE BALANCEADO, DE BATERIAS DE POLÍMERO DE LÍTIO DIAGRAMA DE CONEXIONES.

Este diagrama mostrara, la forma correcta de conectar sus baterías al Cargador B6, solamente cuando utilice el programa de carga con balanceado de baterías.



ATENCIÓN

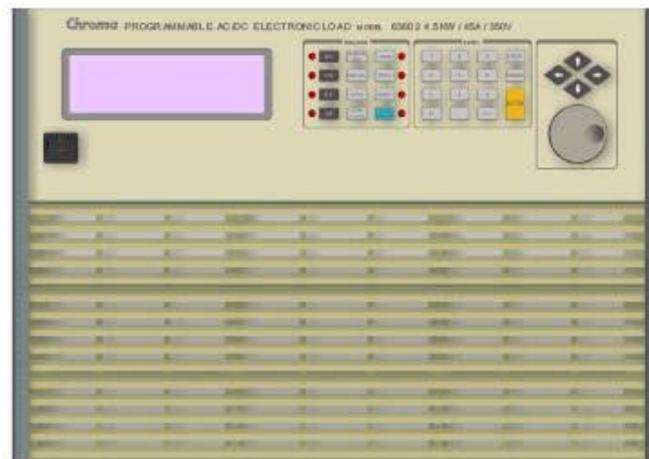


Si no se conecta como se muestra en este diagrama, se dañará el cargador.

La batería y el conector de balanceado, deben estar conectados tal como se muestra en el diagrama, antes de comenzar el programa de carga, con balanceado de la batería.

Anexo C

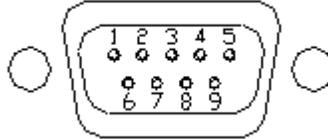
Programmable AC/DC Electronic Load 63800 Series Operation & Programming Manual



Version 1.7
March 2013
P/N A11 001143

Appendix B: Pin Assignment of TTL I/O Signals

9-Pin D-Type Male Connector:



Pin No.	Signal	Pin No.	Signal
1	GND	6	---
2	Load-ON/OFF	7	---
3	Transient-ON/OFF	8	---
4	Fail	9	External Load-ON/OFF
5	Short		

AC LOAD ON

When AC Load is at the “load on” status, this pin turns into HIGH and turns into LOW when the load is off. It is defined at pin 2 of the TTL I/O. The ground reference of the TTL I/O is at pin 1.

Transient-ON/OFF

This signal can be used in CC mode (under AC/DC mode). The first cycle of the current sag or surge is occurred under AC mode, this pin will become HIGH as well as the signal will return to LOW. If the current has changed under DC mode, this pin will become HIGH as well as the signal will return to LOW. The ground reference of the TTL I/O is at pin 1.

Fail

The voltage level of this pin is HIGH if AC load is in normal state. It turns into LOW when AC load is in abnormal status, such as OCP, OVP, OPP, OTP or Fan Fail. It is defined at pin 4 of the TTL I/O. The ground reference of the TTL I/O is at pin 1.

Short

When short is on, this pin will becomes HIGH, and it becomes LOW when short is off. The ground reference of the TTL I/O is at pin 1.

External Load ON/OFF

The AC load can be achieved by TTL high signal. When **CONF./LOCAL** is pressed, choose 1, “SETUP”, and then go to item 6, “External load ON/OFF ENABLE”. Enter into this function through the knob. The execution of the “load on/off” will transfer from front panel to pin 9 of TTL I/O. The ground reference of the TTL I/O is at pin 1. The **LOAD ON/OFF** button in front panel will become invalid under this setting.