

*Artículo Científico***Sistema de carga rápida y software de procesamiento de datos para una celda (lfp)****Fast loading system and data processing software for a cell (lfp)**

Raúl F. Gómez Sierra I. Jaime Hamel Fonseca 2.

1. Ing. Electrónico. Docente investigador.
adegilsonjosel9@gmail.com
2. Lic. Químico. Docente investigador.
dione_luiza@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo trata de la descripción de un cargador rápido para celdas de ion litio del modelo 1865130-Fosfato de Hierro Litio (LFP), producidas en la planta piloto de baterías de ion-litio de La Palea perteneciente a COMIBOL-GNRE, centrando la atención en el proceso de carga acelerada usando un prototipo de cargador electrónico diseñado a medida para el cargado rápido de baterías que emplean esta tecnología mediante la inyección de corriente controlada. También se describe el modelo matemático empleado para evaluar los procesos que caracterizan la carga de estas celdas cuando se emplea este método con el fin de desarrollar tecnología asociada para su uso en aplicaciones auto motivadas, ecológicas, etc.

Palabras clave: Carga rápida. Baterías de litio. Equipos móviles.

ABSTRACT

This article deals with the description of a fast charger for lithium ion cells of model 1865130 - Lithium Iron Phosphate (LFP), produced in the pilot plant of lithium-ion batteries of La Palea belonging to COMIBOL - GNRE, focusing on the accelerated charging process using a custom-designed electronic charger prototype for fast charging of batteries using this technology, by means of controlled current injection. In addition to the description of the mathematical model

used to evaluate the processes that characterize the load of these cells when this loading method is used in order to be able to develop associated technology for its use in self-motivating, ecological applications, etc.

Keywords: Fast loading. Lithium batteries. Mobile equipment.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a la popularización en el uso de energías limpias, el almacenamiento acelerado de energía eléctrica se está convirtiendo en una necesidad muy sentida, especialmente en el área de automóviles ecológicos y aparatos electrónicos portables, por lo que las celdas diseñadas en base a la tecnología LFP son consideradas una solución tecnológica eficiente destinada a paliar estos requerimientos energéticos.

Uno de los principales inconvenientes en la utilización de esta tecnología es el tiempo requerido para realizar la carga de este tipo de celdas, una vez que estas se han descargado. Generalmente se invierte mucho tiempo (horas) para reponer la energía gastada (carga lenta) y durante este tiempo el sistema queda detenido o puede continuar funcionando sólo si se dispone de baterías de reserva (lo que genera unos costos elevados).

La necesidad de reducir al máximo los tiempos de carga ha sido y es objeto de numerosas investigaciones que están orientadas hacia varios campos: mejora de las tecnologías de baterías existentes, búsqueda de nuevas tecnologías con mejores prestaciones y desarrollo de métodos de carga (incluyendo criterios de finalización de la carga) que garanticen la carga segura y rápida en estas baterías.

En numerosos artículos y estudios se describen diferentes diseños de cargadores de baterías que utilizan razones elevadas que -según sus autores- logran disminuir los tiempos de carga en una batería de forma efectiva; sin embargo, desconocen el comportamiento de las baterías cuando estas son sometidas a tales condiciones extremas de acumulación energética, ya que se carece de un estudio fiable que describa el comportamiento de los parámetros electroquímicos internos producto de estos procedimientos. Esto hace que crezca una necesidad de evaluar el comportamiento de estas baterías bajo diferentes regímenes de carga y descarga.

Finalmente, la información obtenida en estas pruebas se tornará de gran importancia a la hora de elaborar estrategias que mejoren la eficacia de nuestro sistema de control electrónico.

DESARROLLO

Tipos de celdas ion Li empleadas

Los estudios fueron realizados en cinco baterías de **LFP** (que a partir de ahora serán nombradas como baterías 0,1,2,3,4), las cuales tienen las siguientes especificaciones de fábrica: Modelo: 1865130, celda EV 32V IOAh Fosfato de Hierro Litio (**LFP**) que emplea la tecnología LFP-1865130A-10Ah.

Tabla N°1. Especificaciones técnicas de la celda ion Li, según el fabricante

N°	Item	Parámetro	Detalle	
2.1	Tipo de batería	Batería de potencia Li-ion LiFePo ₄	Prismática	
2.2	Tecnología	LFP1865130A		
2.3	Capacidad nominal	10.0Ah	Carga y descarga a 0.5C hasta el voltaje de corte de descarga. Temperatura ambiente de 20±5°C a 50% de la capacidad	
	Capacidad mínima	10.0Ah		
2.4	Voltaje Nominal	320V		
2.5	Energía nominal	32 Wh		
2.6	Energía específica (densidad gravimétrica)	110.31 Wh/L		
2.7	Densidad de energía (densidad volumétrica)	210.39 Wh/L		
2.8	Peso neto	290 g		
2.9	Dimensiones	18x65x130 mm		
2.10	Impedancia interna	= 1Sm?		
2.11	Condiciones de carga	Voltaje	3.70V	Tipo de carga CCCV. Carga a corriente constante 0.5C, corriente de corte 0.01C
		Corriente	SA	
2.12	Máxima corriente de carga	10 A (IC)		
2.13	Corriente estándar de descarga	5 A (0.SC)		
2.14	Máxima corriente de descarga	15 A (I.SC)		
2.15	Voltaje de corte de descarga	230V		
2.16	Ciclo de vida	=1000 ciclos	85 % de retención	
2.17	Temperatura de operación	0 +45°C	Carga	
		-20 +60°C	Descarga	
2.18	Temperatura de almacenamiento	-20 +45°C	Menos de 1 mes	
		-20 +35°C	Menos de 3 meses	

Fuente: COMIBOL - GNRE, 2015

Descripción del prototipo de cargadoreemplado para la carga y la toma de datos

a) Características técnicas del prototipo

Cuenta con cinco canales independientes donde se puede controlar la corriente de carga a ser entregada a cada celda de ion-Li, sin importar la impedancia de la batería.

Corriente de salida máxima por canal, 5 Amperios.

Sistema de control inteligente basado en el procesador Atmel2500 que regenta el proceso de carga y a la vez monitorea tres parámetros de cada uno de los cinco canales independientes con los que cuenta el prototipo: voltaje promedio vs tiempo, corriente eficaz vs tiempo, temperatura vs tiempo, almacenando toda esta información mediante una interface USB en un computador personal donde se encuentra un software especialmente diseñado para la toma de datos y control remoto de carga y descarga de cada batería.

b) Diagrama de bloques de los sub sistemas del hardware de carga, monitoreo y procesamiento

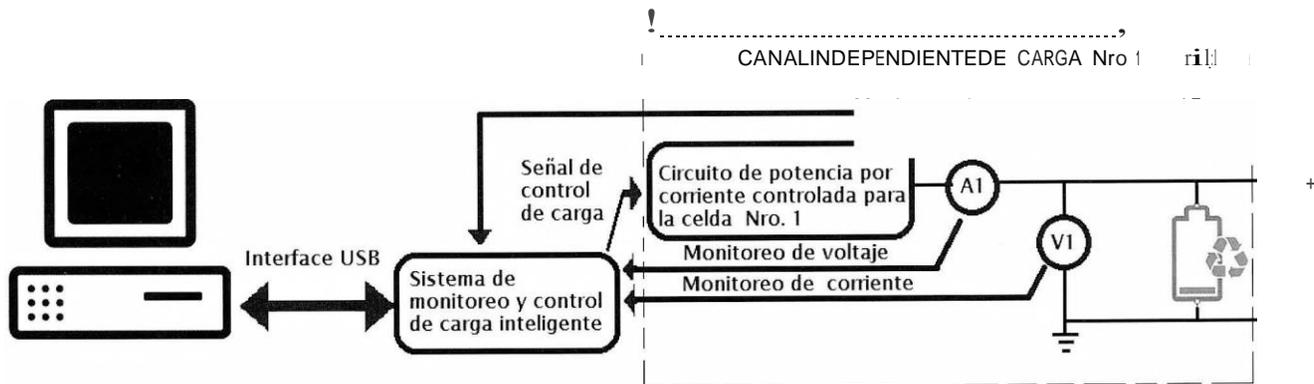
Figura N°1. Módulos del sistema de carga y monitoreo



Fuente: Elaboracion propia, 2018

El módulo del sistema de monitoreo y control de carga inteligente está gobernado por un micro controlador Atmega2500 embebido en una placa de ARDUINO Mega; entre las funciones que cumple el algoritmo que se está ejecutando en él está el de interpretar comandos remotos generados desde un computador personal en donde se encuentra el verdadero núcleo de control del todo el proceso de carga y monitoreo. A partir de estos comandos remotos, este sistema puede controlar la corriente entregada individualmente a cada una de las celdas de ion-Li, del mismo modo puede obtener información acerca del voltaje (promedio), corriente (eficaz), temperatura (°C) de cada una de estas celdas durante el proceso de carga y enviarlas al computador personal para su almacenamiento y posterior realimentación para el control del proceso de carga. Entre otra de sus funciones está el de activar de forma segura un circuito de conexión automatizado que conecta las celdas en serie para alimentar con un voltaje de 16 voltios, una carga representada por uno o más motores DC sin que haya conflictos con el sistema de recarga de las baterías. Es posible también monitorear valores de voltaje, corriente y temperatura durante este proceso de descarga, enviando los mismos al computador personal para la verificación de la descarga y su almacenamiento.

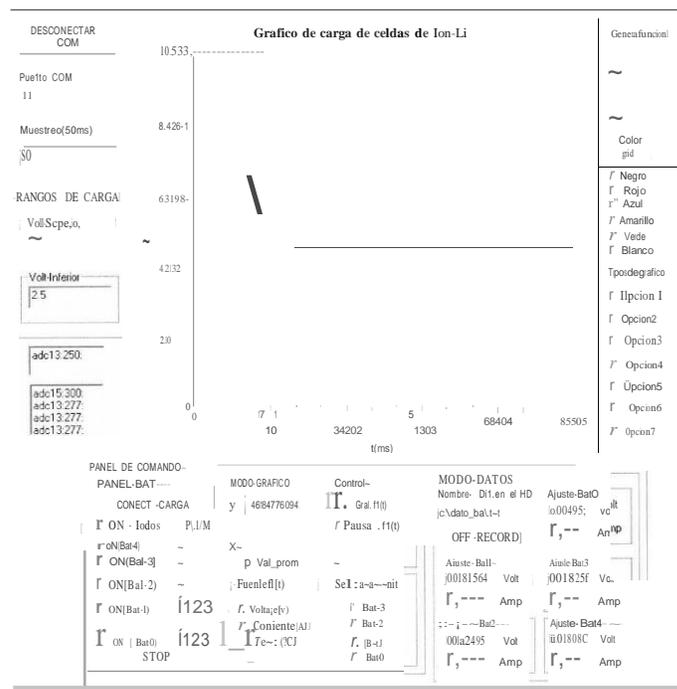
Figura N°2. Sistema de monitoreo y control de carga inteligente



Fuente: Elaboración propia, 2018

Cada canal independiente de carga tiene la capacidad de entregar a las células de ion-Li una carga de corriente fija controlada hasta un valor máximo de 5 Amperios, los cuales se fijan a partir de comandos remotos enviados desde el PC al sistema de monitoreo y control de carga inteligente. Todos los canales de carga están alimentados por dos fuentes de voltaje switching de 12V/60A cada una.

Figura N°3. Interface con el usuario, sistema de monitoreo y control



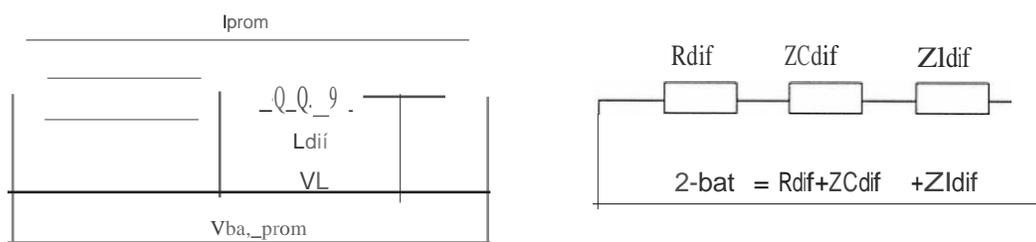
Fuente: Elaboración propia, 2018

En el computador persona se encuentra instalado un software de alto nivel para monitoreo que tiene la posibilidad de mostrar en su pantalla el progreso de la carga en cada una de las baterías de ion-Li. Se puede visualizar el voltaje promedio, corriente eficaz y temperatura de carga y descarga junto con sus valores numéricos y el transcurso del tiempo de monitoreo, el cual se puede configurar con los rangos deseados a partir de un tiempo mínimo de SOMs adelante (todo esto controlado por un operario humano). Por otra parte, se puede almacenar todos los datos recopilados en un archivo el

tipo texto "c:\dato_bat.txt", al cual se le puede cambiar el nombre y la dirección de almacenamiento a criterio del operador (este software puede monitorear y controlar la velocidad de carga al poder definir la intensidad de corriente controlada que se va a suministrar a las celdas desde 0% al 100 %, además de contar con mecanismos de protección de sobrecarga). En resumen, este es un prototipo tecnológico que será usado para el desarrollo, calibración y prueba de futuros cargadores más rápidos e inteligentes para baterías de ion-Li, que posibilitará el desarrollo de este tipo de tecnología muy necesaria en la industria de baterías LFP.

Posterior al desarrollo del hardware de carga y su software de monitoreo se tuvo que crear otro software especializado para procesar los datos recolectados por el sistema de monitoreo, este programa especializado está diseñado para calcular los distintos parámetros asociados al proceso de carga/descarga de una batería de ion-Li con base al siguiente modelo de circuito eléctrico equivalente propuesto para esta prueba y que se usó para el análisis de los parámetros experimentales obtenidos (ver figura N°4).

Figura N°4. Modelo de circuito equivalente eléctrico propuesto



Fuente: Elaboración propia, 2018

Este programa de procesamiento de datos es capaz de calcular parámetros eléctricos asociados al manejo de una batería como ser la impedancia equivalente de la batería (Z_{bat}), útil como indicativo de la salud de la batería y como parámetro a tener en cuenta cuando esta interactúa con motores eléctricos. A continuación, se mencionan los parámetros:

La resistencia diferencial (R_{dif}), cuando se utiliza la batería con celulares, computadoras portátiles y otros.

La capacitancia diferencial (C_{dif}) que representa una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para una diferencia de potencial eléctrico disponible en los bornes de la celda, comportamiento inherente a la batería que es asociada al tipo de respuesta que se da en un acumulador de gran capacidad (súper capacitor), como aproximación eléctrica más aceptada.

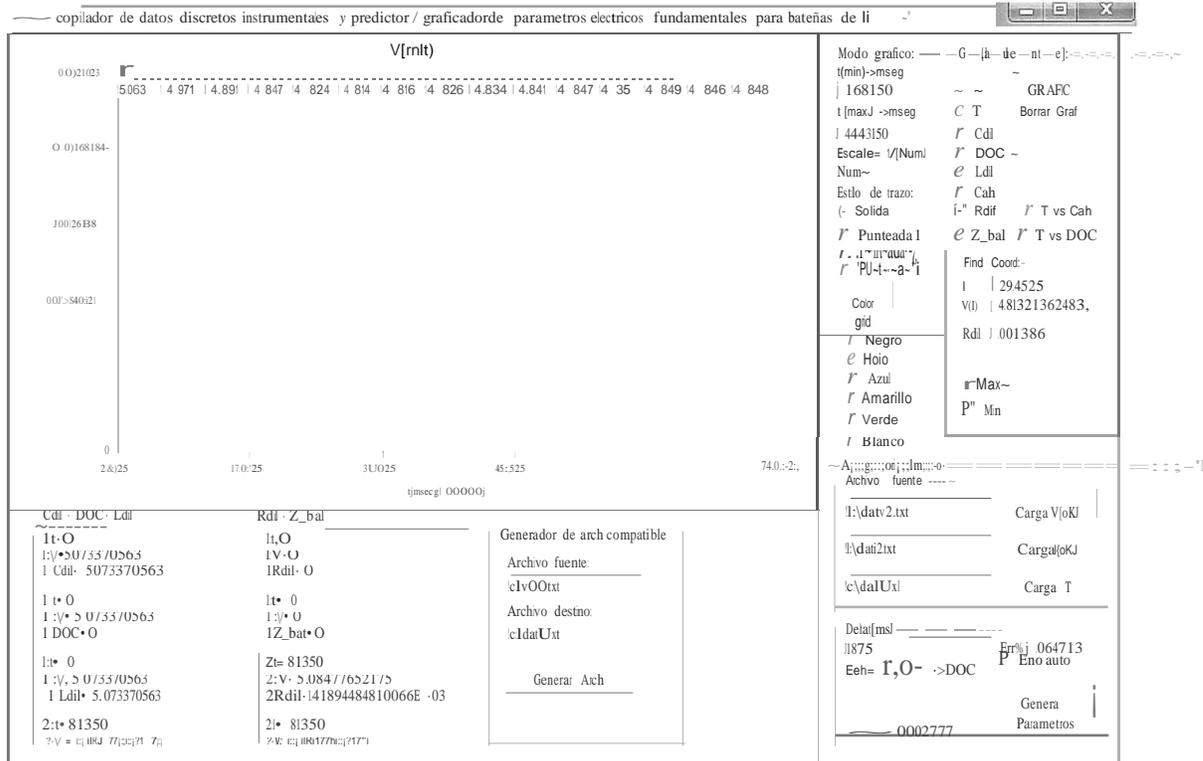
La Inductancia diferencial (L_{dif}) que se usa para calcular la impedancia de la batería (Z_{bat}) y explicar algunos fenómenos químicos internos. Por otro lado, la naturaleza de esta inductancia está relacionada con la inducción de energía magnética en la celda, energía que se acumula en los contactos internos y en los metales que soportan el material activo (electrodos).

La profundidad de carga (DOC), que nos muestra la velocidad de asimilación de carga por parte de la batería.

Finalmente, está la capacidad de carga (C_{ah}) alcanzada por la batería, durante el proceso de acumulación, donde este parámetro referencial nos indica la energía total suministrada a la batería, por efecto del circuito de carga por corriente controlada.

Todos estos parámetros eléctricos tienen su respectiva base matemática que justifica la generación de sus curvas de respuesta; también se despliegan gráficos en el tiempo para el voltaje de carga, corriente y temperatura generados en cada batería, todos estos obtenidos durante la realización de las pruebas de carga acelerada.

Figura N°5. Interface con el usuario procesamiento de datos



Fuente: Elaboracion propia, 2018

Base matemática - cálculo de la capacidad de carga diferencial (Cdif)

La Cdif se define como el cociente entre la carga dQ necesaria para variar la tensión en un dV a una tensión Vf (tensión final de carga):

$$cdif(v) = \frac{dQ}{dv} \quad (1)$$

Según la ecuación (1), es una función continua del potencial. La aproximación numérica se realizó a partir de los datos obtenidos de voltaje vs tiempo, suministrando corriente constante. Se tomó un tiempo de tx y a partir de esto se calculó la carga involucrada como el producto de la corriente aplicada en un intervalo de tiempo Lt=1.875 segundos y se obtuvo el valor numérico de la diferencia de tensión (Av) medida en el intervalo de tiempo (tx+át}, a partir de estos datos se obtuvo la capacidad diferencial como:

$$e_{u_j} = e_{u_j}(v_f) = \frac{I \times 60}{6}$$

Se asoció con la tensión Vf de la siguiente forma:

$$=; v_{j,+} - v$$

Asu vez, la capacidad calculada puede asociarse con el nivel de estado de carga DOC (Depth Of Charge) por medio de:

$$DOC = \frac{Q(V_i)}{C_{ah_nom}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_{prom} dt}{C_{ah_nom}}$$

Para estas pruebas, Cah_nom=Ah representa la capacidad de carga nominal máxima de la batería establecida por el fabricante.

Base matemática - cálculo de la impedancia capacitiva alcanzada (ZCdif)

La definición de impedancia capacitiva, representado junto a la corriente de malla compartida Iprom según el modelo de circuito equivalente serie propuesto, será:

$$Z_{cdif} = \frac{V_e}{I_{prom}} = \frac{\int i(t) dt}{I_{prom}}$$

Donde en un intervalo diferencial:

$$Z_{cdif} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_{prom} dt}{I_{prom}} \tag{2}$$

Base matemática - cálculo de la resistencia diferencial (Rdif)

Según la ley de OHM, al compartir la misma corriente de malla Iprom, se tiene:

$$R_{dif} = R_{dif}(V_f) = \frac{\Delta v}{I_{prom}} \tag{3}$$

Base matemática - cálculo de la inductancia de carga diferencial (Ldif)

De la definición del voltaje de carga de una inductancia:

$$V_L(t) = L \frac{di}{dt}$$

Despejamos L y se representa en un intervalo diferencial:

$$L_{dif} = L_{dif}(V_L) = V_L \frac{dt}{di}$$

Donde:

$$V_L = v_{bal_prom} - I_{prom} (R_{dif} + Z_{cdif})$$

Base matemática - cálculo de la impedancia inductiva alcanzada (ZLdif)

A partir de su definición, con una corriente compartida Iprom de malla, se obtiene:

$$Z_{ldif} = \frac{V_L}{I_{prom}} = L \frac{di}{dr} \times I_{prom}$$

Se expresa en términos de su intervalo diferencial:

$$Z_{Ldif} = \frac{L \frac{di}{dt} \times 6. i}{6. r x l} \quad (4)$$

Base matemática - cálculo de la impedancia equivalente alcanzada (Z_{bat} .)

Combinando las ecuaciones (2), (3), (4) en una sumatoria:

$$Z_{bat} = R_{dif} + Z_{Cdif} + Z_{Ldif}$$

Base matemática - cálculo de la capacidad de carga alcanzada (C_{ah})

La capacidad de carga alcanzada por la batería durante el proceso de carga está dada por la siguiente expresión matemática:

$$e_{ah} = \frac{E}{V_{prom}}$$

Donde la energía total suministrada a la batería E está representada por:

$$E = \{ (Z_{bat} \times I_{prom}^2) [Watt] \times t [seg] \} [Julios]$$

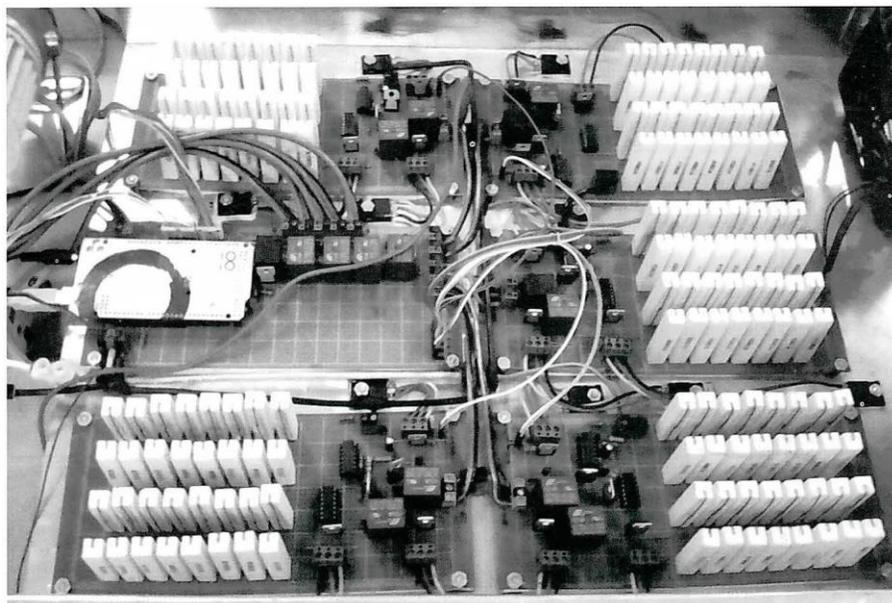
Descripción gráfica del prototipo

Figura N06. Vista general de todo el sistema interconectado



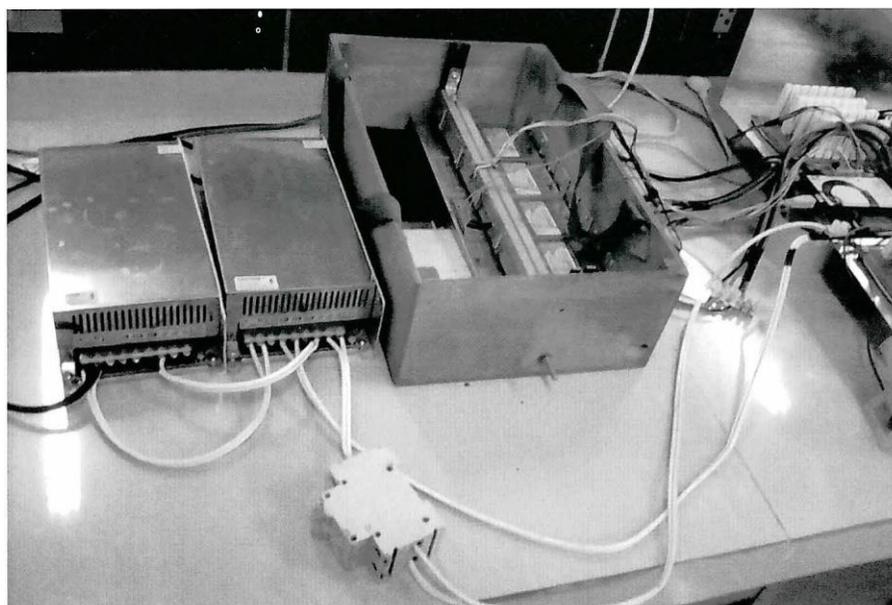
Fuente: Elaboración propia, 2018

Figura N°7. Distintas placas donde se ve los circuitos electrónicos que conforman el sistema de carga y control del prototipo



Fuente: Elaboracion propia, 2018

Figura N°8. Banco de baterías junto a las fuentes swiching de 12V/60A



Fuente: Elaboracion propia, 2018

CONCLUSIONES

Fundamentalmente, durante la realización de estos ensayos de carga rápida se determinó que no es el tiempo de carga el que determina el instante en que se debe dejar de suministrar carga a la batería, sino variables como la temperatura (a considerar en futuros ensayos), corriente (parámetro de control de sobrecarga usado para la presente prueba con buen resultado) y la producción de gas (parámetro que no es posible de controlar por la imposibilidad de acceder al interior del envase).

El voltaje no fue un parámetro de mucha utilidad en la detección de la sobrecarga, esto debido a su lenta evolución durante el proceso de sobrecarga.

Pese a aplicarse una razón de carga de aproximadamente $0.5C$ ($C/2$), lo cual es considerado como una carga rápida según los estándares actuales, no se llegó a observar cambios abruptos en la temperatura ni reacciones químicas donde se producen gases en los sujetos de prueba testeados, por lo que podemos suponer que lo más importante a ser considerado durante el proceso de carga de una batería de ion Li cuando se utiliza este sistema de carga, es justamente el control de la evolución de la curva de la corriente, pues, aunque el control del voltaje es crítico en otros cargadores que manejan otras tecnológicas de carga, donde no se debe rebasar nunca los límites de voltaje V_{MAX} y V_{MIN} definidos para las celdas de litio, ya que en tal caso la batería puede quedar inservible. Nuestro dispositivo de carga evita estos fenómenos con éxito porque entrega corriente de forma controlada y deja que la batería adquiera sus propios voltajes de salida de forma natural, por lo que naturalmente no se sobrepasa estos valores límite perjudiciales a menos que entre en la etapa de sobrecarga.

Cuando se quiere utilizar un modelo fiable que describa de forma acertada el comportamiento de una batería en un proceso de carga y descarga, es imperativo hacer una identificación de los parámetros involucrados para cada celda, pues muchas veces ni siquiera se tiene una idea de su valor. Una ventaja de los modelos eléctricos es que la mayoría de sus parámetros depende de propiedades puramente eléctricas (voltaje y corriente de carga). Por lo que consideramos que este es el método más fiable en la obtención de estos parámetros propios de la celda, debido a que no le interesa los elementos químicos ni la tecnología empleada en su construcción, entonces estos parámetros podrían ser usados más bien como patrón para el desarrollo de un modelo electroquímico característico que le permita al fabricante mejorar la eficiencia de las celdas al modificar de forma acertada en base al modelo electroquímico los elementos constitutivos de la batería, dominando de esta forma tanto el ciclo de diseño como el de producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Yoshio, M., Ralph, J. y Kozawa, A. (2009). Lithium-Ion Batteries. Suiza: Ed.Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-34445-4>
- (2) Korthauer, R. (2010). Handbuch Lithium-Ionen Batteries. Suiza: Ed.Springer.
- (3) Universidad de Vigo (2011). Polarización eléctrica Polarización eléctrica C3A FÍSICA Consultado el 20 de mayo de 2018 Disponible en <http://www.clickonphysics.es/cms/wp-content/uploads/POLARIZACION-ELECTRICA.pdf>
- (4) Linden, D. y Reddy, T. (2001). Handbook of batteries. (3ra Ed.). McGraw-Hill
- (5) Davidson, M. (2008). Molecular Expressions: Electricity and Magnetism Introduction. Cambridge University Press.
- (6) Acosta, J., Favilla, P., Schvesov, C. y Collet, J. (2011). Caracterización eléctrica de celdas de Lito-ion. Cuarto congreso nacional - Tercer congreso iberoamericano hidrogeno y fuentes sustentables de energía - HYFUSEN [04-002]. CEDIT-CONCET (Argentina)

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores. **Declaración de conflicto de intereses:** Los autores declaran que no tiene ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2018 Raul F. Gómez Sierra; Jaime Hamel Fonseca



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia](#) - [Textocompletodelicencia](#)