

MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD PRÁCTICA DE BATERÍAS RECARGABLES DE LI-ION TIPO 18650

PRACTICAL CAPACITY MEASUREMENT FOR 18650 TYPE LI-ION RECHARGEABLE BATTERIES

Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

Universidad Nacional Autónoma de México, México
miguel.banuelos@icat.unam.mx

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

La capacidad de carga práctica de una batería recargable toma como límites el voltaje a carga plena, y el voltaje mínimo de operación del sistema que alimentará. Este es un dato que puede ser distinto al de la capacidad nominal proporcionada por el fabricante. Conocer la capacidad de carga práctica es muy útil cuando la pila alimentará algún equipo que se dejará funcionando de manera remota por varias semanas. En este trabajo, se presenta el desarrollo de un circuito para medir la capacidad de carga práctica de baterías Li-ion de 3.7 V, basado en un microcontrolador ATmega328P. El sistema proporciona una alternativa económica en comparación con algunos equipos comerciales. Utiliza un regulador lineal de voltaje para descargar a corriente constante la batería bajo prueba. Cuenta con un display LCD, donde se muestra el tiempo transcurrido, el voltaje de la batería, y la carga total en mAh que ha sido drenada. El dispositivo diseñado tiene un costo aproximado de \$500 pesos MNX y la capacidad de extender su operación a pilas de NiMH o NiCd de 1.2 V. Se presentan los resultados de pruebas realizadas a baterías de 3.7 V modelo 18650 de 2200 mAh. Considerando un voltaje mínimo de operación de 3.5 V, se encontró que las baterías tienen una capacidad práctica promedio de 1771 mAh.

Palabras Claves: Capacidad de baterías, capacidad práctica, baterías Li-ion, fuente de corriente, microcontrolador ATmega328P.

Abstract

The practical capacity of a rechargeable battery is bounded by the full charge voltage and the minimum supply voltage of the powered system. This may be a different data from the rated capacity specified by the manufacturer. Knowing the practical capacity is very useful when the battery will power some remote equipment for several weeks. In this work, the development of a circuit for measuring the practical capacity of a 3.7 V Li-ion battery, based on an ATmega328P microcontroller is presented. The system represents an economical alternative to some commercial instruments. It uses a linear voltage regulator for discharging the battery under test with a constant current. It has an LCD display where the elapsed time, the battery voltage and the total mAh drained charge are shown. The designed device has an approximated cost of \$500 pesos MNX and its operation capabilities can be extended to test NiMH and NiCd batteries. The results of the tests performed to 3.7 V 2200 mAh model 18650 batteries are presented. Considering a minimum operating voltage of 3.5 V, it was found that the batteries have a 1771 mAh average practical capacity.

Keywords: *Battery capacity, practical capacity, Li-ion battery, current source, ATmega328P microcontroller.*

1. Introducción

Los equipos electrónicos portátiles basan su operación en el uso de baterías. Éstas pueden ser de tipo primario (desechables), o de tipo secundario (recargables). Una batería es un dispositivo capaz de transformar la energía electro-química que almacena, en energía eléctrica, mediante una reacción de oxidación-reducción [Linden, 2001]. En el caso de que esta reacción sea reversible, se tratará entonces de una batería de tipo secundario.

Las tecnologías más utilizadas en la fabricación de pilas recargables son: Níquel-Cadmio (Ni-Cd), Níquel Metal-Hidruro (Ni-MH) y Iones de Litio (Li-Ion). De ellas, la que presenta la mayor densidad tanto volumétrica como gravimétrica de energía es la de Li-Ion [Simpson, 2011] (ver tabla1). Actualmente se puede encontrar pilas de

Li-Ion en teléfonos celulares, cámaras fotográficas, patines eléctricos y automóviles híbridos.

Tabla 1 Comparación de densidad de energía según el tipo de celda.

Tipo de celda	Ni-MH	Ni-CD	Li-ion
Densidad gravimétrica (W-HR/kg)	55	50	90
Densidad volumétrica (W-HR/L)	180	140	210

La capacidad de una batería recargable comúnmente se expresa en ampere-hora; es decir, la cantidad de corriente que puede suministrar en una hora antes de que su voltaje caiga por debajo de su umbral de operación útil [Simpson, 2011]. Para el caso de dispositivos portátiles, a menudo se utiliza el miliampere-hora (mAh).

La capacidad que indica el fabricante se denomina **capacidad nominal** (C_N) y se determina en condiciones específicas de temperatura, corriente de operación y voltaje final de operación [Sauer, 1999]. La **capacidad medida** (C_m) es aquella que se determina mediante alguna prueba estándar, como la propuesta en la norma IEC 61960-3, que establece que la batería se deberá descargar con una tasa igual a $0.2C_N$. La **capacidad práctica** (C_p) es la capacidad disponible considerando la carga máxima proporcionada por el sistema cargador y el voltaje mínimo de operación establecido por el sistema que utiliza la batería.

Algunos sistemas requieren informar al usuario del nivel de carga remanente en la batería, lo cual se conoce como **estado de carga** (SOC, *state of charge*). En otros casos es útil determinar el **estado de salud** (SOH, *state of health*), el cual es un cociente entre la capacidad medida y la capacidad nominal, ecuación 1.

$$SOH = \frac{C_m}{C_N} \quad (1)$$

Se considera que una batería se encuentra en el final de su vida útil cuando el estado de salud es de 0.8 [Sauer, 1999]. Un diagrama comparativo de las definiciones anteriores se muestra en la figura 1.

Un modelo de batería de Li-ion, de fácil adquisición es la pila 18650, la cual es de tipo cilíndrico y proporciona un voltaje nominal de 3.7 V. Este voltaje la hace adecuada para el diseño de circuitos electrónicos que operan con 3.3 V.

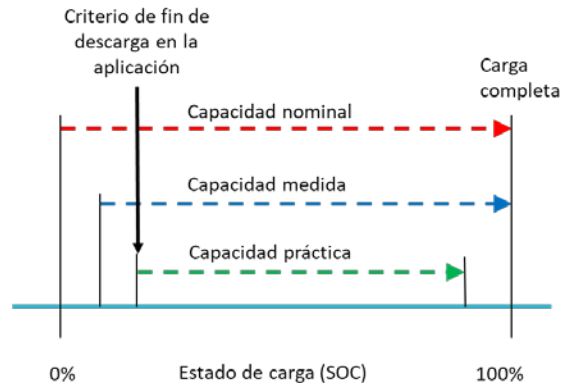


Figura 1 Comparación de definiciones de capacidad y estado de carga.

La pila se puede adquirir con un distribuidor de componentes electrónicos de presencia nacional, o bien a través de internet. A menudo, se trata de baterías que no son de un fabricante reconocido, y puede, por lo tanto, ponerse en duda si la capacidad de la pila corresponde a lo indicado por el vendedor. Esto se puede agravar en el caso de que se adquieran versiones de bajo costo, que pueden ser dispositivos rescatados de otros productos; tal es el caso mostrado en la figura 2, donde se indican los puntos de soldadura que servían para interconectar la batería a un paquete. Por otro lado, aunque se estima que una batería de Li-ion puede alcanzar entre 300 y 500 ciclos de carga-descarga, puede resultar difícil encontrar información sobre el modelo en particular [Tektronix, 2014].



Figura 1 Batería de Li-Ion recomercializada.

Como se mencionó anteriormente, la capacidad práctica está relacionada con las condiciones de operación. La batería se utilizará en un sistema de registro de datos (*datalogger*), el cual operará de forma remota, lejos de la supervisión de un

operador; y por lo tanto, no es indispensable conocer el estado de carga de la batería (SOC). Lo que se busca es conocer la capacidad práctica, y en función de ella estimar el número de semanas que el equipo puede operar. Para ello, se presenta el desarrollo de un sistema de medición de la capacidad práctica de baterías recargables de Li-ion de 3.7 V tipo 18650, basado en un regulador de voltaje lineal, un microcontrolador ATmega328P como sistema de control y una pantalla LCD para despliegue de resultados.

2. Métodos

Para poder estimar la capacidad de carga de una pila, un procedimiento común consiste en cargarla completamente, y luego proceder a descargarla de manera controlada hasta su límite operativo. La opción más sencilla consiste en colocar una resistencia de valor conocido R , estimar la corriente de descarga $I_{descarga}$, a partir del voltaje de la batería $V_{batería}$, mediante la ecuación 2, y medir el tiempo que tarda en descargarse.

$$I_{descarga} = \frac{V_{batería}}{R} \quad (2)$$

Debido a que el voltaje cambia con la carga almacenada, la corriente cambiará a medida que transcurre el proceso de descarga [Simpson, 2011], figura 3.

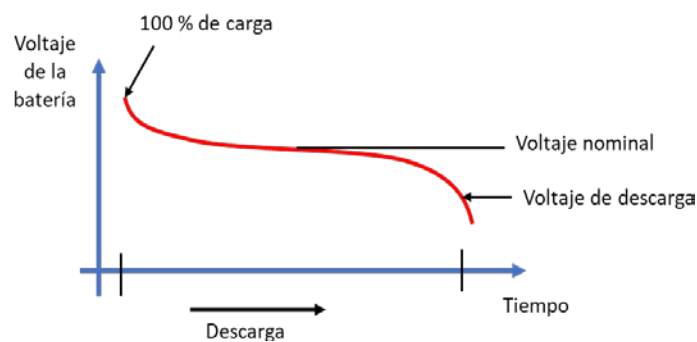


Figura 2 Curva de descarga de una batería.

Este problema se puede resolver si durante la descarga se mide de manera constante el voltaje de la batería, de tal manera que el valor de la corriente se calcule para cada medición.

Por otro lado, existen métodos estandarizados que requieren que la corriente de descarga sea constante [IEC, 2017]. La norma IEC 61960-3 define como capacidad nominal a la cantidad de carga (en Ah) que puede suministrar la batería a lo largo de cinco horas. Algunos equipos de laboratorio, como la carga electrónica de corriente directa BK Precision 8600 [BK Precision, 2017], tienen la opción de realizar este tipo de pruebas (Figura 4), ya que cuentan con un modo de operación de corriente constante que automáticamente se detiene al llegar a un voltaje mínimo preestablecido. Debe considerarse que se trata de equipos cuyo costo puede superar los \$1,000 dólares USD, más impuestos.



Figura 3 Carga electrónica de corriente directa BK Precision 8600.

Existe una alternativa más económica: la carga activa auto alimentada TekBox TBOH02 [TekBox, 2015], la cual produce una carga de corriente constante utilizando un arreglo de transistores en paralelo, y tiene un costo de \$149 dólares norteamericanos (Figura 5).



Figura 4 Carga activa auto alimentada TekBox TBOH02.

Sin embargo, no cuenta con una función específica para evaluar la carga de baterías, por lo que se requeriría de equipo adicional para medir con precisión la corriente, integrar su valor para obtener la carga drenada a la batería, y un sistema para detener la prueba cuando se alcance el voltaje mínimo de operación. El fabricante proporciona el diagrama esquemático del equipo, por lo que podría construirse para reducir su costo.

Otra opción es el probador multibatería MBT-1 [ZTS, 2013], el cual utiliza un proceso patentado [Zimmerman, 2004], que se basa en un pulso de corriente, para estimar la carga (SOC) de una batería a partir de una tabla de curvas de voltaje almacenada en un microcontrolador (Figura 6). Tiene un costo es de \$100 dólares norteamericanos. Tiene la ventaja de que la prueba tiene una duración de dos segundos. Este sistema no cuenta con una función para medir la capacidad práctica.



Figura 5 Probador multibatería MBT-1 de ZTS, Inc.

El probador de baterías de Li-ion ZB206 (Figura 7), utiliza una corriente de descarga para determinar la **capacidad medida** de la batería. Cuenta con un display de LEDs de 7-segmentos para proporcionar el resultado. Como no se puede ajustar el voltaje mínimo de la prueba, no permite medir de forma automática la capacidad práctica. Requiere una fuente de alimentación externa y tiene un costo aproximado de \$210 pesos MNX.

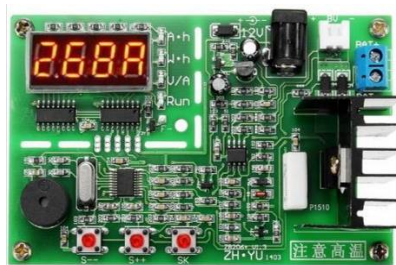


Figura 6 Probador de capacidad de baterías por descarga.

Para la estimación del estado de carga existe una gran variedad de métodos. Un método muy empleado es el método de voltaje abierto, en el que se aprovecha la relación lineal entre dicho voltaje y el estado de carga de la batería. Este método es

útil para evaluar baterías de plomo-ácido, pero no aquellas de Li-ion debido a que en estas últimas no se conserva la relación lineal [Lin, 2015]. El **método de conteo de Coulomb** es el más sencillo y consiste en integrar la corriente, ya sea durante la carga o la descarga. Su exactitud depende de la medición de la corriente y puede ser afectado por variaciones térmicas o fuentes de ruido. La **estimación del estado de carga basado en modelo** consiste en desarrollar un modelo matemático de la batería. Este modelo puede ser representado mediante un circuito eléctrico equivalente. Se han propuesto en la literatura al menos una docena de circuitos equivalentes [Hu, 2012]. Los parámetros del modelo son obtenidos por métodos tales como: estimación adaptable, filtros de Kalman, redes neuronales o lógica borrosa [Cho, 2012]. En ocasiones el modelo matemático puede incluir variables como el tipo de química de la batería [Zhang, 2017], o las variaciones en la temperatura de operación [Xing, 2014]. En ciertas aplicaciones, tales como los vehículos eléctricos es útil estimar también el estado de salud (SOH, *state of health*) de la batería. Para ello se pueden utilizar entre otros métodos: técnicas experimentales de medición, modelos adaptables basados en filtros de Kalman, lógica difusa, y redes neuronales [Berecibar, 2016].

Para determinar la capacidad práctica de una batería de Li-ion, se seleccionó el **método de conteo de Coulomb**, debido a su facilidad de implementación. Como una modificación al método, en lugar de medir la corriente, se utiliza un regulador de voltaje para producir una corriente de descarga constante. La figura 8 muestra dos ejemplos de utilización de un regulador de voltaje ajustable [Winde, 2017].

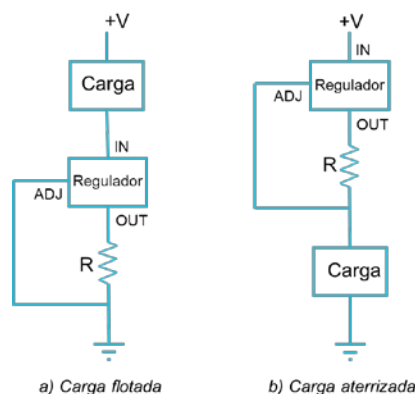


Figura 7 Circuitos de corriente constante utilizando el regulador ajustable.

Por ejemplo, la operación de un regulador LM317 [Texas Instruments, 1997] como fuente de corriente hace uso de que una referencia de voltaje V_{ADJ} interna que está flotada (Figura 9).

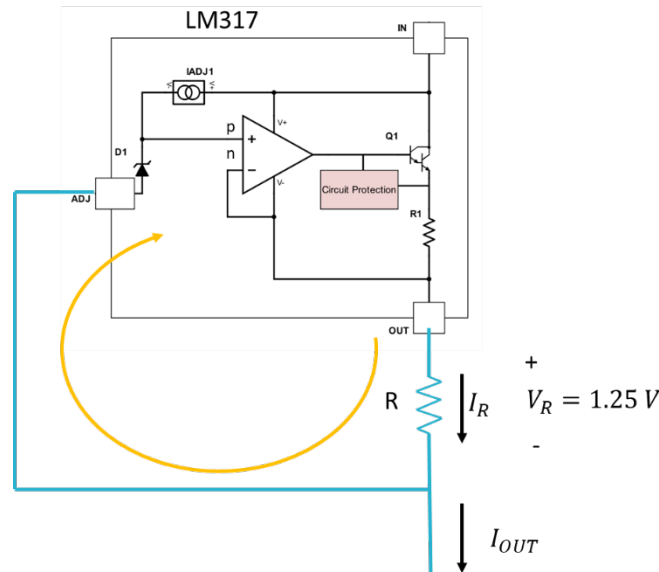


Figura 8 Análisis de un regulador LM317 como fuente de corriente constante.

El amplificador operacional interno se encarga de igualar los potenciales V_p y V_n , por lo que si se desprecia la corriente I_{ADJ} , se tiene que el voltaje en la resistencia V_R está dado por la ecuación 3.

$$V_R = V_{ADJ} \quad (3)$$

Y por lo tanto, la corriente a la salida I_{OUT} está dada por la ecuación 4.

$$I_{OUT} = \frac{V_{ADJ}}{R} \quad (4)$$

Para evitar la utilización de una fuente de voltaje adicional, se propone emplear el modo de carga aterrizada, como se muestra en la figura 10. Sin embargo, de acuerdo con el fabricante, el voltaje mínimo de entrada del circuito LM317-N es de 4.2 V, por lo que no resulta adecuado para probar baterías de 3.7 V. Como alternativa se puede utilizar el LM317M ($V_{IN_MIN} = 3.0\text{ V}$), o el regulador de baja caída (*dropout*) LM1117 ($V_{IN_MIN} = 2.6\text{ V}$). Finalmente se selecciona el LP38851-ADJ ($V_{IN_MIN} = 0.915\text{ V}$), que además cuenta con una terminal de habilitación, y que puede

ser utilizada para desconectar la batería una vez terminada la prueba [Texas Instruments, 2013].

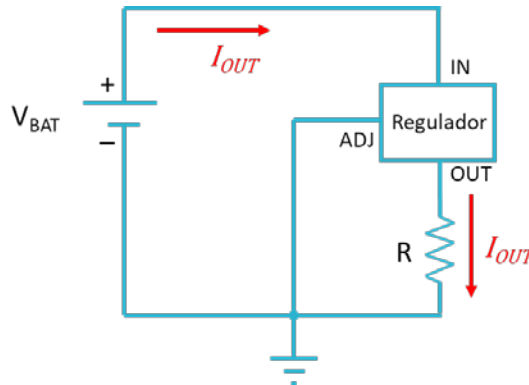


Figura 9 Configuración propuesta.

El análisis del regulador LP38851 es similar al del LM317, con la diferencia principal de que el voltaje de la referencia interna es de 0.5 V. Por lo tanto, la corriente de salida estará dada por la ecuación 5.

$$I_{OUT} = \frac{500 \text{ mV}}{R} \quad (5)$$

Se propone que la corriente de descarga sea de 200 mA. Se selecciona este valor, como un compromiso entre una descarga acelerada y un consumo típico de un instrumento menor a 20 mA [Bañuelos, 2018]. De esta manera, probar una batería con capacidad de 2200 mAh, tomará 11 horas aproximadamente.

3. Resultados

El sistema desarrollado se basa en el microcontrolador de 8 bits ATmega328P, el cual cuenta con 32 kB de memoria de programa, 2 KB de memoria SRAM, un convertidor analógico-digital de 10 bits, y un *timer* de 16 bits, entre otras funciones. Se selecciona debido a sus características, su bajo costo, su facilidad de adquisición, y la flexibilidad de las herramientas gratuitas que proporciona el fabricante. Su programación fue desarrollada en lenguaje C, utilizando el ambiente (*IDE*) Atmel Studio 7 (de licencia gratuita), y se usó el programador PICKIT 4 de Microchip.

El probador de baterías utiliza un circuito integrado DS1307 (reloj de tiempo real) para cronometrar la descarga de la batería, y un display de cristal líquido (LCD) alfanumérico de 16 caracteres por dos renglones, para mostrar información al usuario: el voltaje actual de la batería, el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba, y la carga total que se ha drenado en mAh. Mientras la prueba se lleva a cabo, un LED parpadea a una frecuencia aproximada de 1 Hz. La prueba termina cuando el voltaje de la batería es inferior a un umbral fijado en el programa. En ese momento, el LED deja de parpadear y permanece encendido. El display mostrará entonces, el voltaje de la batería al terminar la prueba, el tiempo que duró la prueba, y la carga total que fue drenada. El montaje final de los componentes en el circuito impreso desarrollado se muestra en la figura 11. En la figura 12 se muestra el diagrama esquemático del circuito diseñado.



Figura 10 El sistema desarrollado, realizando una prueba.

El programa del microcontrolador se encarga de inicializar al convertidor analógico-digital interno, al display LCD, al reloj DS1307, y al temporizador (*timer1*), éste último es utilizado para hacer parpadear al LED. Después se inicia un proceso iterativo de medición, que termina cuando se ha descargado la batería. Esto se muestra de manera simplificada en el diagrama de flujo de la figura 13.

Se realizó la medición de carga en tres baterías nuevas modelo 18650 marca Steren. Para cargar las baterías se utilizó un módulo comercial basado en el circuito integrado TP4056, el cual es un controlador de carga de baterías de Li-ion que está diseñado para cargarlas a un voltaje de 4.2 V (se midió 4.17 V), y se muestra en la figura 14.

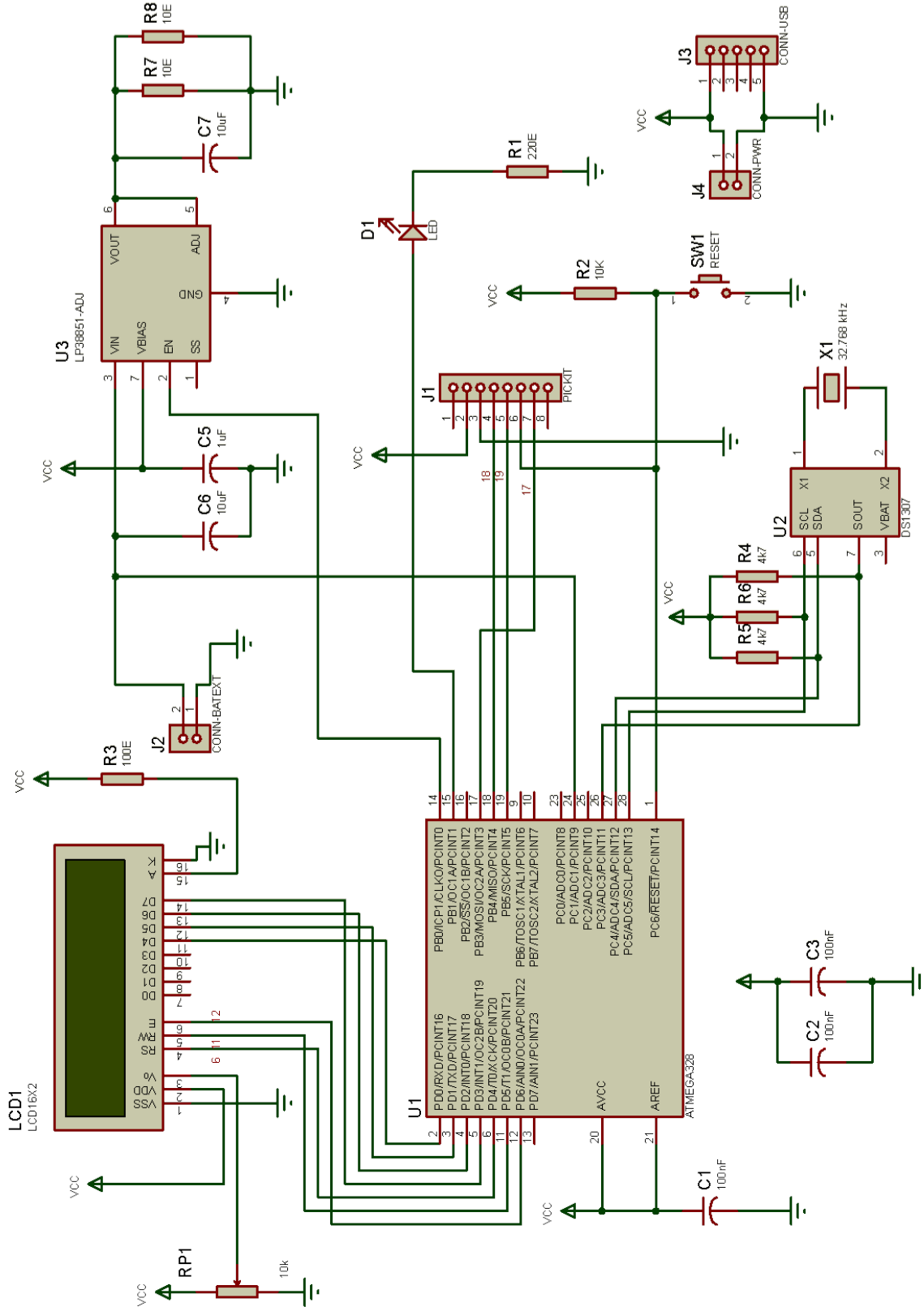


Figura 11 Diagrama esquemático del sistema desarrollado.

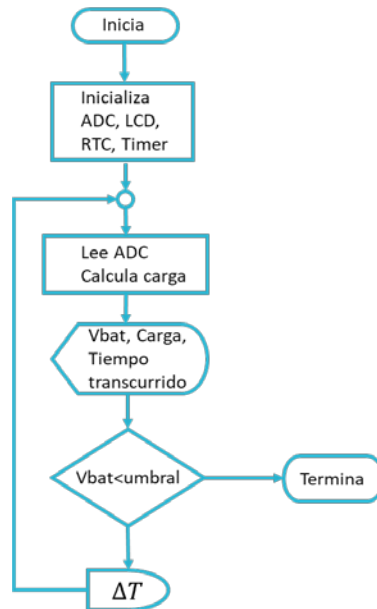


Figura 12 Diagrama de flujo simplificado.



Figura 13 Cargador de baterías Li-ion.

Las baterías se cargaron completamente, y se descargaron con una corriente constante de 200 mA, hasta llegar a un voltaje menor a 3.5 V. La carga promedio fue de 1771 mAh (Tabla 2), lo cual queda por debajo de los 2200 mAh especificados por el vendedor, situación que se analizará en la siguiente sección. Por otro lado, se repitió la prueba considerando un voltaje mínimo de 3.0 V, y se obtuvo que todas las pilas cumplen con su especificación, con una carga promedio de 2290 mAh. La comparación de la capacidad medida con la capacidad nominal representa el estado de salud (SOH). Utilizando la ecuación 1, se obtiene que en promedio las pilas nuevas presentan un SOH=1.04, lo que indica que están en el inicio de su vida útil.

Tabla 2 Capacidad medida en tres baterías tipo 18650.

Batería	CAPACIDAD PRÁCTICA Carga total, $V_{MIN}=3.5V$, en mAh	CAPACIDAD MEDIDA Carga total, $V_{MIN}=3.0V$, en mAh
A	1771	2288
B	1808	2305
C	1733	2278
Promedio	1771	2290

Adicionalmente, se midió la carga de la pila recomercializada (figura 1), encontrándose que tiene una capacidad práctica de 2031 mAh, considerando $V_{MIN} = 3.5 V$, y una capacidad medida de 2335 mAh, considerando $V_{MIN}=3.0 V$. Esto difiere de los 2600 mAh mencionados en su hoja de datos. Con estos datos se puede estimar su estado de salud (SOH) mediante la ecuación 1, y se obtiene un valor de $SOH= 0.9$, lo que sugiere que está a la mitad de su vida útil (considerando el final de la vida útil como $SOH= 0.8$). La pila recomercializada tuvo un costo de \$65 pesos MXN, mientras que una pila nueva marca Steren tiene un costo de \$140 pesos MXN más IVA.

4. Discusión

El método de prueba utilizado se basa en el **método de conteo de Coulomb**, y se adhiere al sugerido en la norma IEC 61960-3. Sin embargo, como el objetivo es determinar la capacidad práctica en lugar de la capacidad medida, se ha utilizado una razón de descarga de $0.091C_N$, en lugar de $0.2C_N$ sugerido en dicha norma. La norma establece una duración de cinco horas, mientras que el sistema desarrollado requiere alrededor de ocho horas para determinar la capacidad práctica y once horas para la capacidad medida. Las baterías se descargan con una corriente de 200 mA. Para acelerar la prueba se puede aumentar la corriente de descarga; sin embargo, debido a un efecto no lineal, la carga total disponible disminuye al aumentar la tasa de descarga, y dado que el uso que se le dará a la batería es la alimentación de sistemas que utilicen una corriente máxima de 20 mA, entonces el uso de una mayor corriente de descarga hará que disminuya la precisión de la prueba.

La prueba resulta invasiva, dado que requiere que la batería sea desconectada del sistema, y utiliza un ciclo de carga-descarga; sin embargo, la determinación de la capacidad práctica se realiza mediante una medición directa en lugar de una estimación, como a menudo ocurre en las pruebas de estado de carga.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la capacidad práctica promedio medida en las baterías modelo 18650 fue de 1771 mAh, lo cual es inferior a los 2200 mAh especificados por el fabricante. Sin embargo, la capacidad nominal de una batería de este tipo se especifica para un voltaje mínimo de 3.0 V [Tenergy, 2009], en lugar de los 3.5 V utilizados en las pruebas realizadas. Se seleccionó el valor de 3.5 V debido a que la batería se utilizará para alimentar un sistema que opera a 3.3 V, y utiliza un regulador de voltaje lineal cuya caída máxima de operación ($V_{\text{dropout_max}}$) es de 175 mV; por lo tanto, el voltaje mínimo que debe proporcionar la batería es de 3.475 V. Se redondea el valor a 3.5 V como margen de seguridad. De esta manera, se considera que la carga práctica obtenida es la que podrá ser extraída de la batería antes de que el sistema deje de operar, debido a un bajo voltaje de suministro. Se cuenta entonces con un dato confiable para estimar la duración de la batería en las condiciones previstas.

El sistema desarrollado puede ser utilizado también para probar otro tipo de baterías, debido a la flexibilidad adicional que presenta el regulador de voltaje lineal LP38851-ADJ. Dado que tiene un voltaje de entrada mínimo de 0.915 V, y un circuito de polarización independiente mediante una terminal de V_{BIAS} , el sistema puede ser utilizado para probar baterías con un voltaje que supere dicho umbral; por ejemplo, baterías recargables de NiMH, las cuales tienen un voltaje nominal de 1.2 V. Bastará con modificar el programa y establecer un nuevo voltaje mínimo de descarga. Este mismo procedimiento se puede utilizar para probar pilas con cualquier voltaje de operación entre el valor mínimo mencionado, y 6 V, que es el voltaje de entrada máximo del regulador.

5. Conclusiones

Se ha presentado un sistema para medir la capacidad práctica de carga de baterías recargables de Li-ion, con voltaje nominal de 3.7 V. Las condiciones de la

prueba se fijaron para evaluar la operación de las baterías en sistemas que operen a 3.3 V, y cuenten con un regulador de voltaje lineal de baja caída ($V_{\text{dropout_max}}=0.175$ mV). La capacidad práctica promedio obtenida en tres pilas tipo 18650 fue de 1771 mAh. Con este dato, se cuenta ahora con una mejor información para estimar la duración de la batería en el sistema que alimentará.

El regulador de voltaje utilizado para producir una descarga de corriente constante (LP38851-ADJ) permite que el sistema pueda ser utilizado para probar baterías cuyos voltajes de operación estén entre 0.915 y 6 V. Esto hace posible la prueba de pilas recargables de NiMH o NiCd de 1.2 V. El costo de los componentes utilizados, sin incluir las baterías, es inferior a los \$500 pesos MXN, por lo que representa una alternativa económica en comparación con los equipos comerciales que tienen función de probar la capacidad de baterías, aunque algunos equipos pueden contar con características adicionales, y no se ha incluido el costo de las horas de diseño utilizadas. De los equipos analizados, únicamente la carga electrónica de corriente directa BK Precision 8600 cuenta con la posibilidad de medir la capacidad práctica de una batería, pero tiene un costo de \$1000 dólares USD. Los otros equipos, aunque más económicos, requieren instrumentos adicionales, o bien, no cuentan con la opción de establecer el voltaje mínimo de operación de la batería, lo que impide que puedan medir de forma automática la capacidad práctica.

El trabajo realizado en este proyecto podría ampliarse para permitir la selección por programa de la corriente de descarga, o bien, servir de base para diseñar un sistema para medir el estado de carga de una batería.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto PAPIIT DGAPA-UNAM IN108118 Construcción y monitoreo de tecnosuelos con materiales de desecho para la revegetación urbana.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Hu, X., Li, S. and Peng, H. (2012) A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 198, pp. 359–367.

- [2] Bañuelos, M. A. (2018) Implementación de un sistema de medición y registro de datos con reloj en tiempo real y almacenamiento en tarjeta microSD, *Pistas Educativas*, 40(130), pp. 330–346.
- [3] Bercibar, M. et al. (2016) Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, pp. 572–587.
- [4] BK Precision (2017) 8600 Series Programmable DC Electronic Loads: <https://www.bkprecision.com/products/dc-electronic-loads/8600-150-w-programmable-dc-electronic-load.html>.
- [5] Cho, S. et al. (2012) State-of-charge estimation for lithium-ion batteries under various operating conditions using an equivalent circuit model. *Computers & Chemical Engineering*, 41, pp. 1–9.
- [6] IEC (2017) IEC 61960-3 Secondary lithium cells and batteries for portable applications - Part 3. International Electrotechnical Commission, p. 22.
- [7] Linden, D. and Reddy, T. (2001) *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill Education.
- [8] Lin, C., Tang, A. and Wang, W. (2015) A Review of SOH Estimation Methods in Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Applications, *Energy Procedia*, 75, pp. 1920–1925.
- [9] [Sauer, D. et al. (1999) State of charge - What do we really speak about?
- [10] Simpson, C. (2011) Characteristics of rechargeable batteries. Texas Instruments Inc., p. 12.
- [11] TekBox (2015) TBOH02 Self powered active load: <https://www.tekbox.com/product/tboh02-self-powered-active-load/>.
- [12] Tektronix (2014) Lithium-ion battery maintenance guidelines. Tektronix Inc., p. 5.
- [13] Tenenergy (2009) TENERGY 18650 2200mAh Li-Ion Cell. Tenenergy Corp., p. 7: <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2144243.pdf>.
- [14] Texas Instruments (1997) LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. Texas Instruments Inc., p. 34.

- [15] Texas Instruments (2013) LP38851 800 mA Fast-response High-accuracy Adjustable LDO Linear Regulator. Texas Instruments Inc., p. 31.
- [16] Winde (2017) Power Supplies for LED Driving. Second Edi. Newnes.
- [17] Xing, Y. et al. (2014) State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 113, pp. 106–115.
- [18] Zhang, X. et al. (2017) A novel method for identification of lithium-ion battery equivalent circuit model parameters considering electrochemical properties. *Journal of Power Sources*, 345, pp. 21–29.
- [19] Zimmerman (2004) Apparatus and method for testing remaining capacity of a battery. US Patent 6823274B2.
- [20] ZTS (2013) ZTS Multi-battery tester: <https://www.ztsinc.com/mbt1.html>.