

Estudio de circuitos protectores de baterías de iones de litio en el proceso de carga y descarga

César Martín Cruz Salazar¹, Ronald Nicolas Saenz Chuqui

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Av. Tupac Amaru 210, Rimac, Lima, c.p. 15333, Perú.

¹*ccruz@uni.edu.pe*

Las baterías de iones de litio se utilizan ampliamente como fuente de alimentación que suministra el accionamiento eléctrico de múltiples dispositivos. Son sensibles a la operación fuera de su área de operación recomendada, lo que podría conducir a un menor tiempo de vida, daños y riesgo de explosión. Se aplica un sistema de gestión de batería (BMS) para controlar y proteger la batería de las condiciones anormales. Este trabajo de investigación consiste en medir el voltaje de corte máximo en la carga y el voltaje de corte mínimo en la descarga de baterías de iones de litio usando circuitos de protección de baterías. Se mide para el caso de una celda y para un conjunto de tres celdas en serie. En el primer caso se utilizó como protector el TP4056 y se desarrolló un circuito basado en una placa de Arduino Nano para registrar datos de voltaje de la carga y descarga cada cierto tiempo. En el segundo caso se desarrolló un circuito 3S 4P que consiste en tres celdas en serie y conectando en paralelo 3 series más de 3 celdas en serie conectados al gestor de batería BMS 3S 20Amperios.

Palabras Claves: Arduino Nano, Modulo TP-4056, BMS, carga de batería li-on, descarga de batería li-on, batería de iones de litio, li-ion, 18650.

Lithium-ion batteries are widely used as a power source that supplies the electrical drive for multiple devices. power supply for multiple devices. They are sensitive to operation outside their recommended operating range, which could lead to shorter lifetime, damage and risk of explosion. A battery management system is applied. management system (BMS) is applied to control and protect the battery from abnormal conditions. This research work is to measure the maximum cut-off voltage at charging and the minimum cut-off voltage at discharging of lithium-ion batteries using ion batteries using battery protection circuits. It is measured for the case of one cell and for a set of three cells in series. three cells in series. In the first case, the TP4056 was used as the protector and a circuit based on an Arduino Nano board was developed to register the battery. based circuit was developed to record charging and discharging voltage data every few seconds. In the second In the second case, a 3S 4P circuit was developed consisting of three cells in series and connecting in parallel 3 series of 3 more 3 cells in series connected to the BMS 3S 20Amp battery manager.

Keywords: Arduino Nano, TP4056 module, BMS, li-ion battery charge, li-ion battery discharge, lithium ion batteries, li-ion, 18650.

1. Introducción

En la actualidad, nos hemos acostumbrado a la movilidad como el uso del teléfono celular, el uso de un ordenador portátil y el uso de un medio de transporte cada vez más común, como son los patinetes eléctricos, bicicletas eléctricas, sillas de ruedas y autos eléctricos, etc.

Todos ellos dependen de un elemento que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de todos estos dispositivos indicados líneas arriba.

Esto es la batería de iones de litio conformada por celdas de iones de litio (li-ion para lo que sigue) (Figura. 1)



Figura 1. Celdas 18650 de iones de litio de 3.7v.

Para hacer frente a la exigencia común de lograr la sostenibilidad energética, disminuir los riesgos ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero, el calentamiento global, etc., y el agotamiento de los combustibles fósiles.

Es de gran importancia reemplazar el vehículo convencional por un vehículo eléctrico que use una batería ecológica de cero emisiones eléctrica.

Con características tales como la tasa de auto descarga baja, la densidad alta de almacenamiento de energía, y el ciclo de vida útil prolongada, hacen que las baterías li-ion se hayan convertido en la principal fuente de energía de los Vehículos Eléctricos (EVs) [1]-[2].

Las celdas 18650 son uno de los tipos de baterías más comerciales y de mayor uso en el mercado. Las pilas ordinarias traen consecuencias negativas para el medio ambiente (las sustancias químicas que hay en el interior de estas son, por ejemplo, manganeso, zinc o hidróxido potásico, todos estos elementos son tóxicos, difíciles y caros de reciclar), por lo que es cada vez más habitual

disponer de baterías recargables en base a celdas li-ion.

El objetivo de este trabajo de investigación es verificar experimentalmente los voltajes de corte hacia arriba como hacia abajo de una celda li-ion usando la placa TP4056 (Fig.2) y de un conjunto de celdas li-ion usando la placa BMS 3S 20A (Fig.3).

En el segundo caso para la medición experimental sea construido una batería de 12v conectando un conjunto de celdas 18650 li-ion.

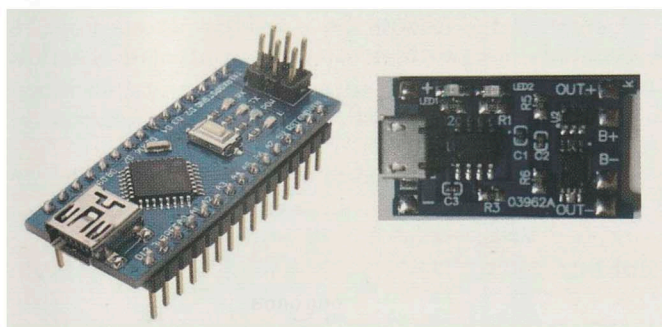


Figura 2. Placa Arduino Nano a la izquierda y la placa de protección TP4056 a la derecha.

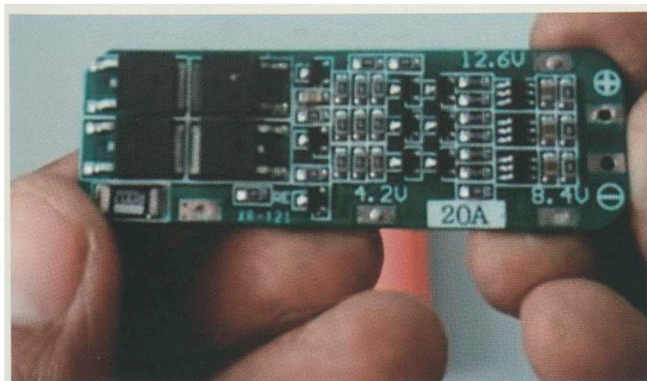


Figura 3. Placa BMS 3S 20Amp.

En las secciones 2 y 3, se tiene una breve explicación de la celda li-ion así como la descripción del sistema usado para la medición. En las secciones 4, 5, 6 y 7 se muestran resultados obtenidos, el BMS, resultados del circuito BMS y observaciones finales.

2. Batería li-ion

La celda li-ion es una batería donde la energía eléctrica puede ser almacenada como energía química y entonces esta energía química se convierte en energía eléctrica para cuando se requiera [3].

En la tabla 1 describimos el interior de una batería de iones de litio.

Tabla 1. Estructura de la batería li-ion.

ELEMENTO	DESCRIPCION
Catodo	Terminal positivo, esta compuesto por LiCoO ₂ . Sustituido por el de fosfato de hierro-litio(LiFePO ₄).
Anodo	Terminal negativo, esta compuesto por grafito.
Separador	Barrera que evita cortocircuito entre los dos electrodos.
Electrolito	Medio situado entre cátodo y ánodo que permite el paso de la carga eléctrica entre ellos. Se trata de una sal de litio disuelta en un disolvente orgánico [4].

Una celda de iones de litio es una batería de alta energía en la que Li + se incrusta y escapa de materiales positivos y negativos cuando se carga y descarga.

Como se ilustra en la figura 4, de izquierda a derecha, una batería consta de un colector de corriente catódica, materiales activos de electrodo negativo, electrolito, un separador, materiales activos de electrodo positivo y un colector de corriente de ánodo. Los materiales de electrodos positivos de las baterías de iones de litio son compuestos de iones de litio, comúnmente LiCoO₂, LiNiO₂, LiMn₂O₄, LiFePO₄ y LiNixCo_{1-2x}MnxO₂, y así sucesivamente.

Los materiales de electrodos negativos son comúnmente LixC₆, TiS₂, V₂O₅, etc. El electrolito es un disolvente orgánico en el que las sales de litio, como LiPF₆, LiBF₄, LiClO₄, LiAsF₆, etc., son solubles. Los disolventes son principalmente carbonato de etileno (EC), carbonato de propileno (PC), carbonato de dimetilo (DMC), carbonato de metilo de cloro (ClMC), etc.

El papel principal del separador en una celda es aislar los electrodos positivo y negativo, al tiempo que permite el transporte de iones. Recientemente, una membrana microporosa de polietileno (PE) o polipropileno (PP) se ha utilizado comercialmente como separador. Los iones de litio se desunen del compuesto del cátodo y se intercalan en la red del ánodo durante el proceso de carga. El cátodo tiene un alto potencial y un pobre estado de litio, mientras que el ánodo tiene un bajo potencial y un rico estado de litio.

Cuando se descarga, el Li + escapa del ánodo y se incrusta en el cátodo, produciendo un rico estado de litio en el cátodo. Por lo tanto, el proceso de carga y descarga de las baterías también es un proceso de desintercalación e intercalación de litio entre los dos electrodos, de ahí el nombre de "baterías de mecedoras".

Para mantener el equilibrio de carga, durante el proceso de carga y descarga, el mismo número de electrones se mueve con el Li^+ entre el cátodo y el ánodo a través del circuito externo. Por lo tanto, se produce una reacción redox entre el cátodo y el ánodo [9].

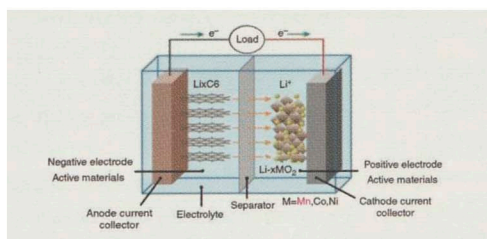


Figura 4. Proceso de descarga de una batería Li-ion [9]

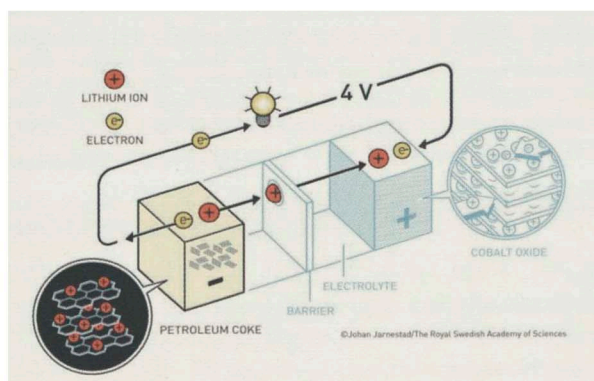


Figura 5. Batería Li-ion Yoshino. Fuente: nobelpri-ze.org

La celda li-ion tiene un recubrimiento exterior de metal, que ahora es particularmente importante porque la pila está presurizada.

Esta caja de metal tiene un orificio de ventilación sensible a la presión. Si la pila se calienta tanto que corre el riesgo de explotar debido a una sobrepresión, esta ventilación se encarga de liberar la presión generada en el interior de la pila.

El respiradero está colocado como medida de seguridad. También dispone de un dispositivo que evita sobrecalentamientos [5].

La carga completa ocurre cuando la batería alcanza el umbral de voltaje y la corriente cae al 3 % de la corriente nominal. Un aumento de la corriente de carga no adelanta una carga completa. Aunque la batería alcanza el pico de voltaje más rápido, en consecuencia, la carga de saturación tardará más. Con una corriente más alta, la carga al inicio es más corta, pero la saturación después de un cierto tiempo tomará más tiempo. Una carga de corriente elevada, sin embargo, llenará rápidamente la batería a aproximadamente un 70 %. Una batería li-ion no necesita estar completamente cargada como es el caso de baterías plomo ácido, ni es deseable hacerlo. De hecho, es mejor no cargarla completamente porque un alto voltaje sobrecarga la batería. La elección de un umbral de voltaje más bajo o la eliminación de la carga de saturación por completo prolonga la vida de la batería, pero esto reduce el tiempo de ejecución. Los cargadores de otros productos van a la capacidad máxima y no se pueden ajustar; con lo

que la vida útil del producto en sí se percibe con menor importancia [6].

3. Materiales y metodología

3.1. Materiales

El circuito elaborado para obtener la gráfica de voltaje de la carga y descarga de la batería de iones de litio fue construido a partir de un microcontrolador Arduino Nano, una placa TP4056, un protoboard, una placa booster step-up, un circuito optoacoplador, resistencias, leds y cables de conexión.

Tabla2. Equipo usado para el circuito con TP4056.

Nro	Equipamiento usado	Especificación
1	Arduino Nano	Entrada de 5V
2	TP4056	Entrada de 5V, 1000mA
3	Booster STEP-UP	Salida de 3V-32V
4	Resistencias	7 Ω , 1000 Ω , 1k Ω , 10k Ω
5	Multímetro	Mide Voltaje, Ohms, etc

EL TP4056 es un módulo de protección y además un controlador lineal completo de corriente y voltaje para una sola celda li-ion. El voltaje de carga es fijado a 4.2V. El TP4056 finaliza automáticamente el ciclo de carga cuando la corriente de carga cae a 1/10 del valor programado después de alcanzar el voltaje final. Otras características incluyen monitor de corriente, bloqueo por bajo voltaje, recarga automática y dos pines de estado para indicar la terminación de la carga y la presencia de un voltaje de entrada [7]. El circuito utilizado para las mediciones se puede visualizar en la figura 6 y figura 7. Ambos circuitos son uno solo al unirse los números que tienen puntos suspensivos. En la figura 8 se visualiza la foto del circuito armado que corresponde a las figuras 6 y 7.

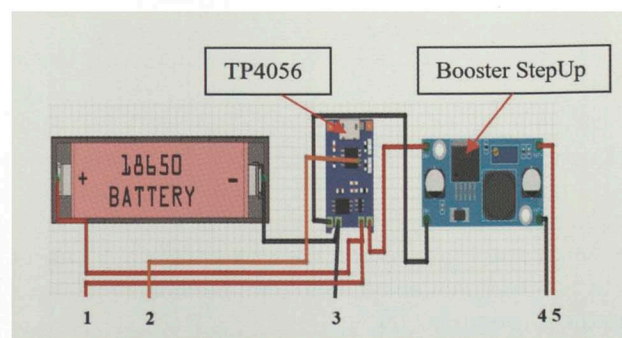


Figura 6. Primera parte del circuito en el cual se puede visualizar el módulo TP4056 el cual controla la carga y descarga de la celda li-ion.

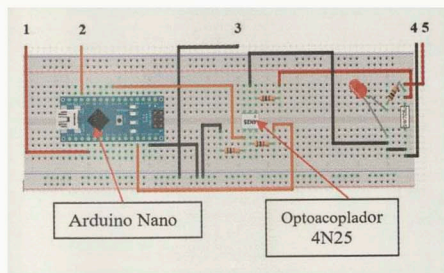


Figura 7. Segunda parte del circuito en el cual se puede visualizar el Arduino Nano que registra voltaje en la carga y descarga.

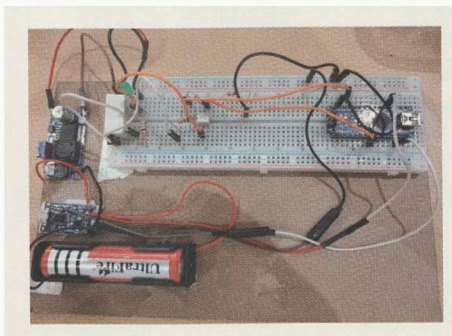


Figura 8. Foto del circuito usado en las mediciones. Aquí no se visualiza el cable que se conecta vía USB a la computadora PC. Pero si se utiliza.

3.2. Metodología

En la figura 6, la placa TP4056 se encarga de controlar la carga de la batería li-ion y a la vez se encarga de su protección, es decir, que no supere su carga máxima y su descarga mínima. Con cables que se conectan a los terminales IN+ e IN- de la placa TP4056 o en su defecto con un cable que se conecta al conector micro-usb se carga la celda li-ion mediante un adaptador de corriente de 5v y 1 o 2 amperios. Los cables que salen de los terminales B+ y a B- del TP4056 van al Arduino Nano (ver figura 7) a una de sus entradas analógicas, mediante lo cual se mide el voltaje, y mediante un programa hecho en Arduino podemos obtener los datos de voltaje de carga.

El voltaje de corte máximo de carga de la batería es controlado por la placa TP4056. El programa requiere un estado lógico 0, para ello se utiliza un cable soldado a su PIN6 del TP4056 y el otro extremo se conecta a una entrada digital del Arduino. El estado 0 lógico que se recibe indica que la celda li-ion está completamente cargada y es en este momento que ya no se sigue suministrando corriente a la celda li-ion.

En la figura 6, los cables de conexión conectados al OUT+ y OUT- de la placa TP4056 se conectan al IN+ e IN- del módulo booster step-up (figura 9) el cual da una salida calibrada de 5V, este voltaje se obtiene a través del OUT+ y OUT- de la placa booster el cual se usa para descargar la celda li-ion mediante una resistencia de 7.5Ohms y 5W. De esta manera se puede obtener la gráfica de la descarga de la batería li-ion.

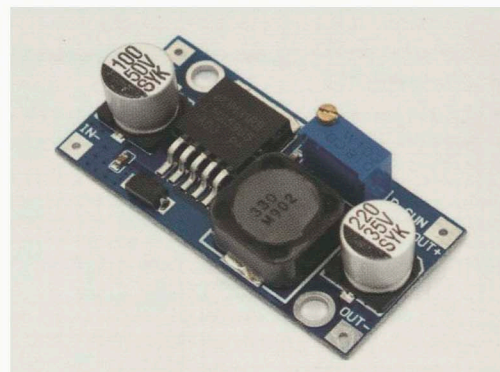


Figura 9. Placa Booster Step Up

Cuando se llega a la carga mínima de la batería la placa TP4056 ya no permite que siga descargándose la celda li-ion, y mediante un cable de conexión conectado en el PIN5 del optoacoplador que también se conecta en la entrada digital D5 del Arduino nano da un 0 lógico que indica que la batería está descargada. Cabe resaltar que se usó un optoacoplador para separar las tierras del Arduino nano de la placa booster step-up.

4. Análisis de gráficos

Con los datos obtenidos se obtuvo las siguientes gráficas en el proceso de carga de diferentes marcas de celdas li-ion.

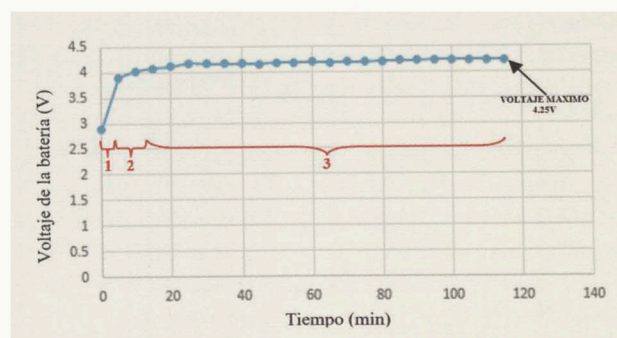


Figura 10. Gráfica de la carga de la celda li-ion de la marca CAFINI.

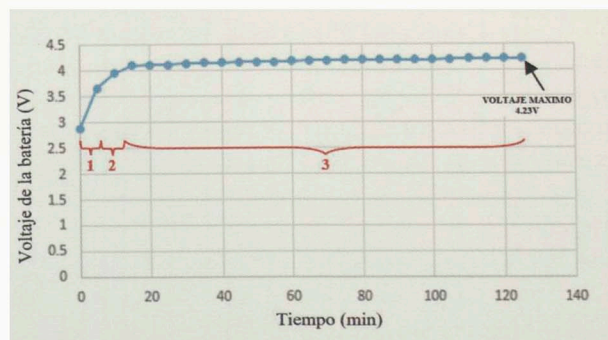


Figura 11. Gráfica de la carga de la celda li-ion de la marca ULTRAFIRE.

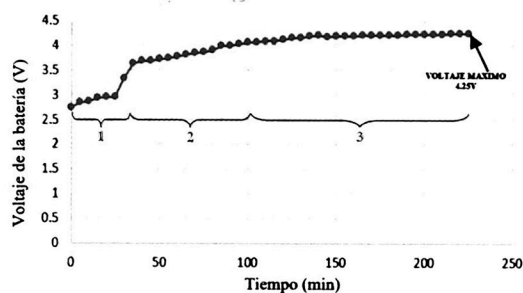


Figura 12. Gráfica de la carga de la celda li-ion de la marca LG.

En la figuras mostradas se puede ver que la batería presenta 3 etapas al momento de cargarla, en la primera etapa presenta una carga rápida en un corto tiempo donde el voltaje va desde su voltaje mínimo hacia el intervalo 3.5V-3.6V, en su segunda etapa empieza una carga menos rápida que la anterior donde el voltaje va desde el intervalo 3.5V-3.6V hacia el intervalo 4.0V-4.10V y en la última etapa presenta una carga mucho más lenta, el cual tiene un tiempo de carga más lento que las dos etapas anteriores hasta llegar a su voltaje máximo, se puede ver que el tiempo de carga de la primera etapa y segunda etapa juntos es igual al tiempo de la tercera etapa. Así también, se obtuvo la gráfica de descarga para cada tipo de batería usando una resistencia de 5W de 70hms, tomado del B+ y B- de la placa TP4056.

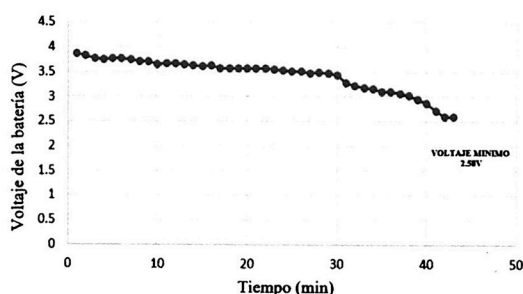


Figura 13. Gráfica de la descarga de la celda li-ion de la marca CAFINI.

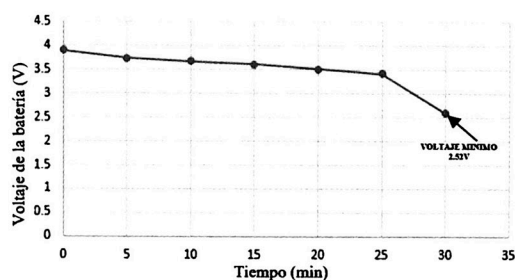


Figura 14. Gráfica de la descarga de la celda li-ion de la marca ULTRAFIRE.

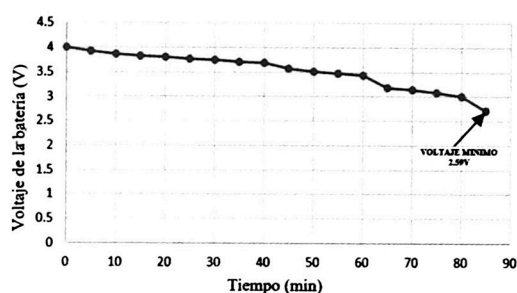


Figura 15. Gráfica de la descarga de la celda li-ion de la marca LG.

De estas gráficas, se pueden visualizar que al momento que se descarga la batería la caída de voltaje tiende a ser una función lineal.

Se visualiza también, que los tiempos de descarga difieren dependiendo de la capacidad de descarga de cada celda.

5. BMS (Sistema de gestión de batería)

Las baterías de iones de litio son sensibles a que funcionen fuera de su área de operación recomendada, lo que podría conducir a un menor tiempo de vida, daños y riesgo de explosión. Se aplica por ello un sistema de gestión de batería (BMS) para controlar y proteger la batería de las condiciones anormales [8]. En los últimos años, se ha prestado atención a esta tecnología de gestión de batería y, con el esfuerzo de los investigadores a lo largo del tiempo, su función ahora se puede definir explícitamente [9]:

- Monitoreo en tiempo real de los estados de la batería. Al medir los parámetros característicos externos (como el voltaje externo, la corriente, la temperatura de la celda, etc.), con el algoritmo apropiado, BMS podría realizar la estimación y el monitoreo de los parámetros y estados internos de la batería como capacidad, estado de la carga, etc.

B. Uso eficiente de la energía de la batería.

C. Evitar la sobrecarga o sobre descarga de la batería.

D. Garantiza la seguridad del usuario y extiende la vida útil de la batería.

6. Materiales y resultados para la batería de 12.6V

6.1. Materiales

Tabla 4. Equipo usado para el circuito de la batería 12.6V

Nro	Materiales usados	Especificación
1	12 baterías de Li-Ion	De 3.7V
2	BMS	Des 3S y 20Amp
3	12 sockets para cada batería	Para una sola batería
4	Booster Step Up	De 3V a 30V
5	Fuente de 5V con indicador digital de voltaje y corriente	De 5Amp
6	Voltímetro digital	De 0v hasta 99.9V
7	Indicador de carga de batería	Para 3S

Se armó el circuito con celdas Li-ion y el BMS de la figura 16:

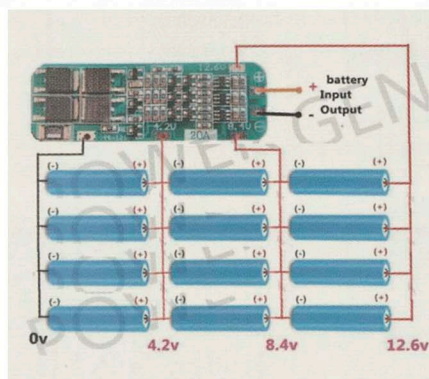


Figura 16. Circuito de baterías 3S 4P conectado al BMS.

El circuito del cargador usado es mostrado en la figura 16. Se utiliza una Fuente de 5V de 5Amperios que se conecta a un Booster Step Up. Este eleva el voltaje de 5v a 12.73v.

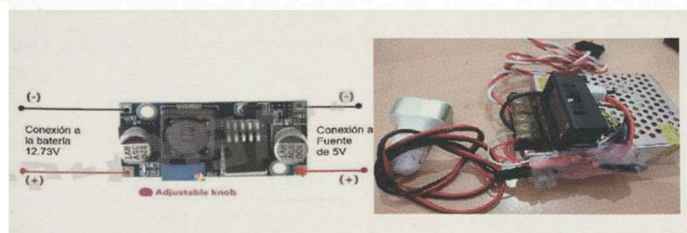


Figura 17. Circuito del cargador de la batería de 12.6V.

El sistema batería y cargador que se fabricó para este proyecto se muestra en la figura 18.



Figura 18. Batería de Li-ion de 12.6V y el cargador.

6.2. Resultados

Las mediciones obtenidas con el sistema de batería + cargador de la figura 18 se muestran en la tabla 4. El indicador digital mostró los voltajes obtenidos. Al momento de la carga y de la descarga de la batería.

Tabla 4. Valores del voltaje máximo y mínimo de una batería li-ion de 12.6V

Batería de 12.6V de iones de litio	
Voltaje máximo de carga y de corte	12.9V
Voltaje mínimo en la descarga y de corte	8.1V

7. Conclusiones

Al haberse realizado diversas pruebas con tres diferentes marcas de celdas li-ion se puede concluir que el voltaje máximo que se le da a la batería al momento de cargarlo y el voltaje mínimo de la batería al momento de ser descargada medidos del B+ y B- del TP4056 se encuentra entre los siguientes valores mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 5. Valores del voltaje máximo y mínimo de una batería li-ion tomado del B+ y B- del TP4056

Celda de iones de litio	
Voltaje máximo de carga y de corte	4.24V-4.25V
Voltaje mínimo en la descarga y de corte	2.55V-2.60V

Si en la carga o descarga no se respetan estos valores dados en la tabla de arriba, la batería puede sobrecalentarse y explotar debido a una sobrecarga; o se podría auto descargar demasiado lo cual dejaría a la batería con una vida útil disminuida, pero si se carga o descarga a la batería como en la figura 10 y figura 13, respectivamente, se le está dando una mayor vida útil a la batería li-ion. Cuando la celda li-ion se descarga y llega a su voltaje mínimo, el TP4056 realiza un corte que hace que ya no disminuya el voltaje, y se puede ver que después del corte la batería infla el voltaje; es decir, sube un poco el voltaje de la batería, la batería se auto recarga.

Cuando se colocó una resistencia de 3.3Ohms y 10W, el TP4056 no permitía que ciertas celdas li-ion se descarguen, de esto se puede decir que, si se pone una resistencia de menor valor, el TP4056 en ese instante hará un corte, no dejará que la batería se descargue con una cantidad de corriente mayor a la que puede dar.

La capacidad de cada batería influye mucho en el tiempo que se demora cargar y descargar, a la vez con una batería de mayor capacidad se pueden usar resistencias de menor valor para descargarlos más rápido sin que el TP4056 lo corte en ese instante como se mencionó.

El OUT+ y el B+ del TP4056 están unidos.

En el momento que no se descarga la batería el B+ del TP4056 y el voltaje de la batería coinciden. Pero cuando empieza la descarga, el B+ del TP4056 y el voltaje de la celda li-ion no coinciden. Esto se debe al circuito interno

que hay en el TP4056.

La carga de la batería de 12.6V demoró un tiempo considerable de unas 8 horas. Para bajar este tiempo, se hace necesario usar booster Step Up y una fuente de mayor amperaje. Se puede usar hasta 10 Amperios.

Agradecimiento

Al Centro de Tecnologías de Información y Comunicaciones (CTIC) de la UNI por el apoyo en el uso del laboratorio del tercer piso para poder desarrollar este trabajo de investigación.

1. J. Kim, J. Shin, C. Chun, and B. Cho, "Stable configuration of a li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/ soc balancing" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 411–424, 2012.
2. Tae-Ho Eom, Min-Ho Shin, Jun-Mo Kim, Jeong Lee, Chung-Yuen Won. Improved Charge Control Algorithm considering Temperature of Li-ion Battery. Sungkyunkwan University. Republic of Korea. 2017.
3. Bijani S., Laminas de Cu₂O. Aplicación como electrodo, Tesis Doctoral, Universidad de Málaga. 2007.
4. Blog Baterías de litio.
<https://www.bateriasdelitio.net/?p=6>. 2019.
5. Ignacio Martil
<https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/01/11/como-son-las-baterias-de-ion-litio/>. 2019.
6. Casana N., Gomez P. Baterías de litio, Investigación y Ciencia. Barcelona. 1996.
7. NanJing Top Power ASIC Corp. TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8.
8. Waraporn Puviwatnangkurn, Bundit Tanboonjit, Nisai H. Fuengwarodsakul. Overcurrent Protection Scheme of BMS for Li-Ion Battery used in Electric Bicycles. Thailandia. 2013.
9. Jiuchun Jiang and Caiping Zhang. Fundamentals and applications of lithium -ion batteries in electric drive vehicles. John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd. 2015.