

Segunda Vida de Celdas de LiFePO_4 Provenientes de un Vehículo Eléctrico

Mariana Bustillo
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
marianabustillo97@gmail.com

Federico Calvello
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
federicocalvello12@gmail.com

Juan José Perez
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
perezjuanjo15@gmail.com

Ing. Federico Arismendi
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
farismendi@fing.edu.uy

Ing. Juan Pedro Carriquiry
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
jpcarriquiry@fing.edu.uy

Dr. Ing. Mario Vignolo
Departamento de Potencia
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Montevideo, Uruguay
jesus@fing.edu.uy

Resumen—En las últimas décadas, han comenzado a tener relevancia los vehículos eléctricos como medio de transporte, principalmente debido a factores económicos, tecnológicos y medioambientales. Sin embargo, uno de los principales desafíos que tienen los vehículos eléctricos para su consolidación en el mercado, es reducir su elevado costo inicial, que es notoriamente mayor al de un vehículo tradicional.

Teniendo en cuenta que gran parte de este costo se debe a la batería y que el aumento de la cantidad de vehículos eléctricos implicará realizar un tratamiento adecuado de estas, resulta de gran interés el estudio de su reutilización. De ser posible la reutilización de las baterías, no solo se podría reducir el costo inicial de los vehículos eléctricos, sino también el impacto ambiental de los mismos y sus desechos.

Además, las baterías de los vehículos eléctricos son reemplazadas cuando alcanzan el 80 % de su capacidad original, por lo que las mismas se pueden emplear de forma exitosa en aplicaciones con una baja tasa de consumo de corriente, como por ejemplo en el almacenamiento estacionario de energía.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el marco de un proyecto de tesis de grado, en el que se ensayaron celdas de LiFePO_4 provenientes de una batería dañada de un vehículo eléctrico, con el objetivo de identificar las celdas potencialmente reutilizables y a partir de ellas construir una nueva batería.

Index Terms—baterías, litio-ion, reutilización, segundo uso, electromovilidad, LiFePO_4 , ANIL.

I. INTRODUCCIÓN

En la historia del automóvil han sido varias las tecnologías que han competido por el dominio de la industria automotriz. Los primeros vehículos eléctricos funcionales surgieron en el siglo XIX, pero por razones prácticas y económicas, los vehículos con motores de combustión interna han dominado el mercado durante prácticamente todo el siglo pasado. Sin embargo, actualmente el uso de vehículos de combustión frente a los eléctricos está siendo reconsiderado [1].

El factor económico es uno de los motivos con más peso en dicha transición, ya que el costo operativo de un vehículo eléctrico es menor que el de uno con motor de combustión.

Otro factor que motiva la transición son los avances tecnológicos en las baterías y sistemas de carga rápida, que han permitido aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos.

El factor medioambiental también constituye un motivo crucial en la transición hacia los vehículos eléctricos, ya que actualmente gran parte de los gases de efecto invernadero emitidos hacia la atmósfera provienen del sector transporte. En el caso puntual de Uruguay, en el año 2020 el sector transporte representó el 56 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [2]. Considerando que actualmente la matriz eléctrica de Uruguay se basa casi en su totalidad en generación eólica e hidráulica [3], desde el punto de vista medioambiental, Uruguay representa un escenario ideal para impulsar la movilidad eléctrica, ya que se reducirían considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, una de las principales desventajas de los vehículos eléctricos es su elevado costo inicial, que es notoriamente mayor al de un vehículo de combustión tradicional. Gran parte de este elevado precio se debe a la batería del vehículo y se incrementa conforme aumenta la autonomía [4]. Además, una vez que los vehículos eléctricos se introduzcan de forma masiva en los mercados, es muy importante realizar un tratamiento adecuado de las baterías que han llegado al fin de su vida útil. Considerando que generalmente estas baterías son cambiadas cuando llegan al 80 % de su capacidad inicial, resulta de gran interés el estudio de la reutilización y reciclado de las mismas, tanto para disminuir el costo de los vehículos como también el impacto ambiental de los mismos.

De esta manera, el presente artículo trata sobre un proyecto de tesis de grado en el que se buscó diseñar y realizar una serie de ensayos a celdas de LiFePO_4 provenientes de una batería dañada de un vehículo eléctrico. Con dichos ensayos se buscó determinar el estado de degradación de cada celda e identificar las potencialmente reutilizables para formar una nueva batería con las mismas. El pack de baterías construido a partir de las celdas reutilizadas también es ensayado para

determinar sus características y sus posibles aplicaciones en electromovilidad o uso estacionario.

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto ANII FSE_S_2020_1_165336, “Segundo uso de baterías de vehículos eléctricos”, el cual es financiado por la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación).

II. ESTADO DEL ARTE

II-A. Baterías de litio-ion

Las baterías de litio-ion surgieron en la década del 90, primeramente como baterías secundarias destinadas a dispositivos electrónicos portátiles y luego se extendieron rápidamente a diversas aplicaciones [5]. Ventajas como su elevada energía específica (Wh/kg), elevada densidad de potencia (W/l), mínimo efecto memoria, gran cantidad de ciclos de vida y baja tasa de autodescarga, han convertido a las celdas de litio-ion como una de las tecnologías actualmente más utilizadas para baterías destinadas a electromovilidad. Sin embargo, una de las principales desventajas de estas celdas es que, debido a su química, son más inseguras que otras tecnologías, lo que requiere el uso de un circuito auxiliar de gestión y control de carga y descarga (también conocidos como BMS - Battery Management System) para mantener un funcionamiento seguro [6].

Las celdas de litio-ion están compuestas por un ánodo (electrodo negativo), un cátodo (electrodo positivo), un electrolito y un separador. Los materiales utilizados para ambos electrodos contienen litio; el cátodo está compuesto por un óxido metálico de litio, mientras que el ánodo está formado por carbono grafito con litio. Dichos materiales tienen una estructura atómica en capas que permite la inserción de los iones de litio en el espacio existente entre capas. Como electrolito se utiliza sal de litio y solventes orgánicos y el material separador es una membrana micro-porosa que evita el cortocircuito entre el cátodo y el ánodo, permitiendo que los iones de litio fluyan de un electrodo a otro durante la carga y descarga de la celda [5]–[8].

Los tipos de celdas de litio-ion más comunes son: litio-óxido de cobalto - LCO (LiCoO_2), litio-óxido de manganeso - LMN (LiMn_2O_4), litio-hierro fosfato - LFP (LiFePO_4), litio-óxido de níquel-manganeso-cobalto - NMC (LiNiMnCoO_2), litio-óxido de níquel-cobalto-aluminio - NCA (LiNiCoAlO_2) y titanato de litio - LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) [6]–[8]. Si bien las prestaciones de potencia y energía de las celdas de LFP no son las mejores dentro de las baterías de litio-ion, las mismas son aceptables para determinadas aplicaciones, tales como electromovilidad y almacenamiento de energía. Además, cuentan con un costo relativamente adecuado y poseen la química térmicamente más segura dentro de litio-ion [6], por lo que son ampliamente utilizadas en electromovilidad [8].

En la Figura 1 se representa la característica de descarga de una celda de LFP para varias tasas de corriente, observándose que la tensión se mantiene constante durante casi la totalidad de la descarga. Por otra parte, la carga de las celdas de litio se realiza con un perfil CC-CV [5], [7] que consiste en un primer paso de carga a corriente constante (CC), en el que la tensión

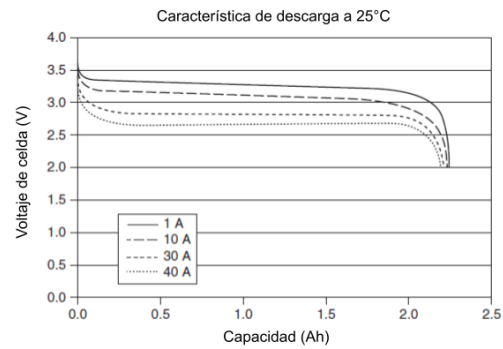


Figura 1: Característica de descarga de una celda de LFP [6].

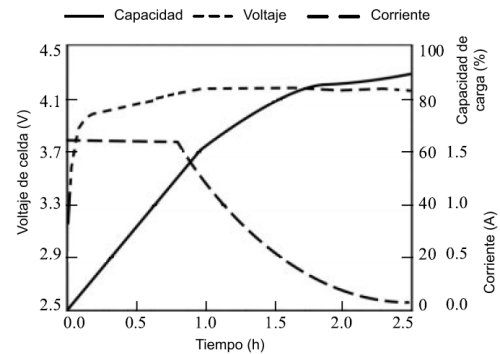


Figura 2: Perfil CC-CV de carga utilizado para una celda de litio-ion [7].

de la celda va aumentando a medida que la misma acepta carga. Cuando la celda alcanza un cierto valor de tensión preestablecido, la carga continúa manteniendo dicha tensión constante (CV) y reduciendo la corriente a medida que la carga se va completando. Este proceso culmina cuando se ha sobrepasado el tiempo determinado para la carga o cuando la corriente alcanza un valor menor que un cierto umbral. Un ejemplo de un perfil de carga CC-CV para una celda de litio-ion se ilustra en la Figura 2.

II-B. Reciclado, reutilización y segunda vida de baterías de electromovilidad

Actualmente, en muchos países aún no existen demasiadas baterías de litio-ion de electromovilidad que hayan llegado al fin de su vida útil (EoL: End of Life) en el vehículo, debido a que cuentan con una vida estimada entre 10 y 20 años y los vehículos con este tipo de baterías se han comenzado a introducir al mercado hace pocos años. Sin embargo existen empresas y universidades que están llevando a cabo desarrollos e investigaciones en métodos de reutilización de dichas baterías [8].

Debido a que las baterías de electromovilidad son recambiadas cuando su capacidad o potencia alcanza el 80 % de su valor original y también que en algunos casos las baterías pueden ser descartadas totalmente cuando solo cuentan con daños en algunas de sus celdas, es posible extraer las mejores celdas que conforman la batería y reusarlas para construir un nuevo pack

capaz de entregar por varios años energía útil a una baja tasa de descarga, por ejemplo en aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía [8].

Lo habitualmente realizado en la reutilización de celdas es ensayar la batería para determinar su capacidad y voltaje, luego se desmantela para extraer las celdas, las que también son ensayadas individualmente. De acuerdo a un criterio de selección, se determinan las celdas que pueden ser reutilizadas para formar un nuevo pack y las que se deben reciclar por no alcanzar dicho criterio. Al igual que en la fabricación de una batería multicelda, cuando se ensambla una batería a partir de celdas reutilizadas, el pack estará limitado por la celda con menor rendimiento. Por lo tanto, se suele utilizar como criterio de selección, elegir celdas que cuenten con una capacidad, un voltaje y un estado de vida (SoH: State of Health) similar [8].

Por otra parte, también existen técnicas de reciclaje que permiten obtener materiales como litio, cobalto, manganeso, níquel, aluminio, cobre, hierro y plásticos. Sin embargo, los procesos de reciclaje tienen un alto consumo energético y un elevado costo, que en muchos casos supera el de los propios materiales [8].

Fabricantes como General Motors, BMW, Renault y Nissan cuentan con proyectos de reutilización de las baterías de sus modelos de vehículos eléctricos para almacenamiento estacionario de energía [9].

III. BATERÍA ESTUDIADA

III-A. Características

La batería estudiada fue conseguida mediante donación de un importador y distribuidor de vehículos eléctricos en Uruguay. La misma estaba compuesta por 24 celdas prismáticas de litio-ion, con un cátodo de LiFePO_4 y era utilizada en un vehículo monoplaza totalmente eléctrico.

Según datos proporcionados por el proveedor, la batería fue descartada por un fallo debido a que el usuario elevó el límite de tensión de carga del BMS (Battery Management System), a la espera de una carga más rápida. Como se observa en la Figura 3, este aumento de tensión en bornes de cada celda (con un correlativo aumento de corriente) provocó un aumento de presión en el interior que derivó en el flujo del electrolito hacia el exterior de algunas de estas, a través de la válvula de alivio. En algunos casos, el electrolito derramado provocó la corrosión de la envolvente de la celda y de su borne. Cabe destacar que

En cuanto a las características y prestaciones eléctricas de las celdas, el proveedor suministró solo los datos de tensiones máximas y mínimas de operación y la capacidad de cada celda. No se pudo conocer procedencia ni fabricante de las mismas, por lo que dada la falta de información al respecto, se tomó como referencia la información de las celdas modelo IFP23140160-50Ah del fabricante HEFEI HOYE ECOLOGIENG TECHNOLOGY CO., LTD, debido a que cuentan con la misma tecnología y similares características. Los parámetros más relevantes de las celdas se detallan en el Cuadro I y fueron utilizados para diseñar los ensayos.



Figura 3: Vista general de la batería estudiada, tal como fue recibida.

Cuadro I: Valores nominales de celda declarados por el fabricante de referencia

Tecnología	LFP
Capacidad	50 Ah
Voltaje límite de carga	3.65 V
Voltaje límite de descarga ($T > 0^\circ\text{C}$)	2.5 V
Rango de temperatura de descarga	-30°C a 60°C
Rango de temperatura de carga	0°C a 60°C
Corrientes de carga/descarga máximas	1C
Corrientes de descarga/descarga máximas (30s)	2C
Retención de carga (25°C , 100% SOC, 30 días)	$\geq 96\%$
Ciclos de vida (25°C , 1C de descarga)	≥ 2000

III-B. Proceso de desmantelamiento y criterios de seguridad

Para obtener las celdas individuales que componen el pack recibido fue necesario desmantelar por completo el mismo. Se debió tener especial precaución con los bornes de las celdas, ya que se encontraban al descubierto, siendo la tensión del pack de 72 Vcc. Para ambientes secos, más de 50 Vac se consideran peligrosos para la vida humana, por lo que fue necesario aislar los bornes principales con cinta y además usar guantes dieléctricos y protección mecánica para baja tensión.

Posterior a esto, se procedió a quitar todo cableado auxiliar (medidas de tensión de cada celda o de temperatura). En este caso las celdas estaban conectadas en serie, unidas mediante una plancha de aluminio soldada con láser al borne. Esto implicó un procedimiento invasivo para romper las soldaduras y lograr separar las celdas.

Durante el procedimiento de desmantelamiento se utilizaron herramientas como sierra, pinza, alicate y destornilladores. Dado que son herramientas metálicas, es importante tener especial precaución, ya que debido a la proximidad de los bornes, la manipulación descuidada de las mismas podría dar lugar a un accidente, como puede ser un cortocircuito en bornes de la celda. Para evitar este inconveniente se recomienda aislar eléctricamente el resto de los bornes, dejando al descubierto únicamente el borne en el que se va a trabajar. En la utilización de herramientas punzantes como destornilladores y alicates, se debe tener cuidado en no dañar la envoltura metálica de la celda, perforando y provocando un derrame de electrolito o cortocircuito interno de la misma, derivando en serios problemas de seguridad.

Cuadro II: Características constructivas de la caja contenedora de ensayos.

Tamaño interno	1000x1000x1000 mm
Material interno	Acero A3 de 1.3 mm de espesor con pintura al horno
Material externo	Acero de 1 mm de espesor
Puerta	Estructura de acero, con bisagras y ventana de inspección a prueba de explosiones
Tamaño de ventana de observación	250x250 mm
Tamaño de batería soportado	9 kWh

Por último, luego de desconectadas y separadas las celdas, las mismas se enumeran y se aíslan sus bornes para evitar cortocircuitos accidentales. Las celdas fueron almacenadas en un ambiente estable desde el punto de vista de temperatura ambiente y humedad. Se aconseja que el lugar de almacenamiento cuente con un sistema de detección específico para instalaciones que trabajen con baterías de iones de litio, que tengan la capacidad de realizar una detección temprana de eventos. También debe haber un sistema de extinción de incendios específicamente diseñado para trabajar con baterías de litio.

El operador que realice los procedimientos anteriormente descritos debe poseer una serie de equipos de protección personal (EPP) como ser: guantes dieléctricos y protección mecánica, antiparras, zapatos de seguridad y delantal ignífugo. A su vez, como equipo de protección colectiva (EPC) se debe contar con extintor para todo tipo de incendios, detector de tensión, y señalizar la zona de trabajo.

IV. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

IV-A. Equipo de carga y descarga de baterías

Para ensayar las celdas y el pack de celdas se utilizó un equipo de la compañía Chroma modelo 17020, el cual consiste en un rack compuesto por diversas etapas que en su conjunto permiten programar ensayos de carga y descarga controlada. Los diversos componentes del equipo se comunican mediante protocolos CANBus y Ethernet.

- Unidad de comunicación de datos, modelo 692001
- Controlador de carga/descarga, modelo 69200-1
- Conversor DC/AC bidireccional modelo A691101
- Téster de carga/descarga modelo 69206-60-8

IV-B. Caja contenedora de ensayos

Dado que las baterías pueden sufrir procesos electroquímicos que deriven en explosiones o incendios, todos los ensayos que se apliquen a las mismas se realizan dentro de un recinto apropiado. Por esto, se utiliza una caja contenedora anti-explosiva que es capaz de contener en su interior una explosión o incendio de una batería. Además también posee un sistema de ventilación forzada que extrae los gases en caso de que ocurra la ignición o explosión de la batería. Las características técnicas de la misma se muestran en el Cuadro II.

Cabe mencionar que todo el equipamiento utilizado durante el desarrollo del proyecto forma parte del Laboratorio de Vehículos Eléctricos de la Facultad de Ingeniería - UdelaR

(Universidad de la República). En particular, el equipo de carga y descarga y la caja contenedora de ensayos, fueron adquiridos para este laboratorio en el marco del proyecto ANII-PEC-152509.

V. ENSAYOS REALIZADOS

V-A. Tipos de ensayos y metodología

Para la elaboración y realización de los ensayos utilizados para determinar qué celdas se pueden reutilizar, se tomó como referencia la norma IEC 62660-1:2018 - *Celdas secundarias de litio-ion para la propulsión de vehículos eléctricos* y el *Manual de ensayos de baterías para vehículos eléctricos del USABC* [10].

V-A1. *Medidas de parámetros físicos:* Para determinar parámetros como la energía específica y la densidad de energía de la batería en estudio, primero es necesario realizar las medidas de sus parámetros físicos como volumen y peso. El método utilizado fue el que se describe en los apartados 5 y 6 de la norma IEC 62660-1:2018.

V-A2. *Medida de parámetros eléctricos:* Algunos de los parámetros declarados por el fabricante que se deben comprobar y son útiles para determinar el uso de una batería son las tensiones de trabajo y la capacidad de la misma.

Los parámetros capacidad, potencia y energía, fueron calculados tomando como referencia el apartado 7 de la norma IEC 62660-1:2018.

En particular, se realizaron dos ensayos:

■ Ensayo de capacidad estática

Tiene como objetivo medir la capacidad de la batería en Ah bajo una descarga a corriente constante (CC). La secuencia del ensayo se describe a continuación:

1. Cargar la celda con un perfil de carga CC-CV. Primero se realiza carga CC con una tasa de C/2 hasta que la celda alcanza la tensión de 3,65 V. Luego se realiza carga CV a tensión 3,65 V hasta que la corriente sea menor que C/20.
2. Descargar la batería con una corriente constante de C/3 hasta que la tensión de la batería sea la mínima declarada por el fabricante.
3. Calcular la capacidad de la batería en Ah según lo detalla la norma.

■ Ensayo de pulso de potencia

Se elaboró un ensayo de potencia con el objetivo de determinar las características de potencia de descarga y de regeneración de la celda, mediante un perfil híbrido que contiene un pulso de carga y otro de descarga. Dicho ensayo está basado en los ensayos HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) y Peak Power Test presentes en [10].

El perfil utilizado consta de un pulso de descarga a una tasa de 2C durante 10 s y un pulso de carga a una tasa de 1,5C durante 10 s. Entre ambos pulsos se dejan 60 s de reposo. En la Figura 4 se muestra el perfil de corriente en función del tiempo que fue utilizado y cómo evoluciona la tensión de una de las celdas ensayadas durante el mismo. Se observa que la

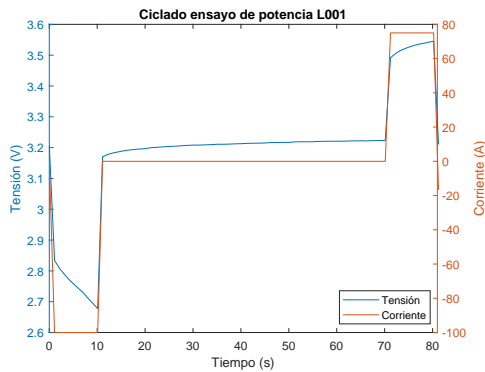


Figura 4: Perfil de corriente utilizado en el ensayo de pulso de potencia y respuesta de la tensión de la celda obtenida.

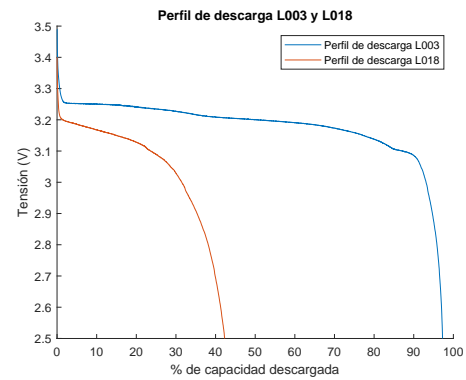


Figura 5: Perfil de descarga estática de las celdas L003 y L018.

tensión de la celda cae durante el pulso de descarga y aumenta durante el de carga.

Se describe a continuación la secuencia del ensayo.

1. Cargar la celda con un perfil de carga CC-CV. Primero se realiza carga CC con una tasa de $C/2$ hasta que la celda alcanza la tensión de 3,65 V. Luego se realiza carga CV a tensión 3,65 V hasta que la corriente sea menor que $C/20$.
2. Dejar reposar la celda por 30 minutos.
3. Inyectar el perfil de carga y descarga de potencia descrito antes y presentado en la Figura 4. Si durante el pulso de descarga o el de regeneración, la tensión de la celda excede los límites de tensión mínima o tensión máxima admisible, se deberá finalizar el ensayo.
4. Descargar un 10 % la capacidad de la celda en Ah, con una corriente constante de tasa $C/3$.
5. Repetir 9 veces los pasos 3) y 4) hasta que se haya descargado al menos el 90 % de la capacidad total de la celda.
6. Finalizar el ensayo descargando la celda con una corriente constante de tasa $C/3$ hasta que la tensión alcance el valor mínimo admisible.

Cabe mencionar que a los efectos de reducir la duración del ensayo, entre cada iteración de los pasos 4) y 3) se suprimió el tiempo de reposo de 60 minutos existente en el ensayo HPPC de [10] y se procedió a ejecutar un ciclo detrás de otro, tal como se realiza en el ensayo Peak Power Test de [10].

V-B. Resultados y parámetros a analizar

V-B1. Ensayo de capacidad estática: En esta sección, se presentan los resultados obtenidos para una celda cuyos resultados fueron satisfactorios (celda L003) y otra en la que no (celda L018), cuyos perfiles de descarga estática se muestran en la Figura 5. Como se observa, la forma del perfil obtenido para la celda L003 coincide con la característica de descarga teórica que fue presentada en la Figura 1. Además se constata que al llegar al final de la descarga, el porcentaje de capacidad descargado por la celda L003 es mayor al 95 % de la capacidad nominal. De manera contraria, al finalizar

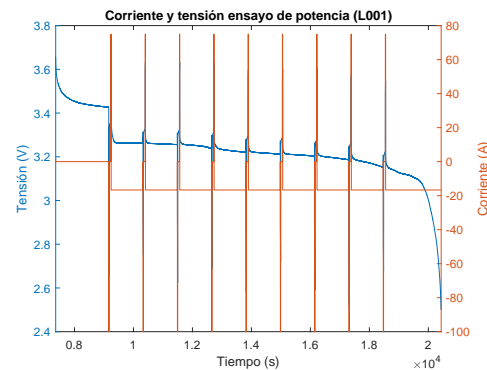


Figura 6: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, celda L001.

la descarga de la celda L018, la capacidad descargada es aproximadamente el 40 % del valor nominal, por lo que esta celda no se considera apta para la reutilización y es descartada.

Realizando este ensayo a todas las celdas, se obtuvo la capacidad en Ah de cada una. De un total de 24 celdas ensayadas, 19 superaron el ensayo entregando más del 95 % de su capacidad nominal. Por lo tanto, al 79 % del total de las celdas se les debió realizar el ensayo de potencia.

V-B2. Ensayo de pulso potencia: En la Figura 6 se muestra el perfil de corriente y tensión obtenido con el ensayo de una de las celdas. En esta gráfica, cada pico corresponde con una de las nueve veces que se ejecuta el perfil mostrado en la Figura 4. Entre cada iteración también se observa la descarga de un 10 % de la capacidad en Ah según el paso 4 del ensayo. Además, conforme la batería se va descargando, se constata que la tensión alcanzada con el pulso de carga y descarga va disminuyendo.

Este ensayo se realizó a las 19 celdas que completaron el ensayo de carga estática, y para cada una de ellas se calculó el pico de potencia de descarga y de carga. De las 19 celdas ensayadas, 15 completaron el ensayo operando dentro de los límites de tensión admisibles, por lo que las 15 fueron elegidas para formar parte del nuevo pack.

VI. CONSTRUCCIÓN DE LA BATERÍA REUTILIZADA

Se decidió construir una batería multicelda de 48 V compuesta por 16 celdas de LFP. De las celdas ensayadas, se seleccionaron las 15 que pasaron los ensayos de capacidad estática y potencia, mientras que de las celdas que no pasaron ambos ensayos, se seleccionó la que mejor rendimiento tuvo en el ensayo de potencia para completar el pack.

Al momento que fue recibida la batería bajo estudio, los bornes de las celdas se encontraban conectados entre sí mediante una soldadura láser de fábrica. Dado que no se contó con la tecnología necesaria para realizar una soldadura similar, el conexionado de los bornes se realizó mediante una conexión roscada, atornillada directamente sobre los bornes de las celdas.

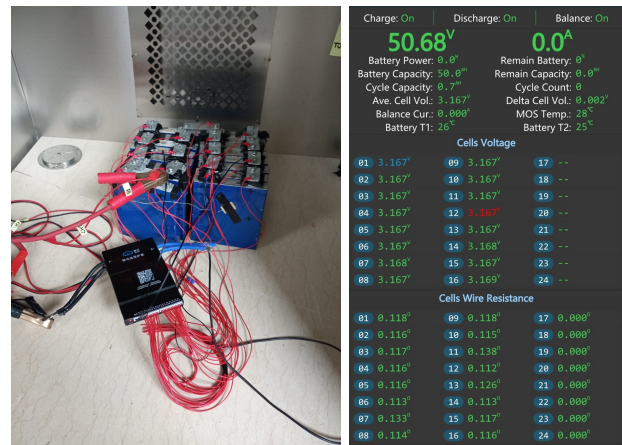
Se diseñó un gabinete de forma prismática para contener las celdas que forman el pack. El gabinete proyectado es estanco, permite ser inundado ante una eventual falla y está diseñado en chapa. Además, para facilitar la reposición de celdas, el diseño se realizó de manera de que cada una sea sujeta en una cavidad individual, para que cuando sea necesario reponer una celda, alcance solo con extraerla y colocar la reposición en su lugar, evitando desmantelar toda la batería. Se tuvo precaución de dejar una cavidad de aproximadamente 3mm de aire entre cada celda para ayudar a la refrigeración y evitar presiones entre las caras de las celdas ante eventuales dilataciones de las mismas.

Para garantizar el funcionamiento de la batería de forma segura se incorporó un BMS compatible con celdas LFP. Dicho BMS puede gestionar hasta 24 celdas en serie, realiza balanceo activo y cuenta con una aplicación en la que mediante conexión bluetooth se pueden ajustar los parámetros de control y protección desde un smartphone. Se prevee que el BMS cuente con una caja contenedora propia, que brindará protección mecánica e irá adosada a la caja del pack de baterías. En la Figura 7 se presenta el conexionado del nuevo pack de baterías y la interfaz de la aplicación del BMS donde se observa el estatus de las 16 celdas en estado balanceado.

VII. CONCLUSIONES Y FUTUROS PASOS DEL PROYECTO

El objetivo central del proyecto es estimar la viabilidad de la reutilización de baterías de vehículos eléctricos que fueron descartadas por diversos motivos. En este sentido, dada una batería que fue descartada para el uso en un vehículo eléctrico tras sufrir daños por sobretensión, la misma fue desmantelada para separar y ensayar las celdas que la componían. De los ensayos realizados se pudo comprobar que un 79% de las celdas aún eran capaces de almacenar al menos un 95% de la capacidad declarada por el fabricante. Por otro lado, se realizó un ensayo de potencia que permitió observar que 15 de las 24 celdas que conformaban la batería eran capaces de soportar el estrés introducido por el ensayo, pudiendo entregar picos de corriente de hasta 2C y recibir picos de 1,5C durante 10 s, para estados de carga (SoC - State of Charge) entre 100% y 10%.

Con los ensayos realizados se seleccionaron 16 celdas para construir un pack de baterías de 48 V y 50 Ah. Al momento



(a) Ensamble y conexionado

(b) Interfase de la app

Figura 7: (a) Montaje y conexionado preliminar del banco de baterías y el BMS dentro de la cámara ex-proof y (b) Interfaz del BMS en el smartphone.

de la edición de este artículo, el proyecto se encuentra en la etapa de construcción del gabinete que contendrá a la batería y se están realizando pruebas para integrar el BMS al pack.

En lo que concierne a los futuros pasos del proyecto, luego de que se cuente con la batería construida y con su respectivo BMS integrado, la misma será ensayada para obtener sus parámetros técnicos, en base a los cuales se determinará la posible aplicación que sería compatible con la batería obtenida. En caso de que pueda ser utilizada en electromovilidad, se estudiará simular su desempeño en un vehículo eléctrico mediante el modelado del mismo y un ciclo de conducción determinado que será ejecutado en el equipo de ensayo.

Como análisis final se estudiará el impacto económico de reutilizar las celdas mediante el proceso realizado en el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] J. Lucendo, *Las Edades del Automóvil: Historia del Automóvil*, 2019.
- [2] Balance Energético Nacional: Características generales - Emisiones de CO₂ (2022, Enero, 29). Disponible: <https://ben.miem.gub.uy/caracteristicas3.php>.
- [3] Informe anual 2020, ADME: Administración de Mercados Eléctricos, Montevideo, Uruguay, 2021.
- [4] P. Wolfram and N. Lutsey, "Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions", *ICCT*, Julio de 2016.
- [5] R. Korthauer, *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Kriptel, Germany, Springer, 2018.
- [6] T. B. Reddy and D. Linden, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed., Mc Graw Hill, 2011, pp. 26.1-26.75.
- [7] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-In Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations", *IEEE Access*, Abril 2018.
- [8] J. Warner, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2015, pp. 65-86, 169-174.
- [9] Asian Development Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*, Mandaluyong City, Philippines, 2018, pp. 42-49.
- [10] U.S. Department of Energy, "United States Advanced Battery Consortium Battery Test Manual For Electric Vehicles", Idaho National Laboratory, Octubre 2020.