

# Pruebas y Clasificación de Baterías de Ion de Litio para dar un Segundo Uso en Electromovilidad

## Testing and Classification of Lithium Ion Batteries for a Repurposing in Electromobility Applications

Marcos Alfredo Hernández Ortega<sup>a,\*</sup>, Moisés Salvador Rodríguez González<sup>a</sup>, Iván Uriel García García<sup>b</sup>, Oscar Emilio Báez Anaya<sup>c</sup>, Roberto Escutia Fernández<sup>d</sup>, Joel Salomé Baylon<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Electromecánica, Universidad Autónoma de Guadalajara; [marcos.hernandez@edu.uag.mx](mailto:marcos.hernandez@edu.uag.mx), [s.rodriguez@edu.uag.mx](mailto:s.rodriguez@edu.uag.mx)

<sup>b</sup> Programa de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Universidad Autónoma de Guadalajara; [ivanu.garcia@edu.uag.mx](mailto:ivanu.garcia@edu.uag.mx)

<sup>c</sup> Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Autónoma de Guadalajara; [oscare.baez@edu.uag.mx](mailto:oscare.baez@edu.uag.mx)

<sup>d</sup> Programa de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Guadalajara; [roberto.escutia@edu.uag.mx](mailto:roberto.escutia@edu.uag.mx)

<sup>e</sup> Departamento de Ingeniería en Energías Renovables, Universidad Tecnológica de Manzanillo, Colima; [joel-salome@utem.edu.mx](mailto:joel-salome@utem.edu.mx)

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

En las últimas décadas, la tecnología de baterías de ion de litio ha tenido enormes avances para aplicaciones de vehículos eléctricos y energías renovables, alineados a la búsqueda de un desarrollo más sostenible de la sociedad humana. Sin embargo, la cantidad de baterías a ser desechadas irá en constante aumento en los próximos años, representando un grave problema de contaminación. Debido a ello, es necesario desarrollar nuevas estrategias para aminorar el impacto ambiental, así como métodos industrializados para su reciclaje. Una ventana de oportunidad muy importante en este contexto surge de un fenómeno que ocurre muy frecuentemente: en un gran porcentaje de casos, las baterías de ion de litio son desechadas de sus aplicaciones principales por normativas internas o por fallas en alguna parte del banco de baterías. Por ello, suponemos que un gran número de baterías que son desechadas por alguna de estas razones pueden tener aun una capacidad remanente considerable, siendo aptas para su reúso en otras aplicaciones. En este artículo, nos centramos en el estudio de la capacidad remanente de diversas baterías de ion de litio que han sido desechadas de su aplicación original. Se presentan los conceptos fundamentales, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos sobre un diverso conjunto de celdas. Se estudiaron 4 conjuntos de baterías: un grupo misceláneo de celdas provenientes de aplicaciones pequeñas, un banco proveniente de un patín eléctrico, un banco de baterías proveniente de un sistema de iluminación independiente de la red eléctrica y bancos de baterías provenientes de aplicaciones de soporte de energía. Los resultados obtenidos muestran que en los primeros dos grupos se tuvieron muchas celdas con muy poca capacidad remanente y algunas con características que las hacen inútiles para cualquier aplicación. Mientras tanto, en el tercer y cuarto conjuntos se presentaron celdas con una muy buena vida útil remanente. Los resultados obtenidos respecto al comportamiento de las baterías pueden ser de utilidad para el diseño de futuras aplicaciones en electromovilidad a pequeña y mediana escala.

**Palabras clave:** baterías de ion de litio, electromovilidad, reúso.



la propuesta de nuevas opciones que puedan ayudar a solventar dos problemáticas: la contaminación por su deposición y su disponibilidad en el mercado (Fereydoonian, 2025), (IEA, 2025b).

Una alternativa que se ha propuesto es la reutilización de las baterías para un segundo propósito, antes de ser desechadas. En la literatura, varios estudios se han enfocado en este aspecto, pero centrándose en la reutilización de baterías que son desechadas de aplicaciones de vehículos eléctricos para su aplicación en soporte de energía (Chung, 2021), (Fereydoonian, 2025), (IEA, 2025b).

Si bien, la reutilización de baterías de ion de litio en segundas aplicaciones no hace que desaparezca ni la contaminación producida durante su fabricación, ni los potenciales contaminantes derivados de su desecho; se ha observado que su reúso conlleva tres grandes ventajas: (1) Al reducir la demanda de producción de nuevas baterías, se reduce la tasa de producción y su consecuente generación de contaminantes. (2) Al reducir la demanda de nuevas baterías, se relajan los precios en el mercado. (3) Se aplaza su desecho o proceso de reciclaje, disminuyendo así la cantidad de baterías a tratar respecto al tiempo (Terkes et al, 2024), (Fereydoonian, 2025), (Mohanty et al, 2026).

En el contexto específico de nuestro país, hemos encontrado que una importante fuente de desecho de baterías consiste en aplicaciones de soporte de energía en la industria, cuyos bancos de baterías y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés) son renovados después de un periodo de entre 3 y 5 años. Este periodo de tiempo es determinado principalmente por la vida útil declarada por el fabricante y la garantía dada por el mismo (Dell Technologies, s.f.) (Salicru, s.f.).

En este trabajo, proponemos la reutilización de celdas de ion de litio para un segundo o tercer uso en aplicaciones de electromovilidad a pequeña y mediana escala. Estas aplicaciones entran dentro del concepto de ciudad inteligente y apuntan al mejoramiento en las condiciones de movilidad urbana y a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Hosseinzadeh et al, 2021) (Abduljabbar et al, 2021), (Barakat et al, 2026).

Como primer paso hacia este objetivo, en este artículo se reportan los resultados de pruebas realizadas a algunas celdas de ion de litio modelo 18650 provenientes de diversas aplicaciones como son: equipos de cómputo, bancos de baterías de equipos, respaldo de energía para iluminación y respaldo de energía para telecomunicaciones. Dichas pruebas son basadas en el estándar UL-1974 (Underwriters Laboratories (UL), 2018), así como otras propuestas enfocadas a la evaluación de baterías que serán destinadas a un segundo uso (Eleftheriadis et al, 2024), aunque su implementación está limitada por el equipo de pruebas que se tenga a disponibilidad.

El objetivo de las pruebas a realizar es cuantificar el porcentaje de capacidad restante de las celdas y su resistencia interna para, con estos dos datos, clasificarlas y poder destinarlas a nuevas aplicaciones de electromovilidad a pequeña y mediana escala, donde se podrían usar dentro de dos rubros: banco de poder (destinado a proporcionar la energía para producir la fuerza motriz del vehículo) y banco auxiliar (destinado a otras tareas como iluminación, monitoreo, etc.).

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: Primeramente, en la Sección 2 se da una perspectiva global de uso y aplicación de baterías de ion de litio para electromovilidad, basándose tanto en datos históricos como en proyecciones a futuro de acuerdo con las políticas vigentes y las metas trazadas para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Posteriormente, la Sección 3 contiene las metodologías estándar para la realización de pruebas a celdas de ion de litio, así como la descripción de las pruebas realizadas y el equipo utilizado. Después, en la Sección 4 se presentan los resultados obtenidos sobre las celdas de ion de litio que se analizaron, así como un análisis y discusión de la información obtenida. Finalmente, la Sección 5 contiene las conclusiones de esta investigación, al igual que algunas recomendaciones y trabajos futuros que se derivan de este reporte.

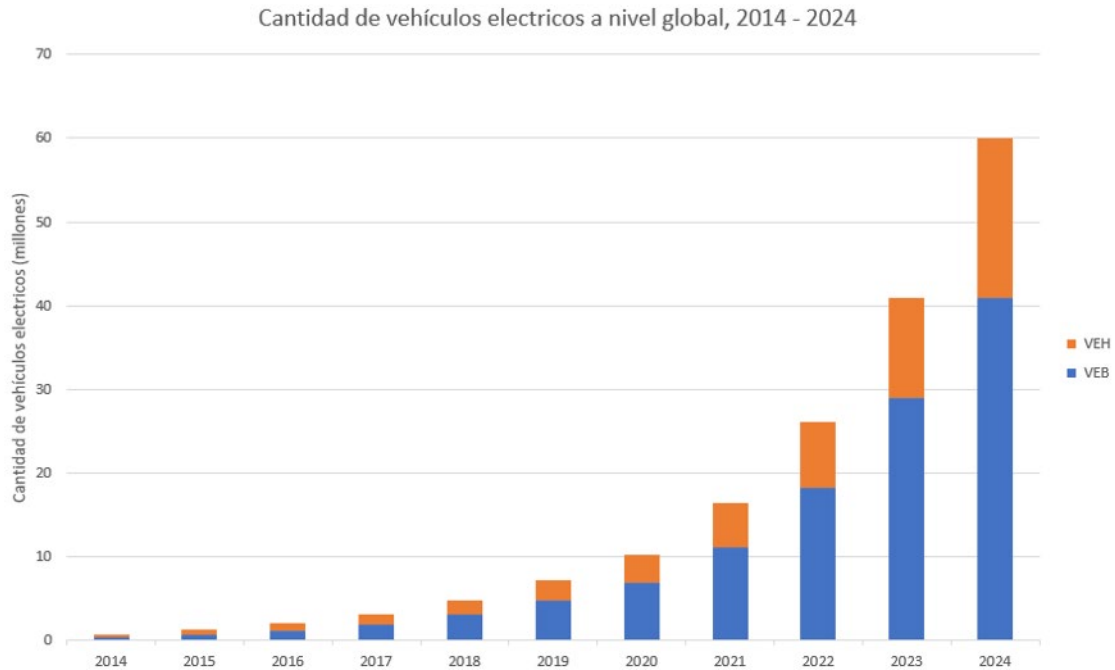
## **2. Contexto de la Problemática**

En esta Sección, se presentan con mayor detalle los dos principales factores que sustentan el presente trabajo de investigación: la perspectiva de crecimiento de la electromovilidad en el mundo y los conceptos fundamentales de la reutilización de baterías.

### **2.1 Perspectiva Global de la Electromovilidad**

Según la IEA (International Energy Agency), se reporta que en el año 2024 se vendieron un total de

17.3 millones de vehículos eléctricos en todo el mundo, representando un aumento de más del 25% respecto al año anterior. Esta cantidad supera las ventas totales de vehículos eléctricos que se vendieron en 2020. Además, se tiene la perspectiva de que, con las políticas actuales, para el año 2030 el 15% de total de vehículos rodando en el mundo serán vehículos eléctricos. De resaltar es la predicción de que, para ese mismo año, el 80% de los vehículos vendidos en China serán eléctricos. Para ilustrar este comportamiento, la Figura 1 contiene la información del total de vehículos eléctricos livianos que se encontraban en las calles, correspondientes a los años 2014 a 2024 (IEA, 2025b).



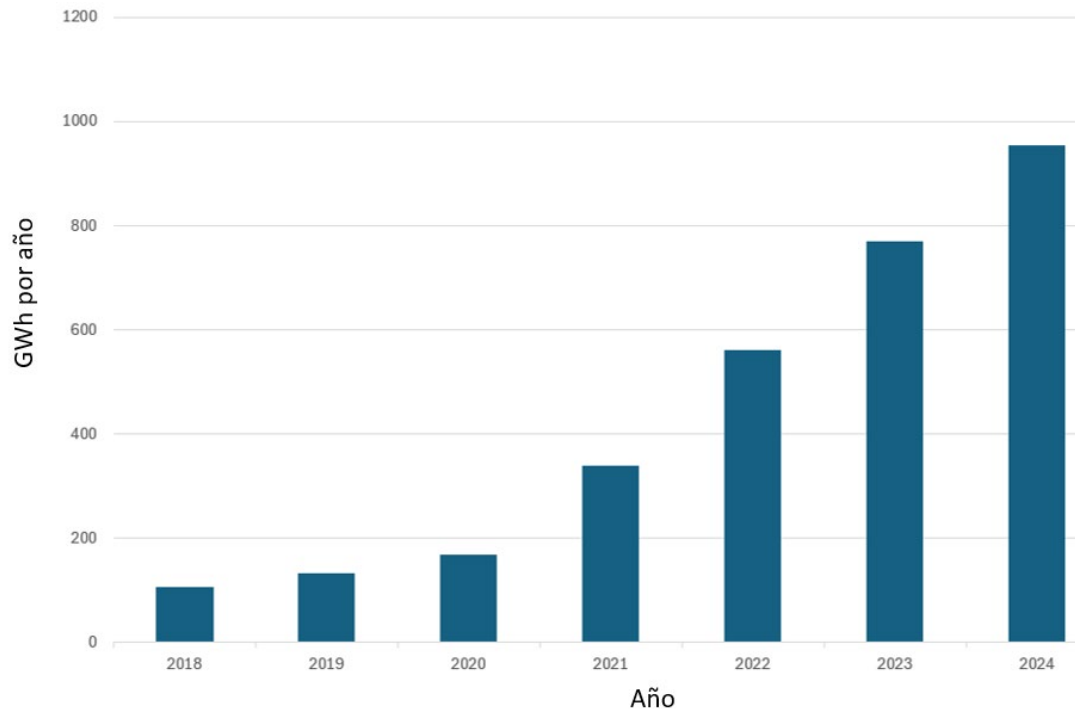
VEB = vehículos eléctricos basados en baterías

VEH = vehículos eléctricos híbridos

**Figura 1.** Evolución de la cantidad de vehículos eléctricos livianos en el mundo (IEA, 2025b)

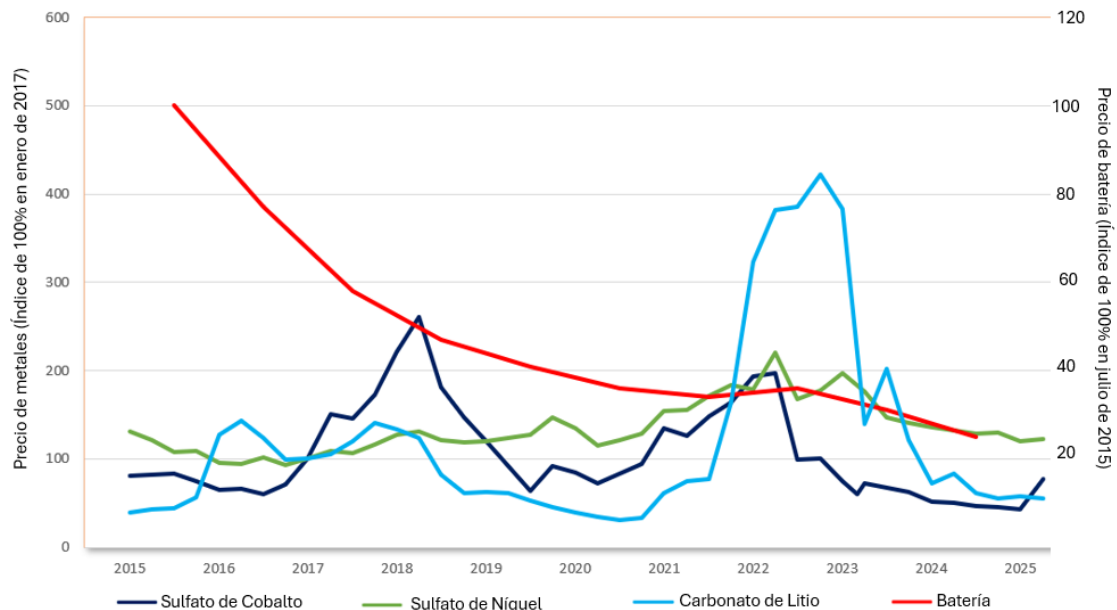
En la gráfica de la Figura 1, se puede apreciar un comportamiento exponencial. Es interesante observar que los vehículos eléctricos basados en baterías (VEB) representan alrededor del 70% del total para el 2024.

En consecuencia, la demanda de baterías de ion de litio para estas aplicaciones de vehículos eléctricos también se ha incrementado de forma exponencial, como se puede ver en la Figura 2. De forma similar a la demanda de vehículos eléctricos, la demanda de baterías se incrementó un 100% del año 2020 al año 2021 y un 565% del año 2020 al año 2024, lo cual se puede apreciar en la Figura 2. Además, en (IEA, 2025b) se estima que la demanda de baterías de ion de litio se incrementará de 169 GWh/año en 2020 a 3 TWh/año en 2030



**Figura 2.** Evolución de la demanda de baterías para aplicaciones de electromovilidad (IEA, 2025b).

El comportamiento observado en la Figura 2 muestra un gran aumento en la demanda de baterías para aplicaciones de vehículos eléctricos. Sin embargo, debido a las recientes tensiones geopolíticas y problemas en las cadenas de suministro, varias materias primas y dispositivos utilizados para construcción de las baterías de ion de litio y sus empaques; se han tenido precios puntuales muy elevados, como se puede ver en la Figura 3 alrededor del año 2023. Esto contrasta con el cada vez menor costo por batería, como se puede apreciar en la curva de color rojo.



**Figura 3.** Evolución del precio de las baterías y de los principales metales utilizados para su fabricación (IEA, 2025b).

El comportamiento observado en la Figura 3 deja entrever el efecto del reciclaje de las baterías para la obtención de los metales utilizados. Sin embargo, el previsto incremento en su demanda y la

cantidad de baterías a ser desechadas hace importante su reutilización. Este tópico es tratado en la siguiente subsección, haciendo énfasis en las principales características y retos de esta tarea.

## 2.2 Reutilización de Baterías

Para lograr una correcta y segura reutilización de las baterías de ion de litio, se requiere la realización de tres subprocesos (UL, 2018):

- **Desmantelamiento:** Donde se debe desarmar el banco de baterías y separar sus componentes. Usualmente solo se conservan las celdas para su reutilización.
- **Pruebas:** Se deben realizar pruebas sobre las celdas, calculando su vida útil restante y su correcto funcionamiento. Es común que, al ser desechadas, las celdas aun tengan más del 80% de vida útil, aunque es probable que algunas celdas ya no sean utilizables.
- **Reensamble:** El ensamble de nuevos bancos de baterías para su reutilización en otras aplicaciones. Este depende de la aplicación específica.

No obstante, existen varios factores que limitan la reutilización de baterías de ion de litio, entre los cuales los principales son los siguientes:

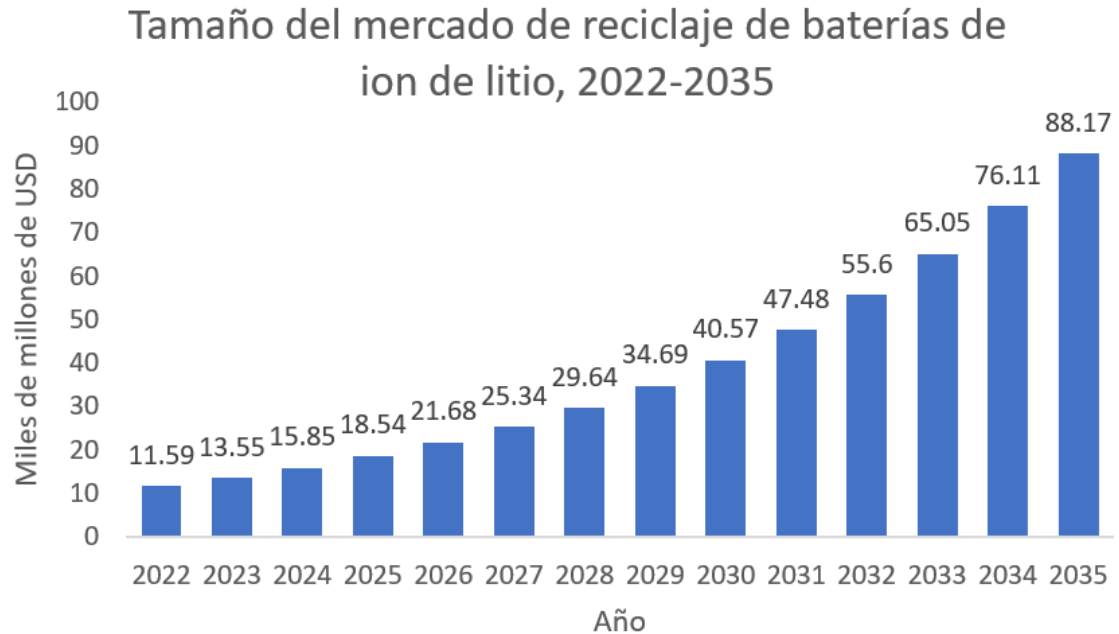
- El fabricante de bancos de baterías reutilizadas debe ser capaz de asegurar tanto la capacidad como la vida útil de los bancos de baterías reensamblados, lo cual muchas veces es incierto.
- Debido al desgaste de las celdas, éstas pueden ser propensas a presentar una falla al utilizarlas en nuevas aplicaciones, provocando que todo el banco falle, minando así la confiabilidad de los bancos reensamblados. Este es un punto crítico en aplicaciones que requieren los bancos como soporte ante emergencias o que son utilizados en actividades críticas. Adicionalmente, un reensamblaje defectuoso o fallas internas pueden desencadenar explosiones de las celdas.
- Un análisis costo/beneficio de utilizar bancos reensamblados en comparación con la compra de equipos nuevos puede ser más provechoso en varias aplicaciones, sobre todo en áreas críticas.

A pesar de lo anterior, la reutilización de las baterías es una necesidad real, debido a la cantidad de baterías que serán desechadas. Esta tendencia se puede observar en la gráfica de la Figura 4, elaborada con datos de (Statista, 2021).

Aunado a lo anterior, se plantea que el antes mencionado incremento en la demanda de baterías que se pronostica para los siguientes años potenciará este rubro, como se puede apreciar en la Figura 5 siguiente (Insight Ace Analytic, 2026).



**Figura 4.** Baterías de ion de litio disponibles para reciclar de 2010 a 2019 (Statista, 2021).



**Figura 5.** Pronóstico de crecimiento del mercado de reciclaje de baterías 2022 a 2035 (Insight Ace Analytic, 2026).

Cabe resaltar que en las figuras 4 y 5 se menciona únicamente el total de baterías desechadas (asumidas como disponibles únicamente para reciclaje); sin embargo, una buena cantidad de éstas tendrán aun una considerable vida útil y podrán ser destinadas a otras aplicaciones (Statista, 2018) (Engel et al, 2019).

En la siguiente sección, se ahonda en uno de los puntos principales que se mencionaron anteriormente: las pruebas de laboratorio que se deben realizar sobre las celdas y la determinación de su vida útil restante.

### 3. Pruebas de Laboratorio por Realizar

En esta sección, se presenta el estándar más utilizado para la realización de pruebas sobre celdas que serán reutilizadas. Se pone especial énfasis en detallar la metodología que ha sido seleccionada para obtener los resultados reportados en este documento, así como el equipo de laboratorio disponible para la realización de las pruebas pertinentes. Esto último ha sido un factor fundamental, como se describirá a continuación.

#### 3.1 Equipo de Laboratorio Disponible

Una parte fundamental de los estudios que se realizaron en este trabajo es el conjunto de equipos que se tienen a disposición y cuyas capacidades serán fundamentales para definir los parámetros de las pruebas a realizar.

Para las pruebas de descarga, se utilizó el equipo de carga electrónica controlable Atorch DL24P. Las características principales de este equipo son las siguientes (Atorch, s.f.):

- a) Capacidad de descarga a corriente constante, resistencia constante, potencia constante o voltaje constante, limitado a dos posiciones decimales.
- b) Potencia máxima de 180W.
- c) Pantalla y aplicación móvil para el monitoreo.
- d) Capacidad de definir el voltaje de corte, limitado a una posición decimal.

Para las pruebas de carga, se tiene a disponibilidad varios equipos LiitoKala Lii-500. Estos son

dispositivos cargadores de baterías que también tienen la capacidad de realizar pruebas de carga, descarga, pruebas de capacidad de la celda y medición de la resistencia interna de las baterías. Las características principales de estos equipos son las siguientes (LiitoKala, s.f.):

- a) Corrientes de carga fijas en: 300 mA, 500 mA, 700 mA y 1.0 A.
- b) Pantalla que despliega: función a realizar, voltaje, corriente fija y resistencia calculada.

Tanto el Atorch DL24P como los LiitoKala Lii-500 se controlan y configuran de forma manual, por lo que realizar cambios de parámetros de forma inmediata es prácticamente imposible.

Debido a lo anterior, las pruebas a realizar estarán limitadas en ciertos aspectos. Por ejemplo, la etapa de carga de las baterías estará limitada a los valores fijos de corriente mencionados anteriormente.

### 3.2 Metodología basada en el Estándar UL-1974

El Estándar para la Evaluación de Baterías de Reutilización, ANSI/CAN/UL-1974, mejor conocido como el estándar UL-1974, está enfocado en estandarizar el proceso de evaluación y clasificación de baterías de ion de litio que serán reutilizadas. El objetivo de dicho estándar es determinar el estado en el que se encuentran las celdas, así como otros parámetros que ayuden a evaluar tanto la viabilidad de su reúso, como su clasificación.

Las evaluaciones que el UL-1974 propone para las baterías que serán reutilizadas son las siguientes:

- a) Medición del voltaje de circuito abierto.
- b) Revisión del aislamiento de entrada de alto voltaje.
- c) Revisión de capacidad.
- d) Revisión de la resistencia interna.
- e) Revisión del sistema de manejo de batería (BMS por sus siglas en inglés) y de los componentes de protección.
- f) Pruebas de ciclos de carga/descarga.
- g) Prueba de autodescarga.

Sin embargo, en este trabajo se presentan únicamente evaluaciones de celdas individuales, por lo que nos enfocaremos en las pruebas de los incisos a, c, d, f y g.

#### 3.2.1 Parámetros de la Celda

Para las pruebas que serán realizadas sobre cada celda, se requiere primero definir qué parámetros serán utilizados y/o cuáles serán obtenidos de medidos:

- a)  $VCA$  es el voltaje de circuito abierto.  $VCA_{ini}$  es el valor inicial de las pruebas, mientras que  $VCA_{min}$  y  $VCA_{max}$  son el voltaje mínimo y máximo permisible para la celda, respectivamente.
- b)  $Cap_{nom}$  es la capacidad nominal de la celda en ampere-hora (Ah).
- c)  $I_C$  es la corriente a la que se carga la celda.
- d)  $I_D$  es la corriente a la que se descarga la celda.
- e)  $I_{RC}$  es la razón de corriente a la que se carga la celda, definida como  $I_{RC} = I_C / Cap_{nom}$ .
- f)  $I_{RD}$  es la razón de corriente a la que se descarga la celda, definida como  $I_{RD} = I_D / Cap_{nom}$ .
- g)  $I_{corte}$  es la corriente mínima que se le sigue suministrando a la batería a un voltaje constante de  $VCA_{max}$ .
- h)  $Cap_D$  es la capacidad de descarga de la celda en ampere-hora (Ah).
- i)  $Cap_C$  es la capacidad de carga de la celda en ampere-hora (Ah).
- j)  $R_{DC}$  es la resistencia interna de la celda.

Los parámetros  $VCA_{min}$ ,  $VCA_{max}$  y  $Cap_{nom}$ , serán tomados del conjunto de datos que provee el fabricante.

#### 3.2.2 Parámetros de la Celda

Siguiendo el estándar UL-1974, y basándonos en las especificaciones recomendadas en (Chung, 2021), además de estar limitados al equipo descrito en la Sección 3.1, las pruebas de descarga/carga reportadas en este documento seguirán los pasos descritos en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Proceso de descarga/carga utilizado

Paso	Acción	Descripción
1	Medición de $VCA_{ini}$	Para comenzar la prueba, la batería debe estar totalmente cargada, por lo que al medir $VCA_{ini}$ deberá ser prácticamente igual a $VCA_{max}$ .
2	Descarga a CC	Con una corriente $I_D$ correspondiente al 50% de $Cap_{nom}$ ( $I_{RD} = 0.5$ ) hasta que la celda alcance un voltaje igual a $VCA_{min}$ *.
3	Periodo de Reposo #1	Reposo de 1 hora, monitoreando el $VCA$ .
4	Recarga a CC	Con una corriente $I_C$ de 1.0 A, hasta que la celda alcance un voltaje igual a $VCA_{max}$ y con una corriente mínima $I_{corte}$ .
5	Periodo de Reposo #2	Reposo de 1 hora, monitoreando el $VCA$ .

CC = Corriente Constante

\*En caso de que  $VCA_{min}$  tenga más de una posición decimal, éste será redondeado a su valor inmediato superior.

En la Tabla 1, el paso 4 donde la corriente constante (CC) de carga se establece que será igual a 1.0 A se debe a las limitaciones del equipo disponible que fue descrito en la Sección 3.1.

El primer periodo de reposo tiene como objeto observar la recuperación de la batería después del periodo de descarga, mientras que en el segundo se observará la estabilidad del  $VCA$  una vez que la batería ha sido recargada.

Las curvas del comportamiento del  $VCA$  durante toda la prueba pueden ser utilizadas para caracterizar las baterías para estudios dinámicos, así como para obtener algunos parámetros de la celda.

### 3.2.3 Revisión de Capacidad

Toda vez que la prueba de descarga/carga descrita en la Tabla 1 ha sido completada, se procede a calcular su capacidad de carga y de descarga usando el tiempo de carga  $t_c$  y el tiempo de descarga  $t_d$  del proceso, así como la señal de la corriente medida  $I(t)$ , tal como se define a continuación:

$$Cap_c = \int t_c I(t) dt \quad (1)$$

$$Cap_d = \int t_d I(t) dt \quad (2)$$

Para la evaluación de la capacidad restante de la celda, ésta se calculará usando  $Cap_D$  por medio de la ecuación (2) y calculando el porcentaje que representa respecto de la capacidad nominal  $Cap_{nom}$

### 3.2.4 Estimación de la Resistencia Interna

De acuerdo con el estándar UL-1974, la medición de la resistencia interna de las celdas se realizará utilizando la siguiente fórmula:

$$R_{DC} = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \quad (1)$$

donde  $I_1$  es una corriente fijada de alguna manera e  $I_2 = 5I_1$ . Además, se debe fijar algún criterio previamente para determinar los tiempos de descarga  $t_1$  y  $t_2$ , y así poder medir los voltajes  $V_1$  y  $V_2$

en dichos instantes de tiempo (UL, 2018).

De forma similar a la propuesta de (Chung, 2021), se tomará la capacidad de descarga nominal,  $Cap_{nom}$ , y se tomarán dos puntos de referencia: cuando la celda está al 85 % de  $Cap_{nom}$ , y cuando está al 20% de este mismo valor. De esta manera, se tendrán dos valores de resistencia interna a dos diferentes estados de carga. Para cada uno de estos puntos de referencia,  $t_2 = 10s$ , mientras que  $t_{1(85)}$  será el tiempo entre la plena carga de la celda,  $Cap_D$ , hasta llegar a  $0.85Cap_{nom}$ . Posteriormente, la celda será descargada hasta el 20% de su capacidad nominal  $Cap_{nom}$ , se dejará en reposo por una hora y se calculará de nuevo la resistencia interna. En este segundo proceso de cálculo, se considerará un tiempo de reposo de 10 minutos. Este proceso se pone de forma detallada en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Proceso de cálculo de resistencia interna utilizado.

Paso	Acción	Descripción
1	Medición de $VCA_{ini}$	Para comenzar la prueba, la batería debe estar totalmente cargada, por lo que al medir $VCA_{ini}$ , éste debe ser prácticamente igual a $VCA_{max}$ .
2	Descarga a CC	Con una corriente $I_D = I_1$ correspondiente a aproximadamente el 20% de $Cap_{nom}$ ( $I_{RD} \approx 0.2$ ) hasta que la celda alcance un 85% de su capacidad restante ( $0.85 Cap_D$ ).
3	Medir $V_{1(85)}$	Al llegar a $0.85 Cap_D$ .
4	Descarga a CC	Con una corriente $I_D = I_2$ correspondiente a aproximadamente el 100% de $Cap_{nom}$ ( $I_R \approx 1.0$ ) durante un tiempo $t_2 = 10$ s.
5	Medir $V_{2(85)}$	Al terminar el paso anterior.
6	Descarga a CC	Con una corriente $I_D$ correspondiente al 50% de $Cap_{nom}$ ( $I_R = 0.5$ ) hasta que la celda alcance un 20% de su capacidad nominal ( $0.20 Cap_{nom}$ ).
7	Periodo de Reposo #1	Reposo de 1 hora, monitoreando el $VCA$ .
8	Descarga a CC	Con una corriente $I_D = I_1$ correspondiente a aproximadamente el 20% de $Cap_{nom}$ ( $I_R \approx 0.2$ ) durante un tiempo $t_{1(20)} = 10$ min.
9	Medir $V_{1(20)}$	Al terminar el paso anterior.
10	Descarga a CC	Con una corriente $I_D = I_2$ correspondiente a aproximadamente el 100% de $Cap_{nom}$ ( $I_R \approx 1.0$ ) durante un tiempo $t_2 = 10$ s.
11	Medir $V_{2(20)}$	Al terminar el paso anterior.
12	Recarga a CC	Con una corriente $I_{CD}$ de 1.0 A, hasta que la celda alcance un voltaje igual a $VCA_{max}$ y con una corriente mínima $I_{corte}$

Cabe resaltar que esta prueba únicamente se realizó sobre aquellas celdas con capacidad remanente de más de 80% de la capacidad nominal.

Al momento de realizar estas pruebas basándose en la descripción mostrada en la Tabla 2, debido a las limitaciones del equipo, algunos valores de corriente deberán ser aproximados a los valores ideales de la prueba. Dichas aproximaciones serán especificadas en las subsecciones correspondientes de la Sección 4.

#### 4. Resultados

En esta Sección, se presentan los resultados obtenidos al realizar pruebas de laboratorio sobre cuatro conjuntos de celdas de ion de litio:

1. Conjunto misceláneo de baterías provenientes de aplicaciones de muy pequeña escala.
2. Banco de baterías de un patín eléctrico.
3. Baterías provenientes de un sistema de iluminación independiente de la red eléctrica.
4. Celdas de bancos de baterías provenientes de aplicaciones de soporte de energía.

#### 4.1 Metodología basada en el Estándar UL-1974

Este grupo de celdas está compuesto por celdas de diversos fabricantes y capacidades nominales, las cuales fueron desechadas de diferentes aplicaciones tales como laptops, bancos de baterías de patines eléctricos, baterías de rotomartillos, entre otros. Debido a esta gran diversidad, fue esencial poder clasificarlas en base a su capacidad remanente.

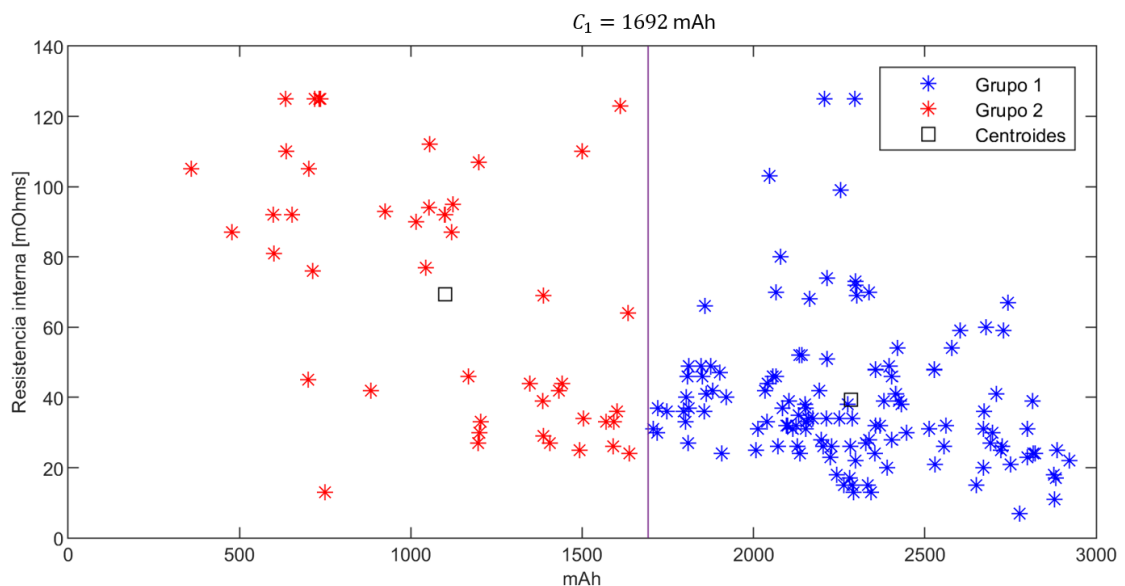
Además, a causa del gran volumen de baterías que se tuvo, se optó por realizar pruebas de forma simultánea utilizando los LiitoKala Lii-500.

Desafortunadamente, para este conjunto no se tomó la precaución de tener un registro de aquellas baterías que resultaron inservibles. Sólo se tienen registros de aquellas que presentaron algo de capacidad remanente. En dicho registro, al haber realizado las pruebas con el LiitoKala Lii-500, se obtuvo, además de la capacidad remanente de las baterías, una estimación de la resistencia interna correspondiente.

Estas celdas fueron utilizadas para generar bancos de baterías para patines eléctricos, los cuales originalmente estaban diseñados para trabajar con baterías de ácido-plomo. Con el objetivo de incrementar la confiabilidad de los patines, se decidió diseñar dos bancos de baterías para cada uno de ellos: uno para el tren motriz y otro para soporte de iluminación y monitoreo.

Considerando una capacidad límite  $C_1$ , la cual definiremos más adelante, se utilizaron los criterios siguientes para la creación de los dos bancos antes mencionados:

1. Banco de baterías del tren motriz: Este banco es de mayor potencia y se le demandará una cantidad de corriente bastante mayor, además de picos de corriente durante la aceleración del patín. Se escogieron celdas con capacidades remanentes mayores a  $C_1$  y procurando que las celdas tuvieran capacidad y resistencia similares.
2. Banco de baterías de soporte: Este banco tendrá una demanda de corriente relativamente baja y constante. Se usaron baterías con capacidad menor a  $C_1$  y procurando nuevamente que estén balanceadas en términos de capacidad y resistencia interna.



**Figura 6.** Capacidad remanente vs resistencia interna. Celdas del conjunto misceláneo. Clasificación en dos conjuntos

Como se puede notar, en ambos grupos de baterías se busca que los bancos sean lo más balanceados posibles. Debido a esto, se hizo una clasificación de las baterías utilizando la técnica K-means con dos centroides, utilizando como criterios de evaluación tanto la resistencia interna como la capacidad remanente. El resultado obtenido es mostrado en la Figura 6.

De la Figura 6 se puede ver que, en general, las baterías con menor capacidad remanente tienen una resistencia interna mayor, tal como se reporta en (Barai et al, 2018). Esto se puede corroborar con los dos centroides obtenidos.

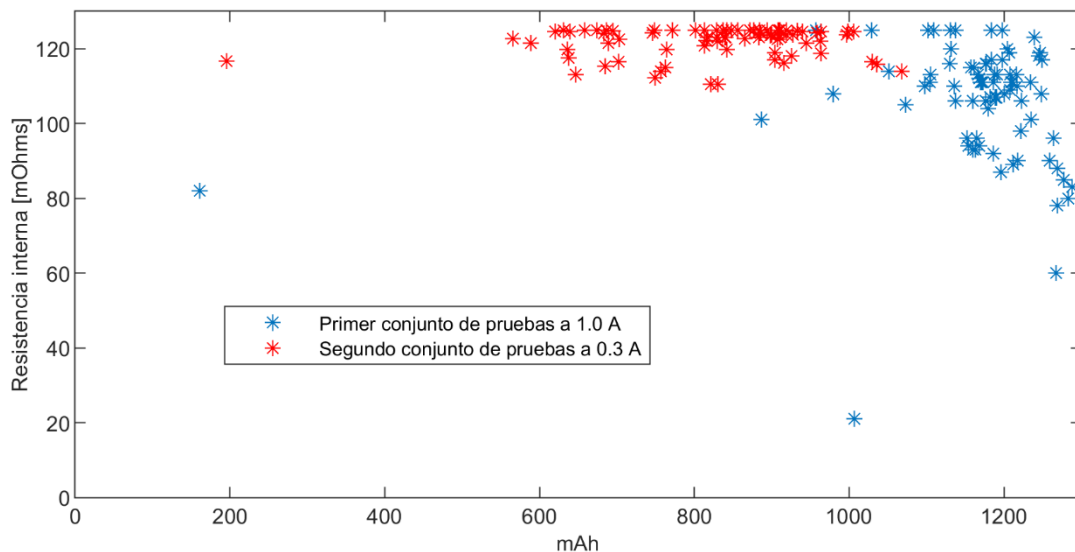
Al obtener los dos centroides, el promedio de las capacidades de ambos puntos es utilizado para definir el valor  $C_1$ , el cual resulta en un valor de 1692 mAh. Esta capacidad es graficada como una línea vertical en la Figura 6 y es utilizada para determinar los dos bancos antes mencionados.

Un punto interesante es que en la Figura 6 se utilizó el dato de capacidad en mAh debido a la diversidad de marcas y orígenes de las celdas que se analizaron. Sin embargo, si se considera un único tipo de celda, la capacidad en porcentaje también puede ser utilizada.

#### 4.2 Banco de Baterías de un Patín Eléctrico

Para este segundo caso, se presentan los resultados que se realizaron a un banco de baterías que pertenecía a un patín eléctrico y que presentaba una baja retención de carga. El banco constaba de 90 celdas en total, cada una de ellas con una capacidad nominal de 2,000 mAh. De las 90 celdas, se encontró que 12 de ellas ya no son útiles debido a que tienen capacidad remanente de prácticamente 0% y/o presentan una degradación física evidente.

Los resultados obtenidos de las 78 celdas que aún tienen capacidad remanente se muestran de forma gráfica en la Fig. 7 en color azul.



**Figura 7.** Capacidad remanente de las celdas del patín eléctrico que aún son reutilizables.

Como se puede apreciar, una celda tiene una capacidad remanente muy baja (8.05%), por lo que puede ser descartada y enviada a reciclaje. El resto de las baterías tiene en promedio un 58.1% de su capacidad nominal, equivalente a aproximadamente 1162 mAh. Esta capacidad remanente es aún considerable, aunque debido al desgaste presentado, se recomienda su uso en bancos de baterías de soporte.

Cabe resaltar que los datos utilizados para los datos en azul de la gráfica de la Figura 7 fueron obtenidos con el equipo LiitoKala Lii-500 con una corriente de prueba de 1.0 A, acorde al procedimiento antes presentado en la Tabla 1. Sin embargo, considerando la capacidad remanente promedio de 1162 mAh, la corriente de prueba de 1.0 A representa un valor de  $I_{RD}$  de 0.86 (86%), lo cual puede degradar aún más a cada celda. La prueba se realizó algunas semanas después para una corriente de prueba de 0.3 A, dando como resultado los datos dibujados en rojo de la Fig. 7. Como

se puede notar, la resistencia de las celdas aumentó, mientras que el promedio de capacidad remanente se redujo al 41.19% (823.75 mAh). Este cambio en sus parámetros da evidencia de la degradación provocada por una corriente de prueba demasiado alta para la capacidad remanente de las celdas.

### 4.3 Baterías de un Sistema de Iluminación Independiente

En este tercer grupo, se tiene un total de 104 celdas con capacidad nominal de 2600 mAh y voltaje mínimo de 2.75 V. El banco fue retirado de su aplicación principal debido a un fallo y al hacer una evaluación del mismo, se encontró que el sistema de manejo de la batería (BMS – Battery management system) se averió. Sin embargo, no se presentaban daños evidentes en las celdas.

**Tabla 3.** Resultados de las pruebas realizadas sobre el tercer grupo de celdas.

	Capacidad remanente		R <sub>85%</sub> (mΩ)	R <sub>20%</sub> (mΩ)
	mAh	%		
Valor mínimo	2369.43	91.13	88.5	113.0
Valor máximo	2588.26	99.55	152.5	135.0
Promedio	2461.33	94.66	111.12	122.88

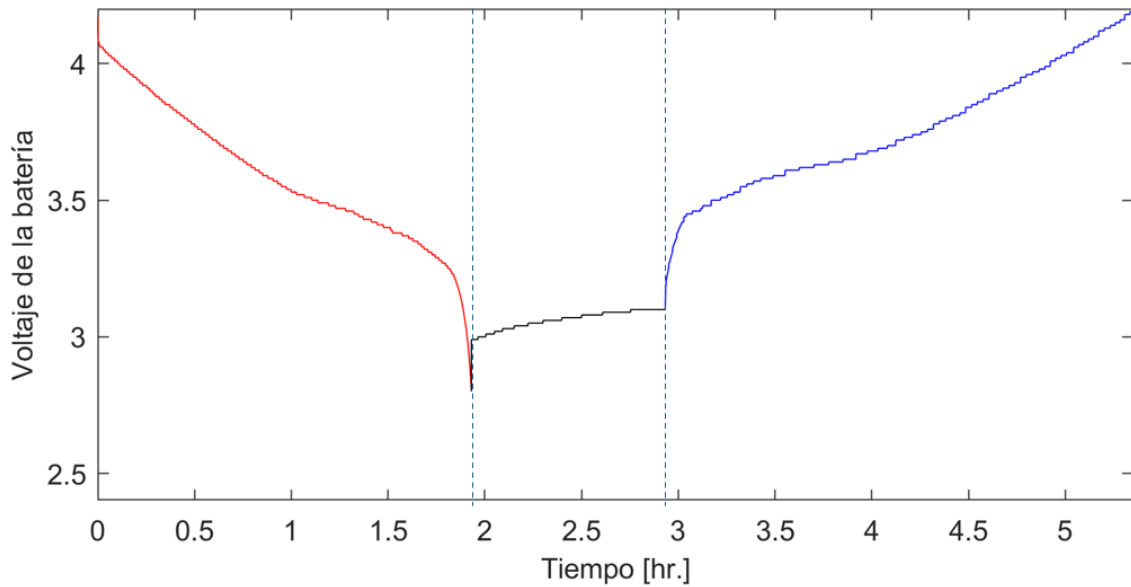
Sobre estas celdas se aplicó el procedimiento mostrado en la Tabla 1 y se obtuvieron los resultados que se muestran en las columnas 2 y 3 de la Tabla 3. Como se puede apreciar, todas las celdas se encuentran con una capacidad remanente por encima del 90% y algunas muy cercanas al 100%. Por esta razón, todas las celdas pueden ser reutilizadas en micromovilidad eléctrica.

Por otro lado, el procedimiento presentado en la Tabla 2 también fue aplicado sobre estas celdas para obtener la resistencia interna al 85% y 20% de su capacidad nominal. Los resultados se muestran en las columnas 4 y 5 de la Tabla 3, respectivamente. Como se puede notar, el rango de variación de la resistencia interna es más amplio cuando se tiene más capacidad remanente. Esta información fue utilizada para, de manera empírica, balancear los módulos de un nuevo banco de baterías destinado a un vehículo kart monoplaza.

### 4.4 Baterías Provenientes de Aplicaciones de Soporte de Energía

Por último, se consideraron celdas provenientes de aplicaciones de soporte de energía que fueron desechadas después de cumplir el tiempo de vida útil garantizado por el fabricante. Cada celda tiene una capacidad nominal de 2500 mAh, voltaje máximo de 4.20 V y voltaje mínimo de 2.5 V. Estas celdas fueron analizadas por un intermediario, descartando todas aquellas con una capacidad menor al 90% de su capacidad nominal o con alguna otra característica que las hizo ser consideradas como no aptas para ser reutilizadas.

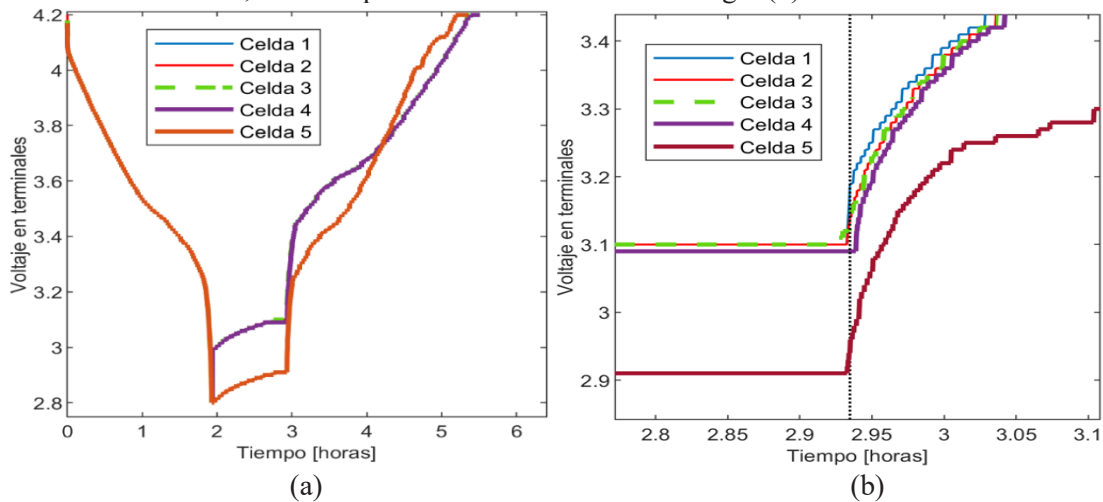
Con el objetivo de evaluar de mejor manera el comportamiento dinámico de estas celdas, se aplicó el proceso de carga y descarga de la Tabla 1, midiendo su voltaje y corriente de forma continua. En la gráfica de la Fig. 8 se muestra un ciclo completo de descarga/carga para una de las celdas evaluadas. Primero, en la parte roja de la curva se observa el proceso de descarga a una corriente de  $I_D=1.25$  A ( $I_{RD}=0.5$ ) hasta un voltaje mínimo de 2.5 V. Posteriormente, se observa un periodo de reposo de 1 hora donde el voltaje se recupera ligeramente. Finalmente, se observa el proceso de carga de la batería con una corriente  $I_C=1.0$  A ( $I_{RC}=0.4$ ) hasta un voltaje máximo de 4.2 V y una corriente de corte de 50mA.



**Figura 8.** Ciclo de descarga y carga de una celda analizada.

Debido a la limitación del equipo disponible, el proceso de monitoreo del voltaje de terminales bajo condiciones de carga/descarga es bastante complejo. Debido a esto y únicamente con el objetivo de explorar las diferencias entre las celdas, se utilizaron sólo 5 celdas de prueba. Las curvas de descarga/carga se presentan en la Fig. 9. Como se puede observar en la Fig. 9(a), las cinco celdas tienen un comportamiento muy similar durante el proceso de descarga, teniendo las capacidades remanentes mostradas en la Tabla 4. Aunque no se logró observar de las curvas obtenidas, el voltaje mínimo alcanzado fue de 2.5 V.

Después, durante el periodo de reposo, se observa que el comportamiento de recuperación del voltaje de las celdas 1 a 4 es muy similar, alcanzando alrededor de 3.1 V. Sin embargo, la celda 5 llega únicamente a 2.91 V, como se puede ver en el detalle de la Fig. 9(b).



**Figura 9.** (a) Curvas de voltaje de terminales para un ciclo de descarga/carga sobre las cinco celdas analizadas. (b) Detalle sobre el punto de mayor diferencia de voltaje.

En este punto, marcado con una línea vertical punteada, se tiene la máxima diferencia de voltajes entre las celdas 1 y 5 de 0.25 V. No obstante, se puede ver en la Figura 9(a) que la celda 5 tiene una importante diferencia en el perfil de voltaje durante la recuperación y la recarga respecto a las demás celdas. Este fenómeno puede provocar diferencias de voltaje y corrientes internas dentro de un banco de baterías, provocando sobrecalentamientos y desgaste de las celdas.

Un punto adicional es que las capacidades de carga y descarga de las celdas, las cuales se muestran

en la Tabla 4, no permiten visualizar esta diferencia en los perfiles de voltaje.

## 5. Conclusiones

Las celdas de ion de litio serán cada vez de mayor importancia para combatir el cambio climático y contribuir a la construcción de ciudades inteligentes a través de su uso en aplicaciones de movilidad, micromovilidad y soporte de energía. Debido a esto, la cantidad de celdas que serán retiradas de su uso principal se verá grandemente incrementada. Una alternativa para disminuir el impacto ambiental de estas celdas y abonar en la posible escasez de los materiales usados para su fabricación es su reúso en aplicaciones de menor capacidad. En este artículo, nos enfocamos en estudiar la posibilidad de su reúso en aplicaciones de micromovilidad eléctrica a través del estudio de 4 grupos de celdas. En el primer grupo compuesto de celdas de diversas aplicaciones pequeñas se observó que se pueden encontrar varias capacidades remanentes en las celdas de segundo uso. Se propuso un criterio basado en la resistencia interna y la capacidad remanente para formar dos bancos en aplicaciones de micromovilidad, uno de potencia y otro de soporte y monitoreo. El segundo grupo, proveniente de un patín eléctrico, mostró que un buen porcentaje de celdas pueden ser aún útiles a pesar de haber ocurrido fallas internas en los bancos de celdas originales; además, se observó que es preferible realizar pruebas de capacidad iniciales con corrientes bajas para evitar una mayor degradación de las celdas. Después, en el tercer grupo, el cual perteneció a una aplicación de soporte de energía para iluminación, se observó una muy buena capacidad remanente de las celdas a pesar de las fallas en el equipo de gestión del banco. Finalmente, en el cuarto grupo de celdas se observó que las 5 celdas evaluadas tienen capacidades de carga y descarga muy similares (superiores al 96% de su capacidad nominal), pero sus perfiles de voltaje pueden mostrar diferencias importantes, principalmente en la recuperación de voltaje. Estas discrepancias pueden inducir desgastes adicionales dentro de los bancos remanufacturados, por lo que se recomienda la utilización de dicho perfil para una mejor clasificación y agrupamiento de celdas. Los resultados y criterios que se obtuvieron de esta investigación deben ser explorados con mayor detalle en grupos de celdas de segunda vida más grandes; la aplicación de estos descubrimientos para remanufacturar bancos de celdas para aplicaciones de micromovilidad eléctrica puede ser un factor fundamental para alcanzar mayores tiempos de vida útil.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma de Guadalajara por el apoyo brindado para la adquisición de equipo.

## Conflictos de interés

No se declaran conflictos de interés.

## Contribución de autores

Marcos Alfredo Hernández Ortega participó en el diseño y la coordinación de las pruebas experimentales, en la idea del proyecto y en la redacción del manuscrito. Moisés Salvador Rodríguez González e Iván Uriel García García participaron como asesores técnicos del proyecto. Oscar Emilio Báez Anaya y Roberto Escutia Fernández participaron en la realización de las pruebas experimentales. Joel Salomé Baylon participó como asesor del proyecto y revisor del manuscrito.

## Referencias

- Abduljabbar, R., Liyanage, S., & Dia, H. (2021). The role of micro-mobility in shaping sustainable cities: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *92*(102734). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102734>
- Alarcón, F., Vergara, A., & Sauma, E. (2023). Electric mobility toward sustainable cities and road-freight logistics: A systematic review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, *430*(138959). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138959>.

- Atorch. (s.f.). *User manual: DL24 Color Screen Bluetooth Data Transmission Digital Control Curve Load Meter*.
- Barai, A., Uddin, K., Widanage, W. D., McGordon, A., & Jennings, P. (2018). A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18424-5>.
- Barakat, S., Guven, A. F., Abdelaziz, A. Y., and Samy, M. M. (2026). A comprehensive review of electric vehicles and sustainable urban mobility in the Middle East and North Africa. *A comprehensive review of electric vehicles and sustainable urban mobility in the Middle East and North Africa*, 225(116154). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116154>.
- Chung, H. (2021). Charge and discharge profiles of repurposed LiFePO<sub>4</sub> batteries based on the UL 1974 standard. *Scientific Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00954-3>.
- Dell Technologies (s.f.). *UPS Dell: Información y solución de problemas del sistema de alimentación ininterrumpida*. Dell Technologies. <https://www.dell.com/support/kbdoc/es-ec/000142496/dell-ups-informaci%C3%B3n-y-soluci%C3%B3n-de-problemas-del-sistema-de-alimentaci%C3%B3n-ininterrumpida#install>.
- Eleftheriadis, P., Leva, S., Gangi, M., Rey, A. V., Borgo, A., Coslop, G., Groppo, E., Grande, L., & Sedzik, M. (2024). Second Life Batteries: Current Regulatory Framework, Evaluation Methods, and Economic Assessment: Reuse, refurbish, or recycle. *IEEE Industry Applications Magazine*, 30(1), 46-58. <https://doi.org/10.1109/mias.2023.3325091>
- Engel H., Hertzke, P., and Siccardo, G. (April, 2019). *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage*. McKinsey & Company.
- Fereydoonian, M., Lee, K., Kiriella, C., Moon, J., and Lee, W., (2025). Closing the Loop on Circular Economy in Transportation Electrification: Reuse, Repurposing, and Recycling of Batteries, Power Electronics, and Electric Machines. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 6(3), 931-947. doi: 10.1109/JESTIE.2025.3530914.
- Gautam, D., Bolia, N. (2024). Fostering second-life applications for electric vehicle batteries: A thorough exploration of barriers and solutions within the framework of sustainable energy and resource management. *Journal of Cleaner Production*, 45(142401). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142401>.
- Hosseinzadeh, A., Algomaiah, M., Kluger, R., & Li, Z. (2021). E-scooters and sustainability: Investigating the relationship between the density of E-scooter trips and characteristics of sustainable urban development. *Sustainable Cities And Society*, 66(102624). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102624>
- International Energy Agency (IEA). (2025). *Renewables 2025*. IEA <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>.
- International Energy Agency (IEA). (2025). *Global EV Outlook 2025*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>.
- LiitoKala (s.f.). *Instruction Manual: Liitokala Lii-500*.
- Mohanti, A., Ramasamy, A., Vaithilingam, C. A., Mohanty, P. P., Bhutto, J. K., Hakami, H., Mushtake, N. (2026). Second-life batteries for a greener grid: strategies for sustainable energy storage and e-waste reduction. *Journal of Energy Storage*, 143(119750). <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119750>.
- Roman, M. (2022). Sustainable Transport: A State-of-the-Art Literature Review. *Energies*, 15(23), 8997. <https://doi.org/10.3390/en15238997>.
- Salicru (s.f.). *Manual de usuario: Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) SLCADAPT 80 400KVA – 3×480 V*. Salicru.
- Statista (Marzo, 2018). *Global second life battery capacity 2023-2030*. <https://www.statista.com/statistics/876624/global-second-life-battery-capacity/>.
- Statista. (Junio, 2021). *Lithium-ion batteries available for recycling globally from 2010 to 2019, by type*. <https://www.statista.com/statistics/1246851/lithium-ion-batteries-available-for-recycling-globally-2010-2019/>.
- Insight Ace Analytic. (Enero, 2026). *Lithium-ion Battery Recycling Market Current Trends Analysis 2026 to 2035*. <https://www.insightaceanalytic.com/report/lithium-ion-battery-recycling->

market/1648

Terkes, M., Demirci, A., Gokalp, E., and Cali, U. (2024). Battery Passport for Second-Life Batteries: Potential Applications and Challenges. *IEEE Access*, 12, 128424-128467. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3450790.

Underwriters Laboratories (UL). (2018). *Standard For Evaluation For Repurposing Batteries*. UL-1974. <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=35079>.