

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Metodología técnico-económica para remanufactura de baterías Ni-MH en
vehículos híbridos y eléctricos.

INGE-2953

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Andrea Alejandra Matamoros Cunalata

Fabián Andrés Aldaz Muñoz

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto es dedicado a quienes son mi ejemplo a seguir y quienes me han demostrado que siempre se puede salir adelante con esfuerzo, Flor Cunalata y Maria Nuela, mi familia, que con el arduo esfuerzo y trabajo de las dos a lo largo de los años me entregaron la mejor educación, valores y conciencia como persona y futura Ingeniera Mecánica. Gracias por siempre permitir que pueda tomar mis decisiones y escoger mi camino a seguir. Para David H., gracias a que se ha convertido en mi mejor amigo, mi novio, me recuerda incesantemente que pese a las adversidades, todo saldrá bien si confío en Dios. Finalmente, a todos los amigos que he hecho en el camino, me han proporcionado grandes aprendizajes y buenos recuerdos, especialmente a Cristhian A. que se ha convertido en un buen amigo y colega.

Dedico este trabajo a mis queridos padres, Fabián Aldaz y Janeth Muñoz, cuyo amor, paciencia y esfuerzo constante han sido la base de todo lo que soy y he logrado, enseñándome con su ejemplo la importancia del trabajo, la perseverancia y los valores que han guiado mi vida y mi formación académica; así mismo, dedico estas líneas a mi hermano Fernando Aldaz, por su apoyo incondicional, comprensión y ánimo constante, que hicieron más llevaderos los retos y más alcanzables las metas, agradeciéndoles desde lo más profundo de mi corazón por ser mi fuerza, mi inspiración y mi refugio, recordándome siempre que los logros se construyen no solo con esfuerzo individual, sino con amor, unidad y apoyo familiar.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todos los profesores que me han enseñado a lo largo de mi trayectoria en Espol, a mi profesor y a mi tutor, cuya guía ha sido fundamental en esta última gran etapa de mi carrera. Un profundo agradecimiento al Dr Peralta, Dr Amaya, Master Fuentes y el Ing. Cabrera que han brindado su gran soporte y conocimiento en el proyecto de materia integradora, enriqueciendo mi formación académica e impulsando a ser una gran profesional. A todos ustedes, mi más profunda gratitud y reconocimiento de su excelente gestión como docentes y profesionales.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todos los docentes que han formado parte de mi trayectoria en la ESPOL, aportando sus conocimientos y enseñanzas. Mi especial reconocimiento a mi profesor y a mi tutor, cuyo apoyo, orientación y acompañamiento resultaron esenciales en esta etapa final de mi carrera. Asimismo, agradezco enormemente al Máster Henry Fuentes, Dr. Peralta, Dr. Amaya e Ing. Cabrera, por compartir su experiencia, guía y dedicación durante el desarrollo del proyecto de la materia integradora, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y profesional. A todos ustedes, expreso mi sincera gratitud y respeto, valorando su compromiso y excelencia como educadores y profesionales, los cuales han dejado una huella perdurable en mi formación

Declaración Expresa

Nosotros Fabián Andrés Aldaz Muñoz, Andrea Alejandra Matamoros Cunalata acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, __29 de mayo__ del 2025.



Fabián Andrés Aldaz
Muñoz



Andrea Alejandra
Matamoros Cunalata

Evaluadores

PhD. Francis Roderich Loayza Paredes

Profesor de Materia

**Máster Galo Andrés Durazno
Palacios**

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto desarrolló una metodología de remanufactura orientada a extender la vida útil de los módulos de baterías NiMH empleados en vehículos híbridos, bajo un enfoque de sostenibilidad y reducción de impactos ambientales. El objetivo se centró en diseñar un procedimiento técnico que garantizara seguridad y confiabilidad, formulándose la hipótesis de que la aplicación de procesos de diagnóstico, clasificación y reacondicionamiento permitía recuperar la funcionalidad de los módulos. La justificación se basó en la necesidad de disminuir los costos de mantenimiento de vehículos híbridos y aprovechar de manera eficiente los recursos existentes. El desarrollo del trabajo incluyó la recolección y desmontaje de baterías, la aplicación de pruebas de carga y descarga, así como el cumplimiento de normas de seguridad. Los resultados demostraron que un porcentaje significativo de módulos recuperó parámetros aceptables de voltaje, resistencia interna y capacidad, validando la propuesta metodológica. Finalmente, se concluyó que la remanufactura constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable que aporta a la sostenibilidad en el sector automotriz.

Palabras clave: SOC, SOH, resistencia interna, Carga y Descarga.

Abstract

The project developed a remanufacturing methodology aimed at extending the lifespan of NiMH battery modules used in hybrid vehicles, focusing on sustainability and reducing environmental impacts. The objective was to design a technical procedure that would guarantee safety and reliability, hypothesizing that the application of diagnostic, classification, and reconditioning processes would restore the modules' functionality. The justification was based on the need to reduce hybrid vehicle maintenance costs and efficiently utilize existing resources. The work included battery collection and disassembly, charge and discharge testing, and compliance with safety standards. The results demonstrated that a significant percentage of modules recovered acceptable voltage, internal resistance, and capacity parameters, validating the proposed methodology. Finally, it was concluded that remanufacturing constituted a technically and environmentally viable alternative that contributes to sustainability in the automotive sector.

Keywords: SOC, SOC, internal resistance, charge and discharge.

Índice general

1.1 Introducción.....	18
1.2 Descripción del Problema.....	20
1.3 Justificación del Problema.....	20
1.4 Objetivos.....	21
1.4.1 Objetivo general.....	21
1.4.2 Objetivos específicos.....	21
1.5 Marco teórico.....	21
1.5.2 Impacto ambiental.....	21
1.5.3 Demandas energéticas y desafíos en vehículos híbridos.....	22
1.5.4 Tipos de baterías y características técnicas.....	22
1.5.5 Composición química de la batería NiMH.....	23
1.5.6 Características del banco de baterías Ni-MH.....	24
1.5.7 Fundamento técnico del balance energético.....	27
1.5.8 Protocolos para la recolección segura de baterías.....	28
1.5.9 Análisis ciclo de vida.....	28
1.5.10 Ecuaciones para justificar viabilidad de una metodología.....	29
2. Metodología.....	2
2.1 Alternativas de solución.....	3
2.2 Matriz de decisión.....	8
2.3 Metodología de remanufactura detallada.....	10
2.4 Instrumentos del proceso.....	18
3. Resultados y análisis.....	20
3.1 Batería Toyota Prius C.....	20
3.2 Batería Toyota Prius.....	24
3.4 Revisión de parámetros en batería operativa mediante Techstream.....	42
3.5 Establecimiento de criterios de evaluación de módulos.....	46
3.6 Consideraciones éticas y de seguridad.....	51
3.7 Análisis ciclo de vida.....	52
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	61
4.1.1 Conclusiones.....	63
4.1.2 Recomendaciones.....	64

Abreviaturas

ACV	Análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment)
BMS	Battery Management System (Sistema de Gestión de Batería)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Híbrido)
HL	High Level (Alto Nivel, generalmente de alerta o señal)
HMI	Human-Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina)
HV	High Voltage (Alto Voltaje)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida)
LCI	Life Cycle Inventory (Inventario del Ciclo de Vida)
SOC	State of Charge (Estado de Carga de la batería)
SOH	State of Health (Estado de Salud de la batería)
VMS	Voltaje mínimo seguro
VMA	Voltaje mínimo admisible

Simbología

Al	Aluminio
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de carbono
KOH	Hidróxido de potasio
La	Lantano
Li ion	Batería de ion de litio
Mn	Manganeso
NaOH	Hidróxido de sodio
Nd	Neodimio
Ni	Níquel
NiCd	Batería de níquel cadmio
NiMH	Batería de níquel hidruro metálico

Índice de figuras

Figura 1 Ventas mensuales de vehículos híbridos	18
Figura 2 Venta de Enero - Agosto en base a su tipo de combustible	19
Figura 3 Diagrama Banco de Baterías NiMH	25
Figura 4 Marco de evaluación de ciclo de vida	26
Figura 5 Caja negra de la Alternativa 1	28
Figura 6 Caja negra de la Alternativa 2	35
Figura 7 Caja negra de la Alternativa 3	37
Figura 8 Diagrama de flujo del reacondicionamiento de una batería NiMH	38
Figura 9 Diseño de balanceador de módulos	42
Figura 10 Ciclo de vida de las baterías NiMH para vehículos híbridos	52
Figura 11 Banco de Batería NiMH de 20 módulos	56
Figura 12 Banco de Batería NiMH de 28 módulos	57
Figura 13 Módulo 2	58
Figura 14 Módulo 21	59
Figura 15 Ejemplo de Módulo cargando	61
Figura 16 Corriente de carga vs tiempo módulo 1	63
Figura 17 Módulos ubicados en balanceador	64
Figura 18 Ejemplo de Módulo descargando	67
Figura 19 Gráfica de cada módulo con la corriente que cede en descarga	68
Figura 20 Gráfica de cada módulo con la resistencia interna en descarga	70
Figura 21 Tiempo, corriente y voltaje en descarga módulo 19	71
Figura 22 Tiempo, corriente y voltaje en descarga módulo 19	71
Figura 23 Tiempo de descarga y voltaje de descarga designado, SOC, SOH	72
Figura 24 Gráficas de voltaje y corriente vs tiempo en descarga módulo 19	72
Figura 25 Gráficas de voltaje y SOC vs tiempo en carga y descarga módulo 19	74
Figura 26 Software Techstream	75
Figura 27 Introducción de datos para reconocimiento de vehículo	74
Figura 28 SOC All Bat, VL, VH, SOC máx y mín	76
Figura 29 Voltaje en pares de cada par de módulos	77
Figura 30 Resistencia interna de algunos módulos	79
Figura 31 Resistencia interna de cada módulo	80

Figura 32 SOH final de cada módulo basado en los datos obtenidos en simulación	80
Figura 33 SOH inicial de cada módulo basado en los datos obtenidos en experimentación	83
Figura 34 Flujo de materiales	84
Figura 35 Contribución por etapa de emisiones de CO2	85
Figura 36 Comparación ambiental de un Pack nuevo y la batería en proceso	85

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de tipos de baterías recargables y sus características técnicas	46
Tabla 2 Características del banco de baterías Ni - MH	48
Tabla 3 Ventajas y desventajas de la Alternativa 1	60
Tabla 4 Ventajas y desventajas de la Alternativa 2	62
Tabla 5 Ventajas y desventajas de la Alternativa 3	64
Tabla 6 Matriz de decisión con las 3 alternativas propuestas en el punto 2.1	65
Tabla 7 Evaluación de alternativas en base a criterios y sumatoria final	67
Tabla 8 Ciclo de Carga Batería de módulo 1	87
Tabla 9 Ciclo de descarga de módulo 1	89
Tabla 10 Medición de voltaje inicial para módulo 1	91
Tabla 11 Datos de carga en módulo 1	94
Tabla 12 Datos de voltaje módulo 1 después de un lapso de tiempo en el balanceador	96
Tabla 13 Datos de corriente en función del tiempo en módulo 1	97
Tabla 14 Estimación de Resistencia Interna en descarga para módulo 1	99
Tabla 15 Estimación de Capacidad real de módulo 1	99
Tabla 16 Estimaciones de estado de salud(SOH) inicial de cada módulo	101
Tabla 17 Datos módulo 1 en simulación	105
Tabla 18 Voltaje bajo, SOC en comparativa de batería experimentada y en uso	114
Tabla 19 Total energético estimado	122
Tabla 20 Van, Tir, Payback	123
Tabla 21 Ciclo de Carga de todos los módulos	172
Tabla 22 Ciclo de descarga de todos los módulos	173
Tabla 23 Medición de voltaje inicial para cada módulo	175
Tabla 24 Medición corriente descarga, voltaje en función del tiempo de las 28 módulos	296
Tabla 25 Tabla de balanceo de todos los módulos	298
Tabla 26 Estimación de Resistencia Interna en descarga para todos los módulos	300
Tabla 27 Estimación de Capacidad Real para todos módulos	303
Tabla 28 Estimaciones de estado de salud(SOH) inicial de cada módulo	305
Tabla 29 Datos de cada módulo en simulación	308
Tabla 30 Ciclo de descarga	419
Tabla 31 Resistencia interna, SOH Y SOC para cada módulo	421

Tabla 32 Voltaje bajo, SOC en comparativa de batería experimentada y en uso	424
Tabla 33 Comparación cuantitativa de emisiones de CO2	425
Tabla 34 Impacto ambiental de las baterías	426
Tabla 35 Lista de elementos utilizados en experimentación	428
Tabla 36 Inversión inicial del proyecto	430
Tabla 37 Costos	431
Tabla 38 Flujo de caja Proyectado	432
Tabla 39 Lista de Materiales	433

Capítulo 1

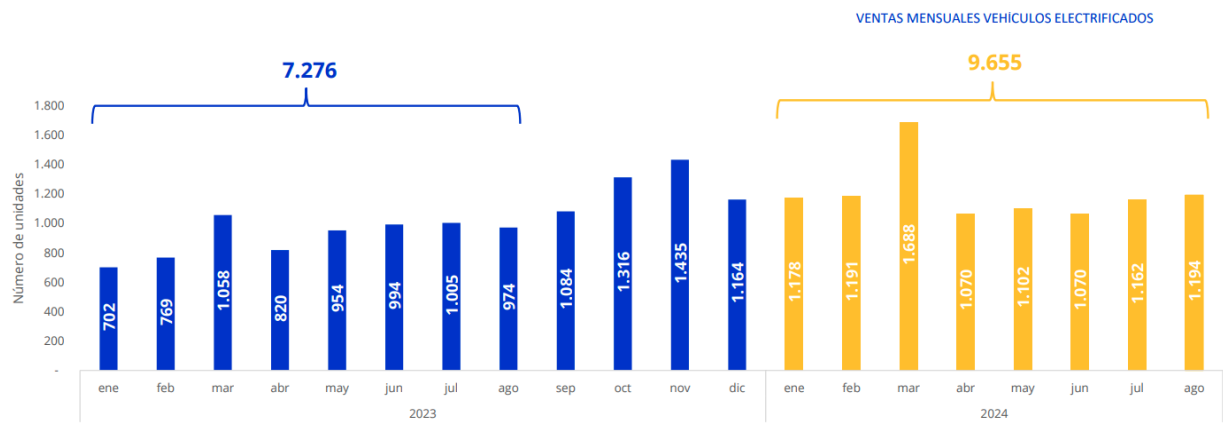
1.1 Introducción

En los últimos años, Ecuador ha registrado un aumento en la comercialización de vehículos híbridos. Estos integran un sistema de tracción compuesto por un motor eléctrico, un motor de combustión y una batería de alto voltaje como fuente de energía. Con más de 20.000 unidades vendidas entre 2009 y 2020, se determina una problemática relacionada con el destino de estas baterías, muchas de las cuales han llegado al final de su vida útil [1].

La figura 1 permite visualizar una tendencia continúa en crecimiento, a continuación, se presenta la cantidad de vehículos híbridos y eléctricos que se vendieron desde enero del 2023 hasta agosto del 2024 (Vehículos electrificados se refiere a híbridos convencionales y enchufables, eléctricos de rango extendido y de batería) [2].

Figura 1

Ventas mensuales de vehículos híbridos entre 2023 y 2024

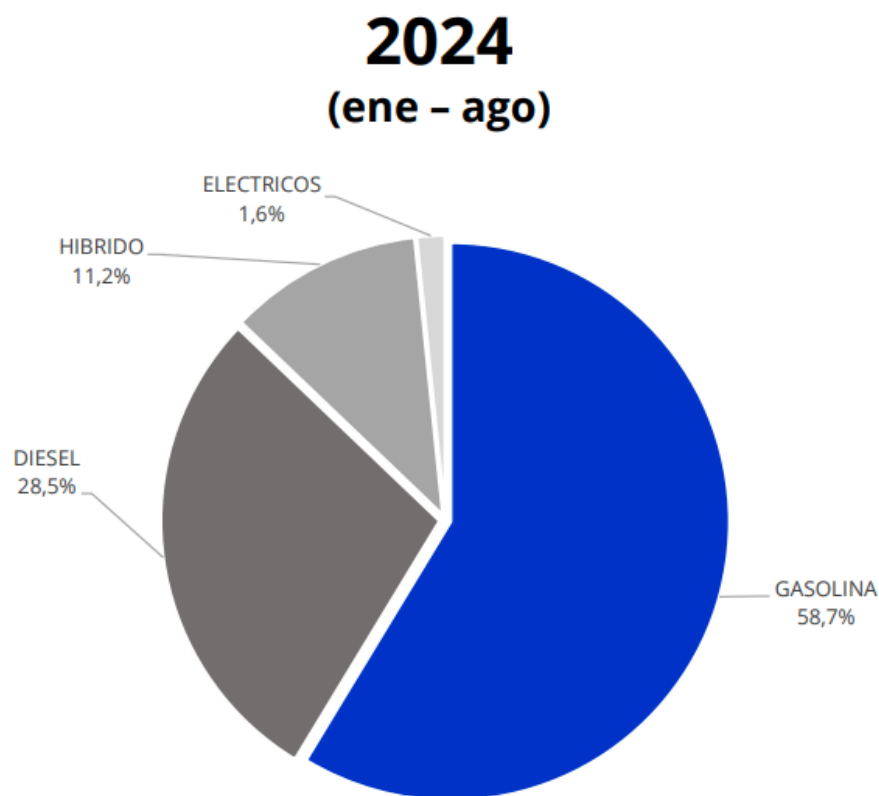


Nota: Datos tomados del boletín de ventas prensa septiembre (2024).

Se determinó que en Ecuador la venta de vehículos híbridos en el año 2024 fue mayor que en esos mismos meses que el año 2023, tal como se logra visualizar en la figura 2:

Figura 2

Venta de vehículos entre Enero - Agosto [2024] en base a su tipo de combustible



Nota. Datos tomados del boletín de ventas prensa septiembre (2024).

De acuerdo con la figura 2 entre enero y septiembre de 2024, las ventas de vehículos híbridos en Ecuador alcanzaron las 9.419 unidades, lo que representa un incremento del 31% en comparación con el mismo período de 2023. Este aumento se traduce en una participación del 11,3% en el total de ventas de vehículos en el país. Entonces el incremento sostenido en ventas de este tipo de vehículos refleja una transición hacia alternativas de movilidad más sostenibles, pero esto implica nuevos desafíos con respecto a la gestión del vehículo, su batería, tratamientos para garantizar la sostenibilidad del sector automotriz.

1.2 Descripción del Problema

En Ecuador, no existen políticas o normas estandarizadas para la recolección, clasificación, evaluación o remanufactura de baterías Ni-MH provenientes de HEV. En consecuencia, surge la necesidad de desarrollar metodologías que permitan evaluar técnica y económicamente el potencial de recuperación de estas baterías, y que sean aplicables a escala local [1].

El presente documento se basará en un caso de estudio que hay en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), particularmente en el laboratorio de CAMPRO, donde se dispone de dos baterías Ni-MH extraídas de un vehículo híbrido marca Toyota, en la cual su batería se compone de 28 módulos. Esto se realizará en el laboratorio CAMPRO, dedicado a la investigación y mecanización.

El estudio aborda la falta de una metodología estandarizada para recuperar baterías Ni-MH usadas, considerando como variables clave el voltaje, capacidad nominal y resistencia interna.

1.3 Justificación del Problema

La ausencia de metodologías estandarizadas para diagnosticar, evaluar y reutilizar baterías Ni-MH implica un desperdicio de recursos valiosos. Una cantidad abrupta de módulos que aún conservan capacidad funcional son descartados prematuramente. Esta situación es compleja en un contexto global de creciente escasez de materias primas críticas como el níquel, el lantano y el cobalto, cuya extracción implica altos costos ambientales y sociales [3]. Entonces la gestión inadecuada y el descarte incorrecto de estas baterías generan impactos ambientales negativos significativos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología técnica y económicamente viable para la remanufactura de baterías Ni-MH mediante inspección visual, pruebas eléctricas y análisis de ciclo de vida (ACV), a fin de extender su vida útil y reducir el impacto ambiental de su disposición final.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado funcional de la batería Ni-MH del Toyota Prius mediante pruebas eléctricas y químicas para identificar módulos reutilizables.
- Establecer parámetros técnicos de calidad y seguridad para evaluar la eficiencia del proceso de remanufactura propuesto.
- Levantar una metodología general para la remanufactura de baterías Ni-MH, aplicable a sistemas de tracción de vehículos híbridos y eléctricos, basada en buenas prácticas técnicas, criterios de seguridad y sostenibilidad.
- Analizar la viabilidad económica y ambiental del proceso a través de indicadores de costo, ciclo de vida y reducción de residuos.

1.5 Marco teórico

1.5.2 Impacto ambiental

El impacto ambiental en general es determinante en la degradación de la atmósfera terrestre, como el efecto invernadero. Pero el principal responsable es el dióxido de carbono (CO₂). En Ecuador, el sector transporte constituye uno de los principales generadores de emisiones, representando el 43,22 % del total del sector energético [4].

Entonces conviene señalar que las baterías NiMH, al cumplir su tiempo de vida estimado, específicamente en aplicaciones vehiculares, mantienen un porcentaje de capacidad energética, lo que las convierte en candidatas idóneas para una “Segunda Vida” en sistemas estacionarios de almacenamiento [5].

1.5.3 Demandas energéticas y desafíos en vehículos híbridos

Dado la inexistencia de normas estandarizadas para el tratamiento de las baterías, hay un desperdicio de recursos no renovables y con dificultades en su proceso de extracción, traslado, etc. Estos packs de baterías tienden a mostrar un voltaje nominal anormal ya sea superior o inferior al esperado respecto a los demás módulos [6] lo que implica que suelen ser reemplazadas de forma completa cuando en realidad sólo deberían reemplazar la unidad en problema.

1.5.4 Tipos de baterías y características técnicas

En la Tabla 1 se presenta una comparación técnica entre los principales tipos de baterías recargables utilizadas en aplicaciones automotrices: níquel metal hidruro (NiMH) y iones de litio (Li-ion) [7].

Tabla 1

Comparación de tipos de baterías recargables y sus características técnicas

Parámetro	NiMH	Ion de Litio (Li-ion)
Voltaje nominal por celda	1,2 V	3,6–3,7 V
Densidad de energía	60–120 Wh/kg	150–250 Wh/kg
Ciclos de vida	500–2 000	1 000–2 500
Eficiencia de carga	66–75 %	90–99 %
Autodescarga mensual	20–30 %	1–5 %
Impacto ambiental	Menos tóxica que NiCd; reciclable	Menos tóxica, pero reciclaje más complejo
Aplicaciones comunes	Vehículos híbridos, herramientas eléctricas	Electrónica portátil, vehículos eléctricos

Nota. Datos obtenidos de "Batteries in a Portable World - A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers" (2021)

Baterías de iones de Litio

Las baterías de iones de litio son baterías que se usan en aplicaciones como dispositivos electrónicos portátiles, sistemas de almacenamiento estacionario y en vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética, bajo peso y eficiencia en la entrega de energía [29].

Baterías de Níquel Metal Hidruro

Las baterías Ni-MH son baterías que se usan comúnmente en equipos domésticos recargables y en vehículos híbridos, como en varias generaciones de modelos Toyota Prius [5]. Su reciclaje se centra en la recuperación de níquel y tierras raras, mediante procesos mecánicos y pirometalúrgicos. Aunque presentan menor complejidad química que las baterías de litio, su tratamiento adecuado evita la disposición inadecuada y permite incorporar materiales valiosos a la cadena productiva, favoreciendo la economía circular [30].

1.5.5 Composición química de la batería NiMH

La batería de *NiMH* posee un cátodo que tiene un núcleo de *Ni* recubierto con *NaOH*, y el ánodo suele ser $MnNi_{3.5}, Co_{0.8}, Mn_{0.4}, Al_{0.3}$. Generalmente se utiliza poliamida o polipropileno como un tipo aislante entre los dos electrodos y la solución de potasio (*KOH*) utilizado como electrolito [8].

Reacción electroquímica global de una batería:



Reacciones parciales

Las reacciones generan el intercambio de electrones y la transformación de los compuestos activos en el ánodo y el cátodo durante los procesos de carga y descarga, con el objetivo de identificar los factores que afectan la capacidad, eficiencia y autodescarga del sistema [9].

Semirreacción de reducción en el cátodo:



Semirreacción de oxidación en el ánodo:



1.5.6 Características del banco de baterías Ni-MH

El híbrido Prius de 2010 utiliza un paquete de aluminio con 28 módulos de la batería Ni-MH fabricadas por Panasonic Holdings Corporation para Toyota, que suman una capacidad notablemente robusta para aplicaciones vehiculares [10].

Tabla 2*Características del banco de baterías Ni - MH*

<i>Características del banco de baterías Ni - MH</i>	
<i>Item</i>	<i>Descripción</i>
Voltaje nominal por célula	1,2 V
Tensión del paquete	201,6 V (120 x 1,2 V)
Capacidad nominal del paquete	6,5 Ah
Número de módulos	28 módulos compuestos por bloques de 6 celdas
Peso del paquete	41 kg
Peso del módulo NiMH	1.04 kg
Rango operativo de voltaje por celda durante descarga	1,00 V a 1,49 V
Capacidad útil medida	6,8 Ah (descarga) / 7,7 Ah (recarga)
Temperatura de operación recomendada	-20 °C a + 55 °C
Ciclos de vida útil estimados	≥ 1000 ciclos

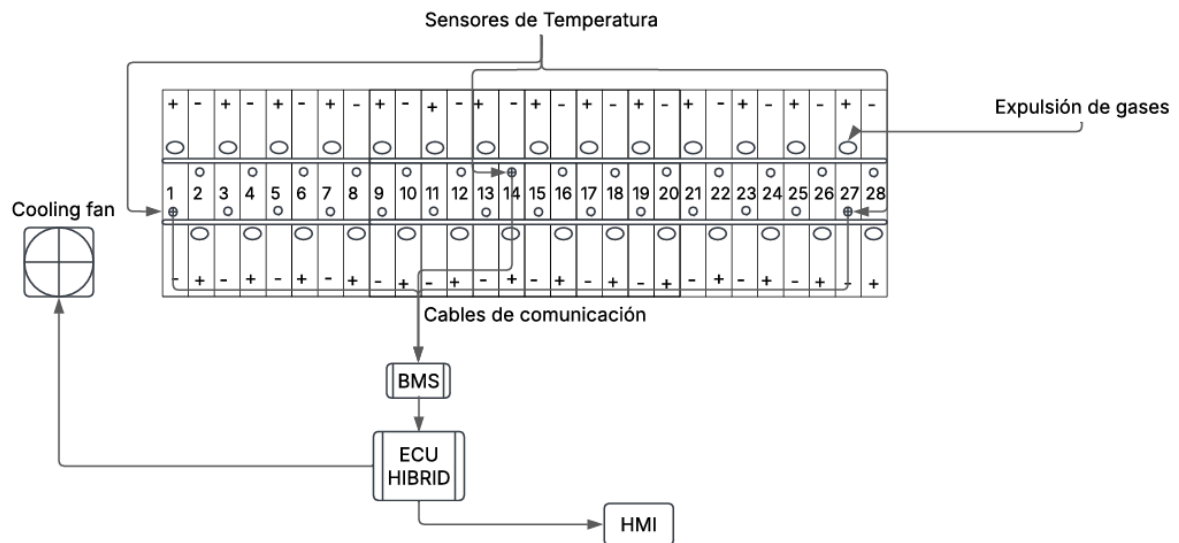
Nota. Datos obtenidos de ficha técnica del Toyota Prius

En conjunto, estos parámetros técnicos confirman que la batería cumple un rol fundamental como fuente de energía auxiliar dentro del tren motriz híbrido, asegurando eficiencia, durabilidad y bajo riesgo operativo durante su vida útil.

Diagrama Banco de Baterías NIMH

Figura 3

Diagrama Banco de Baterías NIMH



Nota. Datos obtenidos de ficha técnica del Toyota Prius

El diagrama muestra la configuración integral del sistema de batería de *NiMH*. Cada módulo incorpora sensores de temperatura que monitorean las condiciones térmicas y envían señales al ECU híbrido (Unidad de Control Electrónico), encargado de procesar dicha información y regular carga, descarga y enfriamiento. Además, cada módulo incluyó una válvula de alivio de presión para liberar gases en caso de sobrepresión interna, como medida de seguridad. El sistema está equipado con un ventilador de enfriamiento que se activa automáticamente al superar los parámetros seguros, asegurando estabilidad térmica. El BMS trabajó junto al ECU para supervisar parámetros como el estado de carga (SOC), el estado de salud (SOH), la corriente, la tensión y la protección frente a anomalías como sobrecarga o cortocircuitos. Mediante el HMI

(Interfaz Hombre-Máquina), el conductor visualiza en tiempo real información relevante como el nivel de carga y alertas de funcionamiento [11].

1.5.7 Fundamento técnico del balance energético

La batería que se está trabajando cuenta con sus módulos en serie, la desigualdad en los voltajes de cada módulo es una constante y a la larga afecta el estado de los otros módulos. Por ejemplo un módulo con baja capacidad o con celdas desbalanceadas puede limitar la entrega de energía del sistema completo [5].

1.5.8 Protocolos para la recolección segura de baterías

Toyota en general ha implementado procesos estandarizados y protocolos técnicos para garantizar la recolección segura de baterías usadas. Estos protocolos aparecen disponibles públicamente, incluyen instrucciones específicas para el embalaje, transporte y desmontaje de los módulos, así como para la disposición segura de catalizadores y piezas eléctricas en puntos de recolección autorizados [12].

1.5.9 Análisis ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología estandarizada por las normas ISO 14040 y 14044, el objetivo es evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de todas las etapas de su existencia. El ACV considera fundamental todos los procesos del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas, fabricación, distribución y uso, hasta la gestión de residuos y disposición final [13].

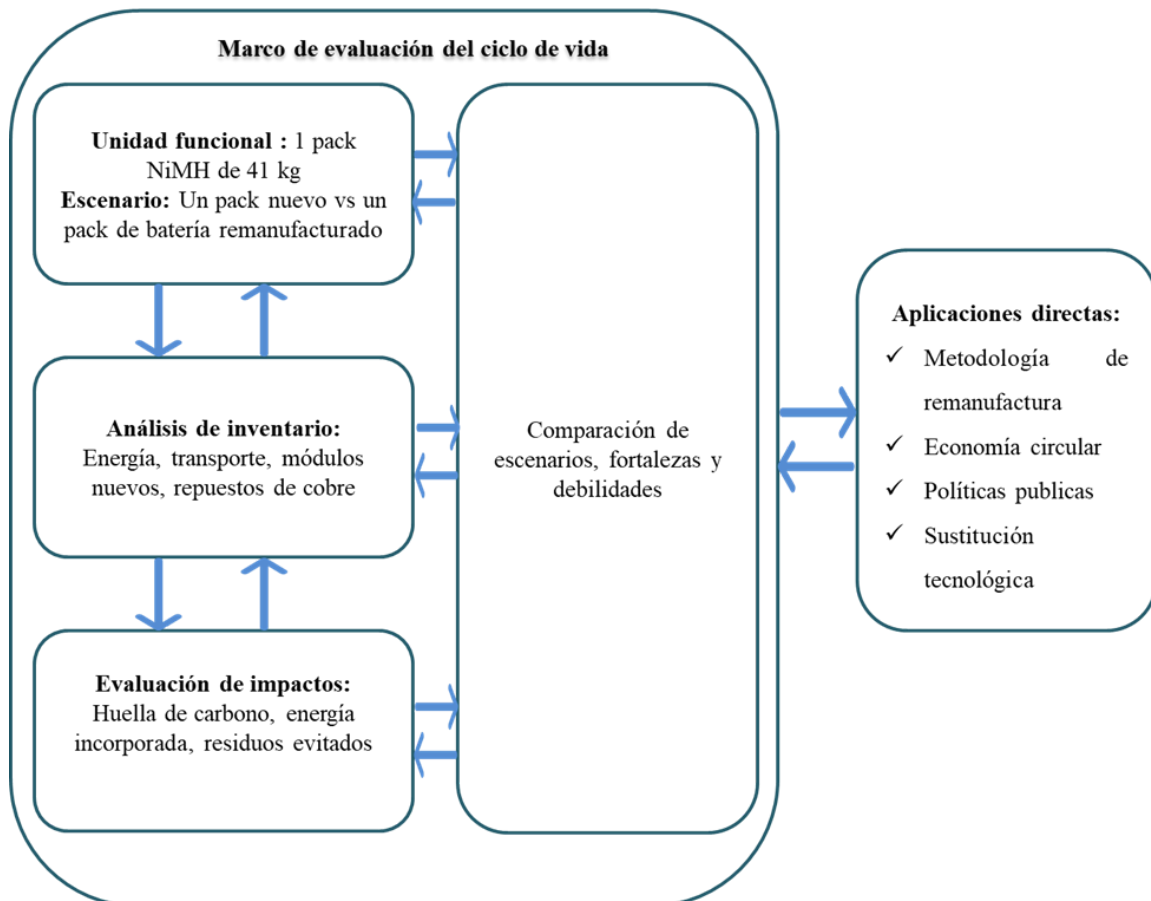
La estructura del ACV se compone de cuatro etapas como se puede visualizar en la figura 4:

- Definición de objetivos y alcance,
- Análisis de inventario del ciclo de vida (LCI)

- Evaluación de impactos del ciclo de vida (LCIA)
- Interpretación de resultados

Figura 4

Marco de evaluación de ciclo de vida



En este estudio, la aplicación del ACV se centra en un enfoque “de la cuna a la puerta”, abarcando desde la sustitución de módulos defectuosos y el balanceo energético hasta la entrega del pack reacondicionado, lo cual representa un aporte significativo a la reducción de impactos ambientales frente a la producción de un sistema nuevo.

1.5.10 Ecuaciones para justificar viabilidad de una metodología

Potencia Real

La ecuación 1.4 permite estimar la potencia real a partir de la comparación entre el voltaje medido en carga y un voltaje de referencia asociado a una carga conocida de voltaje nominal de luces halógenas. La ecuación de la potencia real se obtiene a partir de la ley de Ohm, sustituyendo la ley de ohm en la definición de potencia que es igual al voltaje por corriente para conseguir una potencia nominal igual al voltaje nominal al cuadrado sobre la resistencia, despejando la resistencia y sustituyéndola en la potencia real para terminar obteniendo la potencia real para cada módulo[14, pp. 93-94].

Ecuación de la potencia real:

$$P_{real} = \left(\frac{V_c}{V_{luces}} \right)^2 * P_{luces} \quad (1.4)$$

- P_{real} es la potencia real
- V_c Corresponde al voltaje en carga
- V_{luces} Se trata del Voltaje nominal de las luces
- P_{luces} Es la potencia nominal de las luces

Carga Total

La carga total corresponde acumulada de un módulo en un tiempo determinado, la ecuación 1.5 es una interpretación de la capacidad de la batería [14] también convirtiendo de Coulomb a Ah

$$Q_{cargada} = \frac{1}{3600} \int_0^{t_{carga}} I_{carga}(t) dt \quad (1.5)$$

- I_{carga} corresponde a **corriente en carga del módulo**.
- t_{carga} corresponde al tiempo **de carga del módulo**.

SOC

El estado de carga de una batería, la ecuación 1.6 y 1.7 corresponde a una interpretación de la definición de capacidad y balance de carga [32] tanto en descarga como en carga respectivamente.

$$SOC(t)_{desc} = 100 - \frac{1}{C_{nom}} \int I_{desc}(t) dt \cdot 100 \quad (1.6)$$

- $C_{nominal}$ Es la capacidad nominal de la batería.
- I_{desc} Es la corriente de descarga en un período de tiempo.

$$SOC(t)_{carga} = \frac{1}{C_{nom}} \int I_{carga}(t) dt \cdot 100 \quad (1.7)$$

Corriente de descarga

Dado que es una magnitud eléctrica donde existe el paso de electrones cuando una fuente suministra energía a un circuito exterior. Para llegar a la ecuación 1.8 se recurre a la definición de potencia activa que es voltaje multiplicado por corriente, se despeja corriente y si se va interpretar como de descarga entonces el voltaje será cuando una carga conectada y la potencia será la real que esté consumiendo con ese disipador[14, p. 131].

Ecuación de corriente de descarga:

$$I_{descarga} = \frac{P_{Real}}{V_c} \quad (1.8)$$

- V_c corresponde al **voltaje en carga del módulo**.

Resistencia Interna

Sabiendo que la resistencia interna es el impedimento que presenta un circuito al paso de corriente, entonces para obtener la ecuación 1.9 se recurre a la definición de la ley de ohm despejando resistencia igual a voltaje sobre corriente, para que sea considerada resistencia interna, se resta el voltaje cuando está conectado en el momento en que el módulo está conectado al disipador [14, p. 73].

La ecuación de la resistencia interna:

$$R_{interna} = \frac{V_c - V_o}{I_{descarga}} \quad (1.9)$$

- $R_{interna}$ Representa la resistencia interna del módulo.
- V_o hizo Referencia al voltaje en el momento en que se conecta el disipador
- $I_{descarga}$ Representa la corriente de descarga del módulo.

Para la ecuación 1.10 se realizó una interpretación de la ley de ohm [14] aplicada a un módulo bajo carga, a continuación se muestra la resistencia interna promedio:

$$R_{int} = \frac{\int R_{inst}(t)dt}{t_{desc}} \quad (1.10)$$

Capacidad real del módulo

En las pruebas de diagnóstico de baterías, un módulo que presenta una capacidad real significativamente inferior a la nominal suele indicar pérdida de material activo o aumento de resistencia interna, lo que reduce su eficiencia y vida útil [15]. Para llegar a la ecuación 1.11 se necesita a la definición de carga en coulombs que es igual al tiempo por corriente, en este caso para la real sería bajo el contexto de descarga, por ende, sería con corriente de descarga y tiempo de descarga [14, p. 24].

La ecuación de la capacidad real de un módulo:

$$C_{Real} = I_d * t_d \quad (1.11)$$

- C_{real} Representa a la **capacidad real del módulo**
- $I_{descarga}$ Representa la **corriente de descarga del módulo**, determinada a partir de la relación entre la potencia real y el voltaje de carga.

Para la ecuación 1.12 se realizó una interpretación de la definición de carga en coulombs:

$$C_{real} = \int I_{desc}(t) dt \quad (1.12)$$

SOH (Estado de Salud)

Hace referencia al estado actual comparándose con el estado original de la batería, se sabe que dentro del SOH existen dos ecuaciones donde se puede calcular el estado de la batería, sin embargo, en uno es una medición directa de corriente mientras en otra es de voltaje. Se va a utilizar la ecuación 1.13 en donde se mide en base a su capacidad útil que está relacionada a la nominal [16].

La ecuación para calcular el SOH:

$$SOH [\%] = \left(\frac{C_{real}}{C_{nominal}} \right) * 100 \quad (1.13)$$

Capítulo 2

2. Metodología.

El análisis de la remanufactura de baterías de hidruro metálico de níquel *NiMH* en vehículos híbridos y eléctricos, para ello es imprescindible elaborar un procedimiento estructurado que una criterios técnicos y económicos para fundamentar que el proceso sea viable y sostenible. La metodología conlleva, en primer lugar, la caracterización del estado de la batería, analizando parámetros clave como capacidad real, resistencia interna y estado de carga de los módulos. Se deben definir las etapas necesarias para su desmontaje seguro, inspección, reparación o sustitución de componentes, y ensamblaje final, considerando siempre las normas de seguridad eléctrica y mecánica aplicables. De manera complementaria, se realiza un análisis de costos y beneficios que permite evaluar la conveniencia de la remanufactura frente a la adquisición de una batería nueva.

Procedimiento de desmontaje de batería Ni-MH

EPP requeridos:

- Guantes dieléctricos certificados para trabajos en baja y media tensión.
- Gafas de seguridad o careta facial para protección ocular.
- Calzado de seguridad con suela aislante.
- Ropa de trabajo de algodón o ignífuga, sin partes metálicas expuestas.
- Chaleco reflectante (si se trabaja en áreas de taller con tránsito).

Pasos:

1. Colocarse el equipo de protección personal (EPP) indicado.
2. Abrir el compartimiento trasero (cajuela) y retirar el soporte superior ubicado sobre la llanta de emergencia.
3. Desconectar el terminal negativo de la batería auxiliar de 12 V.

4. Retirar el soporte intermedio restante utilizando herramienta manual (llaves combinadas y dados).
5. Reclinar el respaldo de los asientos traseros en posición horizontal para permitir un acceso adecuado al módulo de batería.
6. Extraer el conector de alta tensión (conector color naranja).
7. Desmontar los paneles laterales de la zona de carga (cajuela) que cubren el compartimiento de la batería.
8. Retirar el soporte superior ubicado sobre la toma de aire del sistema de refrigeración de la batería.
9. Desconectar el conducto de aire presurizado que está acoplado al sistema de ventilación de la batería.
10. Desconectar todos los conectores visibles del arnés de cables que alimentan la batería y los sistemas asociados, además de los cables de alta tensión.
11. Extraer las grapas plásticas que sujetan el cableado dentro del compartimiento.
12. Remover el soporte metálico izquierdo que cubre parcialmente la batería utilizando dados adecuados.
13. Retirar los seis (6) pernos de fijación que aseguran el conjunto de batería al chasis del vehículo.
14. Retirar cuidadosamente la batería del vehículo, preferentemente entre dos personas debido a su peso y dimensiones.

Una vez mencionado el procedimiento de desmontaje de la batería [11] y establecidos los criterios de seguridad y diagnóstico, se plantean diferentes alternativas de intervención que permitan prolongar su vida útil y optimizar su desempeño.

2.1 Alternativas de solución

2.1.1 Alternativa 1: Restauración térmica y eléctrica controlada de módulos

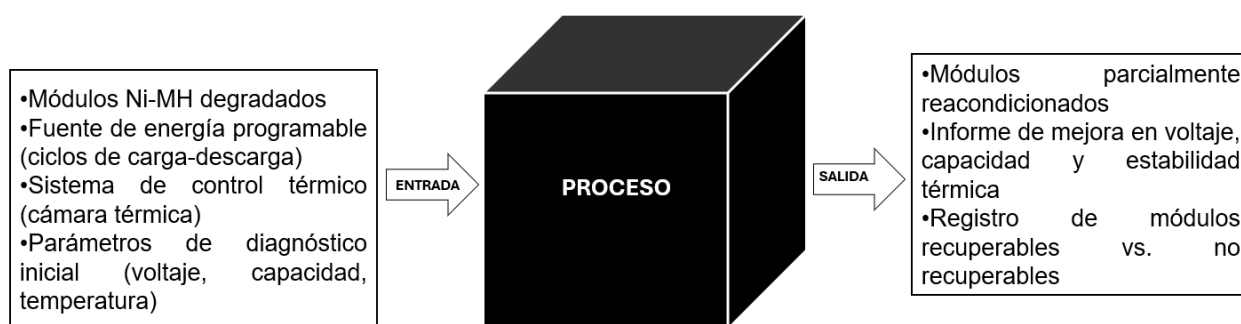
degradados

Se aplica calor moderado (entre 50 °C y 100 °C) y ciclos de carga-descarga eléctrica cuidadosamente regulados para recuperar el rendimiento de módulos Ni-MH que han perdido capacidad debido al envejecimiento o cristalización interna [17]. Este proceso en general busca disolver parcialmente los cristales de hidróxidos metálicos formados en los electrodos y restablecer la conductividad interna mediante el reordenamiento estructural de los materiales activos. A nivel eléctrico, se emplean corrientes específicas en ciclos controlados que permiten reacondicionar los electrodos sin generar sobrecalentamiento ni dañar la integridad del módulo.

2.1.1.1 Caja Negra

Figura 5

Caja negra de la Alternativa 1 - Restauración térmica y eléctrica controlada de módulos degradados



2.1.1.2 Ventajas y desventajas

Tabla 3

Ventajas y desventajas de la Alternativa 1 - Restauración térmica y eléctrica controlada de módulos degradados

Ventajas	Desventajas
Reducción de Costos	Riesgo de sobrecalentamiento o daño adicional.
Recuperación parcial de la capacidad y voltaje.	Requiere instrumentación especializada.
Técnica sostenible y alineada con la economía circular.	Eficiencia limitada.

2.1.2 Alternativa 2: Remanufactura completa con ciclos de carga y descarga además de balanceo de módulos

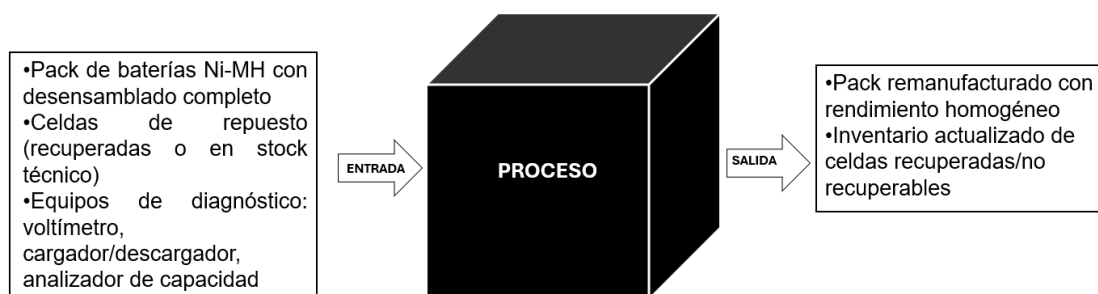
La necesidad de llevar a cabo este estudio tiene como objetivo alargar significativamente la vida útil de las baterías de alta tensión utilizadas en vehículos híbridos. Como se mencionó en el capítulo 1, el proceso de remanufactura permite minimizar la huella de carbono, así como también reducir los costos asociados a los componentes. Para alcanzar este objetivo, se propone implementar un proceso de ciclos de carga y descarga de los módulos que conforman la batería para posteriormente balancearlas, lo cual permitirá lograr un equilibrio adecuado en su funcionamiento y reducirá la degradación de los módulos individuales.

Esta opción implica la apertura completa del pack de baterías, separación individual de módulos Ni-MH, y pruebas de voltaje en reposo, carga y descarga. Se reemplazan únicamente los módulos defectuosos por otras recuperadas de baterías similares o de stock técnico.

2.1.2.1 Caja Negra

Figura 6

Caja negra de la Alternativa 2 - Remanufactura completa con ciclos de carga y descarga además de balanceo de módulos



2.1.2.2 Ventajas y desventajas

Tabla 4

Ventajas y desventajas de la Alternativa 2 - Remanufactura completa con ciclos de carga y descarga además de balanceo de módulos

Ventajas	Desventajas
Control técnico y restauración de capacidad.	Mayor complejidad operativa.
Posible estandarización de módulos remanufacturados.	Necesidad de equipos y herramientas específicas.
Potencial de reutilización en aplicaciones secundarias (sistemas estacionarios).	Requiere personal técnico capacitado.

2.1.3 Alternativa 3: Recuperación química controlada de celdas Ni-MH

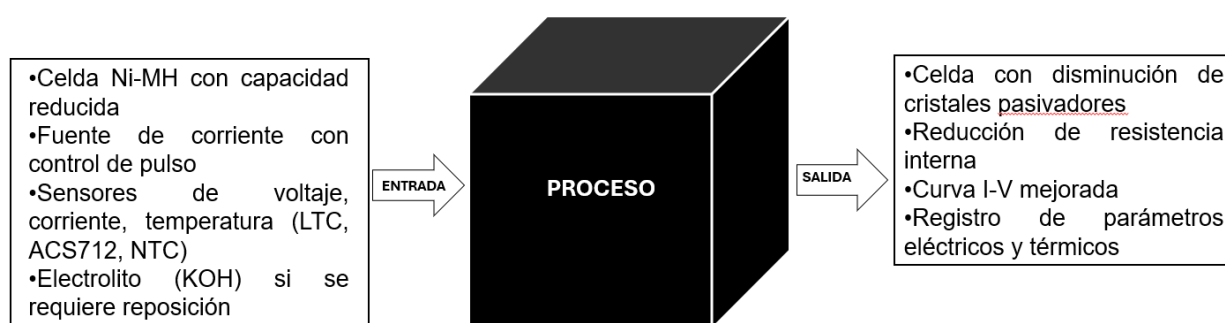
Esta alternativa se basó en un estudio por la milicia de los Estados Unidos [18] en donde se considera que una celda de un módulo de NiCd debe descargarse a menos de 0.6V, entonces se pretende realizar a su similar de NiMH aplicando pulsos de corriente controlada, combinados con calentamiento moderado, para deshacer las estructuras cristalinas pasivas que se forman en las celdas NiMH durante el uso, mejorando la capacidad y reduciendo la resistencia interna. Además, puede considerarse la reposición parcial de electrolitos si el análisis lo indica. El proceso requiere monitoreo con sensores de voltaje, corriente y temperatura para asegurar condiciones seguras y efectivas. La evidencia presentada por [18] indica que la aplicación de cargas pulsantes controladas sobre baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), que comparten similitudes

electroquímicas con las celdas NiMH, permite romper cristales pasivadores que se forman sobre los electrodos durante el uso prolongado.

2.1.3.1 Caja Negra

Figura 7

Caja negra de la Alternativa 3 - Recuperación química controlada de celdas Ni-MH



2.1.3.2 Ventajas y desventajas

Tabla 5

Ventajas y desventajas de la Alternativa 3 - Recuperación química controlada de celdas Ni-MH

Ventajas	Desventajas
Recupera celdas sin reemplazo físico ni desmontaje completo.	Requiere control preciso de corriente, tiempo y temperatura.
Escalable en banco automatizado.	Peligran condiciones si se exceden parámetros (pulsos altos, calor excesivo).
Menor costo frente a implementación de remanufactura total.	En algunos casos es necesario cortar electrolitos, lo cual añade riesgo químico.

2.2 Matriz de decisión

Tabla 6

Matriz de decisión con las 3 alternativas propuestas en el punto 2.1

Criterio		Alternativas		
		1	2	3
1	Eficacia Técnica	Baja (mejora parcial de módulos)	Alta (intervención directa en celdas con problemas)	Alta (predicción precisa)
2	Costo	Medio	Medio	Alto (sensado, software, entrenamiento)
3	Herramientas/Equipos	Medio	Medio (tester de celdas, carga/descarga individual)	Alto (sensores, interfaz, PC, software IA)
4	Tiempos por cada celda	Medio	Alta	Muy Bajo
5	Sostenibilidad	Alta (sin recambios)	Alta (aprovecha módulos sanos, recicla otros)	Media (filtra, pero depende de las otras dos)
6	Complejidad de llevar a cabo	Media	Media	Alta
8	Escalabilidad	Media	Alta	Alta (como herramienta de apoyo)

Ponderación Simple:

- 5: Muy favorable
- 1: Poco favorable

Tabla 7*Evaluación de alternativas en base a criterios y sumatoria final*

Criterio		Peso	Alternativas		
			1	2	3
1	Eficacia Técnica	5	2	5	5
2	Costo	5	5	5	2
3	Herramientas/Equipos	4	4	4	2
4	Tiempos por cada celda	3	4	2	5
5	Sostenibilidad	4	5	5	3
6	Complejidad de llevar a cabo	3	3	3	5
8	Escalabilidad	3	3	5	5
Total			101	116	100

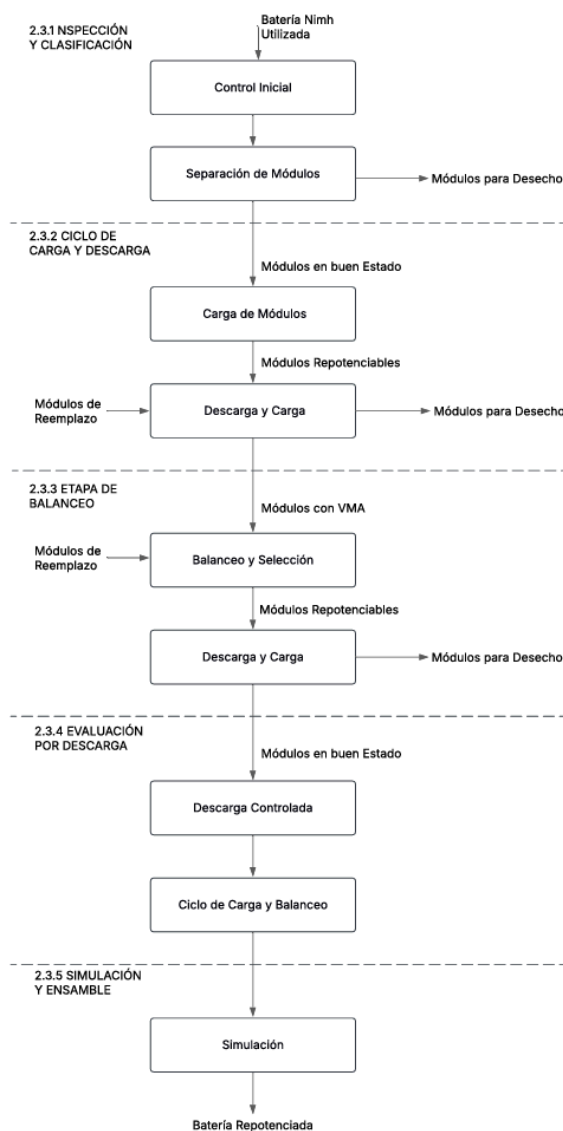
La alternativa 2 tiene mayor puntaje favorable por ende es la alternativa escogida.

2.3 Metodología de remanufactura detallada

A continuación, se presenta el diseño detallado de esta alternativa, describiendo cada una de las etapas técnicas necesarias para su implementación, así como las consideraciones operativas que garantizan su viabilidad y seguridad.

Figura 8

Diagrama de flujo del proceso de revisión y reacondicionamiento de una batería NiMH



2.3.1 Inspección y Clasificación

La metodología se llevó a cabo una inspección visual detallada del pack de batería, procediéndose al retiro de la carcasa para una mejor evaluación. Se identificaron módulos que presentaban problemas físicos, tales como la ausencia de válvulas de expulsión de gases, condición que impide su manipulación por razones de seguridad. Para este proceso se utilizaron herramientas como multímetro, destornillador, alicate, dado 8mm, rache para empezar a separar módulo uno a uno. Finalmente, los módulos que cumplieran con los criterios de rechazo físico fueron separados y destinados para descarte.

2.3.2 Ciclo de carga y descarga

En el proceso de carga y descarga los módulos que superaron el primer filtro fueron sometidos a un proceso de carga lenta con una fuente de 12V, 5A regulada a 11V con un cable 14 AWG conectado a terminales tipo U y un enchufe de 110V con cinta aislante, se reguló a 11V para minimizar el estrés electroquímico y prevenir el sobrecalentamiento, mientras que la descarga se llevó a cabo de forma controlada hasta un voltaje mínimo seguro recomendado por el fabricante [31]. Para la descarga se utilizó las luces halógenas de 12V 55W con cable 14 AWG conectado a terminales tipo U, un visor voltaje y corriente y el conector H4 hembra. Para la carga se tuvo los módulos conectados a la fuente una duración variable entre media hora, una hora o una hora y media, según el tiempo requerido para alcanzar un voltaje nominal aceptable. Posteriormente, se esperaron aproximadamente seis horas para evaluar el comportamiento de los módulos cargados, observando el cambio en el voltaje desde el momento de la carga hasta después del periodo de reposo.

Aquellos módulos que presentaron una caída de voltaje por debajo del límite mínimo aceptable fueron sometidos a ciclos adicionales de descarga y recarga. Durante este

proceso, se registraron casos de sobrecalentamiento o carga excesiva, lo cual provocó la separación de las válvulas de expulsión de gases; dichos módulos fueron descartados por razones de seguridad.

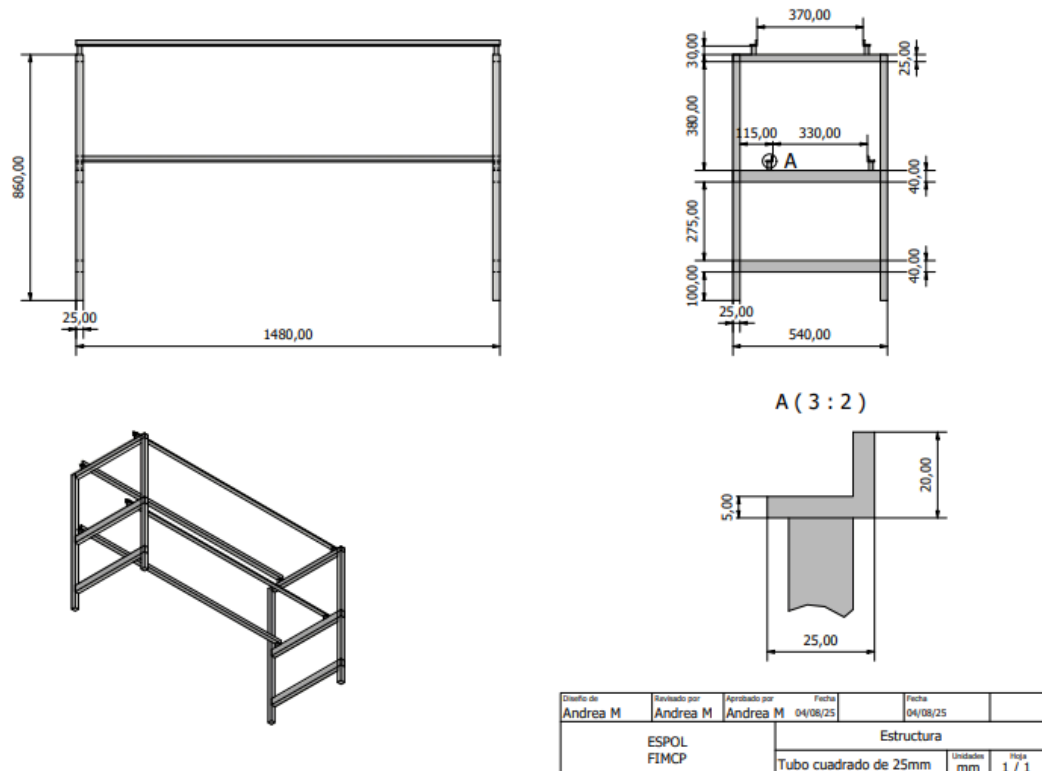
Los módulos que no presentaron estos problemas fueron evaluados nuevamente tras un período de seis horas. Si mantenían un voltaje estable y aceptable, se avanzó a la siguiente fase del proceso. En caso contrario, se solicitó el reemplazo del módulo o se realizaron uno o dos ciclos adicionales de descarga y carga como máximo para intentar su recuperación.

2.3.3 Etapa de balanceo

En el proceso de balanceo, se construyó el balanceador con una estructura de acero negro y ángulos de aluminio para las secciones en donde reposaron los módulos con su respectivo aislante de plástico, algunos módulos que presentaron una buena apariencia física y un voltaje mínimo aceptable fueron colocados en el balanceador para realizar mediciones de voltaje a las 6 y 30 horas, con el fin de igualar el estado de carga (SOC) y garantizar que todos los módulos presentaran valores de capacidad y voltaje lo más homogéneos posible [5]. En la figura 9 se diseñó el balanceador y luego se lo construyó para la experimentación.

Figura 9

Diseño de balanceador de módulos



La mayoría de los módulos mostraron voltajes similares, sin embargo, algunos presentaron caídas de voltaje que no cumplían con el mínimo requerido. Estos módulos fueron reemplazados o sometidos a un ciclo adicional de descarga y recarga para evaluar la recuperación de su voltaje a lo largo del tiempo.

Si, tras repetir este proceso y una nueva evaluación en el balanceador, los módulos continuaron presentando caídas de voltaje significativas, se consideró que no debían ser reutilizados ni sometidos a más intentos de recuperación

2.3.4 Evaluación por descarga

Durante la etapa de evaluación por descarga para los módulos de la batería del Toyota Prius C, se estimó mediante cálculos la potencia real (1.4), la corriente de descarga (1.8),

la resistencia interna (1.9), la capacidad real (1.11) y el SOH (1.13) ya que de forma experimental se obtuvo tiempo de descarga y voltaje final de descarga. Para la batería del Toyota Prius de 28 módulos se estimó la resistencia interna (1.9), la capacidad real (1.11) y el SOH inicial (1.13) porque se obtuvo datos de corriente en función del tiempo, voltajes iniciales y descarga y en el momento en que el disipador fue conectado a la fuente.

Para todos los módulos considerados para repotenciación fueron sometidos a una descarga controlada hasta alcanzar un voltaje mínimo seguro para su integridad. Los módulos cuyos parámetros se encontraron dentro del rango aceptable según los criterios establecidos pudieron ser ensamblados nuevamente, destinando a una segunda vida útil dentro del pack de baterías NiMH.

2.3.5 Simulación y ensamble

En el proceso de simulación y ensamblaje, considerado la última etapa del proceso de revisión de la batería, se determinó la viabilidad de cada módulo para su reintegración en el mercado automotriz. Se simuló el posible estado de carga (SOC) de cada módulo en función del comportamiento observado durante todo el proceso de evaluación y acondicionamiento. Esta simulación permitió estimar con mayor precisión el SOC real de cada unidad, identificando aquellas con un desempeño óptimo y detectando posibles desviaciones respecto al comportamiento esperado. Una vez validada esta información y confirmada la idoneidad de los módulos seleccionados, se procedió al ensamble final en la carcasa de la batería, asegurando su correcta disposición y conexión para el funcionamiento del sistema.

La simulación se llevó a cabo en el software MATLAB, mediante la elaboración de un código que utiliza las ecuaciones de la carga total a lo largo del tiempo (1.5), el SOC

durante descarga (1.6) y carga (1.7), la capacidad real (1.12) en un tiempo determinado y una resistencia interna promedio (1.10), en general el programa está diseñado para recibir como entradas los siguientes parámetros, tales como, voltaje inicial del módulo antes de ser cargado, voltaje del módulo cargado, tiempo de carga, así como las corrientes máxima y mínima de carga.

El código desarrollado permitió simular el proceso de descarga del módulo, determinando el tiempo que se requiere hasta alcanzar un límite de voltaje mínimo seguro. Asimismo, se programó la simulación del proceso de carga, considerando el intervalo de tiempo definido en la entrada correspondiente.

Como resultados, la simulación proporcionó el estado de salud (SOH) de los módulos, la resistencia interna, la capacidad real y el estado de carga (SOC). Además, se generaron gráficas representativas que incluyeron:

- La evolución del voltaje en función del tiempo durante los procesos de carga y descarga.
- La corriente en estado de descarga en función del tiempo.
- El comportamiento del SOC a lo largo del tiempo.

El código lo encontraremos en la sección de anexos

Con esta simulación se pudo validar de forma previa los resultados que se obtendrían en la experimentación, lo que permitió justificar y sustentar los valores observados en las pruebas reales.

Protocolos

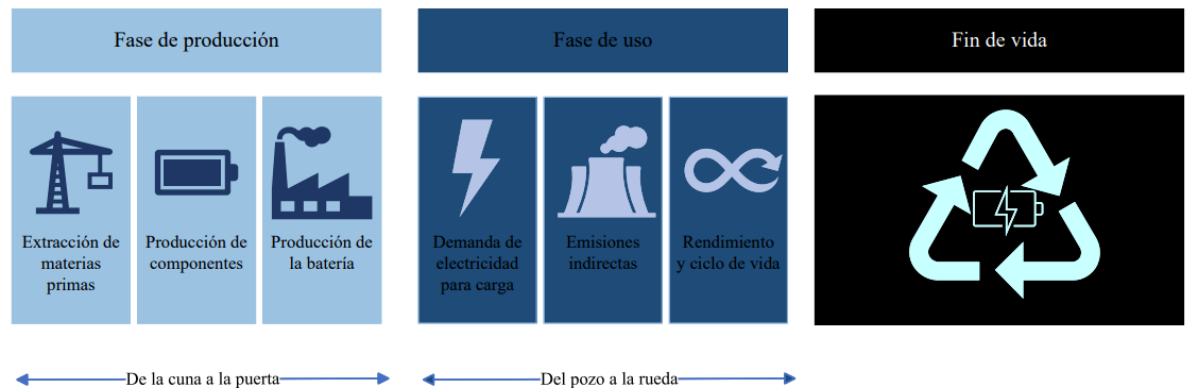
- Desmontaje de la batería de alta tensión del vehículo. Se consideró en base a las características de la batería a disposición. Para el mismo, se tomó de referencia el Manual de Reparación del vehículo Toyota Prius.
- El desmontaje de la batería se realizó siguiendo las instrucciones técnicas contenidas en el Manual de Reparación del vehículo Toyota Prius.
- Operación de carga y descarga regulada, aplicada sobre un conjunto de 28 celdas individuales para evaluar su desempeño.
- Proceso de ecualización de los módulos de baterías de alta tensión, orientado a balancear el voltaje entre las celdas y optimizar su rendimiento.

2.3.6 Análisis ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) que se aplicará en esta metodología de remanufactura sigue la estructura metodológica establecida por la norma ISO 14040 y 14044, que requiere definir claramente los límites del sistema antes de la etapa de inventario. En este sentido, se consideraron tres grandes fases asociadas al ciclo de vida de las baterías de níquel-metal hidruro (NiMH): producción, uso y fin de vida tal como se visualiza en la figura 10.

Figura 10

Ciclo de vida de las baterías NiMH para vehículos híbridos



La fase de producción comprende la extracción de materias primas necesarias para la fabricación de los electrodos, electrolitos, separadores y carcasa metálica, así como la producción de los componentes intermedios y el ensamble final de la batería [19], como tal en el presente documento no se realiza la evaluación a fondo debido a que el objeto de estudio es una batería que ya ha culminado su vida útil inicial en su vehículo híbrido.

La fase de uso incluye el consumo energético durante los procesos de diagnóstico y balanceo eléctrico, los cuales se realizan para recuperar y estabilizar la capacidad de los módulos reutilizados.

La fase de fin de vida se centra en las estrategias de valorización y disposición final de los módulos que no cumplen con los criterios de funcionalidad. Estos módulos se contabilizan como residuos peligrosos y se asume su transporte hacia un gestor autorizado para su reciclaje o disposición. De igual manera, se incluye el transporte del pack completo desde el cliente hacia el taller y su retorno.

Se adoptó un enfoque “de la cuna a la puerta”, debido a que, los límites del sistema abarcan desde la llegada del pack de baterías al taller de remanufactura hasta la entrega

del mismo al cliente, incluyendo el reemplazo de módulos defectuosos, el balanceo energético y la gestión de residuos generados.

La planificación del estudio es consistente con estudios previos de remanufactura de baterías NiMH, que señalan que el mayor potencial de reducción de impactos ambientales proviene de la reutilización de módulos funcionales y la disminución de la demanda de materias primas vírgenes [20].

2.4 Instrumentos del proceso

Para realizar la experimentación se utilizó un multímetro para medir los voltajes iniciales, voltajes finales de descarga, voltajes en momento en que se conecta disipadores de energía al módulo, destornillador estrella, destornillador estrella tipo bornera, dado 8mm, rache para separación de módulos unos de otros y retirar la carcasa inferior del pack de baterías, 3 Luces halógenas 12V 55W que actúan como disipadores de energía, 3 fuentes de 12V 5A para cargar los módulos, 10m de cable 14 AWG para conexiones entre módulos y fuente o disipadores, 3 módulos visores de voltaje y corriente para visualización de datos, 30 terminales tipo U para conexión con los módulos, cinta aislante, 6 conectores H4 hembra para conectar las luces, 3 enchufe 110V, alicate, corta frío, regleta, EPP. Para construir el balanceador se necesitó 4 ángulos de aluminio, tubo estructural cuadrado 1.2 mm acero negro, 4 ruedas, 2.2 lbs electrodos, 8 aislantes eléctrico de plástico 20x15 mm, 8 pernos hexagonales M8X50 mm, 8 tuercas hexagonales M8 y 1 broca de 8 mm, para visualizar las imágenes de las herramientas y su descripción se encuentran en la tabla 39 en anexos.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En el capítulo 3 se analizó los resultados obtenidos a partir del diagnóstico inicial de cada módulo de batería NiMH, así como de la toma de datos correspondientes a los ciclos de carga y descarga. Se procedió al balanceo de los módulos y al proceso de descarga controlada para toma de datos, con ello la verificación final de estado de cada módulo.

Se examinaron parámetros claves como la capacidad real, la resistencia interna, el estado de salud (SOH), los costos asociados y el impacto en el desempeño de los módulos evaluados. Además, se interpretaron los datos experimentales en comparación con los valores nominales establecidos en un Toyota Prius en correcto funcionamiento, con el objetivo de validar la viabilidad técnica y económica del proceso de repotenciación.

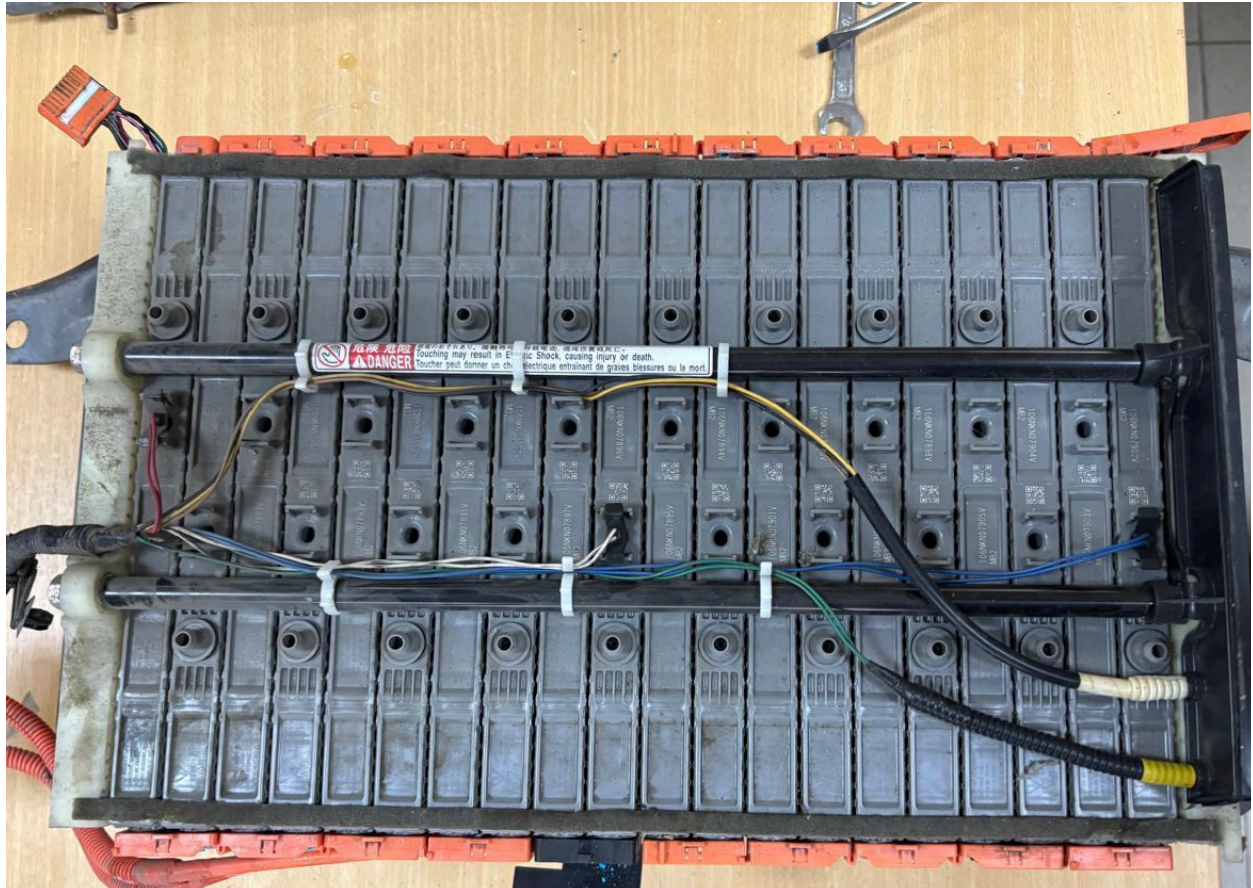
3.1 Batería Toyota Prius C

El primer caso de estudio se fundamentó en una batería conformada por 20 módulos provenientes de un vehículo Toyota Prius C. En esta etapa se recordaron y comprendieron los parámetros básicos de operación, registrando datos de voltaje inicial, tiempo de carga, voltaje final de carga y voltaje final de descarga. Posteriormente, se aplicaron dichos datos para el cálculo de resistencia interna, estado de salud (SOH), capacidad real y corriente de descarga. Con estos resultados, se analizó el desempeño del sistema y se evaluó su correspondencia con el rango de parámetros funcionales establecidos.

En la figura 11 se visualiza la batería de 20 módulos se le realizaron ciclos de carga y descarga, durante los cuales se identificaron algunos módulos tentativamente recuperables.

Figura 11

Banco de Batería Nimh de 20 módulos



Gracias a los datos y conclusiones obtenidos en este primer caso, se estableció una base sólida para el estudio posterior. En adelante, se presentan en la tabla 8 el voltaje inicial, tiempos de carga, voltaje en carga y voltaje correspondientes al módulo 1,2 y 3 posterior a la carga, como referencia para la evaluación y comparación, mientras que en la tabla 23 en anexos están todos los datos para los módulos faltantes.

Tabla 8

Ciclo de Carga de módulo 1,2 y 3

Carga				
Módulo	Voltaje Inicial[V]	Tiempo Carga [min]	Voltaje en carga[V]	Voltaje [V]
1	4.46	6.5	8.16	7.9
2	3.8	7.2	8.06	7.4
3	4.91	10.12	8	7.73

Se llevaron a cabo los ciclos de descarga de los módulos, a partir de los cuales se determinó para el módulo 1 la potencia real utilizando la ecuación 1.4, la corriente de descarga la estimamos con la ecuación 1.5, mientras que la resistencia interna se calculó mediante la ecuación 1.6. Por su parte, la capacidad real se obtuvo aplicando la ecuación 1.7 y, finalmente, el estado de salud (SOH) se evaluó conforme a la ecuación 1.8 y así sucesivamente para los módulos restantes.

Cálculo de la potencia real para módulo 1:

$$P_{real} = ((5.3V/12V)^2) * 55W$$

$$P_{real} = 10.73 W$$

Corriente de descarga para módulo 1:

$$I_{descarga} = (10.73W/5.3V)$$

$$I_{descarga} = 2.02 A$$

Resistencia interna para módulo 1:

$$R_{interna} = (8.16V - 5.3V)/2.02A$$

$$R_{interna} = 1.41 \Omega$$

Capacidad real para módulo 1:

$$C_{real} = (2.45min/60min)(1h) * 2.02A$$

$$C_{real} = 0.08 Ah$$

$$SOH[\%] = (0.08Ah/6.5Ah) * 100\%$$

$$SOH = 1.27\%$$

Para los demás módulos se hizo lo mismo y se presentan en la tabla 22 en anexos, mientras que la tabla 9 muestra los resultados para el módulo 1,2 y 3

Tabla 9

Ciclo de descarga de módulo 1,2 y 3

<i>Descarga</i>							
<i>Módulo</i>	<i>Tiempo descarga[min]</i>	<i>Potencia R[W]</i>	<i>I descarga[A]</i>	<i>Voltaje Descarga[V]</i>	<i>R interna [Oh]</i>	<i>C Real [Ah]</i>	<i>SOH %</i>
<i>1</i>	<i>2.45</i>	<i>10.73</i>	<i>2.02</i>	<i>5.30</i>	<i>1.41</i>	<i>0.08</i>	<i>1.27</i>
<i>2</i>	<i>2.40</i>	<i>9.55</i>	<i>1.91</i>	<i>5.00</i>	<i>1.60</i>	<i>0.08</i>	<i>1.18</i>
<i>3</i>	<i>0.50</i>	<i>11.14</i>	<i>2.06</i>	<i>5.40</i>	<i>1.26</i>	<i>0.02</i>	<i>0.26</i>

De la tabla 10 se observa que el tiempo de descarga, expresado en minutos, corresponde al período que tardó cada módulo en alcanzar el voltaje mínimo seguro (VMS). Los módulos 5, 11 y 15 no fueron sometidos a los ciclos de carga y descarga debido a condiciones inseguras de trabajo. Entre las causas se incluyeron la desconexión del pin de carga en uno de los módulos y la ausencia de la válvula de expansión de gases en otro, entre otras deficiencias. Por estas razones, dichos módulos fueron descartados del proceso.

Como conclusión de la experimentación, se observó que únicamente un número reducido de módulos, específicamente los números 12, 14 y 16, mostraron un voltaje aceptable tras varias horas posteriores a la carga. Posteriormente, se analizó esta condición y se evaluó que los módulos antes mencionados pueden servir para juntarlo con otros módulos que tengan un rendimiento similar, todo esto mediante el criterio de cuanto voltaje puede retener el módulo después de haber sido cargado, esto permitió comprender sus limitaciones y generar una base comparativa para el estudio de la otra batería que se consiguió.

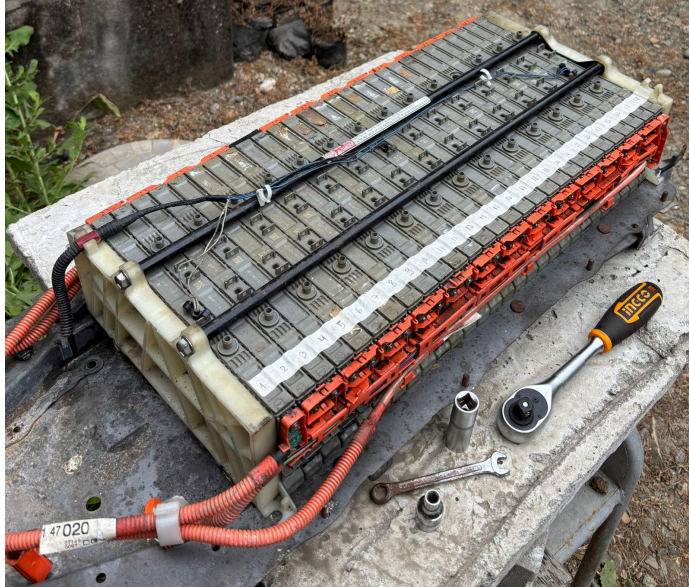
3.2 Batería Toyota Prius

3.2.1 Inspección y Clasificación

Como parte del proceso de diagnóstico del sistema de almacenamiento energético, se procedió con una inspección preliminar de una batería compuesta por 28 módulos individuales. Cada uno de estos módulos está integrado por 6 celdas de carga conectadas en serie. A continuación, se puede observar la batería una vez sacada la carcasa en la figura 12.

Figura 12

Banco de Batería Nimh de 28 módulos



La medición de voltaje de cada módulo reveló que sólo 4 de los 28 módulos presentaban un voltaje superior a 6 V por módulo, lo cual indica un nivel de descarga significativo o un posible deterioro irreversible en las celdas internas. El voltaje total de la batería fue de 106,08 V.

Tabla 10

Medición de voltaje inicial para módulo 1,2 y 3

Medición de voltaje de los módulos	
Módulo 1	1.42 V
Módulo 2	0.56 V
Módulo 3	2.51 V

En la tabla 23 en anexos se encuentra el resto de los voltajes iniciales. En esta etapa se procedió a la separación individual de los módulos que conforman el paquete de baterías. Debido a la sulfatación presente y al prolongado tiempo de almacenamiento de la batería, el proceso de desmontaje resultó complejo y requirió especial cuidado para evitar daños adicionales.

Durante la manipulación, el módulo 2 de la figura 13 sufrió un daño irreversible al desprenderse el pin de carga positiva, lo que imposibilita su uso en posteriores etapas de evaluación.

Asimismo, el módulo 21 en la figura 14 fue excluido del proceso por no contar con la válvula de expulsión de gases, elemento fundamental para la seguridad operativa del componente.

Figura 13

Módulo 2

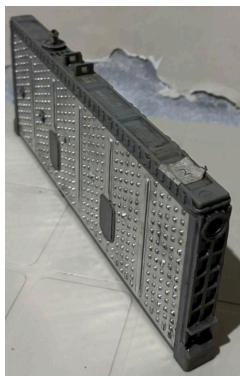


Figura 14

Módulo 21



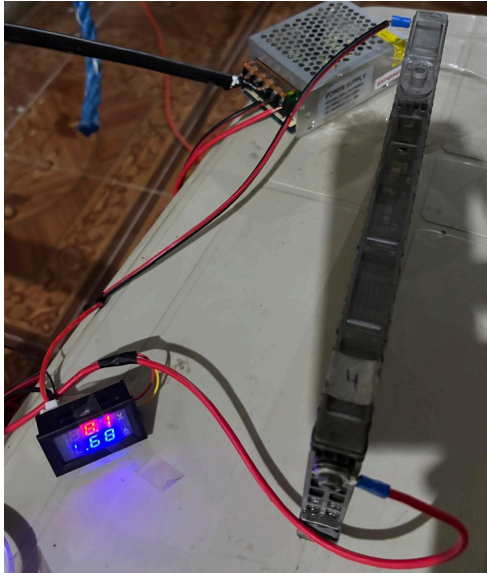
Estos módulos serán reemplazados con los módulos más aceptables del paquete de módulos del Toyota Prius C.

3.2.2 Ciclo de Carga y Descarga

Cada módulo fue cargado individualmente utilizando una fuente conmutada de 12 V, regulada a 10.9 V, con una corriente nominal de entrega de 5 A. En promedio, la carga de cada módulo tuvo una duración aproximada de una hora, hasta alcanzar un voltaje nominal de carga cercano a los 8.3 V.

Figura 15

Ejemplo de Módulo cargando



Posteriormente, se esperó un periodo de entre 6 y 24 horas para evaluar la retención del voltaje transcurrido después de la carga. Se observó que algunos módulos presentaron una mejor retención de voltaje que otros. Aquellos módulos que evidenciaron una caída significativa de tensión fueron sometidos a un ciclo de descarga y carga para evaluar su estado posterior.

Una vez identificados los módulos tentativamente en buen estado, se procedió a avanzar con las siguientes etapas del proceso. A continuación, en la tabla 11, se presenta la información correspondiente al módulo 1 de la corriente de carga y su respectivo tiempo, mientras que para la tabla 24 completa está en anexos con los mencionado anteriormente además del tiempo total de carga y el voltaje final esperado (V_1 luego de concluir la carga), el parámetro V_f corresponde al voltaje con el que finalizó la carga para cada módulo.

Tabla 11

Datos de carga en módulo 1

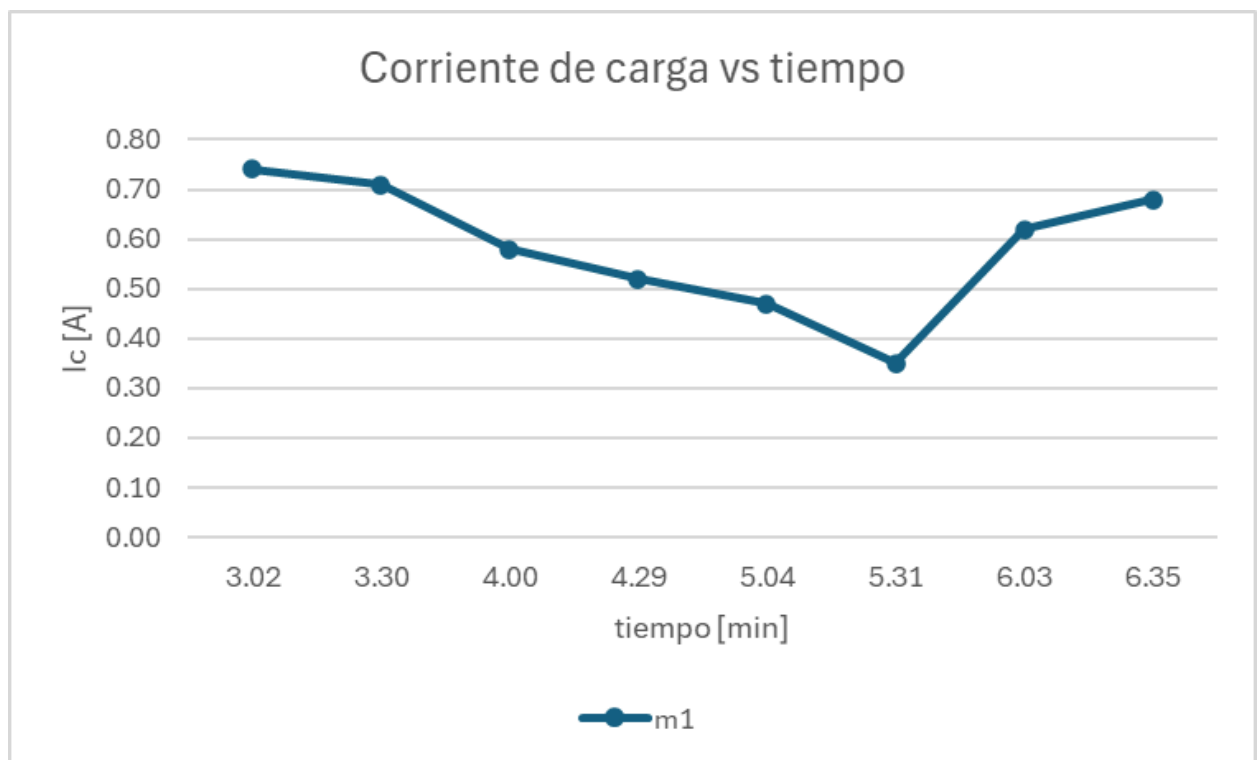
Ciclo de Carga Módulo 1	
tc1 [min]	lc1 [A]
3.02	0.74
3.3	0.71
4	0.58
4.29	0.52
5.04	0.47
5.31	0.35
6.03	0.62
6.35	0.68

Durante el periodo de espera, el módulo 12 presentó problemas significativos, evidenciando una caída de voltaje por debajo de los 6 V por módulo. Debido a esta condición, el módulo fue reemplazado por uno de los módulos usados que se encontraban en buen estado para continuar con el proceso de evaluación.

Se realizaron gráficas de la corriente de carga en función del tiempo, para los módulos, a continuación se presenta la figura 16 con el comportamiento de la corriente de carga para el módulo 1, mientras que en la sección de anexos se encuentran las figuras para los módulos 3, 4 y 5 con el objetivo de entender el comportamiento en un estado de carga.

Figura 16

Corriente de carga vs tiempo módulo 1



A los módulos que presentaron una apariencia física adecuada, pero evidenciaron caídas significativas de tensión se le sometió a un ciclo de descarga controlada hasta alcanzar un voltaje límite predeterminado.

3.2.3 Etapa de balanceo

Los módulos que fueron considerados en buen estado hasta esta etapa se colocaron en paralelo dentro del balanceador (figura 17). Posteriormente, se realizaron mediciones de voltaje a las 20 y 30 horas para cada módulo, con el fin de evaluar su comportamiento y estabilidad eléctrica a lo largo del tiempo.

Figura 17

Módulos ubicados en el balanceador



A continuación, se presenta la Tabla 12, correspondiente al módulo 1,2 y 3 balanceado. En ella, se incluyeron los valores de V_{fb1} y V_{fb2} , los cuales representaron el comportamiento del voltaje de cada módulo para el tiempo de 20 horas y luego de 30.

La tabla 27 se encuentra en anexos y muestra el voltaje de balanceo de todos los módulos.

Tabla 12

Datos de voltaje módulo 1,2 y 3 después de un lapso en el balanceador

Balanceo				
Módulo	Vfb1 [V]	tb1 [h]	Vfb2 [V]	td2 [h]
1	7.46	20	6.66	30
2	7.49	20	7.43	30
3	7.49	20	7.41	30

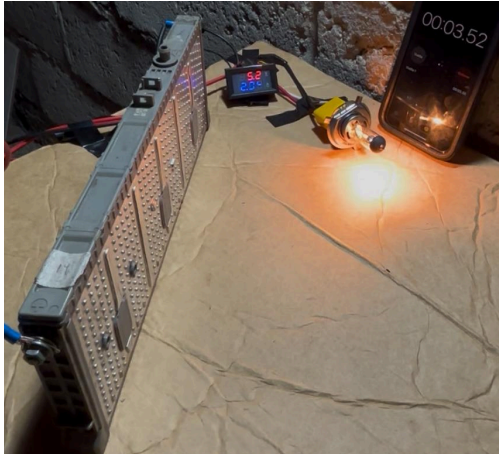
A partir de los resultados obtenidos, se evidenció que el módulo 1 presentó una caída de voltaje sin mostrar signos de recuperación durante el periodo de balanceo. Debido a esta condición, se determinó que dicho módulo será sometido a un ciclo completo de descarga y carga con el objetivo de intentar su recuperación.

3.2.4 Evaluación por descarga

En esta sección, se procedió a descargar todos los módulos (figura 18) hasta un VMS, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la corriente entregada por cada módulo en función del tiempo. Este procedimiento permitió estimar la resistencia interna de cada módulo, así como su capacidad real.

Figura 18

Ejemplo de Módulo descargando



Como ejemplo ilustrativo, se desarrolló un cálculo detallado utilizando los datos del módulo 1, con el fin de determinar tanto su resistencia interna como su capacidad real.

A continuación, la tabla 13 con los datos de corriente y tiempo del módulo 1, mientras que la tabla 30 completa del ciclo de descarga se encuentra en anexos.

Tabla 13

Datos de corriente en función del tiempo en módulo 1

Ciclo de Descarga Módulo 1	
td1 [min]	Id1 [A]
0,05	3,59
0.15	3.48
0.18	3.47
0.25	3.41
0.36	3.09

Para ilustrar el procedimiento de estimación de parámetros eléctricos, se tomó como referencia el módulo 1, utilizando los datos obtenidos durante la descarga controlada, donde se sabe que el voltaje cuando se conecta la carga al módulo es el V_d igual a 7.4V y voltaje en reposo V igual a 8V, para la resistencia interna se usó la ecuación 1.6 y para la capacidad real la 1.7

$$R_{interna\ 1} = (8-7.4)/3.59$$

$$R_{\text{interna } 1} = 0.17 \, \Omega$$

Para la capacidad real obtuvimos lo siguiente:

$$C_{\text{real } 1} = (0.05 \text{ min} / 60 \text{ min})(h) * 3.59 \, A$$

$$C_{\text{real } 1} = 0.003 \, Ah$$

Las resistencias internas estimadas de cada módulo para los distintos tiempos de descarga se presentan en la Tabla 26 en anexos. Por otro lado, la capacidad real calculada para cada módulo a partir de los datos de corriente y tiempo se detalló en la Tabla 27 que se encuentran en anexos, la tabla 14 muestra la estimación solo para el módulo 1,2 y 3 y la tabla 15 de igual manera.

Tabla 14

Estimación de Resistencia Interna en descarga para módulo 1,2 y 3

Descarga					
Módulo	Ri 1[Oh]	Ri 2[Oh]	Ri 3[Oh]	Ri 4[Oh]	Ri 5[Oh]
1	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19
2	0.30	0.30	0.32	0.38	
3	0.23	0.23	0.24	0.27	0.29

Tabla 15

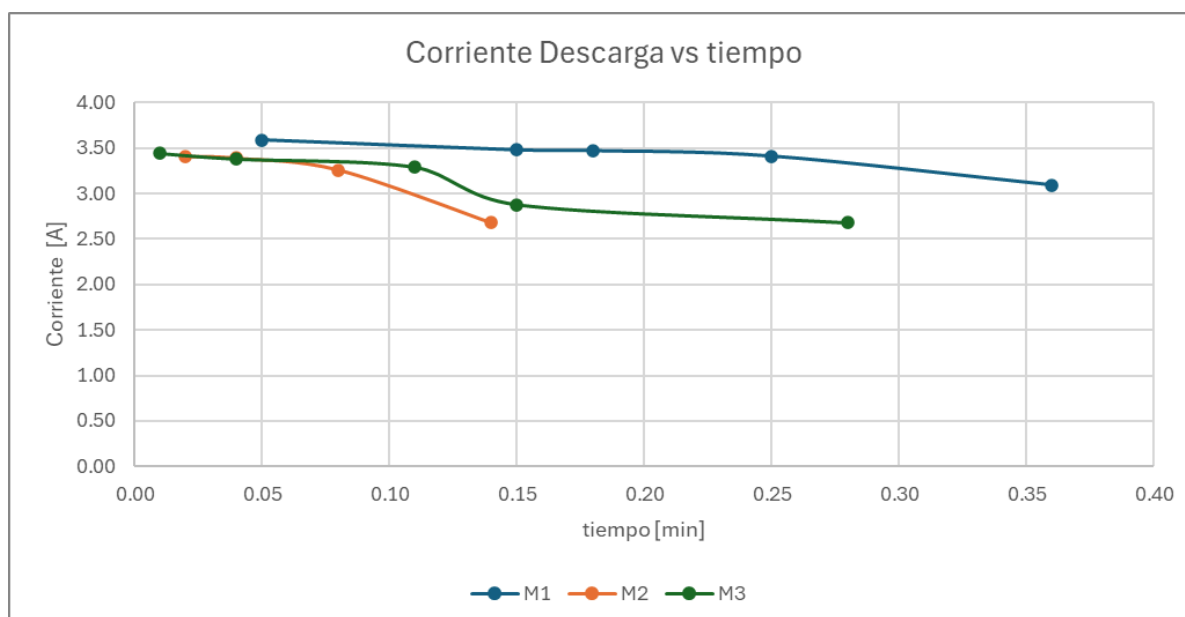
Estimación de Capacidad real de módulo 1,2 y 3

Capacidad Real					
Módulo 1	Creal 1 [Ah]	Creal 2[Ah]	Creal 3[Ah]	Creal 4[Ah]	Creal 5[Ah]
1	0.003	0.009	0.010	0.014	0.019
2	0.001	0.002	0.004	0.006	0.000
3	0.001	0.002	0.006	0.007	0.013

En este contexto, se estimó la representación gráfica de los módulos del 1,2 y 3 en la figura 19, mostrando la curva de corriente de descarga en función del tiempo.

Figura 19

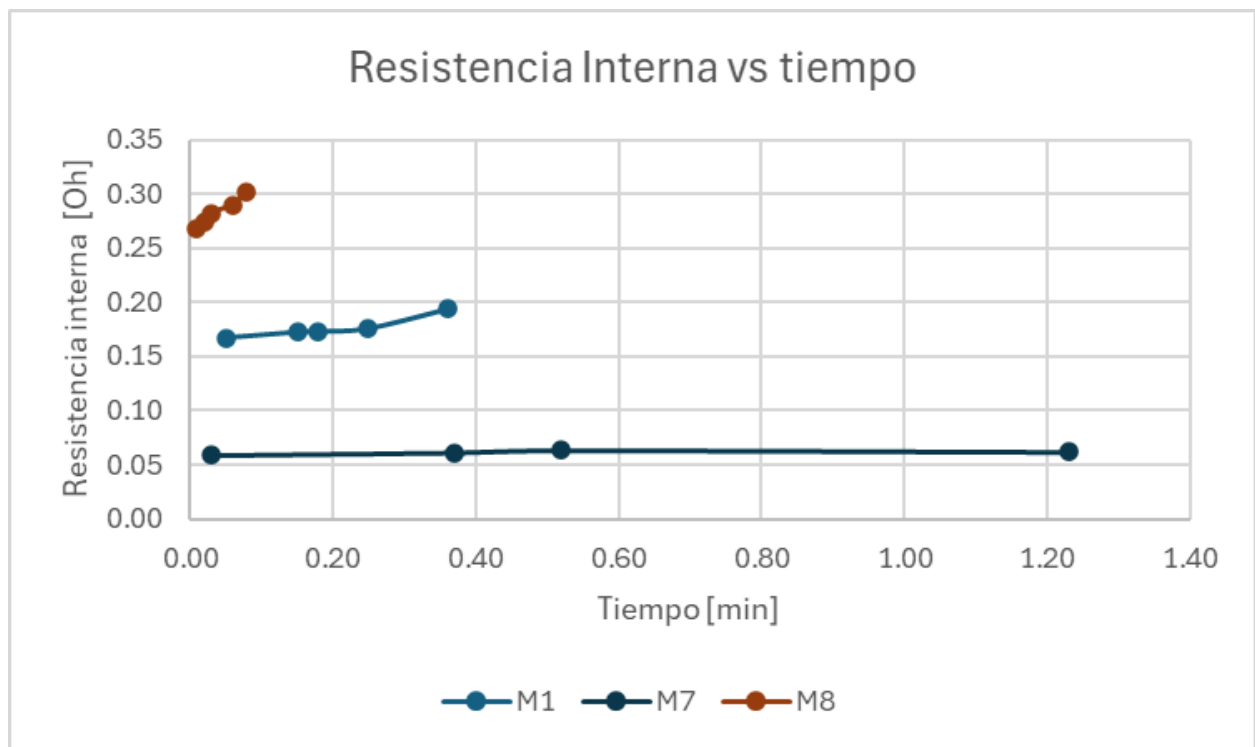
Gráfica de módulo 1,2 y 3 con la corriente que cede en descarga



En la figura 19 se muestra el comportamiento de la corriente de descarga en función del tiempo para los módulos del 1, 2 y 3. Se aprecia una tendencia lineal decreciente, que parte de un valor aproximado de 3,8 A y desciende hasta alrededor de 2,9 A, en correspondencia con el intervalo de tiempo requerido para completar la descarga de cada módulo. Esta tendencia refleja la disminución progresiva de la capacidad de entrega de corriente conforme avanza el proceso de descarga.

Figura 20

Gráfica de cada módulo con la resistencia interna en descarga



En la figura 20 se observa la resistencia interna del módulo 1,7 y 8, evidenciándose una tendencia lineal positiva en la mayoría de los casos, mientras que en algunos se mantuvo prácticamente constante.

Finalmente, para estimar el State of Health (SOH) de cada módulo, una vez determinada la capacidad real, dato obtenido previamente para el módulo 1 y empleando la ecuación 1.8, se

procedió a efectuar el cálculo correspondiente para cada uno de los módulos evaluados. A partir de este procedimiento, se obtuvieron cinco estimaciones del estado de salud para cada módulo que son detallados en la tabla 28 que se encuentra en anexos, mientras que en la tabla 16 se visualiza SOH para el módulo 1,2 y 3

Tabla 16

Estimaciones de estado de salud (SOH) inicial de módulo 1,2 y 3

SOH					
Módulo	SOH 1	SOH 2	SOH 3	SOH 4	SOH 5
1	0.0460	0.1338	0.1602	0.22	0.2852
2	0.0175	0.0348	0.0669	0.10	0.0000
3	0.0088	0.0347	0.0928	0.11	0.1924

Las estimaciones iniciales del estado de salud (SOH) de cada módulo arrojaron, a simple vista, conclusiones cuestionables respecto a su idoneidad para un correcto funcionamiento. No obstante, al someter varios módulos a cargas prolongadas entre 4 y 8 horas se observó un incremento significativo en la capacidad real medida, lo que implicó una mejora proporcional en el SOH.

3.2.5 Simulación y Ensamble

En esta sección se procedió a realizar una simulación en MATLAB con el propósito de justificar que, al aplicar un proceso de carga controlada a los módulos durante un tiempo determinado y bajo supervisión, es posible obtener un incremento significativo en el Estado de Salud (SOH) y,

de igual manera, en el valor del Estado de Carga (SOC). Esta simulación permite analizar el comportamiento de los módulos frente a diferentes intervalos de carga, evidenciando la relación directa entre el tiempo de carga supervisada y la mejora en los parámetros de desempeño.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el módulo 19. En primera instancia, este módulo fue cargado durante 31 minutos, alcanzando un incremento de voltaje desde 5.72 V hasta 7.54 V. Posteriormente, se realizó el proceso de balanceo y se procedió a su descarga controlada. Una vez completada esta etapa, el módulo fue nuevamente sometido a un proceso de carga con una duración de 4 horas, alcanzando un voltaje máximo de 8.5 V. Finalmente, después de un periodo de reposo de 8 horas posteriores a la carga, el voltaje se estabilizó en 8.2 V.

Figura 21

Tiempo, corriente y voltaje en descarga módulo 19

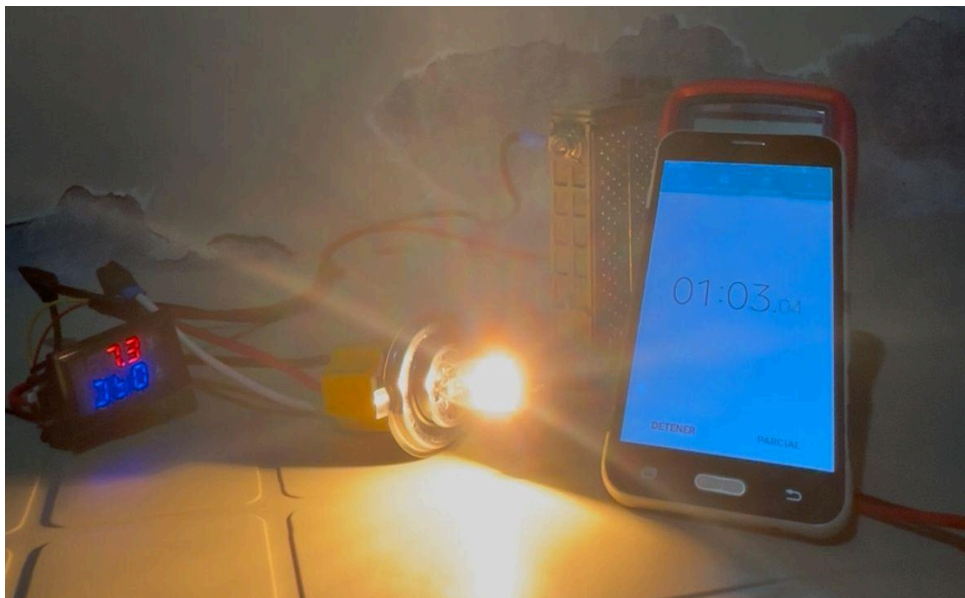
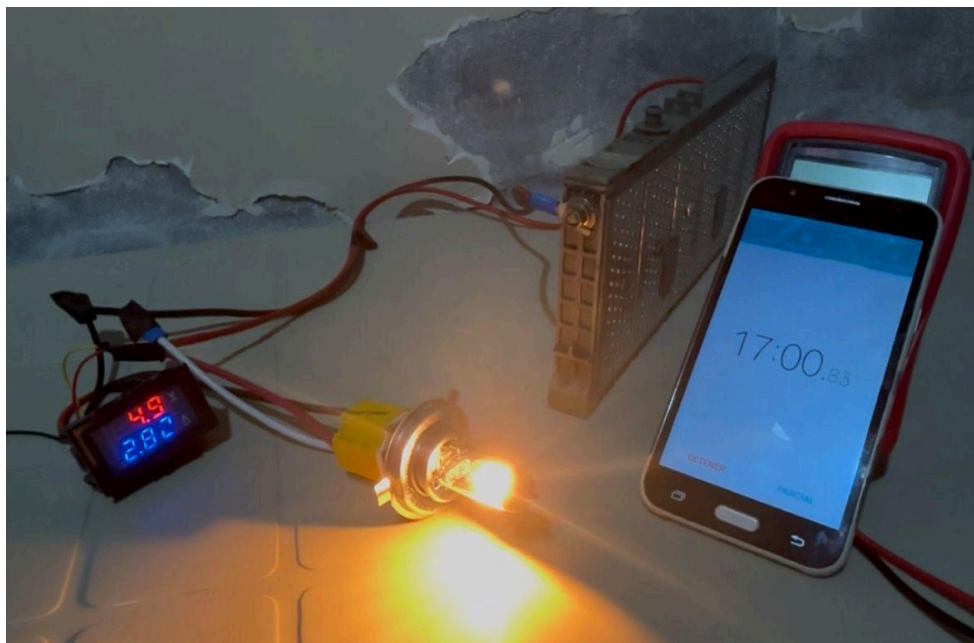


Figura 22

Tiempo, corriente y voltaje en descarga módulo 19



Ahora tenemos los resultados de la simulación para el módulo 19:

Figura 23

Tiempo de descarga y voltaje de descarga designado, SOC, SOH y resistencia interna y capacidad real.

```
Voltaje inicial del modulo cargado [V]: 8.2
Tiempo de la carga realizada [h]: 4
Corriente mínima de carga [A]: 0.4
Corriente máxima de carga [A]: 0.9
--- RESULTADOS ---
Tiempo total de descarga: 0.67 horas
Voltaje final de descarga: 4.90 V
Voltaje inicial del modulo antes de haber sido cargado [V]: 7

Capacidad real del modulo: 2.33 Ah
Resistencia interna: 0.586 Ohm
Estado de salud SOH: 35.81 %
SOC final al terminar descarga: 64.19 %
>>
```

Figura 24

Gráficas de voltaje y corriente vs tiempo en descarga módulo 19

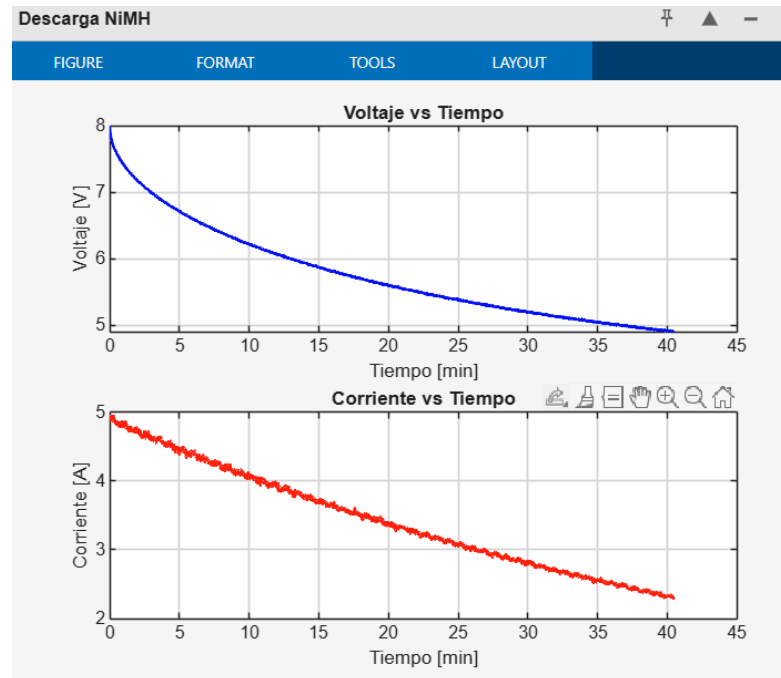
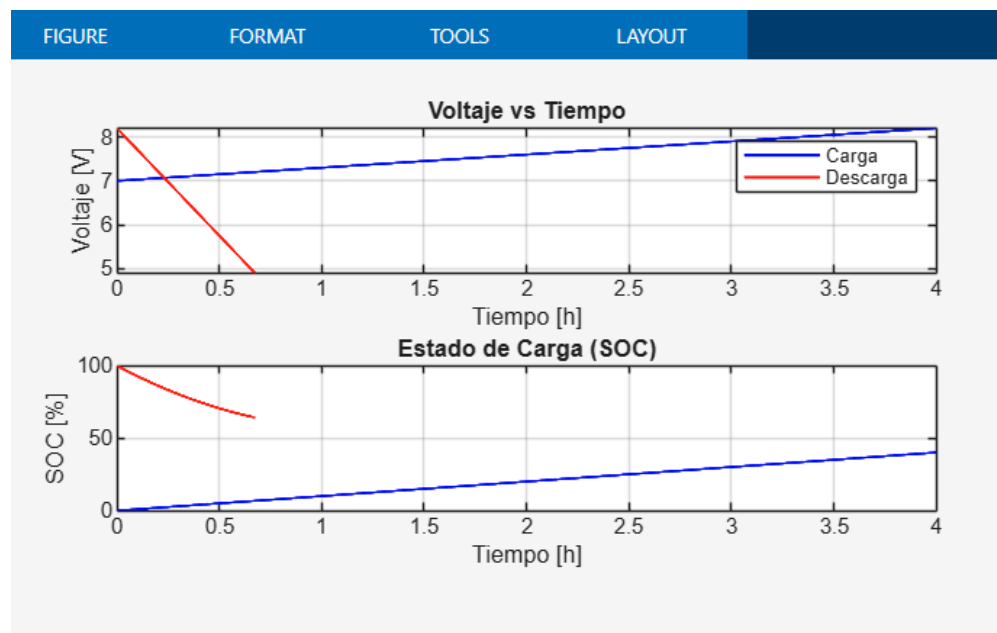


Figura 25

Gráficas de voltaje y SOC vs tiempo en carga y descarga módulo 19



De acuerdo a la figura 23 se aprecia un SOH del 36% y un SOC de 64%, entonces se evidencio que el módulo había experimentado un proceso de repotenciación. Se observó una mejora significativa respecto a su estado inicial, cuando presentaba un voltaje muy bajo. Los resultados de todos los módulos se encuentran en la tabla 29 en anexos, mientras que en la tabla 17 solo los datos del módulo 1, 2 y 3.

Tabla 17

Datos módulo 1,2 y 3 en simulación

Simulación						
Módulo	td[h]	Vfd [V]	Creal [Ah]	SOH [%]	SOC [%]	Ri [Ohm]
1	0.77	5.93	2.65	40.74	59.26	0.38
2	0.92	5.93	3.16	48.59	51.41	0.38
3	0.89	5.93	3.09	47.47	52.53	0.37

El ensamble se realizó utilizando las herramientas descritas en la sección 2.4 y considerando un total de 28 módulos. Durante el proceso de selección y evaluación, se identificó que aproximadamente 6 módulos no cumplían con las condiciones necesarias para su uso, ya sea por la ausencia de la válvula de expulsión de gases, por presentar sobrecalentamiento, por haber sufrido sobrecargas o por registrar caídas de tensión significativas. Como resultado, dichos módulos fueron descartados y reemplazados por otros en mejores condiciones, garantizando así la fiabilidad del conjunto final.

3.4 Revisión de parámetros en batería operativa mediante Techstream

En esta sección se llevó a cabo la visualización de los datos mediante una computadora conectada al puerto del vehículo Toyota Prius híbrido 2010 utilizando el software Techstream. Se observó el estado de carga máximo y mínimo de los módulos; en un vehículo en funcionamiento normal, la carga máxima se registró en 50% y la mínima en 39%. Además, se determinó que el estado de carga total de la batería era de 47%.

Se monitorean también los voltajes de los pares de módulos, correspondientes a los 14 pares del sistema. Adicionalmente, se registraron los valores de VL y VH, lo que permitió evaluar el comportamiento eléctrico de los módulos durante la operación del vehículo.

Figura 26

Software Techstream

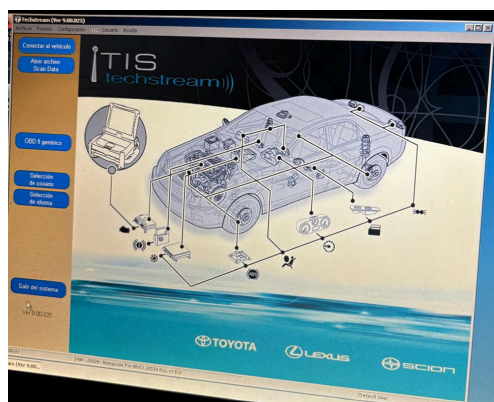


Figura 27

Introducción de datos para reconocimiento de vehículo

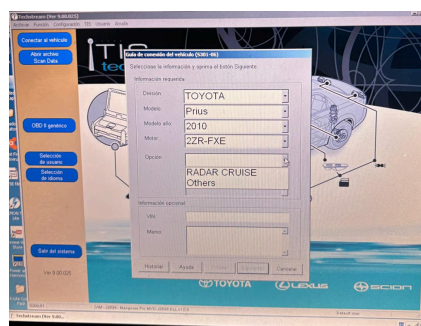


Figura 28

SOC All Bat, VL, VH, SOC máx y mín.

Techstream (Ver 9.00.025) - 10866

Archivar Función Configuración TIF Usuario Ayuda

Selección de sistema Datos almacenados Actualizar calib Control híbrido En vivo

2010 Prius
2ZR-FXE

VIN de entrada

Códigos de diagnóstico

Lista de datos

Prueba activa

Monitor

Utilidad

Lista de Datos Duales

Imprimir

Cerrar

Parametro	Valor	Unidad	Parametro	Valor	Unidad
Engine Coolant Temp	129	F	VL-Voltage before Boosting	218	V
Engine Revolution	0	rpm	VH-Voltage after Boosting	217	V
Vehicle Spd	0	MPH	Boost Ratio	0,0	%
Engine Run Time	1719	s	Drive Condition ID	0	
+B	14,23	V	Crank Position	-7	deg (CA)
Ambient Temperature	77	F	A/C Consumption Pwr	0	W
DTC Clear Run Distance	0	mile	Short Wave Highest Val	4,98	V
MAP	-0	psi(gauge)	Num of Current Code	0	
Atmosphere Pressure	-0	psi(gauge)	Calculate Load	0,0	%
Motor(MG2) Revolution	-1	rpm	Throttle Position	17,6	%
Motor(MG2) Torq	0,00	Nm	DCDC Cnv Tar Pulse Duty	61,6	%
M(MG2) Trq Exec Val	0,00	Nm	Inverter Coolant Water Temperature	102	F
Generator(MG1) Rev	0	rpm	Cooling Fan 0	0,0	%
Generator(MG1) Torq	0,00	Nm	Inverter W/P Revolution	3500	rpm
G(MG1) Trq Exec Val	0,00	Nm	Prohibit DC/DC conv sig	OFF	
Regenerative Brake Torq	0,0	Nm	EV Request	OFF	
Rqst Regen Brake Torq	0,0	Nm	Gradient of Road Surface	-0,1	m/s2
Inverter Temp-(MG1)	102	F	Permit Start by Immobiliser	Norml	
Inverter Temp-(MG2)	102	F	Immobiliser Communication	ON	
Motor Temp No2	108	F	Starter Switch	OFF	
Motor Temp No1	93	F	SOC after IG-ON	41,0	%
Accelerator Degree	0,0	%	Inv-Temp (MG1) Max	131	F
Request Power	0	W	Inv-Temp (MG2) Max	113	F
Target Engine Rev	0	rpm	Mtr-Temp (MG2) Max	93	F
State of Charge (All Bat)	47,0	%	Converter Temp Max	120	F
Master Cylinder Ctrl Trq	0,0	Nm	Status of Charge Max	50,0	%
Power Resource VB	218,0	V	Status of Charge Min	39,0	%
Power Resource IB	0,98	A	Stop Light Switch	OFF	
			Inter Lock Switch	OFF	

S306-01 Control híbrido 1547 ms

Primary Regular

Clasific. de A a Z

Figura 29

Voltaje en pares de cada par de módulos

Parametro	Valor	Unidad
MG1(Generator) Inverter Temperature High-Last Op	0	
MG1(Generator) Inverter Temp High-Last Trip	0	
Main Battery Low Voltage-Last Operation	0	
Main Battery Low Voltage-Last Trip	0	
Coolant Heating-Last Operation	0	
Coolant Heating-Last Trip	0	
Converter Heating-Last Operation	0	
Converter Heating-Last Trip	0	
Batt Pack Current Val	0.98	A
Inhaling Air Temp	86.2	F
VMF Fan Motor Voltage1	0.0	V
Auxiliary Battery Vol	14.18	V
Charge Control Value	-25.0	KW
Discharge Control Value	21.0	KW
Cooling Fan Mode1	0	
Temp of Batt TB1	92.1	F
Temp of Batt TB2	94.3	F
Temp of Batt TB3	98.7	F
Battery Block Vol -V01	15.67	V
Battery Block Vol -V02	15.60	V
Battery Block Vol -V03	15.60	V
Battery Block Vol -V04	15.57	V
Battery Block Vol -V05	15.57	V
Battery Block Vol -V06	15.57	V
Battery Block Vol -V07	15.57	V
Battery Block Vol -V08	15.57	V
Battery Block Vol -V09	15.60	V
Battery Block Vol -V10	15.60	V

Parametro	Valor	Unidad
Battery Block Vol -V11	15.60	V
Battery Block Vol -V12	15.60	V
Battery Block Vol -V13	15.62	V
Battery Block Vol -V14	15.65	V
Battery Low Time	0	
DC Inhibit Time	0	
Hot Temperature Time	0	

Con respecto a la Tabla 25, en la que se muestran los módulos balanceados con voltajes superiores a 7.4 V, lo que refleja voltajes en pares de 14.8 V en estado de reposo. Este valor correspondió a la tensión que mantuvieron los módulos después de 30 horas en reposo tras haber sido cargados. Por su parte, los módulos en pares del vehículo encendido y listo para arrancar presentaron un voltaje de 15.57 V. Con estos resultados se pudo validar que los módulos repotenciados alcanzaron voltajes superiores al nominal de 7.2 V, muy cercanos al voltaje operativo de los módulos en funcionamiento.

En la Figura 28 se visualizó el estado de carga total, así como los estados de carga máximo y mínimo, los cuales se encontraron en un rango de 39 a 50 %. Por otra parte, en la Tabla 29 se

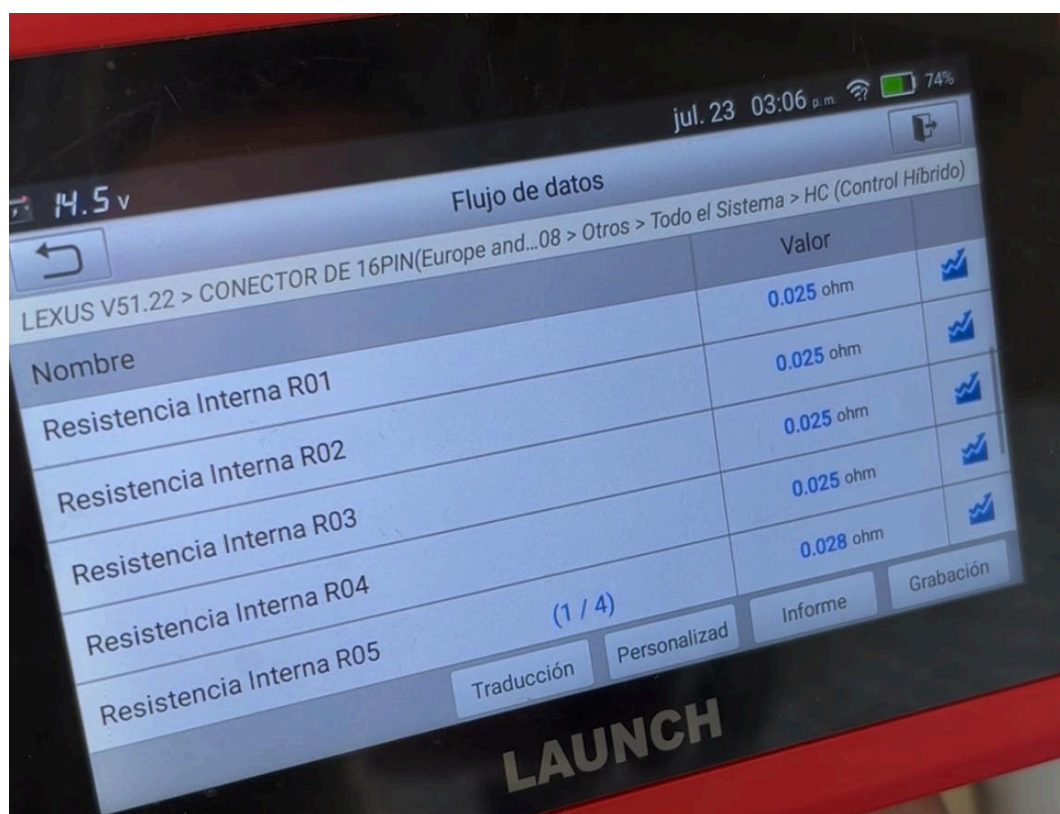
presentan los estados de carga simulados, calculados mediante un procedimiento de integración extenso. Se obtuvo un SOC de descarga desde 43 % hasta casi 70 %, lo que permitió validar que los módulos presentan un estado de carga aceptable.

3.5 Establecimiento de criterios de evaluación de módulos

Dentro de los criterios de evaluación para los módulos se realiza un enfoque en la resistencia interna, donde se encontró un estudio realizado sobre el desarrollo de baterías para vehículos híbridos, se visualizó la resistencia interna por celda de un módulo de batería NiMH con capacidad nominal de 1 Ah. Se determinó que la resistencia interna promedio de cada celda fue de 0.06Ω en estado de reposo, lo que implicó que la resistencia interna total del módulo ascendió a 0.36Ω [21, p. 3].

Figura 30

Resistencia interna de algunos módulos



En la Figura 30 se presentó un valor de resistencia interna correspondiente al momento en que un vehículo Toyota Lexus modelo 2010 se encontraba en funcionamiento. Este vehículo estaba equipado con un paquete de baterías compuesto por 30 módulos. El dato registrado correspondió a la resistencia interna de un módulo en conjunto. Este valor resultó parcialmente comparable, dado que los módulos de las baterías en donde se hizo experimentación presentaban características similares, incluyendo la misma capacidad nominal que los módulos evaluados [22].

Considerando las diferencias entre los datos obtenidos en condiciones de reposo y aquellos registrados durante el funcionamiento pleno, se estableció que un rango adecuado de resistencia interna para los módulos en estudio osciló entre 25 mΩ y 360 mΩ.

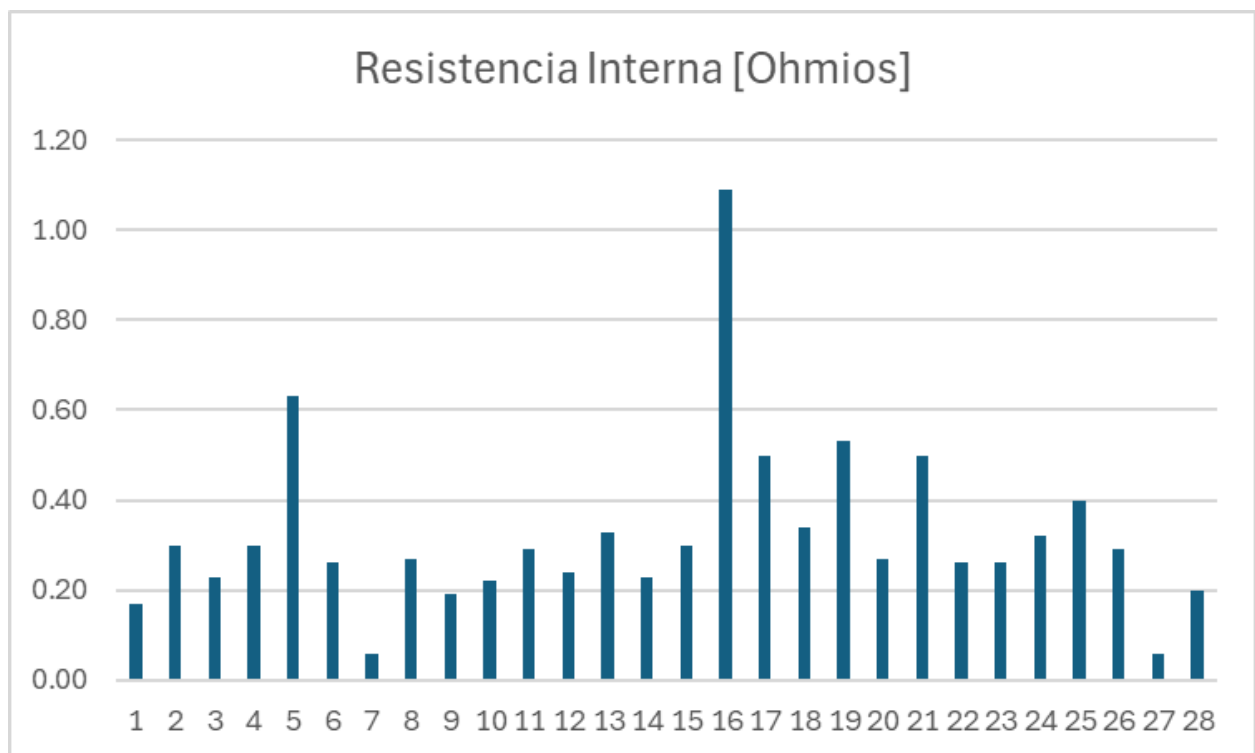
En relación con el parámetro del estado de salud (SOH), un estudio realizado por el Consorcio de Baterías Avanzadas de los Estados Unidos (USABC) en 1996 estableció que, cuando la batería alcanzaba únicamente el 80 % de su capacidad nominal, debía ser reemplazada. Es decir, se consideró que al descender al 80 % de SOH la batería había cumplido su vida útil. Sin embargo, en la actualidad este valor ha sido cada vez más cuestionado debido a los avances tecnológicos ya las nuevas condiciones de operación de las baterías [23]. En otro estudio se mencionó que las baterías debían ser reemplazadas cuando su estado de salud (SOH) se encontraba dentro de un rango del 70 % al 80 % [24]. Este criterio complementa la referencia inicial del Consorcio de Baterías Avanzadas de los Estados Unidos (USABC), aunque reflejó la existencia de diferentes enfoques respecto al umbral de sustitución de las baterías. Por ende, se consideró que en la actualidad no existía un rango definitivo y universalmente aceptado para determinar la viabilidad de una segunda vida de las baterías. En consecuencia, no fue posible establecer que, a partir de un valor específico de SOH, la batería pudiera o no continuar con una nueva vida útil.

Con respecto al estado de carga (SOC), se trató de un parámetro asociado a cada módulo de la batería. Este se definió como una medida del nivel de carga restante en la batería o en el supercondensador, expresado en porcentaje en relación con su capacidad total[25].

En este contexto, la Tabla 31 en anexos presentó los valores mínimos experimentales de resistencia interna que fueron calculados, junto con los valores simulados de los parámetros SOH y SOC, mientras que la figura 31 muestra un diagrama de barras con cada módulo y su resistencia interna.

Figura 31

Resistencia interna de cada módulo



En la figura 32 y 33 se realizó para visualizar de mejor manera el comportamiento con respecto al SOH una gráfica de barras de cada módulo con su SOH inicial y final.

Figura 32

SOH final de cada módulo basado en los datos obtenidos en simulación

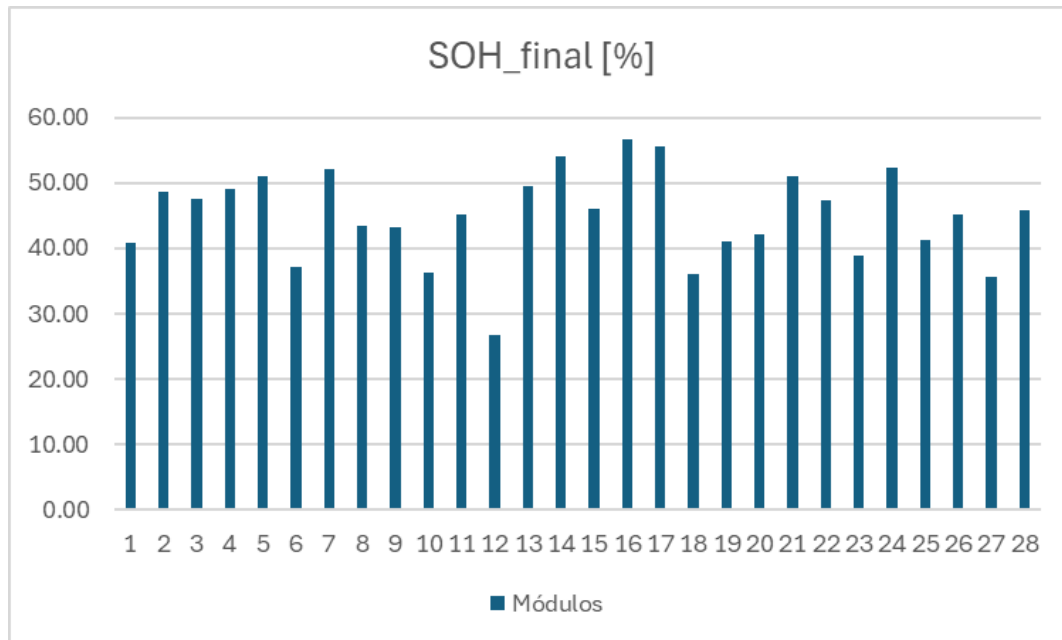
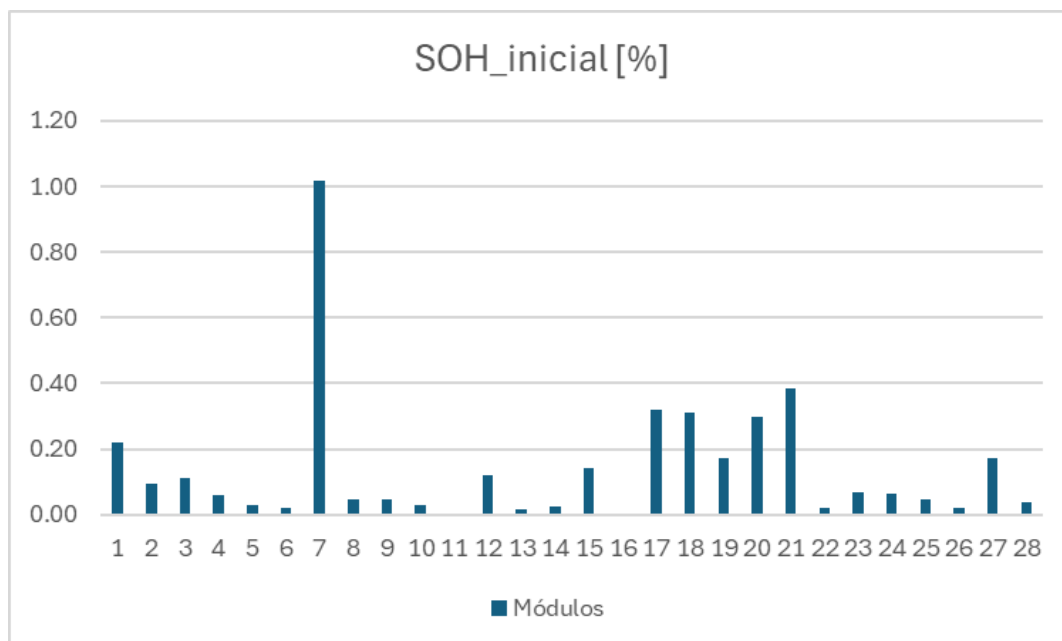


Figura 33

SOH inicial de cada módulo basado en los datos obtenidos en experimentación



Con un ciclo de carga de 4-6 horas tenemos un valor del SOH mucho mejor a comparación de haber realizado el primer ciclo de carga de una hora aproximadamente, con la observación de haber realizado descargas a los módulos que se consideraban con una baja retención de voltaje.

En la tabla 18 tenemos los datos de voltaje bajo (VH) y SOC de la batería, el dato de voltaje bajo es la suma de los voltajes en serie de cada módulo de la tabla 26 después de haber sido balanceados y el soc es de la tabla 29, que es un promedio de todos los módulos. Los datos de la batería operativa fueron sacados de la figura 28.

Tabla 18

Voltaje bajo, SOC en comparativa de batería experimentada y en uso

Batería Experimentada		Batería Operativa	
VH[V]	SOC [%]	SOC [%]	VH[V]
207.46	55%	47%	217

De la batería conformada por 28 módulos, se comprendió que los parámetros de resistencia interna oscilaron entre 0.17 y 1.09 Ω . Posteriormente, se aplicaron los criterios de aceptación establecidos entre 25 m Ω y 360 m Ω , lo que permitió analizar que aproximadamente el 78% de los módulos presentaron resultados positivos, mientras que seis módulos fueron descartados por superar el límite máximo de resistencia interna. Asimismo, se evaluó el estado de carga (SOC), observándose que la batería repotenciada alcanzó un 55% frente al 47% de la batería en uso, lo que evidenció una mejora en el desempeño. Finalmente, se creó una base metodológica que permitió seleccionar los módulos viables para la repotenciación y proyectar su segunda vida útil.

En anexos en la tabla 32 los SOH calculados y estimados, demuestran que en el primer ciclo de carga de una hora para cada módulo el SOH está muy bajo, mientras que cuando se realiza un

nuevo ciclo con 4 a 6 horas de carga, el estado de SOH mejora significativamente, bajo este parámetro todos los módulos han mejorado.

Pero como ya se lo ha mencionado, no existe un rango determinado actualmente y que se considere aceptado para el SOH en una batería, por esa razón bajo los parámetros de resistencia interna, SOC Y SOH, consideramos sólo 6 módulos descartados para formar parte de una batería repotenciada.

3.6 Consideraciones éticas y de seguridad

Dado que el presente estudio involucra el manejo de baterías potencialmente degradadas, se tomaron medidas de seguridad rigurosas como uso de guantes dieléctricos, protección facial y protocolos de aislamiento eléctrico, además de procedimientos de descarga con resistencia supervisada para evitar cortocircuitos.

Adicionalmente, las baterías y módulos fueron almacenados en áreas ventiladas, garantizando condiciones seguras frente a posibles fugas de gases o sobrecalentamiento. Se aplicaron protocolos de etiquetado y trazabilidad, de manera que cada módulo pudiera ser identificado y controlado durante el proceso de remanufactura.

En cuanto a los módulos no recuperables, estos fueron destinados a un área de desechos peligrosos, asegurando una correcta disposición final y evitando impactos negativos relacionados con la liberación de metales pesados y electrolitos en el ambiente.

Desde el punto de vista ético, los datos obtenidos fueron tratados de forma anónima y agregada, eliminando cualquier identificación directa del origen de los módulos. Asimismo, se procuró que el proyecto mantuviera un enfoque de beneficio colectivo, proponiendo soluciones sostenibles que contribuyeran a la reducción de residuos y emisiones en el sector automotriz.

Por otra parte, el personal participante previo a la manipulación de la batería realizaron la búsqueda necesaria de posibles riesgos de trabajo con la batería tales como, riesgos eléctricos y químicos, además de protocolos de actuación en casos de emergencia, como fugas, sobrecalentamiento o cortocircuitos, lo que permitió desarrollar la investigación bajo un marco de seguridad integral y responsabilidad ética.

3.7 Análisis ciclo de vida

Se realizó un análisis de ciclo de vida aplicado a la remanufactura de baterías NiMH aplicadas en vehículos híbridos. El análisis ciclo de vida permitió cuantificar con datos objetivos la importancia del proceso de remanufactura contra la fabricación y distribución de packs nuevos, se evidencia una concreta viabilidad ambiental al intentar extender cada uno de sus componentes.

Se reconoce que dentro de la investigación y sustentación no se dispones de datos explícitos sobre el reciclaje de módulos o baterías completas en el Ecuador, sin embargo, es importante resaltar que bajo la Ley Orgánica del Ecuador en el apartado de Ley de gestión Ambiental regulan la gestión ambiental en base a principios de sostenibilidad, asignan al Ministerio del ramo la autoridad principal, establecen requisitos para obtener licencias ambientales mediante evaluaciones y planes de manejo, y definen instrumentos legales y técnicos para controlar calidad, emisiones, productos [26]. Por lo tanto, todo componente dentro del paquete de baterías se denomina desechos peligrosos.

La revisión con trabajos anteriores permite visualizar que las conclusiones tienen un buen fundamento. Los estudios internacionales mencionan reducciones entre el 50 % y el 70 % en huella de carbono frente a la aplicación de remanufactura de fabricación de nuevas baterías [5].

3.7.1 Resultados principales del inventario

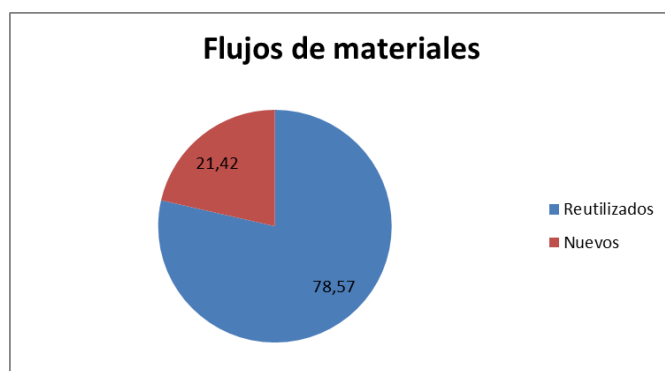
Se visualiza en la figura 34 que, en promedio, dependiendo del estado estacionario de la batería requerirá el reemplazo de 6 módulos defectuosos de 28, lo que corresponde aproximadamente al 21,4% del total. En el proceso de balanceo y pruebas se consumieron alrededor de 25 kWh por pack en ciclos de carga y descarga, con un tiempo total de 48 horas. El peso promedio de módulos descartados asciende a 4,16 kg por batería lo que corresponde al 21,42 % de masa perdida en una de las etapas del proceso de remanufactura, que deben ser gestionados como residuos peligrosos.

Reacondicionamiento de 22 módulos existentes + adquisición de 6 módulos nuevos.

- Reutilización de 22 módulos existentes mediante diagnóstico técnico, balanceo energético y carga estabilizada.
- Compra de 6 módulos nuevos.
- Consumo energético total estimado para el proceso de reacondicionamiento: 3,63 kWh.

Figura 34

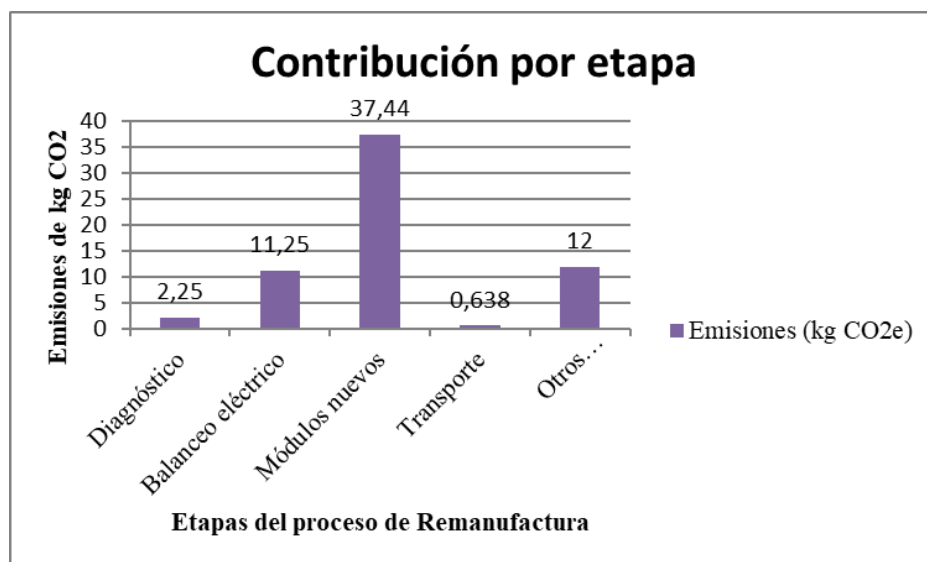
Flujo de materiales



Según estudios de ACV publicados por el Argonne National Laboratory [27], el proceso de fabricación de un módulo Ni-MH puede generar entre 9 y 11 kg de CO₂ equivalente, debido al uso intensivo de energía, la extracción de metales como níquel y lantano, y los procesos industriales de ensamblaje. Para fines comparativos se adopta un valor promedio de 10 kg CO₂ eq por módulo nuevo.

Figura 35

Contribución por etapa de emisiones de CO₂



Este resultado de la figura 35 respalda la estrategia de realizar la metodología de remanufacturar módulos funcionales y reemplazar únicamente aquellos que han superado su ciclo electroquímico útil.

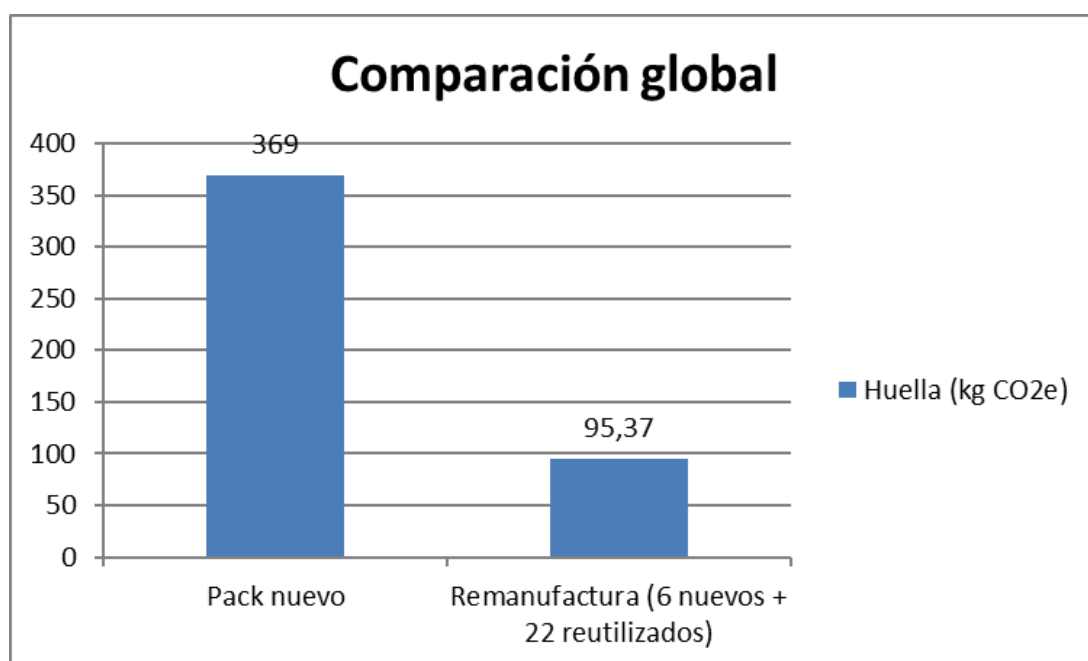
3.7.2 Impacto de las baterías de Ni-MH

En la tabla 34 en anexos, las baterías de NiMH tienen un impacto significativo en el calentamiento global, la toxicidad humana, la ecotoxicidad acuática marina y la acidificación. Como los resultados comparativos se presentan aquí como porcentajes, es evidente que las

baterías de NiMH contribuyen casi al 100% en la mayoría de las categorías. Las baterías de NiMH son de $1,66 \times 10^1$ kg 1,4-DB eq. El valor de ecotoxicidad acuática marina de $9,35 \times 10^3$ kg 1,4-DB eq. para las baterías de NiMH.

Figura 36

Comparación ambiental de un Pack nuevo y la batería en proceso de remanufactura del estudio presentado



Nota. Datos tomados de School of Engineering, Macquarie University, Sydney (2019)

El análisis de ciclo de vida demuestra que la remanufactura parcial de baterías híbridas representa una solución técnicamente viable y ambientalmente responsable como se logra visualizar en la figura 36, al reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo energético asociado a la fabricación de nuevos módulos.

3.7.3 Análisis de Viabilidad Técnico Económica y Financiera

Se analizaron los costos de mano de obra, materiales, equipos y energía. Se aplicaron herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo del costo nivelado de energía almacenada (LCOES).

La evaluación de la viabilidad económica permite determinar si la remanufactura de baterías Ni-MH para vehículos híbridos representa una alternativa económicamente rentable frente a la adquisición de una batería nueva. Este análisis incorpora tanto criterios financieros como ambientales, considerando que el proyecto se orienta hacia la sostenibilidad técnica y energética.

Se utilizó una metodología de análisis de flujos de caja descontados, aplicando indicadores financieros clásicos como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (Payback). Adicionalmente, se incorporó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como complemento para evaluar el impacto ambiental del proyecto.

La inversión inicial corresponde a la adquisición de equipos técnicos, herramientas, materiales y mano de obra calificada necesaria para reacondicionar una batería de 28 módulos. Esta inversión se desglosa en la Tabla 35 y 36 en anexos.

En base a los valores de mercado internacional (eBay, BattMech, Motorcells), una batería reacondicionada Ni-MH de 28 módulos puede alcanzar precios entre 750 y 1.100 USD, dependiendo del balanceo, garantía y procedencia. Dado que el proyecto alcanza la capacidad útil superior al 85%, se adopta un valor medio estimado de 950 USD como ingreso por cada batería reacondicionada.

Se proyecta que con los instrumentos adquiridos se podrá remanufactura de 50 - 100 baterías por año durante cinco años, sin necesidad de reinversión significativa. Durante ese periodo se obtendrá un ingreso anual alrededor de 42.500 USD. Solo en el tercer año se estiman costos

adicionales de operación debido a reposición de celdas, intervención técnica y consumo eléctrico.

a) Reposición de módulos o celdas defectuosas

Cada módulo defectuoso representa un costo adicional, ya sea porque se reemplaza en su totalidad, o se realiza una sustitución de celdas internas. En este proyecto, se estimó un escenario típico donde:

- Se deben reemplazar de 2-4 módulos por batería reacondicionada.
- Cada módulo tiene un costo promedio de 60 - 85 USD

Este costo puede variar si se opta por reemplazar módulos completos (más costoso) o si se pueden regenerar celdas con procesos electroquímicos más avanzados, sin embargo, en este estudio no se realizaron procesos electroquímicos avanzados por regularización y protección a los desechos peligrosos como los electrolitos.

b) Mano de obra técnica puntual

Durante el reacondicionamiento, se pueden presentar fallos eléctricos menores, tales como cortocircuitos, terminales dañados, necesidad de soldaduras o intervenciones mecánicas menores. Estos casos suelen resolverse con soporte técnico adicional no incluido en la mano de obra base.

Para cubrir estas eventualidades, se estima un costo fijo por intervención en taller mecánico de 50 USD por batería reacondicionada, que puede incluir hasta 2 horas de trabajo especializado, materiales de reparación o ajustes de conectores.

c) Consumo energético del proceso de reacondicionamiento

El proceso completo de reacondicionamiento de una batería de 28 módulos incluye:

- Diagnóstico de voltaje de circuito abierto (OCV)
- Descarga controlada con resistencias (focos halógenos)
- Recarga con fuente regulada (9–11 V)
- Balanceo final

Este conjunto de actividades requiere, en promedio, tres ciclos de carga por batería, cada uno con un consumo de energía estimado de 1,21 kWh.

Con base en el precio de electricidad residencial en Ecuador (0,097 USD [28]) el costo energético total asciende a:

Tabla 19

Total, energético estimado

Total energético estimado
$3 \text{ ciclos} \times 1,21 \text{ kWh} = \mathbf{3,63 \text{ kWh por batería}}$
$3,63 \text{ kWh} \times 0,097 \text{ USD/kWh} = \mathbf{0,35 \text{ USD}}$

En la tabla 37 que está en anexos se visualiza los costos operativos. Este valor puede variar +/- 10 – 15 % dependiendo del estado real de los módulos recuperados y de la frecuencia de fallos o

recambios necesarios. En el análisis financiero se ha adoptado este valor como referencia conservadora para el año 3, en el que se presenta una batería con condiciones medias de deterioro. En la tabla 37 de anexos se encuentra el flujo de caja proyectado.

Año 0

$$VAN = \sum_{T=0}^5 \frac{-15000}{(1+0,10)^T} = -15000 \text{ USD}$$

Año 1

$$VAN = \sum_{T=1}^5 \frac{4.000}{(1+0,10)^T} = 3636,36 \text{ USD}$$

Año 2

$$VAN = \sum_{T=2}^5 \frac{6.000}{(1+0,10)^T} = 4958,68 \text{ USD}$$

Año 3

$$VAN = \sum_{T=3}^5 \frac{8.000}{(1+0,10)^T} = 6010,52 \text{ USD}$$

Año 4

$$VAN = \sum_{T=4}^5 \frac{9.000}{(1+0,10)^T} = 6147,12 \text{ USD}$$

Año 5

$$VAN = \sum_{T=5}^5 \frac{9.000}{(1+0,10)^T} = 5588,29 \text{ USD}$$

Tabla 20

Van, Tir, Payback

VAN	11.341 USD
TIR	32,50 %
Payback	3 años

Se considera, además, con una reducción del 15,8 % en el valor de venta por batería, el proyecto sigue siendo altamente rentable. El VAN supera los 11.000 USD, con una TIR del 32,50 % y una recuperación de la inversión en alrededor de 3 años desde la primera operación anual, esto debido que no se contabiliza como una adquisición, más bien, como un servicio prestado al cliente.

Este análisis demuestra que la remanufactura de baterías a escala no solo es viable en condiciones óptimas de mercado, sino también bajo escenarios conservadores. El margen operativo permite absorber fluctuaciones en los precios sin comprometer la rentabilidad global del modelo.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

El trabajo desarrollado tuvo una gran relevancia, ya que se centró en la experimentación práctica para determinar la viabilidad de la repotenciación de módulos de baterías NiMH utilizadas en vehículos híbridos. Esta investigación fue significativa porque permitió evaluar, mediante pruebas controladas de carga y descarga, si los módulos considerados con bajo desempeño podrían recuperar parte de su capacidad y prolongar así su vida útil ya sea para volver al mercado automotriz o para condiciones estacionarias. Finalmente, desde una perspectiva ambiental, la repotenciación contribuyó a disminuir la generación de desechos electrónicos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Fortalezas

La experimentación se caracterizó por el registro detallado de los procesos de carga y descarga en todos los módulos, lo que permitió obtener una base de datos confiable para el análisis. Se trabajó con dos paquetes de baterías distintos, lo cual posibilitó comparar comportamientos. En la primera batería, los módulos presentaron baja retención de voltaje y caídas de tensión tras la carga, mientras que en la segunda batería se observó un mejor desempeño general, con mayor estabilidad en la retención de voltaje.

Debilidades

Entre las debilidades se destacó que no se validó el paquete repotenciado en un vehículo híbrido, lo cual habría permitido comprobar su funcionamiento en condiciones reales. Asimismo, se perdieron algunos módulos debido a la falta de herramientas adecuadas para desmontar las tuercas selladas en los pines de carga. Finalmente, las mediciones se realizaron con un módulo visor de voltaje y corriente en lugar de un osciloscopio, lo que limitó la precisión de los registros.

4.1.1 Conclusiones

Se determinó que al aplicar la metodología de repotenciación de módulos en baterías NiMH, como se muestra en la Figura 9, se obtuvieron datos, simulaciones y comparaciones entre tres baterías distintas: una más antigua, compuesta por 20 módulos, en estado relegado y desmontada, lista para ser dada de baja; una segunda batería con menor antigüedad, de 28 módulos, también en estado relegado y desmontada; y una tercera batería operativa, instalada en un vehículo de la misma marca y modelo, que se utilizó como referencia para la comparación. A partir de estos análisis se obtuvieron las conclusiones correspondientes a cada objetivo.

- Se realizó el diagnóstico en dos baterías, durante el cual se experimentó y evaluó cada módulo para determinar aquellos que serían descartados, ya sea por razones de seguridad o por bajo rendimiento. A lo largo de cada fase de la metodología de repotenciación, se fueron identificando y eliminando los módulos no aptos, dejando únicamente aquellos que continuarán siendo considerados para repotenciación, en el primer ciclo de carga el SOH estimado fue muy bajo por parte de todos los módulos.
- Los parámetros SOC, SOH, resistencia interna y voltaje después de carga fueron calculados y simulados, y sus resultados se compararon con los de una batería operativa. De esta manera, se estableció un rango de referencia en la resistencia interna para los módulos que se consideran repotenciados en donde se obtuvo un 78% de módulos repotenciados bajo este parámetro, el SOH final simulado el 100 % de los módulos presentaron una mejoría y el SOC presenta datos por encima de los de una batería operativa.
- La Figura 9 ilustra de manera completa la metodología aplicada a una batería, desde su desmontaje del vehículo hasta su ensamble final, mostrando cada una de las etapas del proceso.

- La evaluación económica y ambiental del proceso de remanufactura de baterías Ni-MH demostró que el proyecto fue sostenible. Los indicadores financieros confirmaron una rápida recuperación de la inversión y márgenes adecuados para cubrir variaciones en costos operativos, mientras que el análisis de ciclo de vida evidenció la reducción de residuos y la prolongación de la vida útil de algunos de los módulos.

4.1.2 Recomendaciones

Tras culminar la propuesta y ejecutar la experimentación de repotenciación de módulos de baterías NiMH, se identificaron las siguientes recomendaciones para estudios futuros y mejoras en la metodología:

- Se recomienda validar los módulos repotenciados en vehículos híbridos o aplicaciones estacionarias, con el fin de comprobar su desempeño bajo condiciones reales de operación.
- Se sugiere ampliar la muestra de baterías y módulos de distintas marcas y antigüedades para fortalecer la representatividad de los resultados.
- Se aconseja optimizar herramientas y procedimientos de desmontaje para reducir la pérdida de módulos y mejorar la eficiencia del proceso.
- Se recomienda el uso de instrumentos de medición más precisos, como osciloscopios y sistemas de adquisición de datos, para registrar con mayor exactitud voltaje, corriente y resistencia interna.
- Se sugiere realizar estudios de longevidad de los módulos repotenciados, evaluando la degradación por ciclos de carga y descarga para estimar su vida útil.
- Se recomienda realizar el análisis de ciclo de vida mediante un programa especializado, con el fin de estimarlo de manera adecuada y disponer de un amplio conjunto de datos y variables a considerar.

Bibliografía

- [1] E. Fernández, D. Rojas, C. Daniel, y E. Martín, «The Second Life of Hybrid Electric Vehicles Batteries Methodology of Implementation in Ecuador». IntechOpen, 2021. [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/354382684_The_Second_Life_of_Hybrid_Electric_Vehicles_Batteries_Methodology_of_Implementation_in_Ecuador
- [2] «BOLETIN-VENTAS_PRENSA_SEPTIEMBRE-2024.pdf». Accedido: 1 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2024/09/BOLETIN-VENTAS_PRENSA_SEPTIEMBRE-2024.pdf
- [3] N. Bhalla, «Examining the Impact of Issue Salience, Issue Proximity, Situational Motivation, and Communicative Behaviors on Environmental CSR Outcomes», *Sustainability*, vol. 14, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2022, doi: 10.3390/su14052763.
- [4] L. M. F. Dib, «Tema: Reutilización de las Baterías de Tracción de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH) en la Generación de Energía Alternativa para un Taller Automotriz.».
- [5] S. Wu, J. Staines, B. Moonen, y W. Li, «Life Cycle Assessment of Remanufacturing Hybrid Vehicle Batteries: An Australia Case», *Procedia CIRP*, vol. 135, pp. 654-659, 2025, doi: 10.1016/j.procir.2024.12.058.
- [6] «Improved monitoring and battery equalizer control scheme for electric vehicle applications | Request PDF», en *ResearchGate*, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062383.
- [7] CADEX, «BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries», *Batteries in a Portable World - A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, vol. 4th edition, 21 de octubre de 2021.

[8] T. Müller y B. Friedrich, «Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries», *J. Power Sources*, vol. 158, n.º 2, pp. 1498-1509, ago. 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.10.046.

[9] M. Winter y R. J. Brodd, «What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?», *Chem. Rev.*, vol. 104, n.º 10, pp. 4245-4270, oct. 2004, doi: 10.1021/cr020730k.

[10] T. M. CORPORATION, «TMC Strengthens Battery Production Capabilities | Corporate | Global Newsroom», Toyota Motor Corporation Official Global Website. Accedido: 20 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/40515408.html>

[11] «2006 PRIUS Repair Manual - 2006 PRIUS Electrical Wiring Diagram.pdf». Accedido: 18 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://attachments.priuschat.com/attachment-files/2020/01/181285_Hybrid_Battery.pdf?

[12] «Mitos y realidades en el reciclado de baterías eléctricas para coches». Accedido: 1 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/mitos-y-realidades-en-el-reciclado-de-baterias-electricas-para-coches>

[13] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen, y H.-J. Klüppel, «The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, n.º 2, pp. 80-85, 2006.

[14] T. L. Floyd, *Principles of electric circuits: conventional current version*, 8th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2007.

[15] Y. Huo, Z. Rao, X. Liu, y J. Zhao, «Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate», *Energy Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 387-395, ene. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.10.015.

[16] Z. He *et al.*, «An estimation framework for battery pack state of health based on real vehicle charging and discharging features», *J. Power Sources*, vol. 631, p. 236235, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2025.236235.

[17] R. Martínez-Sánchez, A. Molina-García, A. Mateo-Aroca, y A. P. Ramallo-González, «Evaluating a Nickel–Metal Hydride (NiMH) Battery Regeneration Patent Based on a Non-Intrusive and Unsupervised Prototype», *Batteries*, vol. 10, n.º 11, Art. n.º 11, nov. 2024, doi: 10.3390/batteries10110402.

[18] «BU-807: How to Restore Nickel-based Batteries», Battery University. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries>

[19] J. B. Dunn, L. Gaines, J. Sullivan, y M. Q. Wang, «Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, n.º 22, pp. 12704-12710, nov. 2012, doi: 10.1021/es302420z.

[20] M. A. P. Mahmud, N. Huda, S. H. Farjana, y C. Lang, «Comparative Life Cycle Environmental Impact Analysis of Lithium-Ion (LiIo) and Nickel-Metal Hydride (NiMH) Batteries», *Batteries*, vol. 5, n.º 1, p. 22, feb. 2019, doi: 10.3390/batteries5010022.

[21] H. Lewis, H. Park, y M. Paolini, «Frontier battery development for hybrid vehicles», *Chem. Cent. J.*, vol. 6, n.º Suppl 1, p. S2, abr. 2012, doi: 10.1186/1752-153X-6-S1-S2.

[22] «ニッケル水素バッテリー», トヨタバッテリー株式会社. Accedido: 18 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.toyota-battery.com/jp/products/nimh/>

[23] J. Zhu *et al.*, «End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries», *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 2, n.º 8, ago. 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.

[24] S. Maharajan, M. Jana, y S. Basu, «Handling of the End of Life Electric Vehicle Batteries for Stationary Storage Applications», en *2019 IEEE Transportation*

Electrification Conference (ITEC-India), dic. 2019, pp. 1-5. doi:

10.1109/ITEC-India48457.2019.ITECINDIA2019-122.

[25] «State of Charge - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 20 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/state-of-charge?utm_source=chatgpt.com

[26] P. Halder, E. Paladinić, M. Stevanov, S. Orlović, T. J. Hokkanen, y P. Pelkonen, «Energy wood production from private forests – nonindustrial private forest owners' perceptions and attitudes in Croatia and Serbia», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, pp. 515-526, jul. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.038.

[27] MSc. Gladis Sara Sanmartín Ramón, MSc. Rosalía Aura Zhigue Luna, MSc. Tania Patricia Alaña Castillo, «RECYCLING: A NICHE INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP WITH ENVIRONMENTAL FOCUS», mar. 2017.

[28] GlobalPetrolPrices, «Ecuador electricity prices», 2024.

[29] «Executive summary – Batteries and Secure Energy Transitions – Analysis», IEA. Accedido: 26 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary>

[30] K. Korkmaz *et al.*, «System analysis with life cycle assessment for NiMH battery recycling», *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 382, n.º 2284, nov. 2024, doi: 10.1098/rsta.2023.0243.

[31] «Development of the cycling life model of Ni-MH power batteries for hybrid electric vehicles based on real-world operating conditions | Request PDF», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.1016/j.est.2020.101999.mplementation_in_Ecuador

[32] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, Methods for state-of-charge determination and their applications, Journal of Power Sources, Volume 96, Issue 1, 2001, Pages 113-120, ISSN 0378-7753, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00560-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00560-2).

Anexos

Código utilizado en matlab para cada módulo:

```
clc; clear; close all; % Limpiar pantalla, variables y figuras

%% === DATOS DE ENTRADA ===

V_init = input('Voltaje inicial del modulo cargado [V]: '); % Voltaje del módulo al terminar la carga

t_carga = input('Tiempo de la carga realizada [h]: '); % Horas de carga (dato experimental)

I_min = input('Corriente mínima de carga [A]: '); % Corriente mínima usada durante la carga

I_max = input('Corriente máxima de carga [A]: '); % Corriente máxima usada durante la carga

cap_nominal = 6.5; % Capacidad nominal del módulo [Ah]

n_celdas = 6; % Número de celdas en serie

V_cutoff_celda = 0.816; % Voltaje de corte por celda [V]

V_final_cutoff = n_celdas*V_cutoff_celda; % Voltaje total de corte del módulo

I_descarga_max = 4.9; % Corriente máxima de descarga (inicio)

I_descarga_min = 2; % Corriente mínima de descarga (final)

%% === ENERGÍA DISPONIBLE (integración de carga) ===

dt = 1; % paso temporal de 1 segundo

t_carga_seg = t_carga*3600; % convertir horas a segundos

t_carga_vec = 0:dt:t_carga_seg; % vector de tiempo de carga

% Generar corriente de carga aleatoria en el rango [I_min, I_max]

rng('shuffle'); % Semilla aleatoria distinta cada ejecución

I_carga_t = I_min + (I_max - I_min).*rand(size(t_carga_vec));

% Integrar corriente en el tiempo -> carga total en Ah

Q_cargada = trapz(t_carga_vec, I_carga_t)/3600;

Q_cargada = min(Q_cargada, cap_nominal); % No superar capacidad nominal

%% === SIMULACIÓN DE DESCARGA ===

dt = 1; % paso de 1 segundo
```

```

t = 0; Q_descargada = 0; % inicializar tiempo y carga descargada

T = []; I = []; V = []; % vectores para guardar resultados

% Parámetros de ruido y resistencia interna

ruido_corriente = 0.01; % ±1% en corriente

ruido_voltaje = 0.004; % ±4 mV

Rint_min = 0.04; % Resistencia interna inicial [ohm]

Rint_max = 0.08; % Resistencia interna final [ohm]

% Bucle de descarga hasta llegar al cutoff o vaciar carga

while Q_descargada < Q_cargada

    % Fracción de descarga (0 → 100%)

    frac = min(1, Q_descargada/Q_cargada)

    % Corriente decreciente con ruido

    I_base = I_descarga_max + (I_descarga_min - I_descarga_max)*frac;

    I_t = max(I_descarga_min, I_base*(1 +
ruido_corriente*(0.5*sin(2*pi*0.02*t)+0.5*randn())));

    % Resistencia interna crece con la descarga

    Rint = Rint_min + (Rint_max - Rint_min)*frac;

    % Voltaje no lineal vs SOC + ruido

    V_oc = V_final_cutoff + (V_init - V_final_cutoff)*(1 - frac^0.5);

    V_t = V_oc - I_t*Rint + ruido_voltaje*randn();

    % Guardar resultados

    T(end+1) = t;

    I(end+1) = I_t;

    V(end+1) = V_t;

    % Verificar si se alcanzó el voltaje de corte

    if V_t <= V_final_cutoff

        V(end) = V_final_cutoff; % fijar límite

        break;

```

```

end

% Integrar carga descargada (Ah)

Q_descargada = Q_descargada + (I_t*dt)/3600;

t = t + dt; % avanzar tiempo

end

%% === RESULTADOS PRIMERA ETAPA ===

t_descarga_horas = T(end)/3600; % Tiempo de descarga en horas

V_final = V(end);          % Voltaje final

fprintf('--- RESULTADOS DE LA DESCARGA ---\n');

fprintf('Tiempo total de descarga: %.2f horas\n', t_descarga_horas);

fprintf('Voltaje final de descarga: %.2f V\n', V_final);

%% === GRAFICAS DE DESCARGA ===

if ~isempty(T) && ~isempty(V) && ~isempty(I)

    figure('Name','Descarga NiMH','NumberTitle','off');

    subplot(2,1,1);

    plot(T/60,V,'b','LineWidth',1.5);

    xlabel('Tiempo [min]'); ylabel('Voltaje [V]');

    title('Voltaje vs Tiempo (descarga)');

    grid on;

    subplot(2,1,2);

    plot(T/60,I,'r','LineWidth',1.5);

    xlabel('Tiempo [min]'); ylabel('Corriente [A]');

    title('Corriente vs Tiempo (descarga)');

    grid on;

end

%% === SEGUNDA ETAPA: CÁLCULO SOC Y SOH ===

V_ini = input('Voltaje inicial del modulo ANTES de la carga [V]: '); % Voltaje antes de la carga

```

```

V_carga = V_init;      % Voltaje final de carga
V_desc = V_final_cutoff; % Voltaje final de descarga
t_carga_h = t_carga;   % tiempo de carga [h]
t_desc_h = t_descarga_horas; % tiempo de descarga [h]

% Rangos de corriente
I_carga_min = I_min;
I_carga_max = I_max;
I_desc_min = I_descarga_min;
I_desc_max = I_descarga_max;

%% Parámetros de simulación SOC
C_nom = 6.5;          % Capacidad nominal Ah
t_carga = t_carga_h*3600; % tiempo de carga [s]
t_desc = t_desc_h*3600;  % tiempo de descarga [s]

% Vectores de tiempo
t_carga_vec = linspace(0,t_carga,t_carga);
t_desc_vec = linspace(0,t_desc,t_desc);

% Corriente de carga simulada (aleatoria)
I_carga_t = I_carga_min + (I_carga_max - I_carga_min)*rand(1,t_carga);

% Corriente de descarga (lineal decreciente)
I_desc_t = linspace(I_desc_max, I_desc_min, t_desc);

% Voltaje simulado en carga y descarga
V_carga_t = linspace(V_ini, V_carga, t_carga);
V_desc_t = linspace(V_carga, V_desc, t_desc);

%% Cálculo SOC (State of Charge)
dt_desc = 1/3600; % paso = 1 s expresado en horas
SOC_desc = 100 - cumsum(I_desc_t*dt_desc)/C_nom*100; % se va reduciendo
dt_carga = 1/3600;

```



```

SOC_carga = cumsum(I_carga_t*dt_carga)/C_nom*100; % se va aumentando

%%% Capacidad real medida (Ah)

C_real = sum(I_desc_t*dt_desc);

%%% Resistencia interna promedio

V_oc = V_carga; % se asume voltaje en circuito abierto tras la carga

R_inst = (V_oc - V_desc_t)/I_desc_t; % resistencia instantánea

R_int = trapz(t_desc_vec, R_inst)/t_desc; % promedio

%%% Estado de salud (SOH)

SOH = (C_real/C_nom)*100;

%%% === GRAFICAS DE SOC Y VOLTAJE ===

figure;

subplot(3,1,1)

plot(t_carga_vec/3600,V_carga_t,'b','LineWidth',1.2); hold on;

plot(t_desc_vec/3600,V_desc_t,'r','LineWidth',1.2);

xlabel('Tiempo [h]'); ylabel('Voltaje [V]');

title('Voltaje vs Tiempo (carga/descarga)');

legend('Carga', 'Descarga'); grid on;

subplot(3,1,2)

plot(t_carga_vec/3600,SOC_carga,'b','LineWidth',1.2); hold on;

plot(t_desc_vec/3600,SOC_desc,'r','LineWidth',1.2);

xlabel('Tiempo [h]'); ylabel('SOC [%]');

title('Estado de Carga (SOC)'); grid on;

%%% === MOSTRAR RESULTADOS FINALES ===

fprintf('\nCapacidad real del modulo: %.2f Ah\n', C_real);

fprintf('Resistencia interna: %.3f Ohm\n', R_int);

fprintf('Estado de salud SOH: %.2f%%\n', SOH);

fprintf('SOC final al terminar descarga: %.2f%%\n', SOC_desc(end));

```

En esta sección se presentaron las fotografías correspondientes a la experimentación llevada a cabo en las dos baterías intervenidas con fines académicos. La primera de ellas, compuesta por 20 módulos y perteneciente a un vehículo Toyota Prius C, se describe a continuación.

La batería fue recibida sin la carcasa, por lo que se procedió a realizar el desensamble de los módulos. Posteriormente, se efectuó la medición del voltaje inicial de cada módulo, el voltaje máximo alcanzado durante la carga mediante una fuente regulada de 12 V y 5 A, así como el voltaje posterior al finalizar la carga. Todo este procedimiento se llevó a cabo registrando el tiempo correspondiente a cada etapa. A continuación, se presentan los datos obtenidos para cada uno de los 20 módulos.

Figura 37

Medición de Voltaje antes de empezar la carga módulo 1

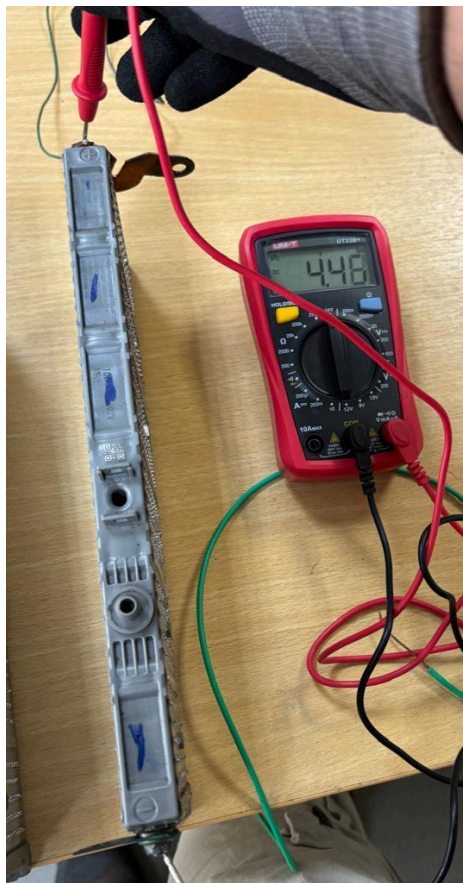


Figura 38

Voltaje del módulo 1 conectada a fuente

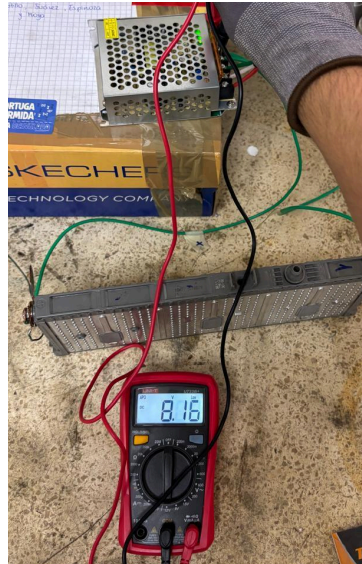


Figura 39

Voltaje de módulo 1 tiempo después de haber cargado el mismo



Figura 40

Voltaje de módulo 1 conectado a una carga

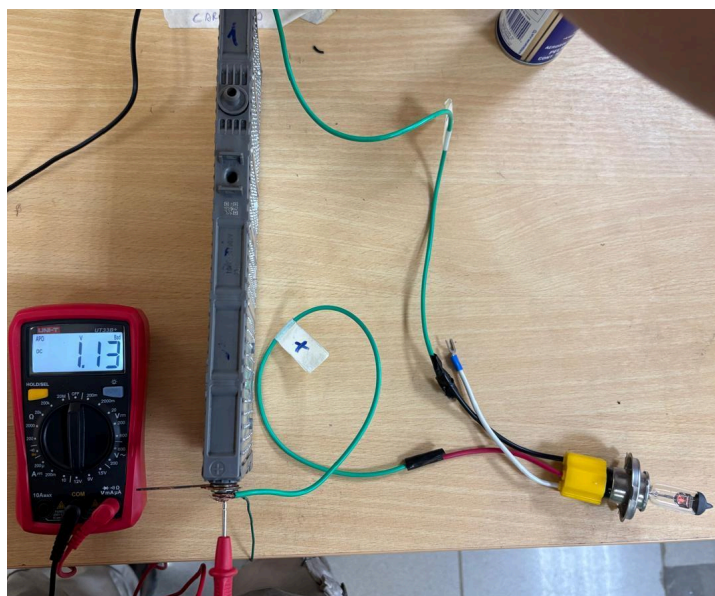


Figura 41

Medición de Voltaje antes de empezar la carga del módulo 2



Figura 42

Voltaje del módulo 2 conectada a fuente.



Figura 43

Voltaje de módulo 2 tiempo después de haber cargado el mismo.



Figura 44

Voltaje de módulo 2 conectado a una carga.

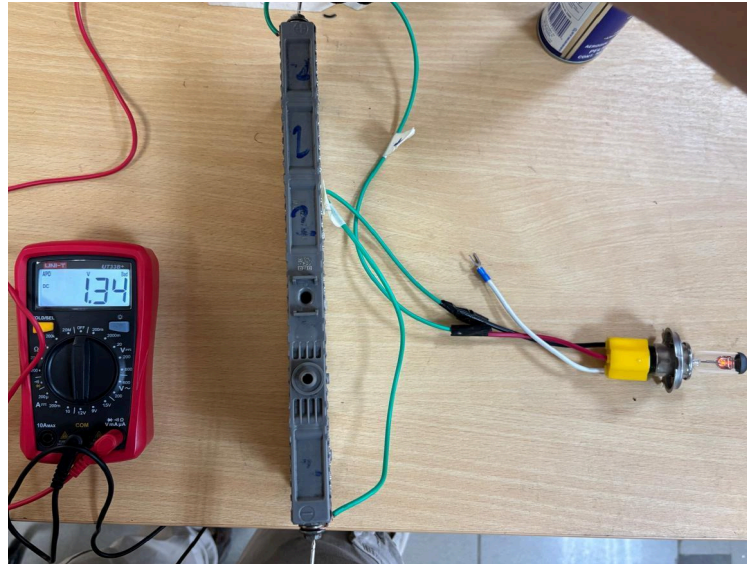
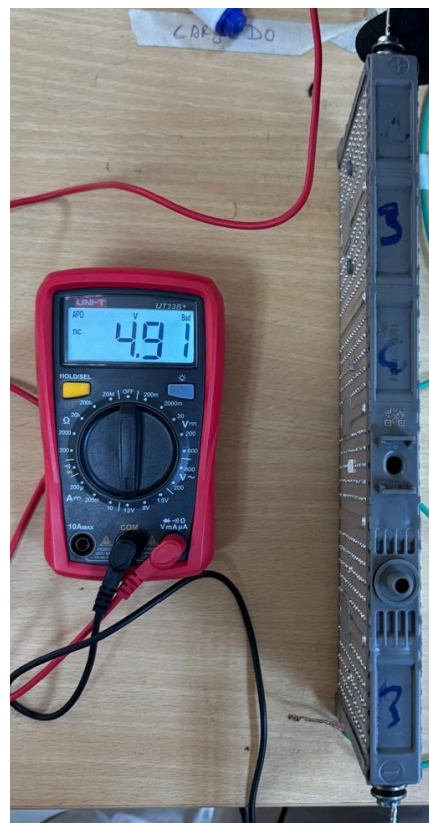


Figura 45

Medición de Voltaje antes de empezar la carga módulo 3.



.....

....

...

.

Todos los datos obtenidos fueron organizados en una tabla, a partir de la cual se determinó la corriente de descarga, entre otros parámetros de interés.

Tabla 21*Ciclo de Carga de todos los módulos*

<i>Carga</i>				
<i>Módulo</i>	<i>Voltaje Inicial[V]</i>	<i>Tiempo Carga [min]</i>	<i>Voltaje en carga[V]</i>	<i>Voltaje [V]</i>
1	4.46	6.5	8.16	7.9
2	3.8	7.2	8.06	7.4
3	4.91	10.12	8	7.73
4	4.42	11.27	7.82	7.52
5	0.41			
6	4.58	8.47	7.98	7.22
7	0.3	5.4	8.15	7.46
8	0.35	4.48	8	7.76
9	4.7	7.46	8.01	7.38
10	4.26	4.53	8.06	7.66
11	5.85			
12	5	11.34	8.04	7.92
13	4.5	9	8.04	7.75
14	5.14	5.3	8.04	7.72
15	0.24			
16	5.06	5.5	8.08	7
17	1.44	4.49	8.12	7.51
18	4.75	5	8.19	7.72
19	4.95	6	8.12	7.71
20	4.99	6.44	8.15	7.68

Tabla 22

Ciclo de descarga de todos los módulos

<i>Descarga</i>							
<i>Módulo</i>	<i>Tiempo descarga[min]</i>	<i>Potencia R[W]</i>	<i>I descarga[A]</i>	<i>Voltaje Descarga[V]</i>	<i>R interna [Oh]</i>	<i>C Real [Ah]</i>	<i>SOH %</i>
1	2.45	10.73	2.02	5.30	1.41	0.08	1.27
2	2.40	9.55	1.91	5.00	1.60	0.08	1.18
3	0.50	11.14	2.06	5.40	1.26	0.02	0.26
4	1.14	9.55	1.91	5.00	1.48	0.04	0.56
6	0.30	6.11	1.53	4.00	2.61	0.01	0.12
7	0.33						
8	0.45	4.42	1.30	3.40	3.54	0.01	0.15
9	0.40	3.44	1.15	3.00	4.37	0.01	0.12
10	0.29	9.55	1.91	5.00	1.60	0.01	0.14
11							
12	11.40	12.85	2.22	5.80	1.01	0.42	6.48
13	0.40	6.11	1.53	4.00	2.64	0.01	0.16
14	0.25	11.55	2.10	5.50	1.21	0.01	0.13
15							
16	0.30	11.14	2.06	5.40	1.30	0.01	0.16
17	0.38	9.55	1.91	5.00	1.63	0.01	0.19
18	0.50	8.80	1.83	4.80	1.85	0.02	0.24
19	0.35	7.06	1.64	4.30	2.33	0.01	0.15
20	0.45	8.80	1.83	4.80	1.83	0.01	0.21

En la sección a continuación se presentaron las fotografías correspondientes a la experimentación realizada en la **segunda batería** intervenida con fines académicos. Esta batería, compuesta por 28 módulos pertenecientes a un vehículo Toyota Prius, presentó como principal diferencia respecto a la anterior su mayor cantidad de módulos, manteniendo, no obstante, características constructivas similares.

Tabla 23

Medición de voltaje inicial para cada módulo

Medición de voltaje de los módulos	
Módulo 1	1.42 V
Módulo 2	0.56 V
Módulo 3	2.51 V
Módulo 4	3.21 V
Módulo 5	4.60 V
Módulo 6	4.81 V
Módulo 7	6.45 V
Módulo 8	4.46 V
Módulo 9	5.93 V
Módulo 10	5.23 V
Módulo 11	0.39 V
Módulo 12	0.01 V
Módulo 13	4.01 V
Módulo 14	3.83 V

Tabla 24

Medición de voltaje inicial para cada módulo

Medición de voltaje de los módulos	
Módulo 15	5.58 V
Módulo 16	3.88 V
Módulo 17	5.64 V
Módulo 18	5.40 V
Módulo 19	3.53 V
Módulo 20	6.24 V
Módulo 21	5.87 V
Módulo 22	3.18 V
Módulo 23	5.74 V
Módulo 24	0.14 V
Módulo 25	0.30 V
Módulo 26	6.05 V
Módulo 27	6.64 V
Módulo 28	0.47 V

La batería fue recibida sin la carcasa, al igual que la anterior, por lo que se procedió a realizar el desensamble de los módulos. Posteriormente, se midió el voltaje inicial de cada módulo, el voltaje máximo alcanzado durante la carga con una fuente regulada de 12 V y 5 A, y el voltaje posterior a la finalización de la carga, registrando en cada caso el tiempo correspondiente. Además, se efectuaron mediciones del voltaje y la corriente de descarga. A continuación, se presentan los datos obtenidos para cada uno de los 28 módulos.

Figura 102

Medición de Voltaje antes de empezar la carga módulo 1.



Figura 103

Corriente de carga 1 y tiempo de carga 1 del módulo 1.

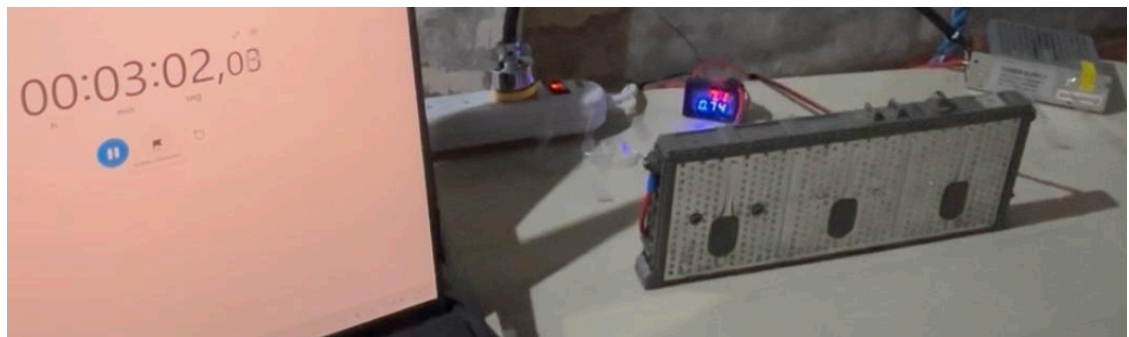


Figura 104

Corriente de carga 2 y tiempo de carga 2 del módulo 1.



Figura 105

Corriente de carga 3 y tiempo de carga 3 del módulo 1.

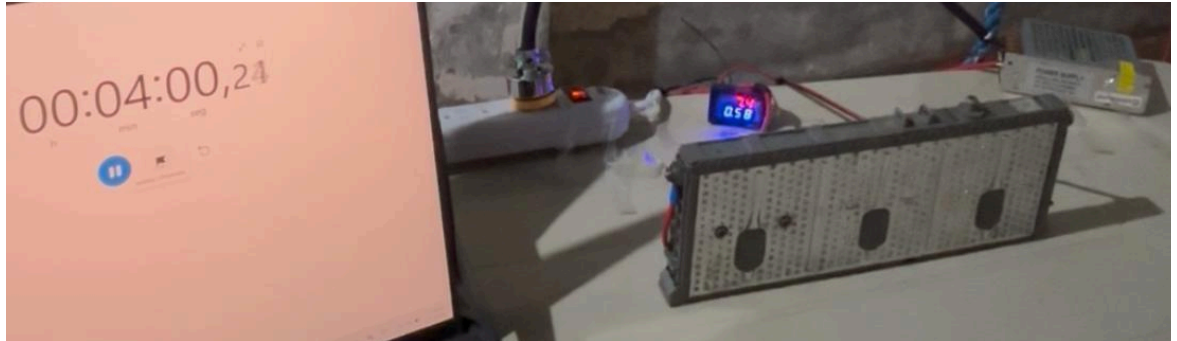


Figura 106

Corriente de carga 4 y tiempo de carga 4 del módulo 1.

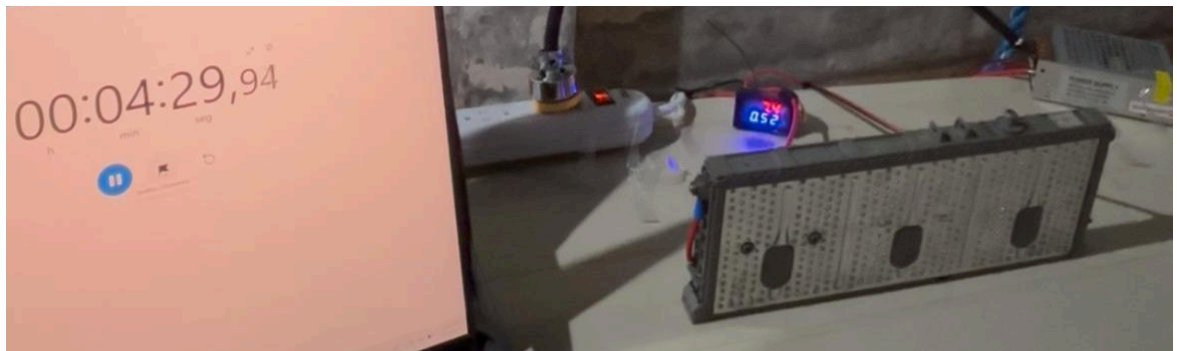


Figura 107

Corriente de carga 5 y tiempo de carga 5 del módulo 1.



Figura 108

Corriente de carga 6 y tiempo de carga 6 del módulo 1.

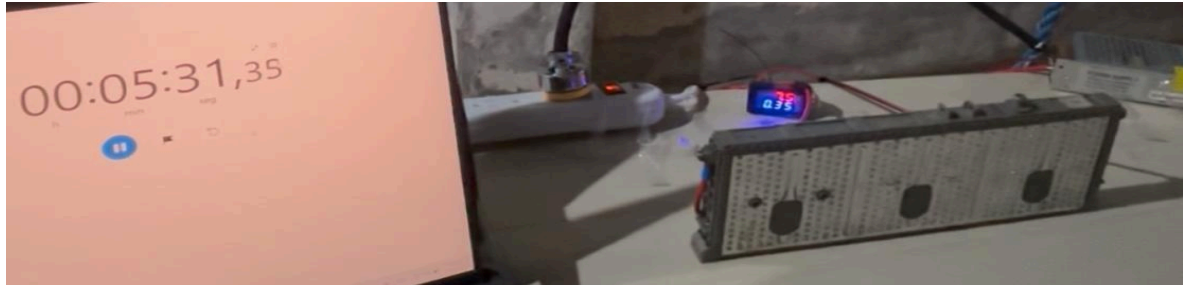


Figura 109

Corriente de carga 7 y tiempo de carga 7 del módulo 1.



Figura 110

Corriente de carga 8 y tiempo de carga 8 del módulo 1.



Figura 111

Tiempo de carga final del módulo 1.



Figura 112

Voltaje de carga en el módulo 1.



Figura 113

Voltaje de módulo 1, hora después de haber cargado el mismo.



.....
.....
.....
.....

Figura 402

Voltaje de carga en el módulo 27.

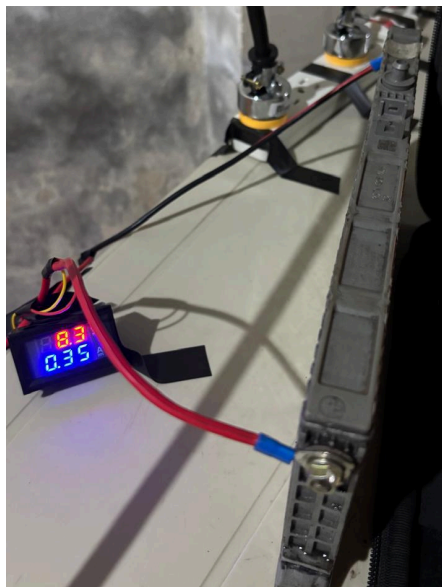


Figura 403

Voltaje de módulo 27, hora después de haber cargado el mismo.

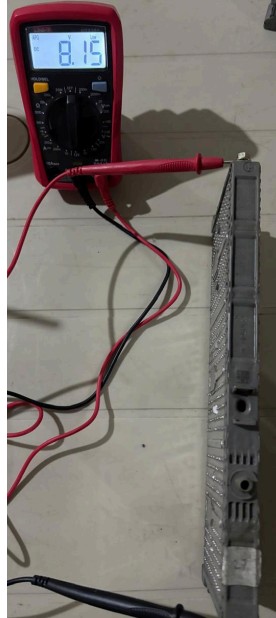


Figura 404

Medición de Voltaje antes de empezar la carga módulo 28.

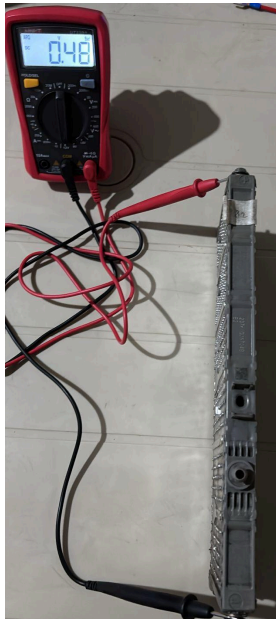


Figura 405

Corriente de carga 1 y tiempo de carga 1 del módulo 28.

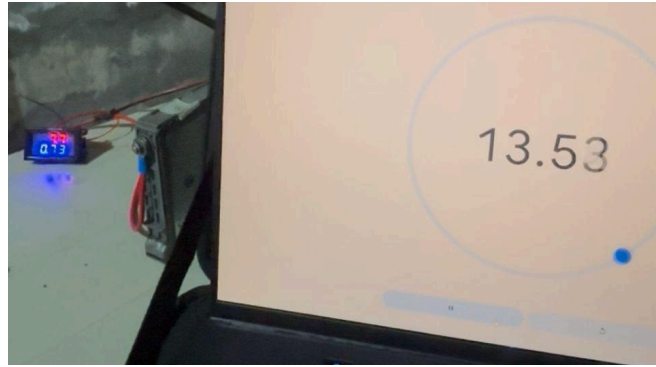


Figura 406

Corriente de carga 2 y tiempo de carga 2 del módulo 28.

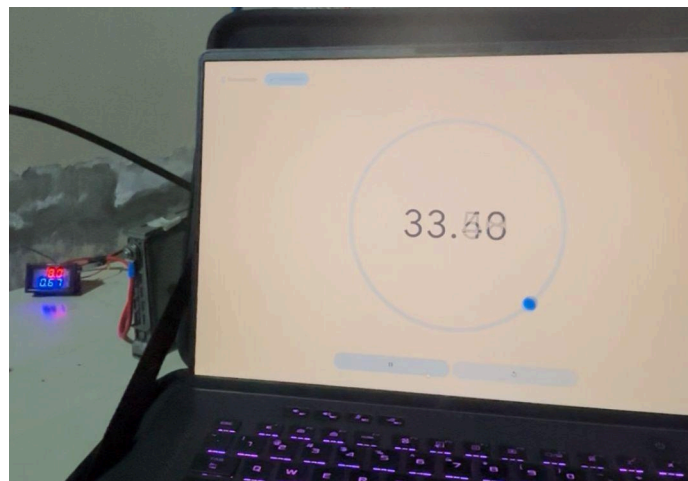


Figura 407

Corriente de carga 3 y tiempo de carga 3 del módulo 28.

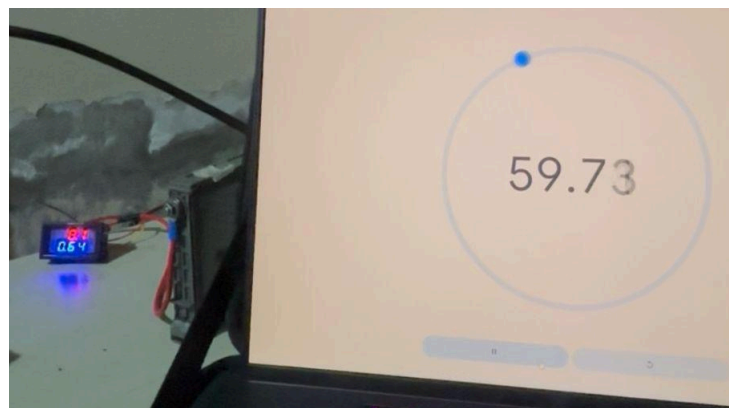


Figura 408

Corriente de carga 4 y tiempo de carga 4 del módulo 28.

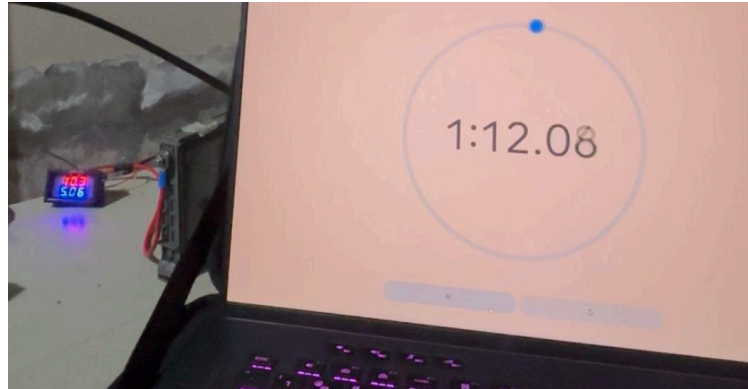


Figura 409

Corriente de carga 5 y tiempo de carga 5 del módulo 28.

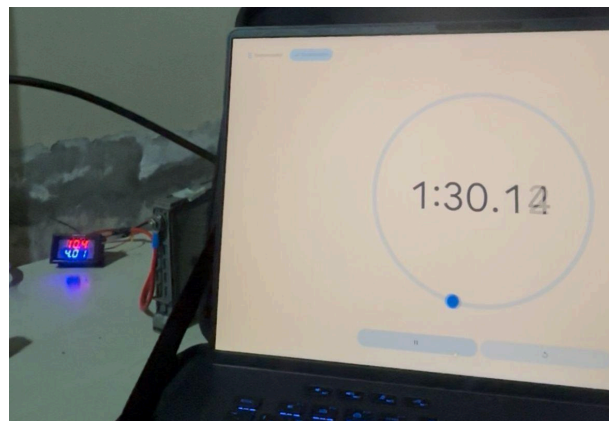


Figura 410

Corriente de carga 6 y tiempo de carga 6 del módulo 28.

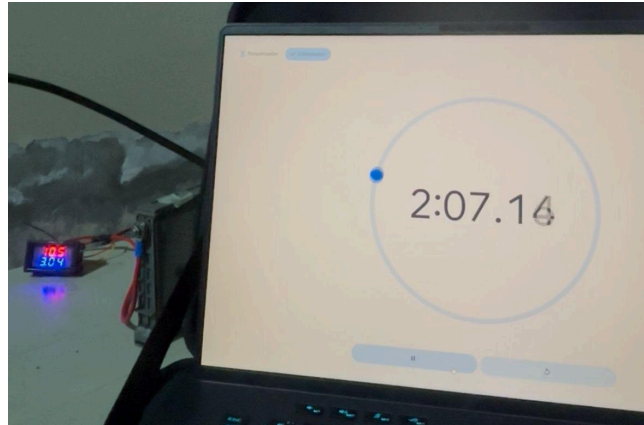


Figura 411

Corriente de carga 7 y tiempo de carga 7 del módulo 28.

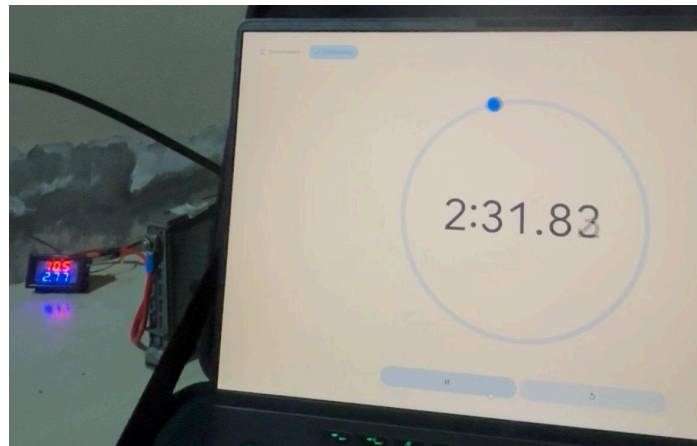


Figura 412

Corriente de carga 8 y tiempo de carga 8 del módulo 28.

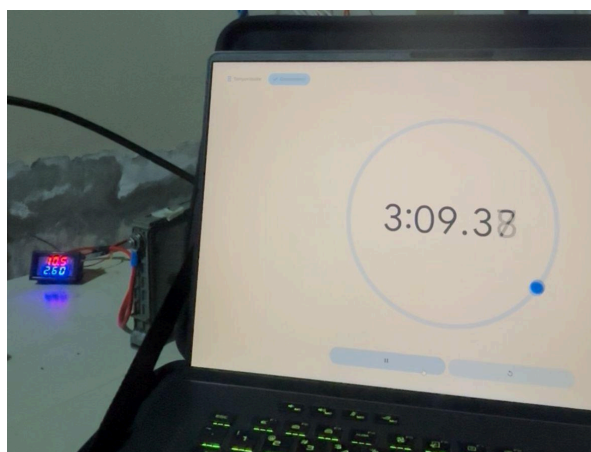


Figura 413

Tiempo de carga final del módulo 28.

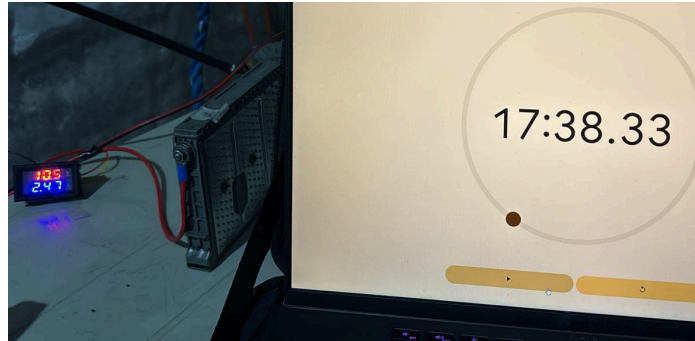


Figura 414

Voltaje de carga en el módulo 28.



Figura 415

Voltaje de módulo 28, hora después de haber cargado el mismo.



Después de haber realizado estas cargas en los módulos, obtenemos 8 datos de corriente de carga con su respectivo tiempo, voltaje inicial, voltaje de carga y voltaje final.

Tabla 24

Medición corriente descarga, voltaje en función del tiempo de las 28 módulos de un Prius 2011

Ciclo de Carga												
Módulo	V [V]	Ic1 [A]	Ic3 [A]	Ic5 [A]	Ic7 [A]	tc1[mi n]	tc3 [min]	tc5 [min]	tc7 [min]	tc [h]	V1 [V]	Vf[V]
1	1.20	0.74	0.58	0.47	0.62	3.02	4.00	5.04	6.03	2.35	8.00	7.81
2												
3	2.57	0.63	0.45	0.44	0.67	0.31	1.16	2.05	3.03	2.19	8.10	7.78
4	3.27	0.20	0.73	0.77	0.73	2.47	3.30	4.29	5.10	1.09	8.10	7.72
5	4.60	0.56	0.56	0.58	0.41	0.38	1.24	2.00	2.34	1.09	8.30	8.02
6	4.81	0.80	0.79	0.35	0.79	2.51	3.50	4.53	5.45	0.39	8.30	8.00
7	6.45	0.74	0.64	0.70	0.79	3.35	4.19	4.59	5.57	0.43	8.30	8.12
8	4.42	0.65	0.82	0.85	0.73	3.18	4.29	5.26	6.28	1.19	8.10	7.92
9	5.93	0.55	0.55	0.44	0.65	0.13	1.00	1.44	2.31	0.39	8.10	7.74
10	5.23	0.74	0.62	0.53	0.20	0.08	0.51	1.52	2.30	1.19	7.80	7.72
11	4.93	0.59	0.61	0.55	0.39	0.12	1.01	1.43	2.38	0.43	8.00	7.57
12	1.84	0.80	0.74	0.76	0.77	2.21	2.53	3.22	4.06	0.22	8.24	0.00

Tabla 25

Medición corriente descarga, voltaje en función del tiempo de las 28 módulos de un Prius 2011

[illegible]

Tabla 26

Medición corriente descarga, voltaje en función del tiempo de las 28 módulos de un Prius 2011

Ciclo de Carga												
Módulo	V [V]	Ic1 [A]	Ic3 [A]	Ic5 [A]	Ic7 [A]	tc1[mi n]	tc3 [min]	tc5 [min]	tc7 [min]	tc [h]	V1 [V]	Vf[V]
23	5.74	0.65	0.62	0.45	0.61	0.15	1.02	1.48	2.31	0.41	8.00	7.68
24	0.14	0.74	0.80	0.77	0.80	4.01	4.41	5.28	6.03	0.41	8.00	7.77
25	5.79	0.70	0.79	0.00	0.67	2.32	3.08	3.52	4.29	0.49	8.20	7.93
26	6.05	0.56	0.55	0.53	0.52	0.16	1.12	2.00	2.41	0.41	8.10	7.83
27	6.65	0.70	0.68	0.67	0.55	3.20	4.30	5.30	6.31	0.35	8.30	8.15
28	0.48	0.73	0.64	4.01	2.77	0.13	0.59	1.30	2.31	0.17	10.50	7.49

Posteriormente, se esperó un lapso de 12 horas tras la descarga para colocar cada uno de los módulos en el balanceador. Los valores de voltaje registrados luego de 20 horas y 30 horas de balanceo se presentan en la Tabla 41 que se encuentra a continuación.

Tabla 27*Tabla de balanceo de todos los módulos*

Balanceo				
Módulo	Vfb1 [V]	tb1 [h]	Vfb2 [V]	td2 [h]
1	7.46	20	6.66	30
2	7.49	20	7.43	30
3	7.49	20	7.41	30
4	7.41	20	7.41	30
5	7.5	20	7.45	30
6	7.5	20	7.45	30
7	7.5	20	7.42	30
8	7.5	20	7.44	30
9	7.49	20	7.41	30
10	7.48	20	7.41	30
11	7.49	20	7.42	30
12	7.44	20	7.44	30
13	7.49	20	7.41	30
14	7.49	20	7.41	30
15	7.49	20	7.43	30
16	7.48	20	7.39	30
17	7.49	20	7.44	30
18	7.49	20	7.43	30
19	7.49	20	7.43	30
20	7.5	20	7.45	30

Balanceo				
Módulo	Vfb1 [V]	tb1 [h]	Vfb2 [V]	td2 [h]
22	7.54	20	7.4	30
23	7.49	20	7.42	30
24	7.49	20	7.44	30
25	7.49	20	7.49	30
26	7.49	20	7.46	30
27	7.49	20	7.5	30
28	7.49	20	7.56	30

Tabla 26

Estimación de Resistencia Interna en descarga para todos los módulos

Descarga					
Módulo	Ri 1[Oh]	Ri 2[Oh]	Ri 3[Oh]	Ri 4[Oh]	Ri 5[Oh]
1	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19
2	0.30	0.30	0.32	0.38	
3	0.23	0.23	0.24	0.27	0.29
4	0.30	0.32	0.34	0.35	0.36
5	0.63	0.75	0.75	0.75	0.72
6	0.26	0.26	0.34	0.35	0.36
7	0.06	0.06	0.06	0.06	
8	0.27	0.27	0.28	0.29	0.30
9	0.19	0.22	0.23	0.23	0.25
10	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27
11	0.29	0.29	0.31		

Descarga					
12	0.24	0.25	0.27	0.28	0.28
13	0.34	0.33	0.46	0.46	
14	0.26	0.23	0.26	0.25	0.32
15	0.30	0.47	0.47	0.48	0.49
16	1.02	1.10	1.09		
17	0.50	0.53	0.54	0.56	0.56
18	0.34	0.36	0.36	0.37	0.37
19	0.53	0.57	0.58	0.58	0.59
20	0.27	0.30	0.30	0.31	
21	0.41	0.46	0.37	0.52	0.50
22	0.26	0.43	0.45	0.46	
23	0.26	0.27	0.29	0.31	
24	0.32	0.37	0.39	0.39	0.40
25	0.40	0.44	0.45	0.45	
26	0.29	0.47	0.49	0.50	0.52
27	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
28	0.20	0.22	0.22	0.23	0.24

Tabla 27*Estimación de Capacidad Real para todos módulos*

Capacidad Real					
Módulo 1	Creal 1 [Ah]	Creal 2[Ah]	Creal 3[Ah]	Creal 4[Ah]	Creal 5[Ah]
1	0.003	0.009	0.010	0.014	0.019
2	0.001	0.002	0.004	0.006	0.000
3	0.001	0.002	0.006	0.007	0.013
4	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005
5	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
7	0.002	0.020	0.027	0.066	0.000
8	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004
9	0.001	0.002	0.003	0.003	0.003
10	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003
11	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
12	0.000	0.001	0.002	0.008	0.009
13	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
14	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
15	0.002	0.002	0.003	0.009	0.014
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.001	0.003	0.010	0.021	0.021

Capacidad Real					
18	0.001	0.004	0.005	0.020	0.029
19	0.001	0.002	0.006	0.011	0.017
20	0.001	0.003	0.009	0.019	0.000
21	0.001	0.002	0.002	0.025	0.003
22	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
23	0.002	0.002	0.004	0.004	0.000
24	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
25	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000
26	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
27	0.001	0.004	0.006	0.011	0.062
28	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003

Tabla 28

Estimaciones de estado de salud(SOH) inicial de cada módulo

SOH					
Módulo	SOH 1	SOH 2	SOH 3	SOH 4	SOH 5
1	0.0460	0.1338	0.1602	0.22	0.2852
2	0.0175	0.0348	0.0669	0.10	0.0000
3	0.0088	0.0347	0.0928	0.11	0.1924
4	0.0197	0.0283	0.0353	0.06	0.0734
5	0.0087	0.0146	0.0222	0.03	0.0307
6	0.0097	0.0095	0.0148	0.02	0.0274

SOH					
7	0.0261	0.3083	0.4200	1.02	0.0000
8	0.0083	0.0163	0.0237	0.05	0.0591
9	0.0199	0.0258	0.0417	0.05	0.0537
10	0.0175	0.0252	0.0245	0.03	0.0432
11	0.0082	0.0082	0.0092	0.00	0.0000
12	0.0034	0.0166	0.0374	0.12	0.1388
13	0.0099	0.0100	0.0072	0.01	0.0000
14	0.0073	0.0168	0.0149	0.02	0.0240
15	0.0241	0.0231	0.0533	0.14	0.2142
16	0.0000	0.0063	0.0064	0.00	0.0000
17	0.0166	0.0386	0.1508	0.32	0.3300
18	0.0167	0.0551	0.0779	0.31	0.4448
19	0.0165	0.0306	0.0908	0.17	0.2658
20	0.0174	0.0462	0.1375	0.30	0.0000
21	0.0082	0.0289	0.0364	0.39	0.0535
22	0.0000	0.0071	0.0137	0.02	0.0000
23	0.0268	0.0338	0.0562	0.07	0.0000
24	0.0177	0.0302	0.0508	0.06	0.0700
25	0.0337	0.0306	0.0373	0.04	0.0000
26	0.0000	0.0076	0.0148	0.02	0.0344
27	0.0186	0.0605	0.0931	0.17	0.9510
28	0.0178	0.0248	0.0323	0.04	0.0454

Tabla 29*Datos de cada módulo en simulación*

Simulación						
Módulo	td[h]	Vfd [V]	Creal [Ah]	SOH [%]	SOC [%]	Ri [Ohm]
1	0.77	5.93	2.65	40.74	59.26	0.38
2	0.92	5.93	3.16	48.59	51.41	0.38
3	0.89	5.93	3.09	47.47	52.53	0.37
4	0.92	5.93	3.18	49.00	51.00	0.40
5	0.97	5.93	3.35	51.00	48.40	0.42
6	0.70	6.00	2.42	37.24	62.76	0.39
7	0.99	6.00	3.40	52.00	47.65	0.38
8	0.82	6.00	2.82	43.42	56.58	0.41
9	0.81	6.00	2.81	43.20	56.80	0.36
10	0.69	6.00	2.36	36.37	63.63	0.36
11	0.85	6.00	2.94	45.20	54.80	0.41
12	0.50	6.00	1.73	26.69	73.72	0.41
13	0.93	5.34	3.22	49.58	50.42	0.49
14	1.02	5.34	3.51	54.00	46.04	0.51
15	0.87	5.34	3.00	46.12	53.58	0.51
16	1.07	5.34	3.68	56.62	43.38	0.53
17	1.05	5.34	3.61	55.52	44.48	0.49

Simulación						
18	0.68	5.70	2.35	36.17	63.83	0.44
19	0.77	5.70	2.66	40.96	59.04	0.41
20	0.80	5.70	2.74	42.23	57.77	0.43
21	0.96	5.70	3.31	51.00	49.00	0.46
22	0.89	5.70	3.07	47.27	52.73	0.46
23	0.73	5.70	2.53	38.86	61.14	0.44
24	0.99	6.00	3.41	52.40	47.60	0.39
25	0.78	6.00	2.68	41.21	58.79	0.39
26	0.85	6.00	2.93	45.14	54.86	0.41
27	0.67	6.00	2.32	35.74	64.26	0.37
28	0.86	6.00	2.98	45.82	54.18	0.41

A continuación, se presenta la evidencia fotográfica de los módulos durante su permanencia en el balanceador, correspondiente a un periodo de 20 horas de operación, con el fin de documentar visualmente el estado y disposición del sistema durante el proceso.

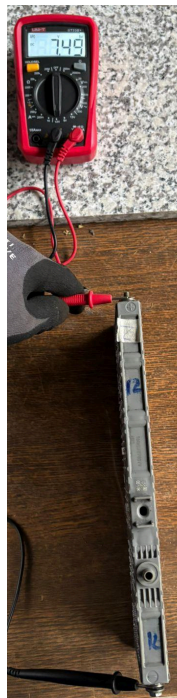
Figura 416

Voltaje módulo 1.



Figura 417

Voltaje módulo 2.



.....

.....

...

.

Figura 443

Voltaje módulo 28



Posteriormente se esperó un tiempo de 10 horas más para volver a tomar datos de voltaje de todos los módulos.

Figura 444

Voltaje 2 módulo 1



Figura 445

Voltaje 2 módulo 2



.....

....

..

.

Figura 471

Voltaje 2 módulo 28



Figura 472

Módulos en el balanceador.



Para el proceso de descarga se tomó datos de corriente y voltaje con su respectivo tiempo, aquí se puede apreciar esos datos de cada módulo.

Figura 473

Voltaje inicial antes de descarga del módulo 1.

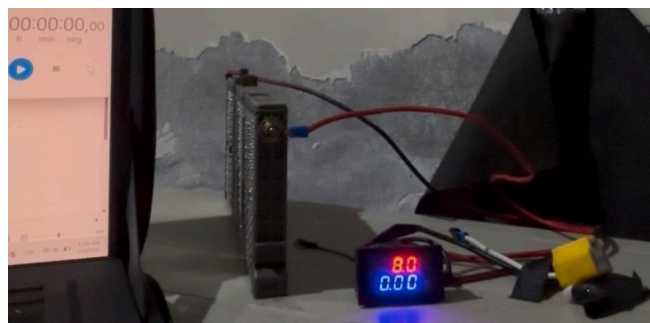


Figura 474

Corriente de carga 1 y tiempo de carga 1 del módulo 1.

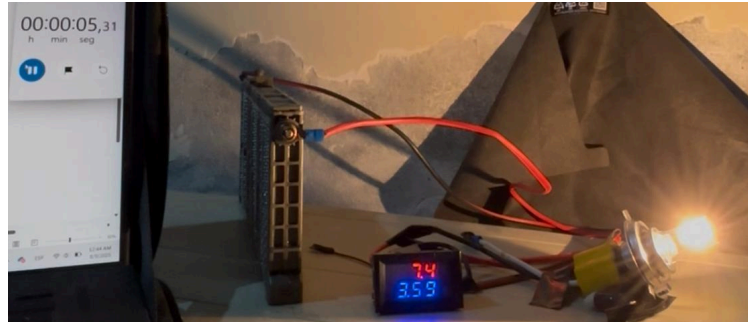


Figura 475

Corriente de carga 2 y tiempo de carga 2 del módulo 1.

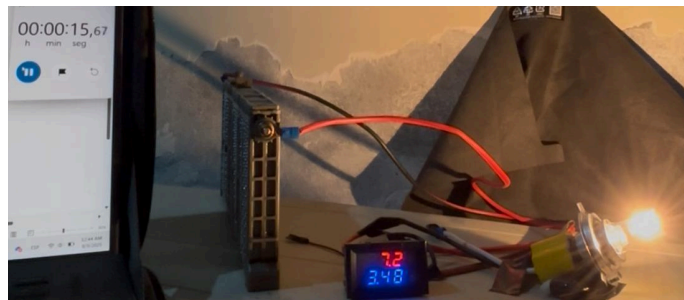


Figura 476

Corriente de carga 3 y tiempo de carga 3 del módulo 1.

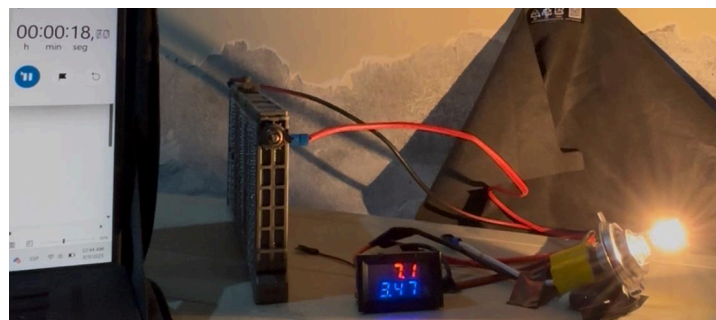


Figura 477

Corriente de carga 4 y tiempo de carga 4 del módulo 1.



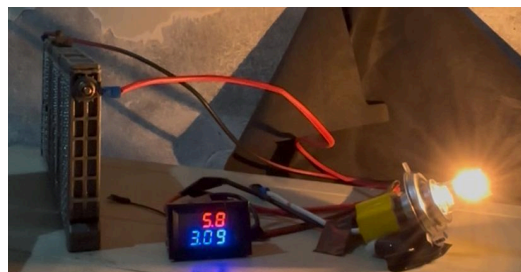
Figura 478

Corriente de carga 5 y tiempo de carga 5 del módulo 1.



Figura 479

Voltaje final de descarga del módulo 1.



.....

....

..

Figura 637



Voltaje inicial antes de descarga del módulo 28.

Figura 638



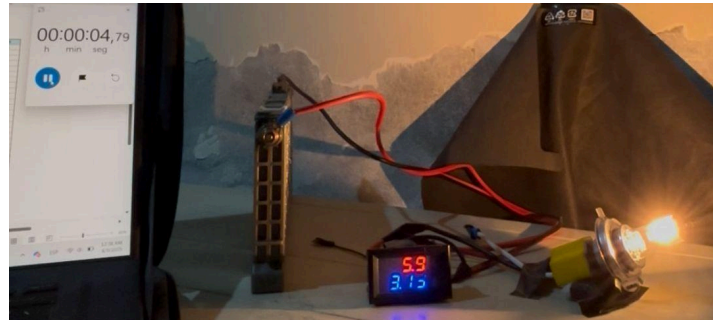
Corriente de carga 1 y tiempo de carga 1 del módulo 28.

Figura 639



Corriente de carga 2 y tiempo de carga 2 del módulo 28.

Figura 640



Corriente de carga 3 y tiempo de carga 3 del módulo 28.

Figura 641



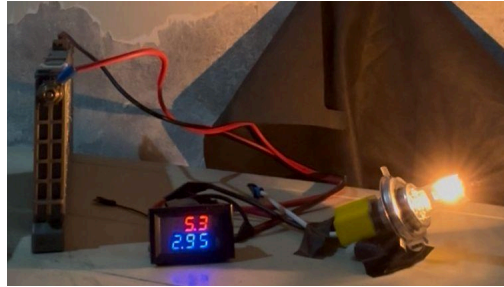
Corriente de carga 4 y tiempo de carga 4 del módulo 28.

Figura 642



Corriente de carga 5 y tiempo de carga 5 del módulo 28.

Figura 643



Voltaje final de descarga del módulo 28.

Finalmente con la evidencia fotográfica presentada se tiene los datos en la tabla 30 como se muestra a continuación

Tabla 30*Ciclo de descarga*

Ciclo de Descarga													
Módulo	V [V]	Id1 [A]	Id2 [A]	Id3 [A]	Id4 [A]	Id5 [A]	td1[mi n]	td2 [min]	td3 [min]	td4 [min]	td5 [min]	td [min]	Vd[V]
1	8.00	3.59	3.48	3.47	3.41	3.09	0.05	0.15	0.18	0.25	0.36	0.36	7.40
2	7.63	3.41	3.39	3.26	2.68		0.02	0.04	0.08	0.14		0.14	6.6
3	7.58	3.44	3.38	3.29	2.88	2.68	0.01	0.04	0.11	0.15	0.28	0.29	6.80
4	7.66	3.85	3.68	3.44	3.28	3.18	0.02	0.03	0.04	0.07	0.09	0.09	6.5
5	7.75	3.39	2.85	2.88	2.86	2.99	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	5.6
6	7.77	3.78	3.69	2.88	2.79	2.67	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	6.8
7	7.00	3.39	3.25	3.15	3.23		0.03	0.37	0.52	1.23		1.23	6.8
8	7.87	3.24	3.18	3.08	3.00	2.88	0.01	0.02	0.03	0.06	0.08	0.08	7
9	7.44	3.89	3.35	3.25	3.15	2.99	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	6.7
10	7.56	3.42	3.28	3.18	3.01	2.81	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	6.8
11	7.73	3.19	3.18	2.98			0.01	0.01	0.01			0.02	6.8
12	7.40	3.34	3.23	2.92	2.89	2.85	0.00	0.02	0.05	0.16	0.19	0.19	6.6

Ciclo de Descarga													
13	7.1 0	3.85	3.89	2.82	2.82		0.01	0.01	0.01	0.02		0.02	5.8
14	7.4 4	2.83	3.27	2.90	2.98	2.34	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	6.7
15	7.7 0	4.69	3.00	2.97	2.91	2.88	0.02	0.03	0.07	0.19	0.29	0.30	6.3
16	7.0 0	2.65	2.45	2.48			0.00	0.01	0.01			0.01	4.3
17	7.3 0	3.23	3.01	2.94	2.88	2.86	0.02	0.05	0.20	0.43	0.45	0.45	5.7
18	7.2 0	3.26	3.07	3.04	2.95	2.94	0.02	0.07	0.10	0.41	0.59	1.00	6.1
19	7.2 0	3.21	2.98	2.95	2.91	2.88	0.02	0.04	0.12	0.23	0.36	0.36	5.5
20	7.3 0	3.39	3.00	2.98	2.92		0.02	0.06	0.18	0.40		0.40	6.4
21	7.3 1	3.20	2.82	3.55	2.51	2.61	0.01	0.04	0.04	0.60	0.08	0.08	6
22	6.1 0	4.63	2.76	2.67	2.63		0.00	0.01	0.02	0.03		0.03	4.9
23	7.2 0	3.48	3.30	3.13	2.94		0.03	0.04	0.07	0.09		0.09	6.3
24	7.2 0	3.45	2.94	2.83	2.79	2.73	0.02	0.04	0.07	0.09	0.10	0.10	6.1
25	7.3 0	3.29	2.98	2.91	2.89		0.04	0.04	0.05	0.06		0.06	6
26	7.2 0	4.88	2.97	2.88	2.82	2.68	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05	5.8

Ciclo de Descarga													
27	7.10	3.62	3.37	3.30	3.32	3.17	0.02	0.07	0.11	0.20	1.17	1.17	6.9
28	7.00	3.47	3.23	3.15	3.09	2.95	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	6.3

Tabla 31

Resistencia interna, SOH Y SOC para cada módulo

Módulo	Ri [Ohmios]	SOH [%]	SOC [%]
1	0.17	40.74	59.26
2	0.30	48.59	51.41
3	0.23	47.47	52.53
4	0.30	49.00	51.00
5	0.63	51.00	48.40
6	0.26	37.24	62.76
7	0.06	52.00	47.65
8	0.27	43.42	56.58
9	0.19	43.20	56.80
10	0.22	36.37	63.63
11	0.29	45.20	54.80
12	0.24	26.69	73.72
13	0.33	49.58	50.42
14	0.23	54.00	46.04

Módulo	Ri [Ohmios]	SOH [%]	SOC [%]
15	0.30	46.12	53.58
16	1.09	56.62	43.38
17	0.50	55.52	44.48
18	0.34	36.17	63.83
19	0.53	40.96	59.04
20	0.27	42.23	57.77
21	0.50	51.00	49.00
22	0.26	47.27	52.73
23	0.26	38.86	61.14
24	0.32	52.40	47.60
25	0.40	41.21	58.79
26	0.29	45.14	54.86
27	0.06	35.74	64.26
28	0.20	45.82	54.18

Tabla 32

Voltaje bajo, SOC en comparativa de batería experimentada y en uso

Módulo	SOH_inicial [%]	SOH_final [%]
1	0.29	40.74
2	0.00	48.59
3	0.19	47.47
4	0.07	49.00
5	0.03	51.00
6	0.03	37.24
7	0.00	52.00
8	0.06	43.42
9	0.05	43.20
10	0.04	36.37
11	0.00	45.20
12	0.14	26.69
13	0.00	49.58
14	0.02	54.00
15	0.21	46.12
16	0.00	56.62
17	0.33	55.52

Módulo	SOH_inicial [%]	SOH_final [%]
18	0.44	36.17
19	0.26	40.96
20	0.00	42.23
21	0.05	51.00
22	0.00	47.27
23	0.00	38.86
24	0.07	52.40
25	0.00	41.21
26	0.03	45.14
27	0.95	35.74
28	0.05	45.82

Tabla 33*Comparación cuantitativa de emisiones de CO2*

Comparación cuantitativa			
Item	Cantidad	Emisión estimada	Total (kg CO₂-eq)
Remanufactura			
Módulos reacondicionados	24	1.5 kg CO ₂ -eq	36
Módulos nuevos adquiridos	4	10 kg CO ₂ -eq	40
Subtotal			76.0 kg CO ₂ -eq
Compra de una batería nueva			
Módulos nuevos (reemplazo total)	28	10 kg CO ₂ -eq	280.0 kg CO ₂ -eq

Tabla 34

Impacto ambiental de las baterías

Nota. Datos
tomados de
of

Impact Category	Litio	NiMH	Unidad
Abiotic depletion	0,0000523	0,000207	MJ
Global warming	7,63	19	kg CO2 eq
Ozone layer depletion	0,00000029	0,0000961	kg CFC-11 eq
Human toxicity	7,38	16,6	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic ecotox.	0,106	0,751	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	8620	9350	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity	0,0263	0,118	kg 1,4-DB eq
Photochemical oxidation	0,0027	0,0301	kg C2H4 eq
Acidification	0,0549	0,764	kg SO2 eq

School

Tabla 35*Lista de elementos utilizados en experimentación*

Ítem	Elemento	Cantida d	Clasificación	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
1	Multímetro Unit-T	1	Herramienta de medición	16,0	16,0
2	Destornillador estrella	1	Herramienta manual	7,00	7,00
3	Destornillador tipo bornera	1	Herramienta manual	5,00	5,00
4	Dado 5/16 in	1	Herramienta manual	3,00	3,00
5	Rache	1	Herramienta manual	10,00	10,00
6	Luces halógenas 12V 20W	3	Artículo	2,50	7,50
7	Fuente 12V 5A	3	Fuente	12,75	38,25

Ítem	Elemento	Cantidad	Clasificación	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
8	Cable 14 AWG	10	Artículo	0,45	4,50
9	Visor Voltaje-Corriente	3	Artículo	11,00	33,00
10	Terminales tipo espada	30	Artículo	0,25	7,50
11	Cinta aislante	1	Artículo	1,20	1,20
12	Cinta papel	1	Artículo	1,50	1,50
13	Conector H4 hembra	6	Artículo	2,30	13,80
14	Enchufe 110 V	33	Artículo	3,75	123,75
15	Luces Halógenas 12V 20W	3	Artículo	3,50	10,50
16	Cronómetro	1	Artículo	4,00	4,00

Ítem	Elemento	Cantida d	Clasificación	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
17	Angulos de Aluminio	3	Construcción	4,50	13,50
18	Tubo Estructural cuadrado 1.2 mm acero negro	6	Construcción	3,50	21,00
19	Ruedas	4	Construcción	22,0	88,0
20	Electrodos	2,2	Construcción	5,79	12,74
21	Aislante eléctrico de plástico 20x15 mm	8	Construcción	1,60	12,80
22	Perno Hexagonal M8X50mm	8	Construcción	0,70	5,60
23	Tuerca Hexagonal M8	8	Construcción	0,45	3,60
24	Broca 8mm	1	Construcción	3,00	3,00
25	Alicates	1	Artículo	4,75	4,75

Tabla 36

Inversión inicial del proyecto

Inversión Inicial	
Item	Subtotal USD
Herramientas + materiales	429,60
Analizador de batería	180,00
Mano de obra (30h × 8.70)	261,00
Total estimado	870,60

Tabla 37*Costos*

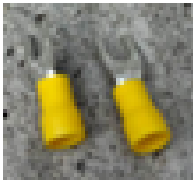
Costos operativos	
Item	Costo estimado (USD)
Reposición de módulos (promedio 2 celdas)	170
Mano de obra técnica externa	100
Consumo eléctrico	0,35
Total	270,35 USD

Tabla 38*Flujo de caja Proyectado*

Año	Ingreso (USD)	Costos (USD)	Costos totales (USD)	Flujo descontado (10%)
0	0	15000	-15000	-15000
1	5.000	1000	4.000	3636,36
2	7.000	1000	6.000	4958,68
3	9.000	1000	8.000	6010,52
4	10.000	1000	9.000	6147,12
5	10.000	1000	9.000	5588,29

Tabla 39*Lista de Materiales*

Ítem	Materiales	Imagen	Descripción
1	Multimetro Unit-T		Para medir los voltajes iniciales, voltajes finales de descarga, voltajes en momento en que se conecta disipadores de energía al módulo
2	Destornillador estrella		Herramienta manual diseñada para apretar o aflojar tornillos que presentan una ranura en su cabeza
3	Destornillador estrella tipo bornera		Herramienta diseñada específicamente para apretar o aflojar tornillos con cabeza de estrella
4	Dado 5/16 in		Herramienta de apriete utilizada junto con una llave de rache
5	Rache		Herramienta de mano que permite girar tornillos o tuercas en una sola dirección.
6	Luces Halógenas 12V 55W		Lámparas incandescentes mejoradas que utilizan un gas halógeno

Ítem	Materiales	Imagen	Descripción
7	Fuente 12V 5A		Es un dispositivo eléctrico que suministra una tensión constante de 12 voltios con una corriente máxima de 5 amperios
8	Cable 14 AWG		Es un conductor eléctrico con un grosor estandarizado
9	Visor Voltaje-Corriente		Es un dispositivo de medición que permite visualizar simultáneamente la tensión (V) y la corriente (A)
10	Terminales tipo U		Son conectores eléctricos planos que permiten unir cables a componentes o dispositivos de forma rápida y segura
11	Cinta aislante		Es un material flexible y adhesivo utilizado para aislar y proteger conexiones eléctricas
12	Conector H4 hembra		Es un enchufe eléctrico diseñado para recibir la clavija H4 macho
13	Angulos de Aluminio		Son perfiles metálicos en forma de "L" utilizados en estructuras, marcos y soportes

Ítem	Materiales	Imagen	Descripción
14	Tubo Estructural cuadrado 1.2 mm acero negro		Es un perfil metálico hueco con sección cuadrada, utilizado en estructuras y ensamblajes
15	Ruedas		Son elementos circulares que permiten el desplazamiento de vehículos o estructuras
16	Alicates		Son herramientas de mano utilizadas para sujetar, doblar, cortar o torcer materiales
17	Guantes		Son elementos de protección personal que resguardan las manos de riesgos eléctricos
18	Mascarillas		Son dispositivos de protección personal que cubren nariz y boca para filtrar partículas
19	Gafas		Son elementos de protección personal que resguardan los ojos de partículas, proyecciones

A continuación las figuras de las corrientes de carga en función del tiempo de algunos módulos

Figura 644

Corriente de carga vs tiempo módulo 3

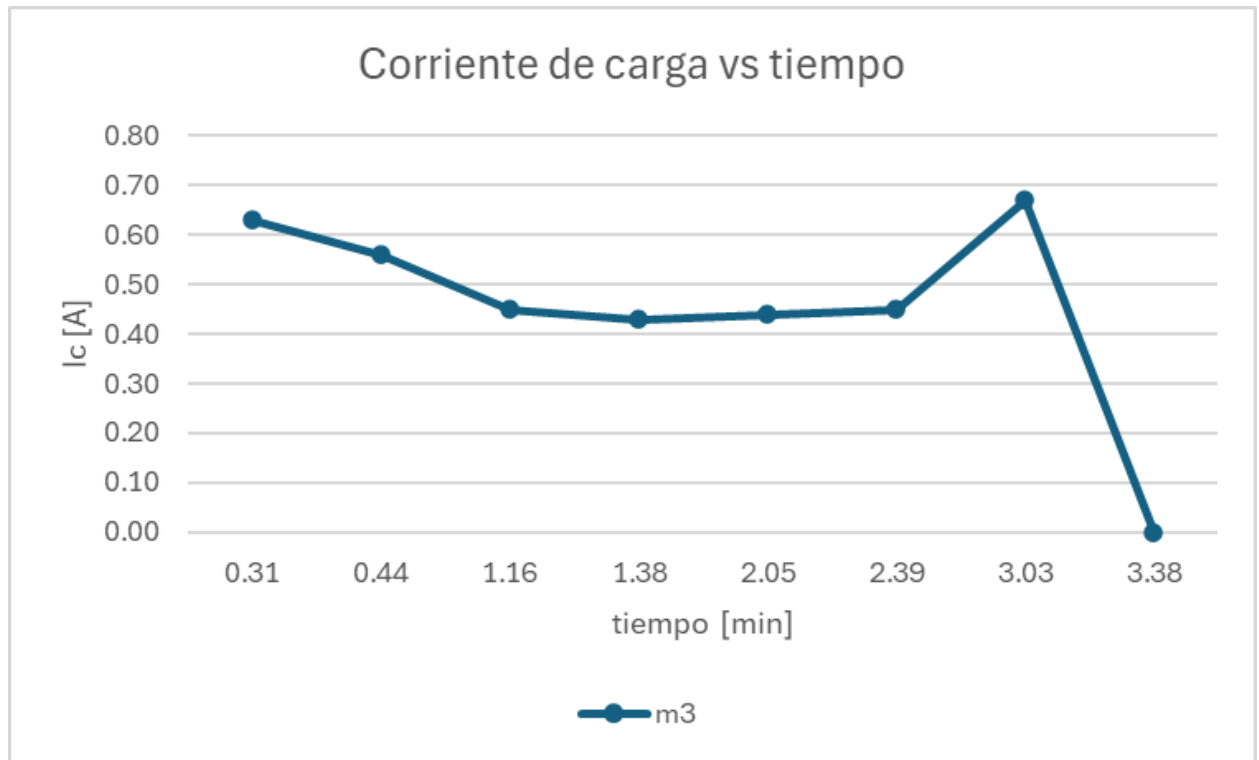


Figura 645

Corriente de carga vs tiempo módulo 4

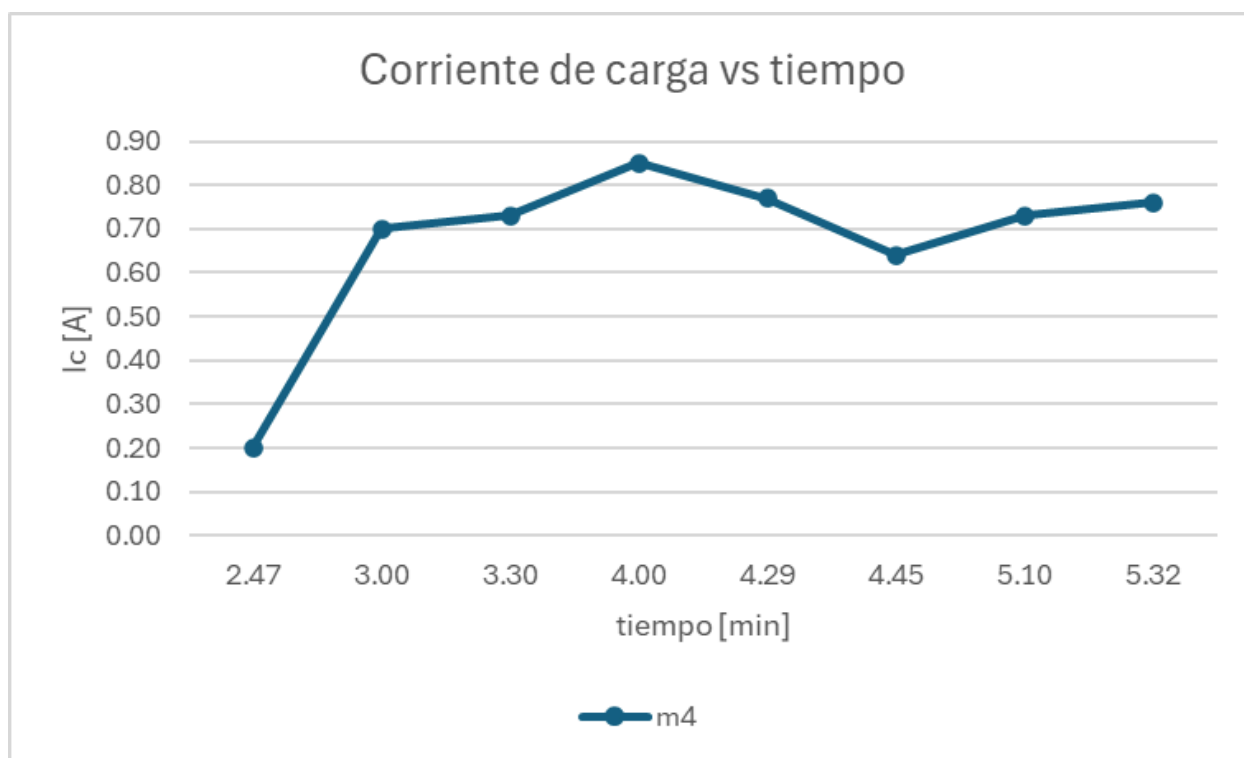


Figura 646

Corriente de carga vs tiempo módulo 5

