

DESARROLLO DE UNA ESTACIÓN DE PRUEBA PARA CELDAS DE LITIO 18650 UTILIZANDO ARDUINO Y LABVIEW

*18650 LITHIUM BATTERY TESTING STATION USING
ARDUINO AND LABVIEW*

Juan Alberto Govea Muñoz

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
al183046@alumnos.uacj.mx

Israel U. Ponce

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
israel.ulises@uacj.mx

Delfino Cornejo Monroy

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
delfino.cornejo@uacj.mx

Osslan Osiris Vergara Villegas

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
overgara@uacj.mx

Recepción: 2/noviembre/2021

Aceptación: 20/diciembre/2021

Resumen

Este trabajo se centra en el estudio de la degradación de la capacidad de las celdas de litio 18650, principalmente en la prueba para determinar la capacidad restante en celdas usadas, obteniendo como parámetro principal su estado de salud. Se presenta la metodología realizada para desarrollar una estación de prueba de baterías que permite recabar datos en tiempo real, los cuales son analizados posteriormente para determinar su posible reutilización. La estación permite probar tres baterías simultáneamente. Las variables que definen la capacidad de cada batería se monitorean en una interfaz desarrollada en LabVIEW que permite almacenar los valores de las variables en tiempo real. Para realizar la adquisición de datos se utilizó una placa de desarrollo de Arduino. Los resultados muestran que es posible identificar correctamente el estado de salud de las baterías con la estación de prueba desarrollada.

Palabras Clave: Batería, instrumentación, interfaz, litio.

Abstract

This work focuses on the study of the capacity degradation of 18650 lithium batteries, determining the remaining capacity in used cells and obtaining their state of health as the main parameter. The methodology used to develop a battery test station is presented. This battery test station collect data in real time, which is analyzed to determine its possible reuse. The station allows to test three batteries simultaneously. Each battery is connected to a discharge system to analyze its performance. The variables that define the capacity of each battery are monitored in an interface developed in LabView. An Arduino platform was used to perform the data acquisition. The results show that it is possible to obtain the state of health of the batteries with the developed test station.

Keywords: Battery, instrumentation, interface, lithium.

1. Introducción

La industria de las baterías en los últimos años se ha diversificado. Mientras en el pasado las baterías solo las encontrábamos en artefactos electrónicos como laptops, celulares, juguetes, y otros. Hoy en día podemos encontrar herramientas como sierras eléctricas, taladros, roto martillo y otros, los cuales demandan altas cantidades de energía eléctrica para su funcionamiento; incluso las compañías automotrices pueden comprometerse con sus clientes a entregar un automóvil eléctrico con mayor autonomía. Se estima que la presencia de vehículos híbridos y eléctricos en el mercado será del 25% para el 2022 [Liu, 2019], resultando en un incremento del triple de la producción del litio. Con todos los productos eléctricos utilizando baterías, en los próximos años tendremos altas acumulaciones de éstas desechadas por los usuarios, las cuales se requiere se les dé una correcta disposición. La disposición inadecuada de las baterías de Litio desencadena amenazas al medio ambiente y a la salud humana, ya que estas contienen alto porcentaje de metales pesados y materiales tóxicos.

El que una batería de litio se deseche por un usuario no necesariamente significa que todas sus celdas internas ya no sean funcionales. De ahí, la importancia de las empresas que se dediquen a la clasificación de celdas de litio para darles una segunda vida, o en su caso la disposición para su reciclaje, lo cual es un desafío tecnológico interesante en el próximo futuro. Al desensamblar los paquetes de baterías de litio y someter las celdas internas a una prueba para determinar su capacidad de almacenamiento de energía, se encuentra que algunas de estas celdas internas aún están en condiciones óptimas de seguir trabajando en una aplicación menos demandante que su actual. Actualmente existen métodos para determinar la capacidad de almacenamiento de energía de una celda de litio. El método más relevante para este trabajo lo podemos encontrar dentro del estándar IEC 62660-1, donde se definen los parámetros que permiten clasificar celdas con potencial de una segunda vida [Salinas, 2019].

De acuerdo con [Ahmadi, 2017], una batería dura aproximadamente 8 años en un vehículo eléctrico hasta alcanzar una capacidad del 80%, y después se puede reutilizar para darle una vida útil de 10 años más. Por otro lado, hay compañías que se dedican al reciclaje de los materiales contenidos en las celdas de litio para reutilizar estos materiales en la construcción de nuevos productos, incluyendo nuevas celdas [Xu, 2008].

En el mercado podemos encontrar equipos de prueba que son diseñados especialmente para los fabricantes de las celdas. Estos equipos de prueba tienen diferentes funciones que permiten al usuario obtener bastantes datos, sin embargo, son costosos y no tan accesibles para presupuestos limitados, un ejemplo de estos equipos es el modelo CT-4008 de la empresa NetWare, el cual cuenta con ocho canales para probar ocho celdas al mismo tiempo, esto permite al usuario conocer más a detalle el estado actual de las celdas al probar su capacidad.

Las baterías de Litio han sido esenciales en el desarrollo tecnológico de diversos dispositivos tecnológicos de los últimos años [Manthiram, 2019], siendo una de las principales aplicaciones la carga de los vehículos eléctricos [Chen, 2019] y [Zhang, 2018]. En todas las aplicaciones, el tiempo de carga y el estado adecuado de las baterías resulta muy importante, de ahí que es necesaria su caracterización

[Tomaszewska, 2019]. Continuamente se tienen avances en los materiales para mejorar la capacidad y desempeño de las celdas, en [Manthiram, 2020] se analizan algunos elementos de química de estado sólido para la mejora de las baterías de Litio. Un punto importante para mejorar el desempeño de las baterías es el estudio de la degradación de la batería en su ciclo de vida, esto permite proponer elementos que alarguen el tiempo de vida de las baterías [Han, 2019]. Las perspectivas sobre las baterías de Litio indican que éstas seguirán siendo utilizadas ampliamente en los próximos años, y el desarrollo tecnológico permitirá su optimización [Zubi, 2018]. El análisis del estado de las baterías de Litio ayuda para evitar accidentes por el sobrecalentamiento de éstas [Wang, 2019], las cuales, sin un cuidado adecuado, pueden provocar graves accidentes [Liu, 2018]. Algunos estudios relativamente complejos se han desarrollado para estudiar la capacidad de las baterías y su ciclo de vida, donde se utilizan algunos modelos de inteligencia artificial para optimizar su uso [Liu, 2021].

En este trabajo se presenta la metodología para el desarrollo de una estación de prueba de baterías de litio haciendo uso de una interfaz en LabVIEW utilizando una placa de desarrollo Arduino UNO. La interfaz permite obtener el comportamiento de las variables que determinan el estado de salud de una batería en tiempo real. Los datos obtenidos se utilizan para clasificar las baterías, ya sea para un segundo uso o su correcto reciclaje.

2. Métodos

A continuación, se describe la metodología utilizada para desarrollar la estación de pruebas de baterías de litio 18650, la cual se utilizará para verificar la condición en la que se encuentran 43 celdas de desecho, a fin de clasificarlas para su posible reutilización o bien, su adecuada deposición para el reciclaje.

Generalidades

Este trabajo se centra en las celdas de litio 18650, por su amplio uso en distintos aparatos electrónicos. El formato 18650 es una celda electroquímica de dimensiones de 18 mm de diámetro y 65 mm de alto que se utiliza en diferentes

dispositivos eléctricos pequeños como baterías de laptop hasta grandes bancos de baterías en autos eléctricos. La hoja de datos de las baterías brinda información relevante como capacidad nominal mínima, voltaje nominal, método de carga, peso, temperatura a la que debe de operar y densidad energética, además dos datos de interés que nos proporcionan las hojas de datos son la curva de ciclo de vida de la celda y la curva del ciclo de descarga, las cuales nos ayudan a determinar el estado de vida útil de las celdas. Los parámetros críticos que influyen en el envejecimiento de las celdas de litio son la degradación de la capacidad [Wang, 2019], el estado de salud, tiempo final de vida, impedancia interna y estado de la carga. De estos, el estado de salud es el parámetro que nos da información más relevante sobre el posible reúso o reciclaje de las celdas. El estado de salud (SoH, State of Health) de una celda se determina a partir de la ecuación 1.

$$SOH = \frac{Q_{current}}{QN_{nominal}} \times 100 \quad (1)$$

Donde $Q_{current}$ es la capacidad actual y $QN_{nominal}$ es la capacidad inicial de la celda cuando fue fabricada [Li, 2019].

Los equipos de prueba para baterías y celdas determinan la capacidad de las celdas definiendo las condiciones en la que se encuentran. Estos equipos de prueba están regidos por estándares que especifican los procedimientos de prueba para obtener las características esenciales de celdas de litio como lo son la capacidad, densidad de energía, vida de almacenamiento y ciclo de vida. Para obtener estos parámetros, los sistemas de medición monitorean el voltaje y corriente de las celdas en condición de descarga controlada. Para llevar a cabo estas mediciones, se utilizando dos tipos de circuitos, de *high-side* y *low-side*, los cuales se muestran en la figura 1.

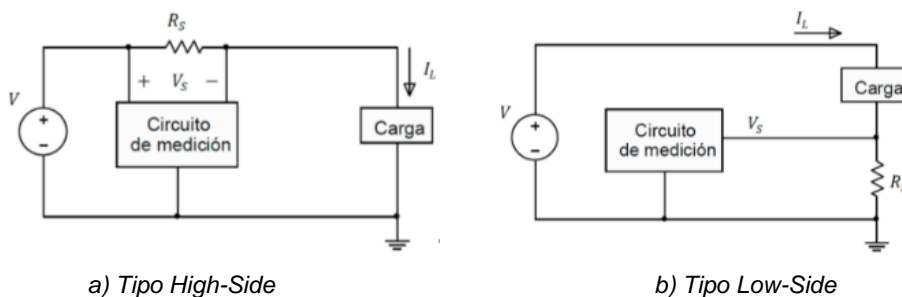


Figura 1 Circuitos monitores de corriente.

Cada uno de estos circuitos tienen sus ventajas y desventajas, pero su principio de operación es muy similar. Para su funcionamiento utilizan una resistencia shunt (R_s), de la cual se deriva una corriente eléctrica (I_L), ecuación 2.

$$I_L = \frac{V}{R_s} \quad (2)$$

Donde V representa el voltaje de la fuente de alimentación.

Para la obtención de la capacidad de las celdas se toma en cuenta lo que se establece en el estándar internacional IEC 62660, que indica que antes de la prueba de mediciones eléctricas, la celda debe de ser cargada de acuerdo con el método declarado por el fabricante a una temperatura entre 20 a 22 grados centígrados, y para medir la capacidad de la celda, se deben seguir los siguientes pasos:

- Paso 1. La celda debe de estar cargada y después de la carga se debe dejar estabilizar la temperatura por 12 horas o al punto en donde el cambio de la temperatura sea menor a 1 K.
- Paso 2. La celda debe de ser descargada hasta el voltaje final de descarga proporcionado por el fabricante.
- Paso 3. Medir la duración de la descarga hasta el voltaje final de descarga y calcular la capacidad de la celda expresado en Ah.

Metodología

La metodología por seguir en este trabajo se observa en la figura 2. Primero, se desarrolla la estación de pruebas de baterías de litio lo cual consiste en la integración del equipo de prueba, aquí, se construye el sistema físico que permitirá monitorear la descarga de las celdas. Posteriormente, se desarrolla un programa en LabVIEW, el cual consiste en una interfaz gráfica donde se observa la captura de datos en tiempo real y además se almacena la información en una base de datos. Los valores capturados corresponden a las variables que definen el estado de salud de las celdas. Posteriormente, se captura información de un total de 43 celdas, para luego analizar los resultados obtenidos.

En la figura 3, se muestra un diagrama del flujo de la información obtenida a partir de las celdas. Las celdas están conectadas en un circuito *High-side* de donde se

obtiene la corriente de descarga, además de monitorear la temperatura. Esta información es capturada en la PC a través de una plataforma de Arduino utilizada como tarjeta de Adquisición de datos. Los datos obtenidos en PC son procesados, almacenados y mostrados en una interfaz gráfica por medio de un programa desarrollado en LabVIEW.

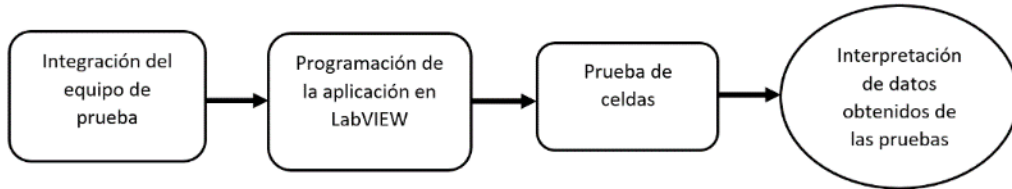


Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología seguida en este proyecto.

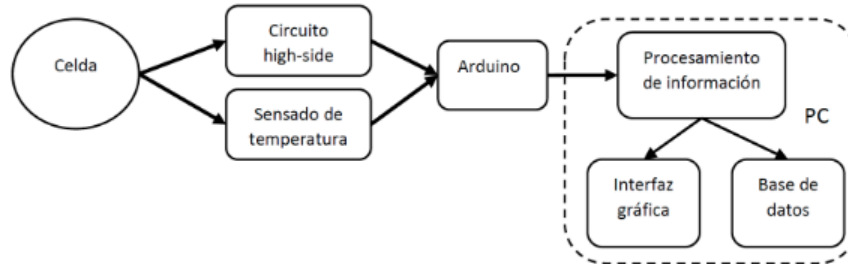


Figura 3 Flujo de información obtenida de las celdas.

Para determinar la capacidad de las celdas es necesario conocer corriente de descarga en cada instante de tiempo, para lo cual se utilizó un circuito de descarga del tipo High-Side como el de la figura 1 a), donde se utilizó una resistencia de carga de 3.3Ω y una resistencia Shunt de 1Ω . El circuito de prueba realizado se muestra en la figura 4.

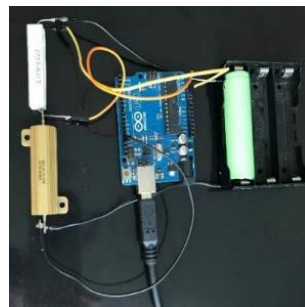


Figura 4 Circuito de descarga para cada celda.

Para la medición de temperatura en la celda se utilizó el sensor LM35, el cual es suficiente en resolución y en rango de temperaturas a medir. El sensor de temperatura se adhirió a cada celda cuando se realizaron las pruebas. Este circuito se replicó 3 veces para llevar a cabo la prueba de tres celdas de manera simultánea. La corriente de descarga de la batería se observó mediante la medición de voltaje en la resistencia Shunt. Esta medición y la de temperatura se hizo a través del puerto analógico digital (A/D) de la placa de desarrollo Arduino. Para realizar la medición en tres celdas de manera simultánea se utilizaron la totalidad de entradas A/D del Arduino. La información digital del voltaje y temperatura de la batería capturada por el Arduino se transmitió hacia la PC utilizando una comunicación serial virtual por medio de una conexión USB.

Procesamiento de información e interfaz gráfica

La información transmitida desde Arduino fue procesada en una PC a través de un programa con una interfaz gráfica desarrollado en LabVIEW. Para este trabajo se utilizó una computadora con sistema operativo Windows 10, con procesador Intel i5 y 8 GB de memoria RAM. Se utilizó una versión de LabVIEW 2020 Community Edition, el NI Package Manager y NI VISA 20.0.0, así como la herramienta LINX Toolkit 2020. LINX de Digilent está diseñado para facilitar el desarrollo de aplicaciones embebidas utilizando LabVIEW, esta interfaz provee a los programadores VIs (instrumentos virtuales) para distintos sensores, así como APIs (Interfaces de programación de aplicaciones) de hardware.

El diagrama de flujo de la figura 5 muestra la lógica de programación que sigue la aplicación creada en LabVIEW. Lo primero que se realiza es definir el puerto de comunicación serial a utilizar para establecer el enlace con Arduino. Enseguida se deben establecer las configuraciones iniciales, las cuales dependen del modelo de celda seleccionado, por lo que la capacidad nominal, el voltaje de corte y el cálculo de salud serán diferentes. Después de realizada la configuración, se inicia la lectura de los datos desde Arduino, la cual se lleva a cabo cada 5 segundos. Estas lecturas son guardadas en arreglos que son almacenados en una base de datos. Con la información obtenida se llevan a cabo los cálculos necesarios para la obtención del

voltaje y capacidad. Esta información es entonces utilizada para crear los gráficos que se mostraran la interfaz gráfica desarrollada con LabVIEW. Después de finalizada las pruebas se cierra la comunicación con Arduino y se guarda la información capturada.

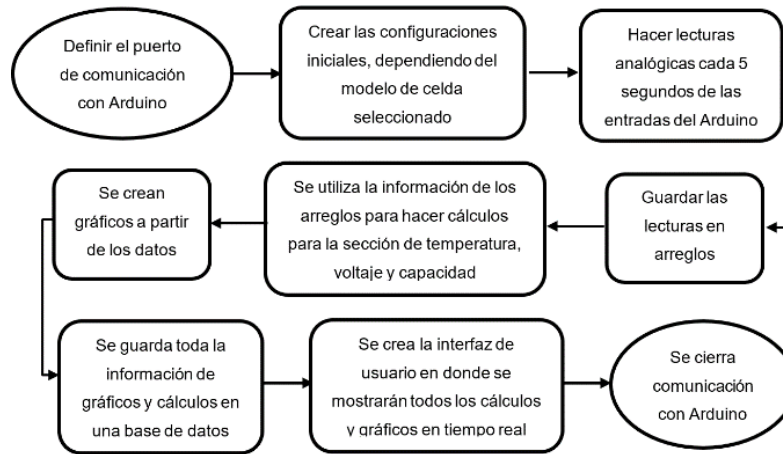


Figura 5 Diagrama de flujo de la lógica de programación.

El método para calcular la capacidad de las celdas de litio es una serie de operaciones matemáticas que se realizan automáticamente mientras la celda se descarga, utilizando la programación en LabVIEW, se utiliza la operación básica para obtener la capacidad de una batería, ecuación 3.

$$Q = I \cdot t \quad (3)$$

Donde Q es la capacidad, I es la corriente total y t es el tiempo. La capacidad se obtiene como la sumatoria de capacidad en distintos momentos a lo largo del tiempo, esto puede verse en la ecuación 4.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot t_i \quad (4)$$

Donde q_i es la capacidad, I_i es la corriente suministra en el instante de tiempo t transcurrido desde la última medición.

La programación en LabView se hace por medio de bloques interconectados. El programa desarrollado es bastante amplio, por lo que a continuación se destacan solo algunas de las etapas de la programación realizada en LabView. La información

para procesar se toma de los datos analógicos obtenidos por la placa de Arduino, la cual está conectada a la computadora por medio de una comunicación serial virtual a través del puerto USB. En la figura 6 se muestran los bloques de la configuración inicial del programa de acuerdo con el modelo de la batería y configuración de la comunicación serial de la placa Arduino con LabView para lograr la lectura de las entradas analógicas correspondientes a la temperatura y voltajes del circuito.

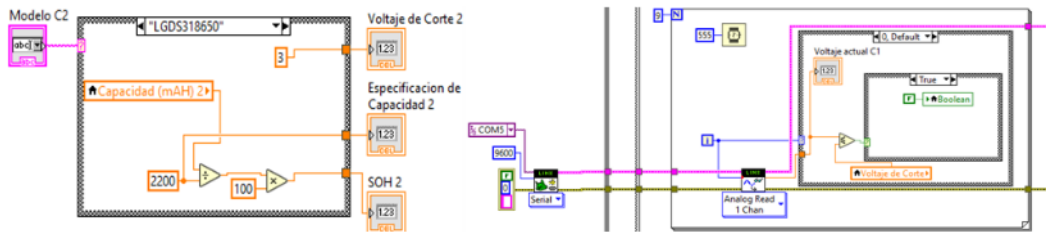


Figura 6 Configuración de acuerdo con el tipo de celda y captura de datos desde Arduino.

Los valores capturados desde Arduino en LabView son ordenados y posteriormente procesados para obtener datos como: temperatura promedio, mínima y máxima, así como información de la capacidad de la celda. Parte de la programación que realiza esta tarea se muestra en la figura 7.

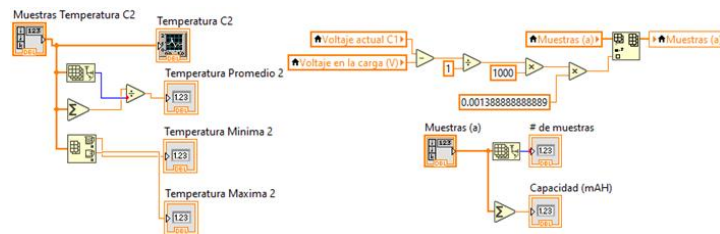


Figura 7 Procesamiento de datos para obtener los valores de temperatura y capacidad.

Finalmente, la información capturada y procesada es almacenada en una base de datos, tal como se muestra en la figura 8. En la figura 9 se muestra la interfaz gráfica del programa que utilizará el usuario para observar diferentes parámetros durante la prueba para una sola celda. Al momento de someter la celda de litio a la descarga, se estará midiendo y calculando la capacidad utilizando muestras de la corriente

que está entregando la celda, lo cual se muestra en la primera columna de la interfaz; también se estará mostrando la temperatura actual, temperatura promedio, máxima y mínima en el segundo recuadro; se mostrará también, el voltaje actual y voltaje de corte, el cual es especificado por el proveedor, y esto se muestra en el tercer recuadro; y finalmente, en el cuarto recuadro se muestran los resultados de la capacidad.

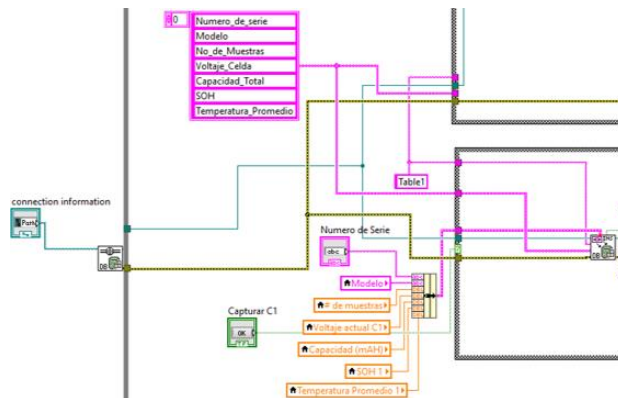


Figura 8 Almacenamiento de la información en una base de datos.

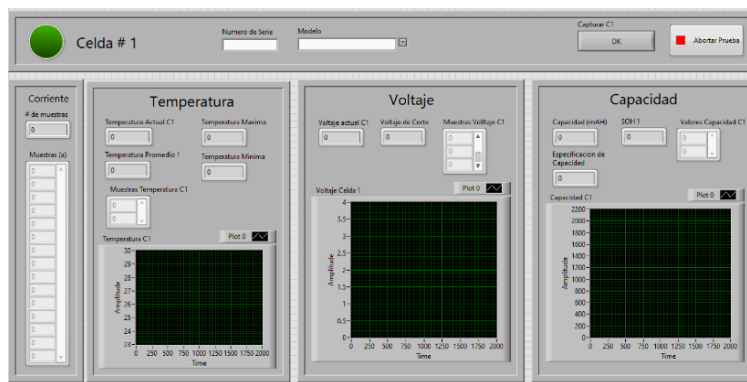


Figura 9 Interfaz gráfica del programa desarrollado en LabVIEW.

En el caso de las mediciones de la temperatura, voltajes y la capacidad, estos se grafican a través del tiempo con la intención de visualizar el comportamiento durante la descarga. Toda esta información que se estará adquiriendo será almacenada en una base de datos con la intención de hacer un análisis de los datos y obtener resultados. Para almacenar la información se inicializa una conexión con Access de Microsoft para la base de datos, después se definen los campos de la base de datos

que son el número de serie, modelo, número de muestras, voltaje en la celda, capacidad total, el estado de salud y la temperatura promedio. También se crean reportes de Excel con todas las muestras de voltaje, temperatura y capacidad.

En la figura 10 se muestra la interfaz de usuario que se visualiza en la pantalla de la computadora. En la pantalla se visualizan los gráficos de temperatura, voltaje y capacidad de cada celda en tiempo real. Cuando se corre el programa y se realiza una prueba, se capturan muestras cada 5 segundos. Conforme el tiempo pasa y la celda se descarga, el voltaje de la celda cae, la temperatura incrementa y la capacidad aumenta al ir haciendo la sumatoria del resultado de capacidades en diferentes momentos a lo largo del tiempo. Al llegar al voltaje de corte recomendado por el fabricante (varía según el fabricante) la prueba se termina y graba los resultados en una base de datos. Toda esta información se guarda en una base de datos y se utiliza para conocer parámetros clave de una celda usada, en específico su temperatura durante operación, su capacidad total y su estado de salud. También se utilizará la información de todos los gráficos para poder conocer más acerca del estado actual de la celda usada. En este trabajo se probaron en total 43 celdas.

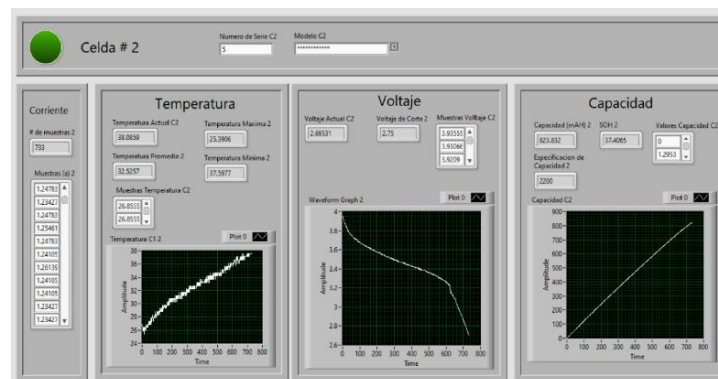


Figura 10 Prueba en proceso.

3. Resultados

En este trabajo se probaron 43 celdas que han sido desechadas, las cuales fueron sometidas a la prueba de capacidad. En la tabla 1 se muestran los registros de 5 de las 43 celdas, esta tabla se obtiene de la base de datos creada previamente en Access.

Tabla 1 Resultados obtenidos de 5 celdas.

Número de identificación	Modelo	Número de Muestras	Capacidad Total	Estado de Salud (SOH)	Temperatura promedio
2	NCR18650B	2754	3196	95	26
15	ICR18650-22E	2024	2127	96	26
17	US18650GR	1509	1735	79	32
30	CJ18650	1786	2027	92	25
36	LGDS318650	1218	1402	64	26

Para cada una de las celdas se almacenaron todas las muestras de capacidad, temperatura y voltaje con el objetivo de graficar y estudiar los datos. La figura 11 muestra el gráfico de la capacidad de la celda 1.

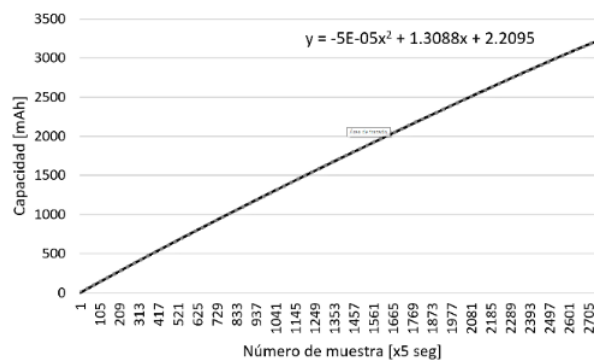


Figura 11 Comportamiento de la capacidad de la Celda 1.

En el eje horizontal se muestran el número de muestras, las cuales son tomadas por la estación de prueba cada 5 segundos, y en el eje vertical se observa el valor de la capacidad en unidades de miliamperios hora. Como se puede observar el comportamiento de la capacidad es un incremento a medida que el tiempo transcurre. Para este gráfico se trazó una línea de tendencia parabólica a fin de observar su comportamiento, la curva obtenida tiene la forma de la ecuación 5.

$$y = -0.00005x^2 + 1.3088x + 2.2095 \quad (5)$$

Este resultado nos indica que el comportamiento de capacidad es casi lineal con respecto al tiempo, lo cual queda de manifiesto al comparar el coeficiente del término cuadrático con el coeficiente del término lineal.

La figura 12 muestra el gráfico de la temperatura para la celda 1. El eje vertical es el valor de la temperatura en grados centígrados. Aquí se observa el

comportamiento de la temperatura en grados centígrados de la celda durante todo el ciclo, el cual a medida que el tiempo transcurre la temperatura va incrementando, la temperatura mínima es alrededor de 22 grados centígrados y la máxima alrededor de 30 grados centígrados. Se puede observar que existe una región lineal donde la temperatura no supera los 25 °C, y después de la muestra 1400 la temperatura se incrementa de forma exponencial, esto corresponde cuando se alcanza una capacidad aproximada de 1500 mAh de carga en la batería.

La figura 13 muestra el gráfico del comportamiento del voltaje al descargar la celda. El eje vertical representa el valor del voltaje en la celda. Se observa que el voltaje durante la descarga de la celda va reduciendo a medida que va pasando el tiempo, el comportamiento de disminución de voltaje es muy similar de los 4 V a los 3.3 V. Para un voltaje menor a los 3 V, el voltaje se reduce mucho más rápido, siguiendo un patrón similar al de la hoja de especificación de datos del fabricante.

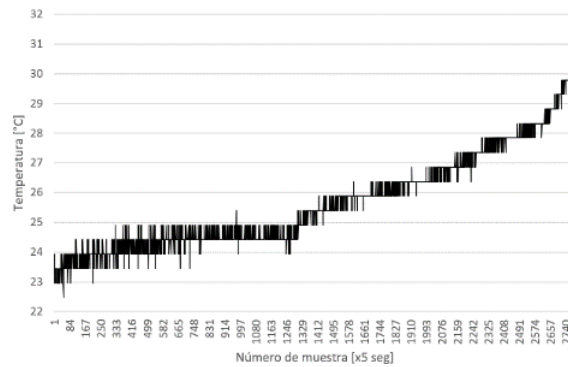


Figura 12 Comportamiento de la temperatura de la celda 1.

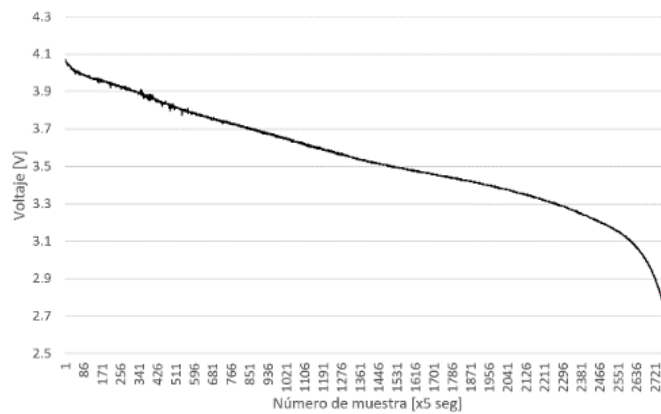


Figura 13 Comportamiento del voltaje de descarga de la celda 1.

A fin de comparar el comportamiento de la capacidad de todas las celdas, en la figura 14 se muestra las curvas del comportamiento de capacidad de las celdas, se observa que las curvas de las celdas se empalman, lo cual impide ver cada una de las curvas, pero esto nos indica que estas tienen una pendiente muy similar y la mayor diferencia entre ellas es su valor de capacidad. Se trazaron también algunas líneas de tendencia parabólica que permiten establecer que el comportamiento de la capacidad de las celdas con más desgaste presenta una mayor curvatura a diferencia de las celdas en buen estado, las cuales tienen un comportamiento prácticamente lineal a lo largo del tiempo.

La figura 15 muestra las curvas del comportamiento del voltaje de todas las celdas. Se observa que la caída del voltaje tiende a disminuir más rápidamente cuando las celdas tienen menor valor de capacidad.

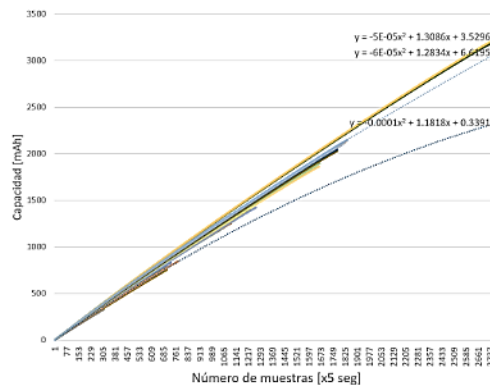


Figura 14 Comportamiento de la capacidad de las 43 celdas.

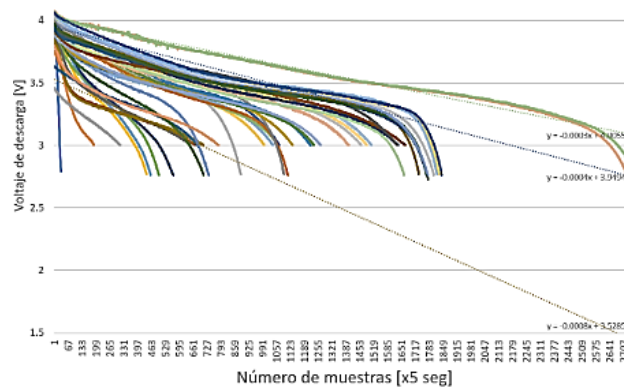


Figura 15 Comportamiento del voltaje de descarga de las 43 celdas.

La figura 16 muestra las curvas del comportamiento de la temperatura de todas las celdas, se puede observar como las celdas con más alta temperatura son celdas con menor tiempo de prueba, esto significa que son celdas con menor valor de capacidad lo cual nos confirma que a mayor temperatura, mayor es la impedancia interna de la celda y menor la capacidad de la celda.

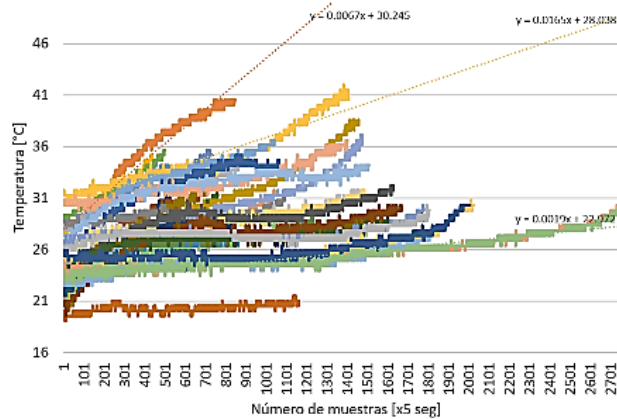


Figura 16 Comportamiento de la temperatura de las 43 celdas.

Después de analizar los resultados, de acuerdo con los distintos datos y comportamientos obtenidos se proponen clasificar las celdas en tres grupos, de tal manera que, a la hora de hacer paquetes de baterías en el futuro, estos cuenten con celdas del mismo grupo y no comprometan su buen desempeño a causa de un mal balanceo de celdas. El primer grupo, grupo A, agrupamos las celdas que se encuentran operando dentro del 70% de su estado de salud, las cuales podrían ser reutilizadas para cualquier aplicación sin ningún problema ya que el comportamiento de los gráficos nos indica los mayores tiempos de operación y temperaturas regulares lo cual se traduce en confiabilidad en el desempeño de las celdas. El segundo grupo, grupo B, se agrupan las celdas que se encuentran dentro del rango de 50-70% de su estado de salud, estas baterías pudieran reutilizarse en aplicaciones en donde no se compromete la seguridad o que requieren poco amperaje. Finalmente, las baterías que se encuentran en el rango de 0 a 50% de su capacidad, las cuales conformarían el grupo C, no se recomienda reutilizarse, ya que, al observar los gráficos de voltaje y temperatura, podemos notar un

comportamiento poco confiable, el cual se traduce a altas temperaturas durante su desempeño y poco tiempo de operación antes de llegar al voltaje de corte.

La figura 17 nos muestra el valor de estado de salud (SOH) de todas las celdas, el eje horizontal representa el número de celdas probadas y el eje vertical representa el valor del estado de salud en unidades de porcentaje. Están ordenadas de menor a mayor de acuerdo con su valor de SOH, podemos observar que la mayoría de las celdas son celdas con la posibilidad de reutilizarse ya que se encuentran con más del 50% de estado de salud.

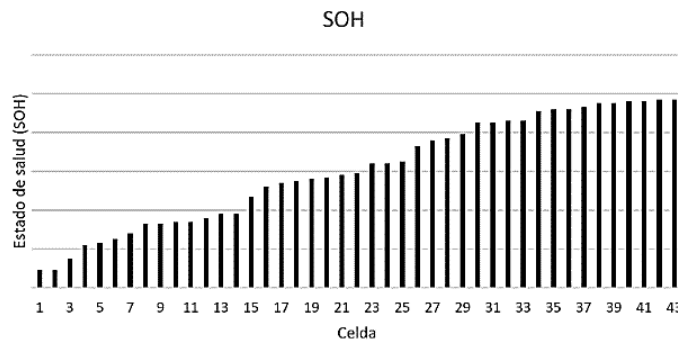


Figura 17 Valor del estado de salud de las 43 celdas.

4. Discusión

La estación desarrollada permitió probar 3 baterías a la vez, obteniendo información útil que nos permite establecer si las baterías pueden reutilizarse o deben ser enviadas para un correcto reciclaje. Como era de esperarse, el comportamiento de la capacidad mostró una tendencia lineal para las baterías en un estado de salud aceptable, mientras que las baterías con más desgaste mostraron una mayor curvatura en su comportamiento. Por otro lado, la temperatura de las baterías sufre un incremento considerable cuando disminuye su capacidad debajo de los 1500 mAh. Y también se comprobó el comportamiento del voltaje durante la descarga de la batería, donde se observó que mantiene una caída a una tasa constante hasta llegar a los 1500 mAh, después de este punto la caída de voltaje se hace más pronunciada.

Al realizar el estudio de las 43 celdas usadas, y tomando en cuenta que solo se reutilizaran las celdas con un estado de salud del 50% en adelante, se tiene que, si

hacemos la sumatoria de los miliamperios/hora de las 10 celdas que se encuentran dentro del rango de 50-70% más las 18 celdas que se encuentran operando dentro del 70% obtenemos un total de 50103 mAh o 50.1 Ah. Esto resulta una cantidad de energía muy importante, considerando que son celdas de desecho.

Por otro lado, se tiene que el costo de una celda nueva NCR18650B ronda alrededor de los 6 dólares americanos. Cada celda nueva nos entrega 3350 mAh. Si dividimos los 50103 mAh recuperados en celdas usadas entre 3350 mAh de una celda nueva obtenemos un total de 15 celdas nuevas. Si compráramos el total de 15 celdas nuevas a 6 dólares es un total de 90 dólares o 1884 pesos mexicanos. Este es el ahorro que obtiene al reutilizar las 28 celdas que se encuentran en el rango entre 50-100%.

5. Conclusiones

Se desarrolló una estación de prueba a bajo costo con características de equipos de laboratorio que permite guardar todos los datos de la prueba en una base de datos. Se desensamblaron paquetes de baterías de laptop usadas para obtener sus celdas internas y se llevaron a cabo las pruebas de la capacidad con 43 celdas. Posteriormente, la información de la base de datos se ordenó para presentarla y obtener resultados. También se clasificaron en 3 grupos todas las celdas obteniendo celdas totalmente confiables, celdas para aplicaciones con poca demanda de corriente y celdas que ya no son funcionales.

Utilizando la estación de prueba se pudo conocer la capacidad de cada una de las celdas, el estado de salud, y la temperatura durante el ciclo de prueba. Estos datos nos ayudaron a clasificar las celdas de litio para una segunda aplicación, solo 15 celdas resultaron no aptas y por lo cual se les tiene que dar correcta disposición para el reciclaje de sus materiales internos. También se calculó el ahorro al utilizar celdas recuperadas para medir el impacto económico que se pudiera tener.

El conocimiento generado con este trabajo se puede utilizar para alguna institución o empresa local que desee enfocarse a la reutilización y reciclaje de baterías.

A partir del prototipo desarrollado se pueden realizar análisis más exhaustivos de las baterías para tener un perfil de comportamiento más completo.

El prototipo desarrollado es posible mejorarlo, se recomienda ampliar la capacidad de prueba de baterías utilizando la totalidad de entradas analógicas de la plataforma Arduino. También sería posible utilizar multiplexores analógicos que permitieran ampliar la capacidad de captura de datos hasta más de 100 celdas por prueba. Esto sería muy útil, ya que en una sola corrida se podría obtener una información bastante confiable para decidir acerca de cada celda.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahmadi, L., Young, S. B., Fowler, M., Fraser, R. A. y Achachlouei, M. A., A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems, *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 1, pp. 111–124, 2017.
- [2] Chen, W., Liang, J., Yang, Z., y Li, G., A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond. *Energy Procedia*, 158, pp. 4363-4368, 2019.
- [3] Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., y Ouyang, M., A review on the key issues of the Lithium-Ion battery degradation among the whole life cycle, *ETransportation*, 2019.
- [4] Li, X., Degradation mechanisms of high capacity 18650 cells containing Si-graphite anode and nickel-rich NMC cathode, *Electrochim.* vol. 297, pp. 1109–1120, 2019.
- [5] Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y. y Sun, Z., Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review, *J. Clean. Prod.*, 2019.
- [6] Liu, K., Liu, Y., Lin, D., Pei, A., y Cui, Y., Materials for lithium-ion battery safety. *Science Advances*, 4(6), 2018.
- [7] Liu, K., Shang, Y., Ouyang, Q., y Widanage, W. D., A Data-Driven Approach With Uncertainty Quantification for Predicting Future Capacities and Remaining Useful Life of Lithium-ion Battery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(4), pp. 3170-3180, 2021.
- [8] Manthiram, A., An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. *ACS Central Science*, 3(10), pp. 1063-1069, 2017.

- [9] Manthiram, A., A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature Communications*, 11(1), 2020.
- [10] Salinas, F., Krüger, L., Neupert, S. y Kowal, J., A second life for li-ion cells rescued from notebook batteries, *J. Energy Storage*, vol. 24, p. 100747, 2019.
- [11] Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., Li, Y., Zheng, S., Vetterlein, S., Gao, M., Du, J., Parkes, M., Ouyang, M., Marinescu, M., Offer, G., y Wu, B., Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 2019.
- [12] Wang, H., Frisco, S., Gottlieb, E., Yuan, R., y Whitacre, J. F., Capacity degradation in commercial Li-ion cells: The effects of charge protocol and temperature, *J. Power Sources*, vol. 426, octubre del 2018, pp. 67–73, 2019.
- [13] Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S. I., y Sun, J., A review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, pp. 95-131, 2019.
- [14] Xu, J., Thomas, H. R., Francis, R. W., Lum, K. R., Wang, J., y Liang, B., A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries, *J. Power Sources*, vol. 177, no. 2, pp. 512–527, 2008.
- [15] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., Wang, H., y Wang, W., State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. *Energies*, 11(7), 2018.
- [16] Zubi, G., Dufo López, R., Carvalho, M., y Pasaoglu, G., The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, pp. 292-308, 2018.