

Proposal for the Implementation of a Second-Life Batteries Pilot Laboratory

Dennis Huanca¹ ; Julio Cuisano² ; L. Enrique Ortiz-Vidal³ 

^{1,2,3}Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, dhuanca@pucp.edu.pe, jcuisano@pucp.edu.pe, leortiz@pucp.pe

Abstract— *The end-of-life management of lithium-ion batteries from electric vehicles represents a critical technical and environmental challenge. Currently, a significant number of these units are prematurely discarded due to partial failures, despite the fact that a large proportion of their cells still retain acceptable operational conditions. In this context, the reuse of second-life batteries emerges as a strategic alternative aligned with the principles of the circular economy and energy sustainability. This paper presents a technical and design proposal for the implementation of a specialized second-life battery laboratory, focused on the diagnosis, classification, rehabilitation, and assembly of new battery packs from recovered cells. The technical foundations for unit characterization are described, detailing the required equipment, tools, and analytical instruments. Additionally, safety protocols are established to mitigate the electrical, thermal, and chemical risks inherent in their handling. The operational process flow, functional zoning of the laboratory, and a technical proposal for regulatory compliance through appropriate protection systems are also presented. The proposed laboratory model constitutes a replicable framework for the technological validation of reuse processes in controlled environments, contributing to the reduction of environmental impact and the advancement of sustainable energy solutions.*

Keywords— *Lithium-ion, second-life batteries, laboratory design, safety, circular economy.*

Propuesta para la implementación de un laboratorio piloto de baterías de segunda vida

Dennis Huanca¹ ; Julio Cuisano² ; L. Enrique Ortiz-Vidal³ 

^{1,2,3}Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, dhuanca@pucp.edu.pe, jcuisano@pucp.edu.pe, leortiz@pucp.edu.pe

Resumen— La gestión del fin de vida de las baterías de ion-litio provenientes de vehículos eléctricos representa un desafío técnico y ambiental crítico. Actualmente, un volumen significativo de estas unidades es descartado prematuramente debido a fallas parciales, a pesar de que gran parte de sus celdas conservan condiciones operativas aceptables. En este contexto, la reutilización de baterías de segunda vida surge como una alternativa estratégica alineada con los principios de la economía circular y la sostenibilidad energética. Este artículo presenta una propuesta técnica y de diseño para la implementación de un laboratorio piloto especializado en baterías de segunda vida, centrado en el diagnóstico, clasificación, rehabilitación y ensamblaje de nuevos paquetes de baterías a partir de celdas recuperadas. Se describen los fundamentos técnicos para la caracterización de las unidades, detallando el equipamiento, herramientas e instrumentos analíticos requeridos. Asimismo, se establecen los protocolos de seguridad necesarios para mitigar los riesgos eléctricos, térmicos y químicos inherentes a su manipulación, se incluye además el flujo de procesos operativos, la zonificación funcional del laboratorio y una propuesta técnica para el cumplimiento de normativas mediante sistemas de protección adecuados. Este modelo de laboratorio propuesto constituye un marco replicable para la validación tecnológica de procesos de reutilización en entornos controlados, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y al avance de soluciones energéticas sostenibles.

Palabras clave- Celdas de ion-litio, baterías de segunda vida, diseño de laboratorio, seguridad, economía circular.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido del uso de vehículos eléctricos constituye una de las principales estrategias para la reducción de emisiones asociadas al consumo de combustibles fósiles [1]. Sin embargo, este avance tecnológico ha generado una problemática emergente relacionada con la gestión del final de vida útil de las baterías, las cuales son frecuentemente reemplazadas durante labores de mantenimiento y descartadas por fabricantes ante la presencia de fallas internas parciales, aun cuando una parte significativa de sus celdas mantiene condiciones operativas aceptables [2]. Así mismo, el descarte de baterías de vehículos eléctricos genera un elevado desperdicio de materiales críticos como el litio, cuya extracción presenta altos costos ambientales y una disponibilidad limitada lo que refuerza la necesidad de estrategias de reutilización y extensión de vida útil [3].

La gestión sostenible de las baterías de iones de litio al final de su vida automotriz es fundamental para mitigar el impacto ambiental y optimizar la cadena de valor de la movilidad

eléctrica [4]. Cuando una batería alcanza el 70-80% de su capacidad original, deja de ser apta para las exigencias de un vehículo eléctrico, pero conserva un valor energético significativo para las aplicaciones de segunda vida [5]-[6]-[7]. No obstante, el éxito de estas metodologías de aprovechamiento depende de un diagnóstico preciso del estado de salud (SoH) y de la implementación de un sistema de gestión de baterías (BMS) avanzado que garanticen la seguridad operativa en nuevos entornos estacionarios [8]-[4]-[7].

Ante esta situación, el concepto de baterías de segunda vida surge como una alternativa tecnológica y ambientalmente viable, orientada al aprovechamiento de celdas funcionales provenientes de baterías descartadas. La reutilización de estas celdas permite reducir el impacto ambiental asociado al descarte prematuro, así como ofrecer soluciones energéticas de menor costo para aplicaciones secundarias, tales como sistemas de almacenamiento estacionario o apoyo a sistemas fotovoltaicos [9].

La implementación de procesos de reutilización de baterías requiere de infraestructura especializada que garantice condiciones adecuadas de seguridad, control ambiental y trazabilidad. La manipulación de baterías de ion-litio implica riesgos eléctricos, térmicos y químicos [10], que deben ser mitigados mediante procedimientos estandarizados locales e internacionales, equipamiento adecuado y una correcta distribución del espacio de trabajo. En este contexto, la implementación de un laboratorio de baterías de segunda vida se presenta como un espacio clave y seguro que permita viabilizar la evaluación, rehabilitación y reacondicionamiento seguro de las baterías de vehículos eléctricos.

A diferencia de las instalaciones convencionales de baterías de segunda vida que dependen principalmente de pruebas prolongadas de capacidad, las cuales pueden llegar a ser lentas y costosas, la metodología de este laboratorio propone un enfoque de diagnóstico de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), que es una técnica de medición no destructiva que aplica una pequeña perturbación de corriente o voltaje alterno a la celda sobre un amplio rango de frecuencias para calcular su impedancia [11]-[12]. Este método es fundamental para parametrizar modelos de circuitos equivalentes (ECM) y permite identificar fenómenos electroquímicos internos, como el crecimiento de la capa de interfaz de electrolito sólido (SEI) o la difusión de litio,

facilitando así el diagnóstico del estado de salud (SoH) y la vida útil remanente (RUL) [12].

El objetivo de este trabajo es brindar una propuesta para la implementación de un laboratorio piloto especializado para baterías de segunda vida, detallando los requerimientos, los equipamientos de diagnóstico EIS, la zonificación, el flujo operativo y las medidas de seguridad necesarias para el diagnóstico y reacondicionamiento de baterías de los vehículos eléctricos.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE BATERÍAS

A. Estado de carga y estado de salud

El estado de carga (SoC, del inglés *State of Charge*) representa la capacidad de energía almacenada en un determinado momento (Q_c) con relación a la capacidad total de la batería (Q) [13]-[14].

$$SoC = \frac{Q_c}{Q} * 100\% \quad (1)$$

El estado de salud (SoH, del inglés *State of Health*) representa la capacidad máxima de la batería en comparación con la capacidad nominal al inicio de su vida útil (Q_{nom}). Este parámetro es el cual determina la viabilidad de aprovechamiento de cada celda [13]-[14].

$$SoH = \frac{Q}{Q_{nom}} * 100\% \quad (2)$$

B. Curvas de carga y descarga

La Fig. 1 presenta la curva de carga típica de una batería. Se muestra el comportamiento del voltaje y la corriente de carga según el tiempo de carga de una batería. Por otro lado, la curva de descarga se presenta en la Fig. 2 donde se muestra el comportamiento del voltaje al utilizar la batería.

C. Eficiencia Coulómbica

La eficiencia coulómbica (CE del inglés *Coulumb Efficiency*) es la relación entre la ($Q_{descarga}$) capacidad de descarga y la capacidad total de una batería o celda [15].

$$CE = \frac{Q_{descarga}}{Q} \quad (3)$$

D. Celda de Ion-Litio

Una celda de ion-litio es un dispositivo individual de almacenamiento eléctrico recargable, basado en la transferencia de iones de litio entre dos electrodos. Es el componente fundamental que al agruparse forma paquetes de baterías utilizados en los vehículos eléctricos y sistemas estacionarios [13].

E. Fallo de celda

Las celdas se degradan de manera progresiva por sobrecargas y tiempo de vida. Como consecuencia, la celda pierde capacidad, aumenta su resistencia en serie, aumenta la

corriente de autodescarga y disminuye la eficiencia coulómbica [13].

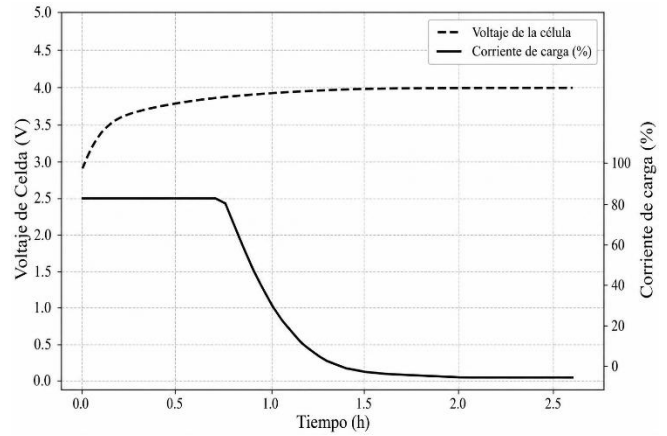


Fig. 1 Comportamiento característico en el proceso de carga de una batería ion-litio LifePo4 en función del tiempo. Adaptado de [7]

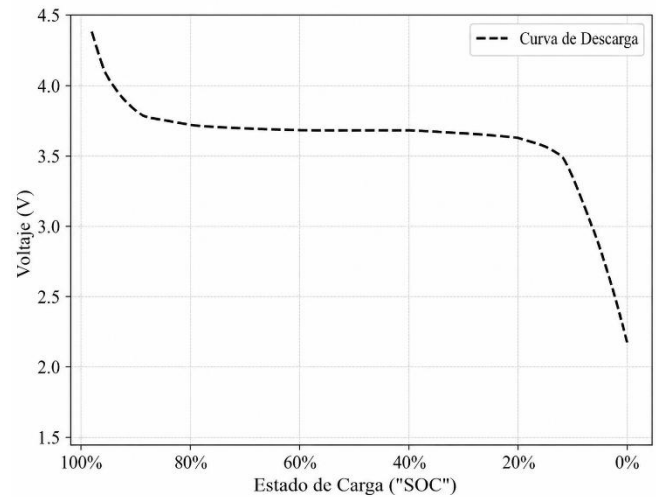


Fig. 2 Comportamiento característico de la curva de descarga en función del nivel de energía en baterías ion-litio LifePo4. Adaptado de [14].

F. Tipos de Celda

Las baterías de los vehículos eléctricos están compuestas por grupos de celdas, las cuales son las encargadas de almacenar energía eléctrica. En general, estas celdas son de tres tipos: celdas tipo Pouch, celdas prismáticas y celdas cilíndricas [13].

Las celdas cilíndricas destacan ventajas comparativas importantes como la resistencia a la presión, gestión térmica eficiente, facilidad de manufactura y costo [13]-[14]. Las celdas prismáticas son de forma rectangular y compacta, contando con menor cantidad de conexiones internas y menor eficiencia térmica, este tipo de celda es más complicada de enfriar y más costosa de fabricar [13]-[14]. Las celdas tipo Pouch tienen forma plana y flexible, envueltas en una lámina metálica, es muy ligera y de alta densidad energética, este tipo de celdas son

menos resistentes y más riesgosas de manipular, por lo que requieren estructuras externas de protección y enfriamiento [13]-[14]. La Tabla I presenta una comparación técnica de los tres tipos de celdas.

G. Sistema de gestión de batería (BMS, del inglés Battery Management System)

El sistema de gestión de batería monitorea la corriente, voltaje y temperatura y controla la apertura o cierre del circuito con las bornas de la batería mediante un relé general como medida de protección del equipo, estos sistemas pueden monitorear el funcionamiento de una celda o grupo de celdas [15].

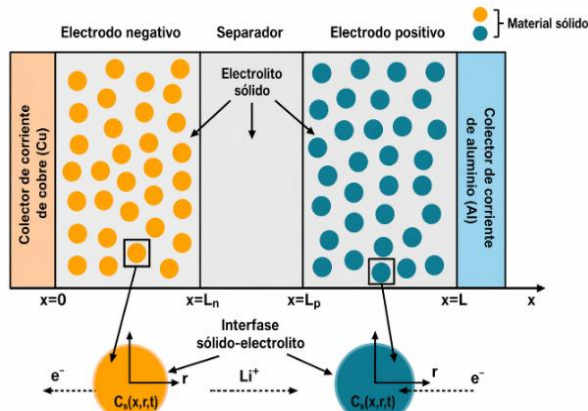


Fig. 3 Modelo diferencial pseudo-bidim. Adaptado de [16].

TABLA I
COMPARACIÓN TÉCNICA DE CELDAS DE IÓN-LITIO CILÍNDRICAS, PRISMÁTICAS Y POUCH [13].

	Cilíndrica	Prismática	Pouch
Tamaño	Pequeña a grande	Pequeña a grande	Pequeño a mediano
Capacidad	1-3.0 Ah	1-20 Ah	0.1-100 Ah
Carcasa	Metal o plástico duro	Metal ligero o plástico	Mylar suave
Sección	Circular	Rectangular	Plana
Terminales	Ninguno o pernos roscados	Pernos o agujeros roscados	Pestañas
Retención de expansión	Inherente	Puede requerir retención externa	Requiere retención externa
Aplicación	EV's personales, laptops y productos para el consumidor	Baterías estacionarias	Celulares, EV's de carrera
Ensamble	simple o complejo	Moderado o complejo	Complejo

III. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DE LABORATORIO

A. Equipos, herramientas e instrumentos para la evaluación de baterías.

Para poder rehabilitar baterías, el laboratorio debe contar con los equipos que permitan realizar los ensayos de carga y descarga de las celdas, el desbloqueo y programación de la BMS [17], un equipo para soldar platinas a los terminales de las celdas al momento de ensamblar nuevos paquetes [14], un instrumento que permita verificar el aislamiento de las carcasas de batería y uno para verificar la tensión de los nuevos packs

[10]. Los sets de herramientas deben contar con aislamiento Clase 0 ($< 1kV$). Estos sets deben contar con desarmador con cabeza tipo Torx, pues este tipo de tornillo es muy utilizado en baterías; además, se debe contar con equipos para medición de parámetros eléctricos [10].

B. Equipos y condiciones de seguridad

Según el documento “Guidance document: ev battery safe handling & storage” el laboratorio debe contar con una ventilación forzada o natural, cámaras térmicas con sensores de calor, detectores de gases, además con medios de contención de eventos térmicos tanto para incendio de baterías como otros equipos, pues los extintores no son eficientes para apaciguar incendios de baterías [18]. El personal debe contar con los Equipos de Protección Personal (EPP's). Los EPP's adecuados son calzado dieléctrico con punta reforzada Clase 0 ($< 1kV$), ropa de protección retardante de llama manga larga y de cobertura completa Categoría 2, protector ocular y facial Categoría 2 con protección para riesgo eléctrico y térmico y resistente al calor y salpicaduras, protección respiratoria con filtros P100 y cartuchos OV/AG y guantes con aislamiento Clase 0 ($< 1kV$) y sobreguantes CAT II [10]. Adicionalmente, en caso sea necesario, el sistema de control de temperatura debe detectar temperaturas bajas ($< 0^{\circ}C$) [19].

Se debe almacenar las celdas en contenedores resistentes y no conductores; además, segregar las zonas de almacenamiento de celdas sanas y dañadas pues las celdas dañadas presentan mayor probabilidad de eventos térmicos que podrían comprometer celdas en buen estado y se evita un efecto en cadena en caso se presente un accidente [10].

El laboratorio debe contar con una adecuada señalización de seguridad donde indique los peligros presentes y la información imprescindible. Se debe indicar las señales de advertencia de “riesgo eléctrico”, “riesgo de incendio”, “material peligroso”, “atmósfera potencialmente peligrosa”, teniendo de referencia la NTP 399.010-1. También se debe indicar las señales de obligación de “uso obligatorio de EPP's”, donde se indican todos los EPP's requeridos, “acceso a personal autorizado” y “trabajar en parejas”. Además, se deben colocar las señales de prohibición de “prohibido fumar”, “Prohibido el usar llamas abiertas”, “prohibido herramientas no aisladas” y “prohibido ingreso sin autorización”. Finalmente, las señales de emergencia necesarias en el laboratorio son “ruta de escape”, “salida de emergencia”, “ducha de emergencia y lavajos”, “área de contención de eventos térmicos” y “ubicación de manta ignífuga” [20].

Se debe contar con un documento de Análisis de Trabajo Seguro (ATS) y una matriz de Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgo (IPERC), que permitan estandarizar las actividades de los trabajadores, estando informado y pendiente de los peligros existentes. Adicionalmente, se debe contar con protocolos de seguridad ante cada incidente o accidente que puedan ocurrir en las instalaciones del laboratorio [20].

IV. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN

A. Procedimiento para la extracción de las celdas de las baterías.

La Fig. 4 muestra que la propuesta en cuatro fases para la gestión de baterías de segunda vida se estructura en un flujo sistemático que garantiza la seguridad y eficiencia del proceso de reutilización. La Fase 1 inicia con el desmontaje del paquete original proveniente de vehículos híbridos o eléctricos bajo estrictas normas de seguridad, empleando herramientas con aislamiento de 1000V y equipo de protección personal específico [14]. Durante la fase 1, se extrae la unidad de gestión de baterías (BMS) para un subproceso aislado de diagnóstico y reprogramación, permitiendo su posterior integración con la nueva configuración. En la Fase 2 etapa de validación por tipología, se identifican las celdas según su morfología: cilíndrica, prismática o pouch. Cada modelo es sometido a un control de tensión riguroso: se verifica un rango de 2.5V a 4.2V para celdas cilíndricas de ion-litio, valores de 7.2V o 9.6V para módulos prismáticos de NiMH, y una tensión nominal de aproximadamente 3.7V para celdas pouch [14]. Las unidades que no cumplen con estos umbrales son derivadas a un proceso de descarte para recuperación de materiales mediante molienda o hidrometalurgia/pirometalurgia [4]-[22]. Las celdas validadas avanzan hacia la Fase 3, caracterización avanzada que comprende ciclos de carga y descarga controlados, seguidos de la aplicación de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) para una determinación precisa del Estado de Salud (SoH) y la definición de su aplicación final [11]-[12]. Finalmente, en la Fase 4 el proceso concluye con el reensamblaje de nuevos paquetes en configuraciones serie y paralelo, la incorporación de la BMS configurada y una validación integral del pack completo [23]. En caso de detectar fallos en la prueba final, se activa un protocolo de desensamble e inspección individual para asegurar la fiabilidad del producto terminado

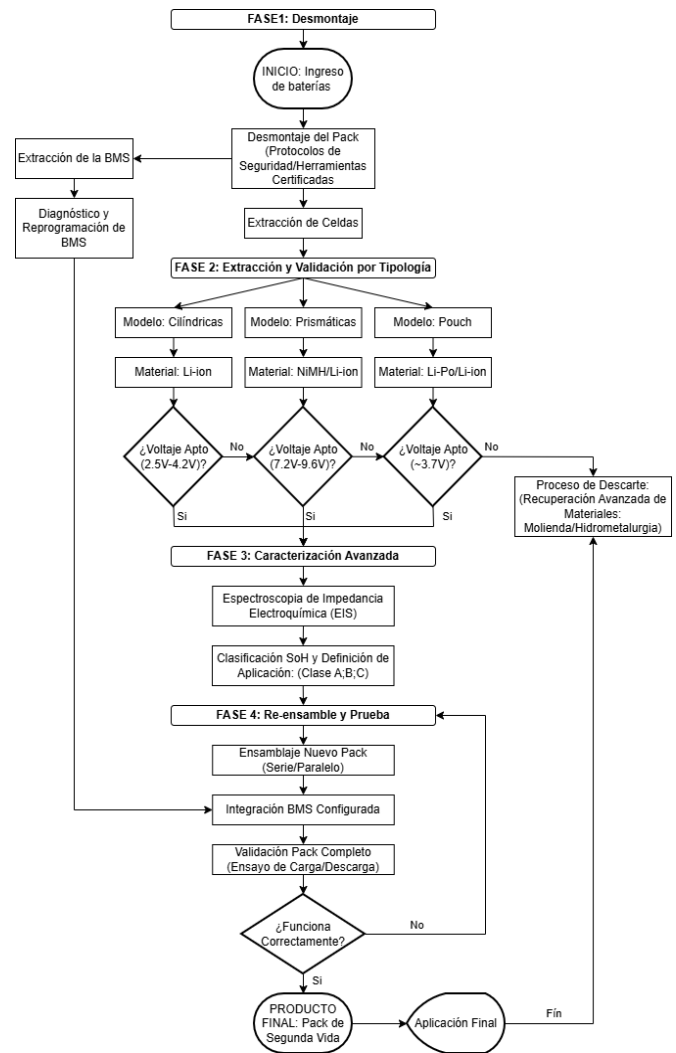


Fig. 4 Proceso de recuperación de baterías de segunda vida.

B. Procedimiento de seguridad ante accidentes e incidentes relacionados con la manipulación de baterías.

Ante un incendio en el laboratorio, lo primero es valorar con calma su magnitud y comprobar si pone en riesgo la estructura del lugar; si se trata de una situación grave, se debe evacuar de inmediato y avisar al cuerpo de bomberos. Si el fuego es incipiente y puede controlarse, se cortará el suministro eléctrico y se evacuará al personal que no participe en la respuesta. Luego, se cubrirá la celda o batería afectada con una manta ignífuga para contener la propagación y se aplicará un extintor de clase D a la base del fuego, sin retirar la manta, manteniendo siempre una distancia segura y realizando descargas cortas y controladas. Una vez sofocado, es fundamental dejar la manta en su lugar y vigilar durante un tiempo prolongado la temperatura y la posible emisión de gases, ya que, si el fuego se reactiva o las condiciones se tornan inseguras, se deberá evacuar nuevamente y esperar el cuerpo de emergencia.

Ante una fuga de gases, se debe suspender inmediatamente toda actividad, cortar el suministro eléctrico y activar los sistemas de ventilación y extracción de emergencia. El personal debe evacuar de forma ordenada e inmediata el área afectada utilizando los equipos de protección personal disponibles, evitando cualquier intento de manipulación de las celdas comprometidas. La zona debe permanecer aislada hasta que los niveles de gases se normalicen y se confirme la ausencia de riesgo mediante los sistemas de monitoreo. Las celdas involucradas deben considerarse no reutilizables y trasladarse, una vez controlada la situación, a contenedores ignífugos para su disposición final.

Ante una electrocución, primero se debe interrumpir el suministro eléctrico, en caso sea en contacto con la batería, alejar al accidentado de la batería evitando el contacto directo. Posteriormente, verificar el estado de consciencia y respiración de la víctima y sus signos vitales, realizar primeros auxilios en caso sea necesario y esté capacitado. Finalmente se debe trasladar al operario a los servicios de salud.

Ante un evento de arco eléctrico, se debe interrumpir de inmediato el suministro eléctrico, suspender todas las operaciones y evacuar el área afectada debido al riesgo de quemaduras, sobrepresión y proyección de material inflamable. El personal debe mantener distancia de seguridad y no reingresar hasta que se confirme la ausencia de tensión y el enfriamiento de los equipos involucrados. El sistema o pack afectado debe considerarse fuera de servicio hasta ser sometido a una inspección técnica completa.

Ante una perforación o derramamiento de celda, se debe detener inmediatamente la actividad, aislar el área y evitar cualquier manipulación adicional del elemento dañado. El personal debe mantener distancia de seguridad y utilizar equipos de protección personal completos, considerando la celda como potencialmente inestable desde el punto de vista térmico y químico. El componente afectado debe retirarse únicamente con herramientas aisladas y colocarse en un contenedor ignífugo, activándose la ventilación del área para prevenir acumulación de gases

A fin de garantizar la operatividad y el cumplimiento de los estándares técnicos, la Tabla II detalla el equipamiento y las herramientas requeridas para cada una de las fases del proceso de recuperación, en correlación directa con la metodología descrita en el diagrama de flujo de la Fig. 4. Por otro lado, la gestión integral del riesgo se aborda en la Tabla III, donde se consolidan tanto los elementos de protección personal (EPP) como las adecuaciones de infraestructura necesarias para la manipulación segura de sistemas de alta tensión. Finalmente, la propuesta de integración física de estos recursos se describe en la Fig. 5, la cual ilustra la disposición espacial del laboratorio y la distribución estratégica de los equipos, diseñada para optimizar el flujo de trabajo y maximizar la seguridad del personal.

TABLA II.
EQUIPAMIENTO TÉCNICO Y HERRAMENTAL SEGÚN FASE OPERATIVA

Fase del Proceso	Equipo / Herramienta	Modelo	Especificaciones Técnicas	Función en el Proceso
Fase 1: Desmontaje y Gestión de la BMS	Set de herramientas dieléctricas	PowerBuilt (33 pcs)	Aislamiento certificado Grado 0 (1 kV).	Desensamble seguro del pack original y módulos.
	Megóhmetro	Fluke 1503	Medición de resistencia de aislamiento.	Verificación de integridad eléctrica del contenedor.
	Programador de BMS	VVDI Prog (Xhorse)	Interfaz diagnóstico de lectura y escritura EEPROM.	Desbloqueo y reprogramación de la BMS original.
Fase 2: Extracción y Validación Tipología	Multímetro digital	Fluke (Serie 170)	Alta precisión en medidas de parámetros eléctricos DC	Medición de tensión de las celdas extraídas.
Fase 3: Caracterización Avanzada	Unidad de Espectroscopia (EIS)	Metrohm PGSTAT204 / FRA32M	Rango de frecuencia: 10 µHz a 1 MHz.	Análisis de impedancia para determinar salud química.
	Evaluable de Carga/Descarga	Heltec HT-ED10AC8V 20	8 canales, hasta 20V y 10A por canal.	Ejecución de ciclos controlados para medir capacidad.
	Registrador de Datos	Novus Field Logger	8 entradas analógicas (V, I, Temp).	Monitoreo y registro de variables durante ensayos.
Fase 4: Re-ensamble y Validación	Ecuilibrador Activo	BMS Heltec HTB-J32S25A	Balaceo para 2 a 32 celdas en serie.	Nivelación de voltajes entre celdas del nuevo pack.
	Battery Spot Welding Machine	Heltec HT-SW01A	Corriente 2000A y potencia 11.6kW	Soldador de punto
	Estación de Trabajo	Laptop HP Victus	Intel i7 (13va Gen), 24GB RAM.	Gestión de software de monitoreo y configuración.

TABLA III.
PROTECCIÓN DE SEGURIDAD, EPP Y CONTROL AMBIENTAL,

Categoría	Elemento de Protección	Modelo Sugerido	Descripción Técnica	Riesgo Mitigado
Protección Personal (EPP)	Guantes aislados	Sofamel Grado 0	Certificados para trabajos de hasta 1 kV.	Choque eléctrico por contacto directo.
	Guantes de protección	Catu CG 981	Resistente al fuego y anticorte	Complemento a los guantes aislados.
	Caret anti-arco	DELTAPLUS Visor Flash	Resistencia de 14 Cal/cm².	Quemaduras por arco eléctrico en bornes.
	Calzado dieléctrico	Eins / Kofi	Resistencia hasta 18 kV con punta reforzada.	Descargas a tierra y accidentes mecánicos.
	Casco de seguridad	Casco 3M	Cascos resistentes ajustables y dieléctricos.	Caída de objetos elevados.
	Mameluco	Bizflame FR50 Portwest	Tela ignífuga con cintas retroreflectantes	Evita daños por derrames de elementos químicos.
	Respirador Full-Face	Elipse (Filtros P100)	Protección contra partículas y vapores.	Inhalación de gases en caso de fuga química.
Seguridad Ambiental	Detector multigas	Siegrist Ventis Pro5	Sensor para CH4, O2, CO, H2S, NO2, CO2.	Exposición a atmósferas peligrosas o tóxicas.
	Termómetro para altas temperaturas	Armotec S-H10	Termómetro de precisión 1°C, resolución 0.1°C	En caso de incendio, activa el protocolo de seguridad.
	Contención térmica	Manta ignífuga / PyroBubble	Arena especial y mantas de Kevlar.	Sofocación de incendios por fuga térmica (<i>Thermal Runaway</i>).
	Alfombra aislada	Sofamel Clase 0	Superficie de aislamiento dieléctrico (< 1 kV).	Paso de corriente a través del operario.

Gestión de Entorno	Señalización	Normativa NTP 399.010-1/ UL 1974	Obligación, prohibición y emergencia.	Errores de procedimiento y falta de advertencia.
	Almacenamiento de las celdas	Contenedor	Caja de transporte S-Box 2 Basic	Aislamos las celdas descartadas.

encuentran degradadas sin requerir ciclos térmicos extensos, logrando un equilibrio técnico superior entre el costo de adquisición de equipos y la sensibilidad del diagnóstico.

VI. CONCLUSIONES

La implementación de un laboratorio especializado para baterías de segunda vida permite abordar de manera estructurada y segura la reutilización de celdas provenientes de baterías automotrices descartadas, reduciendo el desperdicio de materiales críticos y el impacto ambiental asociado a su disposición final.

El diseño del laboratorio, basado en una adecuada zonificación, un flujo de procesos claramente definido y la selección de equipamiento específico, garantiza condiciones controladas para la evaluación, rehabilitación y ensamblaje de nuevos paquetes de baterías. Asimismo, la incorporación de medidas de seguridad, sistemas de detección, equipos de protección personal y protocolos de actuación ante incidentes resulta fundamental para mitigar los riesgos eléctricos, térmicos y químicos inherentes al manejo de baterías de ión-litio.

El piloto propuesto evidencia la viabilidad técnica de implementar un laboratorio de baterías de segunda vida utilizando equipamiento comercial disponible que cumpla los requerimientos de seguridad y control. Finalmente, el piloto modelo propuesto constituye una base replicable para futuras investigaciones y aplicaciones industriales, contribuyendo al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y al fortalecimiento de la economía circular en el sector de la movilidad eléctrica.

En una siguiente etapa se implementará el laboratorio piloto, donde se recolectarán datos empíricos sobre el volumen de procesamiento de celdas, el comportamiento térmico durante los ensayos y los costos reales de reacondicionamiento para contrastarlos con la presente propuesta.

REFERENCIAS

- [1] C. Bermeo, AUTOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE Y LA SOCIEDAD, 2022, p. 25.
- [2] E. Chaves Ramírez, Movilización vehicular y medio ambiente, ¿son los autos eléctricos la ruta hacia una solución definitiva?: el caso costarricense, *Revista Académica Arjé*, vol. 7, n.º 1, pp. 28-62, jun. 2024, doi: 10.47633/kpz5jz23.
- [3] N. Kebir *et al.*, Second-life battery systems for affordable energy access in Kenyan primary schools, *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 11, ene. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28377-7.
- [4] A. Azad, F. F. Nia, A. Anvari-Moghaddam, D. Flynn, M. Longo, y M. Shafie-khah, Second-life applications for retired electric vehicle batteries: Challenges, opportunities,

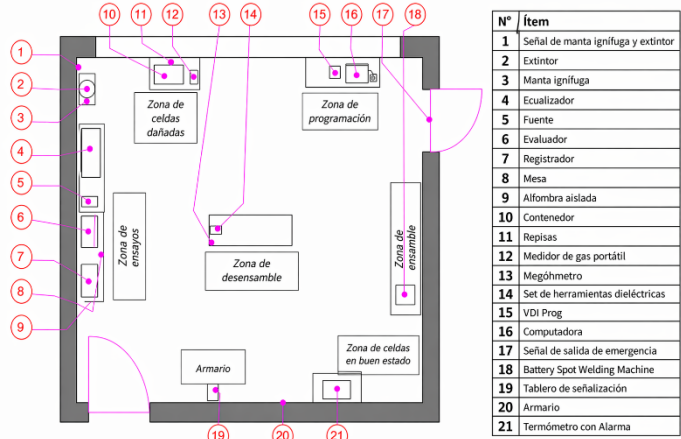


Fig. 5 Distribución de equipos

V. DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN TÉCNICA

A la falta de datos empíricos provenientes de una ejecución física en esta fase inicial, la viabilidad técnica del diseño de este laboratorio se fundamenta analíticamente en su estricta alineación con los estándares de la industria, específicamente con la norma internacional UL1974 “*Standard for Evaluation for Repurposing Batteries*”. Esta normativa establece los requisitos de seguridad, trazabilidad y evaluación para las baterías de ion-litio que serán reacondicionadas. Asimismo, la selección del equipamiento de medición y la zonificación propuesta en las secciones anteriores aseguran que los procesos de clasificación y diagnóstico del estado de salud (SoH) cumplan los protocolos de mitigación de riesgos y confiabilidad exigidos a nivel global, permitiendo una transición de la teoría a la práctica [24].

Como principal aporte y elementos de novedad de esta propuesta, está la integración de un enfoque de diagnóstico multicapa. Las instalaciones tradicionales de segunda vida dependen casi exclusivamente de pruebas de capacidad prolongadas mediante ciclos completos de carga y descarga siendo precisos, pero estos métodos convencionales representan un cuello de botella operativo por el tiempo e infraestructura que demandan, muestra que nuestra metodología propuesta compensa esto incorporando Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) combinada con el análisis de resistencia interna en corriente continua (DCIR). Investigaciones recientes demuestran que las características extraídas mediante EIS, como la resistencia de transferencia de carga, reflejan directamente los mecanismos centrales del envejecimiento en la interfaz de la celda y tienen una fuerte correlación monótonica con la pérdida de capacidad [24]. Este enfoque permite aislar rápidamente las celdas que se

- and future directions, *Journal of Energy Storage*, vol. 151, p. 120190, mar. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.120190.
- [5] Q&A, RECICLAJE DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (VE). marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: www.no-burn.org/batteries/#ev
- [6] M. K. Al-Alawi, A. Jaddoa, J. Cugley, y H. Hassanin, Enhanced state of charge estimation through Cluster-Based Learning Model: Impact study on degradation and profitability of second-life electric vehicle batteries, *Journal of Energy Storage*, vol. 117, p. 116071, may 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116071.
- [7] ProUSAR, Guía técnica para la segunda vida y gestión integral de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos. 2025.
- [8] Z. Alam y S. H. Gheewala, Recharging the planet: The sustainability potential of second-life electric vehicle batteries, *Journal of Energy Storage*, vol. 144, p. 119720, ene. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.119720.
- [9] A. Berastain *et al.*, On the Viability of Reused Vehicle Li-Ion Batteries as PV Storage for High-Altitude Rural Areas: Case Study in Cusco-Peru, *IEEE Access*, vol. 14, pp. 18730-18748, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3657190.
- [10] Supplier, Advancing Sustainability in the Built Environment: New Building Recommendations for Suppliers. abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.supplierspartnership.org/resources/SPNewBldgRecommendationsFinalJune2025.pdf>
- [11] M. Shahjalal *et al.*, A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues, *Energy*, vol. 241, p. 122881, feb. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122881.
- [12] J. Zhu *et al.*, End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries, *Cell Reports Physical Science*, vol. 2, n.º 8, p. 100537, ago. 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.
- [13] D. Andrea, *Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns, Volume 2, Applications*. Artech House, 2020.
- [14] E. Palomeque Fernández y G. Coello Álvares, Manual sobre Procesos de Segunda Vida de Baterías de Vehículos Híbridos y Eléctricos. 10 de mayo de 2025.
- [15] E. M. Pastuña Guanoluisa y F. G. Apolo Bustos, IMPLEMENTACIÓN DE UN PACK DE BATERÍAS RECICLADAS DE ION-LITIO EN UNA MOTONETA ELÉCTRICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, p. 133, 2022.
- [16] M. Terkes, A. Demirci, E. Gokalp, y U. Cali, Battery Passport for Second-Life Batteries: Potential Applications and Challenges, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 128424-128467, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3450790.
- [17] H. A. Gabbar, A. M. Othman, y M. R. Abdussami, Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards, *Technologies*, vol. 9, n.º 2, p. 28, jun. 2021, doi: 10.3390/technologies9020028.
- [18] S. S. Zhang, K. Xu, y T. R. Jow, Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells, *Electrochimica Acta*, vol. 48, n.º 3, pp. 241-246, dic. 2002, doi: 10.1016/S0013-4686(02)00620-5.
- [19] NTP 399.010-1 2016. Accedido: 24 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.servilex.pe/documents/ambiente/NTP%20399.010-1-unlock.pdf>
- [20] Republica del Perú, Reglamento de la Ley N° 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2016.
- [21] M. F. Börner *et al.*, Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries, *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, n.º 10, p. 101095, oct. 2022, doi: 10.1016/j.xcrp.2022.101095.
- [22] A. Mesa Lozano, Diseño y montaje de una bancada de laboratorio para ensayar baterías de litio, Universidad Politécnica de Madrid, s.f.
- [23] UL 1974 Testing & Certification. Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.intertek.com/batteries/ul-1974/>
- [24] Y. Wang, Q. Wang, C. Wei, L. Wang, G. Guo, y Y. He, Accurate SOH Estimation for Second-Life Lithium-Ion Batteries Using a Prior-Informed Hierarchical Fusion Network, *Processes*, vol. 14, n.º 5, p. 768, ene. 2026, doi: 10.3390/pr14050768.