



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Estudio de Reutilización de Baterías de Vehículos Eléctricos

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Mariana Bustillo, Federico Calvello, Juan José Pérez

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Ing. Juan Pedro Carriquiry Universidad de la República
Ing. Federico Arismendi Universidad de la República
Dr. Ing. Mario Vignolo Universidad de la República

TRIBUNAL

Ing. Santiago Martínez Universidad de la República
Dra. Érika Téliz Universidad de la República
Msc. Pablo Toscano Universidad de la República

Montevideo
miércoles 27 julio, 2022

Estudio de Reutilización de Baterías de Vehículos Eléctricos, Mariana Bustillo, Federico Calvello, Juan José Pérez.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 277 páginas.

Compilada el miércoles 27 julio, 2022.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

En agradecimiento a nuestras familias y amigos, que incansablemente cultivaron nuestras fuerzas para transitar esta hermosa carrera.

Agradecemos especialmente a todo profesor/a, que a lo largo de nuestro camino aportó un fundamental grano de conocimiento que quedará para siempre en nosotros.

A la institución y quienes la componen por brindar tan cálido espacio, durante tantos años, nuestra segunda casa.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

En las últimas décadas, han comenzado a tener relevancia los vehículos eléctricos como medio de transporte, principalmente debido a factores económicos, tecnológicos y medioambientales. Desde el punto de vista medioambiental, la electrificación del transporte juega un rol crucial para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. En el caso puntual de Uruguay, en el año 2020 el sector transporte representó el 56 % de estas emisiones. Considerando que actualmente la matriz eléctrica se compone casi en su totalidad por energía eólica e hidráulica, Uruguay constituye un escenario ideal para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la inserción de la electromovilidad. Sin embargo, se estima que para 2030 existirán a nivel mundial 1,5 millones de baterías que habrán llegado al fin de su vida útil en los vehículos, por lo que resulta de gran interés realizar un manejo adecuado de dicho pasivo ambiental. Estas baterías son reemplazadas cuando su energía y potencia máxima se reduce al 80 % del valor nominal, por lo que las mismas se pueden emplear de forma exitosa en aplicaciones con una baja tasa de consumo de corriente, como por ejemplo en el almacenamiento estacionario de energía. De ser posible la reutilización de las baterías, se estaría incrementando la vida útil de las mismas, reduciendo el impacto ambiental de los vehículos eléctricos y sus componentes.

En este sentido, el presente proyecto de grado se centró en el estudio de una segunda vida para una batería de iones de litio proveniente de un vehículo eléctrico, que se encontraba obsoleta tras sufrir una falla por sobretensión. En base a estándares internacionales de ensayo de baterías de electromovilidad, se evaluaron las celdas que componían la batería y se elaboró un procedimiento para determinar cuáles podían ser reutilizadas. Con las celdas identificadas como reutilizables se construyó un nuevo banco de baterías de segunda vida, el cual también fue ensayado para relevar sus características técnicas. Dicho banco podría ser utilizado en aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía, pero fue diseñado y construido pensando en un futuro uso en micro-electromovilidad, por lo que se simuló su uso en un triciclo eléctrico para estimar la autonomía que tendría en el mismo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Lista de acrónimos

- BEV: vehículo eléctrico a batería
- BMS: sistema de gestión de batería (Battery Management System)
- BOL: inicio de vida (Begin of Life)
- CAN: controlador de red de área (Controller Area Network)
- CC: corriente constante
- CD: Charge Depleting
- CENELEC: Comité Europeo de Normalización Electrotécnica
- CEPE: Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas
- CS: Charge Sustaining
- CV: tensión constante
- DST: prueba de estrés dinámico (Dynamic Stress Test)
- EOL: fin de vida (End of Life)
- EPC: equipos de protección colectiva
- EPP: equipos de protección personal
- EV: vehículo eléctrico
- HEV: vehículo eléctrico híbrido
- HPPC: ensayo de caracterización de pulso híbrido de potencia (Hybrid Pulse Power Characterization test)
- ICE: motor de combustión interna (Internal Combustion Engine)
- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional
- IT: tecnologías de la información
- PHEV: vehículo eléctrico híbrido y enchufable

- SOA: zona de operación segura (Safe Operating Area)
- SOC: estado de carga (State of Charge)
- SOH: estado de salud (State of Health)
- UPS: fuente de energía ininterrumpida (Uninterruptible Power Supply)
- USABC: Consorcio de Estados Unidos de Baterías Avanzadas
- WLTC: Ciclos Mundiales para Ensayos de Vehículos Ligeros (Worldwide light-duty test cycles)
- WLTP: Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedure)

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen	III
Lista de acrónimos	V
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes del proyecto y motivación	1
1.2. Descripción del proyecto	2
1.3. Metodología de trabajo	3
2. Baterías	5
2.1. Introducción a las baterías	5
2.1.1. Aspectos generales	5
2.1.1.1. Concepto general del proceso electroquímico y funciona- miento de una celda	5
2.1.1.2. Parámetros y características de una celda	6
2.1.2. Clasificación de las baterías	10
2.1.3. Factores que afectan el rendimiento de las baterías	10
2.1.3.1. Nivel de tensión	10
2.1.3.2. Corriente de descarga	11
2.1.3.3. Modo de descarga	11
2.1.3.4. Temperatura de la batería durante la descarga	12
2.1.3.5. Tipo de descarga (continuo, intermitente)	13
2.1.3.6. Efecto del diseño de la celda y de la batería	13
2.1.3.7. Envejecimiento de la batería y condiciones de almacena- miento	14
2.1.3.8. Efecto del diseño de una batería multicelda	14
2.2. Baterías secundarias	15
2.2.1. Tipos de baterías secundarias	15
2.2.1.1. Perfiles de descarga de las distintas tecnologías	16
2.2.1.2. Comparación de tipos de baterías secundarias	16
2.2.2. Baterías para almacenamiento estacionario de energía	17
2.2.3. Baterías para electromovilidad	19
2.2.3.1. Requerimientos de baterías para BEV	19

Tabla de contenidos

2.2.3.2.	Requerimientos de baterías para vehículos híbridos eléctricos	20
2.2.3.3.	Baterías para BEV y HEV	24
2.2.4.	Baterías secundarias de Níquel-hidruro metálico	26
2.2.4.1.	Composición y química de la celda de NiMH	26
2.2.4.2.	Características eléctricas y de rendimiento de las celdas prismáticas de NiMH	27
2.2.4.3.	Carga de las baterías de NiMH	28
2.2.5.	Baterías secundarias de Litio-ion	30
2.2.5.1.	Principio de funcionamiento y estructura de la celda de litio-ion	30
2.2.5.2.	Ventajas y desventajas de las celdas de litio-ion	31
2.2.5.3.	Tipos de baterías de litio-ion	32
2.2.5.4.	Características eléctricas y de rendimiento de las celdas de litio-ion	33
2.2.5.5.	Carga de baterías de litio-ion	35
3.	BMS	37
3.1.	Funciones de los BMS	38
3.1.1.	Función de medida	38
3.1.2.	Función de protección	38
3.1.3.	Función de balanceo	38
3.1.3.1.	Métodos de balanceo pasivo	39
3.1.3.2.	Métodos de balanceo activo	40
3.1.4.	Función de evaluación y gestión térmica	43
3.1.4.1.	Estimación del estado de carga SOC y estado de salud SOH	44
3.1.5.	Función de comunicación	45
4.	Baterías a estudiar	47
4.1.	Batería A: LiFePO ₄ - Mobility	48
4.1.1.	Características	48
4.1.2.	Proceso de desmantelamiento	50
4.2.	Batería B: NiMH - Toyota Prius	51
4.2.1.	Características	51
4.2.2.	Proceso de desmantelamiento	51
4.3.	Batería C: Litio-ion - Mercedes Benz	53
4.4.	Elección de la batería a estudiar	54
5.	Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio	57
5.1.	Medida de parámetros físicos	58
5.1.1.	Medida de masa	58
5.1.2.	Medida de volumen	58
5.2.	Medidas y cálculo de parámetros eléctricos	58
5.2.1.	Condiciones de ensayo	58

5.2.1.1.	Límites de tensión	59
5.2.1.2.	Método de carga	59
5.2.1.3.	Control de temperatura	59
5.2.2.	Parámetros de potencia	59
5.2.2.1.	Cálculo de potencia de descarga	59
5.2.2.2.	Densidad de potencia de descarga por unidad de masa	59
5.2.2.3.	Densidad de potencia de descarga por unidad de volumen	60
5.2.3.	Potencia regenerativa	60
5.2.3.1.	Cálculo de potencia regenerativa	60
5.2.3.2.	Densidad de potencia regenerativa por unidad de masa	60
5.2.3.3.	Densidad de potencia regenerativa por unidad de volumen	60
5.2.4.	Parámetros de energía	61
5.2.4.1.	Cálculo de energía de descarga	61
5.2.4.2.	Densidad de energía por unidad de masa	61
5.2.4.3.	Densidad de energía por unidad de volumen	61
5.2.5.	Retención de carga	61
5.3.	Procedimiento y descripción de ensayos	62
5.3.1.	Ensayo de medida de capacidad estática	62
5.3.2.	Ensayo de caracterización de pulso híbrido de potencia (HPPC - Hybrid Pulse Power Characterization test)	62
5.3.3.	Ensayo de potencia máxima	65
5.3.4.	Ensayo de autodescarga	66
5.3.5.	Ensayo de estimación de autonomía	67
5.3.5.1.	Definición del ciclo WLTC a utilizar	67
5.3.5.2.	Estimación de la potencia eléctrica consumida en función de la velocidad	69
6.	Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar	71
6.1.	Equipo utilizado para los ensayos eléctricos	71
6.1.1.	Equipo de ensayo de baterías	71
6.1.2.	Caja contenedora de ensayos	74
6.2.	Resultados de ensayos a celdas	74
6.2.1.	Ensayo de capacidad estática	75
6.2.1.1.	Curva de carga CC-CV	75
6.2.1.2.	Perfil de descarga CC	76
6.2.1.3.	Curva de capacidad estática	77
6.2.1.4.	Energía disponible bajo una descarga a $C/3$	79
6.2.1.5.	Conclusiones y resumen del ensayo de capacidad estática	79
6.2.2.	Resultados del ensayo de potencia	81
6.2.2.1.	Perfil de tensión y corriente obtenido	82
6.2.2.2.	Potencia de pulso de descarga y carga	83
6.2.2.3.	Conclusiones y resumen del ensayo de potencia	84
6.3.	Selección de celdas reutilizables	86
6.3.1.	Caja contenedora de ensayos	90

Tabla de contenidos

7. Banco de baterías construido	91
7.1. Conexión de celdas	92
7.1.1. Métodos de conexión de bornes realizados	92
7.1.2. Interconexión de celdas	96
7.2. Gabinete	97
7.2.1. Requerimientos	97
7.2.2. Diseño	98
7.3. BMS instalado	100
7.3.1. Requerimientos para la elección del BMS	100
7.3.2. BMS adquirido	101
7.3.3. Integración del BMS a la batería	103
7.3.3.1. Primeros pasos con el BMS y configuración	103
7.3.3.2. Problemas identificados	105
7.4. Seguridad en baterías	107
7.4.1. Requerimientos de seguridad e información en baterías	107
7.4.1.1. Designación de celdas y baterías:	107
7.4.1.2. Marcado	108
7.4.1.3. Distancias de seguridad	109
7.4.1.4. Protección térmica y de sobrecorriente	109
7.4.1.5. Protección contra cortocircuitos	110
7.4.1.6. Descarga forzada de las celdas	110
8. Ensayos al banco y caracterización	111
8.1. Ensayo de capacidad estática	111
8.1.1. Perfil de carga CC-CV	111
8.1.2. Perfil de descarga CC	113
8.1.3. Curva de capacidad estática	113
8.1.4. Cálculo de energía disponible bajo descarga CC a C/3	115
8.2. Ensayo de potencia	115
8.2.1. Perfil de tensión y corriente obtenido	115
8.2.2. Potencia en pulso de descarga y carga	117
8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)	118
8.3.1. WLTP con frenado regenerativo ideal	121
8.3.2. WLTP sin frenado regenerativo	122
8.3.3. Comparación de autonomía	125
8.4. Ensayo autodescarga	126
8.5. Características del banco obtenido y posibles usos	127
8.6. Guía de usuario	128
8.6.1. Precauciones de uso	128
8.6.2. Conexionado	129
8.6.3. BMS	130
8.6.4. Encendido y apagado del banco	130

9. Análisis de costos y viabilidad	131
9.1. Análisis económico	131
9.1.1. Desmontaje de batería usada y acondicionamiento de celdas	132
9.1.2. Ensayos	133
9.1.3. Ensamble del banco	134
9.1.4. Ensayos al banco	135
9.1.5. Resumen de análisis económico	135
9.2. Resumen y conclusiones sobre viabilidad económica	137
10. Conclusiones	139
10.1. Problemas identificados	140
10.2. Viabilidad	142
10.3. Futuros pasos	142
A. Ensayos realizados a celdas	145
A.1. Parámetros físicos de las celdas	145
A.1.1. Masa	145
A.2. Ensayo de capacidad estática	146
A.3. Ensayo de potencia	166
B. Ensayos realizados al banco de baterías	201
B.1. Parámetros físicos del banco	201
B.1.1. Masa	201
B.2. Ensayo de capacidad estática	202
B.3. Ensayo de potencia	203
B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)	205
B.4.1. Con frenado regenerativo	205
B.4.2. Sin frenado regenerativo	216
C. Construcción del banco	223
C.1. Piezas y partes que componen el gabinete	223
C.2. Fabricación de piezas	227
C.3. Ensamblado del gabinete	231
C.4. Armado y conexión del banco de baterías	242
D. Cotización de batería	245
D.1. Cotización de batería nueva (Proveedor NAMI)	246
Referencias	247
Índice de tablas	250
Índice de figuras	253

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes del proyecto y motivación

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

El factor medioambiental constituye un motivo crucial en la transición hacia los vehículos eléctricos, ya que actualmente gran parte de los gases de efecto invernadero emitidos hacia la atmósfera provienen del sector transporte. En el caso puntual de Uruguay, en el año 2020 el sector transporte representó el 56 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [2]. Considerando que actualmente la matriz eléctrica de Uruguay se basa casi en su totalidad en generación eólica e hidráulica [3], desde el punto de vista medioambiental, Uruguay representa un escenario ideal para impulsar la movilidad eléctrica, ya que se reducirían considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero y los vehículos eléctricos serían cargados con “energía verde”. Además, el factor económico también es relevante en dicha transición, ya que el costo operativo por km de un vehículo eléctrico es menor que el de uno con motor de combustión [4]. Por último, la transición también ha sido impulsada por avances tecnológicos en las baterías y sistemas de carga rápida, que han permitido aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos a valores comparables a los de un vehículo de combustión tradicional.

No obstante, una de las principales desventajas de los vehículos eléctricos es su elevado costo inicial, que es notoriamente mayor al de un vehículo de combustión tradicional. Gran parte de este elevado precio se debe a la batería del vehículo y se incrementa conforme aumenta la autonomía [5]. Además, una vez que los vehículos eléctricos se introduzcan de forma masiva en los mercados, es muy importante realizar un tratamiento adecuado de las baterías que hayan llegado al fin de su vida útil. Se estima que para 2030, habrían aproximadamente 1,5 millones de baterías de electromovilidad que habrían llegado al final de su vida útil a nivel mundial, de las cuales la mitad será de litio y el resto de níquel-hidruro metálico [6].

Capítulo 1. Introducción

Teniendo en cuenta que generalmente se considera que las baterías de vehículos híbridos y eléctricos han alcanzado el fin de su vida útil (EOL) en los mismos cuando su energía y potencia máxima se ha reducido al 80 % del valor que disponían al inicio de su vida (BOL) [7], resulta de gran interés el estudio de la reutilización de las mismas en una segunda vida. De ser posible la reutilización de estas baterías en otras aplicaciones de electromovilidad con menores requerimientos, como en micro-electromovilidad (triciclos y birrodados eléctricos, entre otros), no solo se estaría prolongando la vida útil de las mismas y haciendo un manejo ambientalmente más adecuado, sino que también se podrían llegar a reducir los costos de las baterías utilizadas en estos vehículos. Además, dichas baterías cuentan con un gran potencial para ser utilizadas en aplicaciones de uso estacionario, tan así que fabricantes como General Motors, BMW, Renault y Nissan ya cuentan con proyectos de reutilización de las baterías de sus modelos de vehículos eléctricos para almacenamiento estacionario de energía [8]. Bajo esta motivación, el presente proyecto de fin de carrera se realiza en el marco del Proyecto ANII.FSE.S_2020_1_165336, “*Segundo uso de baterías de vehículos eléctricos*”, el cual es financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) de Uruguay y busca contribuir al estudio de los procesos de reutilización de baterías provenientes de electromovilidad, concretamente tratando de identificar e implementar una segunda vida a una batería de un vehículo eléctrico.

1.2. Descripción del proyecto

El objetivo del presente proyecto es reutilizar una batería proveniente de electromovilidad en una segunda vida. En particular, se intenta identificar cuáles de las celdas que componen la batería son potencialmente reutilizables y cuáles deben ser recicladas o desechadas. Con las celdas que se encuentren en condiciones de ser reutilizadas se pretenderá construir un nuevo banco de baterías de segunda vida que podrá ser utilizado en aplicaciones de micro-electromovilidad o almacenamiento estacionario de energía.

En el documento, primero se presenta a modo introductorio un estudio sobre conceptos de baterías y electromovilidad que son necesarios para la comprensión de los temas desarrollados en el proyecto. Se realiza un estudio general del BMS (Battery Management System) como dispositivo encargado de asegurar el funcionamiento correcto de las baterías multicelda y requerido para la construcción del banco reutilizado que se pretende implementar.

Acorde al objetivo del proyecto, el objeto de estudio del mismo son las baterías de electromovilidad, por lo que en el documento se describen las baterías con las que se trabajó y los medios por los que fueron conseguidas. Mediante ensayos, se pretenderá identificar las celdas potencialmente reutilizables, motivo por el cual se realiza un relevamiento de una lista de ensayos físicos y eléctricos presentes en estándares internacionales y que son aplicables a baterías de vehículos eléctricos. Luego, se describen los ensayos efectivamente realizados a las celdas y se analizan los resultados obtenidos.

En una siguiente etapa, se detalla cómo se construyó un banco reutilizado a partir de las celdas que se identificaron como reutilizables y cómo se implementó un BMS en el mismo. Se presentan los ensayos realizados al banco que permitieron identificar sus características y se analizan los resultados obtenidos para determinar sus posibles

aplicaciones. A modo de simular un uso en una aplicación en micro-electromovilidad, el banco se ensayó tomando como referencia un ciclo del procedimiento WLTP (World harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure) para estimar la autonomía que tendría si se utilizara en un triciclo eléctrico. Finalmente, se realiza un análisis de costos y de viabilidad económica del proceso de reutilización llevado a cabo, comparando el costo del banco construido a partir de celdas reutilizadas frente al costo que tendría si se utilizaran celdas nuevas.

1.3. Metodología de trabajo

Para la primera etapa del proyecto en la que se realizó un estudio general sobre conceptos de baterías y electromovilidad, la metodología de trabajo realizada fue la búsqueda y recopilación de información en libros, artículos y documentos académicos sobre la temática. De manera similar, para la realización de los ensayos previamente se llevó a cabo una revisión de estándares internacionales de ensayos de baterías de vehículos eléctricos.

En lo que refiere al proceso de reutilización, las celdas potencialmente aptas para una segunda vida se identificaron mediante la realización de ensayos en los que se evalúa el estado de salud de las mismas midiendo la capacidad estática y su respuesta ante ciclos de potencia compuestos por pulsos de carga y descarga. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Vehículos Eléctricos del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Udelar), utilizando un equipo de ensayo capaz de realizar procedimientos de carga y descarga de baterías, dentro de una caja contenedora antiexplosiva. Dicho equipamiento fue adquirido en el marco del Proyecto ANILPEC_152509 y se debieron realizar instancias de capacitación con el fabricante para aprender a utilizar el equipo. Los resultados de los ensayos fueron exportados a planillas de cálculo y fueron procesados utilizando Matlab.

Luego, en la etapa de construcción del banco reutilizado, se llevó a cabo una metodología práctica que implicó un involucramiento directo en el diseño, construcción y ensamblado del mismo. Una vez armado, la metodología realizada para ensayar el banco fue la misma que la descrita para los ensayos de las celdas individuales, utilizando el mismo equipamiento. Para el caso particular del ensayo de estimación de autonomía en base al procedimiento WLTP realizado, se debió efectuar en Matlab un modelado físico del vehículo en el cual se utilizaría el banco; de este modelado se obtuvo un vector de datos de la potencia eléctrica demandada a la batería durante el ciclo de conducción, que posteriormente fue cargado al equipo de ensayos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Baterías

2.1. Introducción a las baterías

2.1.1. Aspectos generales

Una batería es un dispositivo que convierte energía química, almacenada en sus componentes activos, en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de oxidación-reducción en la que se produce la transferencia de electrones de un material a otro a través de un circuito eléctrico. Una celda y una batería se diferencian en que la celda es la unidad electroquímica básica que proporciona la fuente de energía eléctrica, mientras que una batería generalmente consiste en un arreglo de celdas conectadas eléctricamente en serie y/o paralelo para cumplir con los requerimientos de niveles de tensión y corriente de la aplicación en la cual será utilizada [9].

Las celdas se componen básicamente de 3 elementos [9]:

- **Ánodo:** elemento que proporciona electrones al circuito externo y es quien se oxida durante la descarga.
- **Cátodo:** elemento que acepta electrones del circuito externo y es reducido durante la descarga. Generalmente se usan óxidos de metales para fabricar los cátodos.
- **Electrolito:** es el conductor iónico que provee el medio para la transferencia de carga en forma de iones y se encuentra dentro de la celda, entre el ánodo y el cátodo. Típicamente se trata de un líquido u otros solventes con sal disuelta o ácido, que llevan a cabo la conductividad iónica. El electrolito debe ser muy buen conductor iónico pero a la vez aislante eléctrico, de manera que no produzca un cortocircuito entre el ánodo y el cátodo.

Las celdas también tienen un separador que aísla eléctricamente el ánodo del cátodo, el cual debe ser permeable al electrolito para mantener la conductividad iónica.

2.1.1.1. Concepto general del proceso electroquímico y funcionamiento de una celda

Durante la descarga de una celda, se conecta una carga externa entre los terminales de la misma y se cierra un circuito eléctrico, en el que el electrodo negativo se oxida

Capítulo 2. Baterías

(pierde electrones) y el positivo se reduce (acepta electrones). Esto origina un flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo a través de la carga y por lo tanto se tiene una corriente eléctrica que circula por la carga desde el cátodo hacia el ánodo, de acuerdo al sentido convencional de la corriente, opuesto al sentido del flujo de electrones. El circuito eléctrico se completa con el flujo de iones en el electrolito, entre ambos electrodos [9].

En el caso de la carga de una celda recargable, se conecta entre los terminales una fuente de corriente continua y sucede el proceso inverso al descrito para la descarga. El sentido de la corriente es desde el electrodo negativo hacia el positivo, el cátodo (acepta electrones) y el ánodo se oxida (pierde electrones) [9].

La máxima energía eléctrica que puede entregar la celda depende de la energía que pueden liberar las reacciones electroquímicas implicadas en el ánodo y cátodo. Dicho valor es acotado por el cambio de energía de Gibbs durante la reacción, la cual estima la cantidad máxima de trabajo que se puede extraer del sistema. Idealmente, durante la descarga toda la energía se transformaría en energía eléctrica útil, sin embargo cuando la corriente pasa por los electrodos, los materiales se polarizan y se generan pérdidas de energía en forma de disipación de calor. La celda sufre dos tipos de polarización cuando se encuentra en operación: una polarización por activación que dirige la reacción a la superficie de los electrodos y una polarización de concentración debida a la diferencia de concentración de reactivos y productos en la superficie de los electrodos como consecuencia de la transferencia de masa. Otro elemento que consume parte de la energía útil y la disipa en forma de calor es la impedancia interna de la celda, la que produce una caída de tensión iR durante la operación proporcional a la corriente extraída [9]. Entonces, cuando se conecta la celda a una resistencia R , la tensión sobre la celda es:

$$E = E_0 - |(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a| - |(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c| - iR_i = iR \quad (2.1)$$

donde

E_0 : Tensión de circuito abierto de la celda

$(\eta_{ct})_a, (\eta_{ct})_c$: Polarización de activación en el ánodo y el cátodo

$(\eta_c)_a, (\eta_c)_c$: Polarización de concentración en el ánodo y el cátodo respectivamente

i : Corriente de operación de la celda bajo carga respectivamente

R_i : Resistencia interna de la celda

R : Resistencia de carga conectada a la celda

Como se observa en la Figura 2.1, cuanto mayor es la corriente de descarga de la celda, mayor será la caída de tensión debida a la polarización y a la impedancia interna. Para valores pequeños de corriente de descarga, la tensión de la celda es muy cercana a la tensión de la celda en vacío [9].

2.1.1.2. Parámetros y características de una celda

Para la construcción de una celda se pueden utilizar diferentes materiales como cátodo y como ánodo, los cuales determinan las características técnicas de la celda. Los valores característicos de los materiales utilizados como electrodos se encuentran tabulados y se utilizan en el cálculo de la ecuación electroquímica correspondiente. En la Tabla 2.1 se presentan los valores característicos de los materiales más comunes [10].

2.1. Introducción a las baterías

Material	Potencial estándar de reducción @ 25°C (V)	Densidad (g/cm ³)	Equivalente electroquímico (Ah/g)
Material del ánodo			
Li	-3,01	0,54	3,86
Na	-2,71	0,97	1,16
Mg	-2,38	1,74	2,20
Al	-1,66	2,69	2,98
Ca	-2,84	1,54	1,34
Fe	-0,44	7,85	0,96
Zn	-0,76	7,14	0,82
Cd	-0,40	8,65	0,48
Pb	-0,13	11,34	0,26
(Li)C ₆	-2,8	2,25	0,37
MH	-0,83	–	0,45
CH ₃ OH	–	–	5,02
Material del cátodo			
O ₂	1,23	–	3,35
Cl ₂	1,36	–	0,756
SO ₂	–	–	0,419
MnO ₂	1,28	5,0	0,308
NiOOH	0,49	7,4	0,292
CuCl	0,14	3,5	0,270
FeS ₂	–	–	0,89
AgO	0,57	7,4	0,432
Br ₂	1,07	–	0,335
HgO	0,10	11,1	0,247
Ag ₂ O	0,35	7,1	0,231
PbO ₂	1,69	9,4	0,224
Li _x CoO ₂	2,7	-	0,137
I ₂	0,54	4,94	0,211

Tabla 2.1: Características de los materiales utilizados como electrodos en una celda [10].

Capítulo 2. Baterías

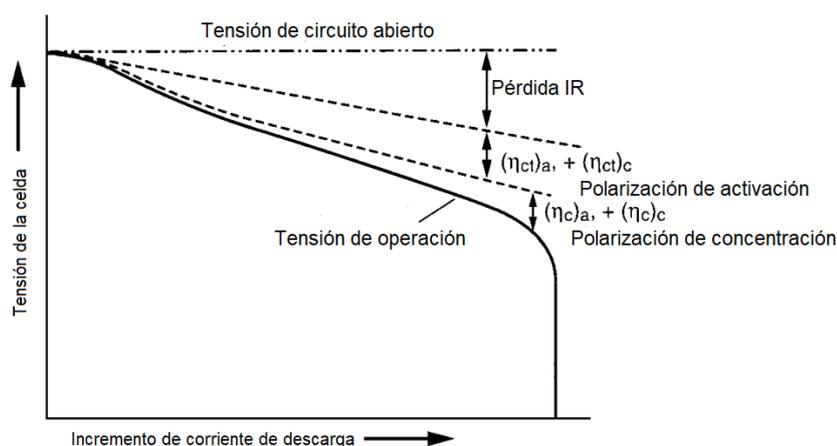


Figura 2.1: Caídas de tensión en una celda en operación producidas por la impedancia interna y efecto de la polarización [9].

Tensión en condiciones estándares y niveles de tensión

La tensión en condiciones estándares de una celda se calcula sumando los valores del potencial estándar de reducción de cada electrodo (ánodo y cátodo), los cuales se obtienen de la Tabla 2.1. En el caso de la tensión del ánodo se suma el valor negativo del potencial de reducción [10]. Además de la tensión estándar, también existen otros parámetros que refieren a la tensión de una celda [9]:

- Tensión de circuito abierto: tensión en bornes de la celda cuando no se tiene carga externa conectada. Se aproxima considerablemente al voltaje teórico.
- Tensión de circuito cerrado: tensión en bornes de la celda cuando tiene una carga conectada.
- Tensión nominal: tensión típica de operación de la celda.
- Tensión de trabajo: tensión instantánea en bornes de la celda cuando tiene una carga conectada. Es menor que la tensión de circuito cerrado.
- Tensión promedio: tensión promedio en bornes de la celda durante su descarga.
- Tensión de punto medio: tensión central durante la descarga de la celda.
- Tensión de cutoff: tensión de fin de la descarga de la celda, para la cual ya se entregó toda la capacidad.

Capacidad de corriente teórica

La capacidad de una celda se asocia a la cantidad de electricidad que es posible extraer de la misma y por tanto depende de la cantidad de material activo que posee. Generalmente se expresa en unidades de Ampere-hora (Ah) y para calcular la capacidad por unidad de masa de una celda, se suma la capacidad por unidad de masa de cada electrodo [10], cuyos valores se muestran en la Tabla 2.1.

Tasa de corriente C

La tasa de corriente C o también conocido como *C-rate* representa la velocidad de descarga de una celda y describe la cantidad de corriente que puede entregar la celda por un cierto período de tiempo [7]. Por ejemplo, si una celda posee una capacidad de 50 Ah a una tasa de descarga de 1C, significa que la misma puede entregar 50 A durante una hora. Complementando el ejemplo, si la descarga se realiza a una tasa de 0,5C, la celda podrá entregar 25 A durante un período de 2 horas, mientras que si se realiza a 2C, se entregarían 100 A durante 30 minutos.

Energía teórica

Otra forma de expresar la capacidad de una celda, es en términos de energía (Wh). Para ello se toma en cuenta la tensión teórica y la cantidad de corriente que puede entregar la celda, de acuerdo a la expresión 2.2 [10]. Donde la tensión V es la nominal declarada por el fabricante.

$$\text{Energía (Wh)} = \text{Tensión (V)} \times \text{Capacidad de corriente (Ah)}. \quad (2.2)$$

Energía específica y densidad de energía

La energía de una celda se puede expresar referida a su masa (Wh/kg) mediante la energía específica o referida a su volumen (Wh/l) mediante la densidad de energía. Se debe tener en cuenta que la capacidad energética teórica de una celda depende de la cantidad de material activo que posea y por ende depende de la masa y el volumen. Sin embargo, del valor teórico de capacidad, solo es utilizable una fracción de la misma, debido a que la celda contiene materiales no activos que agregan masa y volumen [10].

Estado de carga (SOC: State of Charge)

Indica el valor de la capacidad remanente (Q_{rem}) en la celda expresada como porcentaje de la máxima capacidad disponible (Q_{max}), según la ecuación 2.3 [11].

$$SOC = \frac{Q_{rem}}{Q_{max}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Se entiende que un SOC=100% corresponde a una celda totalmente cargada y un SOC=0% a una celda totalmente descargada.

Estado de salud (SOH: State of Health)

Comparación del estado de degradación actual de la celda respecto a la condición que poseía al inicio de su vida útil. Proporciona un indicador de cuánto tiempo falta para que la celda alcance el final de su vida útil. Es una estimación que los controladores de baterías realizan en base a algoritmos que cada fabricante puede implementar a su criterio. Con estos algoritmos se estima el tiempo de vida de la batería en cuestión, evaluando parámetros de la misma, como son las tensiones de trabajo, resistencia interna, temperatura de trabajo, retención de carga, capacidad y número de ciclos de descarga, entre otros [7].

Capítulo 2. Baterías

2.1.2. Clasificación de las baterías

Como criterio general, las baterías o celdas se clasifican en dos categorías según su capacidad de ser recargadas o no. En los siguientes párrafos se presentan las características principales de cada categoría.

Baterías primarias

Son baterías que no pueden ser recargadas de forma efectiva, por lo que se utilizan una única vez y son desechadas. Tienen un bajo costo monetario y tienen un bajo peso, por lo que usualmente son utilizadas para dispositivos electrónicos portátiles, iluminación, juguetes, etc. Algunas de las ventajas que presentan son: larga duración, alta densidad de energía para bajas tasas de descarga, son pequeñas y fáciles de utilizar. Como es evidente, su principal desventaja es que son baterías de un único uso [9].

Baterías secundarias

A diferencia de las primarias, las baterías o celdas secundarias pueden ser recargadas eléctricamente luego de una descarga mediante la circulación de una corriente opuesta a la corriente de descarga. De esta manera, la celda transforma la energía eléctrica que es suministrada, en energía química que es almacenada en sus componentes activos para luego transformarla nuevamente en energía eléctrica en un proceso de descarga [9]. Como ventajas se destacan una alta densidad de potencia, alta velocidad de descarga y algunas químicas presentan buen rendimiento a baja temperatura. Si bien la densidad de energía es generalmente menor que en las baterías primarias, la capacidad total de utilización termina siendo mayor debido a que pueden ser recargadas [9].

2.1.3. Factores que afectan el rendimiento de las baterías

Los parámetros declarados por el fabricante como rendimientos nominales de la batería, están sujetos a una determinada condición de uso. En particular las tensiones de descarga, capacidad de almacenamiento y temperaturas de trabajo dependen de las condiciones de uso. Se detalla a continuación de forma general las principales variables que afectan el rendimiento de las baterías.

2.1.3.1. Nivel de tensión

La tensión en bornes de una celda cuando se descarga es menor que su tensión teórica debido a pérdidas asociadas a la impedancia interna y a la polarización de los materiales. A su vez, la tensión también va disminuyendo durante la descarga debido al incremento de la impedancia interna como consecuencia de la acumulación de impurezas en el electrolito [9].

En la Figura 2.2 se muestra la curva de descarga de una celda ideal y las curvas de descarga reales de dos celdas con diferente impedancia. En la curva ideal, la tensión de la celda se mantiene constante durante toda la descarga y cae instantáneamente a cero cuando la celda entregó toda su capacidad. La curva 2 corresponde a una celda con una

impedancia interna mayor que la correspondiente a la curva 1, por lo que en esta, las pérdidas serán mayores y la tensión caerá más rápido a medida que la celda se descarga.

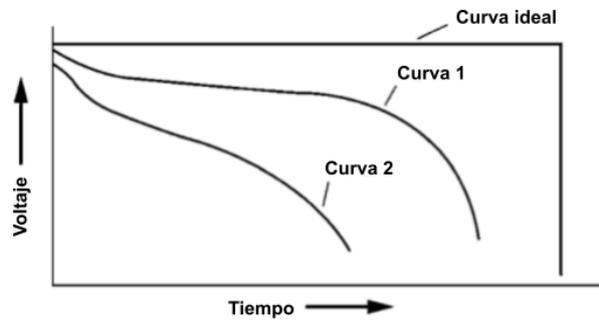


Figura 2.2: Curvas características de descarga de dos celdas con impedancias internas diferentes [9].

2.1.3.2. Corriente de descarga

Tanto las pérdidas asociadas a la impedancia interna como los efectos de la polarización, aumentan con la corriente de descarga, por lo que a mayor corriente de descarga, menor será la tensión de descarga, la curva de descarga se vuelve más pronunciada y se reducirá la capacidad Ah y la vida útil de la celda. Para corrientes de descarga muy pequeñas, la curva de descarga puede acercarse a la curva ideal. Cabe mencionar que si una celda que ha alcanzado su tensión de cutoff bajo una cierta corriente de descarga se utiliza a una tasa de descarga menor, se puede obtener una tensión mayor y una capacidad adicional cuando se vuelva a llegar a la tensión de cutoff [9].

2.1.3.3. Modo de descarga

El tipo de descarga afecta el rendimiento de la batería, por lo que es recomendado que el utilizado en los ensayos sea el mismo que se utilizará en la aplicación para la cual se diseña. Según el modo de descarga, la corriente de descarga tendrá diferentes valores y por lo tanto el tiempo de descarga de la batería será diferente. Los tres modos básicos de descarga son [9]:

- Resistencia constante: la corriente cae durante la descarga de forma proporcional a la caída de tensión para mantener la resistencia constante.
- Corriente constante: la corriente permanece constante durante la descarga, independientemente de la caída de tensión.
- Potencia constante: La corriente aumenta mientras va cayendo la tensión para mantener la potencia constante.

Los dispositivos eléctricos y electrónicos requieren una potencia de entrada mínima P_{min} para funcionar a un nivel de rendimiento específico, por lo que la potencia al final de la descarga de la batería debe ser la misma e igual a P_{min} para los tres modos de descarga [9]. En el modo de descarga de resistencia constante, la corriente durante la descarga (Figura 2.3(a)) sigue la caída de la tensión de la batería (Figura 2.3(b)). La

Capítulo 2. Baterías

potencia, cae aún más rápidamente, siguiendo el cuadrado de la tensión de la batería (Figura 2.3(c)). Para garantizar que la potencia P_{min} esté disponible en la tensión de corte, en este modo de descarga los niveles de corriente y potencia durante la primera parte de la descarga deben superar el mínimo requerido. La batería se descarga a una corriente superior a la necesaria, agotando su capacidad rápidamente, lo que dará como resultado una vida útil más corta [9]. Para el caso del modo de corriente constante, la corriente se mantiene a un nivel tal que la potencia en la tensión de corte es igual P_{min} . Por lo tanto, la corriente y la potencia durante la descarga son menores que para el modo de resistencia constante y consecuentemente el tiempo de descarga de la batería es mayor [9]. Por último, en el modo de potencia constante, la corriente es más baja al comienzo de la descarga y aumenta a medida que cae la tensión para mantener una salida de potencia constante igual al valor de P_{min} . La corriente media es la más baja de los tres modos y por tanto, este es el modo de descarga con el que se obtiene el mayor tiempo de servicio. Cabe señalar que esta ventaja del modo de descarga de potencia constante depende de las características de descarga de la batería y será más notoria en los sistemas que disponen de un amplio rango de tensión para entregar su capacidad total [9].

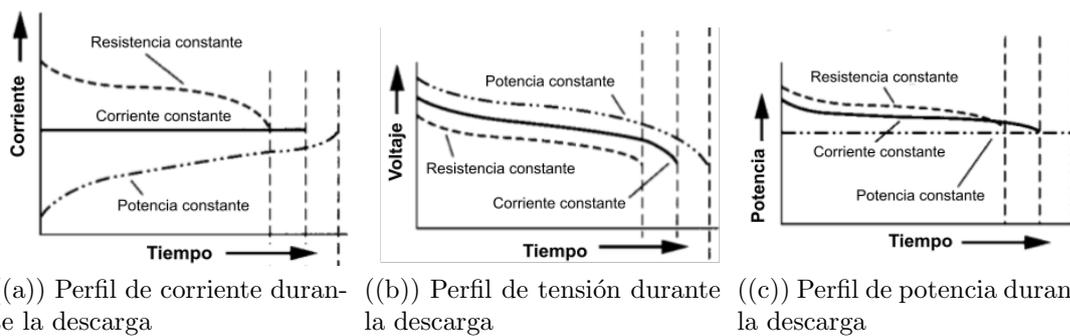


Figura 2.3: Perfiles de descarga en diferentes modos de descarga. El nivel potencia es el mismo para cada tipo de descarga al final de la descarga e igual a la mínima potencia requerida por la carga [9].

2.1.3.4. Temperatura de la batería durante la descarga

La temperatura a la cual se descarga la batería tiene un efecto importante en la capacidad y la característica de tensión, lo que se debe a la reducción de la actividad química e incremento de la resistencia interna a bajas temperaturas. Disminuir la temperatura de descarga resultará en una reducción de capacidad y además un aumento en la pendiente de la curva de descarga. Esto se puede ver en la Figura 2.4(a), que muestra varias descargas con el mismo consumo de corriente pero aumentando la temperatura de la batería progresivamente (de T1 a T4), donde T4 representa una descarga a temperatura ambiente normal [9].

El mejor rendimiento se obtiene en general entre 20 °C y 40 °C. A temperaturas más altas, la resistencia interna baja, la tensión de descarga aumenta y como resultado la capacidad ampere-hora también aumenta. Por otro lado, la actividad química también aumenta a altas temperaturas y puede ser lo suficientemente rápida durante

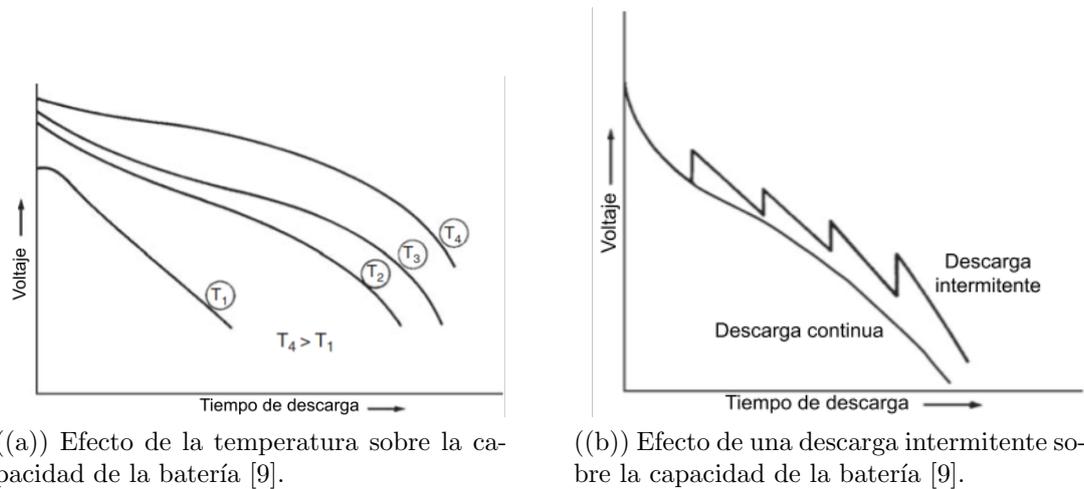


Figura 2.4: Influencia de la temperatura y del modo de descarga en el perfil de descarga de una celda.

la descarga como para causar una pérdida neta de capacidad (fenómeno conocido como “self-discharge” o “autodescarga”) [9].

2.1.3.5. Tipo de descarga (continuo, intermitente)

Cuando se deja en reposo una celda luego de haber sufrido una caída de tensión durante una descarga, ocurren cambios químicos y físicos que pueden resultar en un aumento de la tensión de la celda. Si la celda se vuelve a someter a una descarga, esta entregará energía disminuyendo su tensión nuevamente y dando origen a un perfil de descarga con forma de diente de sierra como se muestra en la Figura 2.4(b). Este fenómeno puede resultar en un aumento del tiempo de servicio, pero se observa que si el tiempo en el que se mantiene en reposo la celda es muy prolongado, pueden ocurrir pérdidas de capacidad debido al fenómeno de “autodescarga” [9], detallado posteriormente en la Sección 2.1.3.7. La mejora del rendimiento es más notoria cuando las corrientes de descarga son elevadas, dado que la celda tiene la oportunidad de recuperarse de efectos de polarización que son mayores bajo corrientes de descargas más elevadas [9].

2.1.3.6. Efecto del diseño de la celda y de la batería

Las características constructivas de las celdas y de las baterías tienen consecuencias en el rendimiento de las mismas. Por ejemplo, las celdas que están diseñadas para contar con la máxima capacidad o máximo tiempo de servicio, tienen la mayor cantidad de material activo posible. Por otro lado, las celdas de alta potencia, que pueden entregar altas tasas de corriente en poco tiempo, son diseñadas con grandes superficies de electrodos y con características para minimizar la resistencia interna y mejorar la densidad de corriente, generalmente sacrificando la capacidad o la vida útil de la celda [9].

La forma y configuración de la celda también afecta su capacidad, ya que afecta la resistencia interna y la disipación de calor. Por ejemplo, una celda alta, de forma estrecha en un diseño tipo bobina, generalmente tiene menos resistencia interna que una celda

Capítulo 2. Baterías

ancha, de forma cuadrada del mismo diseño. Además puede tener mejor rendimiento en proporción a su volumen, en particular a velocidad de descarga alta. La disipación de calor también será mejor en celdas con una relación superficie-volumen elevada o con componentes internos que pueden conducir el calor mas eficientemente hacia el exterior de la batería [9].

2.1.3.7. Envejecimiento de la batería y condiciones de almacenamiento

Durante el almacenamiento, las baterías se deterioran como resultado de procesos químicos que ocurren en sus materiales. Factores como el diseño, el sistema electroquímico, la temperatura y la duración del período de almacenamiento afectan la retención de carga de la batería. Otro factor que afecta es el tipo de descarga luego de un período de almacenamiento, ya que el porcentaje de retención de carga luego del almacenamiento, respecto a antes del almacenamiento, será más bajo cuanto más exigente sean las condiciones de descarga [9].

La autodescarga a su vez depende de la temperatura de almacenamiento, siendo menor cuanto más baja sea la temperatura, por lo que es recomendado almacenar las baterías en ambientes refrigerados y posteriormente calentarlas antes de la descarga para obtener la máxima capacidad. Durante descargas muy lentas o a largo plazo, la batería también puede sufrir una autodescarga que produce una pérdida de capacidad [9].

Algunos sistemas de baterías desarrollan películas protectoras en uno o los dos electrodos durante el almacenamiento. Estas baterías pueden mejorar el porcentaje de retención de carga durante el almacenamiento, pero cuando se intenta descargar la batería, la tensión inicial puede ser baja debido a la impedancia de la película. Dicho efecto dura hasta que la película se rompe y se conoce como “voltage delay” o “atraso de la tensión”, cuya duración es mayor a medida que aumenta el tiempo y la temperatura de almacenamiento [9].

2.1.3.8. Efecto del diseño de una batería multicelda

En baterías formadas por varias celdas, el rendimiento del pack es diferente al de cada celda individual debido a que en la batería, cada celda está rodeada por un entorno diferente. Generalmente las baterías se deben diseñar para mantener una temperatura uniforme en todo su volumen y evitar puntos calientes, así como también proporcionar rigidez y protección mecánica al pack. Los materiales auxiliares que se utilizan para construir la batería aumentan su tamaño y peso, por lo que la energía específica y densidad de energía de la misma será menor que la de las celdas que la componen [9].

El ciclado en baterías recargables puede desbalancear las celdas, ocasionando que su tensión, capacidad y SOC puedan volverse significativamente diferentes. Dicho desbalance puede resultar en un bajo rendimiento del pack y/o problemas de seguridad, por lo que puede llegar a ser necesario contar con un método de control de descarga para prevenir este fenómeno [9].

2.2. Baterías secundarias

Los primeros sistemas recargables de almacenamiento de energía surgieron en 1859 con la invención de la batería de plomo-ácido por parte del físico francés Gaston Planté (1834 - 1889). Esta batería significó el punto de partida para el estudio e investigación en baterías secundarias que dieron origen a las baterías recargables que se encuentran presentes en la actualidad en numerosas aplicaciones, desde pequeñas baterías utilizadas en juguetes portátiles, electrodomésticos, dispositivos electrónicos, herramientas y equipamiento biomédico, hasta baterías de gran tamaño empleadas como almacenamiento de energía en vehículos híbridos y eléctricos [9].

Dado que en el proyecto se estudiarán baterías secundarias, resulta conveniente realizar una breve profundización en esta tecnología, con el fin de conocer características que son claves para comprender fenómenos que pueden surgir en los posteriores ensayos. En la presente sección se realiza una descripción de los tipos de baterías secundarias más relevantes utilizadas comercialmente, se exponen los requerimientos que deben cumplir para aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía y para electromovilidad. Por último, se detallan dos tecnologías utilizadas en electromovilidad, que son las baterías de níquel-hidruro metálico y las baterías de litio-ion, las cuales son objeto de estudio del presente proyecto.

2.2.1. Tipos de baterías secundarias

Plomo-ácido

Son baterías cuyo uso se ha popularizado para muchas aplicaciones de almacenamiento de energía eléctrica debido a su bajo costo y buen desempeño, como por ejemplo para la alimentación de los sistemas eléctricos y arranque de los automóviles, fuentes ininterrumpidas de potencia (UPS), sistemas de telecomunicaciones, sistemas de emergencia, etc [9]. Los electrodos están compuestos por plomo (Pb) y óxido de plomo (PbO_2), como electrolito se utiliza ácido sulfúrico (H_2SO_4). La tensión de cada celda es cercana a 2 V y las características constructivas dependen de la aplicación, existiendo varios diseños [12]. La principal desventaja que tienen las baterías de plomo-ácido es la elevada densidad másica del plomo, lo que determina una baja energía específica (Wh/kg).

Níquel-cadmio

Son baterías con larga vida útil y poco mantenimiento que se utilizan en aplicaciones industriales de gran porte como en camiones y vehículos mineros, señalización ferroviaria, sistemas de potencia de emergencia, encendido de motores diésel, etc [9]. El material utilizado como cátodo es hidróxido de óxido de níquel ($\text{NiO}[\text{OH}]$) y como electrolito se utiliza potasa cáustica al 20 %, alcanzando altos valores de energía específica y una tensión de celda de 1,2 V [12].

Zinc-óxido de níquel

Son baterías que tienen el doble de densidad de energía que las de níquel-cadmio, pero tienen un ciclo de vida menor debido a que el zinc tiene tendencia a deformarse,

Capítulo 2. Baterías

reduciendo la capacidad y provocando cortocircuitos internos. Se usan en bicicletas, scooters eléctricas y en herramientas eléctricas de potencia [9].

Níquel-hidruro metálico

Son baterías que surgieron en 1990 y se han vuelto muy populares debido a su aplicación en la propulsión de vehículos híbridos [7]. Si se comparan con las baterías de níquel-cadmio, las baterías de níquel-hidruro metálico tienen mayor energía específica, mayor densidad de energía, menor presión y menor costo. Durante la carga, el hidrógeno es absorbido por una aleación metálica formando el hidruro metálico, mientras que en la descarga sucede el proceso inverso [9]. Dado que son las baterías más utilizadas en vehículos híbridos, las baterías de níquel-hidruro metálico se estudian en profundidad en la Sección 2.2.4.

Litio-ion

Son baterías que surgieron a principios de los 2000 y rápidamente se volvieron muy populares en el mercado debido a su alta densidad de energía, alta energía específica y largo ciclo de vida [7]. Son utilizadas en una diversa variedad de aplicaciones como en laptops, teléfonos celulares, cámaras fotográficas, juguetes, herramientas inalámbricas, vehículos híbridos y eléctricos, etc.

Para prevenir sobrecargas o sobredescargas que ocasionen un funcionamiento peligroso de la batería (como se mencionará en la Sección 2.2.5.4), las baterías de iones de litio requieren contar con un Battery Management System (BMS), el cual es un circuito que se encarga de monitorear las características de la batería como su temperatura, corriente y tensión, para garantizar su operación segura [9]. En el Capítulo 3 se realiza un estudio detallado sobre los BMS y sus características, mientras que las baterías de litio-ion son desarrolladas en la Sección 2.2.5.

2.2.1.1. Perfiles de descarga de las distintas tecnologías

Cada tecnología cuenta con un perfil de descarga diferente como se muestra en la Figura 2.5, en la que se ilustra la evolución de la tensión en bornes de cada celda cuando son descargadas a una tasa de $C/5$. Como se observa, la mayoría de los sistemas recargables tienen un perfil de descarga plano que comienza a caer abruptamente luego de que la batería entregó aproximadamente el 90 % de su capacidad, a excepción de los sistemas de óxido de plata, que muestran una doble meseta, debido a la descarga en dos etapas del electrodo de óxido de plata. Claramente la tecnología que presenta el mayor valor promedio de tensión es litio-ion, pero el perfil de descarga no suele ser tan plano como en el resto de las tecnologías, debido a la menor conductividad de los electrolitos no acuosos que deben utilizarse [10].

2.2.1.2. Comparación de tipos de baterías secundarias

En la Figura 2.6 se ilustra gráficamente una comparación de las características de algunas de las tecnologías más utilizadas en celdas secundarias. Se observa que litio-ion es la tecnología que tiene mayor rendimiento y eficiencia pero es una de las más

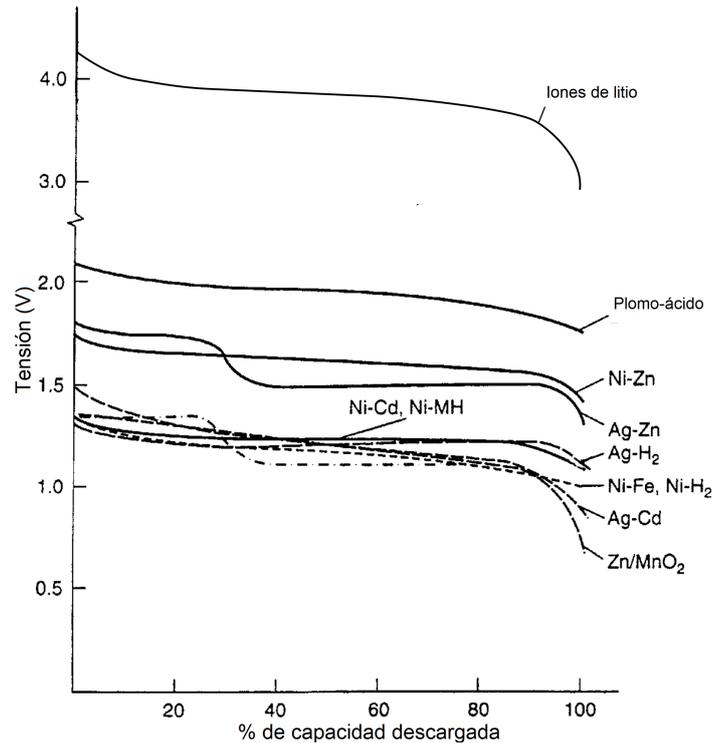


Figura 2.5: Perfiles de descarga de sistemas de baterías secundarias convencionales y baterías de iones de litio recargables a una tasa de descarga de aproximadamente $C/5$ [10].

costosas. Además, la principal desventaja de las celdas de litio-ion es que requieren de un circuito de gestión de carga y descarga para garantizar la operación segura. De manera contraria, las celdas de plomo-ácido son las más baratas pero es una de las tecnologías con menor rendimiento. En el caso de las celdas de níquel hidruro metálico, cuentan con una tensión de celda de 1,2 V, constituyendo la tecnología de tensión más baja, junto con níquel cadmio, mientras que la tensión de las celdas de litio-ion es notoriamente mayor a las del resto. En el resto de las propiedades, níquel hidruro metálico se encuentra en el punto medio aproximadamente. Los métodos de carga de las celdas suelen ser a corriente constante, tensión constante o mediante perfiles que son una combinación de ambos métodos. En el caso de plomo-ácido y níquel-zinc se deben utilizar perfiles con control de sobrecarga, ya que dichas tecnologías tienen poca tolerancia ante sobrecargas [9].

2.2.2. Baterías para almacenamiento estacionario de energía

Un sistema estacionario de energía se define como todo sistema capaz de almacenar energía y devolverla cuando sea conveniente. Existen diversos tipos de sistemas y métodos de almacenaje de energía, pero en el marco de este proyecto es de interés estudiar el almacenamiento de energía eléctrica. Existen cinco clasificaciones, pudiendo ser almacenamiento: mecánico, eléctrico, electroquímico, químico y térmico de energía.

En particular, el almacenamiento de energía electroquímico implica el uso de baterías

Capítulo 2. Baterías

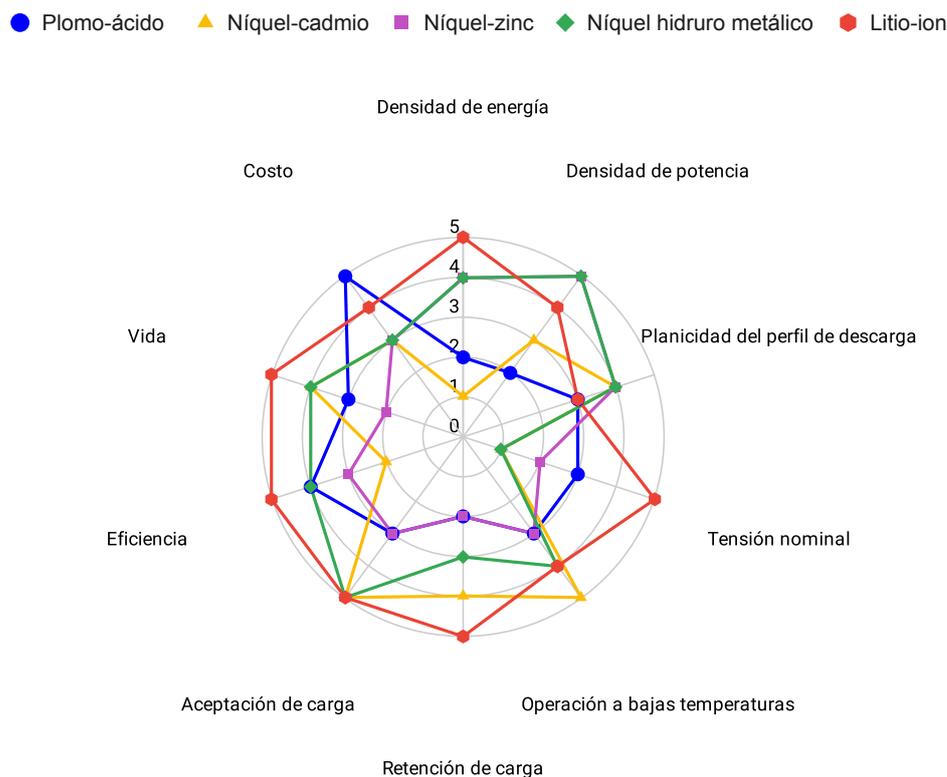


Figura 2.6: Gráfico araña comparativo de algunas de las tecnologías más utilizadas para baterías secundarias. Escala del 1 (peor) al 5 (mejor). Elaboración propia en base a datos de [9].

secundarias, las cuales son capaces de absorber energía eléctrica, retenerla, y liberarla a demanda cuando sea necesario. Según el requerimiento, con la baterías secundarias se implementan diversos sistemas de almacenamiento de energía, los cuales van desde sistemas con potencias entre 100 kW y 100 MW para el control de tensión y frecuencia en redes de distribución y transmisión, hasta sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés) que se diseñan desde algunos kilovatios hasta las centenas de kilovatios [8]. En particular, estos últimos son de interés dado que entran en los niveles de potencia que se pueden conseguir con baterías de VE.

Las UPS forman una parte fundamental de la mayoría de las instalaciones industriales y/o domésticas, dado que proporcionan energía ininterrumpida, lo que es imprescindible para sistemas de comunicación, sistemas IT (tecnologías de la información) o procesos industriales que requieren una fuente de energía con estas características. Por lo general, las UPS están dotadas de una etapa rectificadora, un inversor y una batería o un pack de baterías, que es gobernado por un sistema de control que monitorea la red y gestiona la carga de la batería. Se observa en la Figura 2.7 una topología típica de UPS basada en dichos componentes. Por lo general, estas son escalables, pudiendo incrementar la potencia de almacenamiento según se requiera.

En los catálogos del fabricante ABB se declara una eficiencia de un 97% en sus

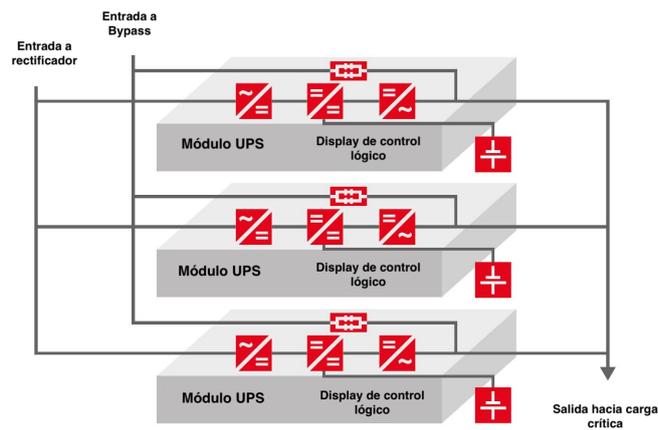


Figura 2.7: Esquema de funcionamiento típico de una UPS [13].

convertidores electrónicos de energía [13], por lo que al momento de diseñar un banco de baterías para su uso en sistemas UPS se puede considerar que la capacidad del sistema se corresponderá con la capacidad del banco de baterías, corregido por un factor correspondiente a las pérdidas en el circuito inversor.

2.2.3. Baterías para electromovilidad

Si bien los vehículos eléctricos cuentan con más de un siglo de antigüedad, durante prácticamente todo el siglo pasado los motores de combustión interna han dominado el mercado automotor. Sin embargo, aproximadamente en los últimos 20 años los vehículos eléctricos han retomado importancia ya que se posicionan como una gran alternativa para reducir la emisión de gases de efecto invernadero en las próximas décadas.

Para lograr la transición hacia los vehículos eléctricos, es necesario que estos sean atractivos a los usuarios y por tanto deben contar con igual o mejores prestaciones, rentabilidad y confort que los vehículos con motores de combustión. Para lograr este objetivo, la batería del vehículo juega un rol crucial, ya que actualmente casi la mitad del costo de un vehículo eléctrico a batería se debe al costo de esta [5] y es el componente más determinante con respecto a la autonomía del vehículo. En este sentido es importante el desarrollo e investigación en nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento y reducir el costo de las baterías utilizadas en vehículos híbridos y eléctricos, conforme al crecimiento de la electromovilidad que se proyecta para las próximas décadas. En la presente sección se realiza un relevamiento de los diferentes tipos de baterías utilizadas para vehículos eléctricos a batería (BEV) e híbridos enchufables (PHEV), así como los requerimientos necesarios para estas aplicaciones.

2.2.3.1. Requerimientos de baterías para BEV

La potencia y energía que utiliza un vehículo eléctrico para su propulsión, es suministrada por la batería, la cual debe ser capaz de brindar las prestaciones para acelerar

Capítulo 2. Baterías

y mantener la velocidad. A los efectos de cumplir con las exigencias de funcionamiento de un BEV, las baterías destinadas a esta funcionalidad requieren contar con:

- Alta energía específica (120-140 Wh/kg) y densidad de energía para incrementar la autonomía de conducción y reducir el tamaño y masa de la batería [14]. En el funcionamiento totalmente eléctrico de un vehículo, 1 kWh corresponde a una autonomía de aproximadamente entre 5 y 10 km, por lo que las baterías de los BEV necesitan contar con capacidades de entre 20 a 100 kWh para cubrir las distancias de viajes diarios [12]. Sin embargo, más capacidad implica mayor peso, por lo que para contar con una amplia autonomía, las baterías deben tener un bajo peso por unidad de energía.
- Alta densidad de descarga de potencia (800-1500 W/kg) para entregar gran cantidad de energía en poco tiempo cuando el vehículo acelera [14].
- Larga vida útil y con poco mantenimiento. Debe ser capaz de durar al menos 10 años sin ser sustituida, dependiendo del perfil de conducción del conductor. Se considera que se ha llegado al fin de la vida útil cuando la batería alcanza el 80 % del rendimiento inicial [14].
- Bajo costo para que el precio de un vehículo eléctrico sea comparable con el de un vehículo de combustión tradicional. [14]. Se considera como objetivo un costo de U\$S 100 por kWh
- Rango de temperatura de operación comprendido entre -40 °C y +60 °C [14].

En este sentido, desde la década del '90 se han llevado a cabo diferentes programas de desarrollo de baterías para vehículos eléctricos dirigidos por USABC (United States Advanced Batteries Consortium), el cual es una asociación entre General Motors, Ford y Chrysler con el objetivo de promover el desarrollo de baterías para vehículos eléctricos. USABC ha ido actualizando las metas que deberían cumplir las baterías de los vehículos desde los últimos 30 años, siendo las metas para el año 2020 las que se presentan en la Tabla 2.2.

2.2.3.2. Requerimientos de baterías para vehículos híbridos eléctricos

Antes de describir los requerimientos que deben cumplir las baterías utilizadas en los vehículos híbridos, es importante definir brevemente el concepto de vehículo híbrido eléctrico y los diferentes tipos más relevantes. Se entiende por vehículo híbrido eléctrico (HEV) todo aquel vehículo en el que la energía de propulsión proviene de dos o más fuentes de energía diferentes, de las cuales al menos una de ellas es eléctrica. Los HEV convencionales se componen de un motor de combustión interna (ICE) combinado con un tren motriz eléctrico, los que pueden combinarse en serie (el motor eléctrico proporciona la tracción a la rueda y es alimentado de una batería que es recargada por un generador de combustión interna), en paralelo (tanto el motor eléctrico como el ICE proporcionan tracción a la rueda) o en serie-paralelo (tanto el motor eléctrico como el ICE proporcionan tracción a la rueda, pero el ICE también funciona como generador recargando la batería que utiliza el motor eléctrico). Generalmente, los motores eléctricos de los HEV pueden

2.2. Baterías secundarias

Parámetro	Unidad	Valor meta a cumplir por el sistema de batería	Valor meta a cumplir por la celda
Densidad de pico de potencia de descarga (pulso de 30 s)	W/l	1000	1500
Pico de potencia de descarga por unidad de masa (pulso de 30 s)	W/kg	470	700
Pico de potencia de regeneración por unidad de masa (pulso de 10 s)	W/kg	200	300
Densidad de energía disponible a una tasa de descarga de C/3	Wh/l	500	750
Energía específica disponible a una tasa de descarga de C/3	Wh/kg	235	350
Energía disponible a una tasa de descarga de C/3	kWh	45	N/A
Vida útil	años	15	15
Cantidad de ciclos DST de vida	ciclos	1000	1000
Costo (en base a 250.000 unidades/año)	\$/kWh	125	100
Rango de temperatura de trabajo	°C	-30 a +52	-30 a +52
Tiempo de recarga normal	horas	< 7	< 7
Tiempo de recarga rápida	minutos	Δ SOC 80% en 15 minutos	Δ SOC 80% en 15 minutos
Máxima tensión de operación	V	420	N/A
Mínima tensión de operación	V	220	N/A
Pico de corriente (30 s)	A	400	400
Funcionamiento sin asistencia a baja temperatura	%	> 70% de energía disponible @ C/3 y -20 °C	> 70% de energía disponible @ C/3 y -20 °C
Rango de temperatura soportado durante 24 horas	°C	-40 a +66	-40 a +66
Autodescarga máxima	%/mes	<1	<1

Tabla 2.2: Metas de USABC establecidas para 2020 para baterías de vehículos eléctricos con una autonomía de 200 millas según un ciclo UDDS [15].

Capítulo 2. Baterías

funcionar como generadores durante el frenado, lo que permite utilizar parte de la energía cinética del vehículo para cargar la batería y se conoce como *frenado regenerativo* [9].

Los requerimientos de las baterías varían según el tipo de HEV del que se trate, por lo que a continuación se realiza una breve descripción de los diferentes tipos de HEV existentes según su performance y grado de electrificación:

- **Micro-híbridos (stop-start HEV):** Son vehículos en los que el ICE se apaga cuando el vehículo se detiene, momento en el que los equipamientos eléctricos auxiliares del vehículo y el sistema de aire acondicionado pasa a ser alimentado por la batería. Luego, cuando el conductor presiona el acelerador, el motor de combustión es reencendido por un motor eléctrico. Este tipo de vehículos proveen un ahorro energético de aproximadamente un 5% y son recomendados para ciclos de conducción urbanos con detenciones frecuentes. Se utilizan baterías de plomo-ácido mejoradas para incrementar la capacidad y soportar la gran cantidad de ciclos de carga y descarga [9].
- **Completamente híbridos (Full HEV):** Vehículos que cuentan con un tren de transmisión eléctrico que complementa al ICE, permitiendo que el vehículo pueda ser arrancado o propulsado de manera completamente eléctrica, ya que el tren eléctrico tiene un torque y potencia similar al del ICE. Los vehículos full HEV pueden proporcionar ahorros energéticos de más de un 50% en ciclos de conducción urbano y requieren baterías con una alta potencia específica (1000 W/kg o más), capaces de aceptar pulsos de alta potencia durante el frenado regenerativo y soportar pulsos de alta potencia de descarga durante la conducción [9].
- **Semi-híbridos (Mild HEV):** Al igual que los full HEV, los mild HEV son vehículos que complementan la potencia del ICE con un tren de transmisión eléctrico, con la diferencia de que los mild HEV no son capaces de arrancar o ser propulsados de forma totalmente eléctrica, ya que el torque y potencia del tren eléctrico es significativamente menor que el del ICE. Si bien requieren baterías con alta potencia específica como en los full HEV (1000 W/kg o más), en los mild HEV se utilizan baterías más pequeñas, reduciendo el costo del sistema de baterías [9].
- **Híbridos enchufables (PHEV):** Son vehículos que cuentan con un tren de transmisión eléctrico y un ICE, ambos como fuentes principales de propulsión. Son similares a los full HEV con la diferencia de que los PHEV tienen la capacidad de recargar su batería conectándose a una red eléctrica.

Se distinguen dos modos de funcionamiento, por un lado el modo *Charge Depleting (CD)* y por otro el modo *Charge Sustaining (CS)*. El modo CD se define como el modo en el que el vehículo puede operar en modo híbrido (propulsión y sistemas del vehículo son alimentados por la energía eléctrica almacenada en la batería y/o motor de combustión) o en modo eléctrico (propulsión y sistemas son alimentados solo por la energía eléctrica almacenada en la batería), con una disminución neta del estado de carga (SOC) de la batería. Mientras que en el modo CS se permite al vehículo operar únicamente en modo híbrido y con un valor de SOC de la batería casi constante [16]. Luego de que se realiza una carga completa de la batería conectándose a la red eléctrica, generalmente se procura primero utilizar el PHEV

Parámetro	Meta a cumplir por un PHEV de 32 km	Meta a cumplir por un PHEV de 64 km
Autonomía en funcionamiento 100 % eléctrico	32 km	64 km
Pico de pulso de descarga de potencia (10 s)	37 kW	38 kW
Pico de pulso de descarga de potencia (2 s)	45 kW	46 kW
Pico de pulso de regeneración de potencia (10 s)	25 kW	25 kW
Máximo pulso de corriente de descarga	300 A	300 A
Energía disponible en modo Charge Depleting	5,8 kWh	11,6 kWh
Energía disponible en modo Charge Sustaining	0,3 kWh	0,3 kWh
Vida útil en modo CD	5000/29 ciclos/MWh	5000/58 ciclos/MWh
Cantidad de ciclos de vida en modo CS	300.000 ciclos	300.000 ciclos
Vida útil @ 30°C	15 años	15 años
Peso máximo del sistema de batería	70 kg	120 kg
Volumen máximo del sistema de batería	47 litros	80 litros
Tensión máxima de operación	420 Vdc	420 Vdc
Tensión mínima de operación	150 Vdc	153 Vdc
Autodescarga máxima	<1 %/mes	<1 %/mes
Rango de temperatura soportable	-46 °C a +66 °C	-46 °C a +66 °C
Costo máximo del sistema (en base a 100k unidades/año)	USD 2.200	USD 3.400

Tabla 2.3: Metas de USABC para 2018 para baterías de vehículos híbridos enchufables PHEV.

en modo *charge depleting*, en el que la propulsión es totalmente eléctrica hasta que la energía de la batería es consumida y luego se utiliza el ICE y se opera en modo *charge sustaining*, manteniendo el SOC de la batería en un cierto valor y controlando la carga y descarga [9].

Existen PHEV que cuentan con una batería de gran capacidad, en los que el tren eléctrico y el ICE se configuran en serie de manera de que una vez que el SOC de la batería alcanza cierto valor, el ICE funciona como generador cargando la batería. Usualmente estos vehículos son denominados como vehículos eléctricos de rango extendido, ya que son propulsados por el tren de transmisión eléctrico por un rango mayor al que tendría únicamente con la batería. Sin embargo, contar con una batería de gran tamaño aumenta el peso y el costo del vehículo, por lo que también existe otro tipo de PHEV en los que se emplea una batería más pequeña y el ICE opera en paralelo al tren eléctrico, proporcionando potencia cuando se exceden ciertos valores de velocidad o de potencia demandada [9].

Capítulo 2. Baterías

Al igual que para los BEV, USABC también define requerimientos meta que deben cumplir las baterías de los PHEV. Algunas de las metas que se establecieron para 2018 se presentan en la Tabla 2.3.

2.2.3.3. Baterías para BEV y HEV

Tradicionalmente las baterías utilizadas para vehículos eléctricos durante el siglo XX, han sido baterías de plomo-ácido debido a su bajo costo y relativo buen rendimiento. A partir de 1990 se comenzaron a desarrollar baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) para aplicaciones en BEV, que proporcionaban una autonomía superior a 150 km y más de 1000 ciclos de vida útil, lo que superaba las prestaciones de las baterías de plomo-ácido. Sin embargo, el costo por unidad de energía de las mismas es muy superior al de las baterías de plomo-ácido, por lo que fue inviable utilizar esta tecnología para BEV de largo alcance, utilizándose baterías de NiMH solo en pequeños packs de baterías para vehículos híbridos [9].

A fines de la década del '90 se comenzaron a desarrollar baterías de litio-ion para aplicaciones en dispositivos electrónicos como laptops, teléfonos celulares, cámaras fotográficas, etc, las cuales contaban con una alta densidad de energía, alta energía específica y un costo accesible. A partir de allí, se comenzaron a utilizar diferentes materiales para fabricar los electrodos de las baterías, con los que se lograron diseños con alta energía específica y alta potencia, consolidando a las baterías de litio-ion como la principal tecnología para las baterías de vehículos eléctricos [9]. Las baterías de litio-ion más relevantes para electromovilidad son Litio-óxido de Cobalto (LiCoO_2), Litio-óxido de Manganeso (LiMn_2O_4), Litio-Hierro fosfato (LiFePO_4), Litio-Níquel-Manganeso-óxido de Cobalto (LiNiMnCoO_2), Litio-Níquel-Cobalto-óxido de Aluminio (LiNiCoAlO_2) y Litio-Titanio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) [7, 12, 17].

Por otra parte, en lo que refiere a las baterías de los HEV, tanto para los micro-híbridos, full HEV y mild HEV, los requerimientos de energía específica para las baterías son modestos y pueden ser alcanzados por baterías de plomo-ácido. Sin embargo, los requerimientos para las baterías de los PHEV son más exigentes, por lo que se utilizan baterías de NiMH o de litio-ion [9].

La principal diferencia entre los requerimientos de las baterías de los BEV y los HEV es la relación entre potencia y energía (P/E), ya que excluyendo los PHEV, los HEV requieren altos valores de potencia pero niveles modestos de energía, por lo que los valores de energía específica requeridos son menores que en los BEV, los cuales requieren altos niveles de energía y por consiguiente baterías de gran tamaño. Si bien los BEV tienen altos requerimientos de potencia al igual que los HEV, los requerimientos de potencia específica son menores que en estos últimos, ya que los BEV cuentan con mayor peso y la relación entre la potencia y el peso es menor [9]. Esto ocasiona que la relación P/E de los HEV sea mayor que para los BEV en más de un orden de magnitud, a excepción de los PHEV, los que tienen requerimientos similares a los BEV, como se puede observar en la Tabla 2.4 en la que se comparan los requerimientos de rendimiento específico de las baterías de los vehículos eléctricos en general (EV).

Tipo de vehículo	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Relación P/E	Costo de energía (\$/kWh)	Costo de potencia (\$/kW)
Micro-híbrido	25	600	24	600	25
Mild HEV (menor potencia)	12	520	43	867	20
Mild HEV (mayor potencia)	20	514	26	514	20
Full HEV (menor potencia)	8	625	83	1667	20
Full HEV (mayor potencia)	8	667	80	1600	20
PHEV (menor potencia)	57	750	13	500	38
PHEV (mayor potencia)	97	317	3	293	89
BEV	200	400	2	100	50

Tabla 2.4: Comparación de requerimientos meta para el desempeño específico de las baterías de HEV y BEV [9].

Además de los requerimientos específicos mencionados para los BEV y HEV individualmente en las Secciones 2.2.3.1 y 2.2.3.2, existen requerimientos generales que deben cumplir este tipo de baterías. Las baterías de los EV deben satisfacer requerimientos de seguridad de manera de garantizar que no se produzcan daños al usuario, al resto de individuos e infraestructura vial. Existen estándares de seguridad que determinan que ante un caso de accidente, las baterías de los EV se deben desconectar automáticamente para evitar posibles cortocircuitos que causen un embalamiento térmico de la batería y ocasionen el incendio del vehículo. La energía liberada, depende de los materiales utilizados en los electrodos de la batería. En el caso de las baterías de litio-ion, las tecnologías LiFePO_4 y LiMn_2O_4 son las más seguras, mientras que LiCoO_2 constituye la química menos segura [18]. Es un requisito fundamental que el sistema de baterías cuente con un BMS capaz de medir los parámetros de la batería, asegurando la operación segura de la misma, lo que se desarrolla en el Capítulo 3.

También, existen requerimientos que la batería debe cumplir en cuanto a la vida útil. Para la industria automotriz, típicamente se requiere que las baterías cuenten con una vida útil de al menos 10 años, considerando como vida útil el período de tiempo comprendido entre el momento en el que la batería cuenta con las propiedades de un producto nuevo en base a sus especificaciones (Begin of Life: BOL) y el momento en el que dichas propiedades se alejan un cierto nivel por debajo de las que tenía al origen (End of Life: EOL). En las baterías de vehículos eléctricos se utiliza como criterio, considerar el EOL cuando la capacidad de la batería cayó hasta un 80% de la que tenía en su BOL. La vida útil de la batería se puede ver reducida por fallas de fábrica, operar a elevadas temperaturas, elevada potencia entregada durante los ciclos, cantidad de ciclos de trabajo y por el envejecimiento propiamente dicho de los componentes activos de la batería [9].

Ventajas	Desventajas
Mayor densidad de energía y energía específica respecto a plomo-ácido y NiCd	Menor energía y potencia específica respecto a litio-ion
Buen rendimiento a altas temperaturas	Reducción del rendimiento a bajas temperaturas
Buena retención de carga	Mayor costo que plomo-ácido
Vida útil y ciclo de vida largo	
Rápida capacidad de carga	
Diseño sellado sin necesidad de mantenimiento	
Seguridad	

Tabla 2.5: Principales ventajas y desventajas de las celdas de NiMH [9].

2.2.4. Baterías secundarias de Níquel-hidruro metálico

La batería de NiMH se comenzó a estudiar en la década del '60 tomando como base las baterías de NiCd y NiH₂. Previo al descubrimiento de las baterías de litio, la batería de NiMH tuvo su auge con el rápido crecimiento de los dispositivos portátiles, desarrollándose una fabricación masiva en poco tiempo. En ese entonces, esta tecnología presentaba mejores prestaciones y ventajas ambientales respecto a las baterías de NiCd, por lo que también comenzó el desarrollo de grandes baterías para ser utilizadas en la industria y en electromovilidad, tanto en vehículos eléctricos como en híbridos. Luego de la aparición de las baterías de litio-ion y debido a las ventajas que estas presentan para el desarrollo de baterías para BEV, actualmente las baterías de NiMH son utilizadas generalmente solo en HEV [9]. Las principales ventajas y desventajas que presentan las celdas de NiMH se listan en la Tabla 2.5.

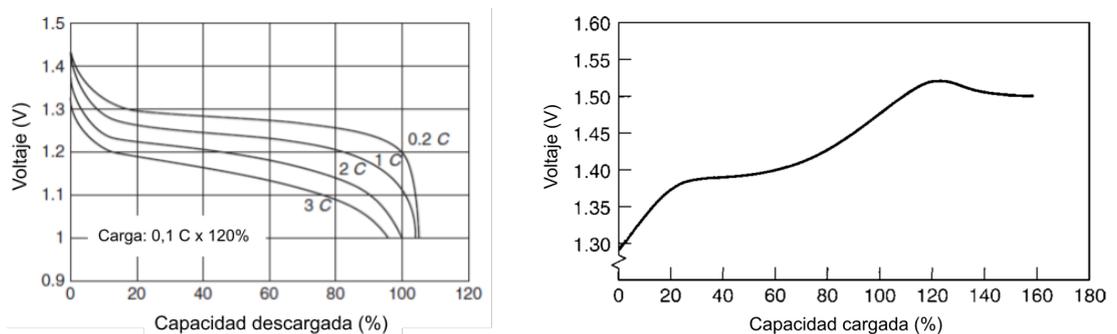
2.2.4.1. Composición y química de la celda de NiMH

Al igual que en la celda de NiCd, el cátodo de la celda de NiMH está formado por oxihidróxido de níquel, mientras que para constituir el ánodo se utiliza una aleación de hidruro metálico, la cual almacena hidrógeno y está compuesta por múltiples elementos químicos. La capacidad de la celda dependerá, entre otras cosas, de la familia de elementos que forman la aleación del electrodo negativo. Para el electrolito se utiliza una solución acuosa de hidróxido de potasio como componente principal, que provee una gran conductividad para un amplio rango de temperatura, mientras que para el separador se utiliza un compuesto de polipropileno y polietileno con una superficie especial que permite que se humecte con el electrolito [10].

2.2.4.2. Características eléctricas y de rendimiento de las celdas prismáticas de NiMH

Características de descarga

La tensión en vacío de las celdas de NiMH oscilan entre 1,25 V y 1,35 V, siendo la tensión nominal de descarga de 1,2 V y la tensión final típica de 1,0 V. En la Figura 2.8(a) se ilustran curvas típicas de descarga de celdas prismáticas de NiMH, donde se observa que cuánto menor sea la tasa de descarga, más plano será el perfil de descarga y la tensión se mantendrá constante en su valor nominal para una capacidad descargada mayor [9].



((a)) Variación de la capacidad de descarga en función de la tasa de corriente de descarga a 20 °C [9].

((b)) Evolución de la tensión de una celda de NiMH durante la carga [9].

Figura 2.8: Perfiles de descarga y carga de celdas de NiMH.

Resistencia interna

Debido al uso de placas delgadas y con gran área, las celdas de NiMH cuentan con una baja resistencia interna, la cual se mantiene prácticamente constante hasta un SOC del 20 % y luego comienza a aumentar rápidamente. Además, dicha resistencia interna aumenta a medida que desciende la temperatura y aumenta con el ciclado [9].

Inversión de polaridad durante la descarga

Un efecto que puede ocurrir en módulos multicelda de NiMH como los que constituyen las baterías de los HEV, es que alguna de las celdas sufra una inversión de polaridad tras ser descargada. Dicho fenómeno ocurre cuando alguna de las celdas que forma el módulo cuenta con una capacidad mucho menor que las restantes, por lo que en la descarga, dicha celda alcanzará la tensión de 0 V antes de que el resto lleguen a la tensión de cutoff (tensión a la que termina la descarga). Si en este caso la descarga continúa dicha celda se sobredescargará invirtiendo su polaridad, ocasionando un deterioro del módulo por acumulación de gases producidos en la celda. Para evitar esto, es recomendable que las celdas que forman un módulo cuenten con una capacidad muy similar [9].

Capítulo 2. Baterías

Ciclos de vida útil y autodescarga

Las celdas de NiMH soportan entre 500 y 1000 ciclos, cantidad que depende del diseño de la celda, de la temperatura de operación y de los requerimientos de la aplicación en la que se utiliza. En lo que refiere a la retención de carga, la misma está estrechamente ligada a la configuración de los electrodos y al material separador, así como también a la temperatura de almacenamiento. Existen materiales avanzados utilizados como separadores que han reducido la autodescarga desde un 30 % a menos de un 15 % por año. Para largos períodos de almacenamientos, puede ser necesario aplicar algunos ciclos de carga y descarga para que la celda recupere su totalidad de capacidad y potencia [9].

Efecto memoria

Cuando una celda de NiMH se descarga parcialmente hasta una tensión superior a la de cut-off durante varios ciclos y luego se intenta realizar una descarga completa, la celda sufrirá una disminución en la tensión de descarga y una pérdida de capacidad. Este fenómeno se conoce como “efecto memoria” y se debe a que durante las descargas parciales, los materiales que no fueron utilizados cambian sus características físicas aumentando la resistencia interna. Para recuperar las características de la celda, usualmente basta con realizar algunos ciclados cargando y descargando la celda completamente [9].

2.2.4.3. Carga de las baterías de NiMH

En el caso de las celdas de NiMH, la recarga toma gran relevancia para mantener una buena vida útil de la batería. Principalmente se debe tener cuidado de que la carga sea completa (para evitar el efecto memoria), se debe evitar la sobrecarga y evitar las altas temperaturas durante la carga, limitando adecuadamente la corriente de carga [9].

El método de carga más común para este tipo de baterías es el de corriente constante, vigilando que no ocurra un aumento excesivo en la temperatura de la celda debido a la disipación de calor por efecto Joule asociado a su resistencia interna. A medida que la celda va recibiendo carga, su tensión va aumentando progresivamente hasta que alcanza el 75 % u 80 % de la carga, momento en el que la tensión comienza a aumentar más rápidamente debido a la formación de oxígeno en el electrodo positivo. Esto puede observarse en la Figura 2.8(b) en la que se ilustra la evolución de la tensión de una celda cilíndrica de NiMH durante su carga. Para evitar daños en la batería, se suelen utilizar los siguientes métodos de control de carga [9]:

- **Carga cronometrada:** La carga se detiene luego de transcurrido un cierto tiempo de carga preestablecido. Debe usarse solo para bajas tasas de carga, ya que es difícil conocer de antemano la carga exacta que tiene la batería a la hora de cargarla y calcular el tiempo que debe ser cargada. En general se usa junto con otro método.
- **Caída de tensión:** Técnica que se basa en la caída de tensión que ocurre debido al sobretensión que se produce cuando la celda completa su carga. Se requiere que el controlador de carga sea muy sensible debido a que la caída de tensión luego de la sobrecarga es muy pequeña.

- **Meseta de tensión:** Se detiene la carga cuando la tensión en la celda alcanza su máximo y su pendiente es cero. Con este método el riesgo de sobrecarga es menor que en el método de detección de caída de tensión.
- **Corte por temperatura:** Se monitorea la temperatura de la celda y cuando llega al valor correspondiente al comienzo de la sobrecarga, la carga se detiene. Es un método que está muy influenciado por la temperatura ambiente, lo que lo hace poco preciso. Generalmente se utiliza en conjunto con otro método.
- **Corte por variación de temperatura:** Es un método análogo al anterior, pero observando la diferencia de temperatura con el ambiente. De esta forma es posible independizarse de la variación de la temperatura ambiente.
- **Tasa de aumento de temperatura:** Se observa la evolución de la temperatura en función del tiempo y se detiene la carga cuando la tasa de crecimiento de la temperatura en el tiempo supera cierto valor predeterminado. Prácticamente no tiene dependencia de la temperatura ambiente y es el método más apropiado para cuidar la vida útil de la batería.

Los métodos de carga más utilizados para las celdas de NiMH son los siguientes [9]:

- **Carga lenta:** Consiste en cargar la batería con una corriente constante de valor $0,1C$, limitando la carga por tiempo. La carga debe interrumpirse después de una carga de 150% (lo que equivale a un tiempo de carga aproximado de 15 h para una batería completamente descargada) y el rango de temperaturas adecuado para este método es de $5\text{ }^{\circ}C$ a $45\text{ }^{\circ}C$.
- **Carga rápida (4 a 5 h):** Se carga una batería completamente descargada con una corriente constante de $0,3C$, protegiendo la carga con corte por tiempo y sobretemperatura (generalmente se corta cuando se alcanzan los $55\text{ }^{\circ}C$ o $60\text{ }^{\circ}C$). Cargando la batería entonces a un 150% de su capacidad, se estima un tiempo de carga de 4,5 a 5 h y el rango de temperatura ambiente a la que puede trabajar la batería bajo estas condiciones es de $10\text{ }^{\circ}C$ a $45\text{ }^{\circ}C$. En celdas que no se encuentran totalmente descargadas se puede utilizar el método de corte por caída de tensión como protección adicional.
- **Carga rápida (1 h):** La carga se realiza a una corriente constante de valor $0,5C$ a $1C$. El método de control de detención de la carga debe ser muy preciso de manera de evitar la sobrecarga y no dañar la celda, por lo que se suele utilizar el corte por tasa de aumento de temperatura con un respaldo de corte térmico. Para módulos multicelda se recomienda usar el método de corte por caída de tensión ajustado en un valor de 10 a 15 mV por celda y el corte por temperatura en $60\text{ }^{\circ}C$.
- **Carga extremadamente lenta:** Se usa en aplicaciones que requieren contar con la batería con una carga completa. Se utiliza una corriente de carga constante con un valor entre $0,03C$ y $0,05C$. El rango de temperatura adecuado para la carga lenta está entre $10\text{ }^{\circ}C$ y $35\text{ }^{\circ}C$ y se puede utilizar cualquier método de control de carga.

Capítulo 2. Baterías

- **Carga en tres pasos:** Método adecuado para cargar rápidamente una celda de NiMH sin causar sobrecarga ni exceder los límites de temperatura. Los tres pasos son los siguientes:

1. Cargar con una corriente constante de 1C y utilizando el método de control de la tasa de aumento de temperatura o el de caída de tensión para detener la carga.
2. Realizar una carga adicional con una corriente de 0,1C, utilizando un temporizador ajustado entre 30 minutos y 1 hora como método de corte.
3. Mantener la carga mediante una carga de duración indefinida a una corriente de entre 0,05C y 0,02C, protegiendo la batería con un corte térmico ajustado en 60 °C.

2.2.5. Baterías secundarias de Litio-ion

El litio (Li) es un metal alcalino de muy baja densidad y buena conductividad eléctrica que desde la década del '60 se ha utilizado para la construcción de baterías. Al comienzo, para baterías primarias pero luego también para baterías secundarias a mediados de la década del '80 [12]. Sin embargo, hasta entonces dichas baterías contenían litio solo en alguno de sus electrodos y no fue hasta el año 1991, en el que Sony lanzó al mercado la primera batería recargable de litio-ion, que se comenzó a utilizar litio en ambos electrodos para la construcción de las baterías. A partir de allí, las baterías de litio-ion han sido utilizadas en numerosas aplicaciones, permitiendo entre otras cosas, el gran desarrollo de dispositivos electrónicos portátiles que ha ocurrido en las últimas décadas.

Ventajas como su elevada energía específica, elevada densidad de potencia, mínimo efecto memoria y baja tasa de autodescarga, han convertido a las celdas de litio-ion como la tecnología más utilizada en las baterías destinadas a electromovilidad, principalmente en todo tipo de BEV [9, 7, 12, 17]. Sin embargo, una desventaja de las mismas es que por razones de seguridad, las baterías de litio-ion requieren de un BMS para gestionar la carga y la descarga.

2.2.5.1. Principio de funcionamiento y estructura de la celda de litio-ion

Al igual que el resto, las celdas de litio-ion están compuestas por un ánodo, un cátodo, un electrolito y un separador. Los materiales utilizados tanto en el cátodo como en el ánodo contienen litio; por un lado el cátodo está constituido por un óxido metálico de litio, mientras que el ánodo está formado por carbono grafito con litio. Los materiales utilizados para la elaboración de ambos electrodos tienen una estructura atómica en capas que permite la inserción de los iones de litio en ella. El cátodo es adosado a un colector de corriente de aluminio y el ánodo a un colector de cobre. Dado que el litio es un metal alcalino que reacciona con el agua, no es posible utilizar electrolitos acuosos en la construcción de la celda, por lo que se utiliza sal de litio y solventes orgánicos como sustancia electrolítica. Por último, como material separador se utiliza una membrana micro-porosa, la cual evita el cortocircuito del cátodo con el ánodo, permitiendo el pasaje

2.2. Baterías secundarias

de los iones de litio a través de ella [9, 7, 12, 17]. Las celdas de litio-ion son fabricadas con diferentes formas y configuraciones, como por ejemplo diseños de celda cilíndrica o celda prismática (con capas enrolladas o apiladas) y celdas conocidas como “pouch”, debido a que los materiales son encapsulados en una bolsa aluminizada y flexible [9].

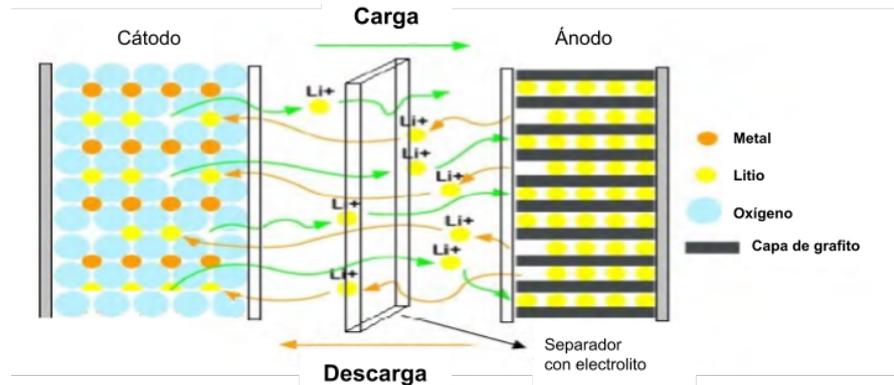


Figura 2.9: Fenómeno ocurrido en una celda de litio-ion durante la carga y descarga [17].

Durante la descarga de la celda, los iones de litio viajan desde el ánodo hasta el cátodo mediante el electrolito y son insertados en el espacio intersticial existente entre la estructura de capas del mismo, mientras que durante la carga, los iones viajan desde el cátodo y son insertados en el ánodo. De esta manera, los iones de litio fluyen de un lado a otro entre ambos electrodos durante el ciclado de la batería [9, 7, 12, 17, 18]. En la Figura 2.9 se representa el fenómeno descrito que ocurre durante la carga y descarga de la celda.

2.2.5.2. Ventajas y desventajas de las celdas de litio-ion

Las principales ventajas de las celdas de iones de litio, en relación con otros tipos de celdas se resumen a continuación [9]:

- **Alta energía específica:** debido al reducido peso del litio y a la elevada capacidad energética, las celdas de litio-ion pueden entregar una elevada cantidad de energía por unidad de masa, llegando a valores de 240 Wh/kg.
- **Alta densidad energética:** También debido a la baja densidad del litio, las celdas de litio-ion tienen una elevada cantidad de energía por unidad de volumen, llegando a valores de 640 Wh/l.
- **Baja tasa de autodescarga:** Tienen una pérdida de carga que va desde 2 a 8% por mes de almacenamiento.
- **Ciclo de vida prolongado:** Más de 1000 ciclos de uso.
- **Amplio rango de temperatura de funcionamiento:** Generalmente se pueden cargar sin problemas para temperaturas desde 0 °C a 45 °C y descargar desde -40 °C y 65 °C.

Capítulo 2. Baterías

- **Elevado nivel de tensión:** Cada celda de litio-ion tiene una tensión nominal que va desde los 2,5 V hasta los 4,3 V, lo que permite utilizar menos celdas de litio-ion para alcanzar un cierto nivel de tensión que si se utilizaran celdas de NiMH por ejemplo, las cuales tienen una tensión nominal de aproximadamente 1,2 V.

Por otra parte, las celdas de litio-ion también tienen desventajas respecto a las otras tecnologías, las que se resumen a continuación [9]:

- **Daño por sobrecarga o sobredescarga:** Las celdas de litio-ion se pueden dañar si son descargadas por debajo de 2V y pueden generar gases que causen su explosión cuando son sobrecargadas, ya que no tienen un mecanismo intrínseco en su química que detenga el proceso de sobrecarga.
- **Seguridad:** Debido a lo mencionado en el punto anterior, las baterías de litio-ion requieren el uso de circuitos de gestión de control de carga y descarga o BMS para asegurar el funcionamiento de forma segura.
- **Efecto ante altas y bajas temperaturas:** Pueden tener una pérdida permanente de capacidad a temperaturas superiores a 65 °C, pero a una velocidad menor que en otras tecnologías como NiMH por ejemplo. Además también se pueden volver inseguras si son cargadas de manera rápida a temperaturas por debajo de los 0 °C.

2.2.5.3. Tipos de baterías de litio-ion

El cátodo de las celdas de litio-ion puede estar formado por diferentes tipos de materiales, los que le brindan a la celda diferentes características. Algunos de los tipos de cátodos más relevantes son [9, 7, 12, 17, 18]:

- **LCO:** Litio-óxido de cobalto (LiCoO_2)
- **LMN:** Litio-óxido de manganeso (LiMn_2O_4)
- **LFP:** Litio-hierro fosfato (LiFePO_4)
- **NMC:** Litio-óxido de níquel-manganeso-cobalto (LiNiMnCoO_2)
- **NCA:** Litio-óxido de níquel-cobalto-aluminio (LiNiCoAlO_2)
- **LTO:** Titanato de litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

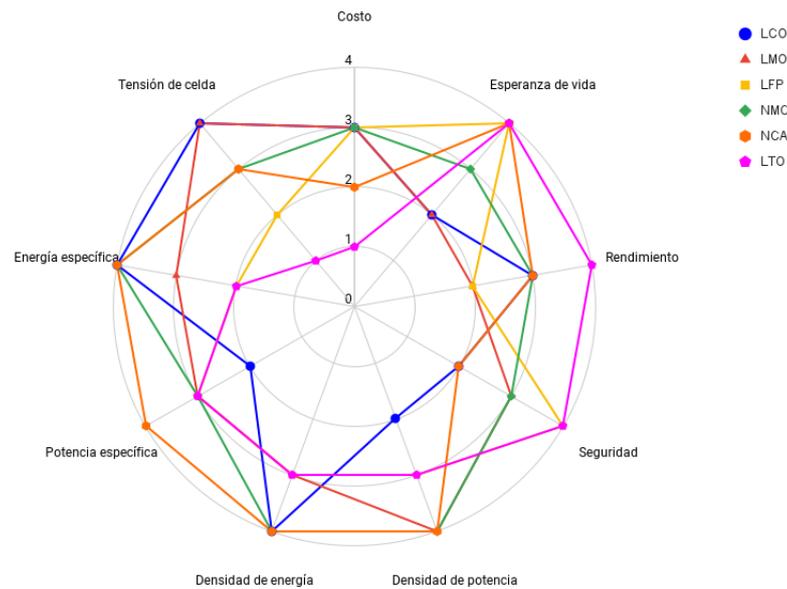


Figura 2.10: Comparación de las características de las diferentes celdas de litio-ion. Elaboración propia en base a datos extraídos de [17].

En la Figura 2.10 se comparan en una escala del 1 al 4 las principales características de las diferentes celdas de litio, observándose que la batería con mejor rendimiento, seguridad y con menor costo por kWh es la LTO, pero es la que cuenta con menor densidad de energía y energía específica. Por otra parte, la batería de NCA es la que cuenta con los parámetros de energía y de potencia más altos, pero junto con la LCO es la menos segura. Si bien las prestaciones de potencia y energía de las celdas de LFP no son las mejores dentro de las celdas de litio-ion, son aceptables y cuentan con un costo relativamente adecuado, lo que las han convertido en los últimos años en uno de los tipos de baterías más utilizados en electromovilidad. Además cuenta con la química térmicamente más estable y por lo tanto constituyen la opción más segura respecto al resto de químicas de celdas de litio-ion, lo que permite que LFP sea más tolerante a sobrecargas y a operar en altas temperaturas [7].

2.2.5.4. Características eléctricas y de rendimiento de las celdas de litio-ion

Características de descarga

Las baterías de litio-ion presentan perfiles de descarga planos con tensiones de descarga que van desde los 2,5 V hasta 4,3 V dependiendo de la química, lo que es aproximadamente el triple que en el caso de las baterías de NiCd o de NiMH [9]. En la Figura 2.11 se ilustra el perfil de descarga de una celda LFP para tasas de descarga que van desde 1 A hasta 40 A y se observa que la tensión se mantiene constante casi hasta la totalidad de la capacidad para todas las tasas de descarga.

Capítulo 2. Baterías

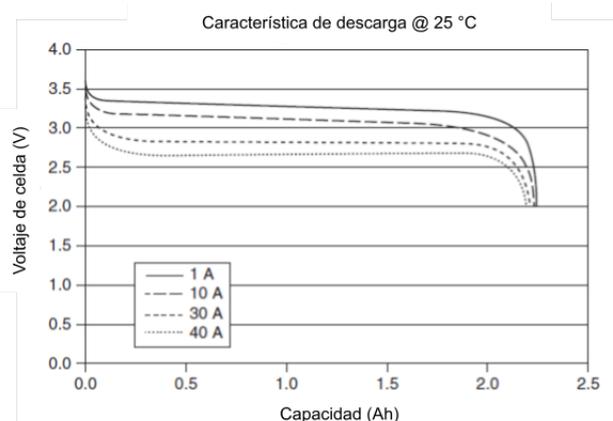


Figura 2.11: Tensión de descarga frente a capacidad para una celda de grafito/LiFePO₄ modelo ANR26650M1A de A123 Systems descargada usando varias tasas de corriente [9].

Seguridad

Han ocurrido numerosos incidentes de seguridad relacionados con baterías de litio-ion, debidos a que los materiales presentes en los electrodos reaccionan con el electrolito a elevadas temperaturas (a partir de los 80 °C). Para evitar estos problemas se han elaborado diferentes documentos y estándares para establecer criterios y ensayos de seguridad para las baterías de litio-ion. Algunos de los estándares que determinan los ensayos y requerimientos de seguridad que deben cumplir las baterías para ser certificadas son [9]:

- UL 1642, “Standard for Li-ion Batteries”.
- IEC 62133, “Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or Other Non-acid Electrolytes”.
- IEEE 1625, “Standard for Rechargeable Batteries for Multi-Cell Mobile Computing Devices”.
- IEEE 1725, “Standard for Rechargeable Batteries for Cellular Telephones”.

La seguridad química de la celda queda determinada por el tipo de electrodos que se utilizan y por el diseño de la misma, mientras que la seguridad eléctrica se logra con la aislación de los contactos y componentes eléctricos de la batería. En el caso de los vehículos eléctricos, las baterías cuentan con una caja especial que monitorea y desconecta la batería en caso de choque [12].

Zona de operación segura (SOA)

Se define zona de operación segura como un conjunto de condiciones de corriente, tensión y temperatura bajo las cuales una batería puede operar sin sufrir daño ni provocar problemas de seguridad. Para ilustrar la importancia de la operación dentro de la zona segura de las baterías de litio, en la Figura 2.12 se presentan distintos tipos de falla en función de una zona de operación segura determinada por la tensión y temperatura [19].

Establecer o definir la SOA implica asignar límites para la temperatura, tensión y corriente durante la carga y descarga. Para esto, siempre se deben seguir las recomendaciones que indique el fabricante en la hoja de datos de la batería. No se debe considerar solamente la batería al momento de definir la SOA, sino también todos los otros componentes incluidos en el sistema (cables, fusibles, relés, protecciones del cargador o de la carga, etc) [19], tal como se muestra en la Figura 2.12 .

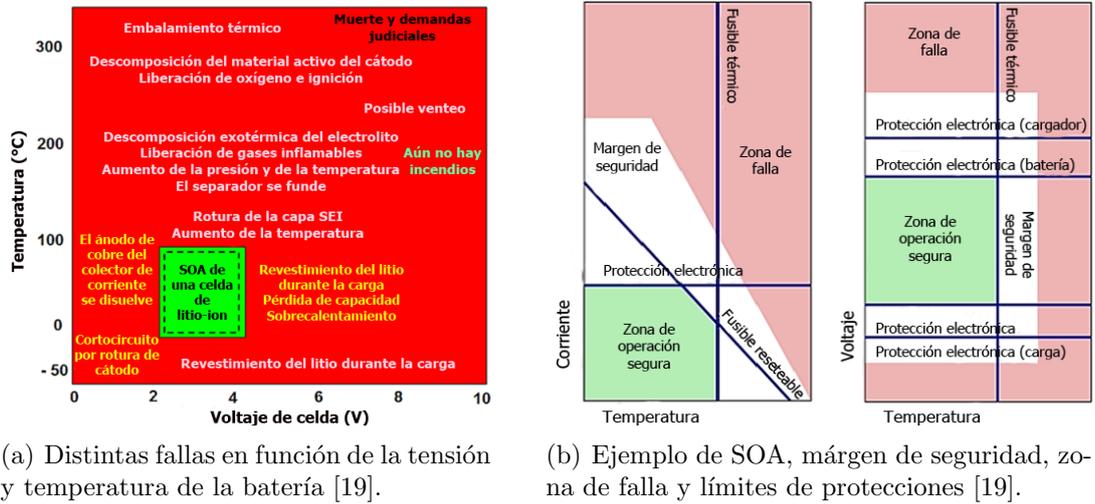


Figura 2.12: Zona de operación segura (SOA) de una celda de litio-ion.

Tiempo de vida

La capacidad de la celda va disminuyendo con el paso del tiempo y la resistencia interna va aumentando, lo que causa que también vaya disminuyendo la capacidad de potencia de la batería. La impedancia interna de las celdas depende del tiempo de descarga o carga, de la corriente y del SOC, pero la temperatura de operación juega un rol crucial en el envejecimiento de la celda, ya que por ejemplo algunas celdas pueden proporcionar más del 95 % de su capacidad después de 1000 ciclos a una temperatura de funcionamiento de 25 °C pero la capacidad de retención disminuye al 75 % después de 1000 ciclos cuando la celda trabajó a 60 °C [9].

2.2.5.5. Carga de baterías de litio-ion

Las celdas de iones de litio se cargan típicamente usando un método de carga CC-CV [12] que consiste en un primer paso de carga a corriente constante (CC), en el que la tensión de la celda va aumentando a medida que la misma acepta la carga. Cuando la celda alcanza un cierto valor de tensión, continúa la carga manteniendo dicha tensión constante (CV) y la corriente se va reduciendo a medida que la carga se va completando. La carga culmina cuando se ha sobrepasado un tiempo preestablecido para la carga o cuando la corriente alcanza un cierto umbral prefijado [17]. Cabe observar que para cargas a tasas bajas de corriente, como por ejemplo a C/5, el método de carga CC-CV

Capítulo 2. Baterías

puede ser sustituido por un método de carga a corriente constante (CC), debido a que la celda está completamente cargada cuando se alcanza el límite de voltaje superior [9].

La tensión máxima que alcanza la celda durante la etapa de carga a CC depende de la química de la celda y en general la tensión de corte afecta el rendimiento de la celda, ya que si se cargan hasta una tensión mayor que la recomendada, estas pueden entregar una capacidad mayor a costas de reducir su ciclo de vida y seguridad de operación [12]. Para garantizar seguridad y evitar el deterioro de las celdas, la carga de las baterías de litio-ion se gestionan mediante un BMS que monitoriza los parámetros de cada celda. En la Figura 2.13 se observa el perfil de carga de una batería de litio-ion que es cargada con CC hasta que alcanza una tensión de aproximadamente 4,2 V y luego se continúa la carga a CV hasta que la corriente se hace despreciable.

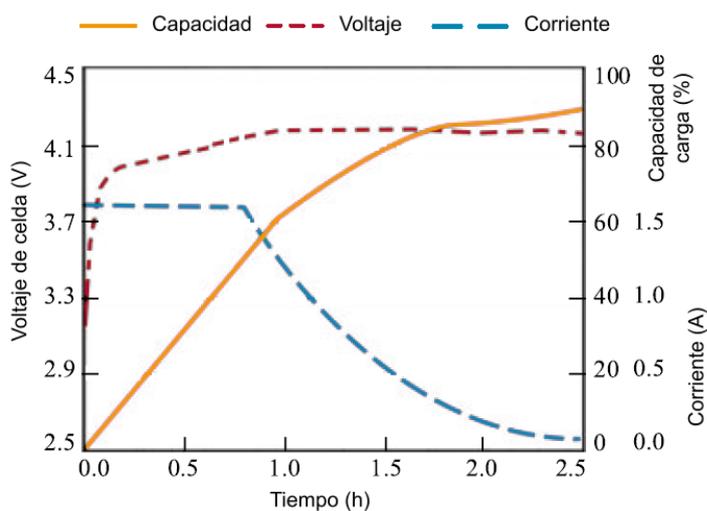


Figura 2.13: Perfil de carga CC-CV para una celda de litio-ion [9].

Capítulo 3

BMS

Si bien las baterías de litio ion presentan mejores características de rendimiento respecto a otras tecnologías (ver Sección 2.2.5.2), estas requieren de un mayor control de su operación. Como se detalló en la Sección 2.2.5.4, las baterías de iones de litio requieren trabajar en su zona de operación segura, con el fin de mantener su estabilidad química y térmica, ya que fuera de los rangos de temperatura de funcionamiento, el litio reacciona desencadenando un incendio de la batería e incluso explosión. Para evitar esto, se utilizan dispositivos denominados “Sistemas de gestión de baterías” capaces de monitorear corrientes, tensiones y temperaturas de operación de las baterías de litio.

Un BMS (Battery Management System) es un dispositivo que tiene como objetivo proteger la batería, de forma de evitar posibles accidentes tales como chispazos, humaredas, incendio o explosiones. Es un elemento indispensable para garantizar seguridad durante el uso de la batería, además de alargar su vida útil. Para esto, un BMS debe ser capaz de al menos cumplir los siguientes puntos [20]:

- Evitar que la tensión de cualquier celda exceda su valor límite, ya sea deteniendo por sí mismo la carga o solicitando a un controlador que la detenga.
- Prevenir que la temperatura de cualquier celda exceda un cierto límite, deteniendo la corriente de la batería directamente, solicitando que se detenga o solicitando que se active el sistema de enfriamiento.
- Evitar que la tensión de cualquier celda caiga por debajo de sus límites operacionales, deteniendo la corriente de descarga o solicitando que se detenga.
- Evitar que la corriente de carga exceda cierto límite, ya sea deteniendo o reduciendo la corriente directamente o solicitando al controlador que lo haga.
- Evitar que la corriente de descarga supere un determinado límite, análogamente a como se describe en el punto anterior.

3.1. Funciones de los BMS

Para asegurar el correcto funcionamiento de la batería, los BMS realizan las funciones que se listan a continuación [20].

3.1.1. Función de medida

Si bien un dispositivo BMS se puede implementar con diversas tecnologías, actualmente en el mercado la mayoría son sistemas digitales. Los cuales, a diferencia de los analógicos poseen una capacidad de manejo de la información mayor, pudiendo realizar cálculos más complejos, así como también almacenar y transmitir datos de interés.

La primera función de un BMS digital sofisticado es recopilar datos sobre la batería (un BMS analógico simple no incluye esta función). Las medidas que el BMS puede realizar son: tensión de las celdas (a veces incluso la del pack de baterías completo), temperatura de las celdas o de la batería y corriente del pack [20]. La velocidad de las lecturas depende de la aplicación, por ejemplo para una aplicación de respaldo de energía (UPS), entre una medida por minuto o cada 10 s es suficiente. En aplicaciones donde la corriente varía rápidamente, como en electromovilidad, se necesita de al menos una lectura por segundo [20].

3.1.2. Función de protección

En función de algunas condiciones de la batería (tensión de las celdas, corriente del pack, temperatura de celdas o del pack), el BMS puede conocer el estado de la batería y con ello lograr que las celdas trabajen siempre dentro de su SOA, solicitando interrumpir o reducir la corriente [20]. Los valores límites de funcionamiento de la celda (tensión, corriente y temperatura de operación) se configuran en el BMS en función de la tecnología con la que se esté trabajando.

3.1.3. Función de balanceo

No hay dos celdas exactamente iguales, así sean fabricadas bajo las mismas condiciones y del mismo lote pueden tener pequeñas diferencias de funcionamiento entre sí. Además, dependiendo de como estén montadas las celdas en el vehículo, pueden tener diferentes temperaturas de operación. La autodescarga de las baterías de iones de litio depende de la temperatura, por lo que las diferencias entre celdas aumentan con los ciclos y envejecimiento, provocando un desbalance del SOC de las mismas [20].

En una conexión en serie, todas las celdas están sometidas a la misma corriente, lo que implica que durante el proceso de carga, la celda con mayor SOC alcanzará su tensión máxima antes que el resto, causando que no todas las celdas lleguen a cargarse completamente. Análogamente, durante la descarga, la celda con el SOC más bajo alcanzará su mínima tensión de descarga antes que el resto, impidiendo que todas las celdas entreguen el total de su capacidad. Si se continúa cargando o descargando en esas condiciones, se sobrecargará la celda con mayor SOC o sobredescargará la que tenga el menor SOC. En este caso, la capacidad útil será menor que la nominal, ya que tanto en la carga como en la descarga no todas las celdas absorben o entregan respectivamente

su capacidad nominal. Por lo tanto, para maximizar la capacidad de la batería, se deben balancear las celdas de forma de que todas cuenten con el mismo SOC en algún punto del ciclo [21].

Los métodos de balanceo pueden clasificarse en pasivos o activos. El balanceo pasivo consiste en extraer energía de la celda más cargada y disiparla en forma de calor (en un elemento resistivo pasivo) hasta que el SOC de las celdas con mayor carga sea igual que el de las de menor carga. Por otro lado, el balanceo activo extrae energía de la celda con mayor SOC, pero no la disipa sino que la utiliza para cargar la celda con menor SOC. Este tipo de balanceo puede además clasificarse en dos tipos dependiendo si utiliza capacitores o convertidores DC/DC. En la Figura 3.1 se muestra un esquema de los distintos tipos de balanceo [22].

Los capacitores en los circuitos de balanceo activo se utilizan con el fin de absorber energía de la celda con mayor tensión, que posteriormente es descargada en las celdas con menor tensión. Por otro lado, en los circuitos de balanceo basados en convertidores DC/DC, el pack de baterías formado por las celdas es la fuente de energía para el convertidor, el cual cargará las celdas que corresponda para mantener un nivel de tensión estable. Los circuitos de estos convertidores pueden contar o no con aislación galvánica. Los que tienen aislación galvánica utilizan transformadores de varios arrollamientos, múltiples transformadores o un único transformador conmutado y están basados en topologías ampliamente usadas en la electrónica de potencia. En cambio, los circuitos con convertidores sin aislación galvánica están basados en convertidores como el buck, boost, buck-boost, o puente completo [23].

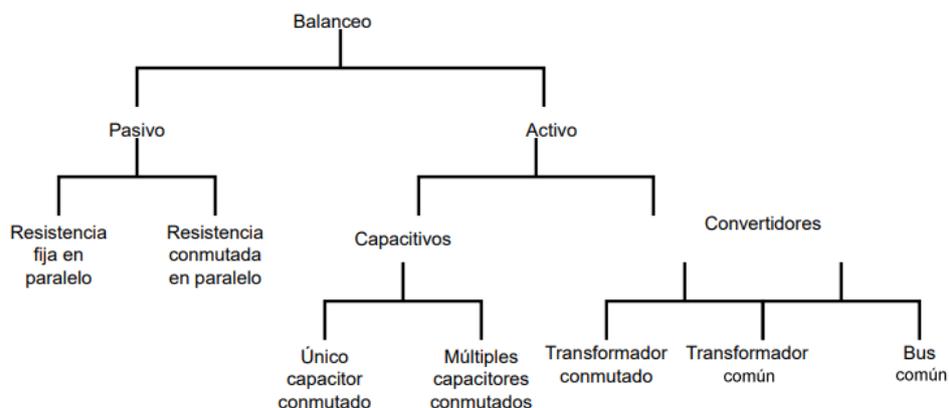


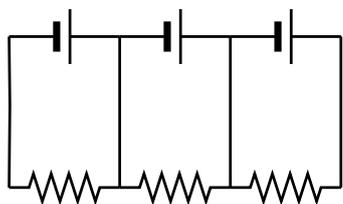
Figura 3.1: Esquema de métodos de balanceo [22].

3.1.3.1. Métodos de balanceo pasivo

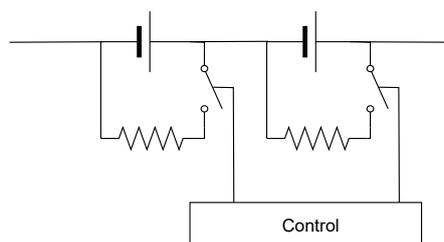
A continuación se presentan dos tipos de circuitos con balanceo pasivo.

- **Resistencia fija en paralelo:**

El método más simple de balanceo consiste en disipar la energía de la celda en una resistencia en paralelo con la misma, como se muestra en la Figura 3.2(a). En general, las celdas con mayor SOC tendrán mayor tensión, lo que deriva en una



((a)) Circuito de balanceo pasivo con resistencia en paralelo.



((b)) Circuito de balanceo pasivo con resistencia en paralelo conmutada.

Figura 3.2: Circuitos de balanceo pasivo con resistencias. Elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].

tasa de descarga mayor que el resto de las celdas. Con el transcurso del tiempo, las celdas de la batería tienden a un estado de equilibrio donde las tensiones de las mismas son iguales [22].

Este método presenta tiempos de equilibrios largos y es muy ineficiente, pero en contra partida, es un método muy sencillo ya que no requiere de una electrónica avanzada de control y medida. A su vez, al permanecer indefinidamente el elemento de descarga conectado en paralelo con la celda, ésta siempre tendrá una corriente de descarga, aumentando así la tasa de autodescarga que naturalmente poseen las baterías.

- **Resistencia conmutada en paralelo:**

Una variación del circuito anterior es utilizar un transistor que funcione como llave controlada por el BMS, de forma de habilitar o deshabilitar el balanceo en determinada celda. En la Figura 3.2(b) se ilustra este circuito, tomando como ejemplo dos celdas.

Este circuito posee un sistema de control más complejo que el caso anterior, ya que se debe incluir la electrónica necesaria para controlar los diversos componentes. Gracias a esto, el BMS puede controlar las llaves para cerrar las que se conectan a las celdas con mayor SOC y dejar abiertas las de menor SOC, evitando de esta forma una descarga continua de las celdas [22].

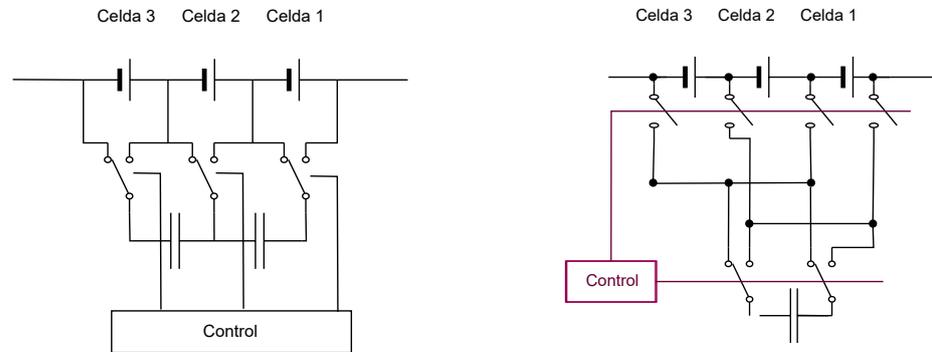
3.1.3.2. Métodos de balanceo activo

Acorde a la Figura 3.1, a continuación se describen las diversas configuraciones utilizadas para implementar un control activo del balance de carga.

- **Múltiples capacitores conmutados:**

El esquemático de un circuito de balanceo activo con múltiples capacitores conmutados se muestra en la Figura 3.3(a). En el mismo, los transistores que operan

como llave se mueven al unísono entre la posición de izquierda y derecha, es decir que todas las llaves se colocan en la misma posición en cada conmutación, lo que provoca que se pueda transferir carga únicamente entre celdas contiguas [22].



((a)) Circuito de balanceo activo con múltiples capacitores conmutados.

((b)) Circuito de balanceo activo con único capacitor.

Figura 3.3: Circuitos de balanceo activo con capacitores. Elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].

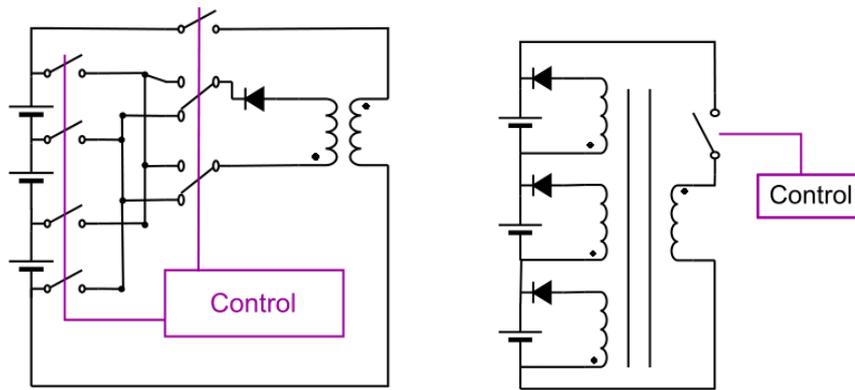
Una desventaja de este circuito es que puede demorar mucho tiempo en balancear en el caso de que la celda con mayor tensión esté en el extremo opuesto de la de menor tensión, ya que la carga tiene que atravesar todas las celdas y capacitores intermedios para llegar a la de menor tensión.

■ Único capacitor conmutado:

Otra opción de circuito utilizando capacitores es el que se muestra en la Figura 3.3(b). En este caso, se cuenta con un único capacitor y controlando las llaves se puede conectar con cualquiera de las celdas. Una ventaja respecto al método anterior (múltiples capacitores), es que se puede conectar el capacitor a la celda con mayor tensión y luego a la de menor tensión, sin necesidad de que la carga circule por celdas intermedias [22].

■ Transformador conmutado:

En lugar de capacitores para transferir energía, se puede utilizar un transformador como se muestra en la Figura 3.4(a). El bobinado primario del transformador se alimenta directamente de bornes de la batería multicelda, mientras que el secundario, con el uso de llaves implementadas con transistores, se conecta en bornes de cualquier celda [24].



((a)) Circuito de balanceo activo con transformador conmutado.

((b)) Circuito de balanceo activo con transformador común.

Figura 3.4: Circuitos de balanceo activo con transformadores. Elaboración propia en base a los circuitos [22].

El circuito implementado en este caso, corresponde a un convertidor DC/DC del tipo flyback, por lo que conmutando la llave que conecta el primario con los bornes de la batería se almacena energía en el flujo magnético del núcleo del transformador, que posteriormente es descargado en bornes de la celda a cargar. La topología flyback implica un diodo en el secundario del transformador que impone un sentido de corriente, por lo tanto la descarga eléctrica producto de la energía almacenada en el campo magnético es descargada únicamente por el secundario.

■ **Transformador común:**

La transferencia de energía se da igual que en el caso anterior. La topología es similar a un flyback de múltiples secundarios. Un esquemático de este circuito se muestra en la Figura 3.4(b) [24]. Al descargarse la energía almacenada en el núcleo entre los múltiples arrollamientos secundarios y al depender la corriente de descarga de la tensión en bornes de la celda, la celda con menor tensión recibirá la mayor transferencia de energía.

■ **Bus común:**

Este tipo de circuitos utiliza un convertidor DC/DC aislado por celda, como se muestra en la Figura 3.5. La entrada del convertidor se conecta a cada celda, y la salida a un bus común de baja tensión. Este bus común debe ser capaz de almacenar energía, por lo que debe ser capacitivo [22].

Como ejemplo, se supone que el bus común se diseña de forma de operar entre 9 V y 14 V. Luego se crea una “métrica de balanceo”, es decir una ecuación que permite convertir los objetivos de balanceo a un nivel de tensión entre 9 V y 14 V. Una de las métricas más simples está basada en el SOC. Esta métrica trabaja de la siguiente manera: si una celda tiene un SOC de 100 %, al aplicar la métrica

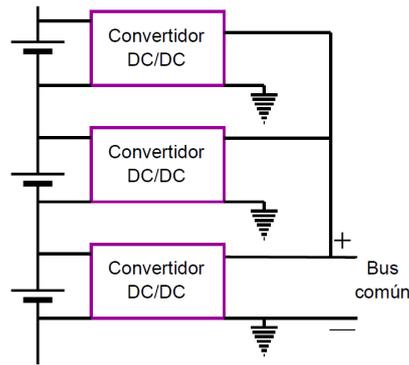


Figura 3.5: Circuito de balanceo activo con bus común. Fuente: elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].

de balanceo se obtienen 14 V. Como caso contrario, si una celda tiene un SOC del 0%, luego de aplicar la métrica se obtiene un equivalente de 9 V [22].

El principio de operación es el siguiente: si el valor de la métrica de una celda es menor que la tensión del bus compartido, implica que la celda tiene un SOC demasiado bajo. Por lo tanto, se utiliza el conversor DC/DC conectado a esa celda para extraer energía del bus de baja tensión, cargando la celda. Esto produce que el bus común se descargue y disminuya su tensión. Considerar ahora el caso opuesto en el que la métrica de una celda es mayor que la tensión del bus compartido, por lo que la celda tiene un SOC demasiado alto. A diferencia del caso anterior, ahora el convertidor DC/DC se utiliza para extraer energía de la celda y entregarla al bus común, el cual se carga y aumenta su tensión [22].

Como conclusión, a medida que este circuito opera, la tensión del bus tiende a acercarse a la tensión promedio de las celdas, ya que las celdas con mayor SOC lo cargan (aumenta la tensión), mientras que las de menor tensión lo descargan (disminuye la tensión). De esta forma se logra balancear las celdas, entregando energía a las menos cargadas, y descargando las que tienen mayor SOC.

En este ejemplo se presentó una métrica en base al SOC, pero también podría ser en base a la tensión de las celdas, siendo la explicación del funcionamiento análoga a la ya mencionada. Además, se pueden utilizar métricas más complejas, por ejemplo tomando en cuenta el SOH de la celda al momento de inyectar carga, obligando a las celdas más sanas a ser cicladas más profundamente que las celdas más degradadas. El resultado es un banco con mejores características de degradación y mayor vida útil [25].

3.1.4. Función de evaluación y gestión térmica

A partir de los datos medidos, el BMS puede calcular ciertos parámetros de la batería como por ejemplo el SOC y el SOH. En general, los BMS analógicos no cuentan con ninguna de estas funciones y la mayoría de los BMS digitales solo implementan la función SOC, solo los BMS digitales más sofisticados estiman o calculan todos los parámetros.

Las funciones de evaluación no son para la protección de la batería, sino que son de carácter informativo para el usuario, para que el mismo pueda saber las condiciones en las que esta se encuentra [20].

El parámetro más importante de los mencionados anteriormente es el SOC, el cual no solamente es útil para planificar las paradas necesarias para hacer un viaje en un vehículo, sino también para controlar los frenados regenerativos. En un frenado regenerativo, la energía cinética utilizada en la frenada se utiliza para cargar la batería. Si el SOC ya está a un nivel alto, no se debería permitir un frenado regenerativo, mientras que en caso contrario sí. Todos los parámetros son estimaciones indirectas por lo que pueden haber grandes discrepancias entre la realidad y lo calculado o estimado [20].

Respecto a la gestión térmica, en general las celdas de iones de litio tienen mayor vida útil si son mantenidas en una temperatura entre 10 °C y 40 °C, pero los rangos de operación en las aplicaciones automotrices oscilan entre -40 °C a 85 °C, por lo que se torna necesario disponer de un control de temperatura activo. Para cumplir este cometido, los BMS pueden controlar la temperatura mediante el accionamiento de algún mecanismo de refrigeración forzada o calefacción [20].

3.1.4.1. Estimación del estado de carga SOC y estado de salud SOH

Dos métodos comúnmente utilizados para la estimación del SOC son la conversión de tensión y el recuento de Coulombs o integración de corriente. Ambos métodos son útiles, pero únicamente uno es incapaz de estimar el SOC en una batería de litio. Combinándolos, se puede obtener una mejor estimación del SOC.

■ Conversión de tensión

Existen químicas en las que el comportamiento de la tensión durante la operación de la celda es lineal al estado de carga de la celda, pudiendo entonces aproximar mediante la medida de tensión el SOC [20]. Por lo general no es un método apropiado, ya que la tensión de la celda es muy susceptible a diversos factores como el número de ciclos que tenga la celda, la temperatura y la corriente de carga o descarga.

En la Figura 2.2.1.1 del Capítulo 2 se puede observar que en la descarga de celdas de litio, la tensión permanece constante durante la mayor parte del SOC. Esto implica que durante un rango amplio de carga, la conversión de tensión no es un método de estimación confiable dada la poca variación. Sin embargo, la tensión cambia significativamente en ambos extremos de la curva. Por lo tanto, la conversión de tensión se puede usar para estimar el SOC de una celda litio cuando está casi completamente cargada o descargada [20].

■ Integración de corriente

La integración de la corriente entrante o saliente de una batería da el valor relativo de su carga. Se habla en términos relativos, ya que como integral definida, el conteo de Coulombs necesita un punto inicial. Si se conoce la carga inicial de la batería, a partir de ese momento se puede utilizar el recuento de Coulombs para calcular la carga. La integración de corriente puede ser muy precisa, pero tiene dos limitaciones fundamentales [20]:

- La corriente de fugas dentro de una celda (disipación por efecto Joule principalmente) es contada como corriente de carga pero esta no es efectivamente almacenada.
 - Los offsets en la medición de la corriente de la batería darán como resultado que el SOC suba (o disminuya) con el tiempo, ya que como en cualquier integral, una constante distinta de cero en la variable que se integra implica que la integración en el tiempo crezca linealmente.
- **Combinación de ambos métodos** La integración de corriente puede ser utilizada para estimar el SOC, siempre y cuando haya una forma de calibrarlo en algún momento, y lo suficientemente seguido como para evitar que los offsets en la medición afecten la estimación (haciendo que la integral aumente o disminuya con el tiempo). La conversión de tensión cumple la función de calibrar el valor del SOC, cuando el nivel de carga es cercano a los extremos (cargada o descargada). Combinando estas dos técnicas, se puede obtener una estimación razonable del SOC [20].

Por otra parte, el SOH describe las condiciones físicas y electroquímicas de la batería y a diferencia del SOC, no hay una definición única del mismo. El SOH podría definirse como un parámetro que refleja las condiciones de salud de una batería y su habilidad para cumplir con un rendimiento especificado en comparación a lo declarado por el fabricante [26]. Dos parámetros que pueden usarse para calcular un valor de SOH son el incremento de la resistencia interna real con respecto a la nominal y la disminución de la capacidad real con respecto a la nominal.

3.1.5. Función de comunicación

Generalmente en los sistemas donde son instalados los packs de baterías o particularmente en los vehículos, se debe disponer de un sistema inteligente de gestión y protección. Se vuelve imprescindible entonces, que el BMS interactúe con el vehículo intercambiando datos de los parámetros eléctricos y físicos con el resto del sistema.

El Controlador de Red de Zona o CAN por sus siglas en inglés, es el estándar más utilizado en los vehículos eléctricos e industria en la actualidad. Este protocolo está diseñado para proveer comunicaciones confiables en entornos exigentes con niveles altos de ruido electromagnético [22]. En el estándar se especifican las capas intermedias, sobre cómo interpretar el flujo digital (capas de objeto y transferencia), pero no se definen las capas externas, como son la capa de aplicación (qué significan los datos) y la capa física (cómo se transmite el flujo digital). No obstante, se ha estandarizado en la industria, cómo implementar las capas restantes [20].

Para explicar el protocolo se tomó como ejemplo el BMS que fue adquirido para este proyecto, el cual se describe en la Sección 7.3.2. Según el manual de comunicación CAN [27] brindado por el fabricante, el protocolo utilizado por la unidad adquirida se implementa bajo el estándar CAN 2.0 con tasas de transferencia de datos de hasta 250 kbps. La comunicación es unidireccional, lo que implica que el BMS solo emite datos por dicho puerto y no recibe ningún tipo de comando externo.

Capítulo 3. BMS

CAN_ID								DATA			
									...		
FUNC				SA				DATA			
3				8				0 a 64			

Tabla 3.1: Formato de datos de transmisión en protocolo CAN 2.0 del fabricante Young Power Technology Limited [27].

Ítem	Nombre	Descripción	FUNC	ID	Emisor	Ciclo del mensaje
1	BATT_ST	Información del estado de la batería	0x02	0x02F4	BMS	20 ms
2	CELL_VOLT	Tensión de celda	0x04	0x02F4	BMS	100 ms
3	CELL_TEMP	Temperatura de celda	0x05	0x02F4	BMS	100 ms
4	ALM_INFO	Mensajes de alarma	0x07	0x02F4	BMS	100 ms

Tabla 3.2: Tabla de grupos de parámetros que se pueden enviar como DATA [27].

El formato de datos enviados se define en la Tabla 3.1, donde FUNC indica qué tipo de parámetros se está enviando de la batería, SA es la dirección de origen, que representa la dirección del BMS, la cual está fijada de fábrica en 0xF4 y DATA es la información enviada correspondiente a la FUNC, la longitud de esta palabra en el marco de este protocolo es 8 bytes (64 bits).

En la Tabla 3.2, se describe qué datos de la batería envía el BMS para cada FUNC. La función BATT_ST, proporciona información de tensión, corriente, SOC y tiempo de descarga general de la batería. La función CELL_VOLT envía las tensiones máximas, mínimas y promedio de las celdas, indicando qué número de celda posee la tensión máxima y mínima. Para ambas funciones los datos se envían en cadena dentro de los bits de DATA. La función CELL_TEMP, análogamente a CELL_VOLT envía los máximos, mínimos y promedios de temperaturas detectadas entre celdas, con la diferencia de que el BMS posee solo dos sondas de medida de temperatura y los canales de medida de tensión de las celdas pueden ser hasta 24. Por último, la función ALARM_INFO es activada si se dispara una alarma. Las funciones anteriores envían datos cíclicamente, informando al exterior el estado de la batería. En caso de activarse en simultáneo más de una alarma, el instrumento posee la capacidad de desplegar hasta cuatro alarmas en el mismo bucle de la función, ponderando las prioridades del 1 al 3.

Capítulo 4

Baterías a estudiar

Como se ha dado a conocer a lo largo del documento, la finalidad de este proyecto es la reutilización de baterías provenientes de electromovilidad, por lo tanto es evidente considerar que un punto crítico del proyecto fue disponer de dichas baterías para su estudio. Para esto, se contactó a 20 empresas importadoras de vehículos híbridos y/o eléctricos de Uruguay, informando acerca del proyecto y consultando sobre la disponibilidad de contar con baterías en desuso que estuvieran dispuestas a donar para ser objeto de estudio. De las mismas, menos de la mitad respondieron la consulta y únicamente la empresa Mobility expresó estar dispuesta a colaborar con el proyecto donando una batería de litio-ion que había sido retirada del vehículo debido a una falla. Luego, por medio de los docentes tutores del proyecto se consiguió una batería de NiMH que había llegado al fin de su vida útil en un vehículo híbrido de la marca Toyota, donada por la empresa Ajax S.A. Posteriormente una de las empresas contactadas, Autolider, manifestó su interés en donar una batería nueva de litio-ion, proveniente de un vehículo híbrido de la marca Mercedes Benz.

Uno de los problemas identificados en el proceso de conseguir las baterías fue el hecho de que los vehículos híbridos y eléctricos han ingresado al mercado local hace pocos años y sus baterías aún no han llegado al fin de su vida útil, motivo por el cual la mayoría de las empresas que respondieron la consulta manifestaron no contar con baterías disponibles para donar. Otro problema encontrado fue la disposición final de las baterías una vez estudiadas, llegando a tener que firmar acuerdos entre las empresas donantes y la Facultad de Ingeniería, en los que ésta asumía hacerse cargo de la disposición final de las baterías, lo que implica el correcto manejo del pasivo ambiental que representan sus componentes una vez que son totalmente descartadas para su funcionamiento.

En el presente capítulo se describen las características de las baterías conseguidas, su proceso de desmantelamiento y medidas de seguridad a la hora de trabajar con las mismas. Además, dado que para construir una batería multicelda solo es posible utilizar celdas de una misma tecnología y con mismas características, se decidió trabajar con la batería de litio-ion donada por Mobility considerando sus superiores prestaciones electroquímicas frente al resto. Los motivos que fundamentan dicha decisión también se describen en este capítulo.

4.1. Batería A: LiFePO_4 - Mobility

Mediante donación, la empresa importadora de vehículos eléctricos Mobility proporcionó al proyecto una batería de 72 V y 50 Ah formada por 24 celdas conectadas en serie de LiFePO_4 . Según datos proporcionados por el proveedor, la batería fue descartada por un fallo producido por sobretensión durante la carga de la misma. Dicho fallo se produjo como consecuencia de una modificación de los parámetros del BMS por parte del usuario, quién aumentó la tensión de carga hasta 4,5 V a espera de una carga mas rápida, siendo la tensión nominal de las celdas 3,2 V.

El pack de baterías se recibió sin su BMS y en la Figura 4.1 se muestra tal cual como fue recibido el mismo por parte de Mobility. Como se observa, la sobretensión durante la carga causó una reacción química en algunas de las celdas que derivó en un aumento de presión en su interior, provocando que el electrolito fluyera hacia el exterior a través de su válvula de alivio.



(a) Vista general del pack recibido.

(b) Celdas dañadas debido a la sobrecarga.

Figura 4.1: Batería entregada por Mobility.

4.1.1. Características

La batería estaba compuesta por 24 celdas prismáticas de LiFePO_4 como la que se ilustra en la Figura 4.2. En cuanto a las características y prestaciones eléctricas de las celdas, el proveedor no suministró la hoja de datos de las mismas, sino que solo informó parámetros como las tensiones máximas y mínimas de operación, la química y la capacidad nominal. No se pudo conocer procedencia ni fabricante, por lo que dada la falta de información al respecto, se realizó una búsqueda en Internet sobre celdas similares y se tomó como referencia la información de las celdas modelo IFP23140160-50Ah del fabricante HEFEI HOYE ECOLENG TECHNOLOGY CO., LTD [28], debido a que cuentan con la misma tecnología y similares características. Los parámetros más relevantes de las celdas se detallan en las Tablas 4.1 y 4.2 y fueron los valores utilizados para diseñar los ensayos que se describen posteriormente en el Capítulo 6.

4.1. Batería A: LiFePO₄ - Mobility



Figura 4.2: Una de las 24 celdas de LiFePO₄ que componen la batería donada por Mobility [28].

Tipo de batería	Prismática
Tecnología	LFP
Capacidad nominal	50 Ah
Tensión nominal de trabajo	3,2 V
Tensión límite de carga	3,65 V
Tensión límite de descarga ($T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	2,5 V
Método de carga	CC hasta 3,65 V y luego CV hasta 0,05C
Rango de temperatura de descarga	-30 $^{\circ}\text{C}$ a 60 $^{\circ}\text{C}$
Rango de temperatura de carga	0 $^{\circ}\text{C}$ a 60 $^{\circ}\text{C}$
Corrientes de carga/descarga máximas (régimen)	1C
Corrientes de descarga/descarga máximas (30 s)	2C
Retención de carga (25 $^{\circ}\text{C}$, 100 % SOC, 30 días)	$\geq 96\%$
Ciclos de vida (25 $^{\circ}\text{C}$, 1C de descarga)	≥ 2000
Vida útil (25 $^{\circ}\text{C}$)	≥ 10 años
Dimensiones (ancho/largo/alto en mm)	23/140/160
Peso (kg)	1,10

Tabla 4.1: Valores nominales de la celda modelo IFP23140160-50Ah del fabricante HEFEI HOYE ECOLENG TECHNOLOGY CO., LTD [28].

SOC	Carga	Descarga	Pulso máx de carga (30 s)	Pulso máx de descarga (30 s)
100 %	0C	1C	0C	2C
80 %	0,75C	1C	1C	2C
50 %	1C	1C	2C	2C
30 %	1C	1C	2C	2C
10 %	1C	0,33C	2C	0,5C
0 %	1C	0C	2C	0C

Tabla 4.2: Tabla con valores máximos de corriente admisibles según el estado de carga y la operación que se esté realizando, a una temperatura ambiente de entre 15 $^{\circ}\text{C}$ y 35 $^{\circ}\text{C}$ [28].

4.1.2. Proceso de desmantelamiento

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

El primer paso realizado fue quitar todo el cableado auxiliar como sondas de medida de tensión y temperatura de cada celda. Como se observa en la Figura 4.1, las celdas se encontraban conectadas entre sí mediante una plancha de aluminio soldada en cada borne mediante una soldadura láser. Por esto, se tuvo que realizar un método invasivo en el que se rompieron los puntos de soldadura para lograr separar las celdas. Se verificó con un téster que uno de los bornes se encontraba conectado a la envolvente metálica de la celda, por lo que se debió tener especial cuidado al momento de manipular los bornes con herramientas metálicas, evitando provocar un cortocircuito en bornes de la celda. Posteriormente a desarmar el pack, como precaución adicional se debieron aislar con cinta aislante los bornes positivos y negativos de cada celda, dado que cualquier objeto metálico que tocara ambos bornes a la vez provocaría un cortocircuito.

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

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

Cabe mencionar que el operador que realice los procedimientos anteriormente descritos debe poseer una serie de equipos de protección personal (EPP) como son guantes dieléctricos y protección mecánica, lentes de protección, zapatos de seguridad y delantal ignífugo. A su vez, como equipo de protección colectiva (EPC) se debe contar con extintor para todo tipo de incendios (halógeno para el cuidado de equipos delicados, como los del laboratorio), detector de tensión, y señalización de la zona de trabajo.

4.2. Batería B: NiMH - Toyota Prius

Mediante el mismo método que el caso anterior, la empresa Ajax S.A. donó una batería de un vehículo híbrido modelo Toyota Prius, la cual estaba fuera de servicio por insuficiencia en su rendimiento. No fue posible conseguir datos de cuánto tiempo estuvo en servicio el pack, ni a cuantos ciclos fue sometida la batería antes de ser descartada. El proveedor solo suministró la tensión de trabajo de la batería, que es 202 V y la química de las celdas, que es NiMH.

4.2.1. Características

En la Figura 4.3(a) se muestra la batería tal cual como fue recibida. La misma estaba compuesta por 28 módulos conectados en serie, cada uno con una tensión nominal de 7,2 V y una capacidad de 6,5 Ah. Dichos módulos a su vez se encuentran formados por 6 celdas de NiMH de 1,2 V cada una, como se ilustra en la Figura 4.4(b). En base a los datos de la ficha técnica del Toyota Prius 2019, las características de la batería usada por el vehículo se presentan en la Tabla 4.3.

Tipo de batería	Multicelda
Cantidad de módulos	28
Cantidad de celdas por módulo	6
Tecnología	NiMH
Capacidad nominal	6,5 Ah
Tensión nominal de trabajo de la batería	201,6 V
Tensión nominal de trabajo de cada módulo	7,2 V
Potencia máxima	36 kW
Tipo de conexionado de módulos	serie

Tabla 4.3: Valores nominales de la batería de NiMH donada por Ajax S.A.

4.2.2. Proceso de desmantelamiento

Como se observa en la Figura 4.3(a), la batería contaba con una envolvente metálica compacta, la cual proporciona estabilidad y protección mecánica al pack. Una vez retirada dicha envolvente, se tuvo acceso a los 28 módulos de NiMH que forman la batería, como se muestra en la Figura 4.3(b). Se observó que el pack poseía un cableado auxiliar al de potencia, el cual estaba conectado en bornes de cada batería individual para obtener la medida de tensión utilizada por el sistema de control de la batería. En la parte superior, el pack contaba con sensores de temperatura distribuidos en la superficie. Tanto los cables de medida de tensión como los de temperatura fueron desconectados y retirados de la unidad. Se constató que los bornes de cada módulo individual eran roscados y se conectaban en serie entre sí mediante una placa de cobre que se encontraba sulfatada al momento del desarme.

Capítulo 4. Baterías a estudiar



((a)) Batería con envoltura metálica.

((b)) Pack de baterías sin envoltura metálica.

Figura 4.3: Batería de Toyota Prius donada por Ajax S.A.



((a)) Módulos individuales

que forman la batería.

((b)) Uno de los módulos que conforma el pack. Nótese las 5 divisiones que delimitan las 6 celdas de NiMH interiores.

Figura 4.4: Módulos que componen la batería del Toyota Prius donada por Ajax S.A. una vez desmontados.

Luego del desmontaje también se observó que la superficie lateral de los módulos no era lisa, sino que estaba construida de manera de formar conductos de aire entre dos módulos contiguos. Según mecánicos automotrices que realizan mantenimiento a este tipo de vehículos, esta característica de diseño es usada para la ventilación forzada de los mismos cuando el controlador de la batería considera que es necesario.

Para desmontar la batería se tomaron los mismos recaudos mencionados en la Sección 4.1.2. Se aislaron los bornes eléctricamente para evitar descargas que provocaran el deterioro de la celda. En la Figura 4.4(a) se observan los 28 módulos que componen la batería, una vez separados y desconectados. Como se mencionó, cada módulo contiene en su interior 6 celdas de NiMH de 1,2 V cada una, conectadas en serie, llegando el módulo

4.3. Batería C: Litio-ion - Mercedes Benz

entonces a una tensión de 7,2 V nominales. En la Figura 4.4(b) pueden observarse 5 divisiones que delimitan cada una de estas 6 celdas. Cabe mencionar que cada módulo se encuentra sellado, por lo que no es posible acceder a cada celda de NiMH individualmente, limitando estudiar el módulo en su conjunto y no sus celdas por separado.

4.3. Batería C: Litio-ion - Mercedes Benz

Se recibió mediante donación de la empresa Autolider Uruguay S.A., una batería de un vehículo híbrido marca Mercedes Benz, la que se muestra en la Figura 4.5. Según la empresa, la batería se encontraba en estado nuevo y nunca había sido utilizada en el vehículo. No se contó con una hoja de datos de dicha batería por lo que los únicos datos sobre la misma fueron los informados por el proveedor y los presentes en las etiquetas adheridas al exterior de su carcasa, los que se resumen en la Tabla 4.4. Se destaca que esta batería no fue desmantelada debido a los motivos que se desarrollan en la Sección 4.4.



Figura 4.5: Batería de un vehículo híbrido marca Mercedes Benz, donada por Autolider Uruguay S.A.

Tecnología	Litio-ion
Capacidad nominal	6,5 Ah
Tensión nominal de trabajo de la batería	126 V
Energía nominal	820 Wh
Dimensiones (ancho/largo/alto en mm)	500/770/400
Peso	21,9 kg

Tabla 4.4: Valores nominales de la batería donada por Autolider Uruguay S.A.

4.4. Elección de la batería a estudiar

Dado que el presente proyecto tiene un tiempo de ejecución acotado, en base a prestaciones eléctricas y de seguridad se decidió comenzar estudiando la batería A. Cabe mencionar que el estudio en profundidad de las tres baterías implicaría un tiempo excesivo para este proyecto, debido a los tiempos necesarios para la realización de los ensayos, que como se describe en el Capítulo 5, insumen varias horas por celda.

Como se desarrolló en la Sección 2.2.5.2, las baterías de iones de litio presentan ventajas frente a las celdas de NiMH, como una mayor densidad de energía, de potencia y una mayor energía específica. Además, dentro de las tecnologías de litio, las baterías de LiFePO₄ son las más estables ante sobrecargas y sobredescargas [7]. Por tales motivos la batería A fue la mejor candidata para estudiar en el proyecto y realizarle ensayos.

Dado el objetivo del proyecto de construir un banco a partir de la segunda vida de baterías provenientes de electromovilidad, la batería C se descartó por tratarse de un dispositivo nuevo que aún no ha llegado al fin de su vida en su aplicación original. Además, de las tres baterías disponibles, la batería C fue la que contaba con menor energía, con tan solo 820 Wh, frente a los 1310 Wh de la batería B y los 3600 Wh de la batería A. Por lo tanto, la batería C fue descartada y no se desmanteló, previendo un eventual ensayo a futuro del pack completo.

Por otra parte, los módulos de la batería B contaban con la ventaja de disponer bornes roscados, lo que facilitaría la conexión de los mismos para construir posteriormente el banco reutilizado. En el caso contrario, las celdas de la batería A poseían sus bornes soldados con una soldadura láser realizada en la fábrica, que no sería posible replicar, dificultando la interconexión de celdas. Si bien esto fue uno de los principales problemas a la hora de construir el banco, en la Sección 7.1.1 se explica cómo pudo solucionarse, logrando un método de conexión de las celdas de LiFePO₄ aceptable para la aplicación de este proyecto.

Además, se estudió que el banco tendría una capacidad en Ah de aproximadamente la mitad si se construyera utilizando los módulos de NiMH en lugar de las celdas de LiFePO₄. Dado que el banco a construir tenía como requerimiento contar con una tensión nominal de al menos 51,2 V nominales, se observó que serían necesarias al menos 16 celdas de LiFePO₄ conectadas en serie para lograr cumplir con este objetivo. En dicho caso, el banco dispondría de una capacidad nominal de 50 Ah, debido a la conexión en serie de las celdas. En un escenario contrario, si se utilizaran los módulos de NiMH se constata que se necesitarían al menos 7 módulos conectados en serie para alcanzar una tensión superior a 50 V. Bajo la suposición poco conservadora de que los 28 módulos de la batería B se encontraran en condiciones de ser reutilizados, se podría formar un máximo de 4 packs de 7 módulos en serie. Conectando dichos packs en paralelo se sumarían las capacidades de cada uno, obteniendo de esa manera una capacidad neta de 4 veces la de un módulo, es decir una capacidad de 26 Ah.

Por lo tanto, se verificó que utilizando las celdas de LiFePO₄ se podría llegar a construir un banco con aproximadamente el doble de capacidad en Ah que si se utilizaran los módulos de NiMH. Además, en este caso también se tendrían problemas relacionados al conexionado en paralelo de celdas, debido a circulación de corrientes entre celdas que provocaría la autodescarga de la batería. Por tales motivos la batería B fue descartada

4.4. Elección de la batería a estudiar

para su estudio y se decidió estudiar en profundidad las celdas de la batería A.

Otro factor que impulsó el estudio de la batería A fue el hecho de contar con mayor cantidad de información técnica sobre esta respecto al resto, lo que fue imprescindible para la realización de los ensayos que se describen en el Capítulo 5. No obstante, más allá de los motivos por los que se eligió trabajar con la batería A, cabe mencionar que si luego de realizados los ensayos a las celdas de la misma, no hubiese sido posible identificar al menos 16 celdas potencialmente reutilizables, entonces se habría optado por ensayar los módulos de NiMH de la batería B. Sin embargo, como se describe en el Capítulo 6, esto fue posible y no hubo necesidad de ensayar los módulos de NiMH.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 5

Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

El desarrollo de la electromovilidad basada en un medio de almacenamiento electroquímico ha desarrollado fuertemente la investigación y fabricación de baterías para el almacenamiento de energía. Esto no solo obliga a estandarizar tanto los procesos productivos y aspectos ambientales en la fabricación a nivel mundial, sino también las prestaciones de dichas baterías. Con el fin de satisfacer requerimientos de rendimiento y confort de los consumidores de vehículos eléctricos, la eficiencia y el rendimiento de la baterías deben ser cada vez mejores. De esta forma surgen estándares internacionales que establecen las prestaciones mínimas que deben cumplir las baterías fabricadas para la movilidad eléctrica y los ensayos que estas deben cumplir.

De acuerdo al objetivo del proyecto, luego de contar con una batería objeto de estudio, es necesario realizar una serie de ensayos a sus celdas para determinar cuáles de estas son potencialmente reutilizables. Por lo tanto, en el presente capítulo se describe una lista de ensayos establecidos en estándares internacionales que permiten conocer las características físicas y eléctricas de baterías de litio-ion utilizadas para electromovilidad. Particularmente, los ensayos descritos provienen de la norma *IEC 62660-1:2018 - Celdas secundarias de litio-ion para la propulsión de vehículos eléctricos - Parte 1: Ensayos de rendimiento* publicada por CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) en febrero de 2019 [29] y del *Manual de Ensayo de Baterías para Vehículos Eléctricos* publicado por USABC (Consortio de Estados Unidos de Baterías Avanzadas) en octubre de 2020 [15], en el que se detallan diversos ensayos para caracterizar y determinar la aptitud de baterías para el uso en vehículos eléctricos. Estos estándares fueron elegidos porque determinan características con las que se puede comparar los parámetros que detalla el fabricante de las celdas (capacidad nominal, tensiones de trabajo y corrientes máximas de operación), como es el caso de la norma IEC. Por otro lado, debido a la relevancia de USABC en la industria automotriz norteamericana y a que dicho organismo establece metas que deben cumplir las baterías de los vehículos eléctricos, se utilizan los ensayos propuestos en su manual para caracterizar baterías de iones de litio.

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

Cabe aclarar que los ensayos presentes en este capítulo no son los que finalmente se realizaron, sino que en este capítulo se realiza una transcripción de algunos de los ensayos presentes en los mencionados estándares internacionales, los que serán utilizados como base para realizar los ensayos a las celdas y posteriormente al banco reutilizado. Dicha transcripción se realiza con el fin de dejar registro de los ensayos que pueden realizarse para los fines del proyecto. Posteriormente, en el Capítulo 6 se describe cómo se implementan los ensayos que fueron realizados y qué cambios se le realizaron a los presentes en este capítulo con el fin de adaptarse a los recursos del laboratorio y del presente proyecto.

5.1. Medida de parámetros físicos

Para determinar parámetros como la energía específica y la densidad de energía de la batería en estudio, primero es necesario realizar las medidas de sus parámetros físicos. A continuación se describen las consideraciones establecidas en la norma IEC 62660-1:2018 para la determinación de los parámetros físicos.

5.1.1. Medida de masa

La masa de la celda debe ser medida a temperatura ambiente y con un instrumento que sea capaz de proporcionar un margen de incertidumbre menor a $\pm 0,1\%$. Se considera que la celda está a temperatura ambiente cuando la misma estuvo en reposo en un ambiente estable durante 12 h, o cuando llegó al equilibrio térmico. Se considera equilibrio térmico cuando la oscilación de la temperatura de la celda es menor a 1 K [29].

5.1.2. Medida de volumen

Las dimensiones de largo, ancho y altura máximas de la celda deben ser medidas a temperatura ambiente y con un instrumento capaz de proporcionar un margen de incertidumbre menor a $\pm 0,1\%$. Luego, el volumen de la celda queda determinado por el producto de las dimensiones relevadas, excluyendo los terminales para el caso de la altura máxima [29].

5.2. Medidas y cálculo de parámetros eléctricos

Se describen a continuación cómo se calculan los parámetros eléctricos de la celda según lo establecido por la norma IEC 62660-1:2018 y también las condiciones de ensayo para obtener dichos parámetros.

5.2.1. Condiciones de ensayo

A menos que se indique lo contrario, para la medida de parámetros eléctricos se realizan las siguientes consideraciones [29]:

5.2. Medidas y cálculo de parámetros eléctricos

5.2.1.1. Límites de tensión

- $V_{max_{100}}$ = tensión de la celda cuando se encuentra al 100 % del SOC.
- V_{min_0} = tensión de la celda cuando se encuentra al 0 % del SOC.
- $V_{nominal}$ = tensión electroquímica nominal calculado como el cociente entre la energía total y la capacidad nominal.
- $V_{max_{op}}$ = tensión máxima del rango de tensiones de operación de la celda. No siempre coincide con $V_{max_{100}}$, ya que no para todas las celdas se cumple que se puede alcanzar el 100 % del SOC. Se considerará que la celda está completamente cargada cuando su tensión sea igual a $V_{max_{100}}$.
- $V_{min_{op}}$ = valor mínimo del rango de tensiones de operación de la celda. Disminuye con el envejecimiento de la celda y el valor mínimo es informado por el fabricante.

5.2.1.2. Método de carga

Para contar con la celda completamente cargada, primero se debe descargar a una corriente constante hasta su tensión de fin de descarga. Luego se debe cargar de acuerdo al método de carga sugerido por el fabricante [29].

5.2.1.3. Control de temperatura

Los ensayos se deben realizar a una temperatura controlada que por defecto es de 30°C. Entre ensayos se debe dejar la batería en reposo por al menos por 60 minutos, para que la misma alcance la estabilidad térmica y química, estabilizando así la tensión de vacío [29].

5.2.2. Parámetros de potencia

5.2.2.1. Cálculo de potencia de descarga

$$P_d = U_d I_{dmax} \quad (5.1)$$

- P_d : Potencia de descarga en (W);
- I_{dmax} : Pulso de corriente máxima de descarga durante 10s (A);
- U_d : Tensión al final del pulso de 10s @ I_{dmax} (V);

5.2.2.2. Densidad de potencia de descarga por unidad de masa

$$\rho_{pd} = \frac{P_p}{m} \quad (5.2)$$

- P_d : Potencia de descarga en (W);

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

- ρ_{pd} : Densidad de potencia (W/kg);
- m : masa de la celda o batería (kg);

5.2.2.3. Densidad de potencia de descarga por unidad de volumen

$$\rho_{pvlm} = \frac{P_d}{V} \quad (5.3)$$

- P_d : Potencia de descarga en (W);
- ρ_{pvlm} : Densidad de potencia volumétrica (W/l);
- V : volumen de la celda o batería (l);

5.2.3. Potencia regenerativa

5.2.3.1. Cálculo de potencia regenerativa

$$P_c = U_c I_{cmax} \quad (5.4)$$

- P_c : Potencia regenerativa en (W);
- I_{cmax} : Pulso de corriente máxima de carga durante 10s (A);
- U_c : Tensión al final del pulso de 10s @ I_{cmax} (V);

5.2.3.2. Densidad de potencia regenerativa por unidad de masa

$$\rho_{pc} = \frac{P_c}{m} \quad (5.5)$$

- P_c : Potencia regenerativa en (W);
- ρ_{pc} : Densidad de potencia regenerativa (W/kg);
- m : masa de la celda o batería (kg);

5.2.3.3. Densidad de potencia regenerativa por unidad de volumen

$$\rho_{pvlmc} = \frac{P_c}{V} \quad (5.6)$$

- P_c : Potencia regenerativa en (W);
- ρ_{pvlmc} : Densidad de potencia regenerativa volumétrica (W/l);
- V : volumen de la celda o batería (l);

5.2. Medidas y cálculo de parámetros eléctricos

5.2.4. Parámetros de energía

5.2.4.1. Cálculo de energía de descarga

$$W_{ed} = C_d U_{avr} \quad (5.7)$$

- W_{ed} : Energía (Wh);
- C_d : Capacidad descargada durante 3 hs @ una corriente de C/3 (Ah);
- U_{avr} : Tensión promedio durante la descarga (V);

5.2.4.2. Densidad de energía por unidad de masa

$$\rho_{ed} = \frac{W_{ed}}{m} \quad (5.8)$$

- W_{ed} : Energía (Wh);
- ρ_{ed} : Densidad de energía (Wh/kg);
- m : masa de la celda o batería (kg);

5.2.4.3. Densidad de energía por unidad de volumen

$$\rho_{evlmd} = \frac{W_{ed}}{V} \quad (5.9)$$

- W_{ed} : Energía (Wh);
- ρ_{evlmd} : Densidad de energía volumétrica (Wh/l);
- V : volumen de la celda o batería (l);

5.2.5. Retención de carga

$$R = \frac{C_r}{C_b} 100 \quad (5.10)$$

- R : Ratio de retención de carga (%);
- C_r : Capacidad de la celda luego del almacenamiento (Ah);
- C_b : Capacidad de la celda antes del almacenamiento (Ah);

5.3. Procedimiento y descripción de ensayos

En la presente sección se describen ensayos establecidos en el Manual de Ensayos de Baterías para Vehículos Eléctricos de USABC [15] y en la norma IEC 62660-1:2018 [29], que según lo que se desarrolla en el Capítulo 6, en base a ellos se diseñaron y realizaron las pruebas a las celdas para determinar cuáles se encontraban en condiciones de ser reutilizadas y los ensayos al banco de baterías construido para determinar sus características. Además se incluye un ensayo en base al procedimiento WLTP para la estimación de la autonomía que tendría el banco si se empleara en una aplicación puntual de electromovilidad, lo que también se desarrolla en el Capítulo 6. En dicho capítulo, también se detallan modificaciones que debieron hacerse a los ensayos propuestos por los estándares internacionales considerados y transcritos en las siguientes secciones, con el fin de adaptarse a los tiempos del proyecto y recursos dispuestos por el laboratorio.

5.3.1. Ensayo de medida de capacidad estática

- **Fuente:** Norma IEC 62660-1:2018 [29].
- **Objetivo:**
Medir la capacidad de una batería en Ah bajo una descarga a corriente constante (CC).
- **Secuencia:**
 1. Cargar la batería según 5.2.1.2.
 2. Descargar la batería con una corriente constante de $C/3$ hasta que la tensión de la batería sea V_{min0} .
 3. Calcular la capacidad de la batería en Ah integrando la corriente en función del tiempo.

5.3.2. Ensayo de caracterización de pulso híbrido de potencia (HPPC - Hybrid Pulse Power Characterization test)

- **Fuente:** Manual de Ensayos de Baterías para Vehículos Eléctricos de USABC [15].
- **Objetivo:** Determinar las características de potencia de descarga y de regeneración de una batería ante un perfil híbrido que contiene un pulso de carga y otro de descarga.
- **Descripción:** En este ensayo se utiliza el perfil que se ilustra en la Figura 5.1. En el mismo primero se aplica un pulso de descarga durante 30 segundos y a una corriente de I_{HPPC} , luego se deja reposar la celda por 40 segundos y se finaliza aplicando un pulso de carga regenerativa de 10 segundos de duración a una corriente de $0,75 \times I_{HPPC}$. La corriente I_{HPPC} se corresponde con el 75 % de la corriente máxima permitida por el fabricante de la batería, para un pulso de descarga de 30 segundos desde algún SOC que no tiene por qué estar especificado (I_{max}). Por lo tanto, $I_{HPPC} = 0,75I_{max}$.

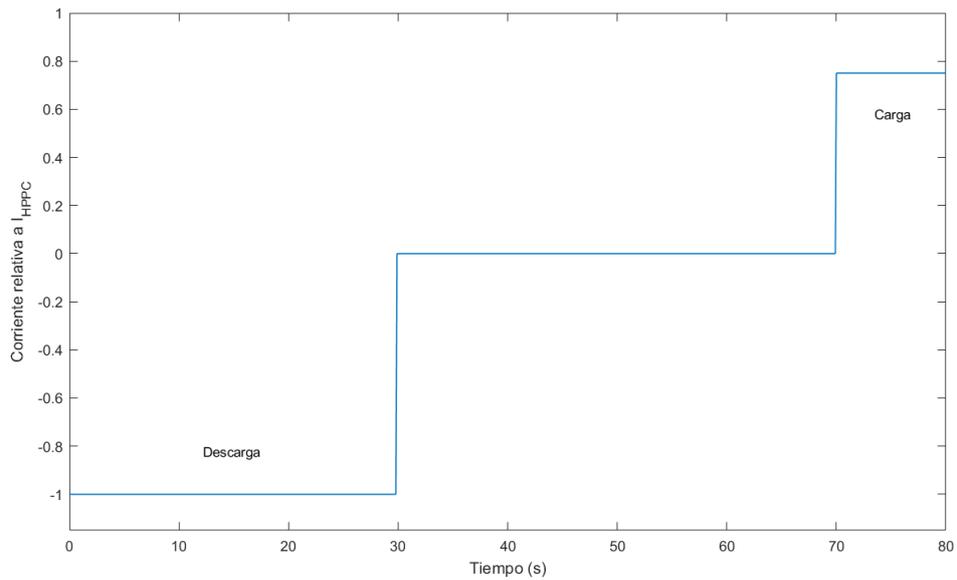


Figura 5.1: Perfil HPPC utilizado para el ensayo [15]. La corriente es relativa a I_{HPPC} .

■ **Secuencia:**

1. Cargar la celda hasta $V_{max_{op}}$ de acuerdo a 5.2.1.2.
2. Dejar la celda en reposo durante 1 hora para que alcance un estado de equilibrio térmico y electroquímico.
3. Aplicar el perfil HPPC descrito anteriormente en la Figura 5.1.
4. Aplicar un pulso de descarga a corriente constante de $C/3$ y con una duración tal que corresponda con una descarga del 10% respecto a la capacidad nominal.
5. Dejar la celda en reposo durante 1 hora para que alcance un estado de equilibrio térmico y electroquímico.
6. Repetir los pasos 3, 4 y 5 hasta que se haya descargado al menos un 90% de la capacidad nominal o lo máximo informado por el fabricante. Si en cualquier punto de los pulsos del perfil HPPC mostrado en la Figura 5.1 se alcanza la tensión V_{min_0} se debe reducir la corriente¹ hasta completar el pulso. En cambio, si dicha tensión es alcanzada durante uno de los pulsos de descarga de 10% de la capacidad que se realizan a $C/3$ en el paso 4, se debe detener el ensayo.
7. Terminar el ensayo descargando el remanente de capacidad de la batería a una corriente constante de tasa $C/3$.

¹Se observa en el Manual de USABC no queda definido a cuánto bajar la corriente de pulso I_{HPPC} en la situación que se plantea.

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

■ Parámetros a registrar:

Durante el ensayo HPPC se deben registrar los siguiente parámetros:

- Temperatura de la celda durante el ensayo.
- Valor acumulado de la capacidad descargada (Ah) al final de cada ciclo de descarga de 10 %.
- Valor acumulado de la capacidad descargada (Ah) al final de cada pulso de descarga contenido dentro de cada perfil HPPC.
- Medidas de tensión y corriente al inicio y al final de cada pulso de carga y descarga dentro de cada perfil HPPC (ver Figura 5.2).

Contando con dichas medidas y las características físicas de la batería, determinadas según 5.1, es posible calcular parámetros como la capacidad, la energía específica de descarga y regeneración, la densidad de potencia de descarga, densidad de energía de descarga y de regeneración. A su vez, el manual establece una medida de resistencia interna, que se calcula en cada pulso de carga y descarga del perfil HPPC, con lo que se puede visualizar cómo es la tendencia de la resistencia interna durante el ciclado. Las ecuaciones 5.11 y 5.12 describen cómo calcular las resistencias correspondientes a los pulsos de descarga y carga respectivamente y se presentan a modo informativo. En la Figura 5.2 se detalla en qué puntos del perfil tomar dichos valores.

$$R_{Descarga} = \left| \frac{\Delta V_{desc}}{\Delta I_{desc}} \right| = \left| \frac{V_{t1} - V_{t0}}{I_{t1} - I_{t0}} \right| \quad (5.11)$$

$$R_{Carga} = \left| \frac{\Delta V_{carga}}{\Delta I_{carga}} \right| = \left| \frac{I_{t3} - V_{t2}}{V_{t3} - I_{t2}} \right| \quad (5.12)$$

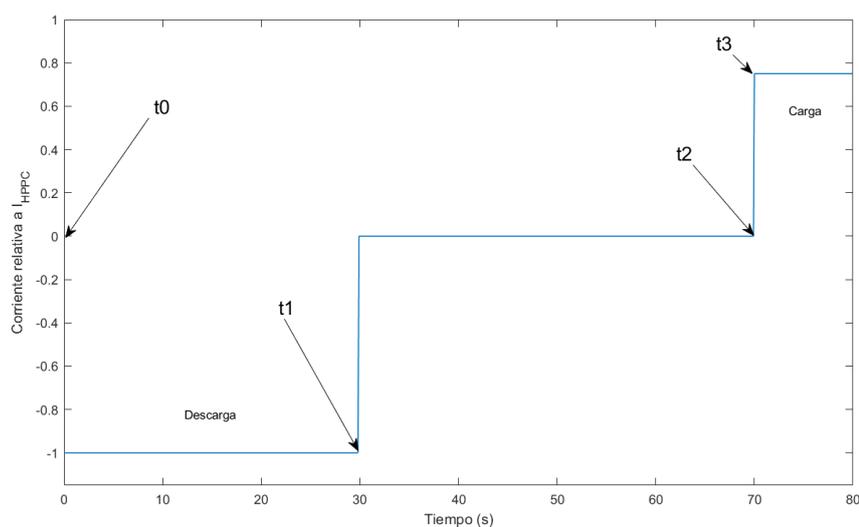


Figura 5.2: Puntos de toma de valores para el cálculo de parámetros en ensayo HPPC [15].

5.3.3. Ensayo de potencia máxima

- **Fuente:** Manual de Ensayos de Baterías para Vehículos Eléctricos de USABC [15].
- **Objetivo:** Determinar la capacidad que tiene una batería para descargar un pulso de potencia cada decrementos de un 10 % de su SOC, dentro del rango de tensión de operación.
- **Descripción:**

Se usa un perfil compuesto por un pulso de descarga de 30 segundos de duración a una corriente alta (High Test Current), seguido por un pulso de descarga de baja corriente (Base Current) con la duración necesaria para descargar un 10 % de la capacidad nominal. El perfil utilizado se muestra en la Figura 5.3 y a diferencia del ensayo HPPC, en el ensayo de potencia máxima el perfil utilizado no contiene pulsos de regeneración y no se dejan períodos de reposo entre un ciclo y otro.

La corriente $I_{High\ Test\ Current}$ tiene el valor de la máxima corriente de pulso soportada por la batería (I_{max}), mientras que la corriente $I_{Base\ Current}$ se determina con la ecuación 5.13

$$I_{Base\ Current} = \frac{12 \times C_{operating} - I_{HighTestCurrent}}{35} \quad (5.13)$$

donde $C_{operating}$ es la capacidad de la celda entre $V_{max_{op}}$ y V_{min_0} .

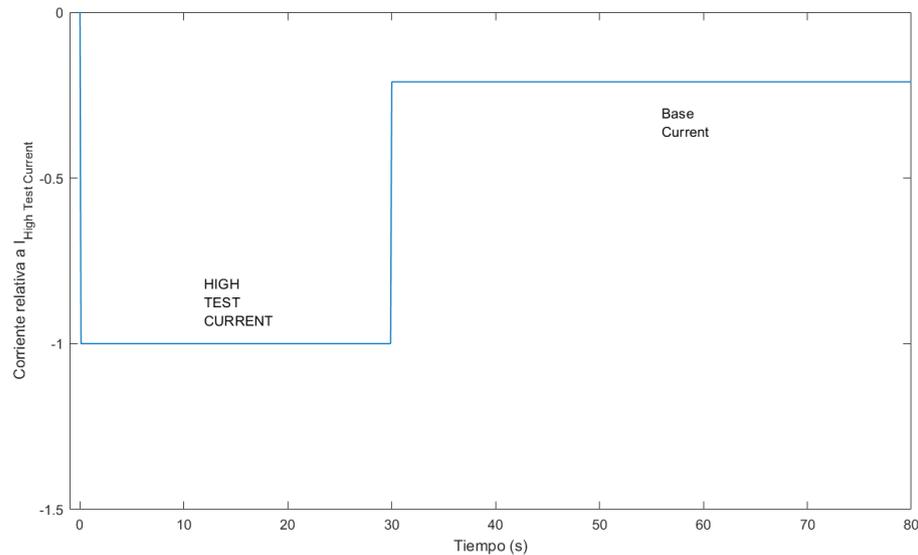


Figura 5.3: Perfil utilizado en el ensayo de potencia máxima [15].

- **Secuencia:**
 1. Cargar la celda hasta $V_{max_{op}}$ de acuerdo a 5.2.1.2.
 2. Dejar la celda en reposo por 1 hora.

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

3. Aplicar un pulso con corriente de descarga de $I_{High\ Test\ Current}$ durante 30 segundos según el perfil de la Figura 5.3.
4. Inmediatamente luego del paso anterior, aplicar un pulso con corriente de descarga de $I_{Base\ Current}$ hasta que se haya descargado un 10 % de la capacidad nominal.
5. Repetir los puntos 3 y 4 hasta que en el último pulso de 30 segundos se haya descargado el 90 % de la capacidad nominal o un valor cercano a dicho porcentaje. Si durante alguno de los pulsos de 30 segundos se alcanza la tensión V_{min_0} , se deberá reducir la corriente de descarga² hasta que se finalice el perfil. En el caso de que se alcance la tensión V_{min_0} en el tramo en el que se realiza la descarga del 10 % de capacidad a baja corriente, se debe detener el ensayo.
6. Terminar el ensayo descargando la capacidad remanente de la batería con una corriente constante de $I_{Base\ Current}$.

5.3.4. Ensayo de autodescarga

- **Fuente:** Norma IEC 62660-1:2018 [29].
- **Objetivo:** Determinar la pérdida de capacidad por almacenamiento de una batería por un período de tiempo determinado.
- **Observación:** Se asume que es conocida la capacidad real de la batería. Si este no es un dato conocido, se debe realizar un ensayo de capacidad estática según lo descrito en la sección 5.3.1.
- **Secuencia:**
 1. Realizar una carga completa de la batería según 5.2.1.2.
 2. Descargar un 50 % de la capacidad en Ah de la batería con corriente constante de tasa $C/3$.
 3. Dejar reposar la batería durante 1 hora.
 4. Descargar la capacidad restante de la batería a una corriente constante de $C/3$. Dicha capacidad descargada se denomina C_b .
 5. Realizar una carga completa de la batería según 5.2.1.2.
 6. Descargar un 50 % de la capacidad en Ah de la batería.
 7. Dejar reposar la batería durante un período de 28 días.
 8. Descargar la capacidad remanente en la batería a una corriente constante de $C/3$. Dicha capacidad descargada se denomina C_r .
- **Cálculo de parámetros:**

Se calcula el ratio de retención de carga según la ecuación 5.10.

²Se observa en el Manual de USABC no queda definido a cuánto bajar la corriente en la situación que se plantea.

5.3.5. Ensayo de estimación de autonomía

Se describe a continuación un ensayo para estimar la autonomía que tendría un vehículo eléctrico en base al procedimiento WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) publicado por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE), con el fin de estandarizar las pruebas de homologación de vehículos ligeros a combustión, híbridos y eléctricos, en materia de emisiones y autonomía [30].

5.3.5.1. Definición del ciclo WLTC a utilizar

En el Anexo B1 de [30] se describen los ciclos WLTC (Worldwide light-duty test cycles) utilizados en el protocolo WLTP, los cuales se clasifican según el valor de la relación peso-potencia del vehículo y de su velocidad máxima. Los ciclos WLTC están compuestos como máximo por cuatro etapas con diferentes velocidades máximas:

- Etapa baja, hasta 56.5 km/h
- Etapa media, hasta 76.6 km/h
- Etapa alta, hasta 97.4 km/h
- Etapa extra alta, hasta 131.3 km/h

Existen tres clases de ciclos WLTC según la relación peso-potencia³ del vehículo bajo ensayo, los cuales se describen a continuación:

- **Clase 1:** Incluye etapas de velocidad baja y media. Se aplica para vehículos que cumplen:

$$\frac{Potencia(W)}{Masa(kg)} \leq 22 \frac{W}{kg} \quad (5.14)$$

- **Clase 2:** Incluye etapas de velocidad baja, media, alta y extra alta. Se aplica para vehículos que cumplen:

$$22 \frac{W}{kg} < \frac{Potencia(W)}{Masa(kg)} \leq 34 \frac{W}{kg} \quad (5.15)$$

- **Clase 3:** Incluye etapas de velocidad baja, media, alta y extra alta. Se aplica para vehículos que cumplen:

$$\frac{Potencia(W)}{Masa(kg)} > 34 \frac{W}{kg} \quad (5.16)$$

No obstante, el Anexo B8 del procedimiento [30] establece que los vehículos híbridos y eléctricos se deben incluir dentro de la clase 3, independientemente de la relación peso-potencia con la que cuenten. En las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran las diferentes etapas de los ciclos de conducción WLTC de las tres clases y como se puede observar, las etapas de baja, media, alta y extra alta velocidad no son iguales para las tres clases. El procedimiento WLTP también define un ciclo de conducción de urbano (WLTC_{city})

³Se considera la masa del vehículo sin el pasajero y sin carga.

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

para vehículos eléctricos que consiste solamente de una etapa de baja velocidad y otra de velocidad media.

Cabe mencionar que el Apartado 9 del Anexo B1 de [30] establece las modificaciones que se pueden realizar a los ciclos WLTC en caso de que la velocidad máxima del vehículo bajo ensayo sea menor que las máximas velocidades alcanzadas en las etapas de los ciclos. En particular, todos los puntos con velocidades mayores a la máxima del vehículo se “recortan” sustituyéndolos por puntos con velocidad constante igual a la velocidad máxima del vehículo. Dado que este procedimiento implica reducir la velocidad del ciclo, se deben agregar más puntos al perfil de manera de que la distancia recorrida en el ciclo no cambie luego del ajuste.

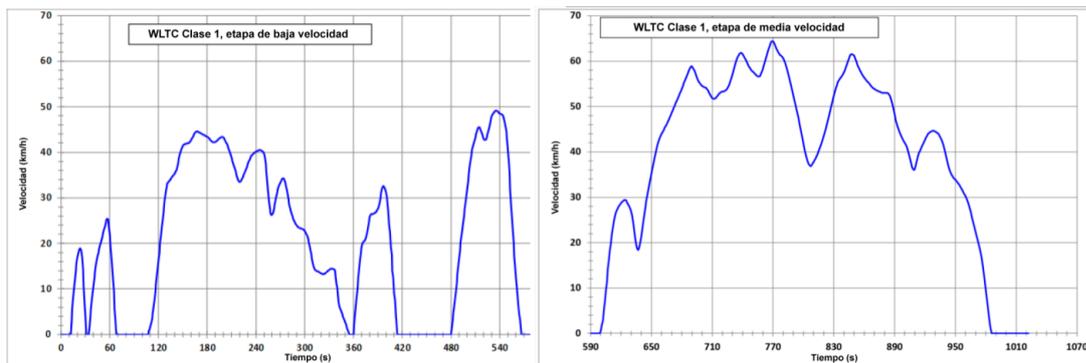


Figura 5.4: Ciclo de conducción WLTC Clase 1 [30].

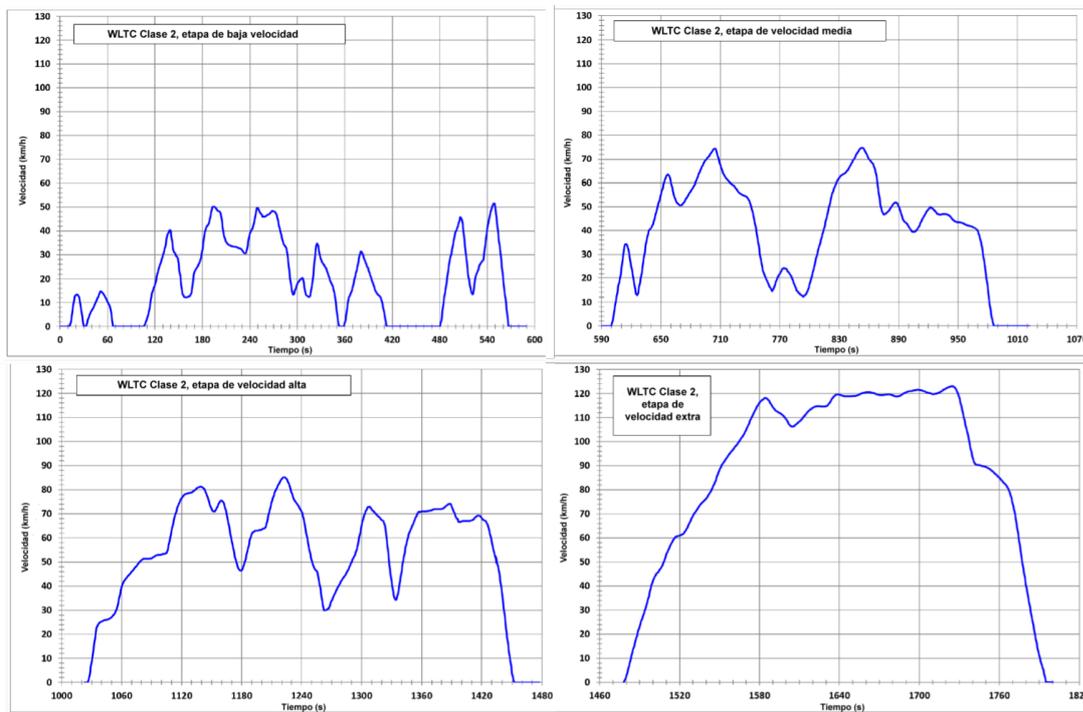


Figura 5.5: Ciclo de conducción WLTC Clase 2 [30].

5.3. Procedimiento y descripción de ensayos

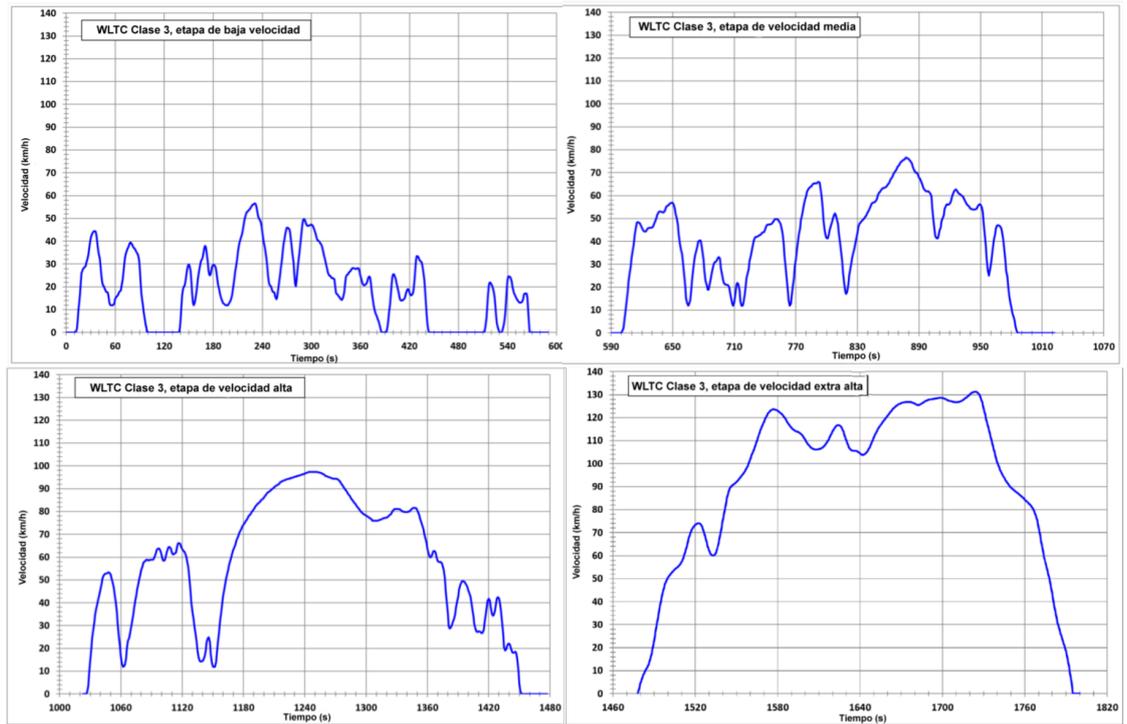


Figura 5.6: Ciclo de conducción WLTC Clase 3 [30].

5.3.5.2. Estimación de la potencia eléctrica consumida en función de la velocidad

Como se observa en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6, el procedimiento WLTP define perfiles de velocidad para cada Clase. Para ensayar una batería y estimar su autonomía simulando su uso en un vehículo, se necesita contar con un perfil de potencia eléctrica en función del tiempo. Por lo tanto, se debe calcular la potencia mecánica requerida por el vehículo en función de la velocidad y luego determinar la potencia eléctrica consumida por el motor para entregar dicha potencia mecánica.

En una primera aproximación, la fuerza requerida para propulsar un vehículo debe al menos exceder la fuerza cinética para acelerar el vehículo, la fuerza producida por el rozamiento de las ruedas, el arrastre aerodinámico y el cambio de elevación según las ecuaciones 5.17 y 5.18 presentes en [31]:

$$F_{propulsión} = ma + F_{resistencia\ de\ rodadura} + F_{arrastre\ aerodinámico} + F_{elevación} \quad (5.17)$$

$$F_{propulsión} = ma + mgC_{RR} + \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 + mg \sin \theta \quad (5.18)$$

donde

- m : masa del vehículo,
- a : aceleración del vehículo,
- g : aceleración gravitatoria,
- C_{RR} : coeficiente de resistencia de rodadura entre ruedas y superficie,
- ρ : densidad del aire ambiente,

Capítulo 5. Recopilación y descripción de ensayos realizables a celdas y baterías de iones de litio

C_D : coeficiente aerodinámico del vehículo,

A : sección transversal del vehículo,

v : velocidad,

θ : pendiente de la superficie.

Luego, la potencia requerida para propulsar un vehículo depende de la fuerza de propulsión y de la velocidad del vehículo, según la ecuación 5.19 presente en [31]:

$$P_{propulsión} = vF_{propulsión} = vma + vmgC_{RR} + \frac{1}{2}\rho C_D A v^3 + vmg \sin \theta \quad (5.19)$$

Por último, la potencia eléctrica requerida por el motor del vehículo se aproxima según la eficiencia (η) del mismo. Este valor de eficiencia del motor debe comprender el motor eléctrico en sí, el sistema de control de potencia o driver llamado comúnmente y el tren motriz. Entonces, según la ecuación 5.20 queda definida la potencia eléctrica que es requerida a la batería durante el ciclo de conducción, la cual es utilizada para el ensayo.

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{propulsión}}{\eta} \quad (5.20)$$

Capítulo 6

Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

En base al equipamiento de laboratorio disponible y al tiempo de ejecución del proyecto, se realizaron modificaciones a los ensayos presentados en el Capítulo 5 para testear las celdas dispuestas a reutilizar. En el presente capítulo se detallan estas modificaciones consideradas para realizar los ensayos, los parámetros utilizados para la configuración de los mismos y los resultados obtenidos. A partir de éstos últimos, se describe el criterio utilizado para seleccionar las celdas reutilizables para lograr un grupo de celdas aptas para movilidad eléctrica, con las que se pueda construir un banco de baterías según se detalla en el Capítulo 7.

Se realizaron dos ensayos en cadena; un primer ensayo de capacidad estática y luego un ensayo de potencia, los que desde un inicio filtran las celdas con mejor rendimiento. Los ensayos se realizaron en locaciones del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay y el equipamiento utilizado se describe en la siguiente Sección.

6.1. Equipo utilizado para los ensayos eléctricos

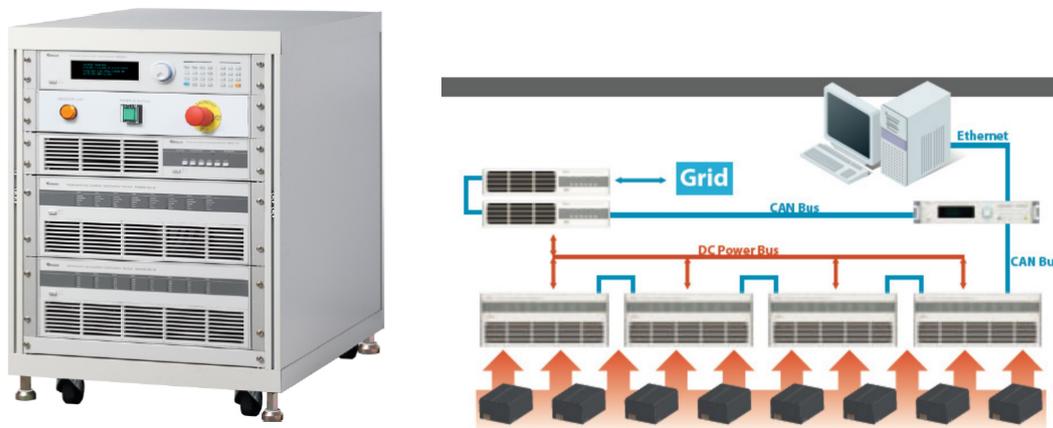
Los ensayos que se describen en las siguientes secciones se realizaron en locaciones del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. El equipamiento utilizado se compone de un equipo de ensayo de baterías y una caja contenedora de ensayos según se describe a continuación. Dicho equipamiento forma parte del Laboratorio de Vehículos Eléctricos de la Facultad y fue adquirido en el marco del proyecto ANIL.PEC_152509.

6.1.1. Equipo de ensayo de baterías

Para ensayar las celdas y el banco reutilizado se utilizó un equipo marca Chroma modelo 17020, que como se muestra en la Figura 6.1(a), consiste en un rack compuesto por diversas etapas, que en su conjunto permiten programar ensayos de carga y descarga controlada. Los diversos componentes del equipo se comunican mediante protocolos

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

CANBus y Ethernet y en la Figura 6.1(b) se ilustra el esquema de funcionamiento a nivel de hardware.



((a)) Potenciostato Chroma 17020 utilizado para realizar los ensayos. ((b)) Diagrama de HW del potenciostato Chroma 17020.

Figura 6.1: Equipo utilizado para los ensayos. Fuente: Manual de usuario Chroma.

Se describen brevemente los principales componentes del equipo de ensayos:

■ Unidad de comunicación de datos, modelo 692001

Es la interfaz de comunicación entre la PC donde se programan los ensayos y los diversos equipos que controlan la carga y descarga de la batería en cuestión (Inversor AC/DC, Téster de descarga y controlador de carga/descarga). A su vez, es capaz de soportar una comunicación mediante CANBus con un BMS, pudiendo recabar datos del estado individual de cada celda cuando se esté ensayando un banco.

■ Controlador de carga/descarga, modelo 69200-1

Es un equipo que a través de Ethernet es capaz de recibir desde la PC los perfiles de carga/descarga configurados por el usuario y convertirlos en parámetros que son levantados por el Téster de carga/descarga mediante protocolo CANBus. A su vez lee los datos de tensión, corriente y temperatura recogidos por el téster, guardándolos en la PC.

Este dispositivo también cuenta con una memoria interna en la que guarda los datos durante 60 minutos en caso de que la PC pierda el enlace de comunicación.

Características técnicas:

- Rango de tensión de alimentación: 90-250 Vac
- Frecuencia de alimentación: 50/60 Hz
- Máxima corriente de alimentación: 2 A
- Máxima potencia de alimentación: 50 VA

6.1. Equipo utilizado para los ensayos eléctricos

- Protocolos de comunicación: CANBus y Ethernet

■ **Convertor DC/AC bidireccional modelo A691101**

Este equipo convierte la corriente AC de la red en corriente DC para alimentar diversos componentes del equipo de ensayo y es el encargado de entregar las corrientes de carga para las baterías cuando se someten a esta etapa. Además, durante la descarga de la batería convierte la corriente DC entregada a corriente AC para volcarla a la red. Tiene una eficiencia de un 95 % en la conversión de energía y una distorsión armónica de corriente del orden del 5 %.

Características técnicas:

- Rango de tensión de entrada auxiliar: 90-250 Vac MODO AC/DC
- Rango de tensión AC de entrada: 190-250 Vac
- Rango de tensión DC de entrada: 400-440 Vdc
- Máxima corriente DC: 25 A
- Potencia nominal: 10 kW
- Factor de potencia: 0,9

■ **Téster de carga/descarga modelo 69206-60-8**

Es el equipo encargado de controlar las corrientes de carga y descarga de la batería conectada y es el elemento del equipo de ensayo que va directamente conectado a la batería a ensayar. Es capaz de controlar las tensiones y/o corrientes de carga/descarga según los parámetros de entrada. Cuenta con 8 canales de entrada, configurables para usar en paralelo o serie, según tensiones y corrientes del dispositivo a ensayar. A su vez, también cuenta con 4 canales de entrada de medida de temperatura a los que se conectan termocuplas.

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

Características técnicas:

- Rango de tensión por canal: 5-100 Vdc
- Máxima corriente por canal: 50 A
- Máxima potencia: 2,5 kW
- Resolución en medida de corriente: 5 mA
- Resolución en medida de tensión: 3mV
- Resolución en medida de potencia: 0,5 W
- Protecciones: sobretensión, subtensión, sobrecorriente y sobret temperatura.

6.1.2. Caja contenedora de ensayos

Dado que durante los ensayos las baterías pueden sufrir procesos electroquímicos que deriven en explosiones o incendios, todos los ensayos que se apliquen a las mismas se realizan dentro de un recinto apropiado. Por esto, se utiliza una caja contenedora anti-explosiva que es capaz de contener en su interior la explosión o incendio de la batería. Posee un sistema de ventilación forzada que extrae los gases en caso de que ocurra la ignición o explosión y también cuenta con iluminación interior para facilitar la inspección visual. Las características técnicas de la misma se muestran en la Tabla 6.5.

Volúmen interno	1000 × 1000 × 1000 mm
Material interno	Acero A3 de 1,3 mm de espesor con pintura al horno
Material externo	Acero de 1 mm de espesor
Puerta	Estructura de acero, con bisagras y ventana de inspección a prueba de explosiones
Tamaño de ventana de observación	250 × 250 mm
Energía de batería soportada	9 kWh

Tabla 6.1: Características constructivas de la caja contenedora de ensayos.

6.2. Resultados de ensayos a celdas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con los ensayos de capacidad estática y potencia realizados a las celdas, basados en los ensayos presentados en el Capítulo 5, con modificaciones adaptadas a la circunstancias del presente proyecto. Las modificaciones particulares realizadas en cada ensayo se explican en la sección correspondiente al ensayo en cuestión, pero existen algunas consideraciones que fueron tomadas a nivel general para todos los ensayos. Un ejemplo de un cambio considerado para todos los ensayos, es el hecho de que tanto la norma IEC 62660-1:2018 como el Manual de ensayos de USABC indican que estos deben realizarse a una temperatura controlada de 25 °C y 30 °C respectivamente. Sin embargo, dado que en las instalaciones donde se

6.2. Resultados de ensayos a celdas

realizaron los ensayos no se contaba con un sistema de control de temperatura, estos se realizaron a la temperatura ambiente existente durante cada ensayo, la cual varió entre 20 °C y 30 °C según reportes del propio equipo de ensayos.

6.2.1. Ensayo de capacidad estática

Para medir la capacidad en Ah de cada celda bajo una descarga a corriente constante de C/3 se realizó un ensayo de capacidad estática según fue descrito en la Sección 5.3.1. Este ensayo se realizó a las 24 celdas que componían la Batería A, presentada en la Sección 4.1 y tuvo una duración de 5 horas por celda. Para celdas dañadas la duración fue menor debido a que no fueron capaces de entregar la totalidad de su capacidad nominal o contaban con una tensión por debajo del rango de operación, impidiendo en dicho caso la realización del ensayo.

Con el presente ensayo se pretende caracterizar las celdas con las que se cuenta y en base a los resultados obtenidos se seleccionarán las celdas que podrían ser reutilizadas y pasan al ensayo de potencia. En esta sección se presentan los resultados más relevantes obtenidos, considerando los casos más representativos. La totalidad de los resultados se puede encontrar en el Anexo A.2.

6.2.1.1. Curva de carga CC-CV

Como se menciona en la Sección 2.2.5.5, para las baterías de litio se usa un perfil de carga CC-CV. En la Figura 6.2 se muestra la respuesta de una de las celdas al perfil de carga impuesto, elegido en función de las características de carga especificadas por el fabricante en 4.1. Como se observa, la carga se realizó a una corriente constante de 0,5C (25 A) hasta llegar a una tensión de 3,65 V (tensión de transición CC a CV), a partir de donde se comienza a cargar a tensión constante hasta que la corriente disminuya a 0,05C (2,5 A), momento en el cual se da por completada la carga (condición de parada del ensayo). Estos límites superiores e inferiores considerados para la carga de las celdas se extrajeron de la hoja de datos de las celdas modelo IFP23140160-50Ah del fabricante HEFEI HOYE ECOLENG TECHNOLOGY CO., LTD [28] considerada como referencia según lo mencionado en 4.1.

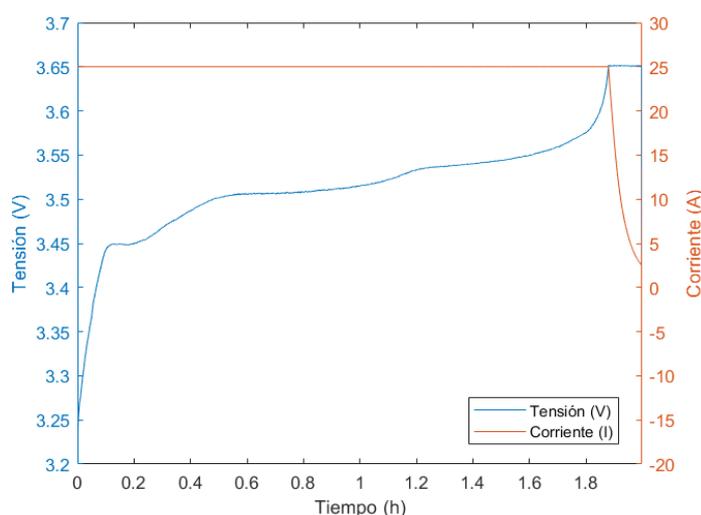


Figura 6.2: Respuesta de una de las celdas al perfil de carga CC-CV utilizado.

6.2.1.2. Perfil de descarga CC

Contando con la celda cargada, se procedió a realizar la descarga a una corriente constante de tasa $C/3$ como se establece en el ensayo de capacidad estática descrito en la Sección 5.3.1. En la Figura 6.3 se muestra en celeste el perfil de descarga obtenido para la celda L003 y como se observa, el mismo coincide con la curva teórica de la Figura 2.11 mencionada en el Capítulo 2, ya que la tensión permanece estable entre 3,3 V y 3,2 V entre el 80 % y el 5 % del SOC.

De acuerdo al perfil obtenido para la celda L003, se comprueba que al llegar al final de la descarga, el porcentaje de capacidad descargado es mayor al 95 % de la capacidad nominal, lo que brindó indicios de que esta celda podría ser reutilizada. Un comportamiento similar se obtuvo con otras 18 celdas de las 24 ensayadas. En cambio, como caso opuesto en la Figura 6.3 también se presenta en anaranjado el perfil de descarga de la celda L018, en el que se observa que el porcentaje de capacidad descargado fue cercano al 40 % del valor nominal, por lo que esta celda se consideró como no reutilizable. Por otra parte, para las celdas L013, L017, L019 y L024 se midió una tensión en circuito abierto menor a 2,5 V (tensión mínima de operación), por lo que no fue posible realizarles el ensayo de capacidad estática y las mismas se consideraron también como no reutilizables.

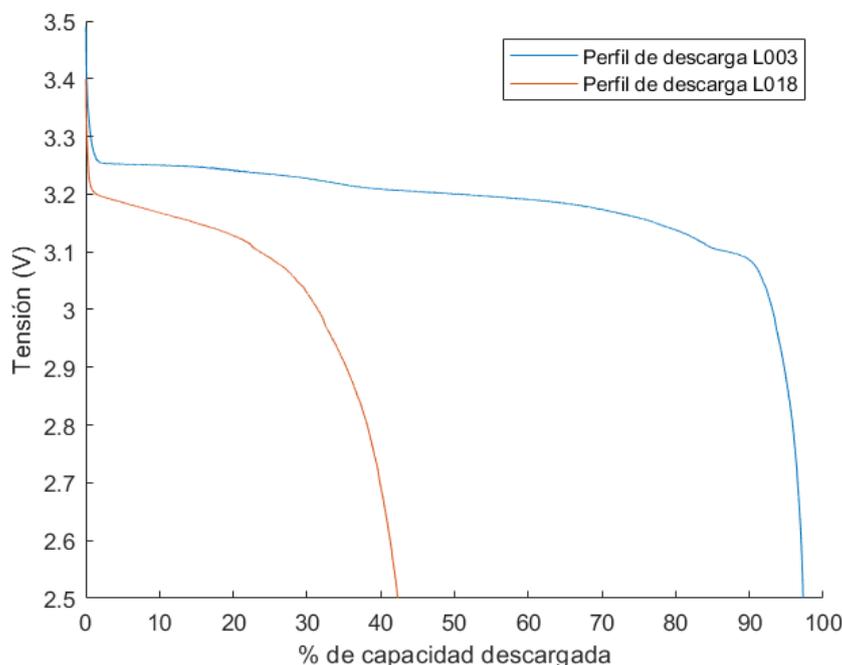


Figura 6.3: Perfil de descarga estática de las celdas L003 y L018 bajo una corriente de descarga de $C/3$.

6.2.1.3. Curva de capacidad estática

En la Figura 6.4(a) se presenta la curva de capacidad estática de la celda L003, donde se observa que esta alcanza los 48 Ah durante la carga y entrega 48 Ah en la descarga. El hecho de que la celda sea capaz de entregar la misma capacidad de Ah que absorbió durante la carga también es un buen indicador de que puede ser reutilizada, ya que la corriente de carga es aceptada por la celda y no existen fenómenos disipativos que impliquen una disminución de la carga efectiva aceptada (disponible para la descarga).

En contraste, en la Figura 6.4(b) se presenta la curva de capacidad estática de la celda L018, que alcanza solamente 7,5 Ah durante la carga y entrega 21 Ah durante la descarga. Se observa que la celda L018 además de no entregar una capacidad cercana al valor nominal según el perfil de la Figura 6.3, tampoco es capaz de absorber carga. Analizado el perfil obtenido durante la carga de la celda L018, graficado en la Figura 6.5, se constató que durante la etapa de carga a CC, la tensión de la celda aumentó alcanzando rápidamente los 3,65 V, por lo que la carga se realizó casi en solamente con la etapa CV. Esto se debió a que el método de carga utilizado pasa a una etapa CV cuando la tensión de la celda alcanza los 3,65 V, continuando la carga en este modo, disminuyendo drásticamente la corriente hasta alcanzar el umbral de 2,5 A, donde el ensayo se da por finalizado.

Además de esto, la descarga de la celda L018 representó una situación atípica, ya que según los datos medidos, se descargó una capacidad en Ah mayor que la absorbida en el proceso de carga. Una vez constatado esto, se intentó realizar nuevamente el ensayo de

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

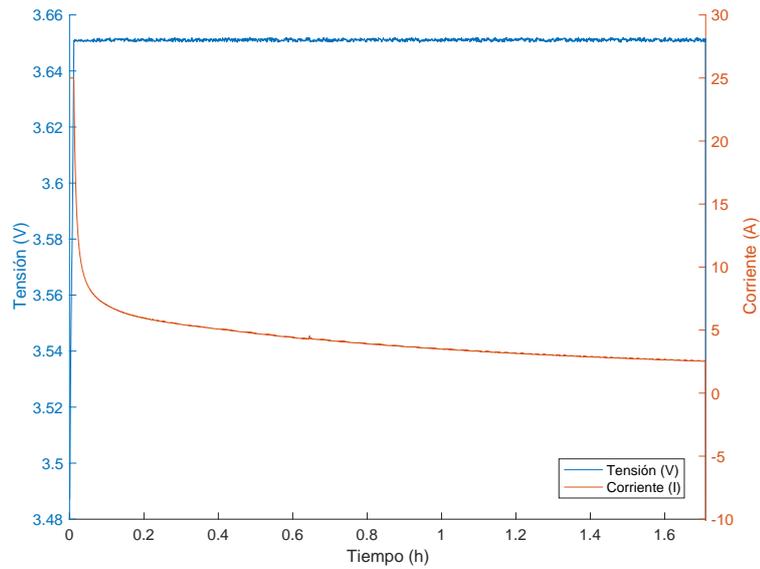
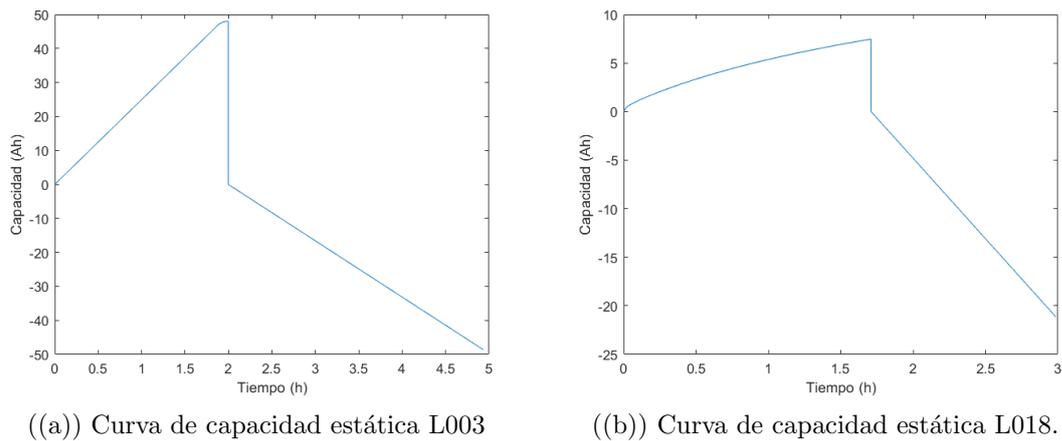


Figura 6.5: Perfil de carga CC-CV de la celda L018, tensión y corriente en función del tiempo.

capacidad para descartar que este fenómeno estuviera asociado a un error en los datos recabados. Al intentar cargar la celda para repetir el ensayo, la misma contaba con una tensión de 0,02 V, por lo que las protecciones ajustadas para el ensayo impidieron la realización del mismo, por tratarse de una tensión por debajo del mínimo de operación. Por lo tanto, el hecho de que la celda L018 haya descargado más capacidad en Ah que los absorbidos durante la carga, implicó una situación anormal respecto al resto de las celdas, no siendo posible atribuir el fenómeno a ninguno de los procesos estudiados en el Capítulo 2, pudiendo requerir un estudio más profundo.



((a)) Curva de capacidad estática L003

((b)) Curva de capacidad estática L018.

Figura 6.4: Capacidad en función del tiempo de celdas L003 y L018.

6.2.1.4. Energía disponible bajo una descarga a C/3

Con el ensayo de capacidad estática también es posible calcular la energía que entrega la celda bajo una descarga de C/3, según la ecuación 5.7 del Capítulo 5. Además, midiendo la masa de cada celda acorde a la Sección 5.1.1, es posible determinar la energía específica (Wh/kg) de cada celda según la ecuación 5.8. Los resultados de energía disponible y energía específica de cada celda ante una descarga de C/3 se presentan en la Tabla 6.2 y la masa de las celdas se detalla en el Anexo A en la Tabla A.1.

6.2.1.5. Conclusiones y resumen del ensayo de capacidad estática

Al concluir los ensayos de capacidad estática de todas las celdas, se observa que de un total de 24 celdas, 19 de ellas entregaron más de un 95 % de su capacidad nominal, manteniendo un perfil de tensión estable entre el 80 % y 5 % del SOC. En vista de estos valores, se toma como criterio de aceptación que las celdas con una capacidad mayor o igual al 95 % respecto a la nominal, pasan el ensayo y continúan su evaluación con el ensayo de potencia que se describe en la Sección 6.2.2.

En la Tabla 6.2 se resumen los resultados de capacidad y energía disponible de las celdas ensayadas, remarcando en rojo la celda que menor capacidad presentó, y en verde la de mayor capacidad entregada. En particular, además de la celda L018 que no es capaz de absorber carga y por ende tampoco entregar una capacidad cercana a la nominal, otras cuatro celdas presentaron una tensión de circuito abierto por debajo del mínimo de operación, por lo que fueron descartadas.

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

Celda	Capacidad estática (Ah)	% de la capacidad nominal	Energía disponible (Wh)	Energía específica (Wh/kg)	Comentarios
L001	48,92	97,84 %	152,71	134,4	Pasa el ensayo
L002	48,92	97,84 %	152,22	135,4	Pasa el ensayo
L003	48,63	97,26 %	154,68	136,2	Pasa el ensayo
L004	48,69	97,38 %	147,13	130,8	Pasa el ensayo
L005	49,94	99,88 %	158,85	141,2	Pasa el ensayo
L006	49,50	99,00 %	158,10	140,8	Pasa el ensayo
L007	48,93	97,86 %	152,37	132,3	Pasa el ensayo
L008	49,37	98,74 %	154,12	136,6	Pasa el ensayo
L009	49,02	98,04 %	156,98	138,2	Pasa el ensayo
L010	48,78	97,56 %	157,32	138,0	Pasa el ensayo
L011	49,21	98,42 %	158,26	141,1	Pasa el ensayo
L012	47,99	95,98 %	147,28	130,3	Pasa el ensayo
L013	N/A	N/A	N/A	N/A	En la descarga previa al ensayo se mide una tensión menor a 2,5 V
L014	48,91	97,82 %	151,22	131,0	Pasa el ensayo
L015	48,25	96,50 %	150,47	132,8	Pasa el ensayo
L016	49,07	98,14 %	153,41	134,6	Pasa el ensayo
L017	N/A	N/A	N/A	N/A	En la descarga previa al ensayo se mide una tensión menor a 2,5 V
L018	21,15	43,00 %	64,56	59,9	
L019	N/A	N/A	N/A	N/A	En la descarga previa al ensayo se mide una tensión menor a 2,5 V
L020	49,67	99,34 %	153,65	136,5	Pasa el ensayo
L021	48,80	97,60 %	150,61	132,8	Pasa el ensayo
L022	48,36	96,72 %	155,39	136,8	Pasa el ensayo
L023	48,87	97,74 %	156,89	137,1	Pasa el ensayo
L024	N/A	N/A	N/A	N/A	En la descarga previa al ensayo se mide una tensión menor a 2,5 V

Tabla 6.2: Resultados del ensayo de capacidad estática realizado a las celdas de LiFePO_4 de la batería A. Se presenta la capacidad en Ah, la energía disponible y la energía específica de cada celda ante una descarga de corriente constante de tasa C/3.

6.2.2. Resultados del ensayo de potencia

A las 19 celdas que pasaron el ensayo de capacidad estática se realizó un ensayo de potencia que combina el ensayo HPPC descrito en la Sección 5.3.2 con el ensayo de Potencia máxima descrito en la Sección 5.3.3. El ensayo de potencia realizado utiliza un perfil híbrido de potencia como el HPPC con la diferencia de que se consideraron pulsos de carga y descarga de 10 segundos de duración, ambos separados por un período de reposo de 60 segundos de duración. El perfil utilizado se muestra en la Figura 6.6 y como se observa, el pulso de descarga tiene una amplitud igual al valor de la máxima corriente de descarga I_{max} informada en la hoja de datos de referencia [28], es decir 2C (100 A), mientras que el pulso de carga tiene un valor de $0,75 \times I_{max}$, es decir 1,5C (75 A).

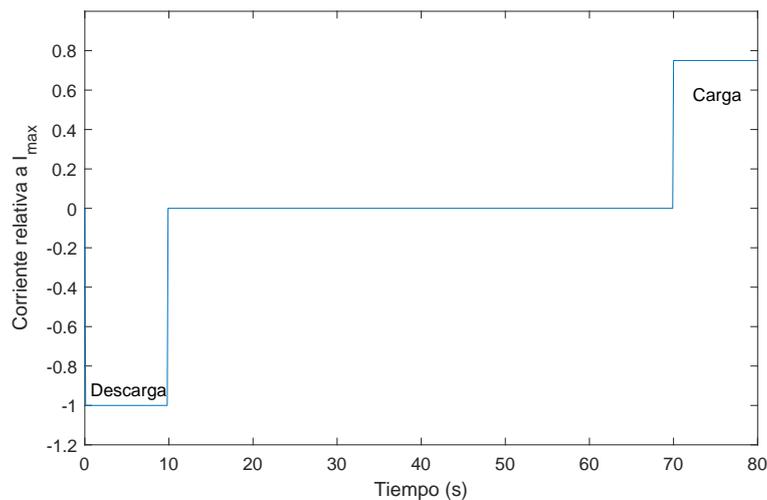


Figura 6.6: Perfil utilizado en el ensayo de potencia realizado. Fuente: elaboración propia.

Una diferencia no menor entre el ensayo de potencia realizado y el ensayo HPPC descrito en la Sección 5.3.2, fue que se eliminó el período de 1 hora de reposo luego de cada ciclo, aplicando todos los ciclos sin descanso entre ellos. Esta decisión fue tomada para reducir la duración del ensayo a aproximadamente 6 horas, frente a las 15 horas que tomaría realizar el ensayo HPPC tal cual se define en el Manual de ensayo de USABC [15]. Considerando que se debía realizar el ensayo de potencia a 19 celdas y no se contaba con opción de controlar los ensayos de manera remota, resultó inviable realizar ensayos de tan larga duración como la del HPPC, por lo que se decidió suprimir el período de reposo basándose en el hecho de que el ensayo de potencia máxima 5.3.3 tampoco lo consideraba. Además se consideró que al quitar dichos intervalos, se estaría del lado conservador debido a que el ensayo sería más exigente por no permitir a las celdas alcanzar su estabilidad electroquímica y térmica antes de cada ciclo.

Por otro lado, en la Sección 2.1.3.5 del Capítulo 2 se mencionó que si una celda o batería es descargada de manera intermitente dejando períodos de reposo entre la descarga, se podría obtener una capacidad mayor que en el caso de realizar una descarga continua. En dicha sección se señaló que este efecto de recuperación es más notorio para descargas con altas tasas de corriente dado que en esos casos los efectos de polarización

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

son mayores. Según lo establecido por el Manual de ensayos de USABC, el reposo entre ciclos se debería dejar luego de cada etapa de descarga del 10 % de capacidad que se realiza a una tasa de $C/3$. Dado que este valor de corriente es bajo, según lo mencionado, se asume que el efecto de recuperación que se tendría si se hubiesen dejado los períodos de reposo sería poco notorio.

Por los motivos expuestos, se decidió eliminar el tiempo de reposo de 1 hora entre ciclos en el ensayo de potencia. En virtud de esto, a excepción de los pasos 2 y 5, el ensayo de potencia se realizó según el procedimiento del ensayo HPPC desarrollado en la Sección 5.3.2, utilizando un perfil con las modificaciones mencionadas. Se consideró que una celda completó satisfactoriamente el ensayo si es capaz de completar todos los ciclados sin salir de los límites de tensión de operación. En esta sección se presentan los resultados más relevantes del ensayo de potencia, considerando los casos más representativos. La totalidad de los resultados se puede encontrar en el Anexo A.3.

6.2.2.1. Perfil de tensión y corriente obtenido

En la Figura 6.7 se muestra el perfil de tensión y corriente obtenido durante el ensayo de potencia, donde se observan los 9 ciclos en los que se aplica el perfil de potencia de la Figura 6.6 y las 9 etapas en las que se realiza una descarga del 10 % de la capacidad a $C/3$, acorde al procedimiento del ensayo HPPC mencionado en la Sección 5.3.2. En dicho perfil también se observa que la tensión de la celda durante las descargas a $C/3$ tiene una evolución similar a la obtenida en el ensayo de capacidad estática y mostrada en la Figura 6.3. En la ampliación realizada a uno de los ciclos de potencia de la Figura 6.7 se presenta cómo evoluciona la tensión de la celda ante el perfil de potencia, observándose que la tensión disminuye cuando se aplica el pulso de descarga y aumenta con el pulso de carga, mientras que durante el período de 60 s de reposo, la tensión intenta alcanzar un valor de equilibrio electroquímico de circuito abierto.

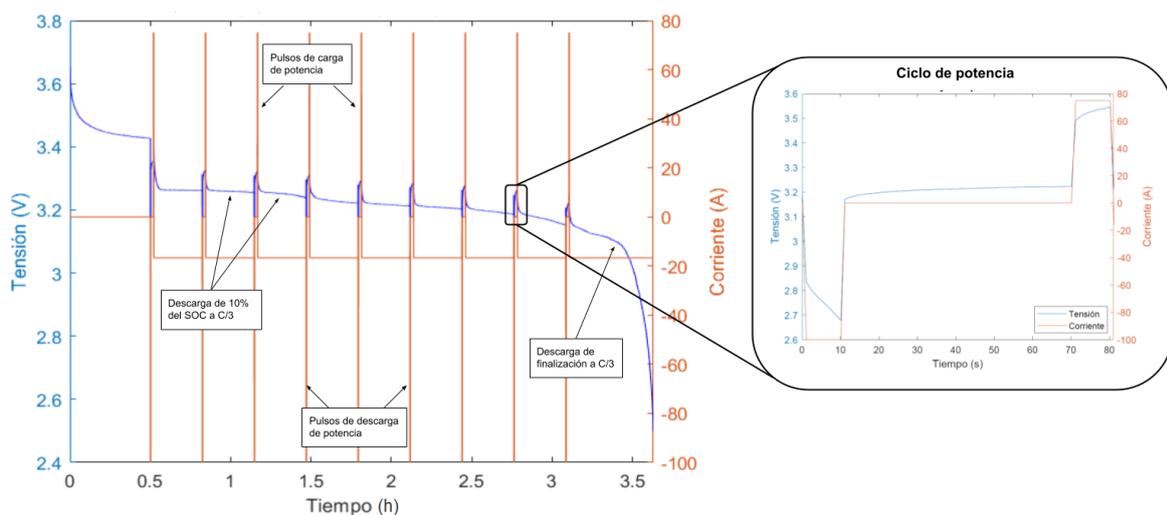


Figura 6.7: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, celda L001. Se muestra ampliada la evolución de la tensión y corriente durante uno de los perfiles de potencia de la Figura 6.6.

6.2. Resultados de ensayos a celdas

De forma similar, en la Figura 6.8 se presenta la corriente y la capacidad de la celda L001 durante el ensayo. Se observa que en cada pulso de descarga de $C/3$, la celda entrega aproximadamente 10% de su capacidad en Ah, por lo que realizando 9 ciclos, la celda habrá entregado el 90% de su capacidad en Ah según lo requerido en el ensayo.

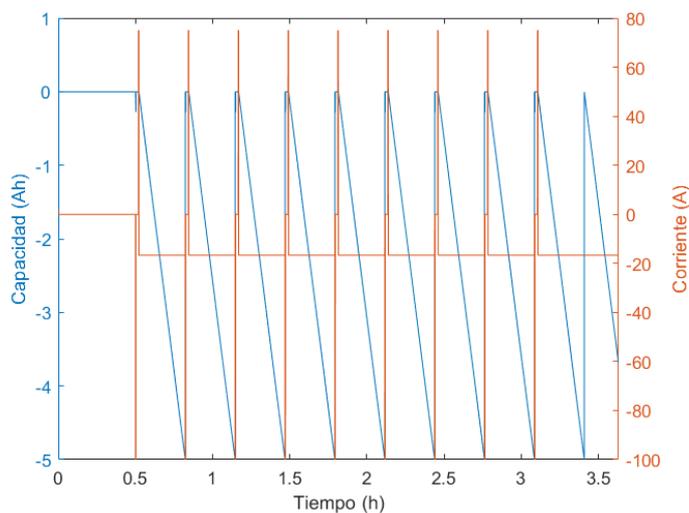


Figura 6.8: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, celda L001.

6.2.2.2. Potencia de pulso de descarga y carga

En este ensayo se debe calcular la potencia entregada o absorbida durante un pulso de descarga o carga respectivamente, por lo que se explica a continuación el procedimiento de cálculo para la potencia de descarga y de forma análoga se puede obtener la potencia de carga. El primer paso es dividir los datos de forma de mantener solo la parte del ciclo que interesa, en este caso se considera solo el pulso de descarga. Posteriormente se calcula la potencia instantánea haciendo la multiplicación punto a punto entre corriente y tensión durante el pulso y se calcula su valor promedio. Dado que durante el ensayo se tienen 9 pulsos de descarga, realizando este procedimiento para cada pulso se obtendrá un vector con 9 valores de potencia media distintos, los que se grafican en la Figura 6.9. Como se pretende indicar un único valor de pulso de potencia de descarga para comparar y caracterizar las celdas, se decide tomar como resultado final el peor caso, siendo esta la potencia de menor valor absoluto obtenida en los 9 pulsos de descarga. Los resultados de potencia de descarga y carga se presentan en la Tabla 6.3.

En la Figura 6.9 se observa la evolución de la potencia de pulso de carga y descarga en función del número de ciclo y se constata que ambas se mantienen aproximadamente constantes con una variación menor al 5% a lo largo del ensayo. Recordando que en cada ciclo se realiza la descarga de un 10% de la capacidad total en Ah, se concluye que la habilidad de la celda para entregar pulsos de $2C$ y recibir pulsos de $1,5C$ durante 10 s de duración, no varía para un SOC entre el 100% y 10%. Si bien en la Figura 6.9 se ilustra solo la evolución de potencia de la celda L001, se comprobó que para el resto de celdas la potencia de pulso también se mantuvo constante durante los ciclados del ensayo, como

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

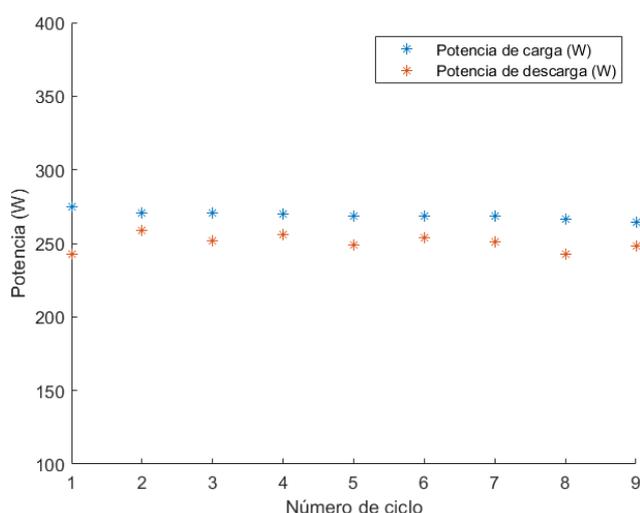


Figura 6.9: Evolución de la potencia de descarga y carga durante los perfiles de potencia.

se muestra en la sección Anexo A.3. Para el cálculo de potencia, el único término que varía es la tensión (la corriente se mantiene constante a lo largo de todo el pulso), por lo que también se concluye que la tensión no varía significativamente entre un ciclo y otro.

6.2.2.3. Conclusiones y resumen del ensayo de potencia

Realizado el ensayo de potencia se calculó el valor de potencia de pulso de descarga y carga que pueden respectivamente entregar y absorber las celdas, lo que se presenta en la Tabla 6.3. De las 19 celdas ensayadas se observó que 15 pasaron el ensayo de potencia operando siempre dentro de los límites de tensión declarados por el fabricante, mientras que hubo 4 celdas que alcanzaron el límite inferior de tensión de operación durante alguno de los pulsos de descarga, debido a que la tensión de la celda disminuye en tal situación de acuerdo a lo mostrado en la Figura 6.6. Por lo tanto, se concluye que de las 24 celdas que conformaban la Batería A de LiFePO_4 recibida, el 62,5% de las celdas pasaron el ensayo de potencia y mostraron tener la capacidad de entregar y recibir un valor estable de potencia durante todo el ensayo, teniendo variaciones menores al 5% para un amplio rango del SOC (entre 100% y 10%).

6.2. Resultados de ensayos a celdas

Celda	Pulso de potencia de descarga (W)	Pulso de potencia de carga (W)	Pulso de potencia de descarga específica (W/kg)	Pulso de potencia de carga específica (W/kg)	Comentarios
L001	242,3	264,2	213,3	232,6	Pasa ensayo de potencia
L002	228,9	278,6	203,6	247,9	No pasa, se alcanza $V_{min_{op}}$ (2,5 V) en el séptimo pulso de descarga.
L003	246,1	265,2	216,6	233,5	Pasa ensayo de potencia
L004	261,7	285,9	230,0	251,2	No pasa, se alcanza $V_{min_{op}}$ (2,5 V) en el segundo pulso de descarga.
L005	286,6	252,3	254,8	224,3	Pasa ensayo de potencia
L006	253,9	261,6	226,1	233,0	Pasa ensayo de potencia
L007	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasa, se alcanza $V_{min_{op}}$ (2,5 V) en el primer pulso de descarga.
L008	271,9	267,7	281,1	237,4	Pasa ensayo de potencia
L009	275,8	266,5	242,7	234,6	Pasa ensayo de potencia
L010	253,3	256,9	222,2	225,4	Pasa ensayo de potencia
L011	250,0	263,9	222,8	235,2	Pasa ensayo de potencia
L012	240,9	259,9	212,7	288,8	Pasa ensayo de potencia
L013	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasó ensayo de capacidad.
L014	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasa, se alcanza $V_{min_{op}}$ (2,5 V) en el primer pulso de descarga.
L015	220,7	281,0	194,83	248,1	Pasa ensayo de potencia
L016	209,1	283,5	183,4	248,7	Pasa ensayo de potencia
L017	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasó ensayo de capacidad.
L018	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasó ensayo de capacidad.
L019	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasó ensayo de capacidad.
L020	271,2	262,3	240,8	233,0	Pasa ensayo de potencia
L021	267,0	267,7	235,45	236,3	Pasa ensayo de potencia
L022	252,7	265,2	222,5	233,4	Pasa ensayo de potencia
L023	259,6	269,0	226,9	235,1	Pasa ensayo de potencia
L024	N/A	N/A	N/A	N/A	No pasó ensayo de capacidad

Tabla 6.3: Pulso de potencia de descarga y carga obtenido en el ensayo de potencia realizado a las celdas de LiFePO_4 . También incluye el valor de los pulsos de potencia por unidad de masa. Cabe recordar que la potencia tabulada es el mínimo valor de potencia media obtenido de los 9 ciclos que conforman el ensayo de potencia.

6.3. Selección de celdas reutilizables

Para la selección de celdas a reutilizar se tomó como criterio considerar las que pasaron satisfactoriamente el ensayo de capacidad y el de potencia según se ilustra en la Figura 6.10. Por lo tanto, por un lado se consideró la capacidad arrojada del ensayo de capacidad estática (Tabla 6.2), quedando totalmente descartadas las celdas cuya capacidad medida se alejó más de un 5 % del valor nominal. De las celdas que cumplieron con esta condición, se seleccionaron las que también fueron capaces de soportar el estrés inducido por el ciclo del ensayo de potencia sin salirse del rango de tensión de operación. Como se señaló en la Sección 6.2.2.3, solo 15 de las 24 celdas evaluadas superaron ambos ensayos. Dado que uno de los requerimientos del banco de baterías reutilizado a construir era contar con 16 celdas para lograr una tensión mayor a 48 V, estas 15 celdas fueron seleccionadas como reutilizables. Luego el banco se completó con la celda L002 que fue la que mejor comportamiento tuvo de las que no pasaron el ensayo de potencia, ya que alcanzó superar 7 ciclados antes de que su tensión saliera del rango de operación. Las celdas L004, L007 y L014 no fueron seleccionadas para formar el banco debido a que las mismas sobrepasaron los límites de tensión de operación en el primer o segundo ciclo del ensayo de potencia. Cabe señalar que el hecho de tomar la celda L002 para integrar el banco implica el riesgo de que cuando se realice el ensayo de potencia al banco, este no pueda superar el séptimo ciclo de potencia.

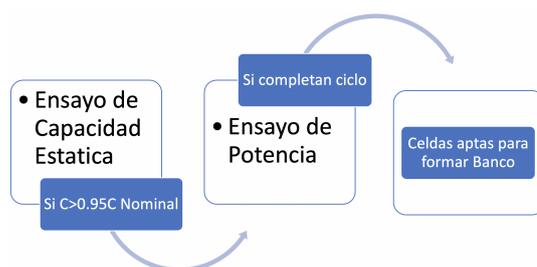


Figura 6.10: Procedimiento de selección de celdas aptas para formar el banco en base a la realización de ensayos. Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar, que dada la cantidad de celdas que cumplieron satisfactoriamente ambos ensayos, no se tuvo margen para elegir. En cambio si se hubiese contado con más de 16 celdas potencialmente reutilizables por haber cumplido con los ensayos, se habrían elegido las 16 celdas que mejor cumplieran con los siguientes criterios:

1. **Emparejamiento en capacidad:** para lograr que el banco contara con la mayor capacidad en Ah posible, de los resultados obtenidos con el ensayo de capacidad estática, se hubiesen elegido las celdas con mayor capacidad, ya que debido a que el banco se construirá realizando la conexión en serie de las mismas, la capacidad del banco estará determinada por la celda de menor capacidad. Además, las celdas seleccionadas deberían contar con un valor similar de capacidad en Ah para que el banco se encontrara lo más balanceado posible en capacidad.
2. **Mayor energía de descarga a C/3:** de acuerdo a la energía entregada durante el ensayo de capacidad estática, calculada en la Sección 6.2.1.4, se hubiesen selec-

6.3. Selección de celdas reutilizables

cionado las celdas con mayor energía disponible, lo que es necesario para mantener la velocidad del vehículo que utilice el banco, en el caso de que el mismo se aplicara a electromovilidad.

3. **Mayor potencia de pulso:** para que el banco contara con la mayor descarga y recarga de pulsos de potencia, se hubiese seleccionado las celdas que hayan entregado los mayores niveles de potencia durante los ciclos del ensayo de potencia.

Finalmente, en la Tabla 6.4 se resumen las celdas que se consideraron aptas para construir un banco de baterías reutilizado como se detalla en el Capítulo 7. Las celdas que fueron descartadas se enviaron a la Facultad de Química de la Universidad de la República para ser utilizadas en una tesis de maestría realizada en el marco del proyecto “Recuperación de Metales a partir de Baterías Agotadas de Ion Litio por Métodos Hidrotérmicos”, financiado por el Fondo Clemente Estable de la ANII que será ejecutado entre abril 2022 y marzo 2024, y cuenta con investigadores del Área Físicoquímica y del Instituto Polo Tecnológico de Pando de la Facultad de Química.

Celda	Reutilizable	Comentarios
L001	Sí	-
L002	Sí	Baja tensión (2,5 V) en el séptimo pulso de descarga.
L003	Sí	-
L004	No	Baja tensión (2,5 V) en el segundo pulso de descarga.
L005	Sí	-
L006	Sí	-
L007	No	Baja tensión (2,5 V) en el primer pulso de descarga.
L008	Sí	-
L009	Sí	-
L010	Sí	-
L011	Sí	-
L012	Sí	-
L013	No	Se descarta, no pasa ensayo de capacidad
L014	No	Baja tensión (2,5 V) en el primer pulso de descarga.
L015	Sí	-
L016	Sí	-
L017	No	Se descarta, no pasa el ensayo de capacidad
L018	No	Se descarta, no pasa el ensayo de capacidad
L019	No	Se descarta, no pasa el ensayo de capacidad
L020	Sí	-
L021	Sí	-
L022	Sí	-
L023	Sí	-
L024	No	Se descarta, no pasa el ensayo de capacidad

Tabla 6.4: Resumen de selección de celdas para la construcción del banco reutilizado.

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

Se describen brevemente los principales componentes del equipo de ensayos:

■ **Unidad de comunicación de datos, modelo 692001**

Es la interfaz de comunicación entre la PC donde se programan los ensayos y los diversos equipos que controlan la carga y descarga de la batería en cuestión (Inversor AC/DC, Téster de descarga y controlador de carga/descarga). A su vez, es capaz de soportar una comunicación mediante CANBus con un BMS, pudiendo recabar datos del estado individual de cada celda cuando se esté ensayando un banco.

■ **Controlador de carga/descarga, modelo 69200-1**

Es un equipo que a través de Ethernet es capaz de recibir desde la PC los perfiles de carga/descarga configurados por el usuario y convertirlos en parámetros que son levantados por el Téster de carga/descarga mediante protocolo CANBus. A su vez lee los datos de tensión, corriente y temperatura recogidos por el téster, guardándolos en la PC.

Este dispositivo también cuenta con una memoria interna en la que guarda los datos durante 60 minutos en caso de que la PC pierda el enlace de comunicación.

Características técnicas:

- Rango de tensión de alimentación: 90-250 Vac
- Frecuencia de alimentación: 50/60 Hz
- Máxima corriente de alimentación: 2 A
- Máxima potencia de alimentación: 50 VA
- Protocolos de comunicación: CANBus y Ethernet

■ **Convertor DC/AC bidireccional modelo A691101**

Este equipo convierte la corriente AC de la red en corriente DC para alimentar diversos componentes del equipo de ensayo y es el encargado de entregar las corrientes de carga para las baterías cuando se someten a esta etapa. Además, durante la descarga de la batería convierte la corriente DC entregada a corriente AC para volcarla a la red. Tiene una eficiencia de un 95% en la conversión de energía y una distorsión armónica de corriente del orden del 5%.

Características técnicas:

- Rango de tensión de entrada auxiliar: 90-250 Vac MODO AC/DC
- Rango de tensión AC de entrada: 190-250 Vac
- Rango de tensión DC de entrada: 400-440 Vdc
- Máxima corriente DC: 25 A
- Potencia nominal: 10 kW
- Factor de potencia: 0,9

- **Téster de carga/descarga modelo 69206-60-8**

Es el equipo encargado de controlar las corrientes de carga y descarga de la batería conectada y es el elemento del equipo de ensayo que va directamente conectado a la batería a ensayar. Es capaz de controlar las tensiones y/o corrientes de carga/descarga según los parámetros de entrada. Cuenta con 8 canales de entrada, configurables para usar en paralelo o serie, según tensiones y corrientes del dispositivo a ensayar. A su vez, también cuenta con 4 canales de entrada de medida de temperatura a los que se conectan termocuplas.

Capítulo 6. Resultados de ensayos realizados y determinación de celdas a reutilizar

Características técnicas:

- Rango de tensión por canal: 5-100 Vdc
- Máxima corriente por canal: 50 A
- Máxima potencia: 2,5 kW
- Resolución en medida de corriente: 5 mA
- Resolución en medida de tensión: 3mV
- Resolución en medida de potencia: 0,5 W
- Protecciones: sobretensión, subtensión, sobrecorriente y sobretemperatura.

6.3.1. Caja contenedora de ensayos

Dado que durante los ensayos las baterías pueden sufrir procesos electroquímicos que deriven en explosiones o incendios, todos los ensayos que se apliquen a las mismas se realizan dentro de un recinto apropiado. Por esto, se utiliza una caja contenedora anti-explosiva que es capaz de contener en su interior la explosión o incendio de la batería. Posee un sistema de ventilación forzada que extrae los gases en caso de que ocurra la ignición o explosión y también cuenta con iluminación interior para facilitar la inspección visual. Las características técnicas de la misma se muestran en la Tabla 6.5.

Volúmen interno	1000 × 1000 × 1000 mm
Material interno	Acero A3 de 1,3 mm de espesor con pintura al horno
Material externo	Acero de 1 mm de espesor
Puerta	Estructura de acero, con bisagras y ventana de inspección a prueba de explosiones
Tamaño de ventana de observación	250 × 250 mm
Energía de batería soportada	9 kWh

Tabla 6.5: Características constructivas de la caja contenedora de ensayos.

Capítulo 7

Banco de baterías construido

Conforme al objetivo del proyecto, con las celdas potencialmente reutilizables que fueron seleccionadas según lo descrito en el Capítulo 6, se buscó construir un banco de baterías capaz de funcionar como sistema de almacenamiento de energía. El banco construido se puede observar en la Figura 7.1 y está formado por las 16 celdas de LiFePO_4 seleccionadas según la Sección 6.3, por un BMS y por un gabinete contenedor. En el presente capítulo se detallan las características de estos tres componentes y cómo se interrelacionan entre sí. Se exponen los requerimientos físicos, constructivos y de seguridad para la fabricación y ensamblado del banco, profundizando en las características constructivas del gabinete y su elaboración. También se explica el método utilizado para conectar los bornes de las baterías, el BMS adquirido y cómo este fue integrado al banco.



Figura 7.1: Banco de baterías construido. Se observan las 16 celdas interconectadas dentro del gabinete contenedor y el BMS con sus respectivas sondas de tensión conectadas a las celdas. Para facilitar la visión de los componentes, se extrajo la tapa superior y la tapa lateral.

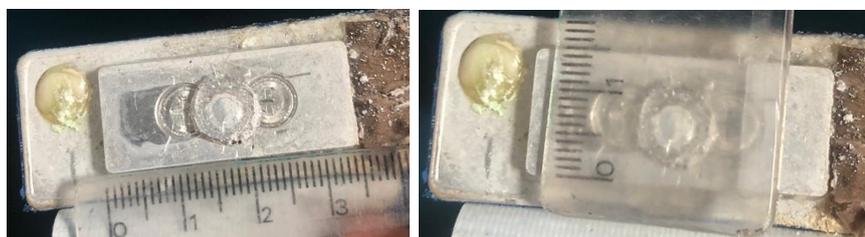
7.1. Conexión de celdas

La batería recibida contaba con 24 celdas conectadas en serie, interconectadas entre sí mediante una placa de metal soldada a los bornes con una soldadura láser. Dado que no se contó con la tecnología necesaria para realizar una soldadura similar, se procedió a interconectar las celdas mediante una conexión roscada, atornillada directamente en cada borne.

7.1.1. Métodos de conexión de bornes realizados

Las celdas utilizadas cuentan con bornes rectangulares de 35 mm de largo, 15 mm de ancho y aproximadamente 3 mm de profundidad, ver Figura 7.2. Debido al reducido espesor del borne, en una primera instancia se decidió acoplar un tornillo (que oficiaría como un terminal roscado del borne) a través de una pieza de aluminio con forma de omega mediante cuatro tornillos más pequeños, para brindar una adecuada rigidez mecánica en la conexión, acorde a la manipulación que tendrá el banco. Esta conexión se ilustra en la Figura 7.3 y constaba de las siguientes partes:

- **Tornillo de conexión:** tornillo hexagonal 8.0 mm x 1/2" que configura el borne roscado de la celda.
- **Omega de aluminio:** pieza de aluminio de 1 mm de espesor, moldeada con una forma omega como la que se muestra en la Figura 7.3.
- **Tuerca de sujeción:** tuerca hexagonal 8.0 mm que aprieta el tornillo contra la omega de aluminio.
- **Tornillos de sujeción** cuatro tornillos 2 mm x 7 mm Phillips atornillados directamente en los bornes para fijar la omega de aluminio contra el borne.
- **Suplemento:** trozo de planchuela de aluminio de 2 mm de espesor utilizado como suplemento para completar el largo de los tornillos de sujeción, ya que la profundidad del borne es de 3 mm aproximadamente.



((a)) Largo.

((b)) Ancho.

Figura 7.2: Dimensiones de los bornes de las celdas.

7.1. Conexión de celdas

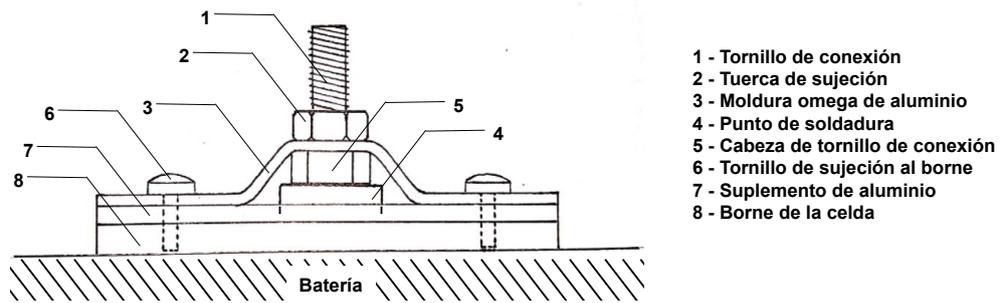


Figura 7.3: Esquema de pieza roscada diseñada para interconectar las celdas. Elaboración propia.

Dado que los bornes se encontraban fabricados con un material blando y fácilmente maleable, los mismos se perforaron en cuatro puntos con una mecha con un diámetro apenas menor que el de los tornillos de sujeción, de manera de que los mismos pudieran roscar las paredes del orificio al ser atornillados. Un aspecto crítico de este procedimiento es que al realizar los orificios en los bornes, se debe tener mucho cuidado de no perforar la celda más allá de la profundidad de su borne, lo que podría ocasionar una fuga de gases hacia el exterior y provocar daños a la batería y al operario. Como condiciones de seguridad para realizar este procedimiento se recomienda utilizar un taladro de banco en el que se pueda colocar de forma fija y estable la celda, graduar la profundidad de la mecha en el mandril del taladro de manera que solo sobresalga la profundidad del borne (aproximadamente 3 mm), realizar los orificios lentamente y con cuidado, utilizar antiparras o máscara como protección ante una eventual perforación del sellado de la batería y fuga de gases.

Se conectaron los bornes de las 19 celdas que pasaron el ensayo de capacidad estática, según lo mencionado en 6.2.1.5. Por lo tanto, en total se realizaron 38 piezas de conexión de bornes. En la Figura 7.4 se muestran las partes que componen la conexión de cada borne y el resultado obtenido una vez finalizado el montaje del borne.



(a) Partes que conforman una pieza de conexión.



(b) Omega con tornillo de conexión y suplemento sobre el borne sin atornillar.



(c) Borne con la pieza conectada.

Figura 7.4: Montaje de pieza de conexión del borne.

Sin embargo, cuando se interconectaron las celdas para constituir el banco, se identificaron problemas mecánicos y eléctricos con este método de conexión de bornes que causaron la necesidad de buscar otro método. Algunos de los problemas encontrados con

Capítulo 7. Banco de baterías construido

este método de conexión fueron los siguientes:

- Rotura de algunos de los tornillos de sujeción al intentar apretarlos en el borne.
- Dado que el material del que se componen los bornes es muy blando, la rosca realizada en los mismos se borraba con facilidad, causando que los tornillos no apretaran la pieza de aluminio contra el borne y por lo tanto una mala conductividad eléctrica y baja endurance mecánica del borne.
- Mala conductividad eléctrica debido a que se utilizó aluminio anodizado para fabricar las piezas, el cual se desconocía que contaba con un recubrimiento con una capa aislante, causando que el contacto eléctrico se realizara solamente a través de los tornillos de sujeción que se roscaban al borne.
- Dada la mala conductividad eléctrica, se identificó que los bornes calentaban y se observaron chispas en los contactos cuando el borne se intentaba cargar o descargar según lo realizado en en el Capítulo 8.
- De acuerdo a los problemas mencionados, se producían falsos contactos en los bornes de algunas de las celdas, lo que ocasionó que la lectura de tensión del BMS estuviera corrupta, causando la desconexión del banco de manera errónea.

Para solucionar estos problemas y contar con una conexión con mayor rigidez mecánica y mejor conductividad eléctrica, se decidió atornillar directamente en el punto de soldadura del borne, un solo tornillo de mayor sección que los utilizados anteriormente, el que se ajusta al borne con una tuerca. Al utilizar el punto de soldadura se contó con más de 1 mm de espesor adicional para roscar el tornillo y aumentar la rigidez mecánica de este. Además el material del punto de soldadura es más duro por lo que no es tan fácil borrar la rosca realizada en el mismo, respecto a la realizada en el material del borne. Cabe mencionar que la rosca en este caso se realizó con un macho correspondiente al tornillo a colocar, logrando una rosca mucho más definida que la realizada con los tornillos de sujeción en el método anterior.

El contacto eléctrico también mejoró con el nuevo método de conexión, ya que el tornillo que forma el terminal roscado de la celda, se encuentra directamente conectado al borne, sin utilizar piezas intermedias en la conexión, que pueden incrementar la resistencia eléctrica del contacto. El tornillo utilizado tiene un diámetro de 5 mm, por lo que cuenta con una sección de aproximadamente de $19,6 \text{ mm}^2$, en cambio los tornillos utilizados en el primer método contaban con un diámetro de 2 mm y por ende una sección de $3,14 \text{ mm}^2$. Además de la mejoría en la rigidez mecánica en la conexión, se observa entonces que la sección del tornillo utilizado en el nuevo método es mayor que la suma de las secciones de los 4 tornillos utilizados anteriormente. La tuerca utilizada para fijar el tornillo contra el borne también contribuye a incrementar la sección de contacto con el borne. Al tornillo se le cortó la cabeza para facilitar la conexión al borne mediante terminales de ojo y tuercas. En la Figura 7.5 se muestra la conexión roscada obtenida con el segundo método de conexión de bornes mencionado.

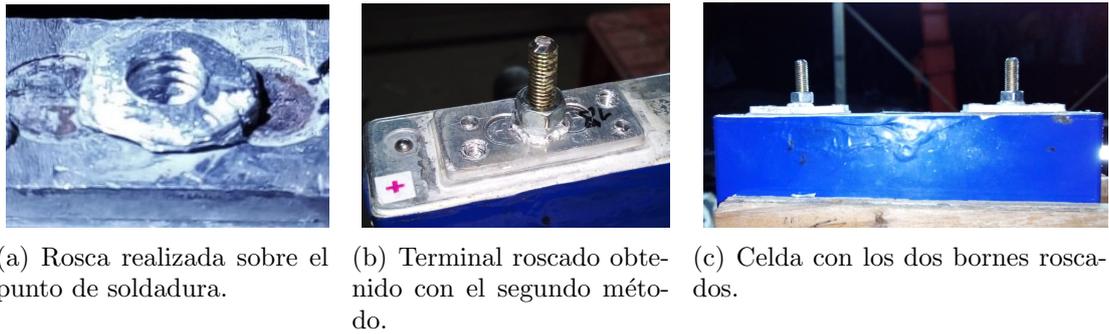


Figura 7.5: Terminales roscados colocados en los bornes de las celdas con el segundo método.

Por último, para una correcta verificación del funcionamiento de estos nuevos bornes, se realiza una termografía con el fin de asegurarse que ningún contacto eléctrico presente una resistencia de contacto elevada. Esto es verificable indirectamente a través de la termografía, ya que debido al efecto Joule, una elevada resistencia de contacto provocaría una fuente puntual de calor en el circuito, pudiendo observar consecuentemente gradientes de temperatura en la imagen termográfica. Como se observa en la Figura 7.6, los cables de interconexión no presentan puntos calientes ni gradientes de temperatura marcados. La diferencia de temperatura de los puntos más calientes del circuito respecto a la ambiente es de tan solo $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima. Teniendo en cuenta que la imagen fue tomada luego de 30 minutos de estar el banco bajo una descarga a corriente constante de $16,7\text{ A}$, se considera que el sistema está operando en régimen y por lo tanto de existir puntos calientes, deberían ser visibles en la termografía. Se observa también que el cableado de las celdas ubicadas en el centro del banco se encuentra a una temperatura levemente mayor que el resto, lo que es esperable, ya que el aporte de calor de las celdas circundantes produce un aumento de temperatura en esa zona.

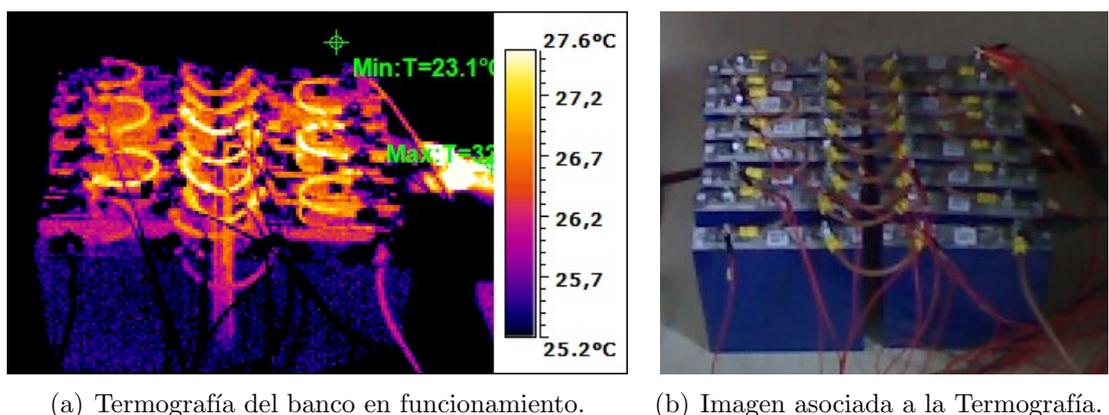


Figura 7.6: Termografía del banco a los 30 minutos de estar descargando una corriente de $16,7\text{ A}$. Cabe señalar que la prueba se realizó con las celdas fuera del gabinete contenedor.

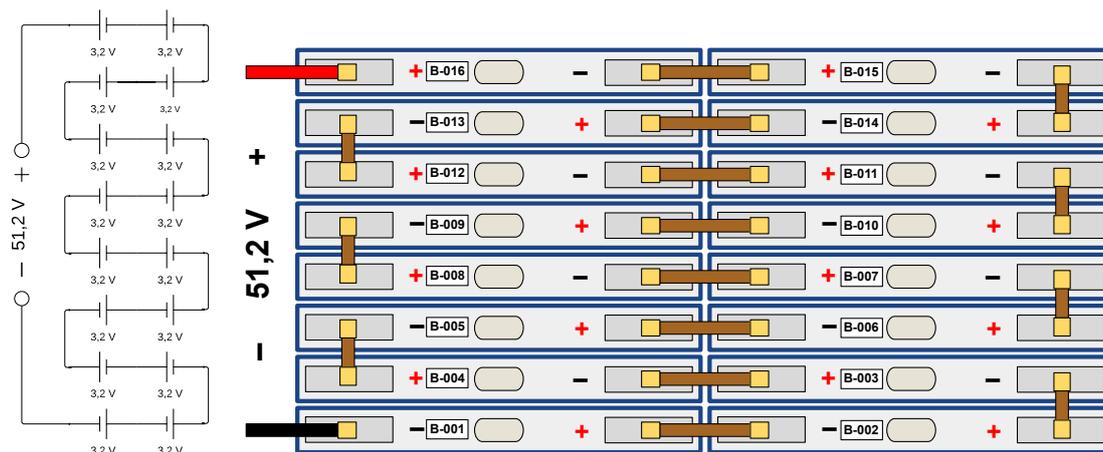
Capítulo 7. Banco de baterías construido

7.1.2. Interconexión de celdas

Debido a la posibilidad de evaluar su rendimiento en un triciclo eléctrico, el cual requiere de un banco de baterías con una tensión mayor a 48 V, el principal requerimiento para la construcción del banco fue alcanzar dicha tensión nominal. Dado que cada celda tiene una tensión nominal de 3,2 V se decidió realizar la conexión en serie de las 16 celdas que conforman el banco y obtener así una tensión total de 51,2 V entre bornes del mismo. Cabe señalar que con este tipo de conexión, teóricamente la capacidad máxima en Ah del banco estaría limitada por la celda que entregó la menor capacidad en el ensayo de capacidad estática 6.2.1.5 (de las celdas utilizadas para el banco), es decir por la celda L012 que entregó una capacidad de 47,99 Ah. Esta celda posiblemente sea la que determinará la capacidad del banco, dado que en la descarga será la primera en llegar a la tensión mínima, indicando que el SOC del banco llegó al 0 %.

La conexión entre celdas se realiza con cables de 6 mm² con aislación de PVC, mediante terminales de ojo en sus extremos, los que se ajustan en el terminal roscado de la celda mediante una tuerca. Se eligió realizar la conexión con cable y no con contactos rígidos debido a que los cables pueden absorber parte de las vibraciones que podría llegar a sufrir el banco si se utilizara en electromovilidad, evitando una eventual rotura de los terminales roscados en los bornes. El cable fue dimensionado de acuerdo al Reglamento de Baja Tensión - Instalaciones interiores o receptoras - Capítulo II, el cual establece que la corriente admisible en régimen permanente por un cable de 6 mm² de sección y aislación en PVC es de 59 A, cuando la corriente nominal de régimen del banco construido es de C/3, es decir 16,7 A. A su vez, esta corriente admisible declarada en el reglamento de UTE es para corriente alterna, la cual supone un efecto llamado “Efecto Pelicular”. Este efecto reduce la sección efectiva del conductor respecto a la corriente continua, cuando la corriente que circula es alterna [32]. Por lo tanto, en el dimensionado del cable, considerar la corriente admisible en AC es conservador respecto a nuestro caso.

En la Figura 7.7 se ilustra el diagrama de conexionado en serie de las celdas y las 16 celdas que efectivamente fueron interconectadas. Se seleccionó la secuencia de conexión mostrada en la Figura 7.7 debido a la disposición física que tendrían las celdas y el BMS en el gabinete. Además, desde el punto de vista de la seguridad, también es conveniente que los terminales del banco se encuentren distanciados entre sí.



(a) Diagrama de conexionado de las celdas.

(b) Esquema representativo del conexionado de las celdas.

Figura 7.7: Diagramas de conexión y celdas conectadas en serie. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Gabinete

El conjunto de las 16 celdas conectadas en serie y el BMS se colocan dentro de un gabinete metálico que brinda protección e integridad física al banco. En la presente sección se describen los requerimientos considerados para el gabinete, el diseño del mismo y su construcción.

7.2.1. Requerimientos

Los requerimientos que debe cumplir el gabinete son los siguientes:

- **Forma y dimensiones:** Dado que el gabinete debe contener a las 16 celdas y al BMS, debe contar con el volumen interior necesario para albergar todos los componentes. La forma del gabinete deberá ser prismática y en lo posible no deberá disponer de salientes, de manera de ocupar el menor volumen posible.
- **Peso:** Debido a que la energía específica final del banco será inversamente proporcional a su masa, se deberá reducir lo más posible el peso del gabinete.
- **Rigidez:** El gabinete deberá ser lo suficientemente rígido de manera que pueda contener las celdas y los componentes sin deformarse, es decir que debe ser capaz de soportar al menos una masa de 20 kg. También debe ser lo suficientemente rígido como para poder transportar el banco en él sin problemas.
- **Absorción de vibraciones:** El sistema de retención de celdas deberá reducir las vibraciones que se podrían transferir a las celdas si el banco se utiliza en

Capítulo 7. Banco de baterías construido

electromovilidad. A los efectos de reducir dichas vibraciones, las caras del gabinete que se encuentren en contacto directo con las celdas también deberán contar con algún material en su interior que ayude a absorberlas.

- **Reposición de celdas:** Pensando en la practicidad a la hora de reemplazar una celda por otra, el sistema de sujeción de las celdas deberá ser tal que garantice que la sustitución de una celda se realice de manera sencilla e independiente del resto de las celdas. Deberá ser posible recambiar una celda sin tener que extraer otras y en dicho proceso se deberán tener que desconectar la menor cantidad de celdas posible.
- **Refrigeración:** Se deberán prever cavidades de aire entre celdas para proporcionar circulación de aire como método de refrigeración.
- **Impermeabilidad:** El gabinete deberá proteger al banco y a sus componentes del ingreso de agua y otros líquidos hacia el interior que se proyecten desde cualquier dirección.
- **Protección contra ingreso de materiales extraños:** El gabinete debe ser cerrado de manera de evitar el ingreso de objetos sólidos hacia el interior. No se restringe la entrada de polvo ni de partículas con un diámetro menor a 1 mm hacia el interior, pero se debe evitar que la cantidad ingresada interfiera con el funcionamiento correcto del banco.
- **Protección contra contactos directos:** Se debe evitar que las personas tengan contactos directos con las partes activas del banco siempre que el gabinete esté debidamente cerrado. Se deberá garantizar que las personas no tengan acceso a las partes activas con una herramienta. El gabinete deberá contar con una tapa que no pueda ser removida accidentalmente.
- **Grado de protección IP:** Según lo indicado en los últimos tres puntos, el gabinete debe contar con un grado de protección IP-34 o mayor, según la norma IEC 60529.
- **Inundabilidad:** Estando destapado, debe ser posible inundar con agua el gabinete en su totalidad. Deberá contar con una estanqueidad tal que una vez inundado no se generen filtraciones de agua hacia el exterior.
- **Inflamabilidad:** Se deberá evitar utilizar materiales combustibles para la construcción del gabinete o se utilizarán en cantidades muy reducidas.

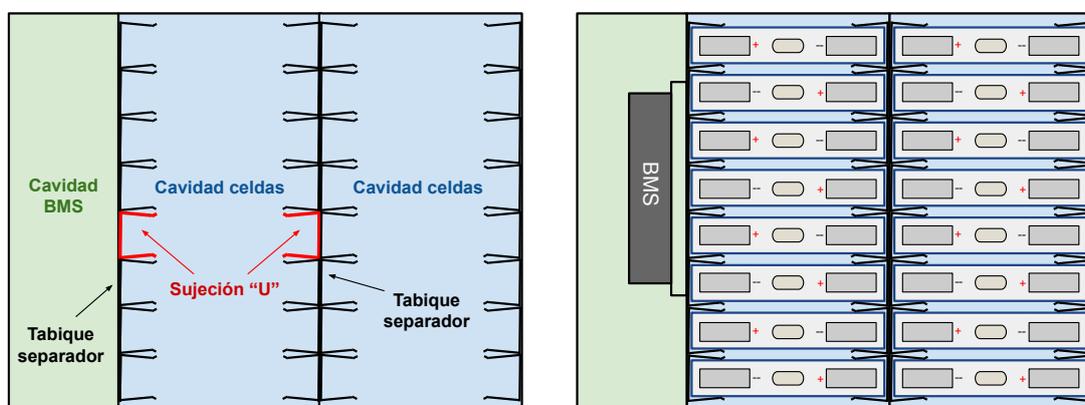
7.2.2. Diseño

Se decidió construir el gabinete en chapa de hierro N° 22 para cumplir con los requerimientos de rigidez sin comprometer el peso de la batería. Considerando todas las

piezas que se describen a continuación, se estimó un peso total del gabinete de aproximadamente 5,5 kg, se observó que en caso de utilizar chapa N° 20, la rigidez del gabinete aumentaría pero se tendría un peso de al menos 6,8 kg.

El gabinete diseñado esencialmente es una caja prismática con tapa, con dimensiones de 25 cm de ancho, 35 cm de largo y 23 cm de alto. En su interior cuenta con dos cavidades separadas por un tabique: una cavidad destinada al BMS (denominada “cavidad BMS”) y otra cavidad donde se colocan las celdas (denominada “cavidad celdas”). La cavidad celdas se divide a la mitad por otro tabique, debido a que las 16 celdas se disponen en dos grupos de 8 celdas. El borde superior de la caja cuenta con un pestañado para brindar mayor rigidez y seguridad en la manipulación, evitando bordes filosos al descubierto.

Cada celda es sujeta individualmente por dos piezas con forma de “U” en las que la celda es insertada. Dichas piezas offician de pinza y están diseñadas de tal manera que sostienen las celdas fijamente y absorben vibraciones de las mismas. Cada una de estas piezas se suelda mediante soldadura de punto al interior de las caras laterales de la cavidad celdas y al tabique que la divide a la mitad. Las piezas de sujeción están diseñadas para que una vez que se coloquen las celdas, exista un espacio de aproximadamente 5 mm entre celdas contiguas. En la Figura 7.8 se ilustra la vista superior del gabinete y sus reparticiones, así como también la disposición de las celdas y del BMS en el mismo. La sujeción individual considerada para las celdas, permite que ante la sustitución de alguna de ellas, solo sea necesario desconectar las conexiones de la celda en cuestión para extraerla y reemplazarla, lo que evita desconectar todas las celdas para sustituir una unidad.



(a) Cavidades y reparticiones del gabinete.

(b) Representación de ubicación de celdas y BMS en el gabinete.

Figura 7.8: Representación esquemática de vista superior del gabinete. Fuente: Elaboración propia.

Se consideró dejar un espacio de 1 cm entre la parte inferior de las celdas y el fondo del gabinete, de manera de que estas no quedaran en contacto directamente con el fondo. Para lograr esto, las celdas apoyan sobre cuatro ángulos que se encuentran soldados a 1 cm del fondo del gabinete. Los espacios considerados entre celdas y entre el fondo y

Capítulo 7. Banco de baterías construido

las celdas, permiten que estas queden rodeadas por aire en la mayoría de sus caras, lo que ayuda a la refrigeración y circulación de aire. Además, contar con dichos espacios, permite que sea más fácil inundar el banco, al contrario a si se hubiesen dispuesto una celda junto a la otra y contra el fondo. Otra ventaja de considerar dichos espacios es que si el gabinete sufre algún golpe o presión que cause pequeñas abolladuras, las celdas no se verían comprometidas por la deformación. Sin embargo, vale aclarar que el gabinete no está diseñado para soportar golpes de estas características sin transmitir parte de la energía cinética a las celdas. Al considerar un espacio entre una celda y otra también se eliminan presiones que podrían ocurrir entre celdas ante la eventual deformación y dilatación de las mismas durante su funcionamiento.

Para absorber las vibraciones que podrían sufrir las celdas en el caso de que el banco se utilizara en electromovilidad, se decidió colocar una banda de goma de 2 mm de espesor en el interior de las piezas que las sujetan. Si bien la goma considerada no es un material ignífugo, la misma se utiliza en pequeñas cantidades y se considera despreciable su aporte a la combustión frente a la energía que pueden liberar las celdas ante una ignición.

En cuanto a la tapa, se fabricó también en chapa N° 22 y acorde a la medida exterior del gabinete, de manera de entrar “justa” para reducir el ingreso de partículas y de líquidos hacia el interior del gabinete. Por otra parte, la cavidad BMS cuenta con una tapa propia que es atornillada al lateral del gabinete, por la cual se da acceso al BMS y su conexión. Finalmente, se le soldaron dos manijas a ambos lados del gabinete, de manera de facilitar el transporte del banco. En el Apéndice C se encuentran los planos de todas las piezas diseñadas con sus respectivas medidas y fotografías del proceso de ensamble del gabinete.

7.3. BMS instalado

Según los motivos explicados en el Capítulo 3 y debido a que el banco construido está formado por celdas de iones de litio, es necesario que el mismo cuente con un BMS para garantizar su operación segura. En la presente sección se detallan los requerimientos considerados para adquirir el BMS, las características del BMS elegido y cómo el mismo fue integrado al banco construido.

7.3.1. Requerimientos para la elección del BMS

Las características que debe cumplir el BMS son las siguientes:

- **Cantidad de celdas y compatibilidad con la química:** el BMS elegido debe ser capaz de gestionar al menos 16 celdas y debe ser apto para ser utilizado con celdas de LiFePO_4 .
- **Tensión de celda:** el BMS debe soportar celdas cuya tensión varíe en el rango de 2,5 V y 3,65 V.

- **Corriente máxima de descarga continua:** según la hoja de datos [28] utilizada como referencia para determinar los parámetros técnicos de las celdas que conforman la batería construida, la máxima corriente de descarga constante es de 1C, es decir 50 A. Para contar con un margen de seguridad, se requiere que el BMS pueda soportar corrientes de descarga continua al menos de 75 A.
- **Máximo pico de corriente de descarga:** Según la hoja de datos de referencia [28], los máximos picos de corriente de descarga que soportan las celdas tienen valor de 2C, es decir 100 A. Para contar con un margen de seguridad, se requiere que el BMS sea capaz de soportar picos de descarga de al menos 150 A. Cabe señalar que los ratings en corriente del banco son los mismos que los de las celdas, debido a la conexión en serie.
- **Medida de temperatura:** dado que las celdas dentro del gabinete se disponen en dos grupos de 8 celdas, se requiere que el BMS cuente con al menos dos sensores de temperatura para tomar medidas en cada grupo.
- **Balaceo:** el BMS debe contar con la función de balaceo para equilibrar las tensiones de las celdas durante la carga y la descarga del banco. Se requiere que el balaceo sea activo, de forma de minimizar la potencia disipada en forma de calor y conseguir un uso más eficiente de la energía. Con la función de balaceo activo el exceso de carga en una celda no se disipa, sino que se utiliza para equilibrar celdas menos cargadas. La corriente de balaceo debe ser lo mayor posible para contar con un balaceo rápido.
- **Idioma, interfaz y configuración:** la interfaz de comunicación debe ser sencilla de utilizar e intuitiva. El idioma de la interfaz debe ser español o inglés. Debe ser sencillo conectarse al BMS, por lo que se requiere que cuente con comunicación bluetooth y una aplicación para smartphone en la que se muestre el estatus de las celdas y se realice la configuración de parámetros. Debe ser posible configurar parámetros de protección como límites máximos y mínimos de tensión, de corriente, de temperatura, de potencia y de capacidad entregada o descargada en Ah. Además también se requiere que en la interfaz del smartphone se visualicen las tensiones de cada celda por separado.
- **Contraseña:** el BMS debe contar con contraseña para evitar que cualquier usuario pueda modificar los parámetros configurados y garantizar el uso seguro del banco. Con esto se evitarían daños como los sufridos en la batería estudiada.
- **Conectividad:** debe contar con puerto canBUS para conectarse con el equipo de ensayo.

7.3.2. BMS adquirido

Se encontró un BMS publicado en ebay que cumplía con los requerimientos mencionados, por lo que el mismo fue adquirido en el marco del Proyecto ANII FSE_S.2020.1.1653396,

Capítulo 7. Banco de baterías construido

“Segundo uso de baterías de vehículos eléctricos”, el cual es financiado con fondos de la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación). El BMS adquirido se muestra en la Figura 7.9 y sus principales características son las siguientes:

- **Marca:** JIKONG
- **Modelo:** JK-B2A24S15P
- **Cantidad de celdas de LiFePO_4 :** 15 - 24
- **Tensión por celda:** 1 - 5 V
- **Corriente máxima de descarga continua:** 150 A
- **Máximo pico de corriente de descarga:** 300 A
- **Tipo de balanceo:** Activo
- **Corriente de balanceo:** 2 A
- **Protección por sobretensión:** Ajustable entre 1,2 - 4,35 V
- **Protección por subtensión:** Ajustable entre 1,2 - 4,45 V
- **Protección por sobrecorriente:** Ajustable entre 10 - 150 A
- **Medida de temperatura:** 2 sensores
- **Rango de temperatura de operación:** -20°C - 70°C
- **Tensión de alimentación:** 40 - 100 V
- **Consumo:** 10 mA @ 100 V con balanceo activado, 6 mA @ 100 V sin balanceo.
- **Conectividad:** Bluetooth
- **Otras interfaces:** RS485/CAN
- **Contraseña:** Sí
- **Dimensiones l/a/h:** 162 mm/102 mm/20,4 mm

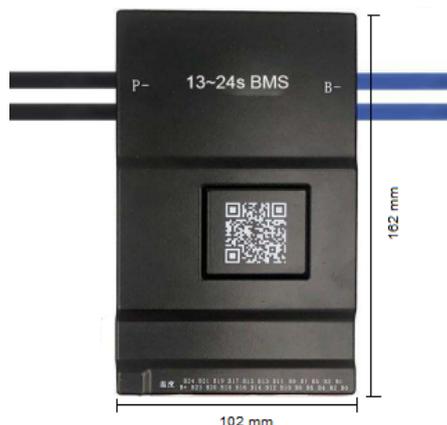


Figura 7.9: BMS marca JIKONG adquirido. Fuente: manual de usuario del BMS JK.

Adicionalmente se adquirió un segundo BMS como respaldo, el cual tiene las mismas características que el BMS ya descrito, con la diferencia de que cuenta con una corriente máxima de régimen continuo de 200 A.

7.3.3. Integración del BMS a la batería

7.3.3.1. Primeros pasos con el BMS y configuración

El BMS debió ser integrado y configurado al banco para el correcto funcionamiento del mismo. Lo primero que se realizó fue conectar el BMS con el banco y cablear sus sondas de tensión a cada celda según establece el fabricante para el caso de 16 celdas. El diagrama de conexión utilizado se ilustra en el Figura 7.10. El BMS se coloca entre el banco y la aplicación exterior, de manera de que sea capaz de abrir la conexión correspondiente al borne positivo del banco.

Como se muestra en la Figura 7.10, el negativo del BMS se conecta al negativo del banco. La primera celda será la que queda conectada al negativo del BMS y la 16° celda será la última que se conecta en la serie de celdas. Las sondas se van conectando una a una a cada celda como se representa en la Figura 7.10, siendo de vital importancia conectarlas en el orden correcto, ya que de lo contrario el BMS no encenderá. El BMS se alimenta de la propia batería mediante las entradas B- y B+, por lo que estas se conectan al borne negativo y positivo del banco respectivamente. Cabe señalar que el BMS necesita más de 36 V entre dichos terminales para encender, en caso contrario se deberá utilizar un booster (no incluido en el pack adquirido) para elevar la tensión.

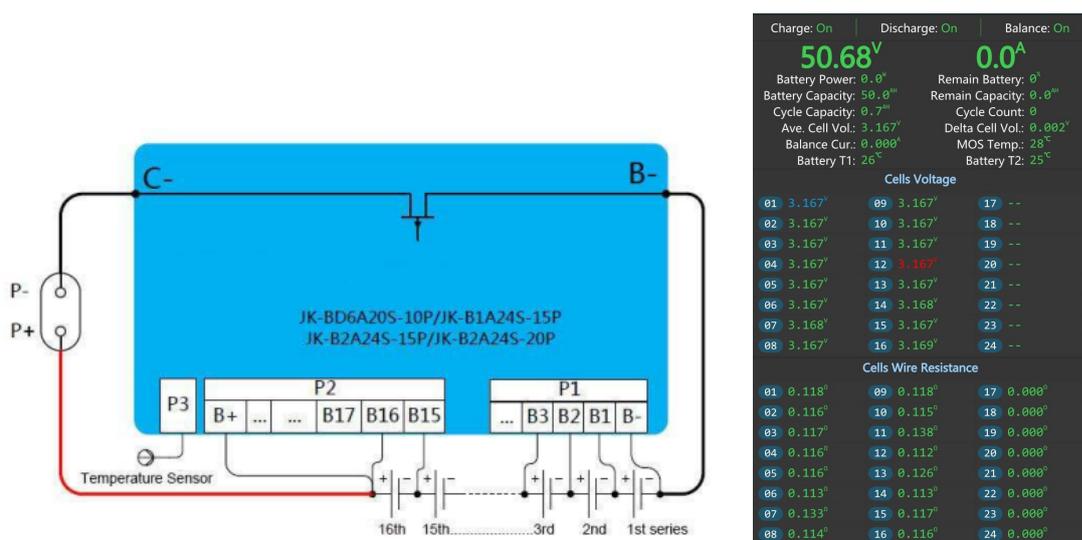


Figura 7.10: Conexión e interfaz del BMS.

Contando con la aplicación instalada en el smartphone, el paso siguiente fue encender el BMS, para lo cual fue necesario aplicar una tensión de 5 V entre sus terminales B- y P-. Una vez encendido se conectó el smartphone mediante bluetooth y se realizó la configuración inicial ingresando la contraseña por defecto. Luego se ajustaron los parámetros de protección del BMS acorde a los límites de operación de las celdas de LiFePO_4 con las que trabajará y se verificó que el BMS interrumpía el circuito de manera correcta cuando se excedían estos límites, protegiendo la celda en cuestión.

Se verificó el funcionamiento de la función de balanceo, la que puede ser encendida y apagada desde la pestaña de ajustes de la aplicación. También desde dicha pestaña se puede habilitar o deshabilitar la carga y la descarga del banco, lo que permite contar con un encendido y apagado de manera remota desde el smartphone. Las medidas de tensión y corriente que realiza el BMS pueden ser calibradas desde la interfaz, tomando como referencia la lectura de un instrumento de confianza. Se observó que el BMS logra balancear las celdas tal como se muestra en la Figura 7.10, donde las 16 celdas han sido balanceadas a una tensión de 3,167 V. Dicha imagen corresponde a la captura de pantalla de lo que se muestra en la interfaz del smartphone. Sin embargo, luego se identificaron problemas con la función de balanceo según se describe en la siguiente sección.

Se verificó que el BMS cuenta con una memoria interna en donde se guardan los ajustes cargados al BMS, los cuales se mantienen si se accede al dispositivo con un smartphone diferente al que fue utilizado para la configuración de parámetros. En el caso de que se superen los límites de protección ajustados, el BMS desconecta el banco correctamente y en su interfaz reporta un log en el que se indica el motivo por el que abrió el circuito y la celda en cuestión, en caso de que corresponda.

7.3.3.2. Problemas identificados

Una vez configurado el BMS, se procedió a balancear el banco, igualando la tensión de todas las celdas para luego realizar la carga de la misma. Al realizar la carga, la tensión de las celdas fue incrementando a medida que aceptaban carga y se observó que algunas celdas alcanzaron el límite de tensión máxima mucho antes que el resto, impidiendo que el banco absorbiera la capacidad nominal de 50 Ah. Ante esta situación, se formuló la hipótesis de que las celdas se encontraban con diferentes niveles de SOC cuando se interconectaron para formar el banco, lo que ocasionó que las celdas con mayor SOC alcanzaran el 100 % de su carga antes que el resto. Si bien antes de realizar la carga, las celdas se habían balanceado, el proceso que realiza el BMS es un balanceo en tensión y no en SOC. Si se dispone de celdas con diferentes tensiones de trabajo para un mismo SOC (como en el caso de estudio), es lógico considerar que el hecho de que las celdas se encuentren balanceadas en tensión no implica que estas se encuentren al mismo SOC.

Para solucionar este problema, resultó necesario volver a armar el banco partiendo de un SOC conocido para cada celda. Por lo tanto, se desarmó el banco y se cargó cada celda individualmente hasta el 100 % de su capacidad. Durante este proceso se observó que todas las celdas absorbían diferentes capacidades en Ah, lo que reafirmó la hipótesis sobre las diferencias de SOC planteada anteriormente. Una vez totalmente cargadas, las celdas se volvieron a interconectar para formar el banco y se dejó balanceando el BMS para igualar las tensiones de cada celda. En esta segunda instancia, se tomó como hipótesis considerar que si las 16 celdas se encuentran con un SOC de 100 %, entonces el banco está completamente cargado y debe entregar al menos la mínima de las capacidades obtenidas con el ensayo de capacidad estática 5.3.1 de cada celda que compone el banco, es decir, aproximadamente 47 Ah bajo una descarga de C/3.

Cuando se intentó realizar la descarga, se constató que el BMS abría el circuito transcurridos apenas algunos segundos luego de iniciada la descarga debido a que algunas celdas excedían el límite de tensión inferior de operación. Se identificó que el problema se encontraba en la lectura de tensión realizada por el BMS producto de falsos contactos en la conexión de los bornes de las celdas según lo descrito en 7.1.1, lo que producía chispas en los bornes y una lectura errónea de tensión. Solucionados los problemas de conexión según lo mencionado en 7.1.1, se realizó la descarga del banco con una tasa de C/3, pero se obtuvo una capacidad total en Ah de tan solo la mitad de la nominal. Al momento en el que el BMS abrió el circuito, nuevamente se observó que algunas celdas habían alcanzado o estaban cerca de alcanzar la tensión mínima de descarga mientras que otras aún tenían una tensión de operación normal.

Consecuentemente, se decidió separar las celdas una vez más y cargarlas completamente de manera individual, pero esta vez realizando la descarga de las mismas previamente. Al realizar la descarga hasta un SOC de 0 % se obtuvo el valor de capacidad que disponían dichas celdas, observando que aproximadamente la mitad contaban con una capacidad remanente de 20 Ah y la otra mitad una capacidad remanente menor a 5 Ah. Esto fue consistente con lo observado en la aplicación del BMS al momento en el que abrió el circuito y brindó indicios de que existían dos grupos de celdas: un grupo

Capítulo 7. Banco de baterías construido

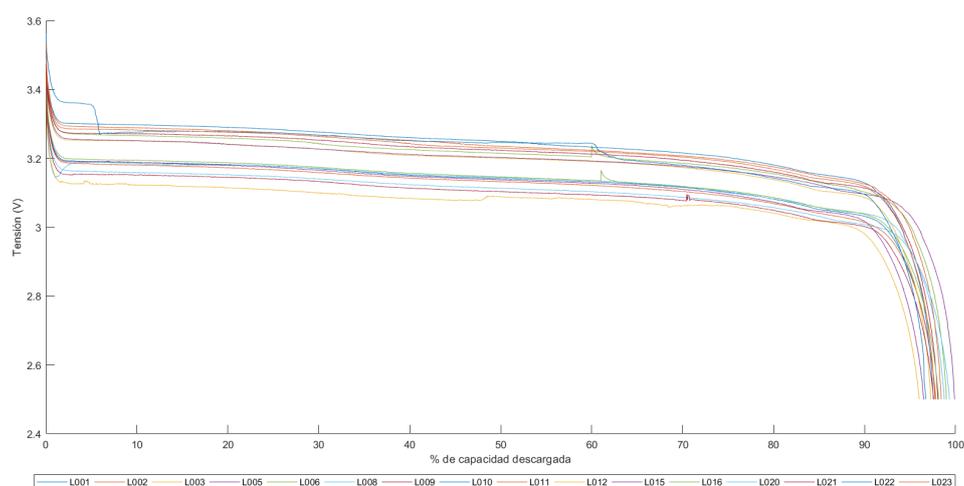


Figura 7.11: Perfiles de descarga estática de las celdas de LiFePO4 que componen el banco.

que ya se había descargado totalmente y otro grupo que aún contaba con la mitad de la capacidad disponible.

En la Figura 7.11 se muestran superpuestos los perfiles de descarga obtenidos con el ensayo de capacidad estática realizado en la Sección 6.2.1 para todas las celdas que componen el banco. En dicha figura se identifican dos grupos de celdas según la tensión de operación durante la descarga estática, un grupo que opera a una tensión de aproximadamente 3,3 V y otro grupo a una tensión de 3,2 V, para un SOC comprendido entre el 90 % y el 5 %. Considerando esto, se constata que para un mismo SOC, las celdas de cada grupo operarían con una tensión de aproximadamente 0,1 V de diferencia, por lo que al realizar la descarga con la función de balanceo encendida, el BMS estaría continuamente descargando las celdas del grupo con mayor tensión para igualar las tensiones. El fabricante del BMS elegido declara que el dispositivo cuenta con función de balanceo activo, por lo que la capacidad que el BMS descarga de las celdas del grupo de mayor tensión, debería utilizarse para cargar las celdas del grupo de menor tensión. Sin embargo, esto no fue posible verificarlo y adquirió relevancia como una posible causa de la diferencia de capacidad descargada en las celdas.

Una vez cargada individualmente cada celda y habiendo absorbido una capacidad de al menos 48 Ah cada una, se volvió a armar el banco interconectando en serie las 16 celdas. Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, se realizó la descarga del banco esta vez sin activar la función de balanceo, de manera de que cada celda pudiera entregar la totalidad de su capacidad a la tensión de trabajo de cada una. Realizando este procedimiento, el banco fue capaz de entregar aproximadamente 48 Ah de capacidad bajo una descarga a corriente constante de $C/3$. Luego se realizó la carga del banco también con la función de balanceo del BMS desactivada y se obtuvo que absorbió 48 Ah. Esto reafirmó la hipótesis de que la función de balanceo del BMS era lo que

descargaba las celdas de manera no equitativa, por lo que se decidió no utilizarla para el resto de los ensayos y para el funcionamiento del banco. Se observó entonces que una vez balanceadas las celdas en SOC al momento de su interconexión inicial para formar el banco, las mismas se cargan y descargan cada una a su tensión de operación, entregando y absorbiendo aproximadamente un 96 % de la capacidad nominal, acorde al comportamiento esperado.

7.4. Seguridad en baterías

Existen diversos requerimientos de seguridad para las baterías multicelda establecidos por diferentes normas. En la presente sección se resumen algunos de los requerimientos considerados para la construcción del banco descrito en este capítulo, los cuales se basan en las siguientes normas:

- IEC 61960-3:2017 - Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary lithium cells and batteries for portable applications - Part 3: Prismatic and cylindrical lithium secondary cells, and batteries made from them.
- ISO 6469-1:2009 - Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS).
- IEC 63056:2020 - Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in electrical energy storage systems.

7.4.1. Requerimientos de seguridad e información en baterías

Algunos de los requerimientos que el banco debe cumplir en materia de seguridad e información son los que se presentan a continuación.

7.4.1.1. Designación de celdas y baterías:

Conforme a la norma IEC 61960-3:2017, las celdas de la batería deben ser designadas de la siguiente manera:

$$A_1 A_2 A_3 N_2 / N_3 / N_4 \quad (7.1)$$

donde:

- A_1 denota el material del electrodo negativo: “I” si es carbono, “L” si es una aleación de litio, “T” si es titanio, “X” si es otro material.
- A_2 denota el material del electrodo positivo: “C” si es cobalto, “F” si es hierro, “Fp” si es hierro fosfato, “N” si es níquel, “M” si es manganeso, “Mp” si es manganeso fosfato, “T” si es titanio, “V” si es vanadio, “X” si es de otro material.

Capítulo 7. Banco de baterías construido

- A_3 denota la forma de la celda: “R” si es cilíndrica, “P” si es prismática.
- N_2 es el diámetro máximo en el caso de que sea cilíndrica o el grosor máximo si es prismática, ambas medidas informadas como un número entero en mm.
- N_3 es el ancho máximo si es prismática, informado como un número entero en mm. Si es cilíndrica no se especifica N_3 .
- N_4 es la altura máxima, informada como un número entero en mm.

En el caso de las baterías multiceldas, la denotación es la siguiente:

$$N_1 A_1 A_2 A_3 N_2 / N_3 / N_4 - N_5 \quad (7.2)$$

donde:

- N_1 denota el número de celdas conectadas en serie en la batería.
- N_5 denota el número de celdas conectadas en paralelo. En el caso de que la batería no cuente con celdas en paralelo N_5 no es informado.

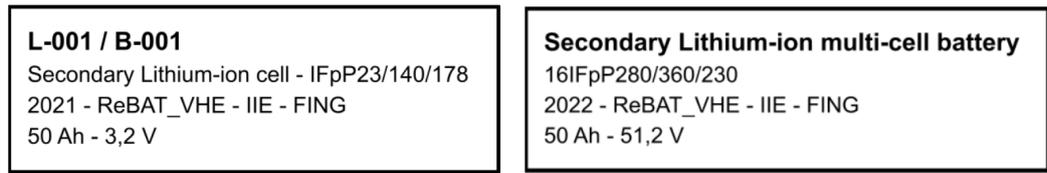
El resto de los parámetros tienen la misma definición que para el caso de las celdas.

7.4.1.2. Marcado

La norma IEC 61960-3:2017 establece que tanto las celdas como las baterías deben contar con un marcado que contenga la siguiente información:

- Indicación sobre si la celda/batería es de Litio o de Litio-ion.
- Designación de la celda/batería según 7.4.1.1.
- Polaridad.
- Fecha de fabricación.
- Nombre o identificación del fabricante.
- Capacidad nominal.
- Tensión nominal.

Por lo tanto, a las celdas y al banco se les incorporaron las etiquetas que se ilustran en la Figura 7.12. Cabe aclarar que “L-001/B-001” es el código utilizado para identificar cada celda y su ubicación en el banco, donde L-XXX es el número de la celda con el que se identificó previamente a la realización de los ensayos y B-XXX denota la posición que ocupa en el banco. Dado que algunas celdas fueron descartadas para formar el banco debido a que no pasaron los ensayos, ambas numeraciones no siempre coinciden y es este el motivo por el cual es necesario contar con dos numeraciones diferentes.



(a) Marcado de cada celda. Se muestra el marcado de la celda L-001 que ocupa el primer lugar dentro de la batería.

(b) Marcado del banco.

Figura 7.12: Marcado de celdas y del banco construido. Fuente: elaboración propia.

7.4.1.3. Distancias de seguridad

Se debe mantener una separación entre los bornes de una batería para evitar daños por cortocircuito ante una eventual fuga del electrolito. En este sentido, para baterías con una tensión máxima mayor a 60 Vdc la norma ISO 6469-1:2009 establece que:

- La distancia d entre los dos terminales de la batería debe satisfacer:

$$d \geq 0,25U + 5 \quad (7.3)$$

donde d está expresada en mm y U es la máxima tensión de operación entre los dos terminales, expresada en V.

- La distancia de seguridad entre superficies conductoras debe ser mayor a 2,5 mm.

Además, si la batería posee conectores hacia el exterior, los mismos deberán ser del tipo hembra para reducir la posibilidad de cortocircuito de manera accidental.

Si bien el banco construido cuenta con una tensión menor a 60 Vdc, según la conexión de las celdas descrita en 7.1.2, los terminales del mismo estarían dispuestos a ambos lados del banco, existiendo una separación de aproximadamente 24 cm entre los mismos, respetando ampliamente las distancias de seguridad.

7.4.1.4. Protección térmica y de sobrecorriente

La batería debe contar con algún sistema de desconexión ante sobrecalentamiento para evitar daños e incluso llegar a explotar. También se debe interrumpir la corriente cuando esta exceda cierto valor soportado por la aplicación que utiliza la batería. Por tanto, según la norma ISO 6469-1:2009, la batería debe contar con un sistema que monitoree y sense la temperatura, la corriente y la tensión de la misma. El BMS montado en el banco es el dispositivo encargado de brindar la protección de acuerdo a lo establecido en el presente punto.

Capítulo 7. Banco de baterías construido

7.4.1.5. Protección contra cortocircuitos

Cuando una batería es cortocircuitada a través de los terminales externos, la energía química se convierte en calor dentro de la batería. Para prevenir esto, se utilizan dispositivos para interrumpir la corriente de cortocircuito como por ejemplo:

- Fusibles o interruptores.
- Termostatos diseñados para abrir el circuito de la batería cuando la temperatura o corriente alcanza un límite máximo predeterminado.
- Instrumentos de coeficiente positivo de temperatura (PTC) que a temperatura y corriente normal tienen un valor de resistencia muy bajo, pero cuando pasa una corriente excesiva a través de ellos, o la temperatura de la batería aumenta, la resistencia aumenta en órdenes de magnitud, limitando la corriente. Estos aparatos están incorporados internamente en algunas celdas por algunos fabricantes. Al usar celdas con protección interna, es recomendable usar un PTC externo seleccionado para ajustar tanto la corriente como los niveles de tensión acorde a la aplicación de la batería.

Acorde a una posible aplicación futura de la batería construida en un triciclo eléctrico, cabe destacar que el Reglamento N° 136 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE/ONU) - *Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos de la categoría L en relación con los requisitos específicos del grupo motopropulsor eléctrico* establece requerimientos de seguridad que debe cumplir el banco ante cortocircuitos externos, sobrecargas, sobredescargas y sobrecalentamiento, de manera similar a lo descrito en los puntos 7.4.1.4 y 7.4.1.5. A pesar de esto, se decidió no instalar un fusible o alguna clase de interruptor automático en el banco, debido a que el BMS instalado oficia de protección, cumpliendo con estos requerimientos según lo informado en el manual de usuario proporcionado por el fabricante.

7.4.1.6. Descarga forzada de las celdas

Debido a la variabilidad en la fabricación, las capacidades de las celdas que componen un banco de baterías pueden diferir una de otras, lo que causa que en baterías con configuraciones de celdas en serie, la capacidad neta esté dada por la celda con menor capacidad. Si una vez que dicha celda alcanza su mínima tensión de operación se continúa descargando, comenzará a aumentar la temperatura interna de la celda, provocando eventualmente la ruptura o venteo de la misma.

Este proceso se conoce como “descarga forzada” y ocurre generalmente en baterías multicelda recargables, ya que con el ciclado el SOH (State of Health) de las celdas puede ir variando. Para minimizar este efecto, las baterías recargables deben estar construidas con celdas “emparejadas”, es decir, celdas con capacidades lo más idénticas posibles. Esto fue tenido en cuenta para la determinación de las celdas que constituirían el banco, según lo descrito en la Sección 6.3.

Capítulo 8

Ensayos al banco y caracterización

A lo largo del documento se pudo apreciar en detalle todo el proceso que conllevó la reutilización de una batería de un vehículo eléctrico, desde su desmantelamiento inicial, hasta el ensamble del nuevo banco formado por las celdas que se consideraron aptas para una segunda vida. Resta entonces como último paso, caracterizar el banco obtenido, para lo que se realizó un ensayo de capacidad estática y un ensayo de potencia como los realizados a las celdas.

Se agrega también un ensayo de autodescarga, para determinar la pérdida de capacidad del banco cuando es almacenado y un ensayo de autonomía, basado en un ciclo de conducción del procedimiento WLTP, pasado a un perfil de potencia de descarga en función del tiempo, a través del modelado simplificado de un vehículo eléctrico. Se presentan entonces en este capítulo los resultados de estos ensayos realizados al banco de baterías reutilizado.

8.1. Ensayo de capacidad estática

En esta sección se presentan los resultados del ensayo de capacidad estática, que fue realizado al banco según lo especificado en la Sección 5.3.1 del Capítulo 5.

8.1.1. Perfil de carga CC-CV

Al igual que las celdas individuales, el banco se carga con un perfil CC-CV compuesto por una primera etapa de carga a corriente constante CC de $C/3$ hasta una tensión V_{CV} . Luego se finaliza el proceso con una etapa de carga CV a una tensión de V_{CV} hasta que la corriente sea menor que $0,05C$ (2,5 A). Se observa que debido a la conexión en serie de las 16 celdas, el umbral de corriente en la etapa de carga CV del banco es el mismo que el utilizado para la carga de las celdas. En cambio, el umbral de tensión V_{CV} de la carga del banco no coincide con 16 veces la tensión V_{CV_Celda} usada como umbral de la etapa de carga CV de las celdas individuales, ya que no todas las celdas logran dicho valor al mismo tiempo.

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

Como primera opción, para determinar la tensión V_{CV} , se procedió a superponer los perfiles de carga de todas las celdas que componen el banco, para posteriormente hallar el instante T_{CV} en el que la primera de ellas alcanza el valor de tensión $V_{CV_Celda}=3,65$ V (ver Figura 8.1). Luego, se calculó V_{CV} como la suma de las tensiones de cada celda en el instante T_{CV} , obteniendo $V_{CV} = 56,95$ V. Sin embargo, al intentar cargar el banco con este valor, no se logró la correcta transición de la etapa de carga CC a la etapa CV, debido a que el BMS abrió el circuito ante una sobretensión en una de las celdas del banco antes de la transición, interrumpiendo el proceso de carga antes de llegar a la etapa de carga CV. De igual forma, en este proceso la batería absorbió 48 Ah, valor apenas un 4% por debajo del nominal, pero se decidió hallar un valor de V_{CV} para el cual las protecciones del BMS no actuaran y el banco se pudiera cargar con el perfil CC-CV establecido.

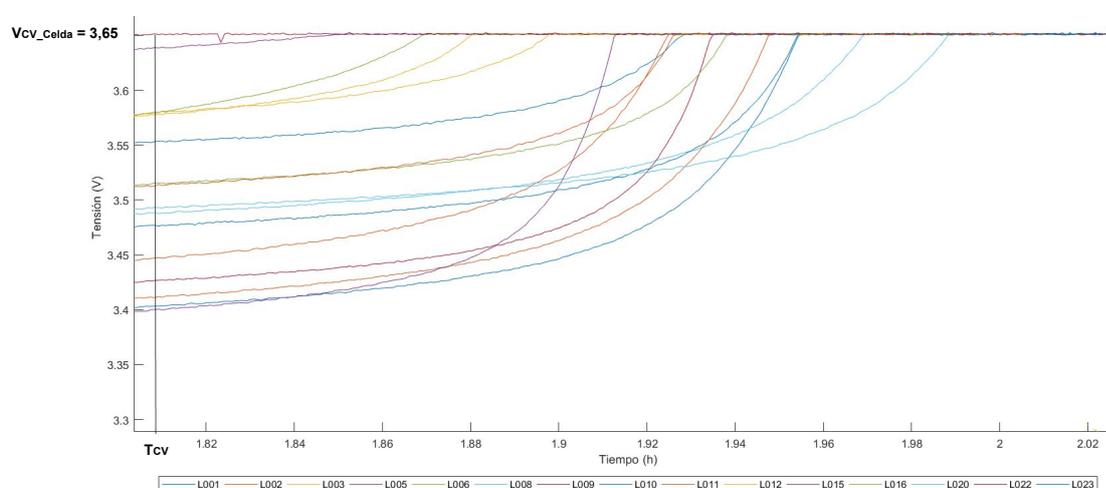


Figura 8.1: Etapa final de los perfiles de carga de las celdas LiFePO_4 que componen el banco.

Se probó entonces manualmente, a partir del valor calculado anteriormente, diversos niveles de tensiones V_{CV} para lograr que la carga del banco se realizara con un perfil CC-CV en el que el BMS no abriera y el banco absorbiera la mayor carga posible, lo que se logró con un valor de $V_{CV} = 56,8$ V. Quedando definidos de esta forma entonces los parámetros eléctricos para la carga CC-CV del banco, los cuales se resumen en la Tabla 8.1. En la Figura 8.2(a) se ilustra el perfil de carga efectivamente obtenido, con el que el banco absorbió un total de 49,6 Ah.

Parámetro	Valor
Método de carga	CC-CV
Corriente máxima de carga CC	25 A
Tensión de transición CC-CV	56,8 V
Corriente de corte de carga CV	2,5 A

Tabla 8.1: Valores nominales de los parámetros utilizados para la carga del banco construido.

8.1. Ensayo de capacidad estática

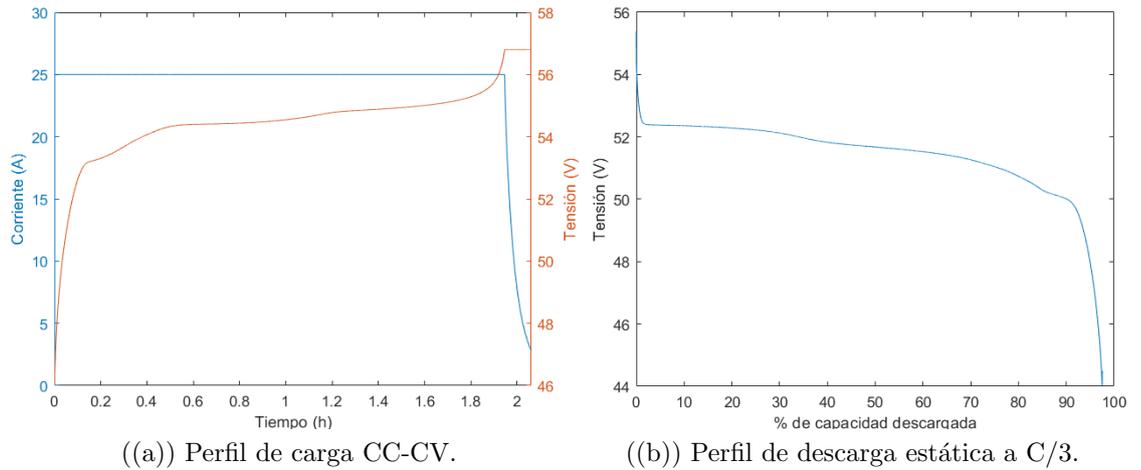


Figura 8.2: Curvas de carga CC-CV y descarga estática del banco de LiFePO_4 construido.

8.1.2. Perfil de descarga CC

En la Figura 8.2(b) se muestra el perfil de descarga obtenido cuando el banco es sometido a una descarga CC con tasa de $C/3$, de acuerdo al ensayo de capacidad estática descrito en la Sección 5.3.1. Se observa que el resultado coincide con lo esperado, ya que la forma de la curva estática del banco coincide con los perfiles de descarga de las celdas individuales (ver Figura 6.3, gráfica de la celda L003) y a su vez con la curva teórica de descarga de celdas de LiFePO_4 (ver Figura 2.11).

Para definir la tensión de corte de descarga del banco V_{min_banco} se siguió un proceso análogo al explicado en la Sección 8.1.1 para hallar la tensión de corte de carga V_{CV} . En este caso se superpusieron los perfiles de descarga de todas las celdas individuales y se halló el instante $T_{descarga_CC}$ en el que la primera celda alcanza el valor de tensión $V_{min_celda} = 2,5$ V (ver Figura 8.4). Luego, se calculó V_{min_banco} como la suma de las tensiones de cada celda en el instante $T_{descarga_CC}$, obteniendo $V_{min_banco} = 44,95$ V y se comprobó que con dicho valor de corte el BMS no abre.

8.1.3. Curva de capacidad estática

Realizado el ensayo de capacidad estática al banco según el procedimiento de la Sección 5.3.1 con $C/3$, se obtuvo que al finalizar la descarga, el banco entregó una capacidad de 49,6 Ah, es decir, el 99% de la capacidad nominal declarada por el fabricante (50 Ah). En la Figura 8.3 se presenta la curva de capacidad estática del banco, donde se observa que los valores de capacidad en Ah absorbida durante la carga y entregada en la descarga coinciden.

Se observa que la capacidad arrojada por el banco es mayor que la capacidad que fue medida para cada celda individualmente. Según los registros del equipo potencióstato, durante los ensayos individuales de las celdas, estas operaron a una temperatura que no

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

superó los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que durante la descarga del banco, el BMS registró temperaturas cercanas a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si bien esta temperatura corresponde al centro del banco, se deduce que en general, la temperatura de funcionamiento de las celdas en el mismo es mayor que en el funcionamiento individual de cada una, ya que el ensayo dura aproximadamente 3 horas (dando lugar a equilibrios térmicos) y las celdas están contenidas en un recinto cerrado, sin ventilación forzada. En base a lo estudiado en la Sección 2.1.3.4 del Capítulo 2, se observa que un incremento en la temperatura de descarga deriva en un mayor rendimiento, logrando un tiempo de servicio mayor a una misma tasa de corriente de descarga y por ende una capacidad en Ah mayor, lo que podría llegar a explicar el incremento de de capacidad obtenido con el banco.

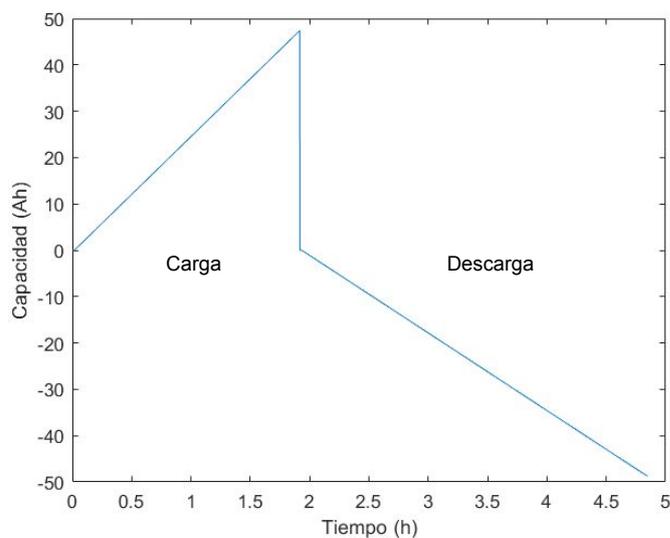


Figura 8.3: Curva de capacidad estática del banco

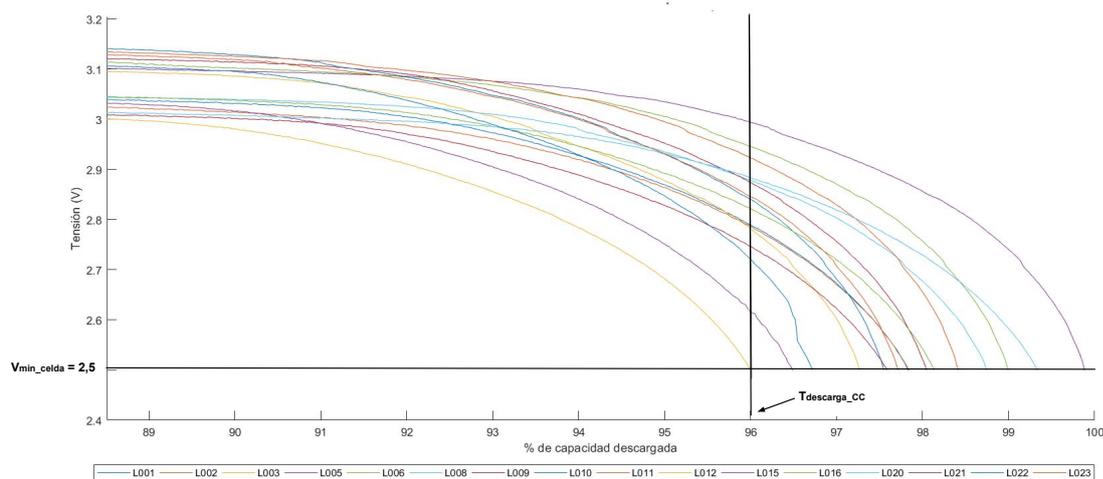


Figura 8.4: Etapa final de los perfiles de descarga a $C/3$ de las celdas que componen el banco.

8.1.4. Cálculo de energía disponible bajo descarga CC a C/3

Al igual que como se realizó para las celdas individuales en la Sección 6.2.1.4, se calcula la energía que entrega el banco bajo una descarga de C/3 según la ecuación 5.7 del Capítulo 5. Además, midiendo la masa y el volumen del banco¹ es posible determinar la energía específica (Wh/kg) y la densidad de energía (Wh/l) del mismo respectivamente, según las ecuaciones 5.8 y 5.9. Los resultados de capacidad estática en Ah, energía disponible, energía específica y densidad de energía del banco ante una descarga a CC de C/3, se presentan en la Tabla 8.2. Como es esperable, dado que el banco se implementa en un gabinete contenedor y el mismo posee dispositivos auxiliares como el BMS y el cableado, la energía específica del banco disminuye con respecto a las celdas individuales, debido al peso de este equipamiento auxiliar.

Capacidad entregada (Ah)	Energía disponible (Wh)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/l)
49,67	2509	98,4	121,2

Tabla 8.2: Resumen de resultados obtenidos con el ensayo de capacidad estática realizado al banco bajo una descarga a CC de C/3.

8.2. Ensayo de potencia

El ensayo de potencia del banco es el mismo que el realizado a las celdas individuales y descrito en la Sección 6.2.2. Dada la conexión en serie de las celdas, el ensayo de potencia del banco se realiza con el mismo perfil de pulsos de corriente utilizado para las celdas representado en la Figura 6.6, sin requerir modificaciones. En la presente Sección se describen los principales resultados obtenidos con este ensayo.

8.2.1. Perfil de tensión y corriente obtenido

En la Figura 8.5 se muestra el perfil de tensión y corriente obtenido en este ensayo. Como se mencionó en la Sección 6.2.2 para el caso de las celdas individuales, en el ensayo de potencia del banco también se pueden observar los 9 ciclos en los que se aplica el perfil de potencia, así como también las 9 etapas en las que se realiza cada descarga del 10% de la capacidad, acorde al procedimiento del ensayo de potencia.

¹El banco pesa 25,5 kg y tiene un volumen de 20,7 l según las características físicas presentes en la Tabla 8.7

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

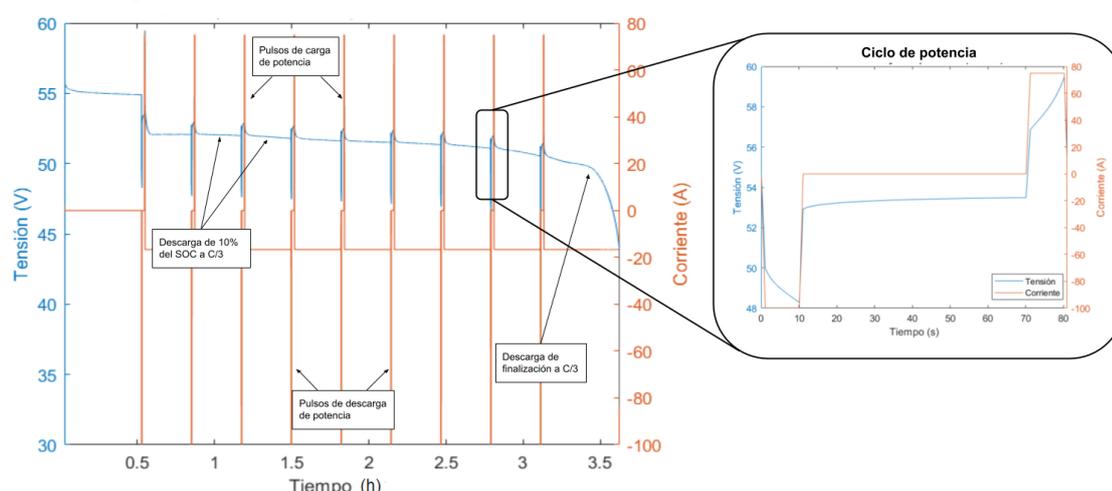


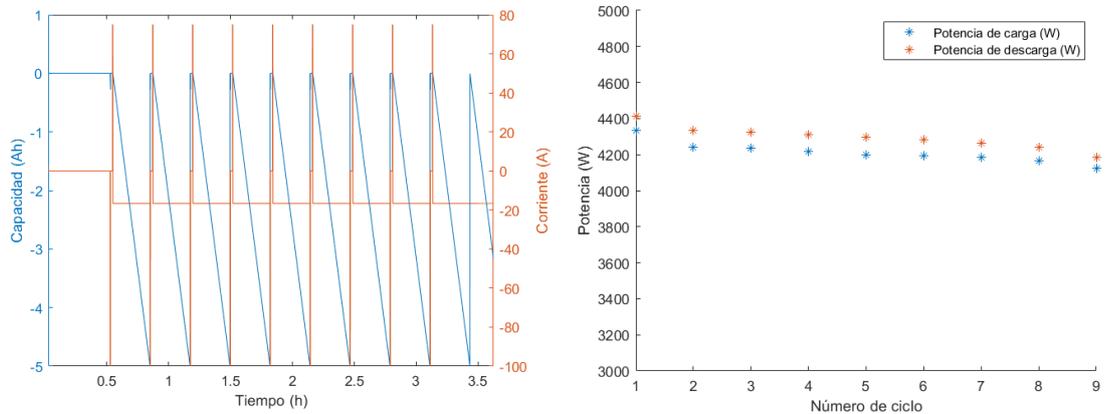
Figura 8.5: Corriente y tensión en el ensayo de potencia del banco. Se muestra ampliada la evolución de la tensión y corriente durante uno de los perfiles de potencia de la Figura 6.6.

En este caso, también se observa que la tensión del banco durante las descargas a $C/3$ tiene una evolución similar a la obtenida en el ensayo de capacidad estática y mostrada en la Figura 8.2(b). De manera análoga a lo realizado en el ensayo de potencia de las celdas, en la ampliación realizada a uno de los ciclos de potencia de la Figura 8.5 se presenta cómo evoluciona la tensión del banco ante el perfil de potencia, observándose que la tensión disminuye cuando se aplica el pulso de descarga y aumenta con el pulso de carga, mientras que durante el período de 60 s de reposo, la tensión intenta alcanzar un valor de equilibrio electroquímico de circuito abierto.

Por otra parte, en la Figura 8.6(a) se presenta la corriente y capacidad del banco durante el ensayo. Se observa que en cada pulso de descarga, el banco entrega aproximadamente 10 % de su capacidad total en Ah, por lo que realizando 9 ciclos, el banco habrá entregado el 90 % de su capacidad, cumpliendo uno de los requerimientos del ensayo.

Una vez más, como se mencionó anteriormente en la Sección 8.1.3, el efecto térmico de implementar las celdas ensayadas en un banco se torna visible, ya que como se detalla en el Capítulo 6, de manera individual una de las celdas utilizadas (L002) no soportó todos los ciclos del ensayo de potencia, pero sin embargo, al ensayar el banco en su conjunto este soportó todos los ciclos sin que ninguna celda saliera de los límites asignados. La celda L002 había salido de su rango de tensión de operación en el séptimo ciclo de potencia, específicamente debido a una subtensión durante el pulso de descarga. Al estar formando el banco, ahora la temperatura de la misma es mayor respecto a cuando se ensayó individualmente, aumentando la tensión según lo mencionado en la Sección 2.1.3.4, lo que podría explicar por qué dicha celda logró soportar el ensayo de potencia cuando se encontraba formando el banco. Esto es una hipótesis formulada en base a la bibliografía estudiada, no siendo comprobada empíricamente. Para comprobarlo se debería contar con un sistema de acondicionamiento térmico y realizar estos ensayos a diferentes temperaturas ambiente, pudiendo caracterizar el comportamiento del banco

para diferentes temperaturas.



((a)) Corriente y capacidad en el ensayo de potencia del banco.

((b)) Evolución de la potencia de carga y descarga durante los ciclos del ensayo de potencia del banco.

Figura 8.6: Curvas de capacidad y potencia relevadas en el ensayo de potencia del banco de LiFePO_4 construido.

8.2.2. Potencia en pulso de descarga y carga

Con el ensayo de potencia realizado al banco se calcula la potencia entregada y absorbida durante un pulso de descarga y uno de carga, respectivamente (ver Tabla 8.3). El proceso de cálculo de dicha potencia es el mismo que fue presentado en la Sección 6.2.2.2. En la Figura 8.6(b) se presenta la evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo. Se observa que con el paso de los ciclos, tanto la potencia de carga como la de descarga se mantiene aproximadamente constante con una variación menor al 5%. Al igual que en el caso de las celdas individuales (ver resultados en la Sección 6.2.2), se concluye que la capacidad del banco para entregar pulsos de 2C y absorber pulsos de 1,5C durante 10 s no varía para un SOC entre 100% y 10%. Para el cálculo de la potencia, el único término que varía es la tensión (la corriente se mantiene constante a lo largo de todo el pulso), por lo que también se concluye que la tensión no varía significativamente entre un ciclo y otro.

Pulso de potencia de descarga (W)	Pulso de potencia de carga (W)	Pulso de potencia de descarga específica (W/kg)	Pulso de potencia de carga específica (W/kg)
4187	4125	164,3	162,0

Tabla 8.3: Resumen de resultados obtenidos con el ensayo de potencia realizado al banco construido.

8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

A los efectos de una posible aplicación futura del banco construido en un triciclo eléctrico, se realiza un ensayo basado en el procedimiento WLTP para estimar la autonomía que tendría la batería en dicho vehículo. Los conceptos principales de este ensayo se explicaron en la Sección 5.3.5, por lo que en esta sección se muestran solamente los parámetros considerados para calcular la potencia mecánica según la ecuación 5.19 y otras consideraciones realizadas al momento de llevar a cabo el ensayo.

Sección transversal S (m^2)	1,43
Coefficiente de arrastre C_x	0,55
Masa en vacío (kg)	210
Masa del conductor (kg)	75
Velocidad máxima (km/h)	60
Capacidad de ascenso (capacidad de arranque en pendiente) (%)	10 %
Tipo de neumático	145/70/12
Tiempo de aceleración de 0-60km/h (pendiente 0 %) (s)	20
Autonomía mínima (km)	60
Autonomía máxima (km)	100
Potencia motor (W)	3000

Tabla 8.4: Datos del vehículo en el que se pretende utilizar el banco.

Se consideró que el vehículo circula por un plano con inclinación cero, por lo que el término $vmg \sin \theta$ de la ecuación 5.19 no fue considerado en este ensayo. En la Tabla 8.4 se presentan los datos brindados por el fabricante del vehículo, que se utilizaron para calcular la potencia mecánica según la ecuación 5.19. De todos los parámetros que intervienen en dicha ecuación, el único que no fue informado por el fabricante fue el coeficiente de resistencia de rodadura C_{RR} , por lo que este se estimó en 0,015 considerando un vehículo de pasajeros que se desplaza en concreto [33]. Utilizando la ecuación 5.19, con una masa de 360 kg (vehículo, conductor y un pasajero) y realizando las consideraciones anteriormente mencionadas, es posible obtener la potencia mecánica requerida a partir del ciclo WLTC de velocidad en función del tiempo. Para pasar del perfil de potencia mecánica a un perfil de potencia eléctrica se utiliza el factor de eficiencia del motor y su driver, el cual es 0,76 según la hoja de datos del triciclo. Este factor no tiene en cuenta pérdidas mecánicas en el tren motriz o caja de cambios si es que la tiene, ya que no se disponía de dicha información. De esta manera entonces, se obtiene el perfil de potencia eléctrica-tiempo que el vehículo requeriría al banco, que es lo que finalmente se utiliza para el ensayo.

Como se menciona en 5.3.5, todos los vehículos eléctricos deben considerarse como Clase 3 para determinar el ciclo WLTC de ensayo a utilizar. Dentro del ciclo de Clase

8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

3, las etapas alta y extra alta se descartaron ya que representan un ciclo de conducción en carretera y este no sería el uso del triciclo. Respecto a la etapa media, como se ve en la Figura 5.6, la velocidad máxima del ciclo supera los 60 km/h (velocidad máxima declarada por el fabricante del triciclo) por lo que se siguió el procedimiento especificado en el Apartado 9 del Anexo B1 de [30] de forma de “recortar” los datos con velocidades mayores a 60 km/h. En la Figura 8.7 se muestra el ciclo con esta modificación.

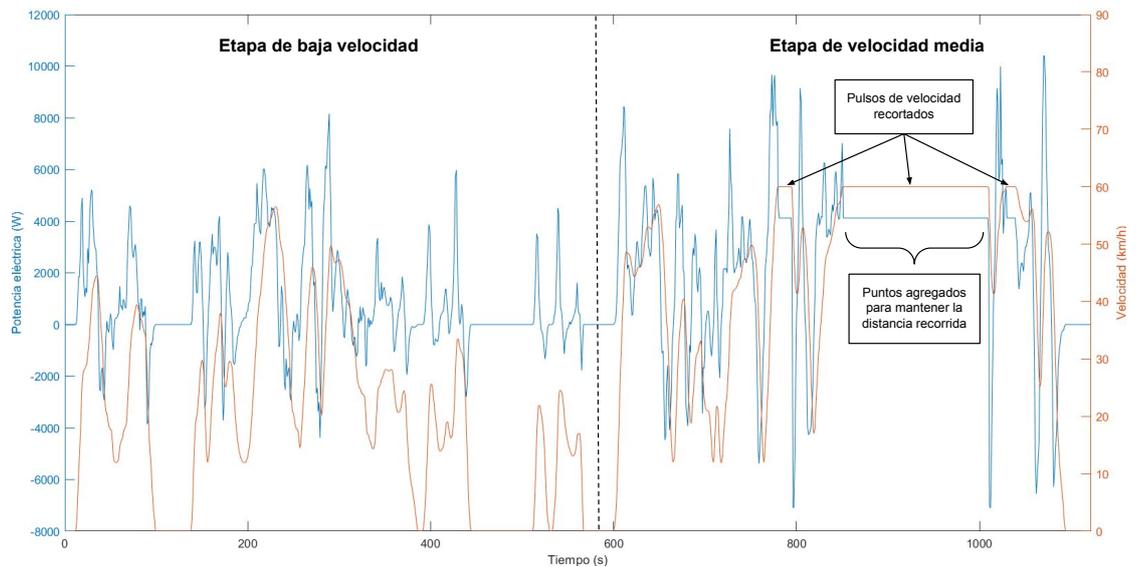


Figura 8.7: Ciclo de conducción WLTC Clase 3, con etapas media y baja. En la etapa de velocidad media se recortaron los picos de velocidad que superaban la velocidad máxima del vehículo y se agregaron puntos adicionales a velocidad máxima para respetar la distancia recorrida.

A pesar de este recorte, en la etapa de velocidad media de la Figura 8.7 se observa que la mayoría de los pulsos superan los 4 kW, valor máximo de potencia del banco relevado en el ensayo de potencia según la Tabla 8.3. Mientras que en la etapa de baja velocidad son pocos los pulsos que superan la potencia máxima del banco y los que lo hacen, superan dicho valor durante menos de 10 segundos (duración de los pulsos de potencia utilizados en el ensayo de potencia). No existiendo una etapa más baja, se decide ensayar el banco considerando solamente la etapa de baja velocidad, por lo que se sustituyó la etapa media por una segunda etapa de baja velocidad, quedando el ciclo de ensayo compuesto por dos etapas de baja velocidad consecutivas, como se muestra en la Figura 8.8. Luego, aplicando la ecuación 5.19 se obtiene el perfil de potencia mecánica requerido para impulsar el vehículo acorde al ciclo de velocidad en función del tiempo considerado, lo que se ilustra en la Figura 8.9.

Dado que se pretende determinar la autonomía que tendría el vehículo, el ciclo de la Figura 8.8 se repetirá hasta que la batería quede totalmente descargada, simulando un caso de conducción sin pausas para recargar. La distancia recorrida en cada ciclo se calcula con la ecuación 8.1 según [30], obteniendo un valor de $d_{WLTP} = 6189 \text{ m}$ por

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

ciclo.

$$d_{WLTP} = \sum \frac{(v_i + v_{i-1}) \times (t_i - t_{i-1})}{2 \times 3,6} \quad (8.1)$$

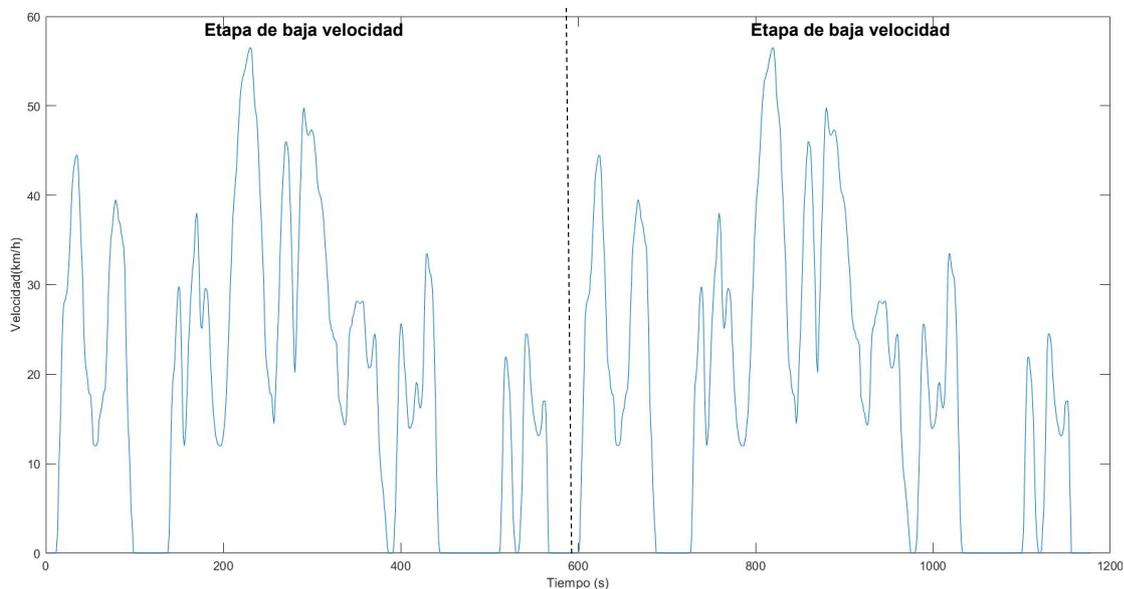


Figura 8.8: Ciclo de conducción WLTC Clase 3 utilizado en el ensayo. Se sustituye la etapa de velocidad media por otra etapa de baja velocidad, quedando formado el ciclo por dos etapas bajas consecutivas.

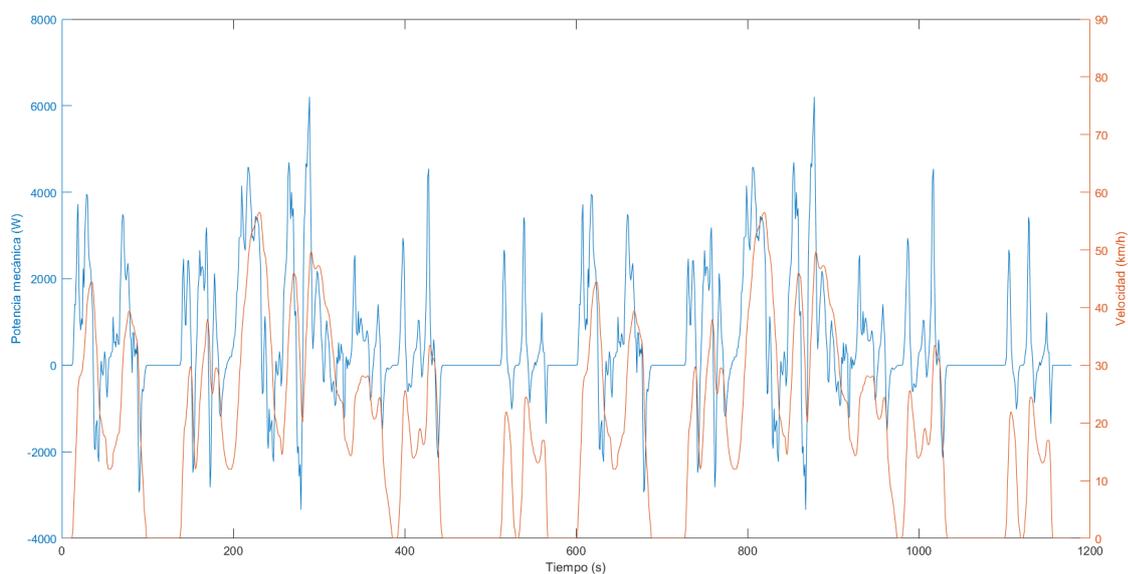


Figura 8.9: Velocidad y potencia mecánica del ciclo de conducción WLTC Clase 3 de baja velocidad considerado.

8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

Es usual que los vehículos eléctricos cuenten con sistemas de frenado regenerativo en los que parte de la energía cinética perdida durante el frenado se recupera para cargar la batería y aumentar la autonomía [34]. Si bien el triciclo modelado no cuenta con un sistema de frenado regenerativo, resulta interesante evaluar empíricamente cuánto variaría la autonomía si contara con el mismo. Por lo tanto, se realizaron dos versiones del ensayo de estimación de autonomía: considerando o no frenado regenerativo, las que se describen a continuación en las Secciones 8.3.1 y 8.3.2.

8.3.1. WLTP con frenado regenerativo ideal

En esta sección se presentan los resultados del ensayo de estimación de autonomía considerando un frenado regenerativo ideal en el que la totalidad de la energía cinética del vehículo durante el frenado se utiliza para cargar la batería. Este caso representa un escenario utópico en el que no se consideran pérdidas de potencia en el sistema de frenado y se utilizará para estimar la máxima autonomía teórica que podría llegar a alcanzar el vehículo durante el frenado.

Como se muestra en la Figura 8.10, durante el ensayo se lograron realizar 10 ciclos completos y un pequeño porcentaje de otro, antes de que la batería se agotara. A partir de esto, utilizando la ecuación 8.1 se estima que la máxima autonomía teórica que podría llegar a tener el vehículo considerando un sistema de frenado regenerativo ideal sería de 61,89 km. A modo de referencia, se observa que este valor es del orden del mínimo de autonomía declarada por el fabricante del triciclo en la Tabla 8.4.

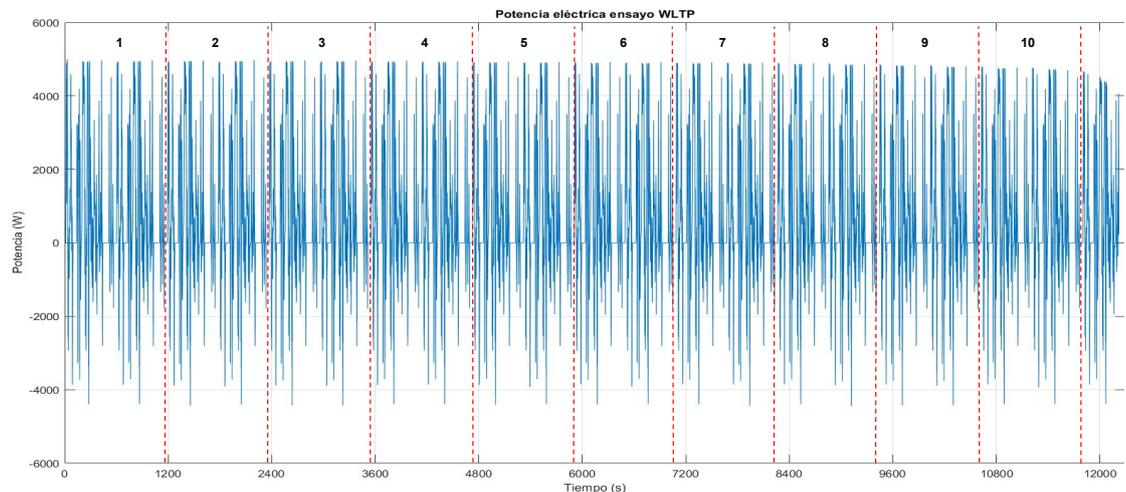


Figura 8.10: Potencia eléctrica en función del tiempo en ensayo WLTP, con frenado regenerativo. Se distinguen 10 ciclos de conducción WLTC transcurridos antes de que la batería se descargue totalmente, recordando que cada ciclo está compuesto por dos etapas de baja velocidad.

En la Figura 8.11 se muestra la evolución de la capacidad en Ah en función del tiempo durante el primer ciclo del ensayo, donde se puede observar que la capacidad consumida por ciclo es de aproximadamente 4,7 Ah. En la Figura 8.11 también se aprecia

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

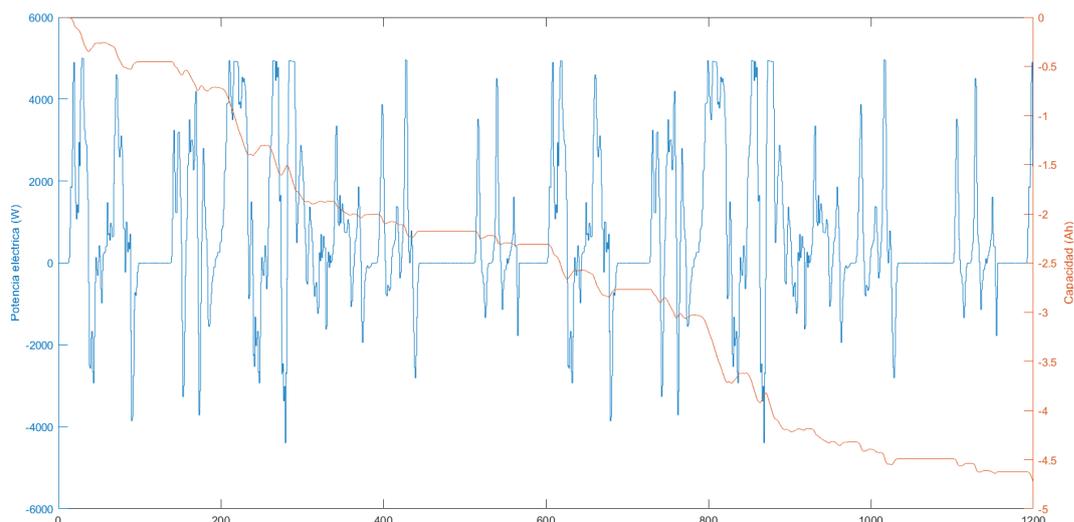


Figura 8.11: Evolución de la capacidad descargada y cargada por el banco durante un ciclo del ensayo WLTP, con frenado regenerativo.

que la capacidad entregada por el banco es mayor que la absorbida durante el frenado regenerativo ideal, por lo que el SOC del banco va disminuyendo a medida que se cicla. Un detalle con las gráficas de cada ciclo, tanto potencia como corriente y tensión se puede encontrar en el Anexo B.4.1.

Dado que con el perfil de ensayo considerado se aplicarían pulsos de potencia de muy corta duración que excedían la potencia máxima ensayada en el banco, se limitó la corriente entregada por el equipo de ensayo a un valor de 100 A (máximo valor de corriente de descarga de pulso de potencia de las celdas) para evitar sobrecorrientes. Esto provocó que el equipo de ensayo limitara los picos de potencia a aproximadamente 5 kW como se observa en la Figura 8.11. Por lo tanto, vale la pena aclarar que el banco no siguió exactamente el perfil de potencia de la etapa de baja velocidad impuesto.

8.3.2. WLTP sin frenado regenerativo

A diferencia de la Sección 8.3.1, en esta oportunidad se presentan los resultados del ensayo de estimación de autonomía sin considerar ninguna clase de frenado regenerativo. Para esta instancia se ajustaron a cero los puntos del perfil de la Figura 8.9 que contaban con una potencia negativa, de manera de que en ningún momento se entregara potencia a la batería y por ende la misma no sea cargada. Realizando esto se obtuvo el perfil de ensayo que se muestra en la Figura 8.12.

El ensayo se realizó bajo una temperatura ambiente de 17°C y la máxima temperatura registrada por el BMS fue de 32°C. Como se muestra en la Figura 8.13, durante el ensayo se lograron realizar 6 ciclos completos y aproximadamente la mitad de otro antes de que la batería llegara al límite de capacidad entregada. A partir de esto, utilizando la ecuación 8.1 se estima una autonomía de 41,62 km sin frenado regenerativo. En la Figura 8.14 se muestra la evolución de la capacidad en Ah en función del tiempo durante el primer

8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

ciclo de ensayo, donde se puede observar que la capacidad consumida por ciclo es de aproximadamente 6,2 Ah. En la Figura 8.14 también se aprecia que en ningún punto del ciclo el banco absorbe carga, sino que la capacidad es siempre decreciente o constante, a diferencia de lo que se observó en la Figura 8.11 para el caso en el que se consideró frenado regenerativo ideal. Un detalle con las gráficas de cada ciclo, tanto potencia como corriente y tensión se puede encontrar en el Anexo B.4.2.

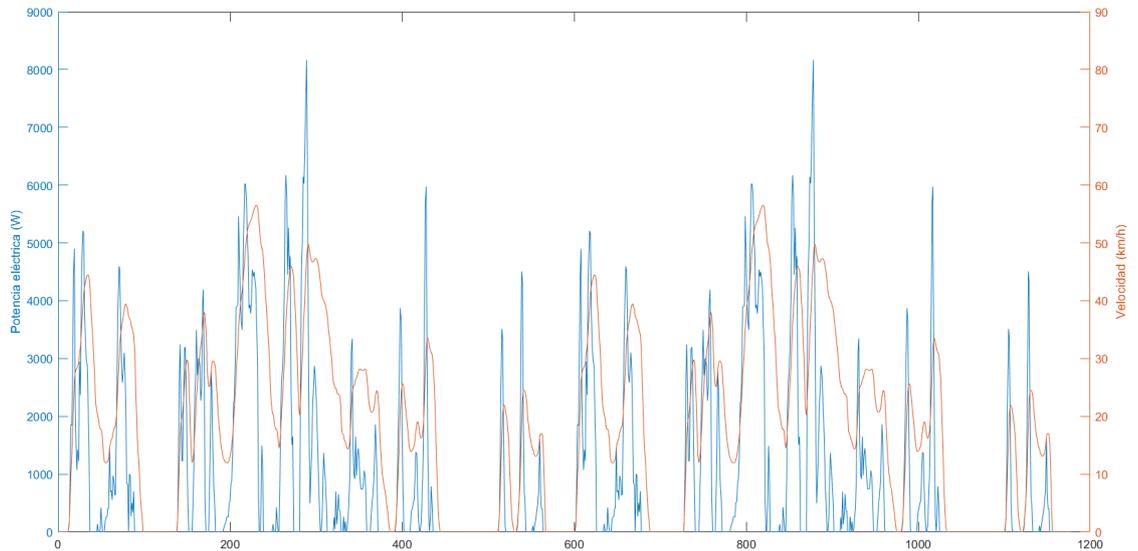


Figura 8.12: Velocidad y potencia eléctrica del ensayo WLTP, sin frenado regenerativo.

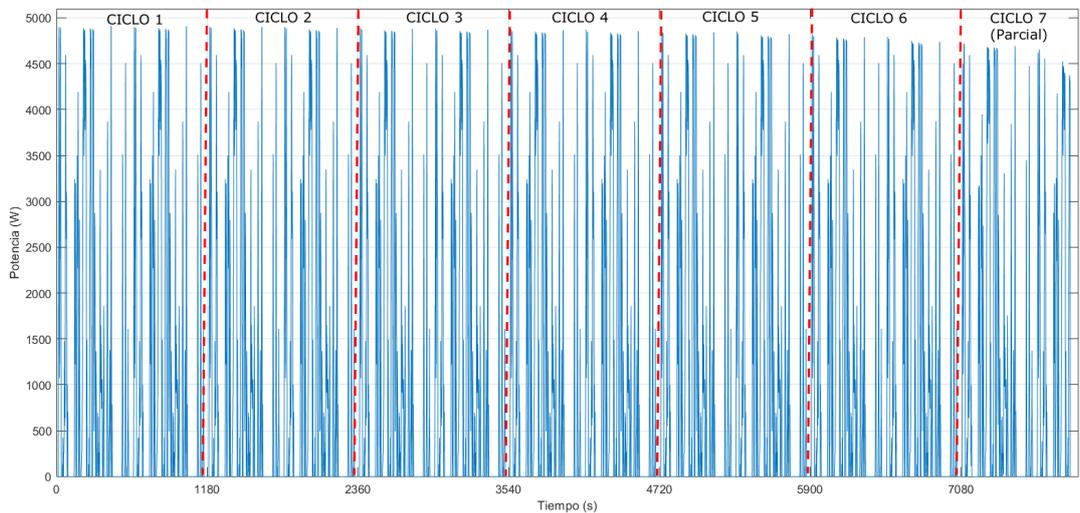


Figura 8.13: Potencia eléctrica en función del tiempo en el ensayo WLTP, sin frenado regenerativo. Se distinguen 6 ciclos completos de conducción WLTC transcurridos y un séptimo parcial antes de que la batería se descargue totalmente, recordando que cada ciclo está compuesto por dos etapas de baja velocidad.

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

En este caso también se limitó la corriente a un valor máximo de 100 A, por lo que el equipo de ensayo recortó los picos de potencia a 5 kW. Por lo tanto, al igual que el caso en el que se consideró frenado regenerativo ideal, el banco no siguió exactamente el perfil de potencia introducido.

8.3. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

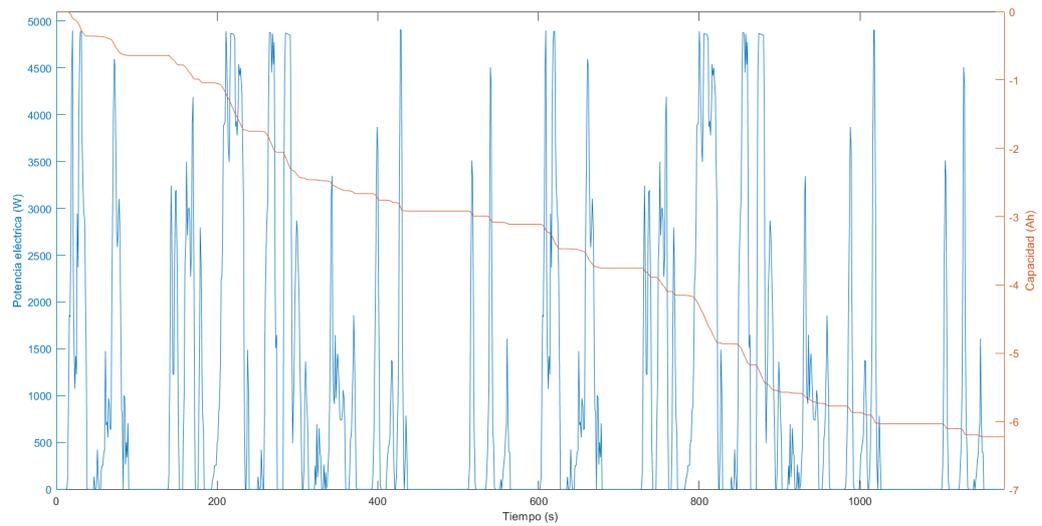


Figura 8.14: Evolución de la capacidad durante un ciclo del ensayo WLTP, sin frenado regenerativo.

8.3.3. Comparación de autonomía

Realizados los ensayos descritos, se obtuvo que considerando un sistema de frenado regenerativo ideal en el que el 100 % de la energía cinética del vehículo durante el frenado se utiliza para cargar la batería, la máxima autonomía teórica que podría alcanzar sería aproximadamente 20 km superior respecto al caso de no considerar frenado regenerativo. Los sistemas de frenado regenerativo reales permiten transferir solo una parte de la energía cinética en energía eléctrica para cargar la batería, por lo que la autonomía considerando un caso real estaría acotada en el rango de los 41,62 km obtenidos sin frenado regenerativo y los 61,89 km obtenidos con el caso de frenado regenerativo ideal.

Con frenado regenerativo ideal la capacidad descargada por ciclo fue de 4,7 Ah, mientras que sin regeneración se descargó 6,2 Ah en cada ciclo. Por lo tanto, la máxima capacidad en Ah que se podría cargar con regeneración ideal, sería de 1,5 Ah por ciclo. La máxima eficiencia de los sistemas de frenado regenerativo reales es del orden del 78 % [34], por lo que en un caso real se podría cargar hasta 1,2 Ah por ciclo. El total de capacidad descargada por ciclo sería entonces 5,9 Ah, por lo que ante esta situación, la batería podría soportar aproximadamente 8,5 ciclos WLTC y se obtendría una autonomía de 52,45 km. En la Tabla 8.5 resume la autonomía que se obtiene en los diferentes casos.

Tipo de sistema de frenado	Eficiencia de regeneración	Autonomía estimada (km)
Regenerativo ideal	100 %	61,89
Regenerativo real	78 %	52,45
Sin regeneración	0 %	41,62

Tabla 8.5: Autonomía estimada en base a WLTP para el vehículo modelado, según tipo de frenado.

8.4. Ensayo autodescarga

Este ensayo tiene como objetivo observar la capacidad de retención de carga que tiene el banco luego de un período de 20 días de almacenamiento en circuito abierto. El mismo se realiza tal como se describió en la Sección 5.3.4 del Capítulo 5. Para el período de reposo se desconectó el BMS y se dejó el banco en circuito abierto para evitar una pérdida de carga producto del consumo del BMS.

Se detallan en la Tabla 8.6 los pasos realizados en el ensayo y los valores obtenidos en cada uno, acorde al procedimiento de la Sección 5.3.4. En dicha tabla se observa que el valor de capacidad a descargar en el paso 2 es la mitad del valor de capacidad absorbido en el paso 1 y este mismo valor es utilizado para la descarga parcial del paso 6.

N° de paso	Etapas	Datos
1	Carga completa	Capacidad absorbida 49,6 Ah
2	Descarga del 50 %	Capacidad descargada 24,8 Ah
3	Reposo 30 min	N/A
4	Descarga de capacidad remanente (C_b)	Capacidad descargada 24,4 Ah
5	Carga completa	Capacidad absorbida 49,5 Ah
6	Descarga del 50 %	Capacidad descargada 24,8 Ah
7	Reposo 20 días	N/A
8	Descarga capacidad remanente (C_r)	Capacidad descargada 23,1 Ah

Tabla 8.6: Parámetros medidos en cada paso del ensayo de autodescarga.

El reposo se realizó durante 20 días, a diferencia de los 28 días que requiere la norma IEC 62660-1:2018, debido al tiempo disponible para la realización de este ensayo en el proyecto. Por último, como indica la ecuación 5.10 del Capítulo 5, el ratio de retención de carga se calcula como 8.2, obteniéndose que luego de 20 días de almacenamiento del banco con un SOC de 50 %, este fue capaz de retener el 94,7 % de su capacidad.

A modo de evaluación del valor obtenido con el ensayo de autodescarga, en la hoja de datos de las celdas consideradas como referencia [28], el fabricante informa un ratio de retención de capacidad de 96 % luego de almacenar la celda durante 30 días a una temperatura ambiente de 25 °C y con un SOC del 100 %. Si bien en el ensayo realizado el banco se almacenó durante 20 días con un 50 % del SOC, se observa que el valor de retención de carga obtenido es menor que el declarado por el fabricante pero no se aleja demasiado de dicho valor, por lo que se observa que las celdas no cuentan con un daño que incremente notoriamente su tasa de autodescarga.

$$R_{vacío} = \frac{C_r}{C_b} \times 100 = \frac{23,1 Ah}{24,4 Ah} \times 100 = 94,7\% \quad (8.2)$$

8.5. Características del banco obtenido y posibles usos

Dado que el ensayo fue realizado sin el BMS conectado, resta realizar una estimación de la autodescarga que tendría el banco con dicho equipo. Debido a que por razones de tiempo no fue posible ensayar el banco bajo estas condiciones (con el BMS conectado), se realiza una estimación en función del consumo del BMS declarado por el fabricante, el cual declara un consumo de 0,6 W (sin balanceo activado). Este consumo equivale a 11,72 mA a una tensión de alimentación de 51,2 V (tensión nominal del banco). Multiplicando dicho valor de corriente por 480 h equivalentes a los 20 días de reposo en los que se realiza el ensayo, esto equivale a una descarga de $C_{BMS} = 5,635 \text{ Ah}$ ($0,01172 \text{ A} \times 480 \text{ h}$). Por lo tanto el nuevo ratio de retención de carga se calcula con un C_r equivalente a la carga retenida por la batería luego de almacenada menos la carga que hubiera absorbido el BMS, como se muestra en la ecuación 8.3. Como es esperable, el ratio de retención de carga ahora disminuye considerablemente (alrededor de un 25 %). Bajo esta condición (dejando el banco en reposo con un SOC de 50 %), el banco perdería su carga remanente (24,4 Ah) en aproximadamente 70 días, considerando el consumo del BMS y la propia autodescarga de la batería.

$$R_{conBMS} = \frac{C_r - C_{BMS}}{C_b} \times 100 = \frac{23,1 \text{ Ah} - 5,635 \text{ Ah}}{24,4 \text{ Ah}} \times 100 = 71,6 \% \quad (8.3)$$

8.5. Características del banco obtenido y posibles usos

Con los ensayos realizados al banco se relevaron parte de las características electroquímicas y de operación del mismo, las que se resumen en la Tabla 8.7. En dicha tabla también se incluyen los parámetros físicos del banco y otros datos de interés para el usuario, conformando así lo que sería la hoja de datos del banco construido.

Luego de haber caracterizado el banco se observa que el mismo podría utilizarse sin problemas en aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía de bajo porte como en UPS y micro-generación. El rendimiento y la compatibilidad del banco con la aplicación dependerá de los requerimientos de la misma, quedando a criterio del usuario. Como referencia, se informa que bajo una descarga a $C/3$ el mismo es capaz de entregar una energía de 2509 Wh, por lo que según se detalla en el Capítulo 2 en la Sección 2.2.2, con sistemas UPS cuyo rendimiento en el sistema de conversión de energía ronda los 97 %, la energía que el sistema es capaz de entregar a la carga es de 2433 Wh, traduciéndose por ejemplo en el abastecimiento de una carga de 2433 W durante 1 hora.

En cuanto al uso del banco en electromovilidad, se observa que si bien el mismo es capaz de entregar picos de potencia, las características del banco se encuentran por debajo de los valores meta establecidos por USABC en las Tablas 2.2 y 2.3. Igualmente, con el ensayo de autonomía se simuló el estrés que sufriría el banco si fuera utilizado en micro-electromovilidad, obteniendo valores de autonomía similares a los que disponen los vehículos de ese tipo. Por lo tanto, se concluye que el banco construido podría ser utilizado en un triciclo eléctrico como el modelado, lo que podría llegar a ser esperable debido a que las celdas provienen de la batería de un vehículo con características similares.

Capítulo 8. Ensayos al banco y caracterización

Cantidad de celdas	16 en serie
Química	LiFePO ₄
1C	50 A
Capacidad	49,6 Ah
Tensión Nominal	51,2 V
Energía disponible de descarga continua @ C/3	2509 Wh
Energía específica de descarga continua @ C/3	98,4 Wh/kg
Densidad de energía de descarga continua @ C/3	121,2 Wh/l
Corriente máxima de descarga continua	1C
Corriente máxima de carga continua ²	0,5C
Corriente máxima de descarga @ 10 s	2C
Corriente máxima de carga @ 10 s	1,5C
Pulso máximo de potencia de descarga @ 2C, 10 s	4187 W
Pulso máximo de potencia de carga @ 1,5C, 10 s	4125 W
Pulso máximo de potencia de descarga específica @ 2C, 10 s	164,3 W/kg
Pulso máximo de potencia de carga específica @ 1,5C, 10 s	162,0 W/kg
Método de carga	CC hasta 56,8 V CV @ 56,8 V hasta I≤0,05C
Tensión máxima de carga	56,80 V
Tensión mínima de descarga	44,95 V
Tasa de autodescarga @ 50% SOC en 20 días (Sin BMS / Con BMS)	94,7% / 71,6%
Rango de temperaturas de carga ³	0 °C a 60 °C
Rango de temperaturas de descarga	-30°C a 60 °C.
Dimensiones l/a/h	360 mm / 250 mm / 230 mm
Volumen	20,7 l
Peso Neto	25,5 kg
Comunicación con BMS	Bluetooth (visualización y configuración de parámetros) y/o CANBus (lectura de datos)
Protecciones eléctricas	Sobretensión, sobrecarga, sobredescarga, contra cortocircuitos

Tabla 8.7: Datos nominales del banco de baterías construido.

8.6. Guía de usuario

Se presenta a continuación una breve guía para el correcto uso del banco construido.

8.6.1. Precauciones de uso

1. La manipulación del banco debe estar a cargo de personal calificado para trabajar con baterías y contar con todas las medidas de seguridad necesarias.

²Según [28].

³Según [28]. No se realizaron ensayos de variación de temperatura.

2. El banco no es impermeable, no debe operar ni almacenarse a la intemperie.
3. No deben cortocircuitarse los bornes de salida potencia, ni los bornes individuales de cada celda, por lo cual se debe trabajar con mucho cuidado cuando el banco se encuentre sin la tapa superior.
4. No se deben utilizar objetos punzantes a la hora de manipular la caja.
5. Se debe utilizar siempre en planos horizontales.
6. No se debe golpear el gabinete.
7. Si se va a utilizar en un vehículo, el banco deberá ser sujetado al mismo.
8. No se debe colocar peso sobre la tapa.
9. Se debe mantener alejado de fuentes de calor como fuego, estufas, etc.
10. Se debe evitar almacenar el banco en ambientes húmedos.

8.6.2. Conexionado

El conexionado de potencia se debe realizar con cables de 6 mm² de sección o más, el mismo se realiza en el punto de conexión indicado en la Figura 8.15 y se debe verificar el correcto apriete de la bornera de conexión. Cabe señalar que no se instaló un terminal de conexión debido a que no se contó con información sobre el conector del motor del vehículo eléctrico en el cual se pretende utilizar el banco. Se descartó utilizar un conector industrial debido a que implicaría un gasto innecesario, ya que debería ser sustituido a la hora de utilizar el banco en el vehículo. Por tal motivo, se decidió colocar en el interior del banco la bornera que se muestra en la Figura 8.15, para no perder generalidad en el uso del banco y poder instalar a partir de allí el conector que sea necesario para la aplicación en la que se pretenda utilizarlo.



Figura 8.15: Punto de conexión de potencia del banco marcada con el círculo rojo.

8.6.3. BMS

El BMS cuenta con los parámetros de protecciones preconfigurados en función de la química de la batería, los mismos se visualizan y se editan mediante la aplicación de interfaz gráfica que proporciona el fabricante, la que se descarga escaneando el QR mostrado en la Figura 8.16. La contraseña del primer acceso es 123456, luego cambia automáticamente a 1234 y puede ser cambiada por el usuario desde la aplicación. Se deberá seleccionar la química correspondiente a las celdas con las que se va a trabajar, en el caso del banco será LFP. Se deberá verificar que los parámetros cargados automáticamente por el BMS, sean consistentes con la hoja de datos del banco. Se sugiere también calibrar la lectura de tensión y corriente del BMS comparando con un instrumento de medida. La aplicación cuenta con parámetros específicos para realizar dicha calibración.



Figura 8.16: Código QR para descargar la aplicación del BMS.

En el siguiente link se puede descargar del manual completo del BMS, donde se indica el manual de uso de la aplicación y conexión del mismo <https://www.dropbox.com/s/s1zz6hdx0ho3e17/JK%20BMS%20Active-Bluetooth-BMS-Manual.pdf?dl=0>.

8.6.4. Encendido y apagado del banco

El banco posee un botón de encendido del BMS y un botón de apagado, los cuales son accesibles desde el compartimiento donde se encuentra el BMS, extrayendo la tapa lateral. El botón de encendido se etiqueta con “ON” y es un normal abierto que cuando es presionado aplica una tensión de 3 V (proporcionada por dos pilas AA) entre los terminales del BMS para prenderlo. Por otra parte, el botón de apagado se etiqueta con “OFF” y es un normal cerrado que cuando es presionado interrumpe la alimentación del BMS, causando el apagado del mismo. El estado del BMS lo denota un LED de color rojo integrado al mismo, el cual se enciende y permanece destellando cuando se encuentra encendido, mientras que permanece apagado cuando el banco se encuentra apagado.

En caso de que el BMS active una de sus protecciones y no vuelva a habilitar la carga o descarga del banco, se debe reiniciar el mismo, presionando primero el botón de OFF y luego el de ON. Se observa que en caso de querer automatizar este proceso mediante un controlador externo, se pueden reemplazar los pulsadores por relés con contactos auxiliares normal abierto para el botón ON y normal cerrado para el botón OFF.

Capítulo 9

Análisis de costos y viabilidad

9.1. Análisis económico

Para dimensionar todo el proceso de reutilización y evaluar la rentabilidad del mismo, se considera pertinente realizar un análisis de carácter económico que contemple las distintas etapas del proceso de reutilización de las celdas usadas, para finalmente comparar el costo del banco reutilizado contra el costo que tendría si se hubiera construido con celdas nuevas. Este análisis busca dimensionar el proceso sin un carácter de proyecto de inversión, por lo tanto, los costos se dimensionan a modo de referencia y sin una visión de negocio.

Para determinar el costo operativo total en recursos humanos, se toma como referencia el sueldo de un Ayudante G^o1, como operario de laboratorio en régimen de 4 h diarias (U\$S 411 mensuales). Se supone que el laboratorio se considera dotado de dos operarios dado que existen procesos que por seguridad es conveniente que lo realicen dos personas, por lo que el costo mensual de recursos humanos se estima en U\$S 822.¹

Los costos indirectos de herramientas de mano, equipamiento de medición (potenciostato, caja contenedora de ensayos, multímetro, etc.) y equipos de protección personal (EPP) no se consideran como tales, ya que se valoriza el costo de alquiler del laboratorio en su conjunto. Para valorizar este equipamiento, se toma como referencia la depreciación anual de los mismos, en base a los datos del Artículo 137 del Estatuto Tributario de Colombia, los cuales se observan en la Tabla 9.1.

En la Tabla 9.2 se valorizan los equipos y herramientas adquiridos para el laboratorio, donde la información del costo del potenciostato y la caja de ensayos fue proporcionada por el equipo docente encargado del laboratorio. Se estima un costo total mensual de U\$S 623, con lo que se cubrirían los gastos de depreciación del equipamiento del laboratorio.

¹Los datos de sueldos fueron extraídos del documento “Escala de sueldos Universidad de la Republica”, publicado en la página web oficial de la UdelaR.

Capítulo 9. Análisis de costos y viabilidad

Activo	Tasa de depreciación Anual	Vida útil
Equipamiento eléctrico	10 %	10 años
Equipo médico/científico	12,5 %	8 años
Envases, empaques y herramientas	20 %	5 años

Tabla 9.1: Valores de depreciación anual y vida útil de equipos y herramientas según Art. 137 del Estatuto Tributario Colombiano.

Activo	Tipo de activo	Valor	Costo de depreciación (mensual)
Multímetro	Equipamiento científico	U\$S 65	U\$S 0,7
Juego de destornilladores	Herramientas	U\$S 25	U\$S 0,40
Juego de pinzas	Herramientas	U\$S 20	U\$S 0,33
Juego de dados	Herramientas	U\$S 85	U\$S 1,4
EPP	Herramientas	U\$S 50	U\$S 0,81
Potenciostato Chroma	Equipamiento científico	U\$S 50000	U\$S 521
Caja contenedora de ensayos	Equipamiento científico	U\$S 7000	U\$S 73
Sistema de incendio	Equipamiento eléctrico	U\$S 3000	U\$S 25
Depreciación total mensual del laboratorio			U\$S 623

Tabla 9.2: Valor del equipamiento adquirido para el laboratorio y su depreciación asociada.

9.1.1. Desmontaje de batería usada y acondicionamiento de celdas

En base al procedimiento descrito en el Capítulo 4 y a la experiencia obtenida, se estima una jornada de 4 h de dos personas para todo el proceso de desmantelamiento de la batería, teniendo en consideración los procedimientos de seguridad requeridos para un trabajo seguro. En particular, las celdas estudiadas en el presente proyecto no poseían bornes roscados para realizar la conexión, por lo que también se debió invertir una jornada completa de 8 h para la adaptación de terminales roscados en los bornes de las celdas, según lo descrito en la Sección 7.1.1 del Capítulo 7. Para esta instancia se prevé el uso del laboratorio con el fin de tener accesibilidad a herramientas para el desarme, equipo de medidas eléctricas y equipamiento de protección personal, por lo tanto a las horas hombre también se les suman las horas de uso del laboratorio.

Por otro lado, se tiene en consideración la disposición final de la batería, la cual tiene un costo de U\$S 5/kg para baterías de litio ². Este es el precio que a la fecha se cobra en el mercado uruguayo por la disposición final de los residuos de esta índole, por lo tanto, a los gastos operativos del proyecto se descuenta el costo de la disposición final de las 16

²Según datos proporcionados por WERBA, industria especializada en reciclaje de residuos industriales.

celdas que se utilizaron para formar el nuevo banco, ya que este monto se le cobraría a la empresa que donó la batería para realizar una gestión de disposición final o segunda vida en este caso. Se calcula el peso de las 16 celdas utilizadas en el banco según la Tabla A.1.1, obteniendo un total de 18,14 kg, por lo que el costo de la disposición final de las mismas sería de aproximadamente U\$S 91. Vale aclarar que se consideran solo las 16 celdas utilizadas en el banco, ya que si bien se cobraría la disposición final de las 24 celdas a la empresa que donó la batería, luego se debe pagar el costo de la disposición final de las 8 celdas que no son utilizadas para el banco. En resumen, se observa en la Tabla 9.3 los costos operativos y las horas hombre invertidas en esta instancia.

	Horas de equipo técnico	Horas de uso de laboratorio	Costos operativos
Desmantelamiento	4	4	0
Instalación de bornes	8	8	0
Disposición final	0	0	- U\$S 91
Total	12	12	- U\$S 91

Tabla 9.3: Resumen de horas y costos según etapa del proceso de desmontaje de batería usada y acondicionamiento de celdas.

9.1.2. Ensayos

Los ensayos realizados fueron los descriptos en el Capítulo 5 y se realizaron a todas las celdas de la batería recibida. En particular, el ensayo de capacidad estática tiene una duración de 5 horas. Este tiempo, es la duración si la celda absorbe los 50 Ah que declara el fabricante, pero en el caso de las celdas estudiadas, algunas de ellas no lograron absorber esta capacidad, por lo que el tiempo del ensayo fue menor. De igual forma, desde un punto de vista conservador y con el fin de simplificar el cálculo, se considera que en todos los casos la carga fue completa, dado que fueron solo 5 de las 24 celdas estudiadas las que no pasaron el ensayo de capacidad estática. Por lo tanto, para el ensayo de capacidad estática de todas las celdas se deben disponer de 12 jornadas de 5 horas, debido a que el equipo de ensayo cuenta con dos canales que permiten ensayar dos celdas en simultáneo. A su vez, también se debe agregar 1 hora extra por jornada para la preparación del ensayo y la finalización del mismo, que implica la manipulación de las celdas, la programación del equipo, verificación de conexiones y almacenamiento de datos.

Por otro lado, el ensayo de potencia explicado en la Sección 6.2.2, considerando las modificaciones realizadas para reducir su tiempo de operación, tiene una duración de 5,5 horas aproximadamente más una hora de preparación del ensayo. Es aproximado, dado que puede variar en función de cómo responda la celda, y cuántos ciclos le lleve descargarse por completo. Dado que este ensayo se realizó a las 19 celdas que pasaron el ensayo de capacidad estática, fueron necesarias 10 jornadas de 6,5 horas, ya que es posible ensayar dos celdas en simultáneo utilizando los dos canales del equipo de ensayo.

Capítulo 9. Análisis de costos y viabilidad

Cabe mencionar que el almacenamiento y procesamiento de datos recabados de los ensayos se incluyen dentro de las horas de ensayo, ya que mientras estos se efectúan, el operario dispone de tiempo libre para realizar esta actividad. Se señala que para la realización de los ensayos alcanza con un solo operario, dado que no representa mayores riesgos al trabajar con bajas tensiones y efectuar el ensayo dentro de un recinto anti-explosivo. Por lo tanto, para el cálculo del costo de los ensayos solo se considerará el jornal de un operario. Se observa en resumen, en la Tabla 9.4 las horas y recursos invertidos en la etapa de ensayos a las celdas.

	Horas de equipo técnico	Horas de uso de laboratorio	Costos operativos
Ensayo de Capacidad	30	60	0
Ensayo de Potencia	32,5	65	0
Total	62,5	125	0

Tabla 9.4: Resumen de horas y costos en el proceso de ensayos de celdas.

9.1.3. Ensamble del banco

Para la construcción del banco de baterías se debió diseñar y ensamblar un gabinete contenedor. Para el diseño del mismo se invirtió una jornada completa de 4 horas de dos personas para especificar todas las partes y método de ensamble y fabricación. El gabinete se construyó con chapa y el costo del suministro y plegado de las mismas fue de U\$S 168. En cuanto al montaje del gabinete, se debió soldar las diferentes partes y posteriormente pintarlo, requiriendo una jornada de 8 horas de dos personas. Al banco también se le incorporó un BMS, el cual fue adquirido del exterior y tuvo un costo de U\$S 280, incluyendo el envío e impuestos.

Para armar el banco, el conexionado en serie se realizó con saltos de cable de cobre aislado en PVC de 6 mm², con terminales de ojo pre-aislados. Por último, se atornilló y conectó el BMS, junto con el cableado de medida del mismo. Este proceso de armado del banco requirió de una jornada de 4 horas de dos personas, con un costo en materiales de U\$S 40, sin requerir el uso del laboratorio. Se observa en la Tabla 9.5 el resumen del total de horas y recursos invertidos en el ensamble del banco.

	Horas de equipo técnico	Horas de uso de laboratorio	Costos operativos
Diseño de caja	4	0	0
BMS	0	0	280
Armado de caja	12	8	208
Total	16	8	488

Tabla 9.5: Resumen de horas y costos en el proceso de diseño y armado del banco.

9.1.4. Ensayos al banco

Para finalmente determinar las características y prestaciones eléctricas del nuevo banco formado por las celdas reutilizadas y para realizar pruebas de funcionamiento del BMS, al banco se le realizó una serie de ensayos tal como fue descrito en el Capítulo 8. Se requirió de 5 horas para el ensayo de capacidad estática, 5,5 horas para el ensayo de potencia, 5 horas para el ensayo de ciclo de conducción WLTP y finalmente para el ensayo de retención de carga se utilizan 10 horas de ensayo (no se consideran los días que la batería queda en reposo). Se le suma a cada ensayo una hora extra por la conexión y desconexión del equipo y programación de ensayos. En la Tabla 9.6, se resumen las horas y recursos invertidos en esta etapa.

	Horas de equipo técnico	Horas de uso de laboratorio	Costos operativos
Ensayo de capacidad estática	3	6	0
Ensayo de potencia	3,25	6,5	0
Ensayo de ciclo de conducción	3	6	0
Ensayo de retención de carga	5,5	11	0
Total	14,75	29,5	0

Tabla 9.6: Resumen de horas y costos en el proceso de ensayos al banco.

9.1.5. Resumen de análisis económico

En la Tabla 9.7 se puede observar para cada etapa del proyecto, los recursos utilizados y las inversiones económicas requeridas. En complemento, en la Figura 9.1 se aprecia claramente qué procesos requirieron una mayor dedicación.

Finalmente, en la Tabla 9.9 se compara el costo de armar el banco reutilizado del proyecto frente a armar uno exactamente igual pero con celdas nuevas, según el cálculo por etapas que se presenta en la Tabla 9.8. Para estimar el precio de las celdas nuevas, se utiliza como precio de referencia el de un proveedor uruguayo de baterías para electromovilidad. El mismo no disponía de las mismas baterías que se trabajaron en el presente proyecto, por lo tanto se estima el costo del Wh en base a la batería ofrecida por el proveedor. La misma, es una batería de 12,8 V, 100 Ah y 1280 Wh LiFePO₄, con un costo de U\$S 515 (Ver cotización en Anexo D.1). Por lo tanto el precio Wh de esta batería sería de 0,4023 U\$S/Wh. En nuestro caso, la energía que almacenan estas 16 celdas es de $16 \times 3,2V \times 50Ah = 2560$ Wh, lo que se traduce entonces a un costo de U\$S 1030.

Capítulo 9. Análisis de costos y viabilidad

	Tipo de costo						Total por etapa	
	Equipo técnico (1 h = U\$S 10,275)		Laboratorio (1 h = U\$S 3,894)		Operativos			
	Horas	U\$S	Horas	U\$S		U\$S	Horas	U\$S
Disposición final	0	0	0	0	-91	0	-91	
Acondicionamiento de celdas	Desarme	4	41	4	16	0	24	170
	Bornes	8	82	8	31	0		
Ensayos a celdas	Capacidad	30	308	60	234	0	187,50	1129
	Potencia	32,50	334	65	253	0		
Construcción del banco	Diseño	4	41	0	0	0	24	683
	Gabinete	8	82	8	31	168		
	BMS	0	0	0	0	280		
	Montaje	4	41	0	0	40		
Ensayos al banco	Capacidad	3	31	6	23	0	44,3	266
	Potencia	3,25	33	6,50	25	0		
	Autodescarga	5,50	57	11	43	0		
	WLTP	3	31	6	23	0		
Total por tipo de costo		105,25	1081	174,50	679	391	179,75	2151

Tabla 9.7: Resumen de cálculo de costo del banco reutilizado.

	Tipo de costo						Total por etapa	
	Equipo técnico (1 h = U\$S 10,275)		Laboratorio (1 h = U\$S 3,894)		Operativos			
	Horas	U\$S	Horas	U\$S		U\$S	Horas	U\$S
Compra de celdas nuevas	0	0	0	0	1030	0	1030	
Construcción del banco	Diseño	4	41	0	0	0	24	683
	Gabinete	8	82	8	31	168		
	BMS	0	0	0	0	280		
	Montaje	4	41	0	0	40		
Ensayos al banco	Capacidad	3	31	6	23	0	44,3	266
	Potencia	3,25	33	6,50	25	0		
	Autodescarga	5,50	57	11	43	0		
	WLTP	3	31	6	23	0		
Total por tipo de costo		30,75	316	37,50	145	1518	68,25	1979

Tabla 9.8: Resumen de cálculo de costo del banco nuevo.

Banco reutilizado	Banco nuevo
U\$S 2151	U\$S 1979

Tabla 9.9: Comparación entre el costo total del banco reutilizado y un banco nuevo.

9.2. Resumen y conclusiones sobre viabilidad económica

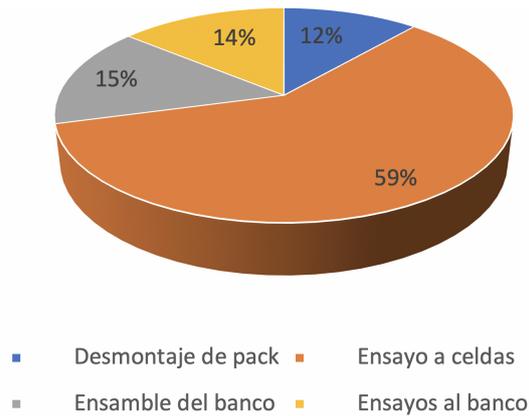


Figura 9.1: Gráfica de distribución de horas hombre según etapa.

9.2. Resumen y conclusiones sobre viabilidad económica

Como se observa en la Tabla 9.9, en base a la estimación de costos realizada, armar un banco con celdas reutilizadas requiere de una inversión de un 8,7% superior a la de implementar el banco con celdas nuevas. Dada la naturaleza de la estimación a lo largo de este capítulo, se puede considerar aproximadamente una paridad entre precios de un banco nuevo y uno reutilizado.

Como se observa en la Figura 9.1, casi el 60% de las horas invertidas en el proyecto se destinó al ensayo de cada celda individual, por lo que este es un punto clave en la optimización de costos del proyecto. Existen empresas de reutilización de baterías que cuentan con acuerdos con fabricantes de vehículos que proporcionan baterías asegurando un determinado rendimiento y grado de envejecimiento. De esta manera, las empresas de reutilización evitan realizar ensayos a la totalidad de las celdas para determinar cuáles pueden ser reutilizadas. Un ejemplo de esto es la empresa alemana Betteries, quien cuenta con un acuerdo con el fabricante Renault para brindar una segunda vida a las baterías provenientes de sus vehículos híbridos y eléctricos. Se observa que contando con un sistema de este tipo, se evitarían más de 180 horas de ensayos y por lo tanto U\$S 1129 del costo final del banco. Por lo tanto sería ampliamente más rentable el proceso de reutilización, ya que el banco reutilizado tendría un costo un 51,6% por debajo del precio del banco nuevo.

No obstante, debe tenerse en cuenta que este es un caso particular de un banco de baterías que fue descartado para su uso en el vehículo, pudiendo en otros casos no ser tan rentable la reutilización. Por otro lado, se desconoce completamente (en este caso) como fue el ciclado de la batería antes de ser donada, no pudiendo estimar la vida útil restante del banco reutilizado. Estos son temas importantes a estudiar dado que a la hora de comercializar este tipo de equipos se debe garantizar determinada vida útil para que sea confiable al consumidor. Por lo tanto, tener una historia técnica de la batería y hacer un estudio con más casos de reutilización, ayudaría a determinar con mayor exactitud la viabilidad económica del proyecto realizado.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 10

Conclusiones

Con la realización del proyecto fue posible dar una segunda vida a una batería de un vehículo eléctrico que se encontraba obsoleta. En particular, a partir de la misma se construyó un banco de baterías reutilizado capaz de ser empleado en aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía y/o micro-electromovilidad.

Se aprendió a utilizar un equipo de ensayo de baterías con el que tomando como referencia estándares internacionales, se diseñaron y realizaron ensayos a las celdas de la batería recibida para determinar cuáles eran aptas para reutilizar. En particular, a las celdas se les realizó un ensayo de capacidad estática y uno de potencia, obteniendo que de las 24 celdas que componían la batería recibida, 19 pasaron el ensayo de capacidad estática, demostrando contar con una capacidad en Ah superior al 95 % de su valor nominal. Por otra parte, de estas 19 celdas, 15 pasaron el ensayo de potencia, entregando y absorbiendo pulsos de corriente de valor 2C y 1,5C respectivamente, para un rango de SOC comprendido entre el 100 % y 10 %. Se concluye entonces, que el 62,5 % de las celdas que componían la batería recibida pueden ser reutilizadas en aplicaciones de micro-electromovilidad que demanden pulsos de potencia similares a los del ensayo de potencia realizado.

El banco construido cuenta con una tensión nominal de 51,2 V y se construyó con 16 celdas conectadas en serie que son gestionadas por un BMS (Battery Management System) adquirido del exterior. Se diseñó y ensambló un gabinete en el cual se alojan las celdas y el BMS en un mismo recinto, dando rigidez y protección mecánica al banco en su conjunto.

Mediante la realización de ensayos, el banco también fue evaluado para determinar sus parámetros eléctricos. Específicamente se realizó un ensayo de capacidad estática con el que el banco demostró disponer del 99 % de la capacidad nominal en Ah de las celdas y con un ensayo de autodescarga se midió un ratio de retención de carga de 94.7 % luego de 21 días de almacenamiento a un SOC de 50 %. El banco logró cumplir el ensayo de potencia entregando y absorbiendo pulsos de corriente de valor 2C y 1,5C respectivamente, por lo que se observó que podía ser utilizado en aplicaciones de micro-electromovilidad que demandaran pulsos de corriente similares a los ensayados. Debido a esto y ante la posibilidad de una futura prueba del banco en un triciclo eléctrico, se

Capítulo 10. Conclusiones

realizó un ensayo para estimar la autonomía que tendría el vehículo si utilizara el banco como fuente de alimentación. Dicho ensayo se realizó tomando como referencia uno de los ciclos de conducción del protocolo WLTP (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure) y se consideró un modelo físico básico del triciclo para determinar la potencia eléctrica demandada por el motor para alcanzar los valores de velocidad impuestos por el ciclo. Con este ensayo se determinó que la batería en el triciclo tendría una autonomía de aproximadamente 61,9 km considerando frenado regenerativo ideal, 52,45 km con un frenado regenerativo real, y de 41,62 km sin frenado regenerativo.

Se destaca que con la realización del proyecto no solo se construyó un banco de baterías, sino que el hecho de que este sea construido a partir de celdas descartadas de un vehículo eléctrico, brinda una segunda vida a un pasivo ambiental que se incrementará en los próximos años a medida que los vehículos híbridos y eléctricos tengan una mayor penetración en el mercado y sus baterías comiencen a ser descartadas, tras llegar al fin de su vida útil o presentar fallas de funcionamiento. En ese sentido, el presente proyecto presentó un punto de partida para el estudio de una segunda vida de dichas baterías, contribuyendo a un manejo ambiental más adecuado de los residuos provenientes de electromovilidad.

10.1. Problemas identificados

Dada la inexperiencia durante las primeras etapas del proyecto, a lo largo del mismo surgieron diversos contratiempos que enlentecieron el avance, causando tener que volver a realizar tareas y probar diferentes métodos. Particularmente, destaca un inconveniente sufrido con los bornes de las celdas a la hora de realizar su interconexión: la batería recibida contaba con las celdas interconectadas mediante una placa de aluminio soldada a los bornes con una soldadura láser, por lo que durante el desmantelamiento de la batería, se tuvieron que romper dichas placas para lograr separar las celdas. Debido a que no se contó con la tecnología requerida para realizar una soldadura similar a la de fábrica, para formar el banco fue necesario acondicionar los bornes para disponer de un terminal roscado con el cual se pudiera realizar la interconexión entre celdas. Dado que los bornes contaban con una profundidad menor a 3 mm y el material del cual estaban contruidos era blando, fue muy difícil roscar un terminal directamente en el borne, por lo que primero se probó fijar un terminal roscado al mismo a través de 4 tornillos pequeños, pero este método ocasionó problemas de falsos contactos y poca rigidez en la conexión, tal como se detalló en la Sección 7.1.2 del Capítulo 7. Por lo tanto, finalmente se decidió roscar un tornillo de mayor sección directamente en el punto de soldadura del borne para contar con mayor profundidad, lo que mejoró el contacto, tanto eléctrica como mecánicamente.

El problema en la conexión de los bornes del primer método recién fue identificado cuando se armó el banco y se intentó ensayar la carga y descarga del mismo, por lo que cambiar de método de conexión implicó volver a desarmar el banco y manipular los bornes de las celdas nuevamente, insumiendo más de un mes de tiempo. Gran parte de

este trabajo se pudo haber evitado si al momento de dismantelar la batería recibida, los puentes de aluminio que unían las celdas se hubiesen cortado con una sierra en lugar de haberlos extraído completamente. De haber realizado esto, se hubiese contado con aproximadamente 2 mm de profundidad adicional para roscar el terminal, lo que hubiese proporcionado desde un comienzo un contacto más confiable y con mayor rigidez mecánica. Como consecuencia de este problema identificado en la conexión de los bornes, se concluye que un aspecto importante para facilitar la reutilización de baterías provenientes de electromovilidad es que las mismas estén compuestas por celdas con bornes accesibles y conectables de una manera sencilla.

Por otra parte, otro problema identificado en el proyecto fue la gran carga horaria requerida por los ensayos a las celdas, ya que como se apreció en el Capítulo 9, casi el 60% de las horas del proceso de reutilización fueron consumidas por dichos ensayos. Dado que esta carga horaria incrementa el costo del banco e impacta directamente en la viabilidad económica del proceso, se podría hacer más eficiente la determinación de las celdas a reutilizar instalando por ejemplo más cantidad de canales en el potencióstato para realizar más ensayos en simultáneo.

Por último, otro inconveniente que fue identificado en el proyecto surgió al momento de instalar el BMS en el banco, ya que al intentar realizar la carga y descarga del banco, el mismo no entregaba la totalidad de su capacidad. En una primera instancia se identificó que esto se debió a que al momento en el que se armó el banco, las celdas se conectaron con diferentes valores de SOC y por lo tanto no todas alcanzaban el 100% o el 0% del SOC al mismo tiempo durante la carga o descarga del banco, respectivamente. Para solucionar esto se debió desarmar el banco, separando las celdas y cargando cada una hasta un SOC del 100%, de manera de armar nuevamente el banco partiendo de un valor de carga conocido. Luego, al intentar descargar el banco, se observó que a pesar de que este había sido armado con las celdas totalmente cargadas, solo entregó aproximadamente la mitad de su capacidad nominal. Debido a que no todas las celdas que componen el banco se descargan a la misma tensión de operación, se constató que la reducción en la capacidad podía estar asociada a que el BMS durante la descarga realizaba un balanceo que descargaba las celdas con mayor tensión, ya que el BMS realizaba un balanceo en tensión y no un balanceo en SOC. Para solucionar esto se tuvo que desarmar el banco nuevamente y volver a cargar las celdas por separado. Luego se armó nuevamente el banco con las celdas completamente cargadas y se realizó la descarga con la función de balanceo del BMS desactivada, obteniendo en este caso que el banco entregó una capacidad de aproximadamente el 99% de su valor nominal. Se concluye entonces que todos estos pasos se podrían haber evitado si desde un comienzo las celdas se hubieran conectado completamente cargadas para formar el banco y la descarga se hubiera hecho sin la función de balanceo del BMS.

10.2. Viabilidad

Como se detalla en el Capítulo 9, a grandes rasgos, el costo de reutilización de las baterías es comparable al de haberlas adquirido nuevas (precisamente reutilizarlas cuesta un 8,7% más). Considerando también, que dicho banco reutilizado carece de una estimación de vida útil, dado que no se cuenta con información del estado de degradación de las baterías usadas, se torna muy difícil la introducción al mercado de este tipo de equipamiento.

Como se evalúa en la Sección 9.2 de dicho capítulo, contar con un esquema de reutilización donde el proveedor de baterías usadas asegure un cierto SOH y rendimiento, ahorraría casi un 60% del total de horas invertidas en ensayos, lo que implicaría una reducción del costo de más de un 50% respecto al banco construido con baterías nuevas. En esta situación, evidentemente se torna más atractivo el proceso, no solo dando margen para una venta a menor precio respecto a las nuevas, si no también teniendo un respaldo de una empresa automotriz respecto al SOH de las baterías reutilizadas.

Si bien esta estimación no tuvo un carácter formal de proyecto de inversión, es un punto de partida para una evaluación como unidad de negocios. En caso de evaluarse como tal, debe realizarse un estudio más profundo, analizando diversos factores como son entre otros, el mercado local de baterías y vehículos eléctricos, los fabricantes que estén dispuestos a una asociación para reutilizar sus baterías, cuántas baterías descartadas existen en el mercado, cuántas celdas son reutilizadas en promedio por batería, así como también, el mercado para la colocación de estas baterías reutilizadas.

10.3. Futuros pasos

Es vital para continuar afianzando la viabilidad de dar una segunda vida a baterías de vehículos eléctricos, estudiar un mayor número de baterías a reutilizar, comprendiendo diversas tecnologías y motivos del descarte de las mismas. De esta forma, se aumenta el espectro de posibilidades consideradas y se acota la incertidumbre ante diversas situaciones con las que se pueda enfrentar a la hora de avanzar con este tipo de proyectos.

Un punto importante para poder lanzar al mercado de consumo una batería reutilizada es garantizar el correcto funcionamiento de la misma. Por lo tanto deben investigarse métodos para estimar la vida útil de celdas electroquímicas, teniendo una medida confiable del SOH del banco, en conjunto con sus características avaladas por ensayos eléctricos, dándole al consumidor la garantía que al operar la batería bajo ciertas condiciones, esta tendrá un correcto funcionamiento durante un determinado tiempo. Para este punto puede llegar a resultar importante realizar ensayos a diversas temperaturas, tal como realizan los fabricantes de baterías. Para lograr esto se debería adecuar el Laboratorio de forma de contar con un sistema de acondicionamiento térmico, capaz de mantener la temperatura controlada. Además de ensayos a diversas temperaturas, también es común e importante realizar ensayos mecánicos (vibración, caída libre, impacto, shock térmico) para garantizar el uso seguro de la batería en su gabinete (no explosión, no incendio)

bajo condiciones más exigentes o posibles accidentes.

Al finalizar este proyecto el Laboratorio de Vehículos Eléctricos queda dotado de un equipo de ensayos funcional, con recursos humanos capacitados y (a la fecha) dos baterías más para estudiar (Batería B 4.2 y Batería C 4.3). Por lo que a futuro se podrían ensayar las celdas que componen dichas baterías y en caso de que sean capaces de ser reutilizadas, comparar los resultados que se obtendrían construyendo un banco con las mismas, respecto a los resultados obtenidos con el banco del presente proyecto.

Por último, en cadena con este proyecto se podría evaluar el rendimiento del banco en una aplicación real de electromovilidad, implementando el banco en el triciclo considerado, para evaluar el modelado realizado en la Sección 8.3 del Capítulo 8 y validar el ensayo de estimación de autonomía realizado. De esta forma se obtendría un resultado más certero del comportamiento del banco bajo condiciones operativas reales y se tendría la oportunidad de evaluar su funcionamiento.

Dado que en este proyecto se consiguieron baterías de diferentes tecnologías, surge la inquietud de estudiar si es posible formar un banco compuesto por celdas de diferentes tecnologías. Este hecho no es trivial y representa un desafío, ya que las diferentes tecnologías de almacenamiento electroquímico poseen diferentes tensiones de trabajo y distintas condiciones de operación. Por lo tanto, puede ser de utilidad investigar en sistemas de conversión de electrónica de potencia capaces de adaptar celdas de diversas tecnologías en un mismo conjunto de almacenamiento. De ser esto posible, se aumentarían aún más las posibilidades de reutilización de baterías provenientes de electromovilidad.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Ensayos realizados a celdas

A.1. Parámetros físicos de las celdas

A.1.1. Masa

La masa de cada celda se midió con una balanza de 1 g de apreciación de acuerdo con la norma [29]. Los resultados para cada celda se presentan en la Tabla A.1.

Celda	Masa (kg)	Celda	Masa (kg)
L001	1,136	L009	1,136
L002	1,124	L010	1,140
L003	1,136	L011	1,122
L004	1,138	L012	1,136
L005	1,125	L013	1,100
L006	1,123	L014	1,154
L007	1,152	L015	1,133
L008	1,128	L020	1,126
L009	1,136	L021	1,134
L010	1,140	L022	1,136
L011	1,122	L023	1,144
L012	1,136	L024	1,082

Tabla A.1: Masas obtenidas para cada celda.

A.2. Ensayo de capacidad estática

Se listan a continuación las curvas relevadas en el ensayo de capacidad estática con cada celda.

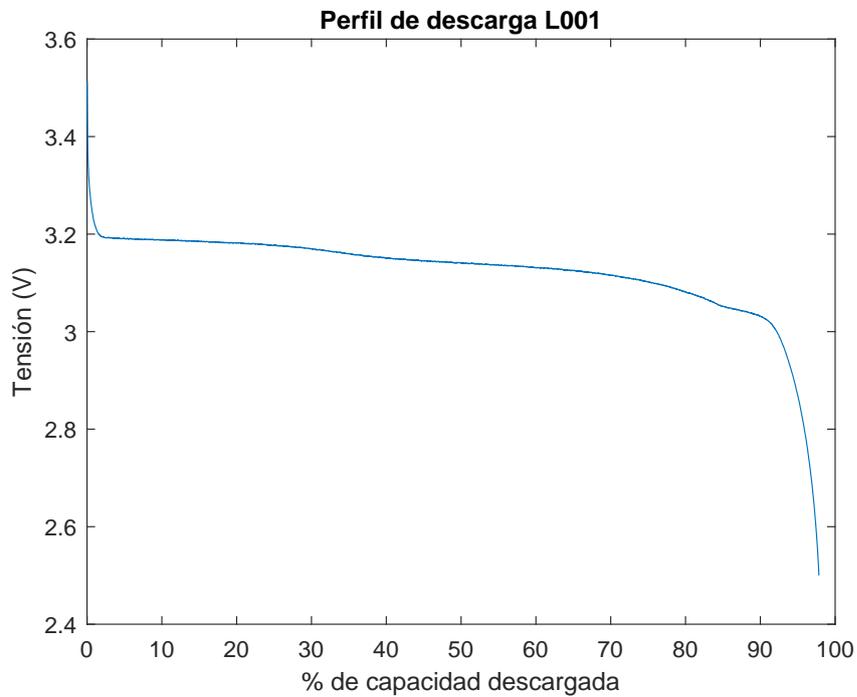


Figura A.1: Perfil de descarga L001.

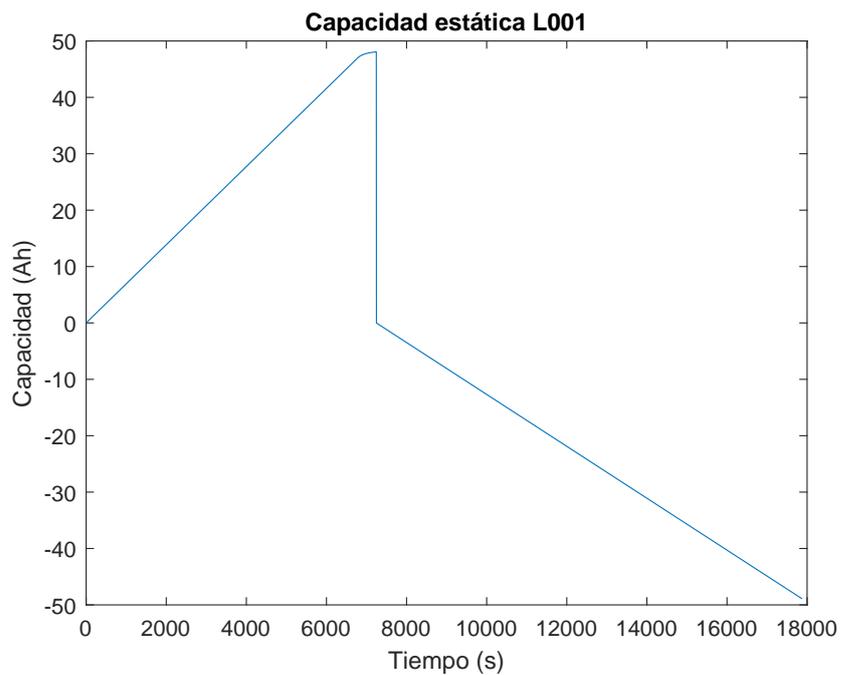


Figura A.2: Curva de capacidad estática L001.

A.2. Ensayo de capacidad estática

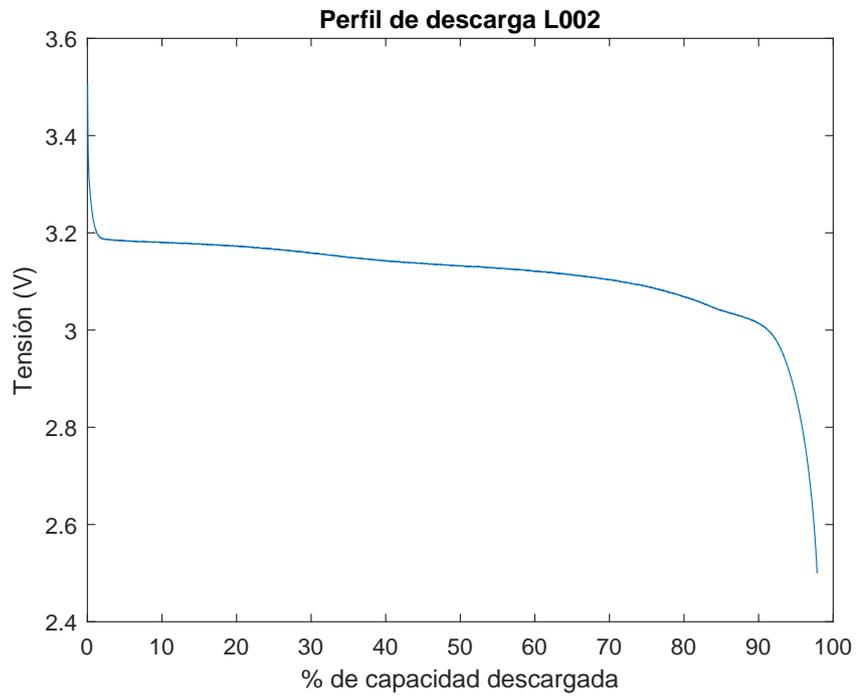


Figura A.3: Perfil de descarga L002.

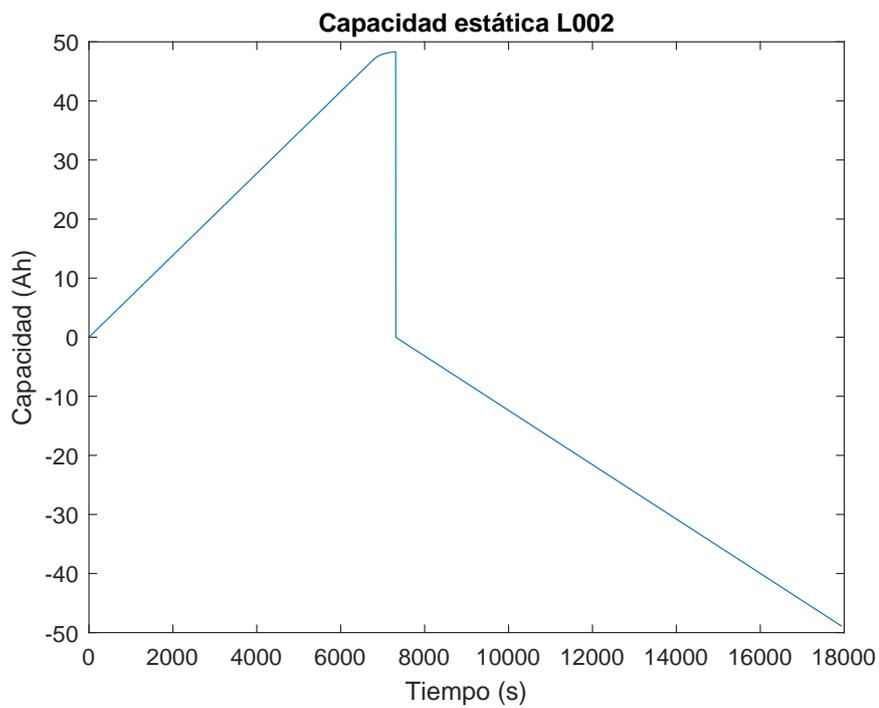


Figura A.4: Curva de capacidad estática L002.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

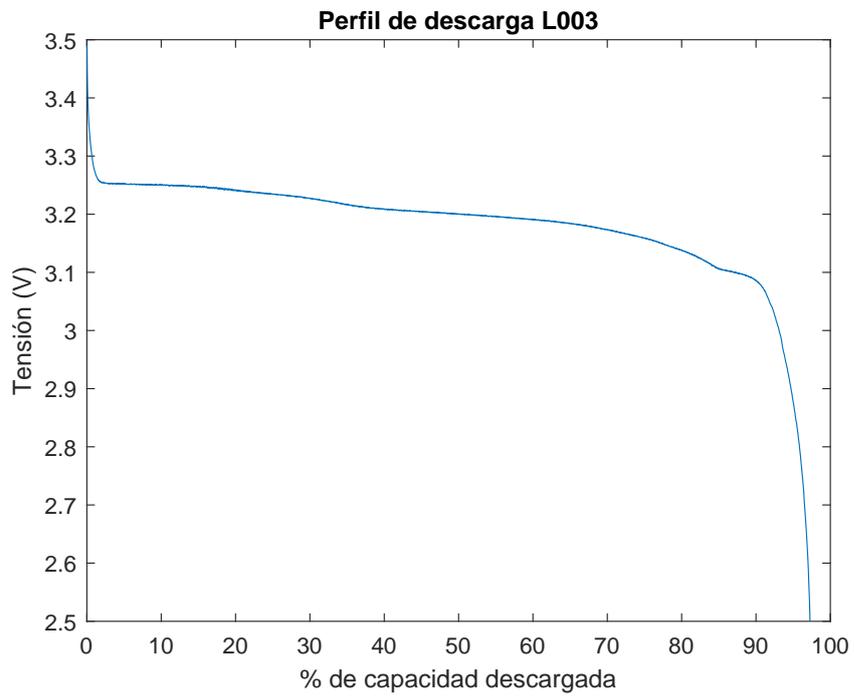


Figura A.5: Perfil de descarga L003.

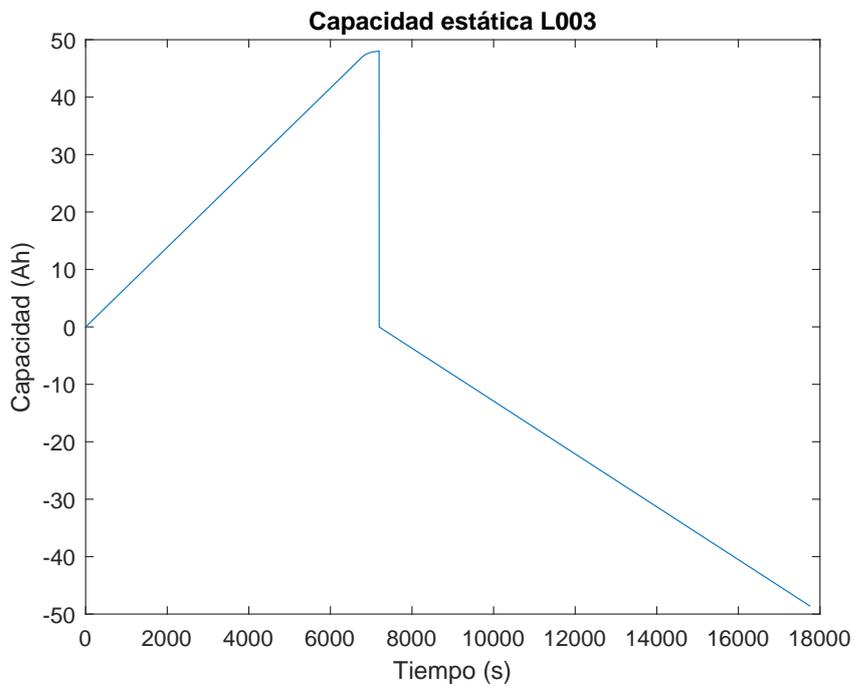


Figura A.6: Curva de capacidad estática L003.

A.2. Ensayo de capacidad estática

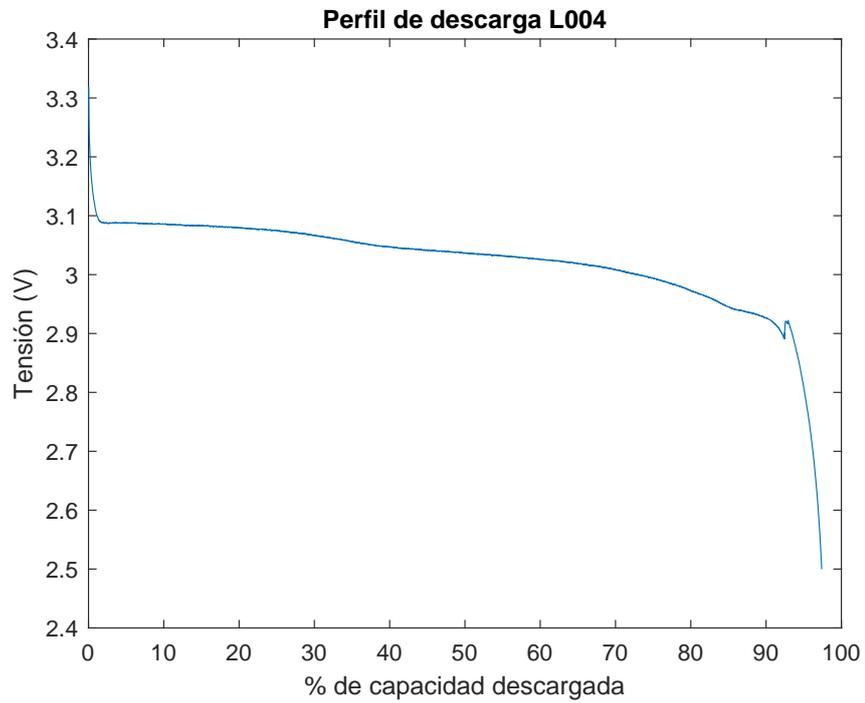


Figura A.7: Perfil de descarga L004.

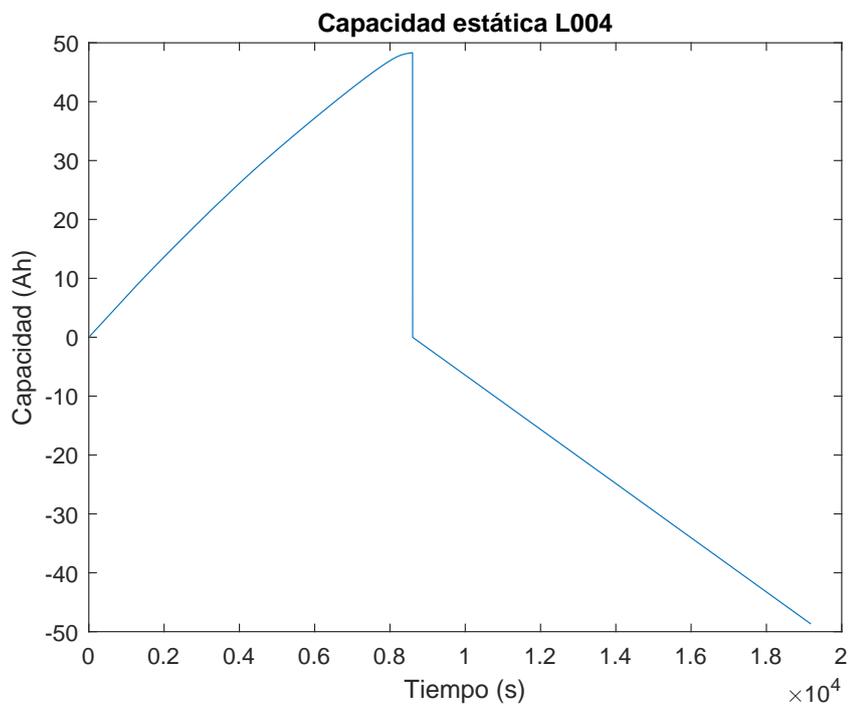


Figura A.8: Curva de capacidad estática L004.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

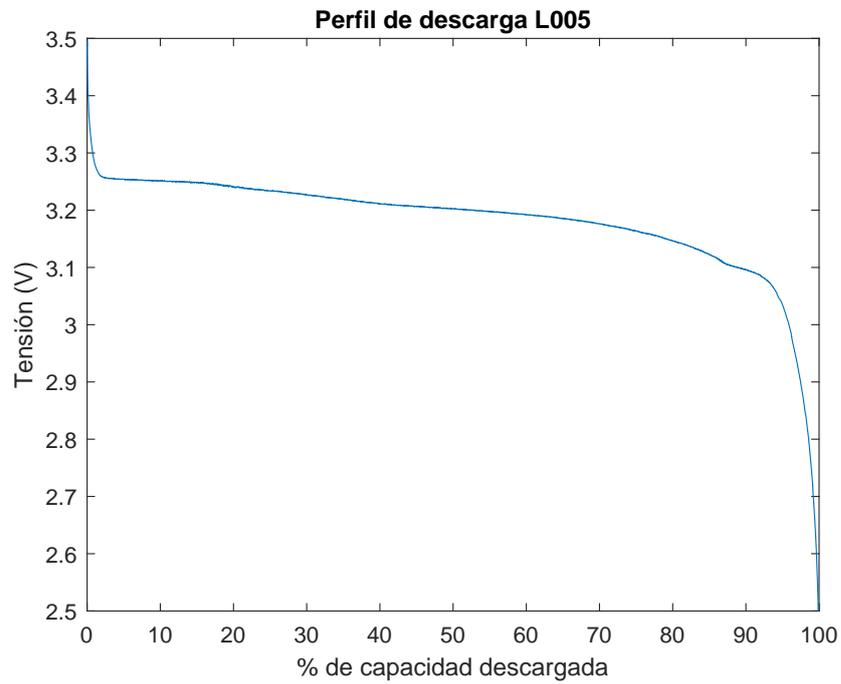


Figura A.9: Perfil de descarga L005.

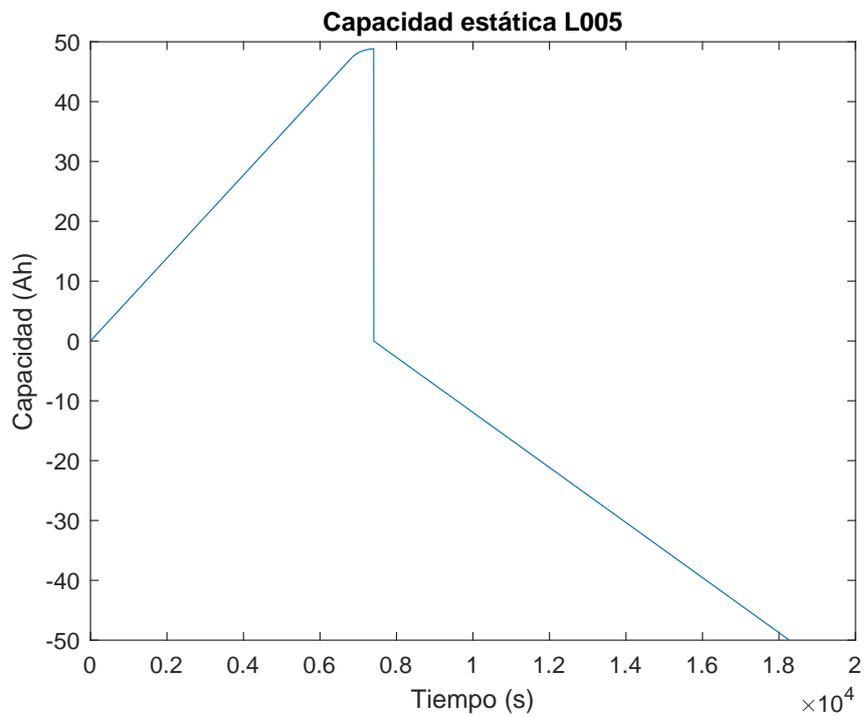


Figura A.10: Curva de capacidad estática L005.

A.2. Ensayo de capacidad estática

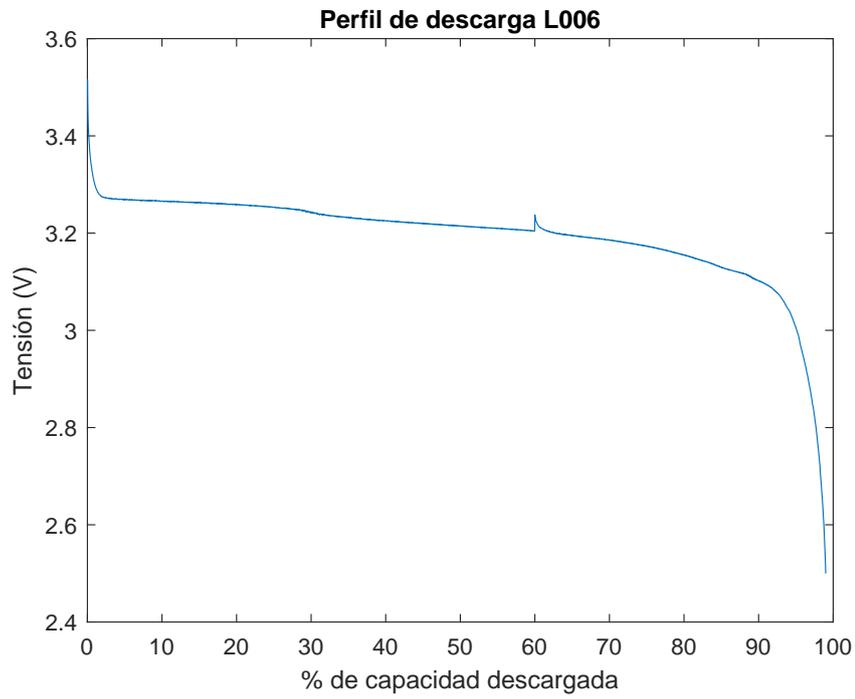


Figura A.11: Perfil de descarga L006.

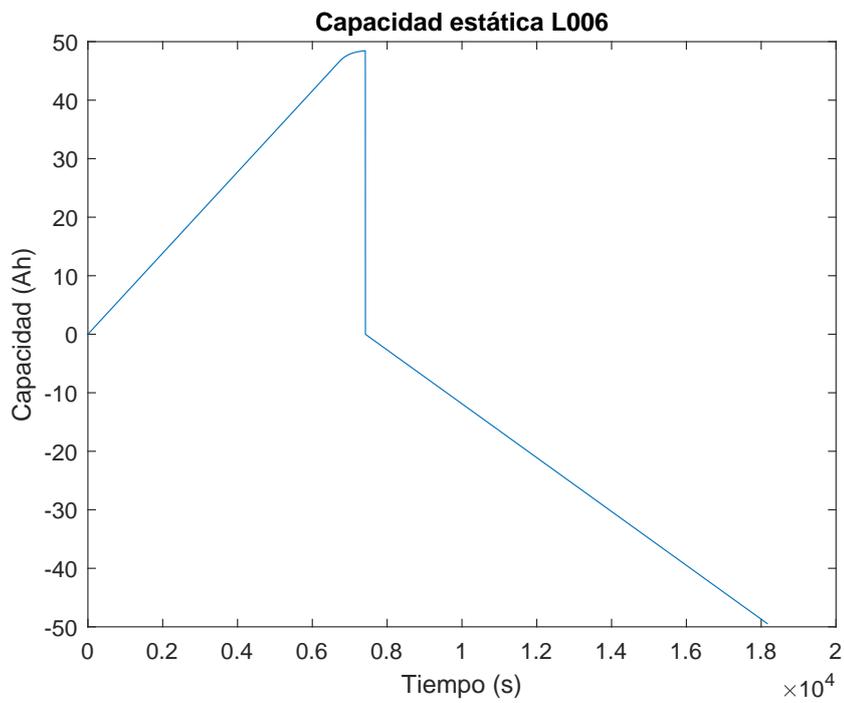


Figura A.12: Curva de capacidad estática L006.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

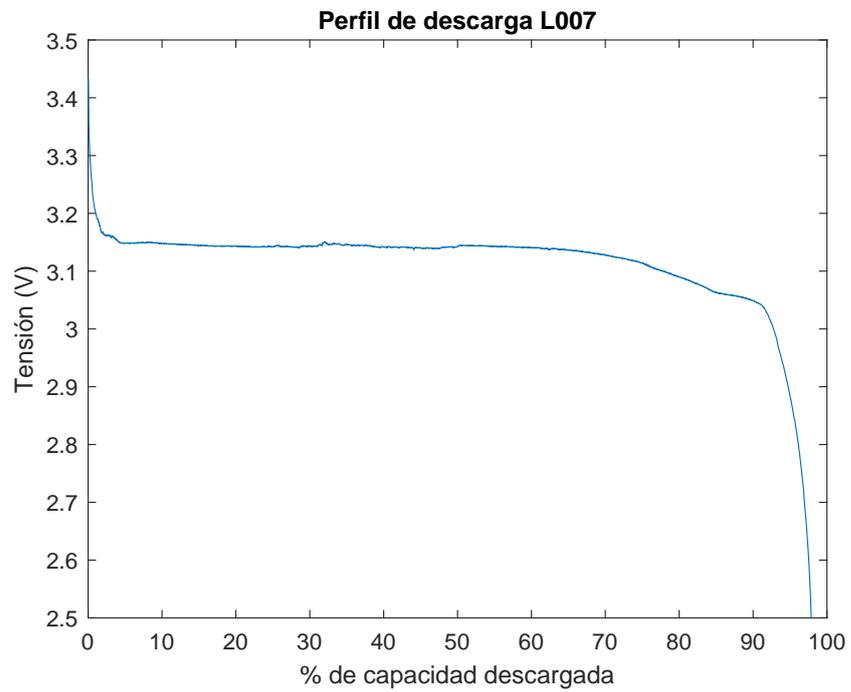


Figura A.13: Perfil de descarga L007.

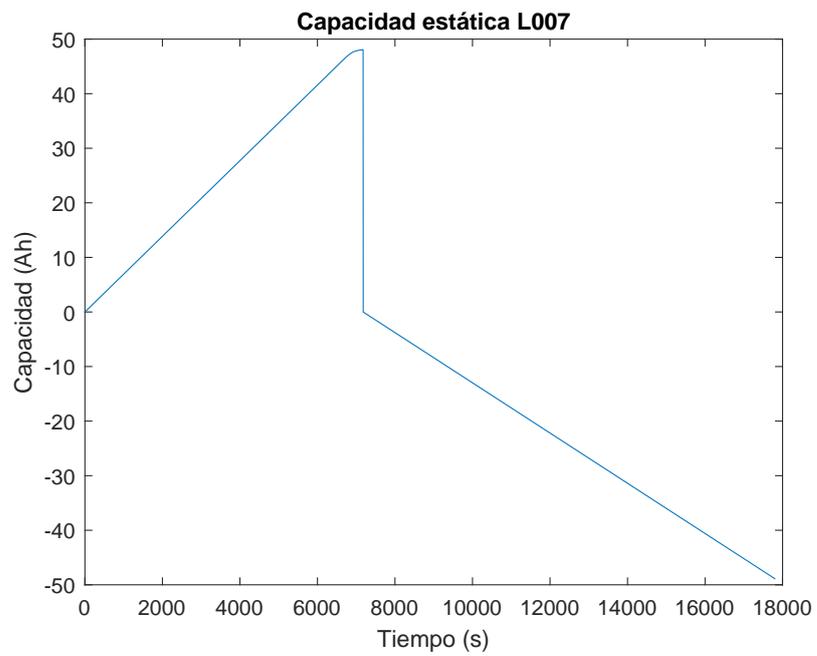


Figura A.14: Curva de capacidad estática L007.

A.2. Ensayo de capacidad estática

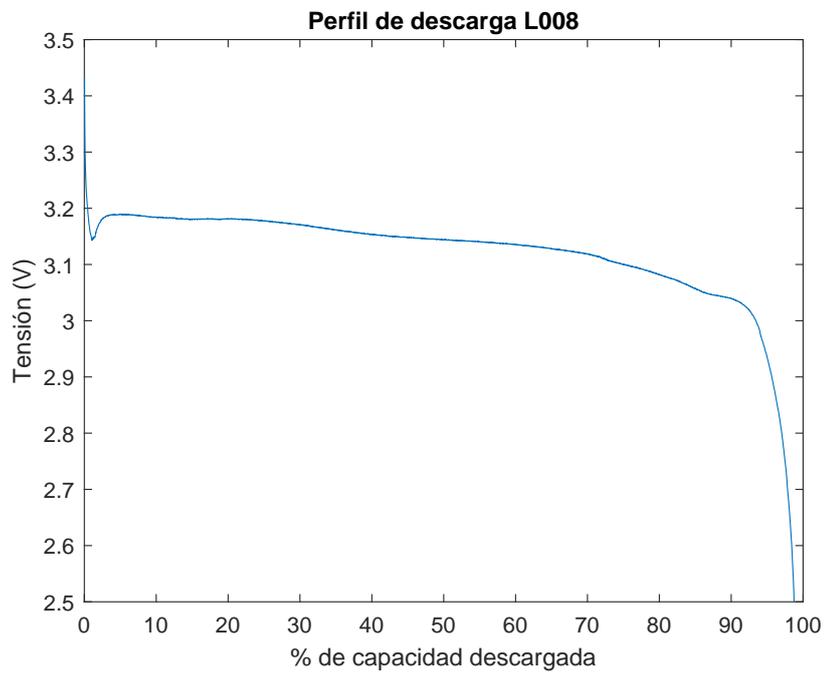


Figura A.15: Perfil de descarga L008.

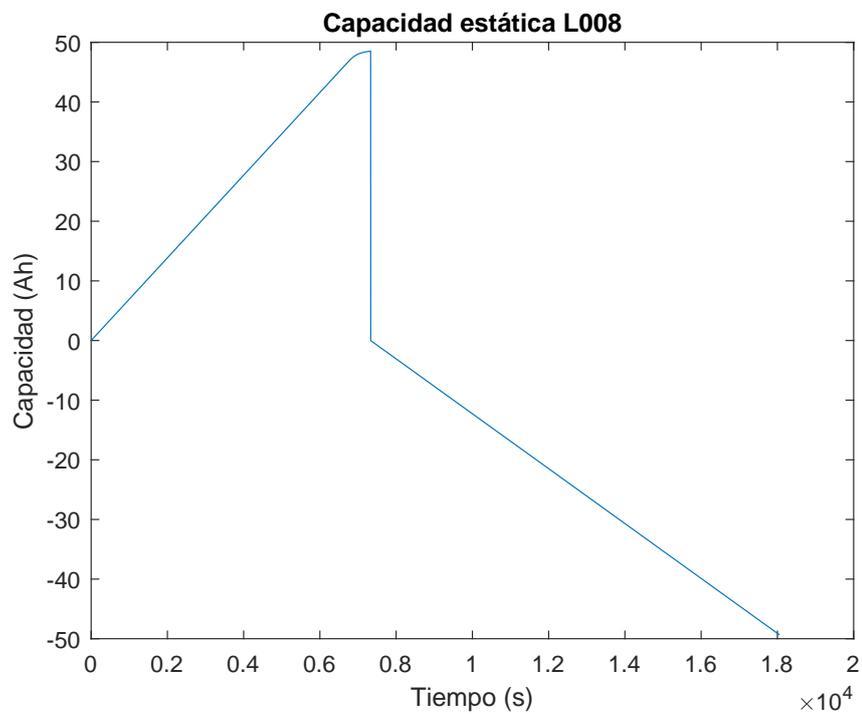


Figura A.16: Curva de capacidad estática L008.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

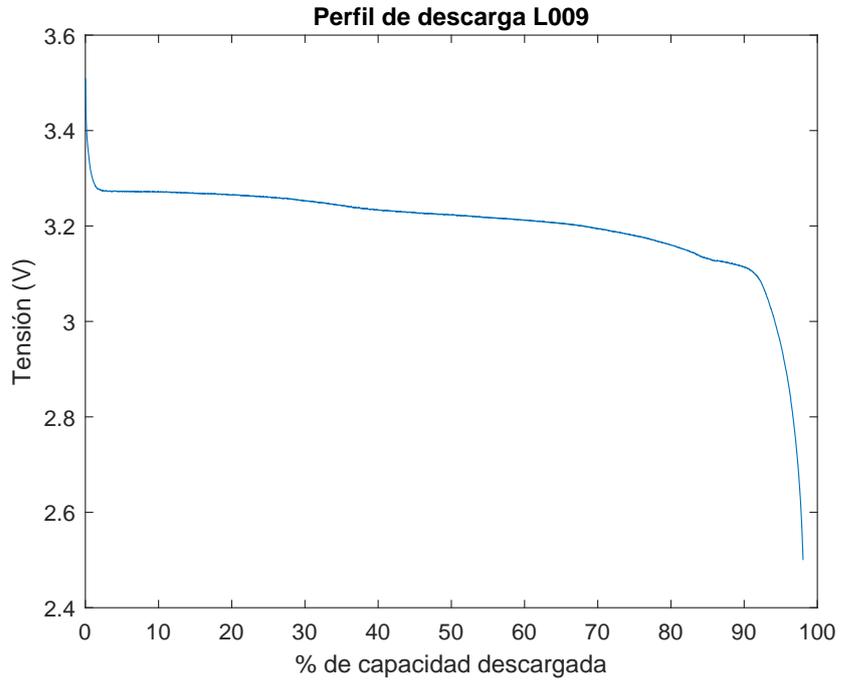


Figura A.17: Perfil de descarga L009.

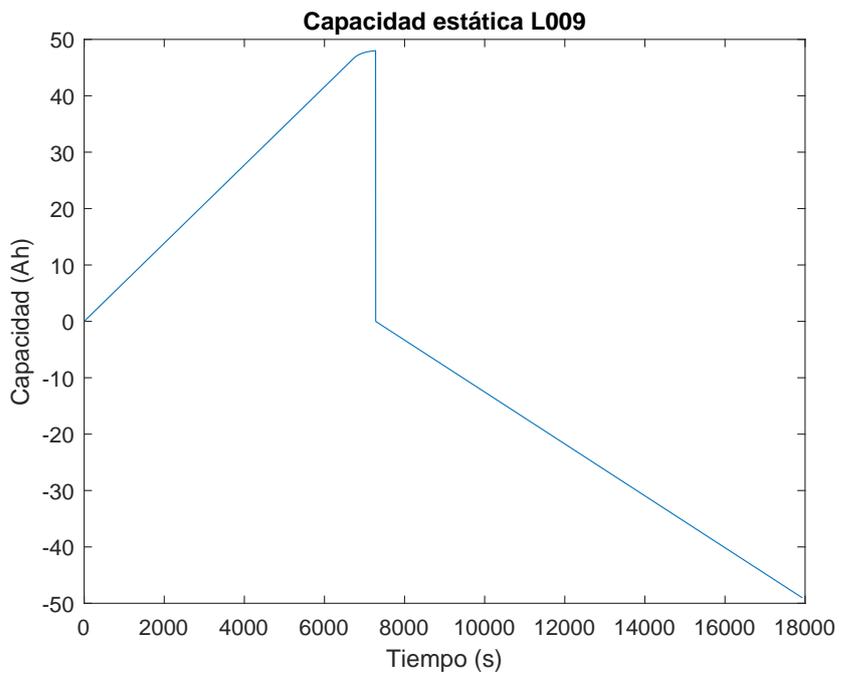


Figura A.18: Curva de capacidad estática L009.

A.2. Ensayo de capacidad estática

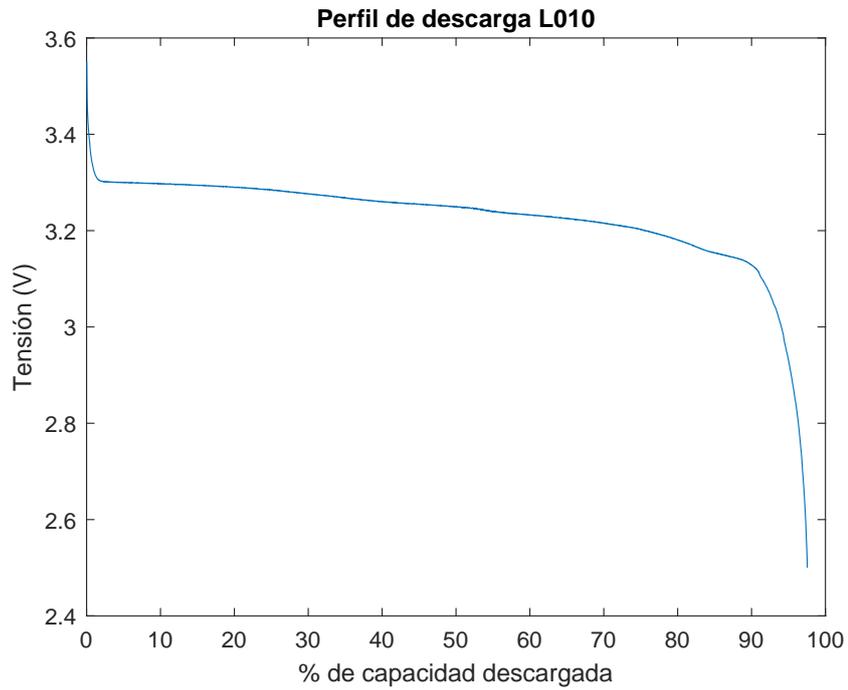


Figura A.19: Perfil de descarga L010.

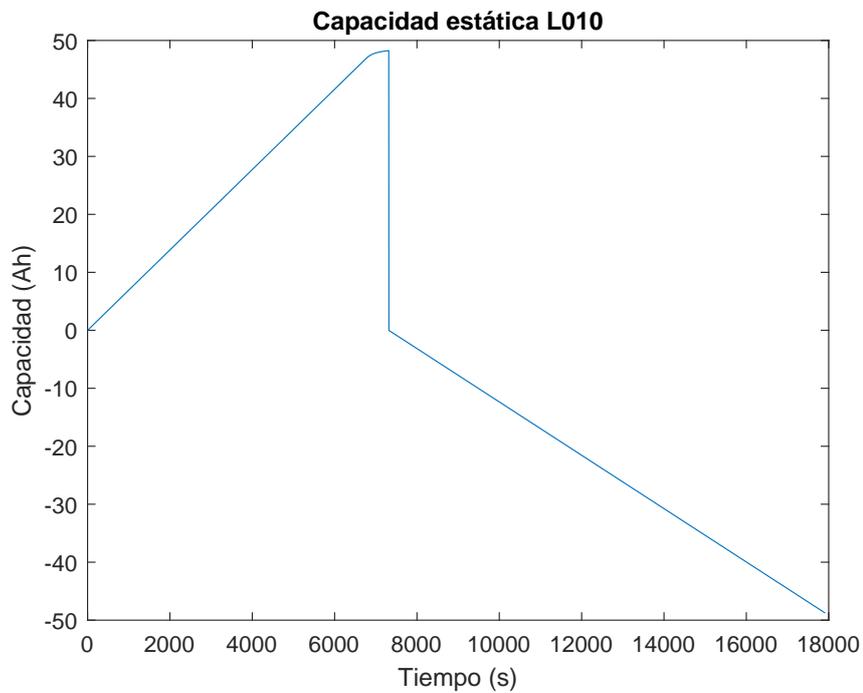


Figura A.20: Curva de capacidad estática L010.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

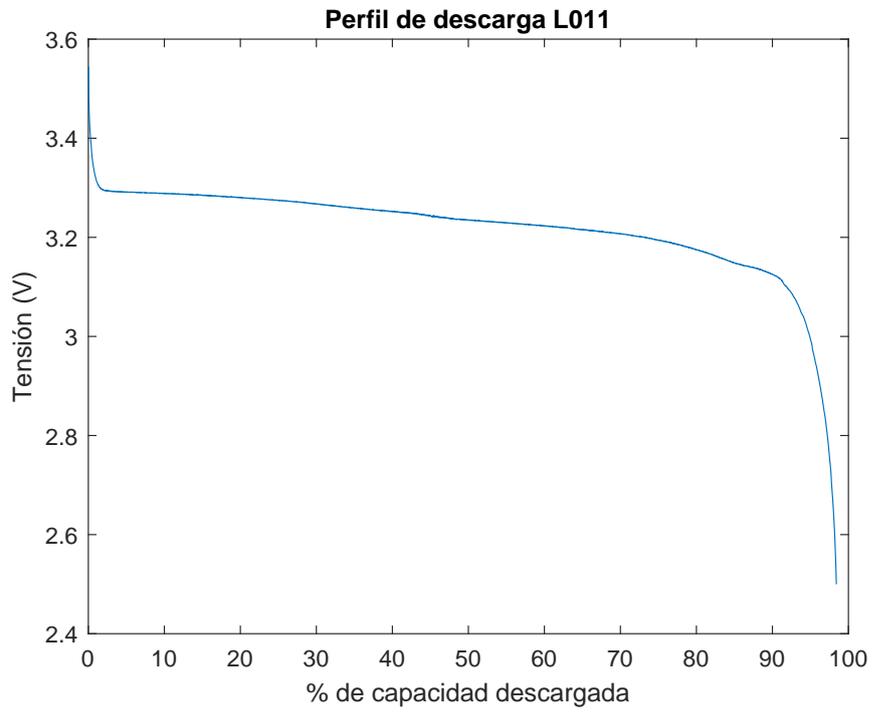


Figura A.21: Perfil de descarga L011.

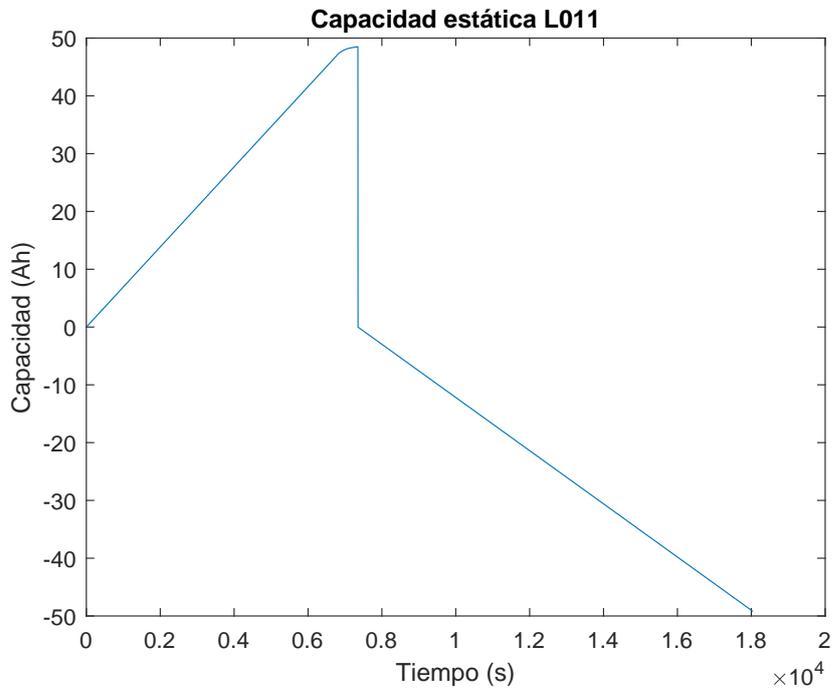


Figura A.22: Curva de capacidad estática L011.

A.2. Ensayo de capacidad estática

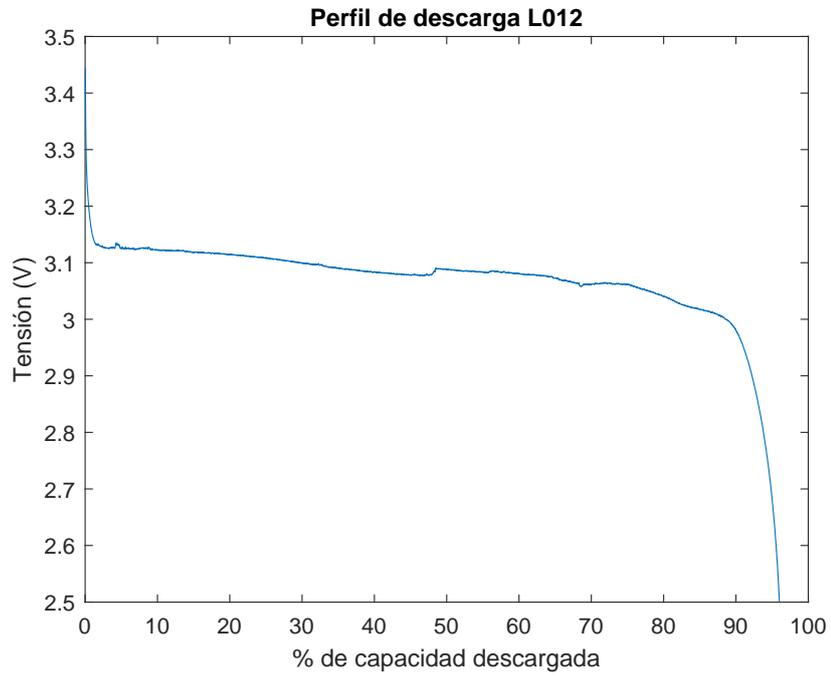


Figura A.23: Perfil de descarga L012.

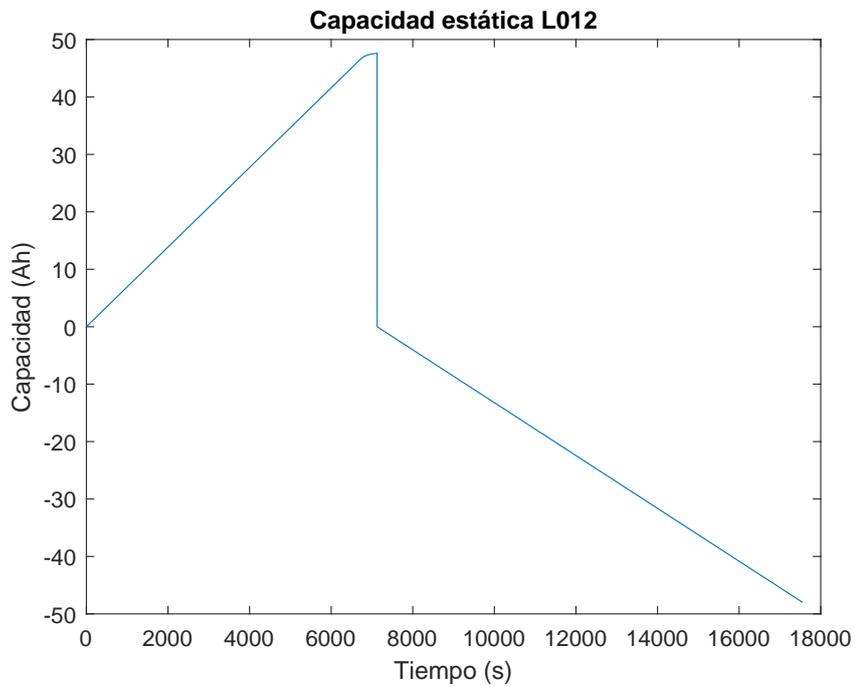


Figura A.24: Curva de capacidad estática L012.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

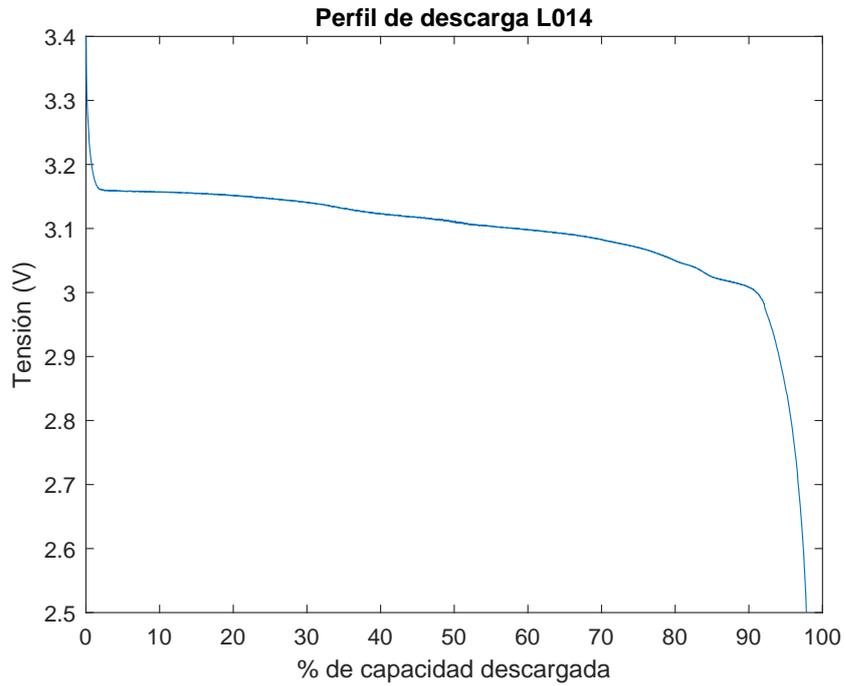


Figura A.25: Perfil de descarga L014.

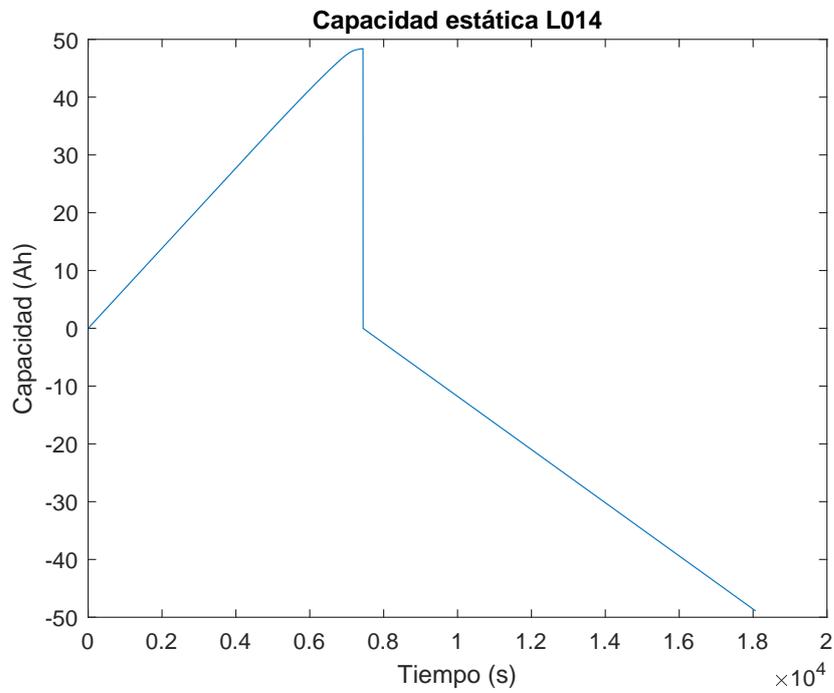


Figura A.26: Curva de capacidad estática L014.

A.2. Ensayo de capacidad estática

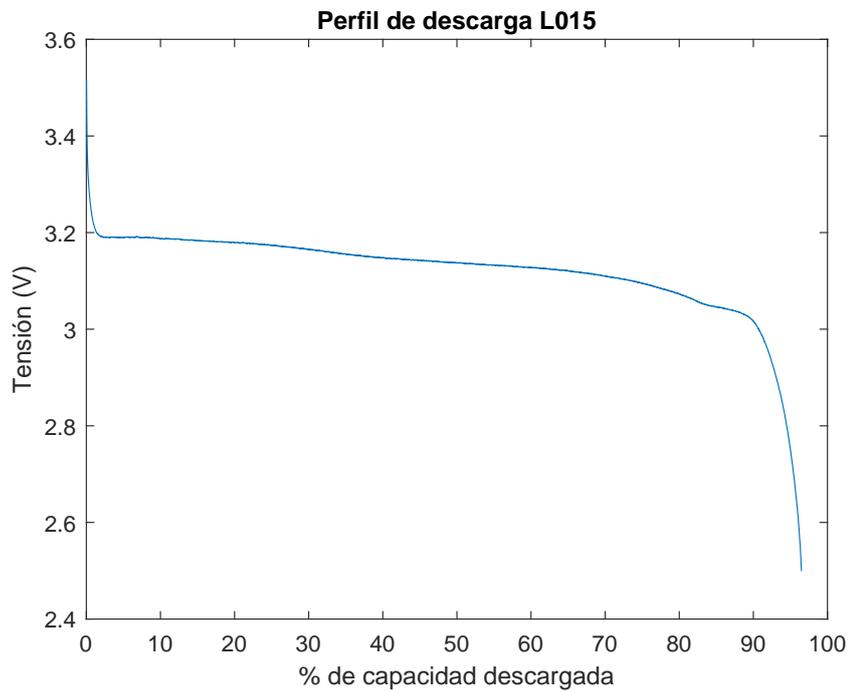


Figura A.27: Perfil de descarga L015.

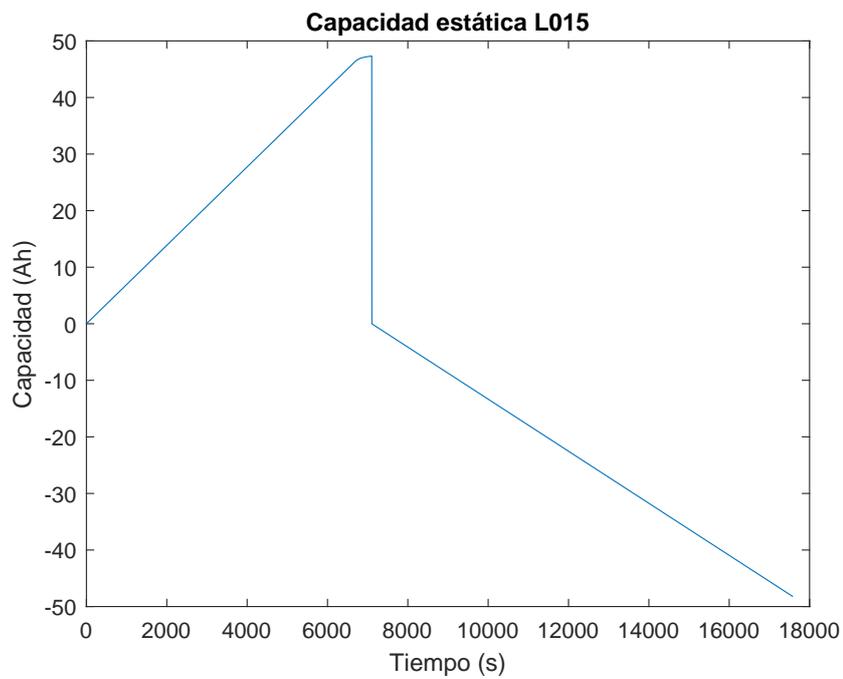


Figura A.28: Curva de capacidad estática L015.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

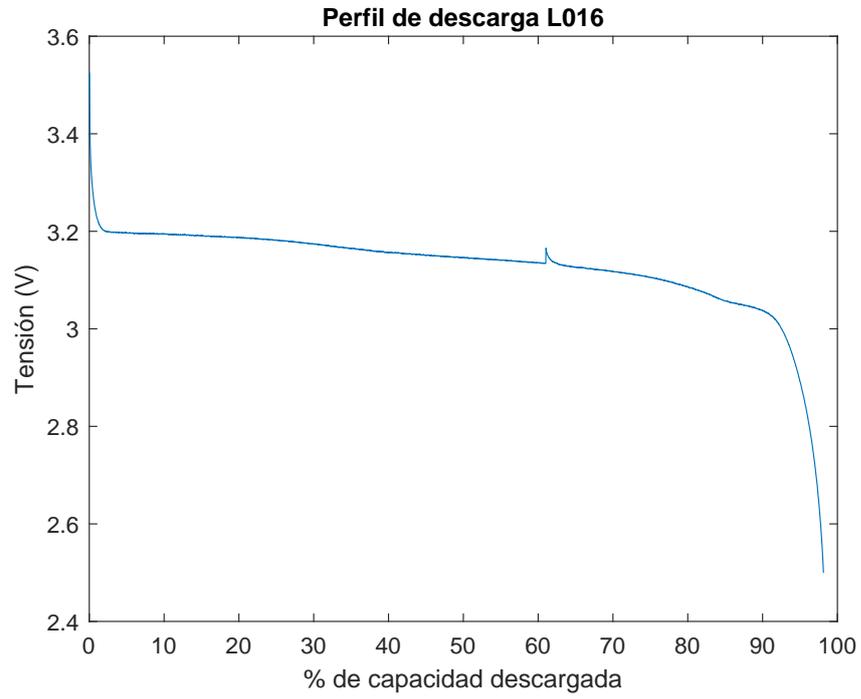


Figura A.29: Perfil de descarga L016.

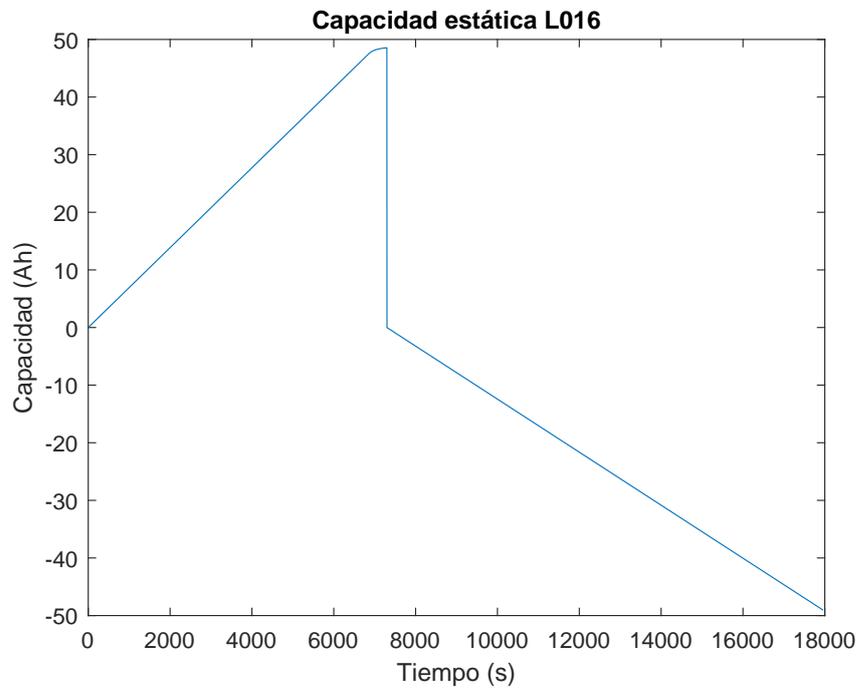


Figura A.30: Curva de capacidad estática L016.

A.2. Ensayo de capacidad estática

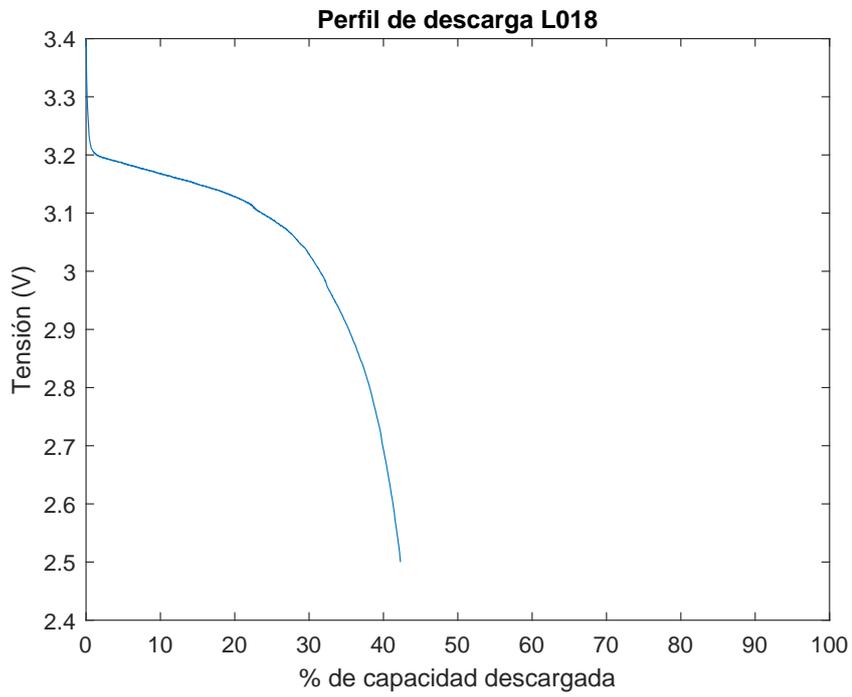


Figura A.31: Perfil de descarga L018.

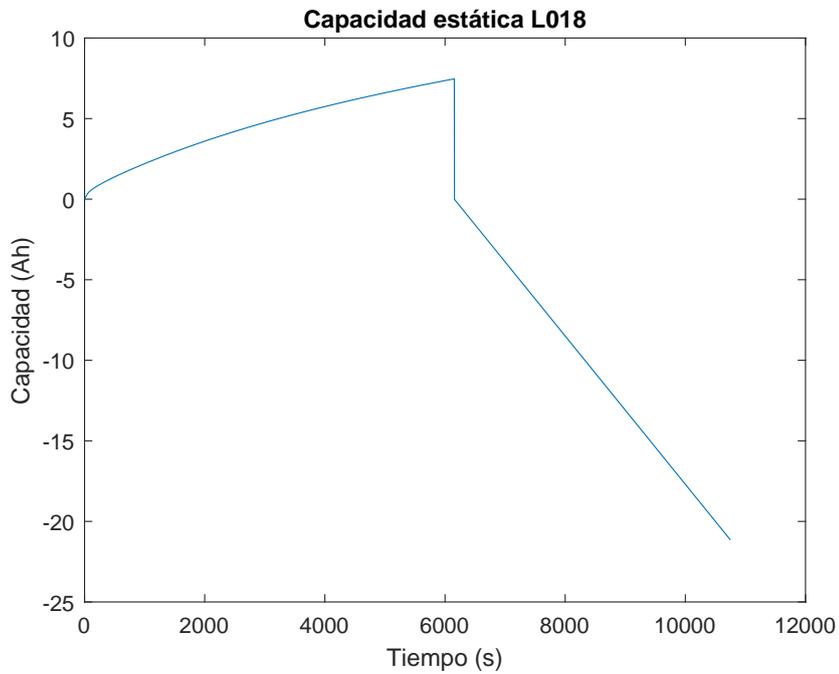


Figura A.32: Curva de capacidad estática L018.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

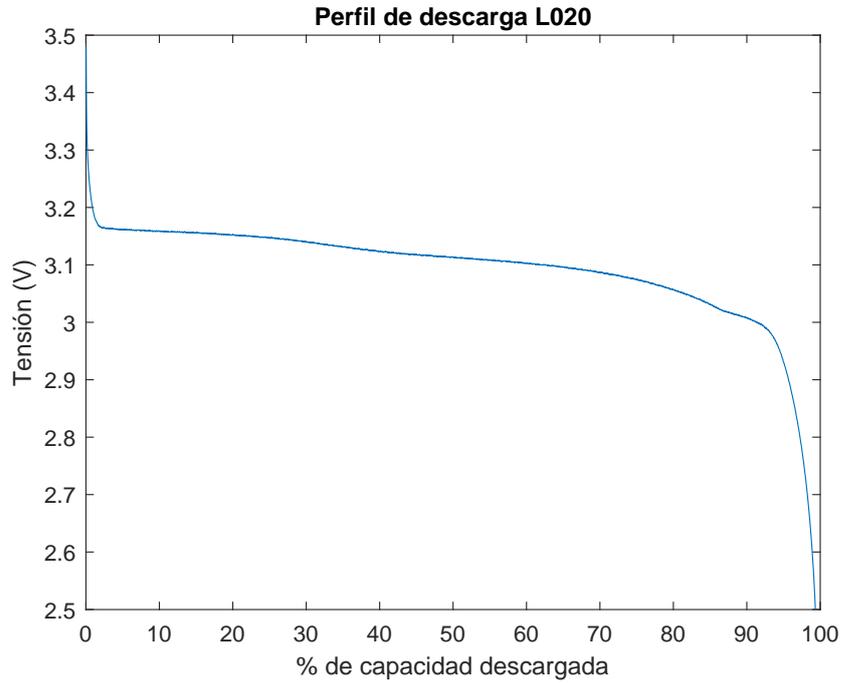


Figura A.33: Perfil de descarga L020.

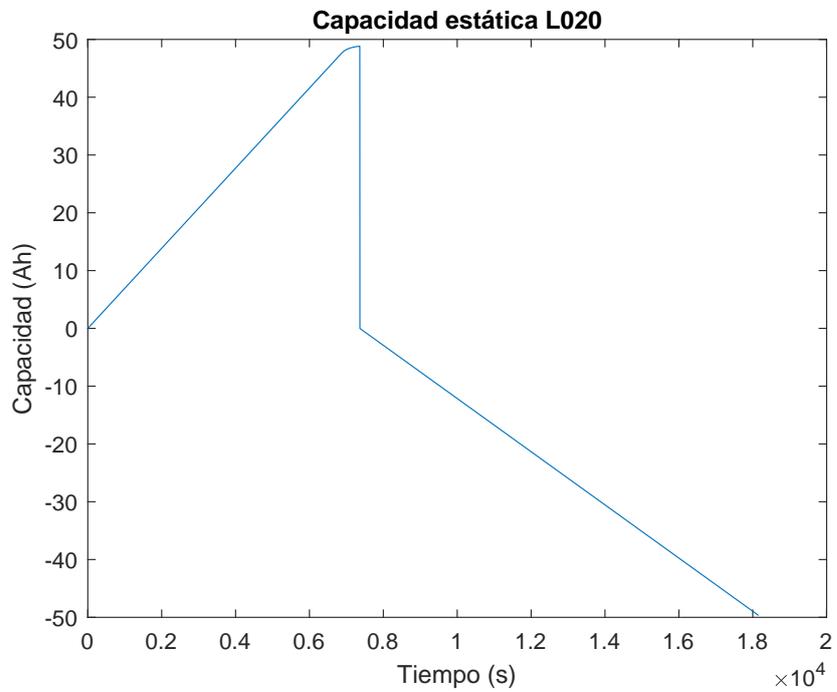


Figura A.34: Curva de capacidad estática L020.

A.2. Ensayo de capacidad estática

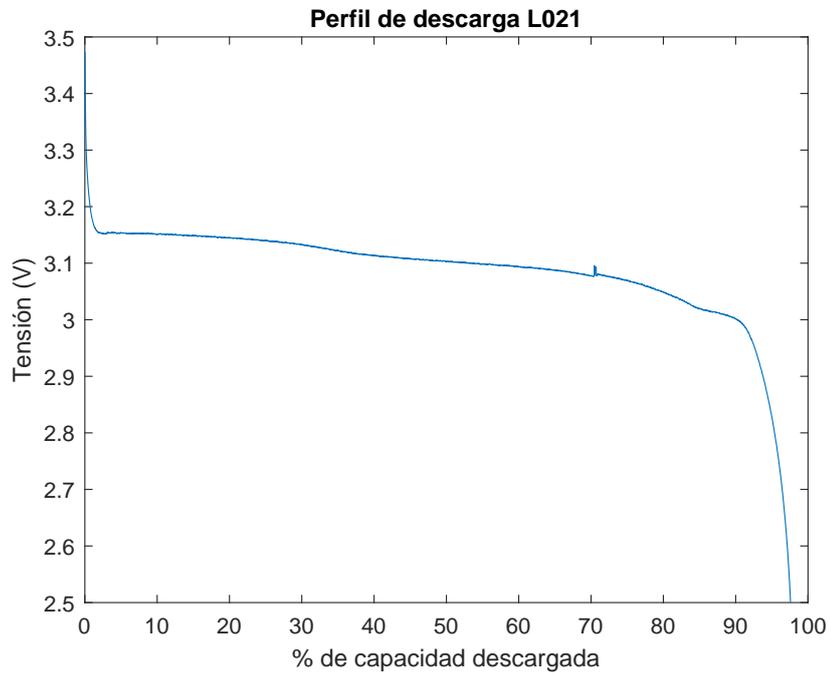


Figura A.35: Perfil de descarga L021.

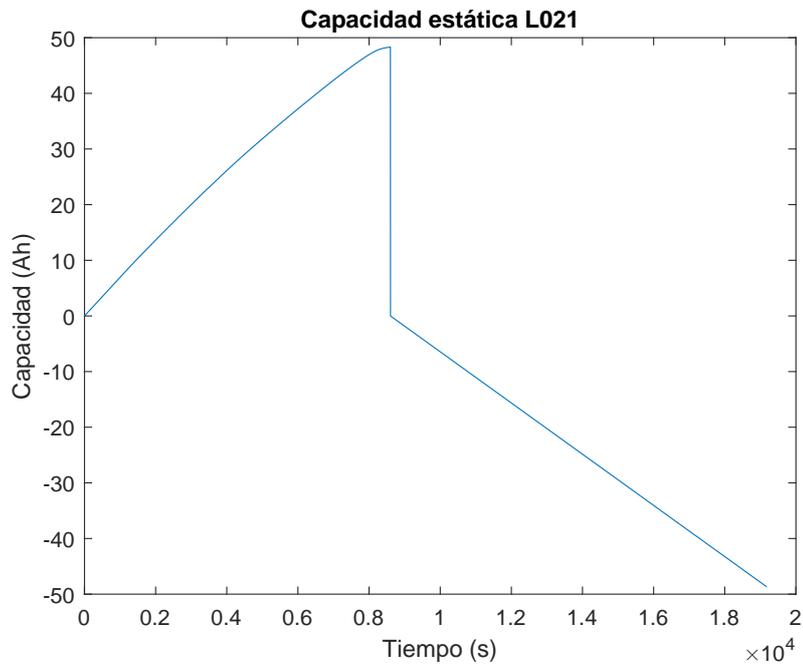


Figura A.36: Curva de capacidad estática L021.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

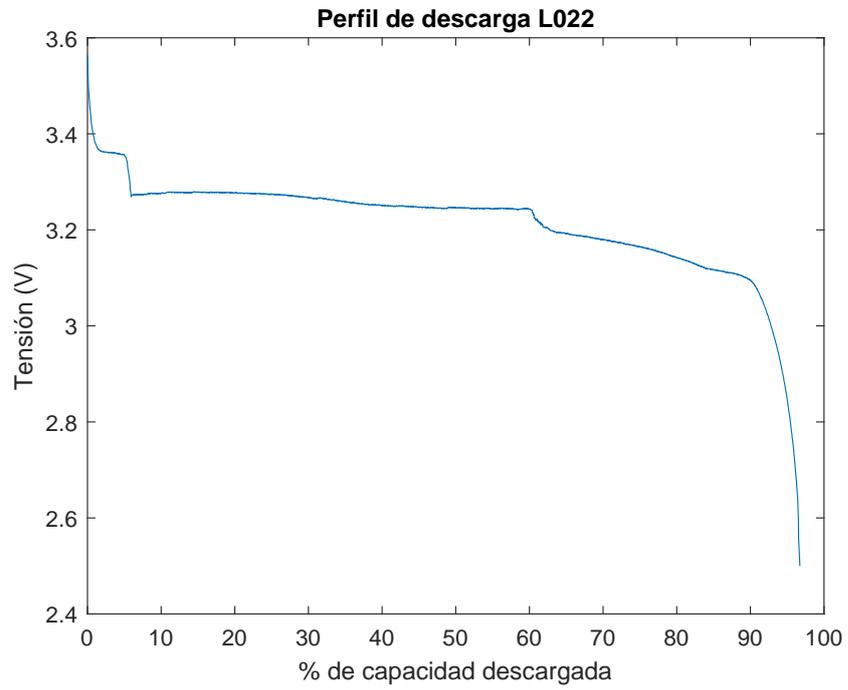


Figura A.37: Perfil de descarga L022.

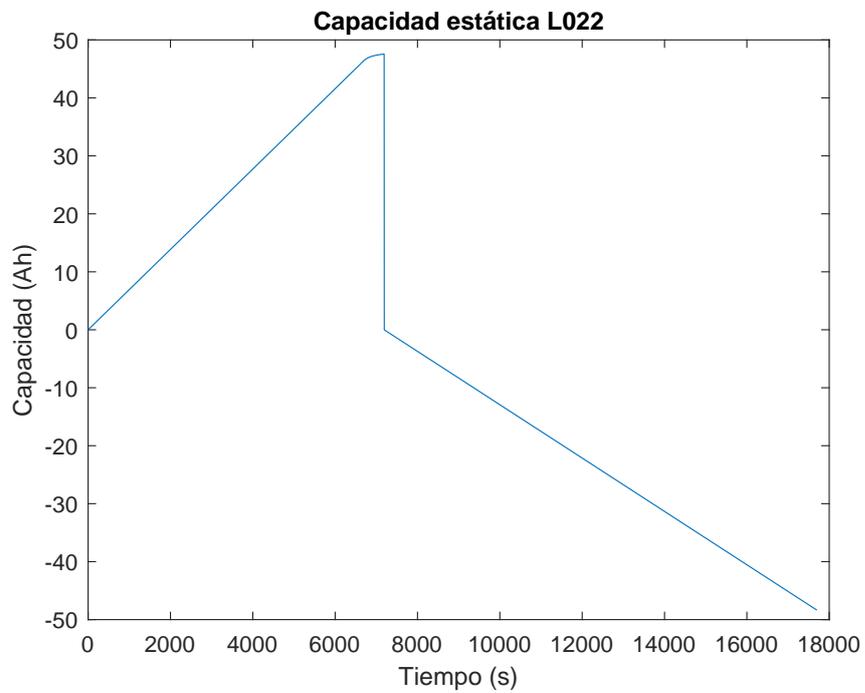


Figura A.38: Curva de capacidad estática L022.

A.2. Ensayo de capacidad estática

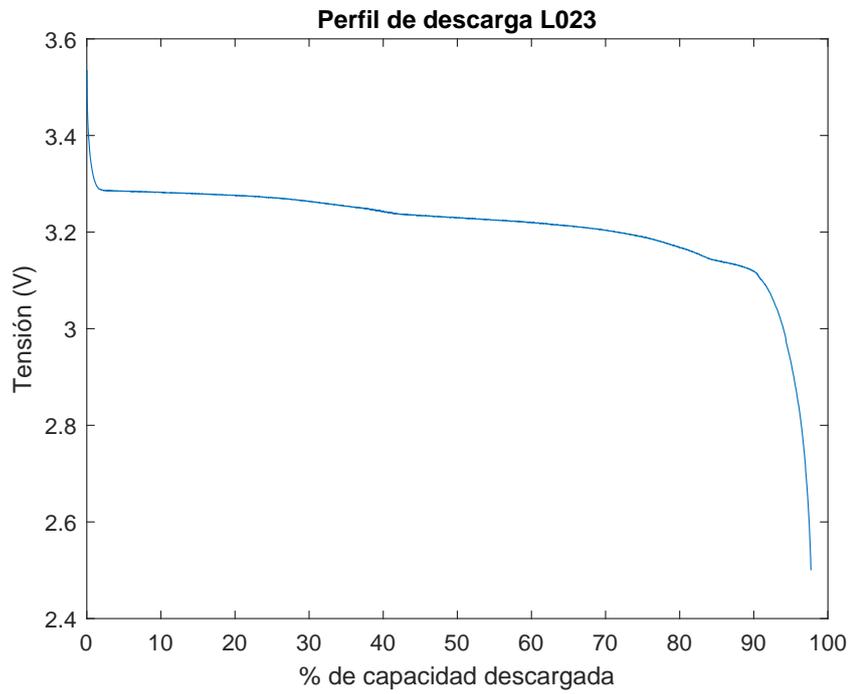


Figura A.39: Perfil de descarga L023.

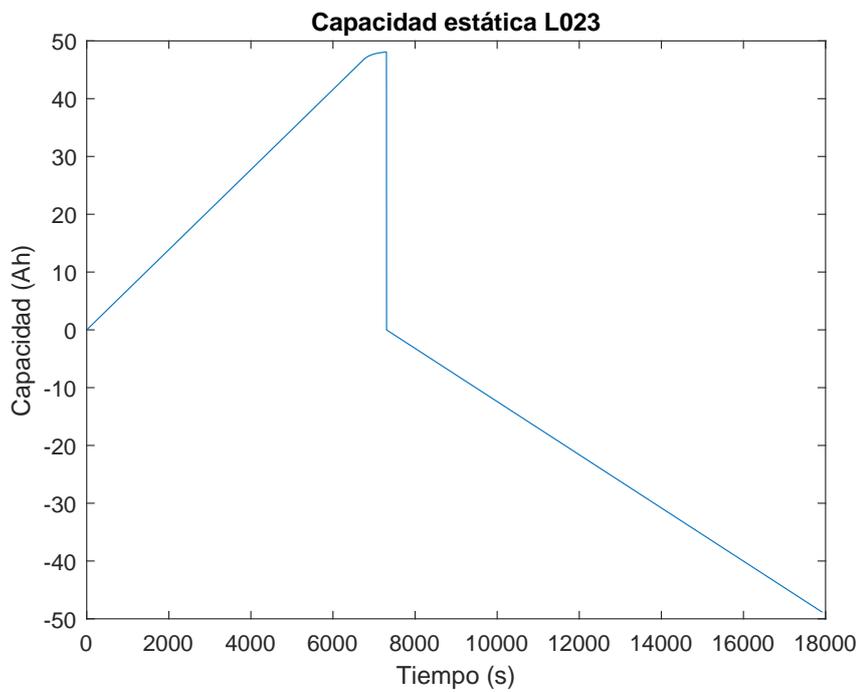


Figura A.40: Curva de capacidad estática L023.

A.3. Ensayo de potencia

Se listan a continuación las curvas relevadas en el ensayo de potencia realizado a cada celda.

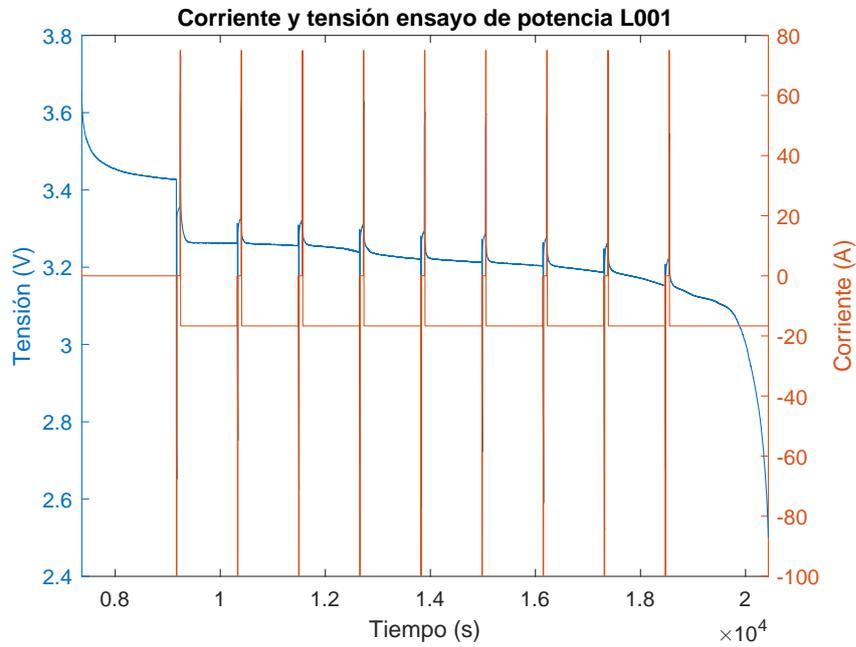


Figura A.41: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L001.

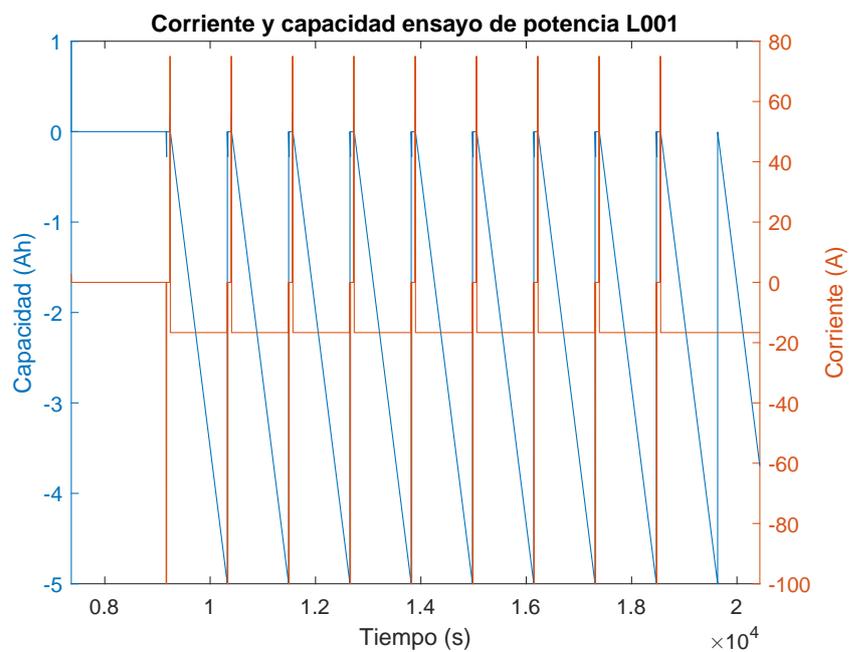


Figura A.42: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L001.

A.3. Ensayo de potencia

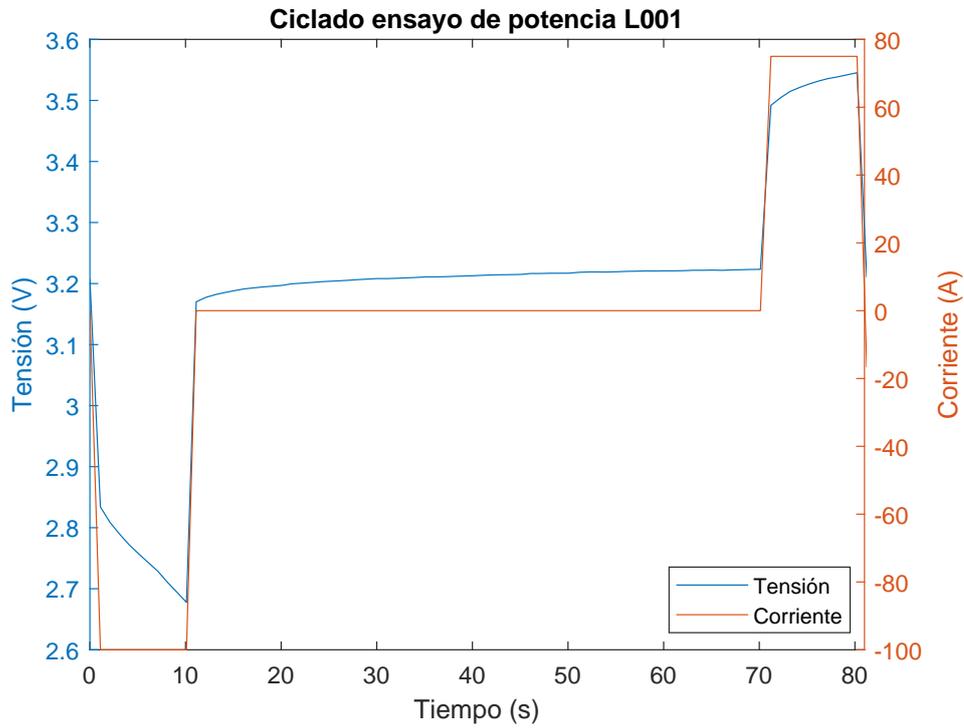


Figura A.43: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L001.

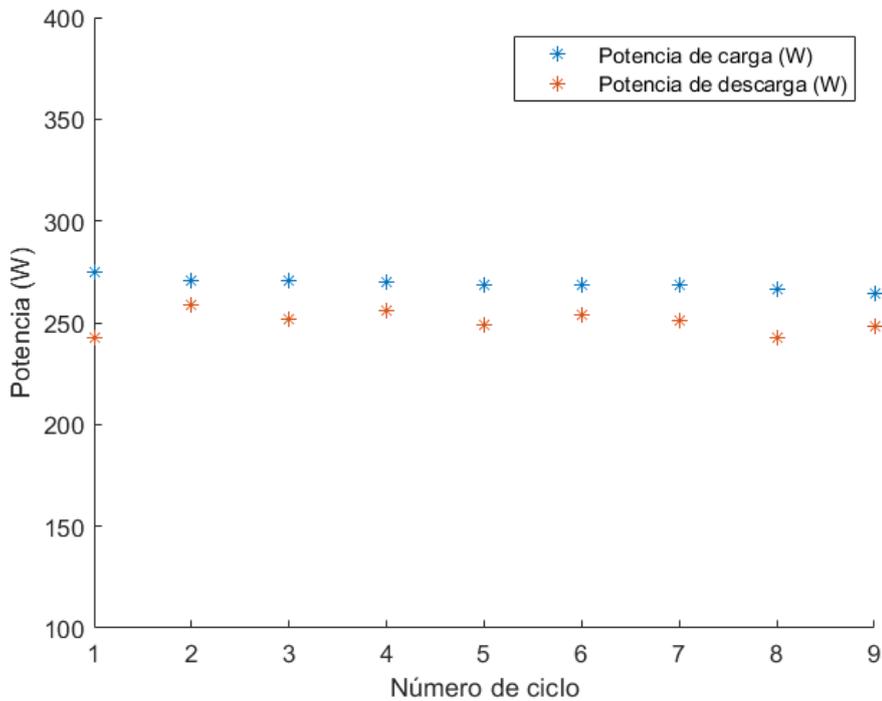


Figura A.44: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L001.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

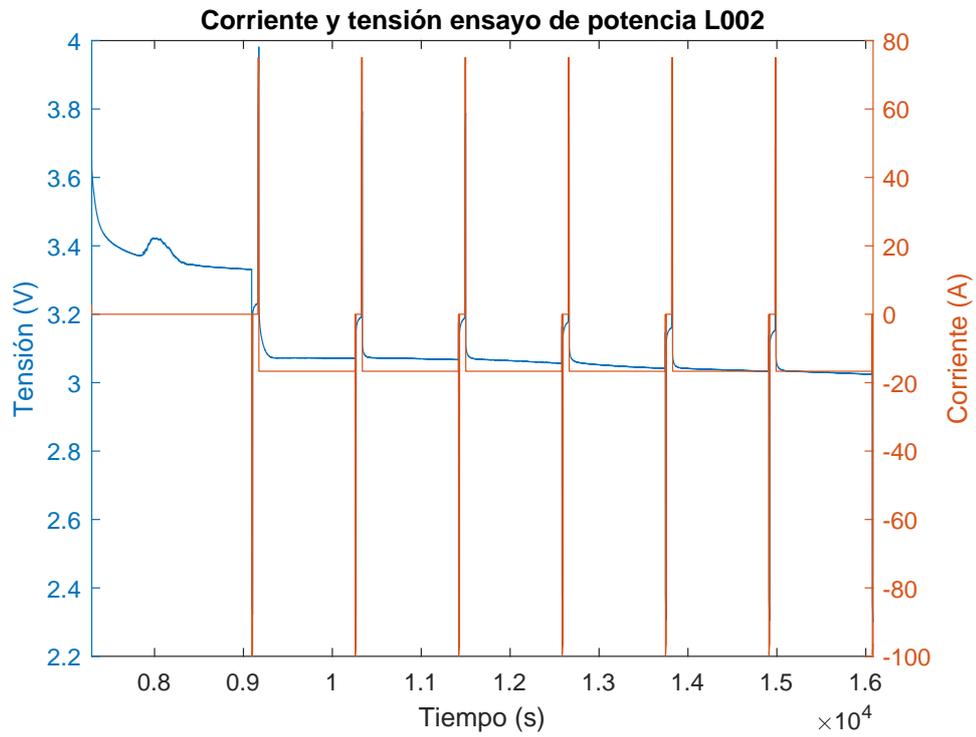


Figura A.45: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L002.

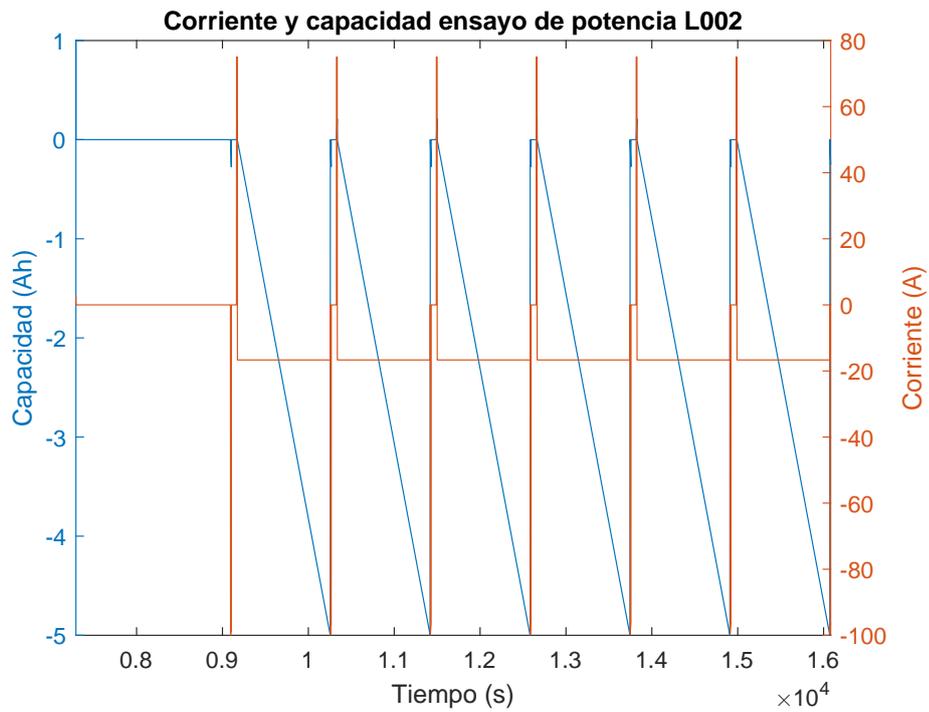


Figura A.46: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L002.

A.3. Ensayo de potencia

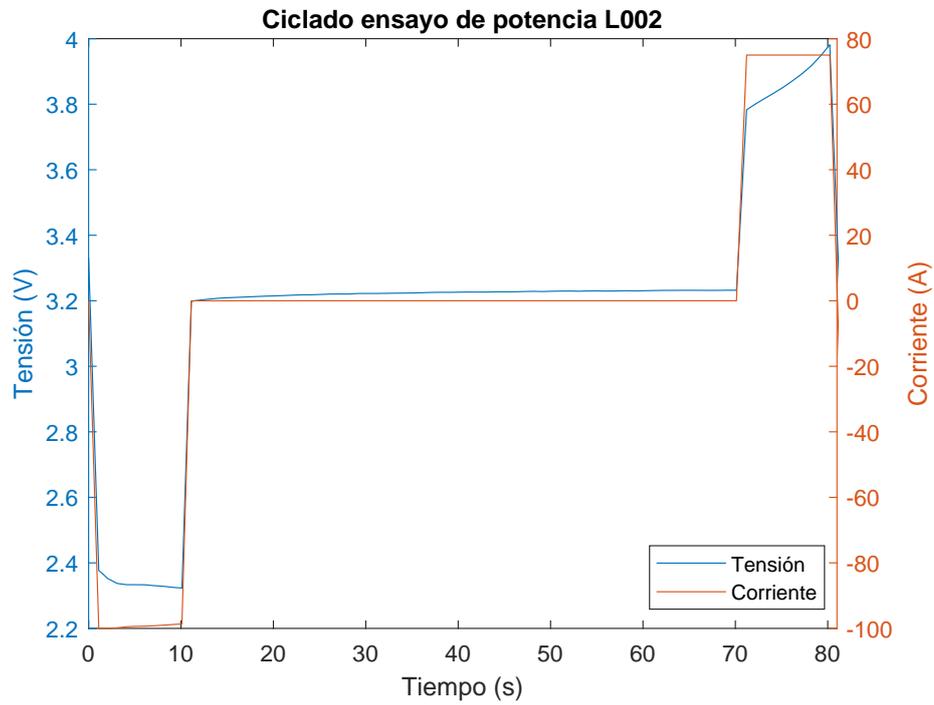


Figura A.47: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L002.

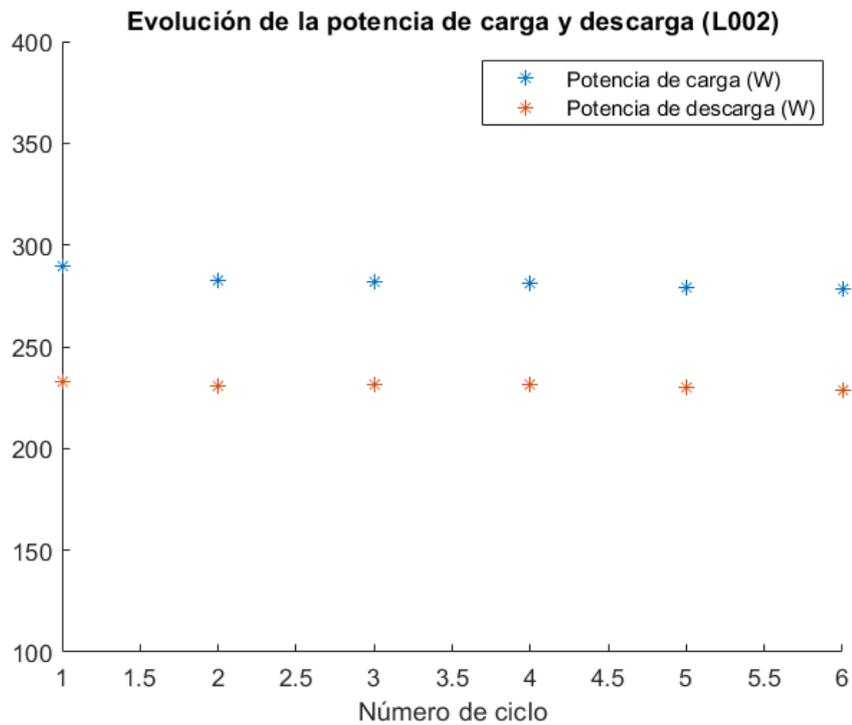


Figura A.48: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L002.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

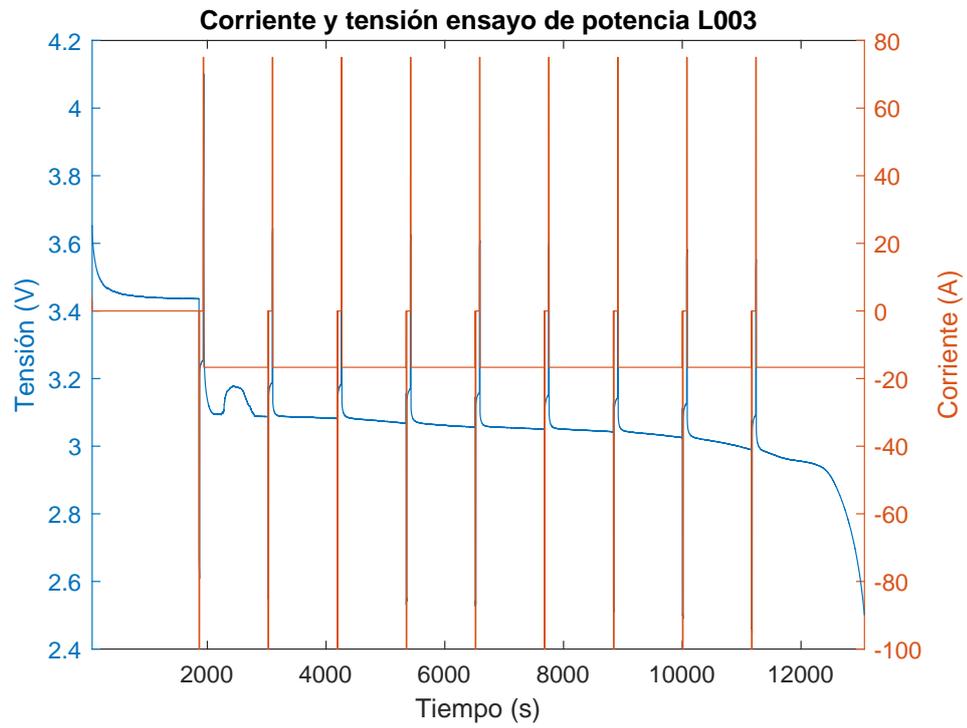


Figura A.49: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L003.

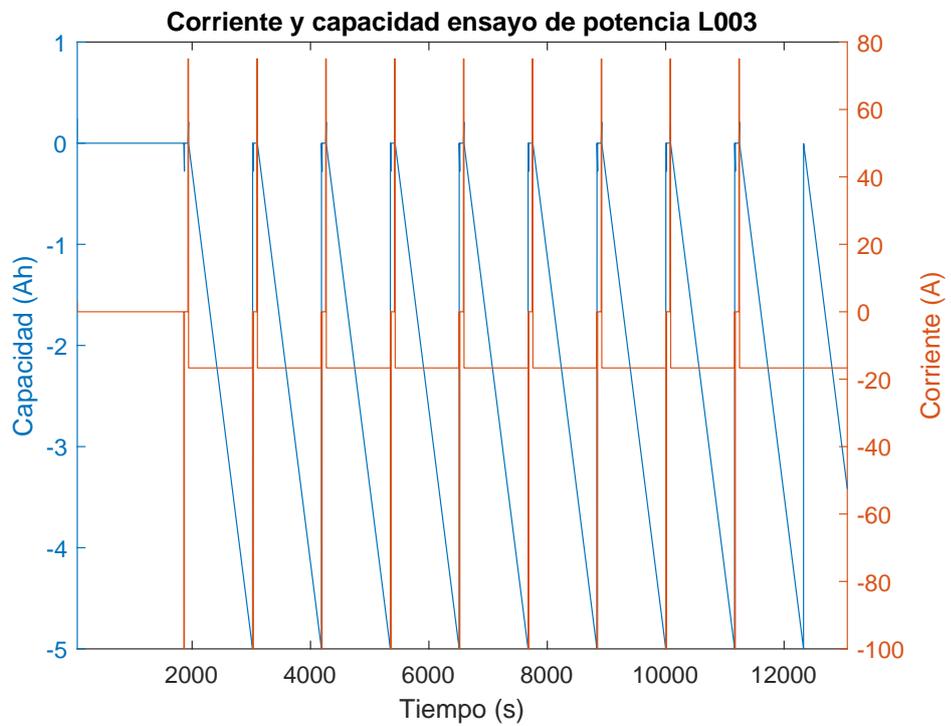


Figura A.50: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L003.

A.3. Ensayo de potencia

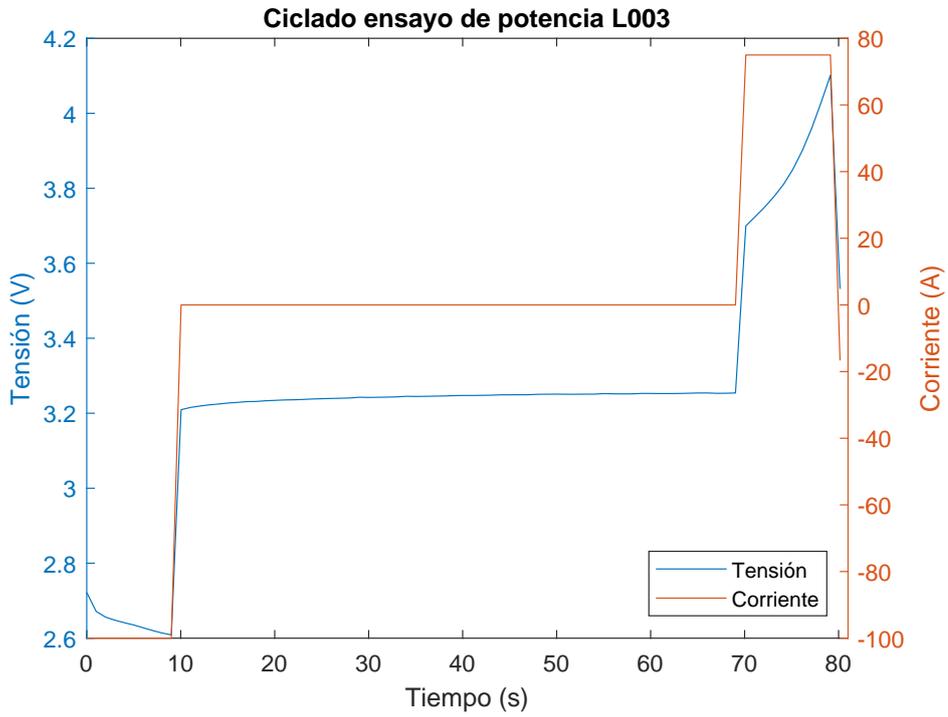


Figura A.51: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L003.

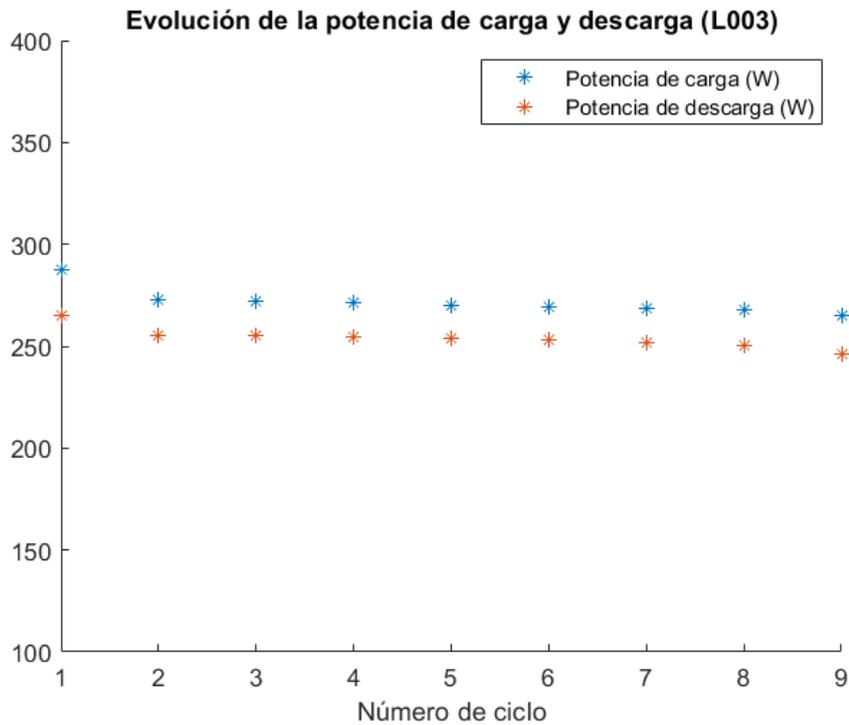


Figura A.52: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L003.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

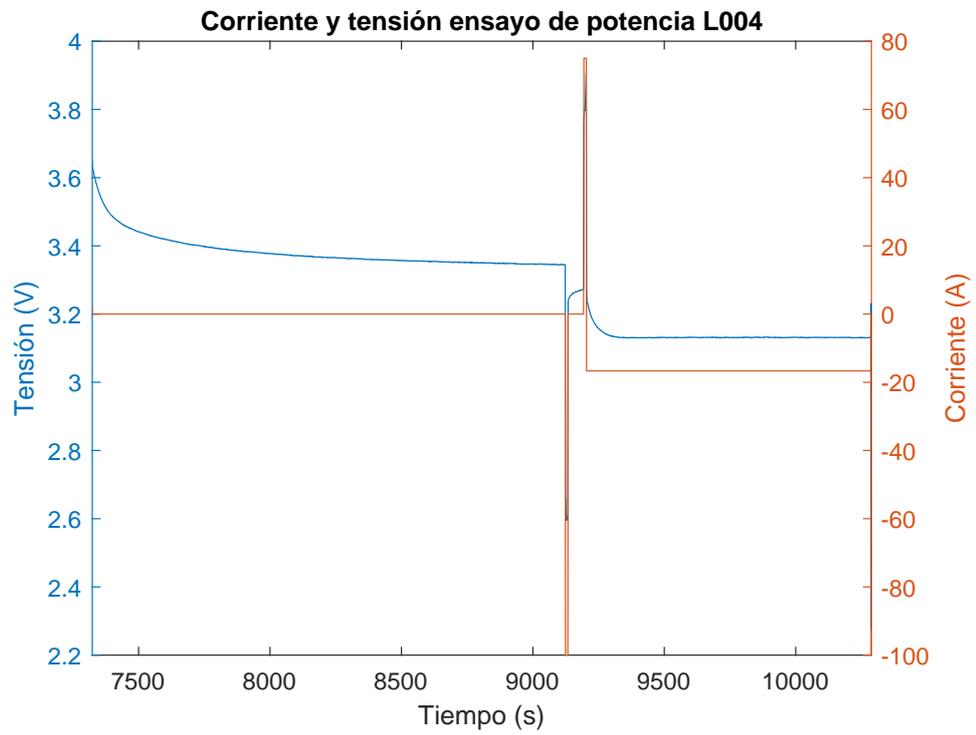


Figura A.53: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L004.

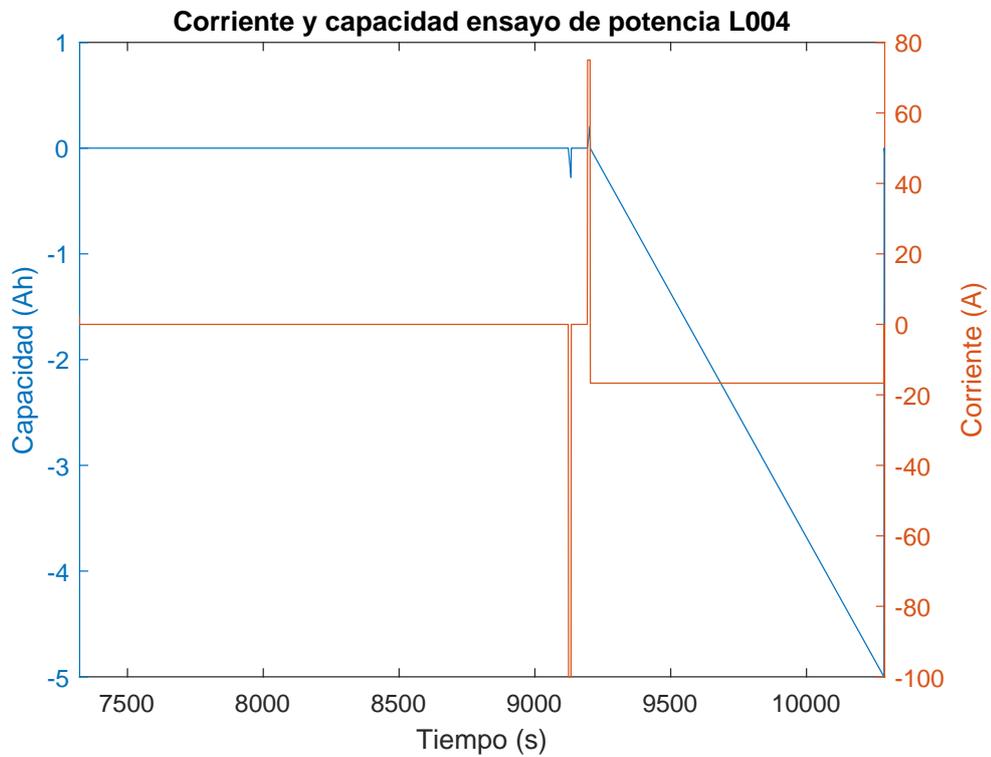


Figura A.54: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L004.

A.3. Ensayo de potencia

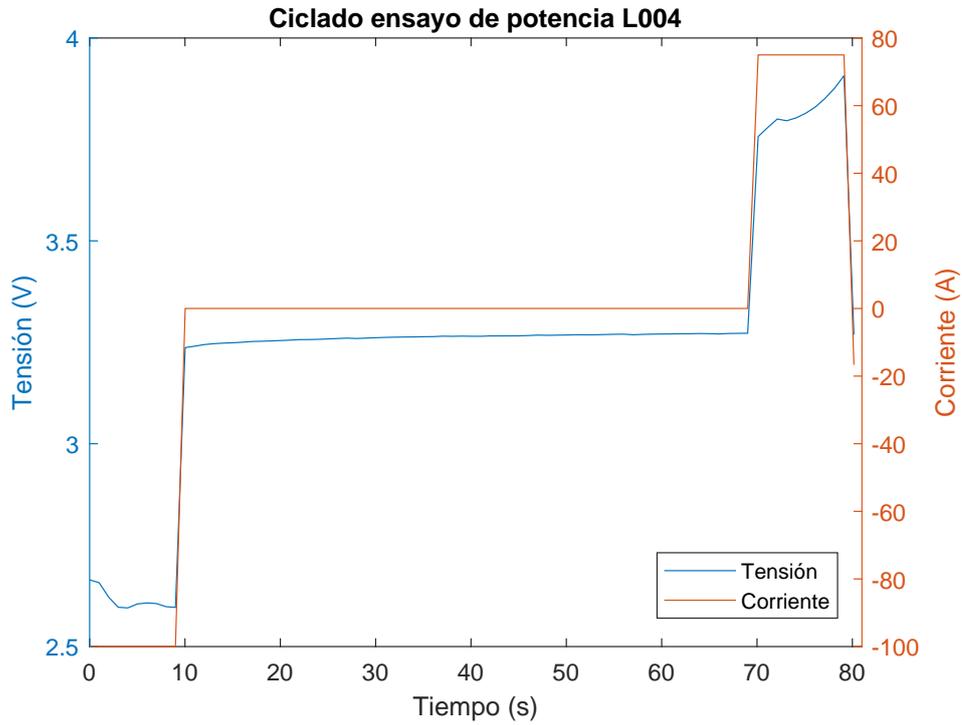


Figura A.55: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L004.

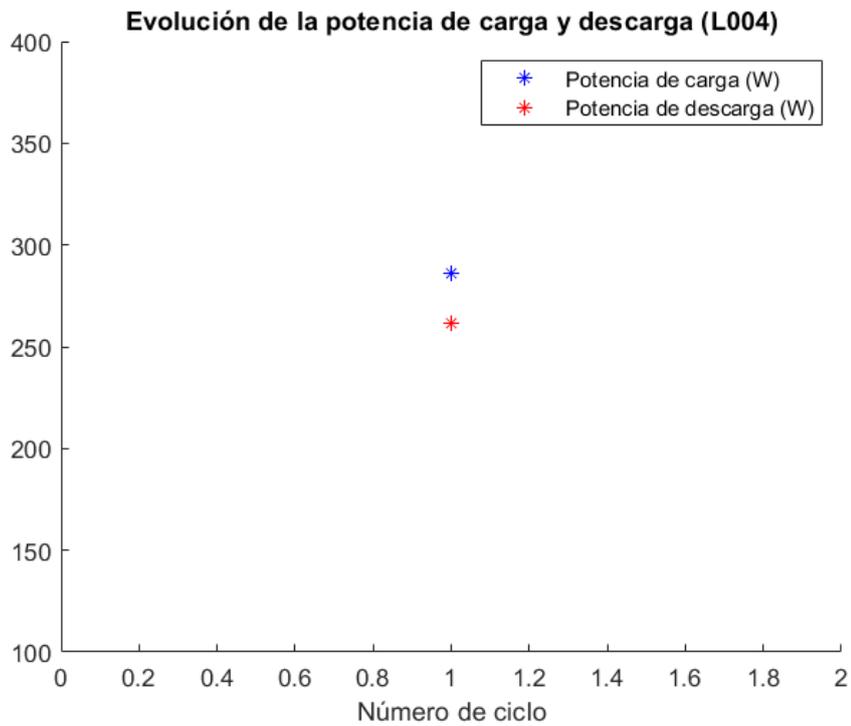


Figura A.56: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L004.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

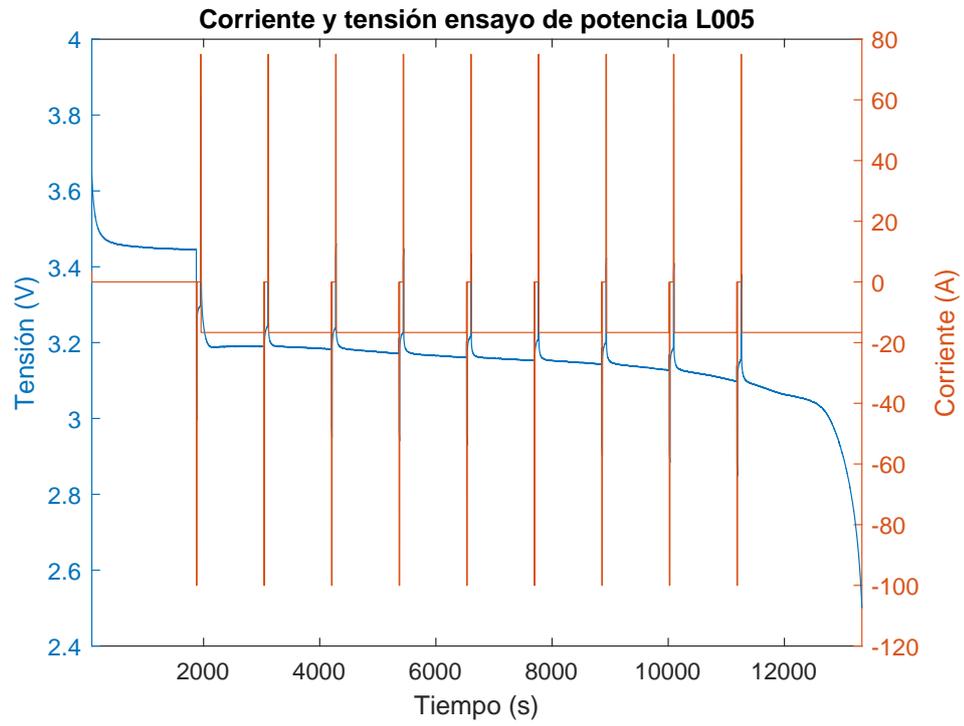


Figura A.57: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L005.

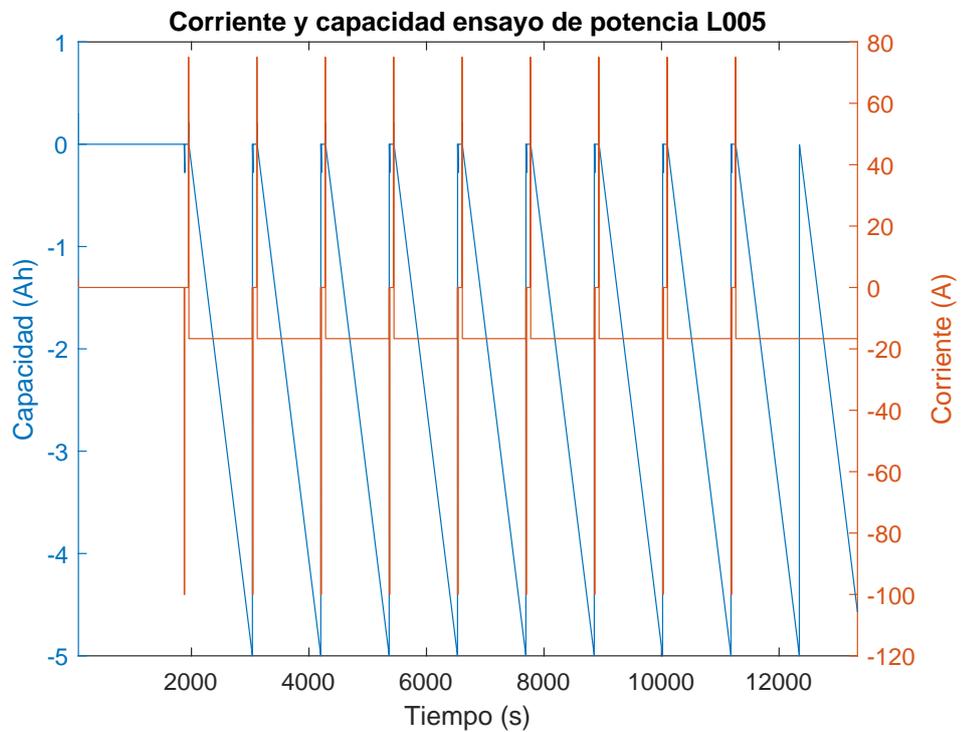


Figura A.58: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L005.

A.3. Ensayo de potencia

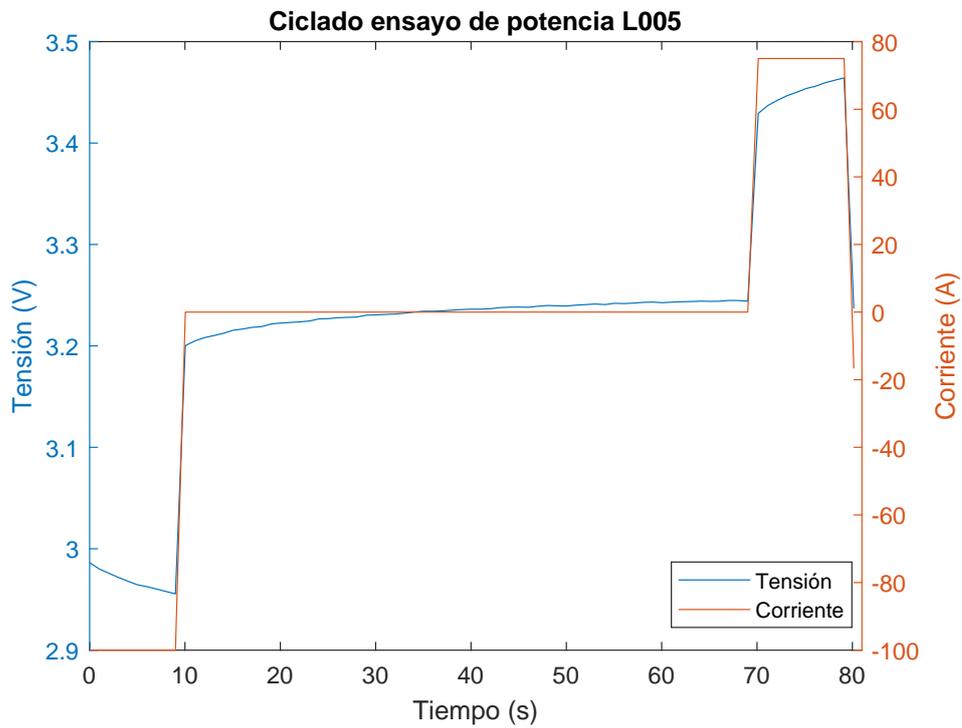


Figura A.59: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L005.

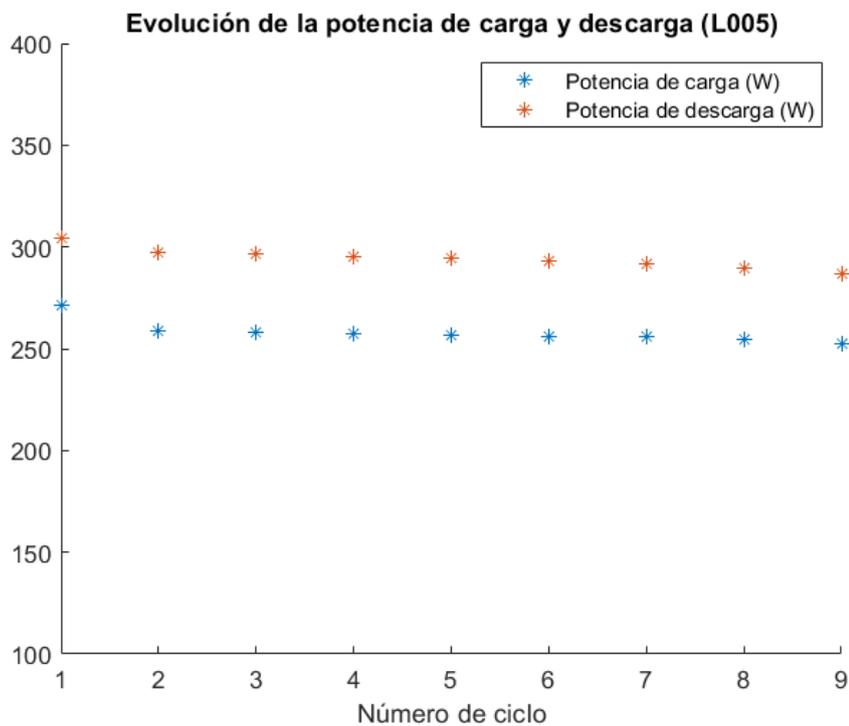


Figura A.60: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L005.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

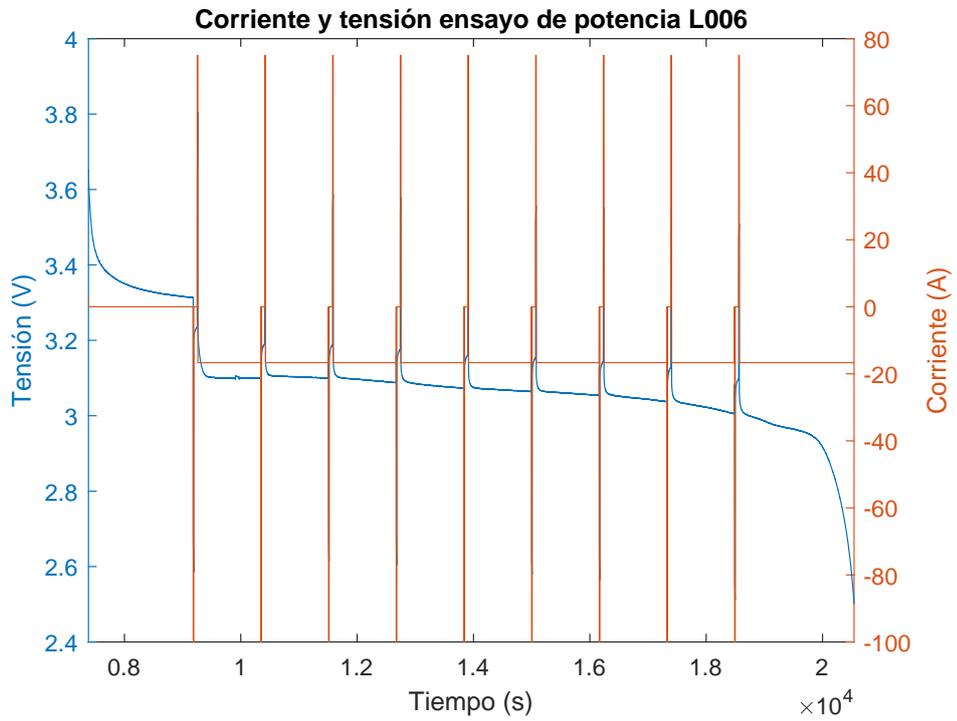


Figura A.61: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L006.

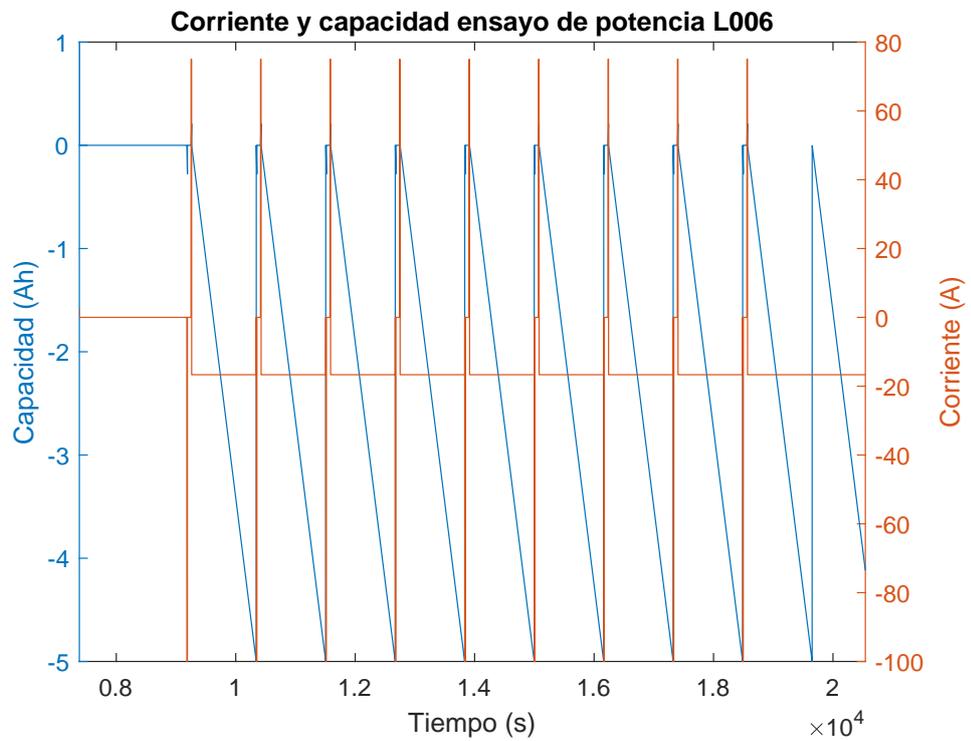


Figura A.62: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L006.

A.3. Ensayo de potencia

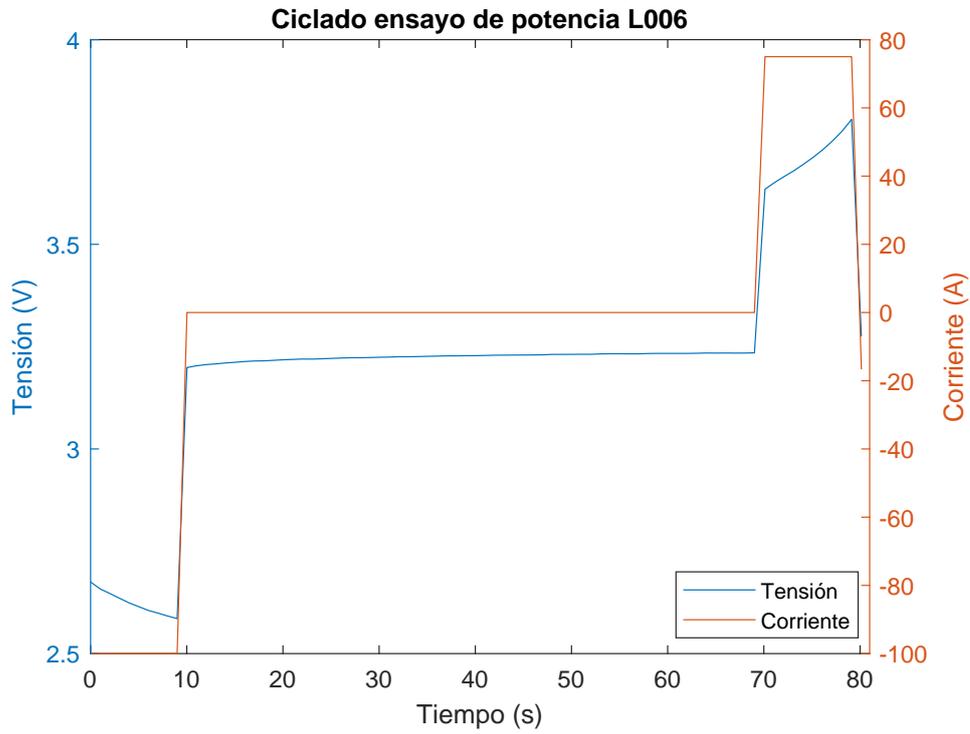


Figura A.63: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L006.

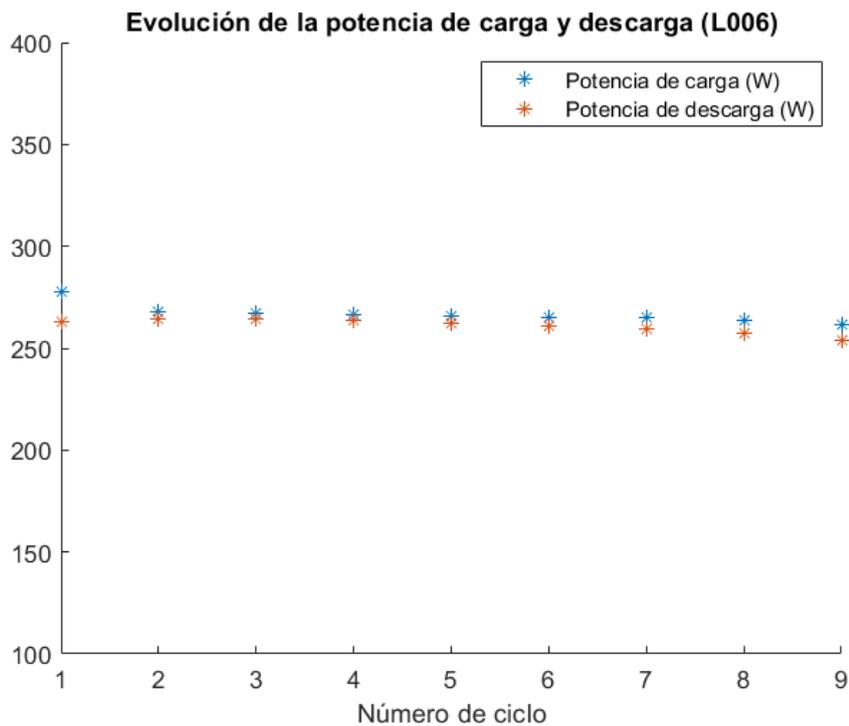


Figura A.64: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L006.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

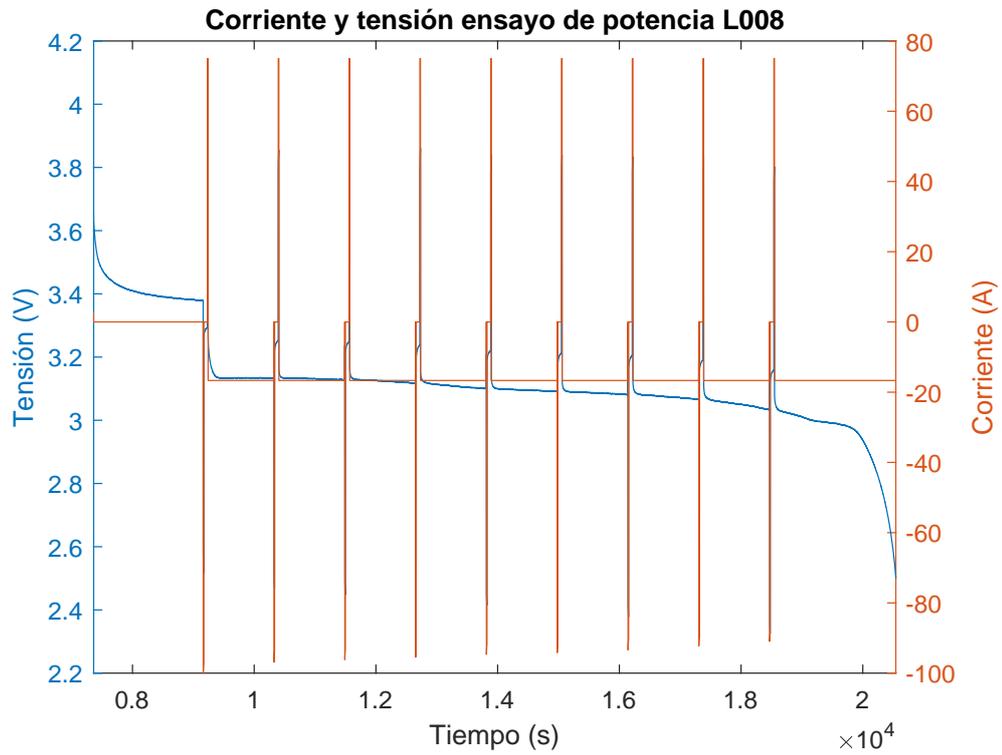


Figura A.65: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L008.

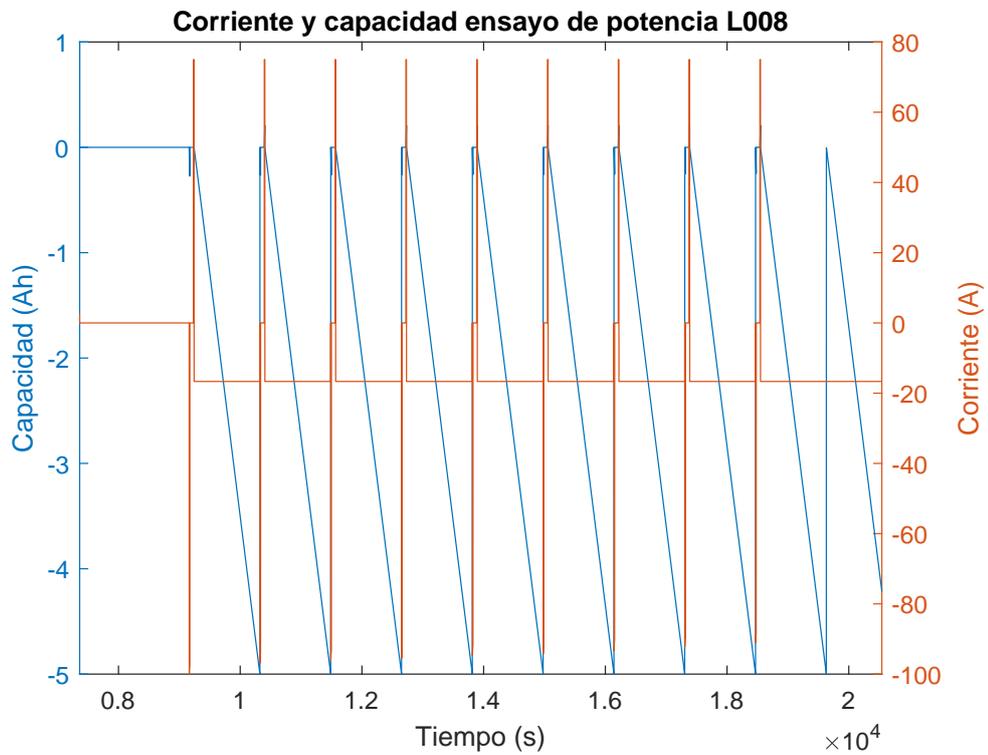


Figura A.66: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L008.

A.3. Ensayo de potencia

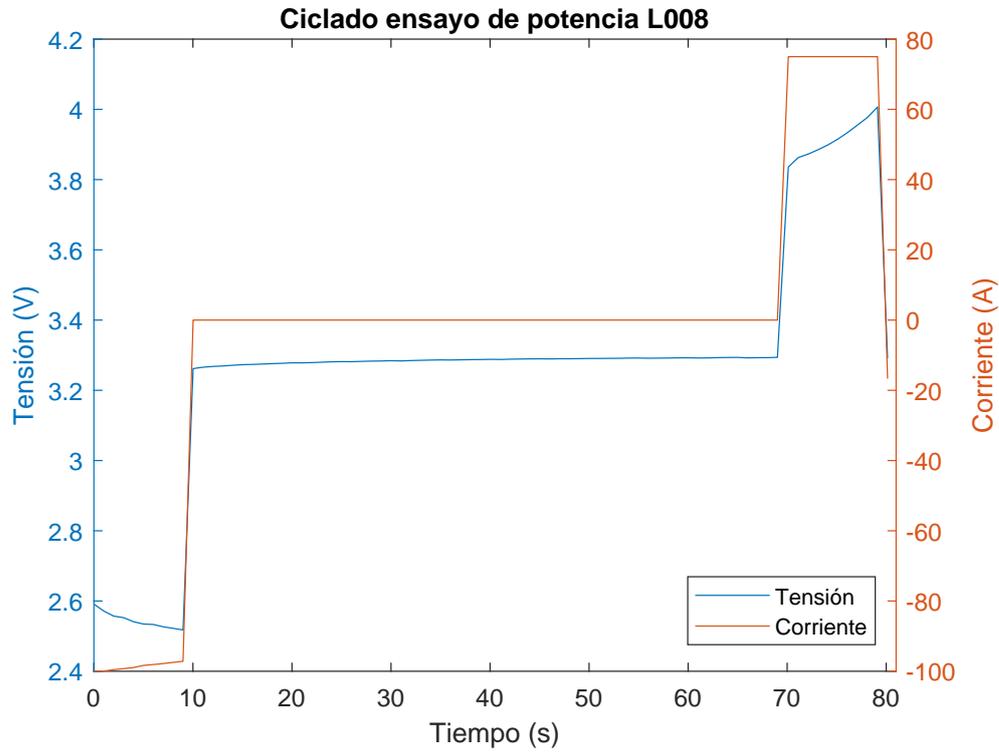


Figura A.67: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L008.

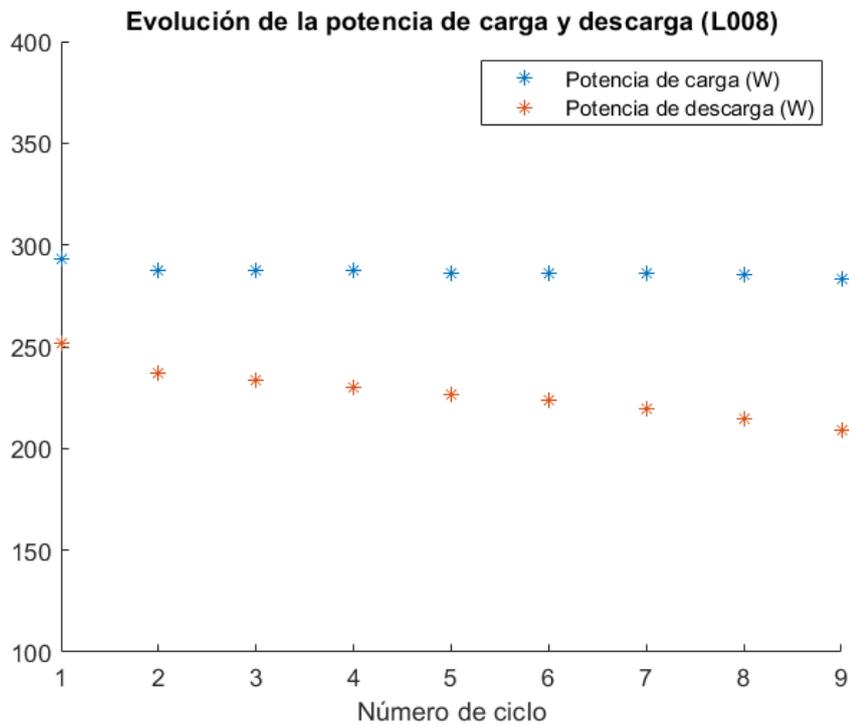


Figura A.68: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L008.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

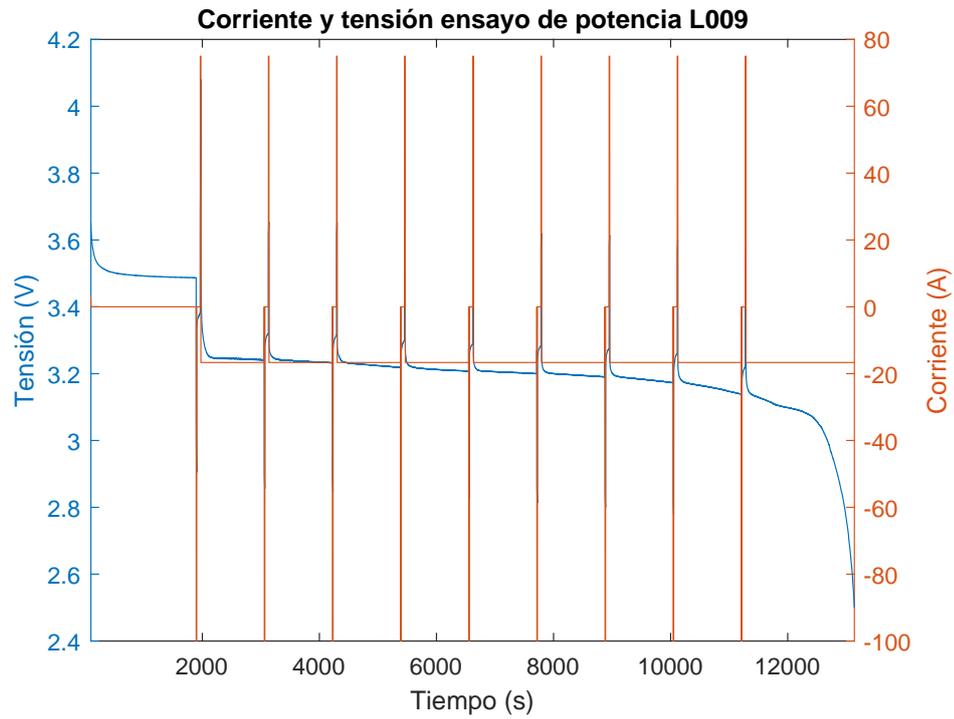


Figura A.69: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L009.

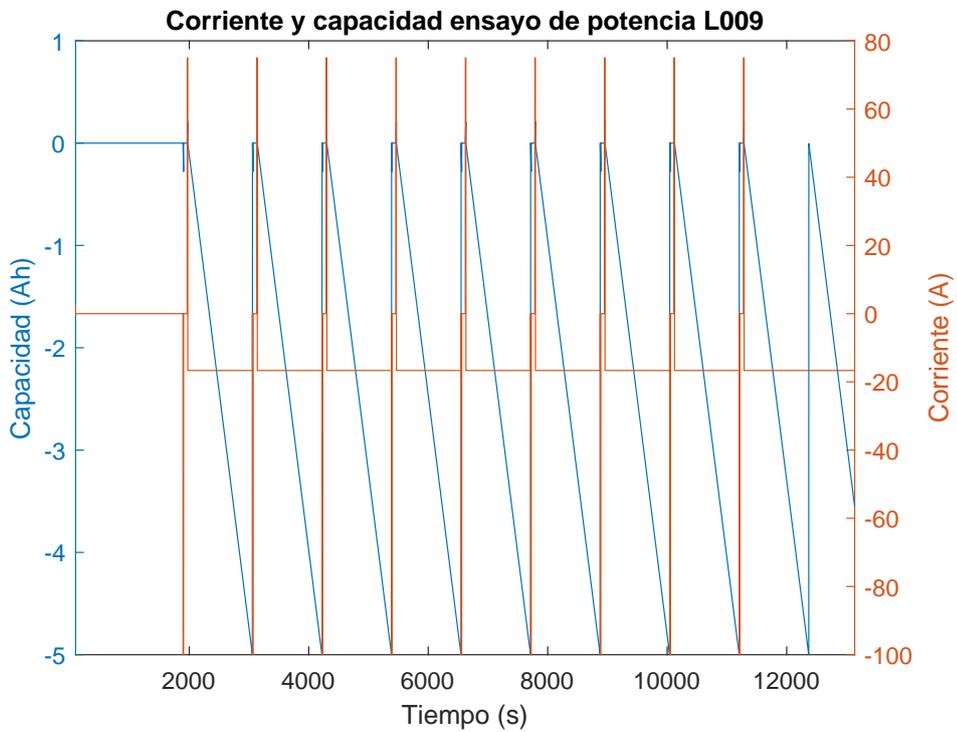


Figura A.70: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L009.

A.3. Ensayo de potencia

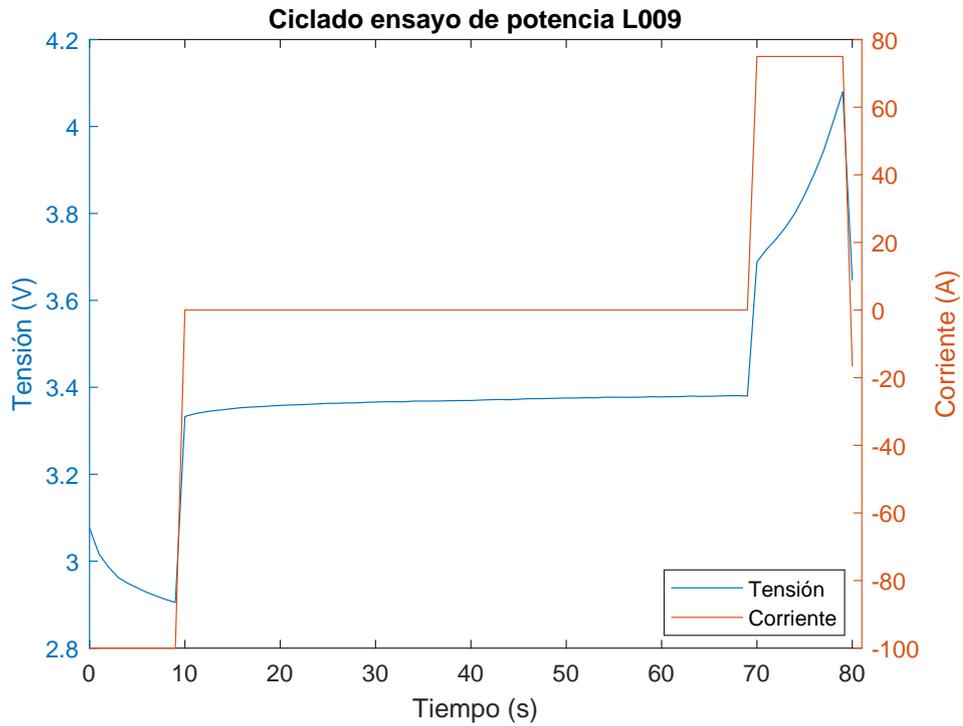


Figura A.71: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L009.

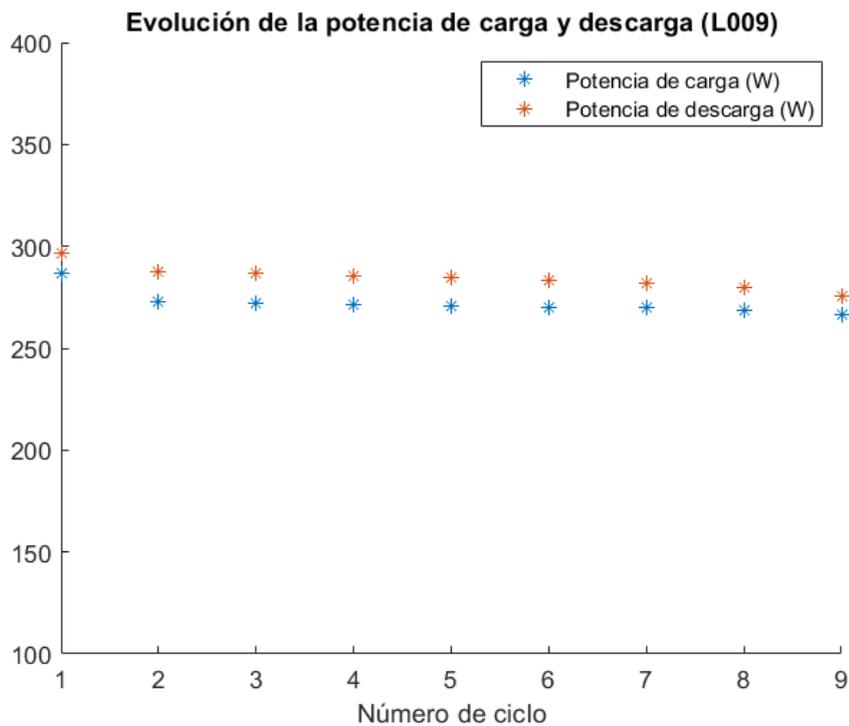


Figura A.72: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L009.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

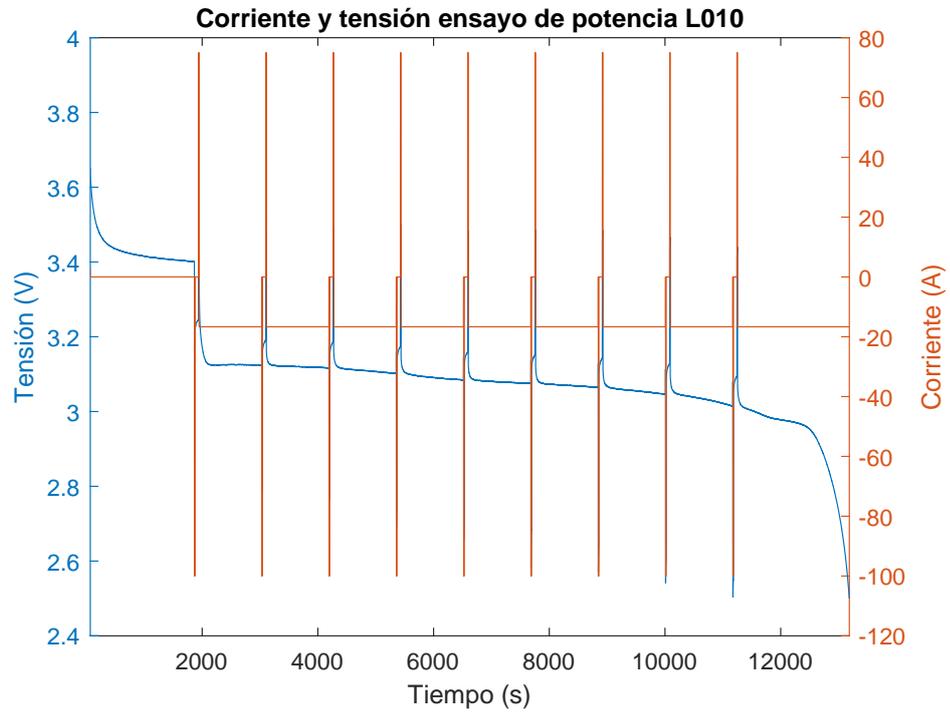


Figura A.73: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L010.

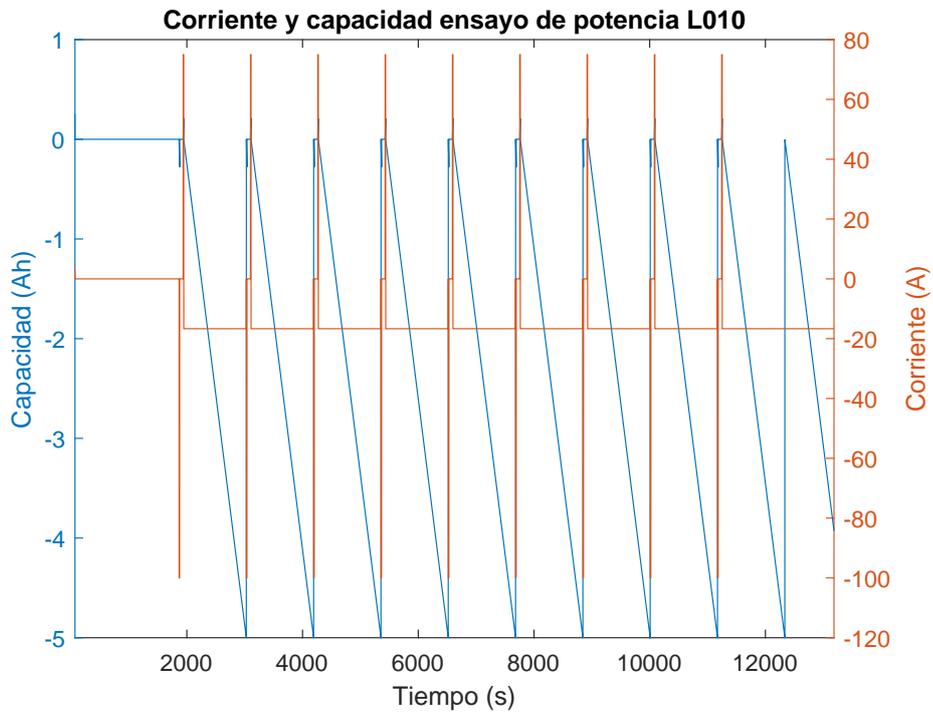


Figura A.74: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L010.

A.3. Ensayo de potencia

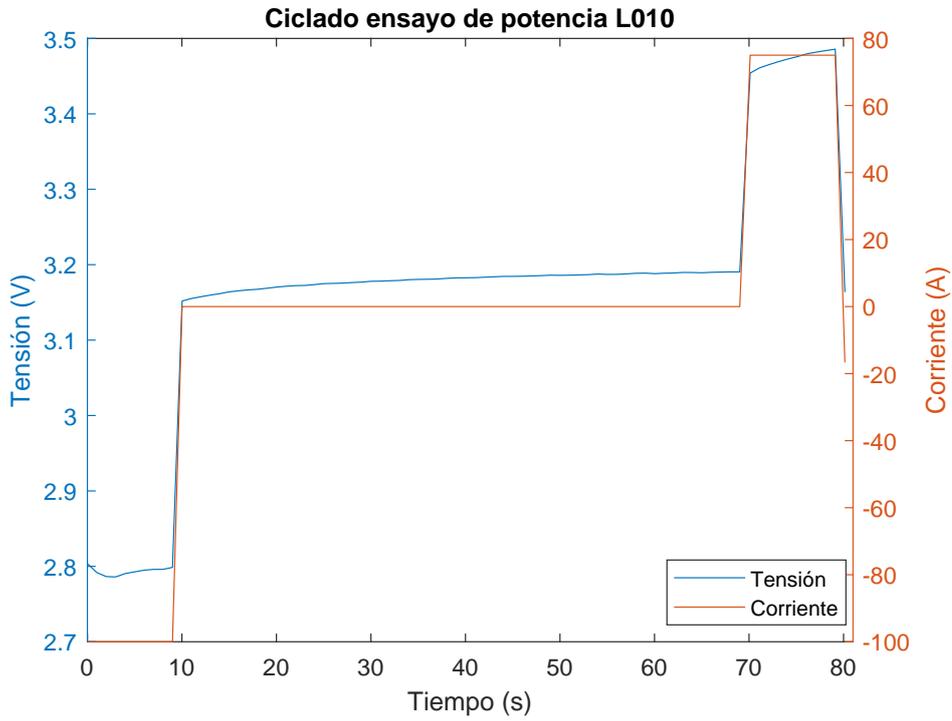


Figura A.75: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L010.

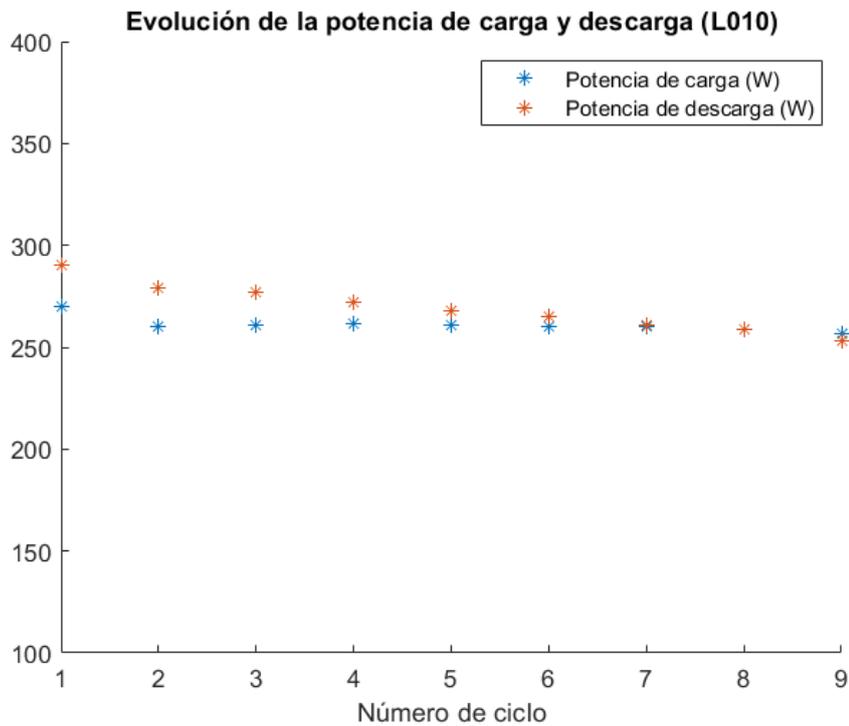


Figura A.76: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L010.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

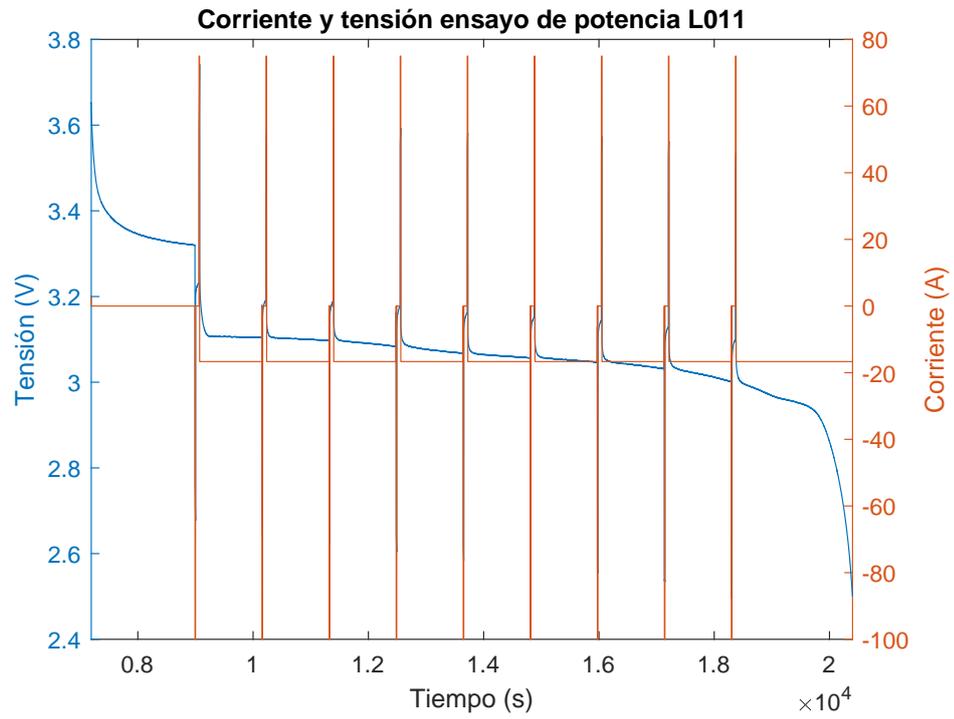


Figura A.77: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L011.

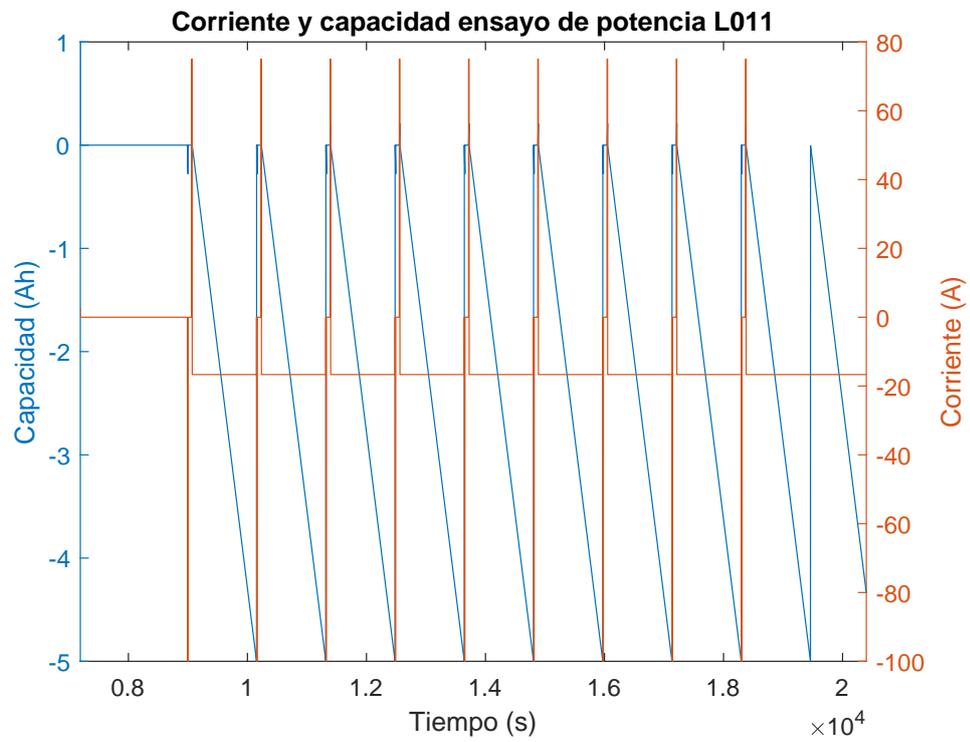


Figura A.78: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L011.

A.3. Ensayo de potencia

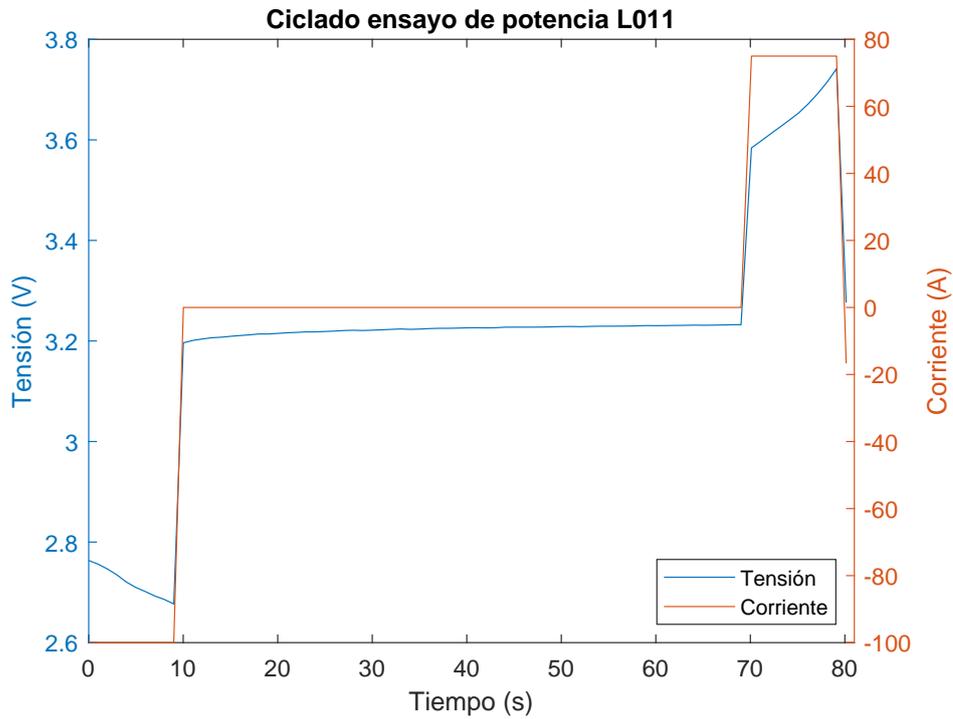


Figura A.79: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L011.

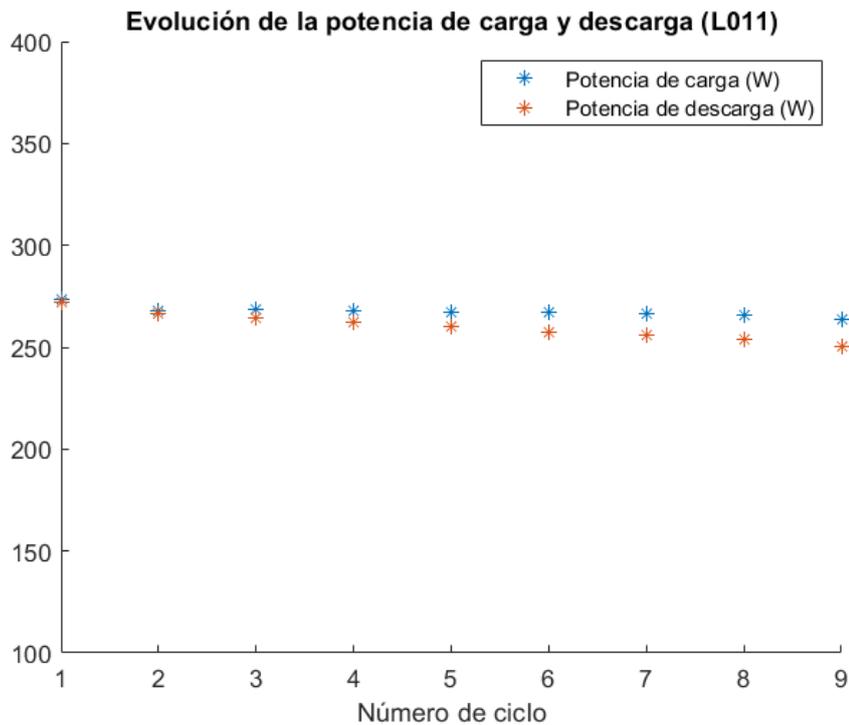


Figura A.80: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L011.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

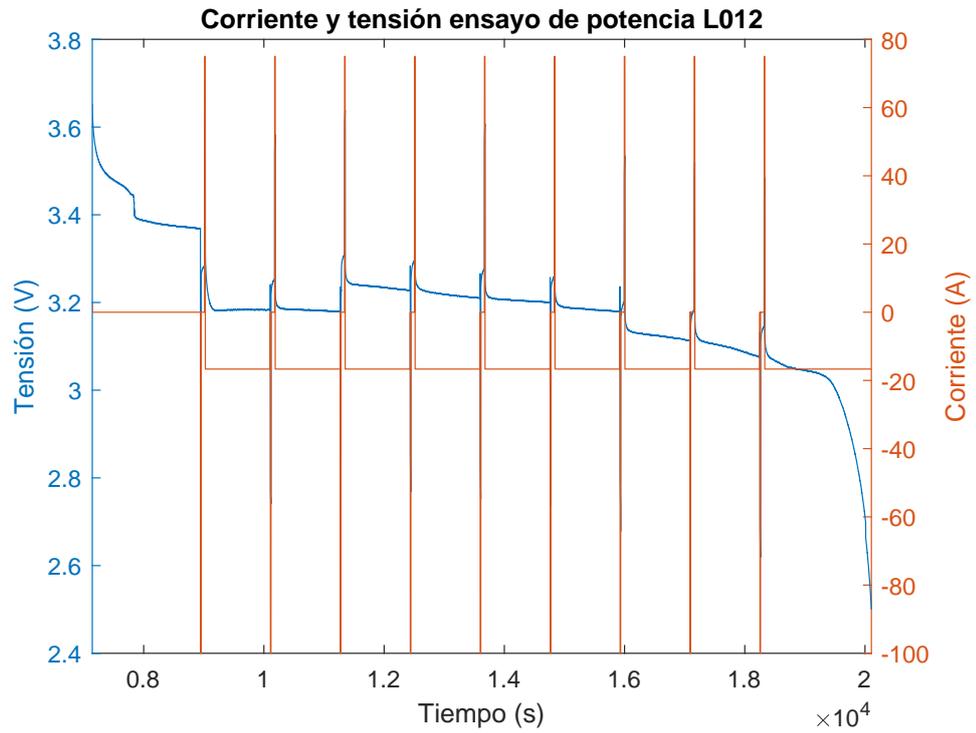


Figura A.81: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L012.

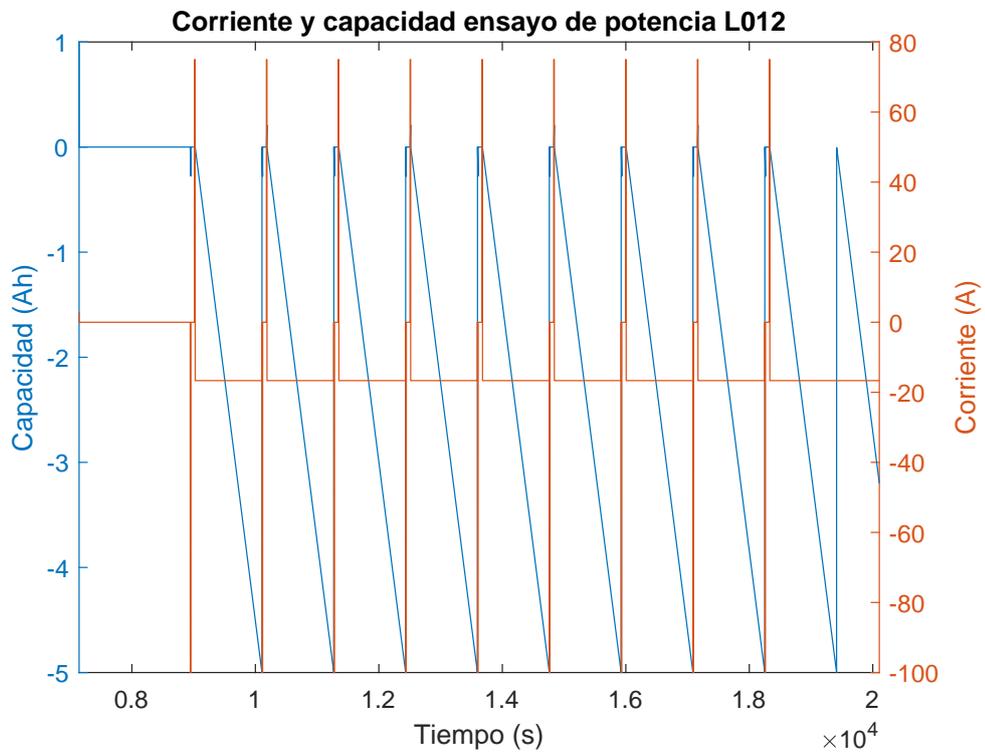


Figura A.82: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L012.

A.3. Ensayo de potencia

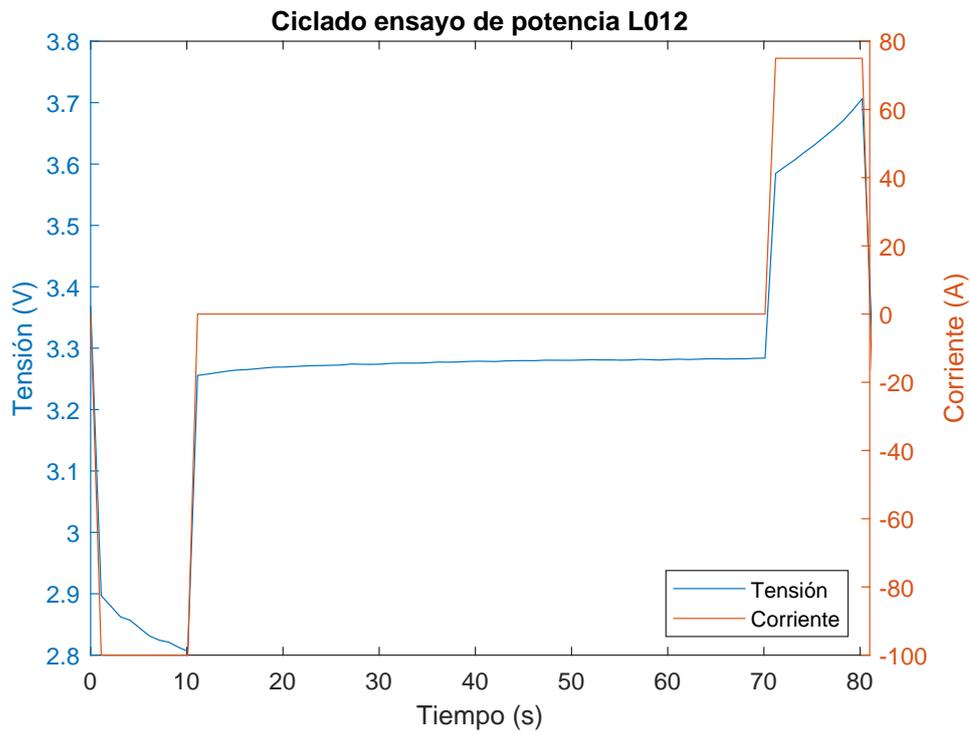


Figura A.83: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L012.

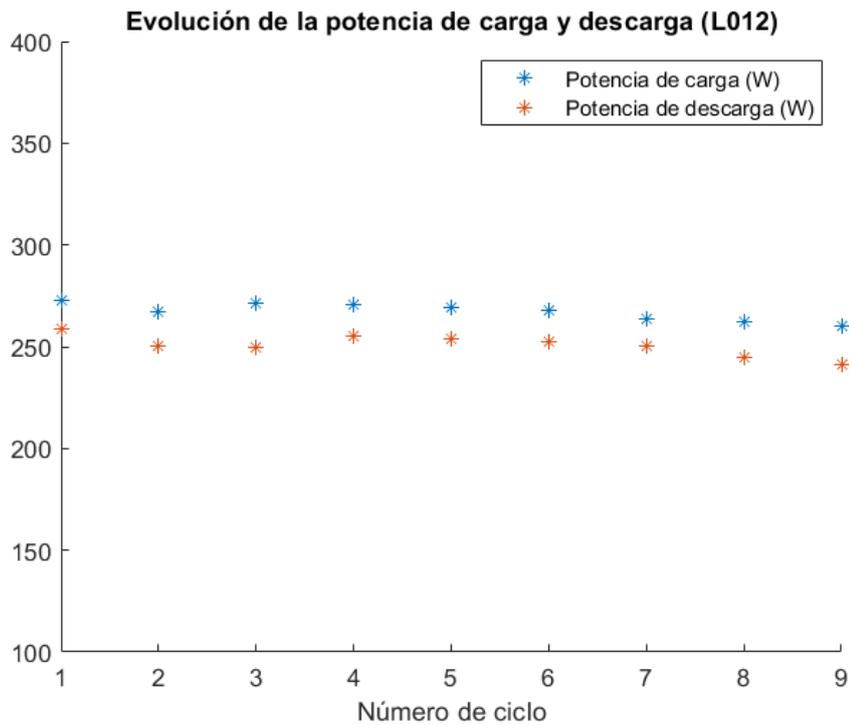


Figura A.84: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L012.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

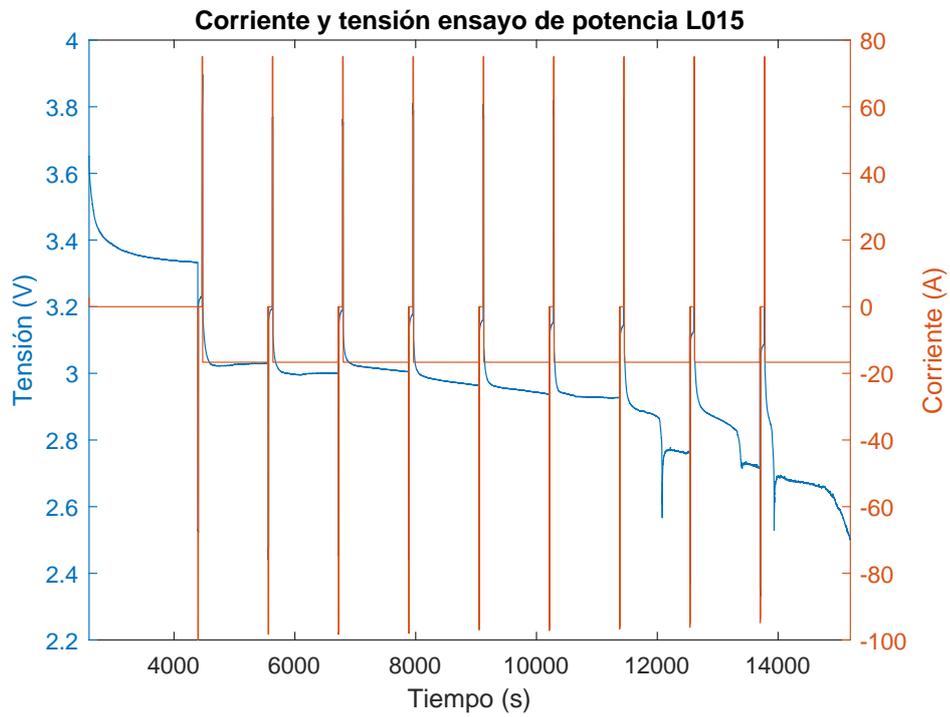


Figura A.85: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L015.

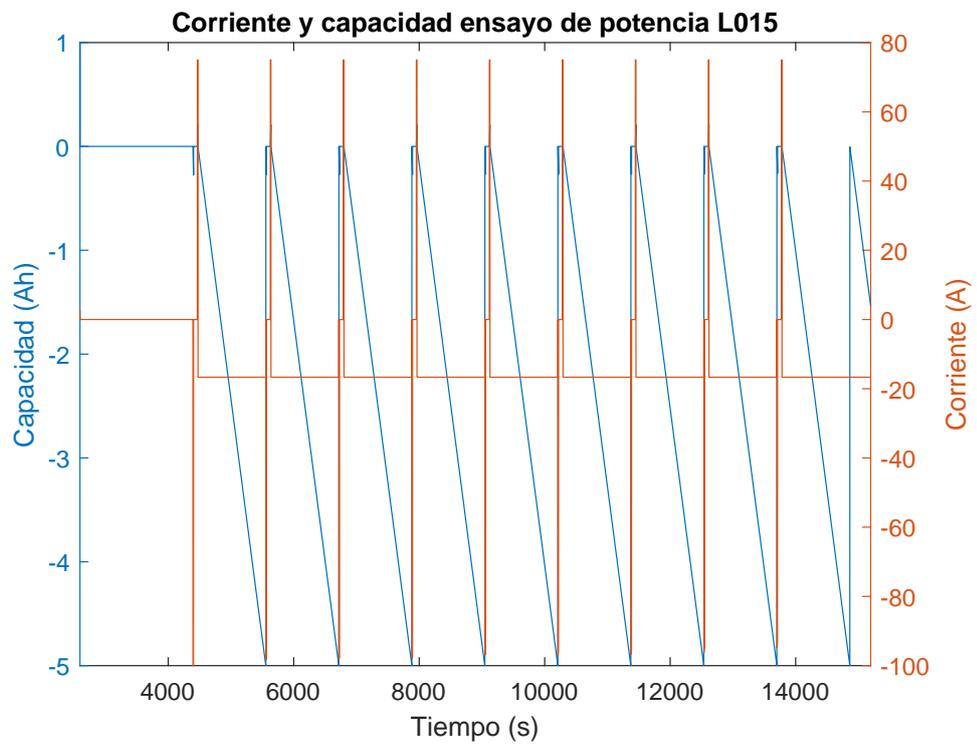


Figura A.86: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L015.

A.3. Ensayo de potencia

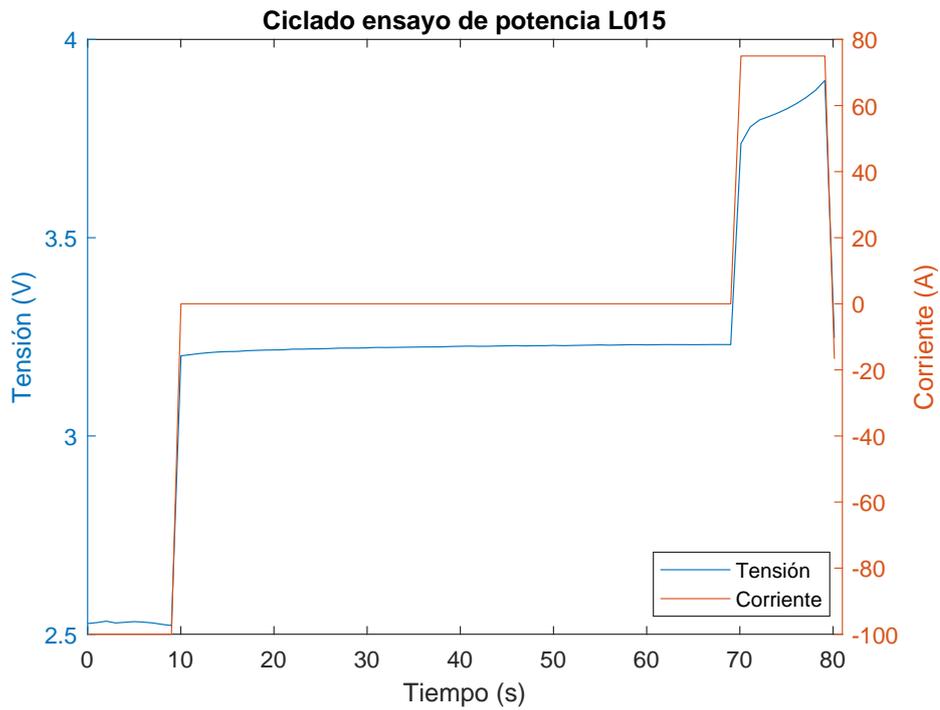


Figura A.87: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L015.

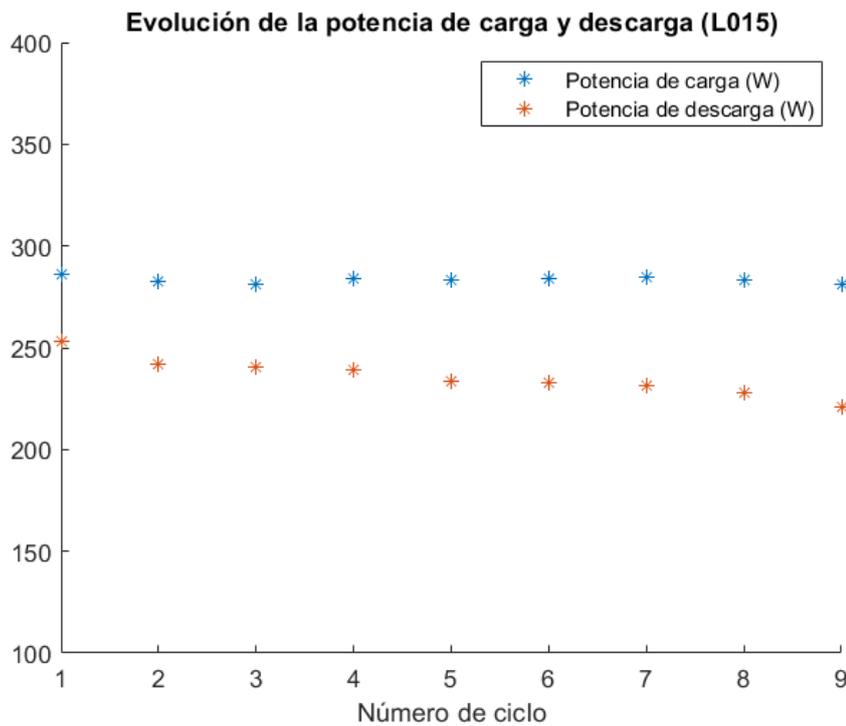


Figura A.88: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L015.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

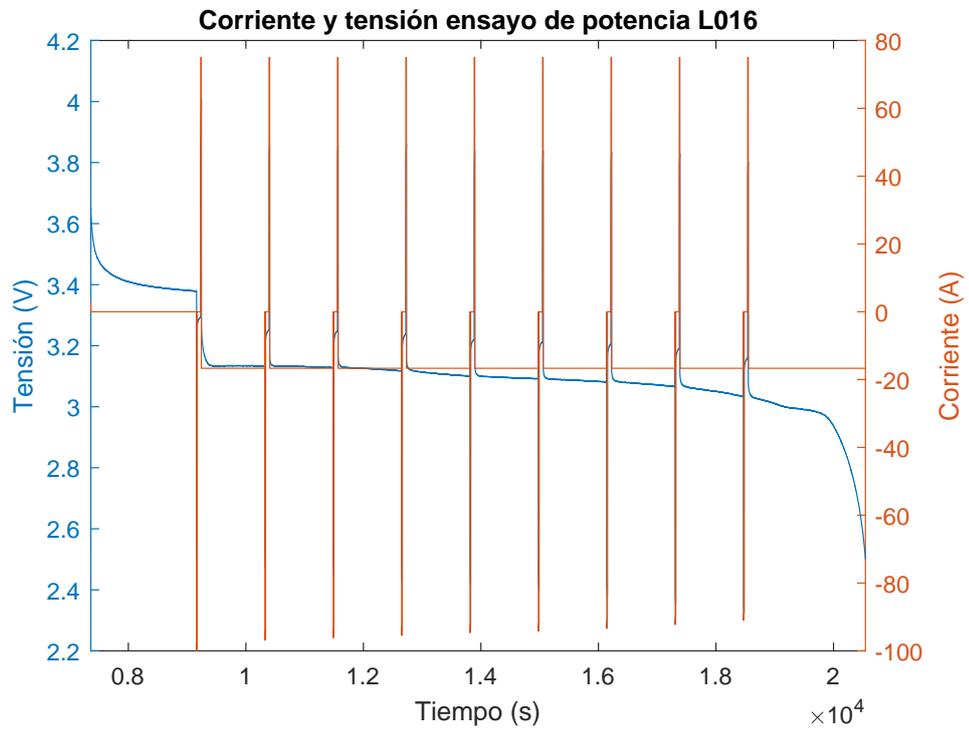


Figura A.89: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L016.

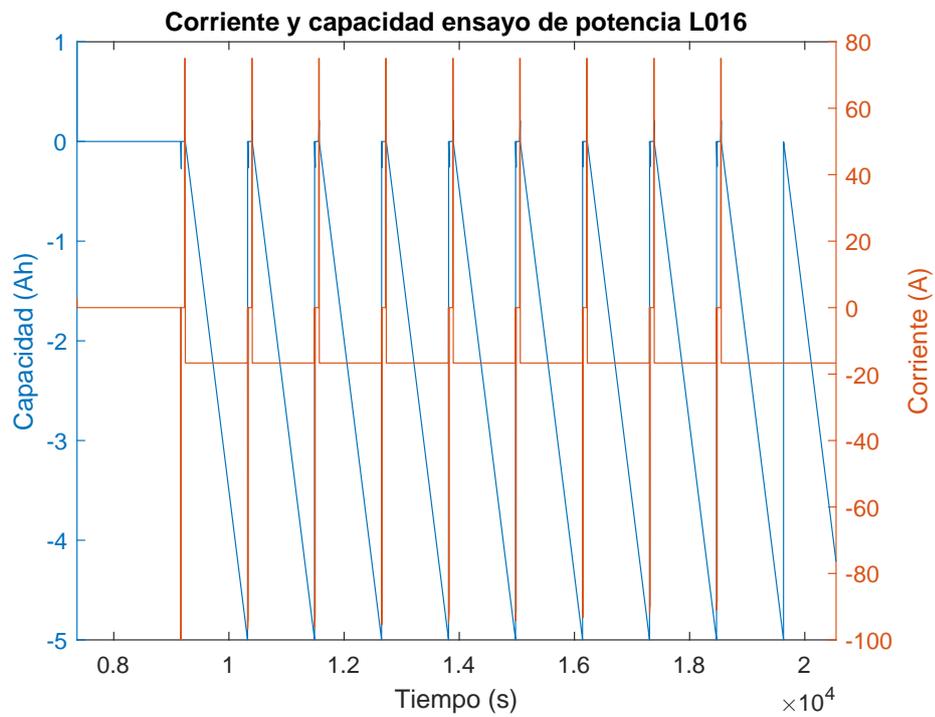


Figura A.90: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L016.

A.3. Ensayo de potencia

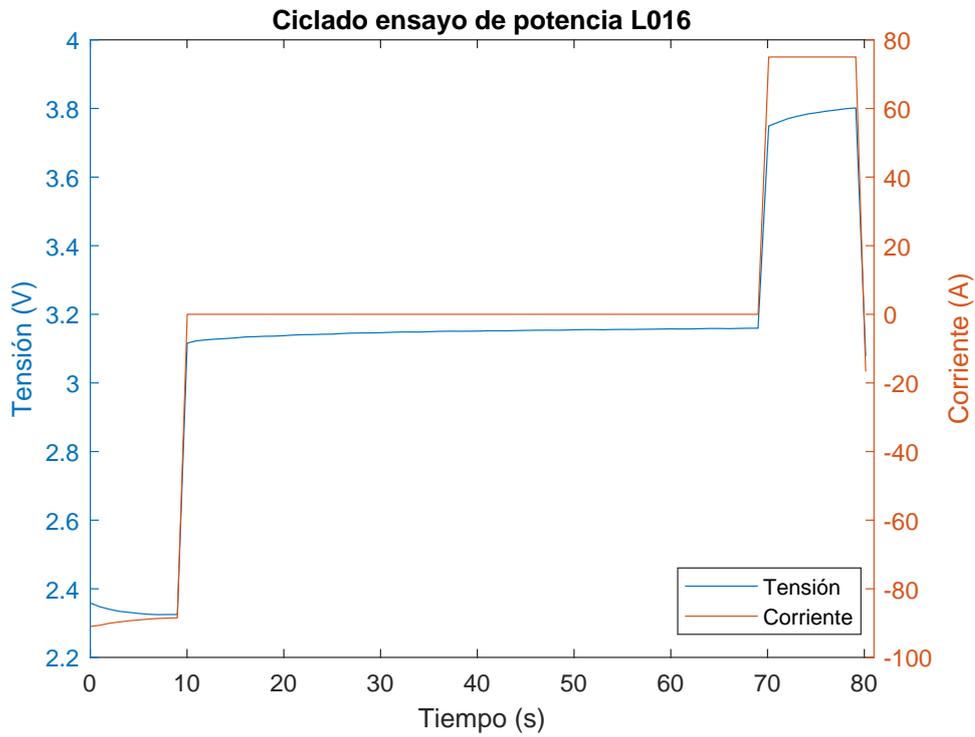


Figura A.91: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L016.

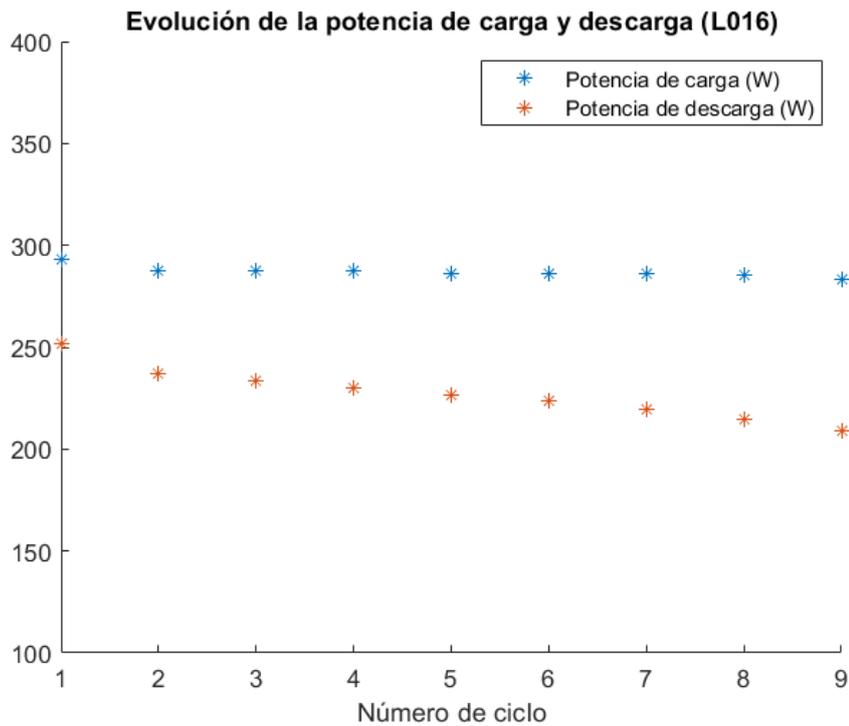


Figura A.92: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L016.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

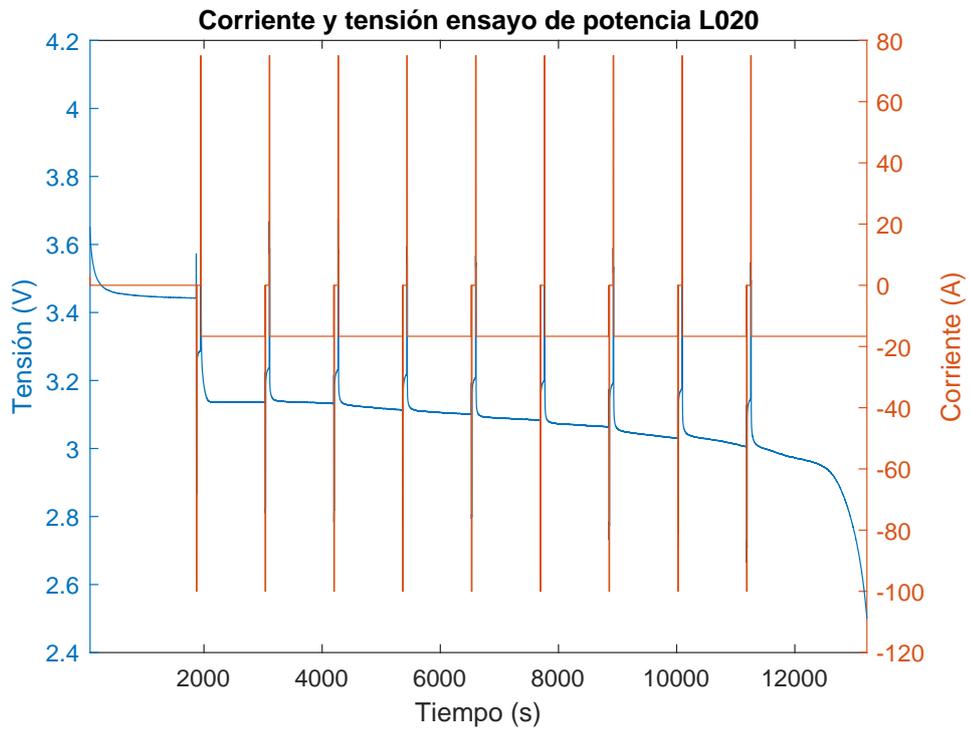


Figura A.93: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L020.

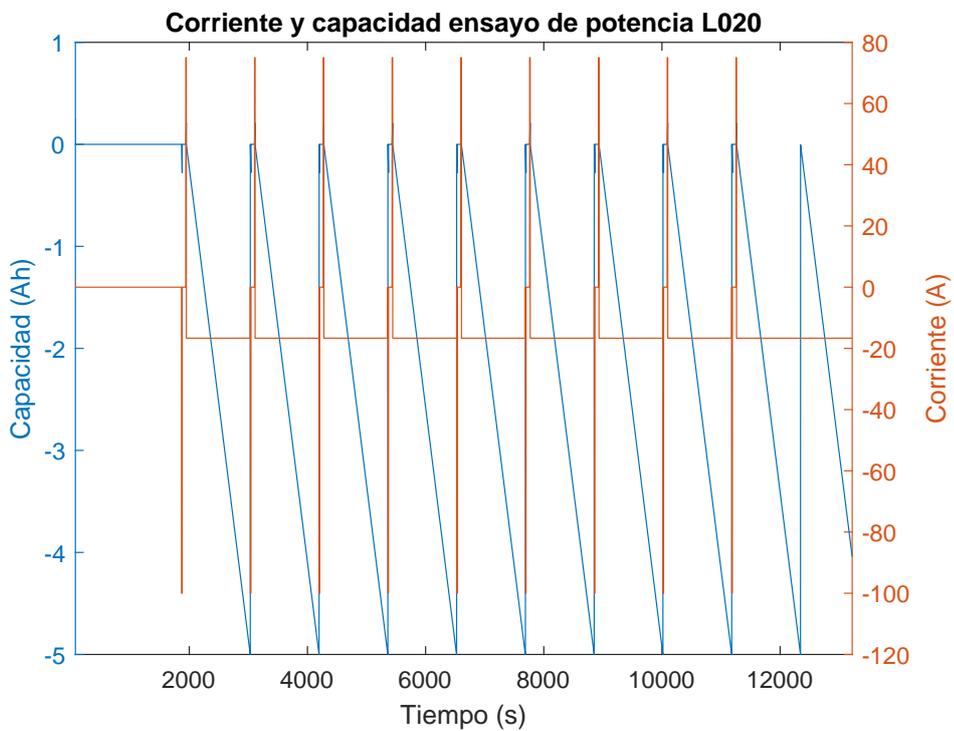


Figura A.94: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L020.

A.3. Ensayo de potencia

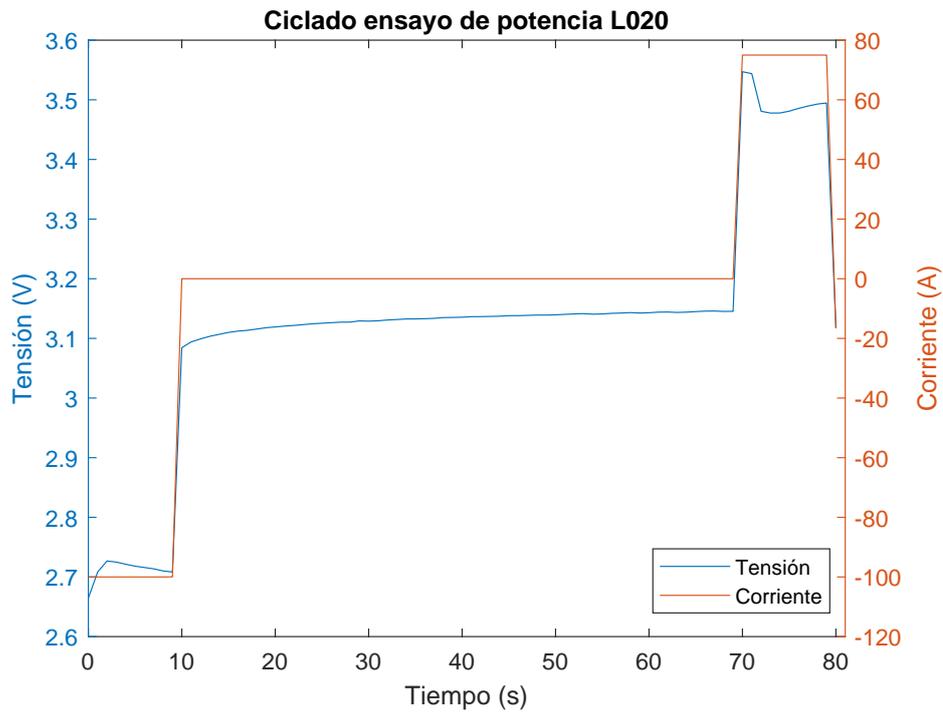


Figura A.95: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L020.

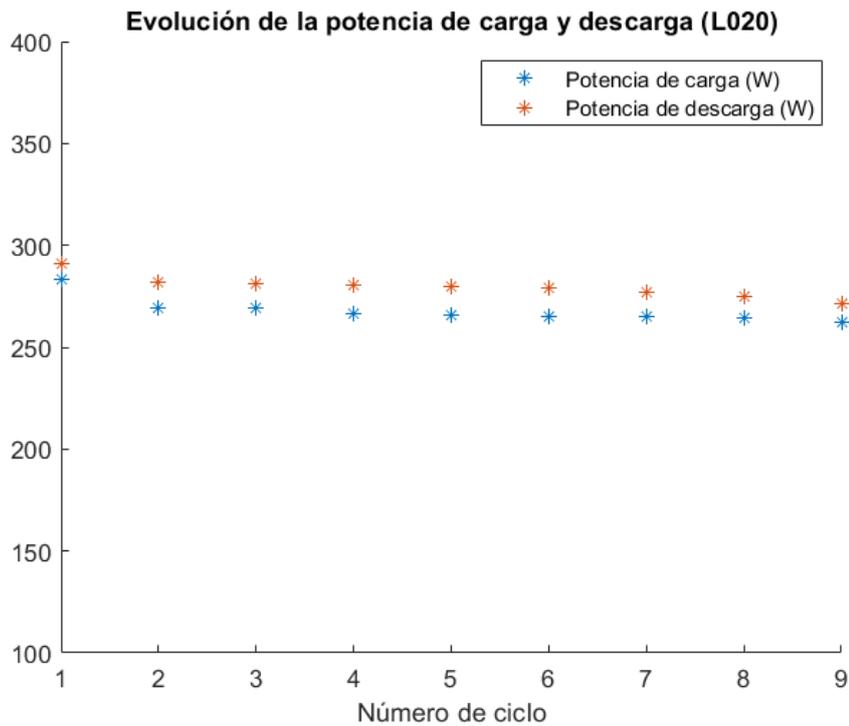


Figura A.96: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L020.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

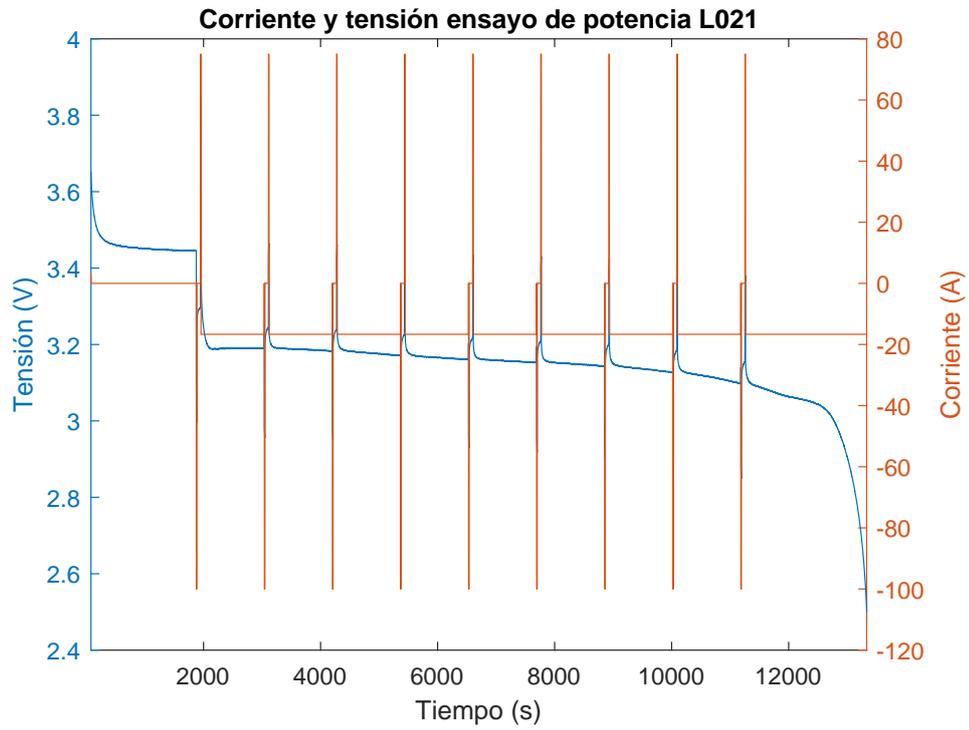


Figura A.97: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L021.

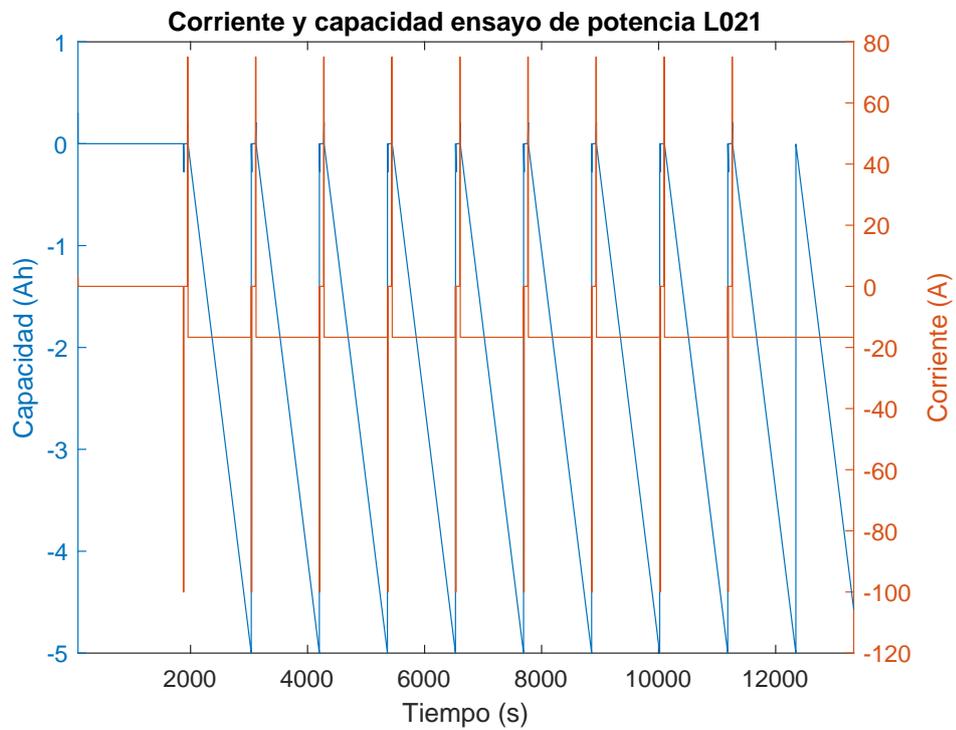


Figura A.98: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L021.

A.3. Ensayo de potencia

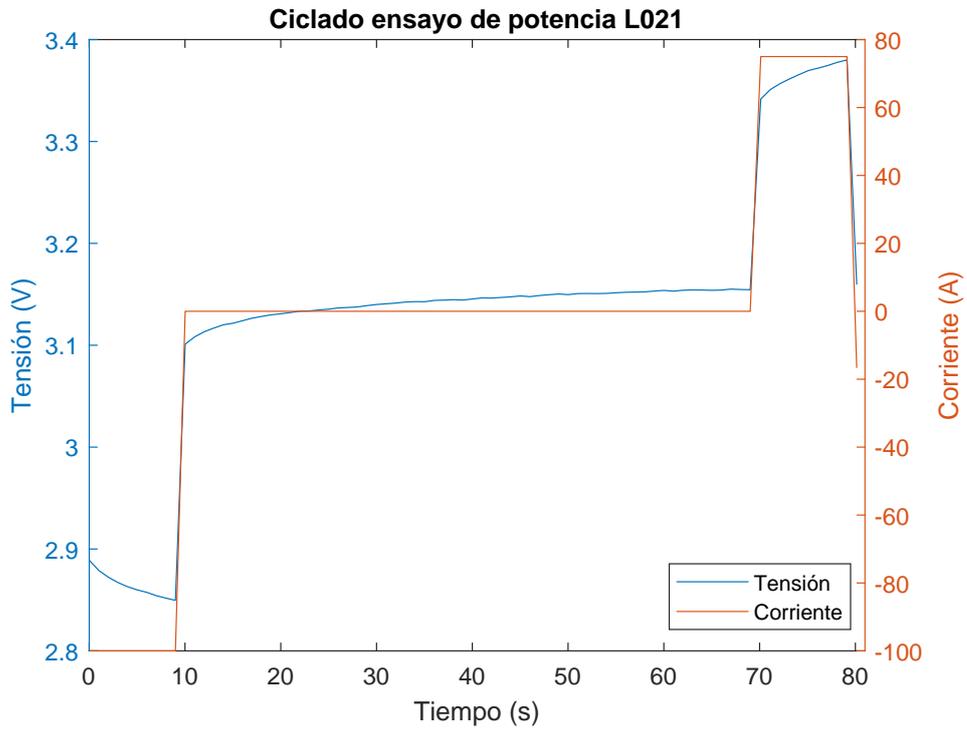


Figura A.99: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L021.

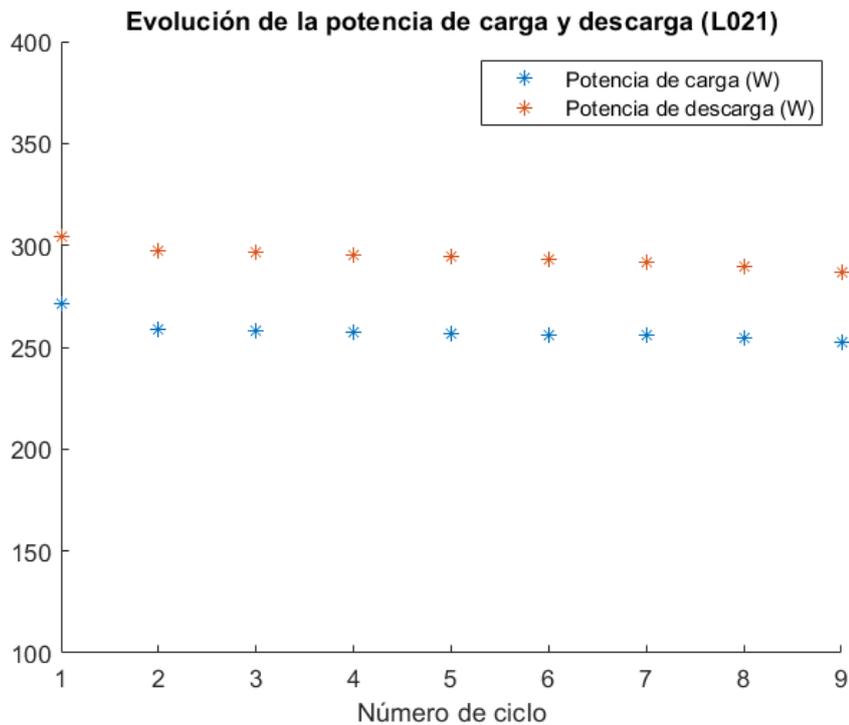


Figura A.100: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L021.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

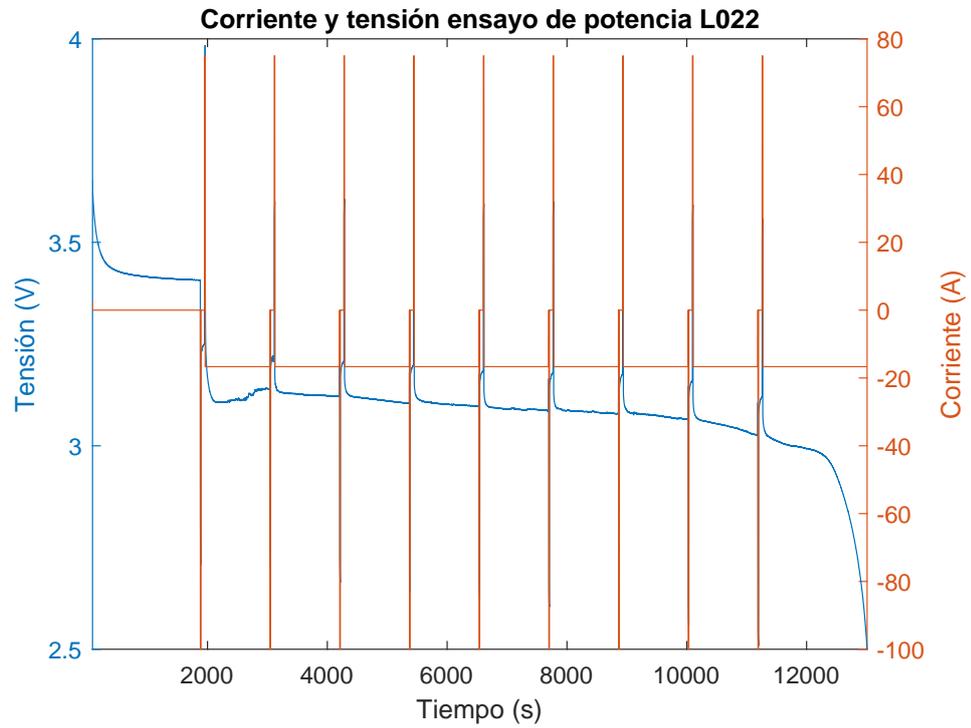


Figura A.101: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L022.

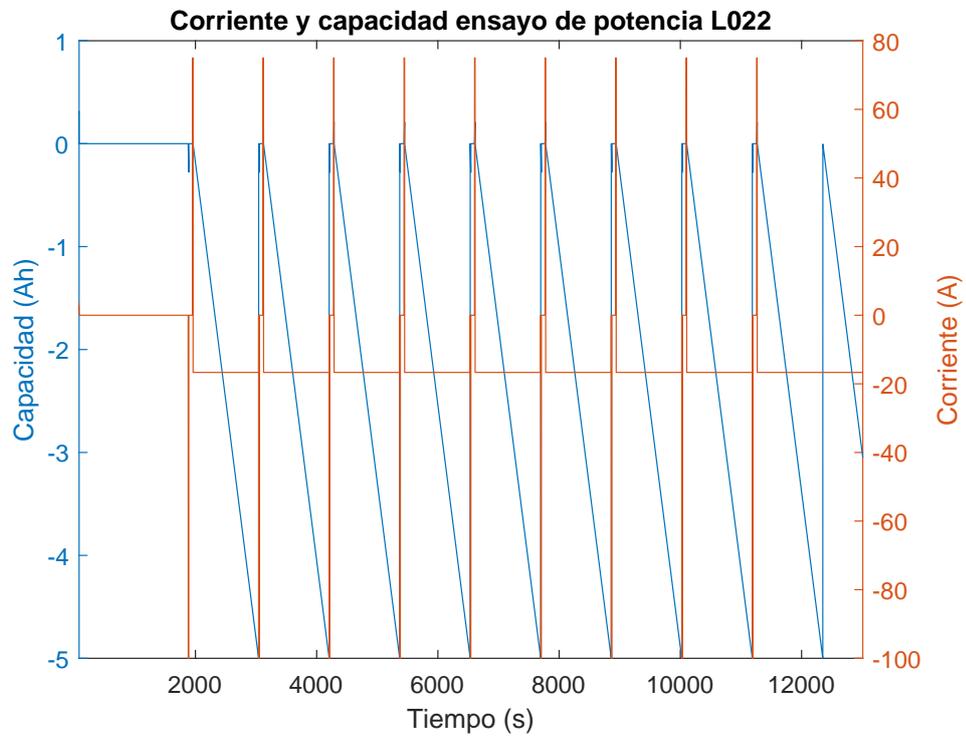


Figura A.102: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L022.

A.3. Ensayo de potencia

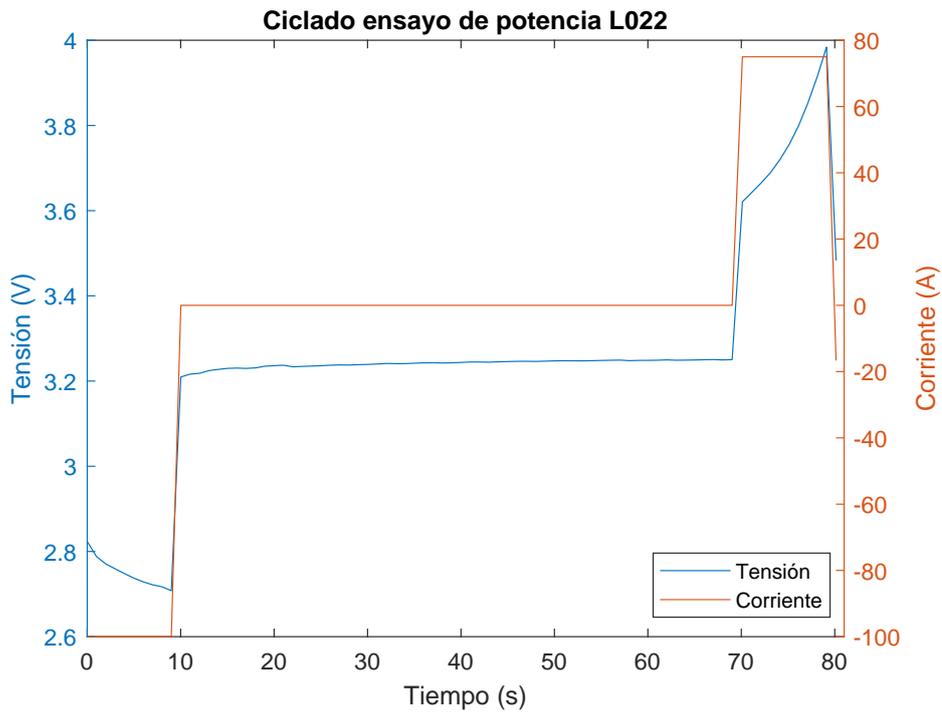


Figura A.103: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L022.

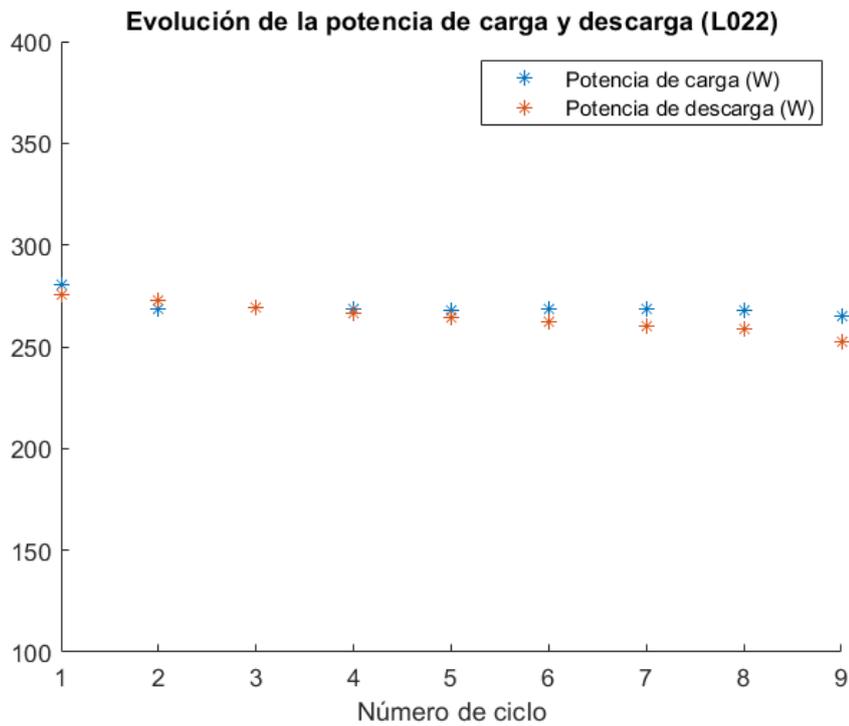


Figura A.104: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L022.

Apéndice A. Ensayos realizados a celdas

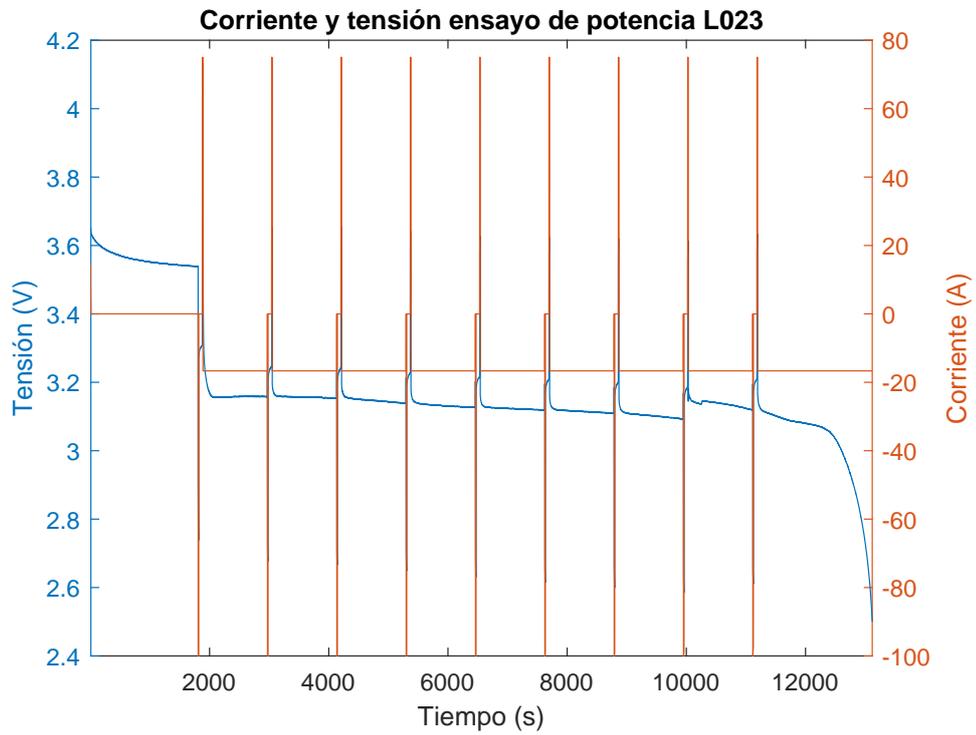


Figura A.105: Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L023.

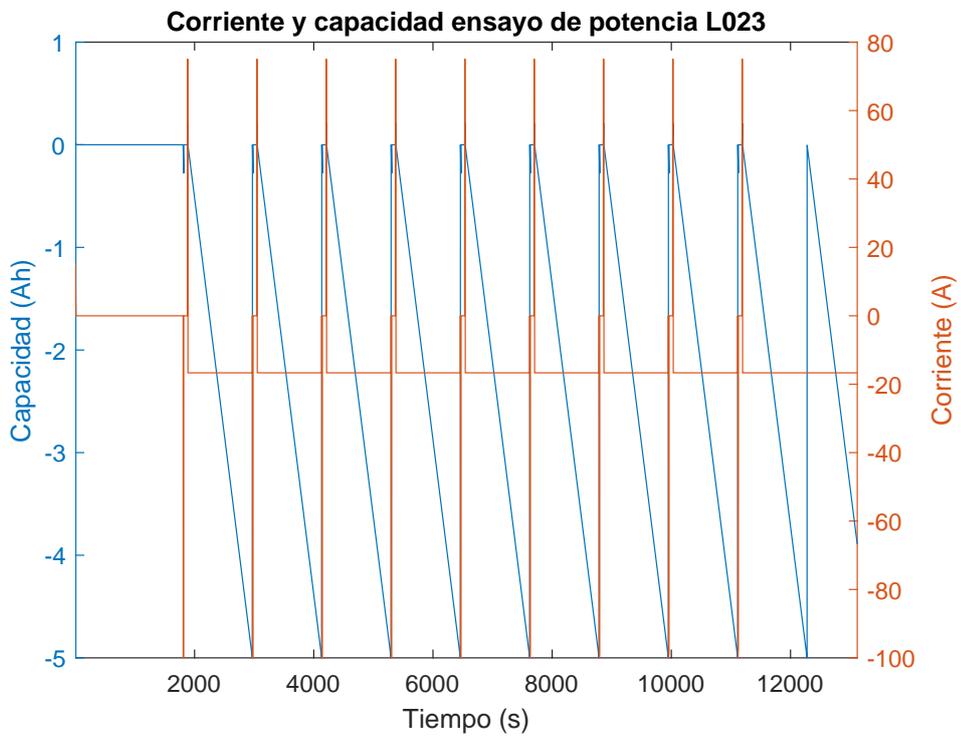


Figura A.106: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L023.

A.3. Ensayo de potencia

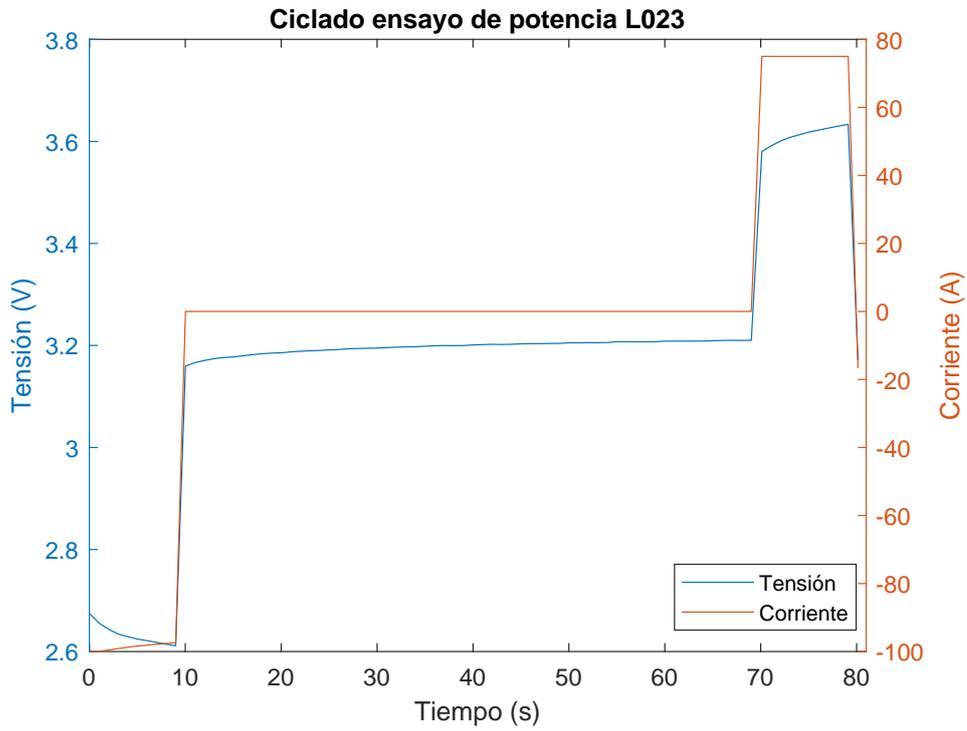


Figura A.107: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L023.

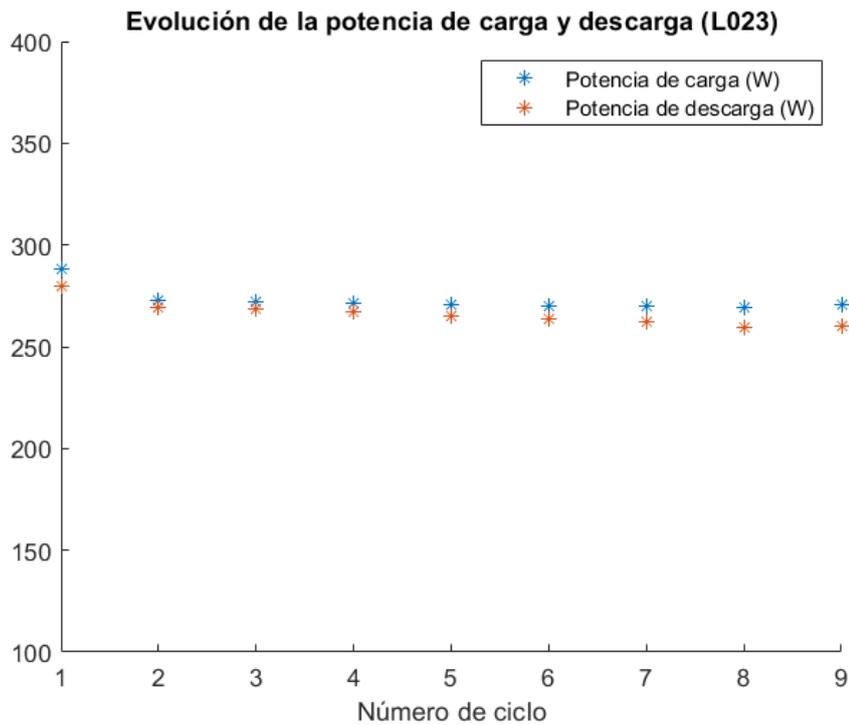


Figura A.108: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L023.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

Ensayos realizados al banco de baterías

B.1. Parámetros físicos del banco

B.1.1. Masa

La masa del banco se midió con una balanza de 100 g de apreciación, de acuerdo con la norma [29]. Los resultados se presentan en la Tabla B.1.

	Masa (kg)
Celdas que componen el banco	$18,119 \pm 0,001$
Gabinete	$5,600 \pm 0,001$
Banco completo (con BMS y conectores)	$25,5 \pm 0,1$

Tabla B.1: Masas del banco construido.

B.2. Ensayo de capacidad estática

Se listan a continuación las curvas relevadas en el ensayo de capacidad estática del banco.

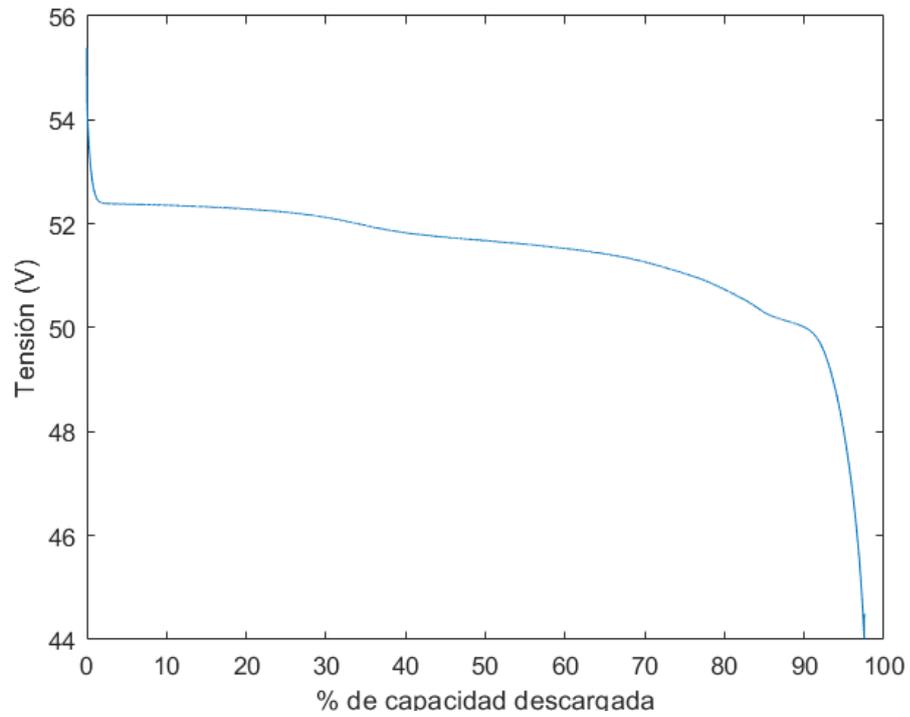


Figura B.1: Perfil de descarga del banco con C/3.

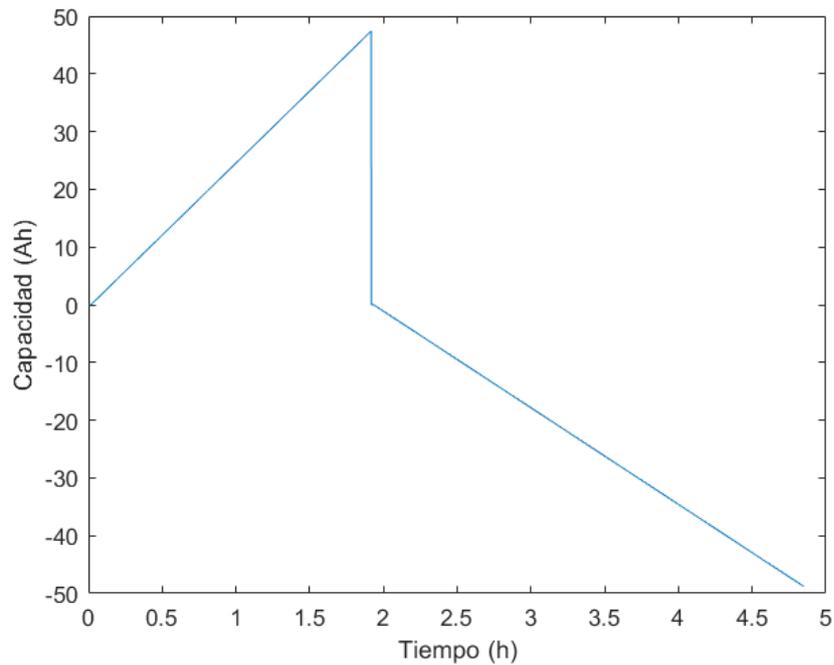


Figura B.2: Curva de capacidad estática del banco con C/3.

B.3. Ensayo de potencia

Se listan a continuación las curvas relevadas en el ensayo de potencia del banco.

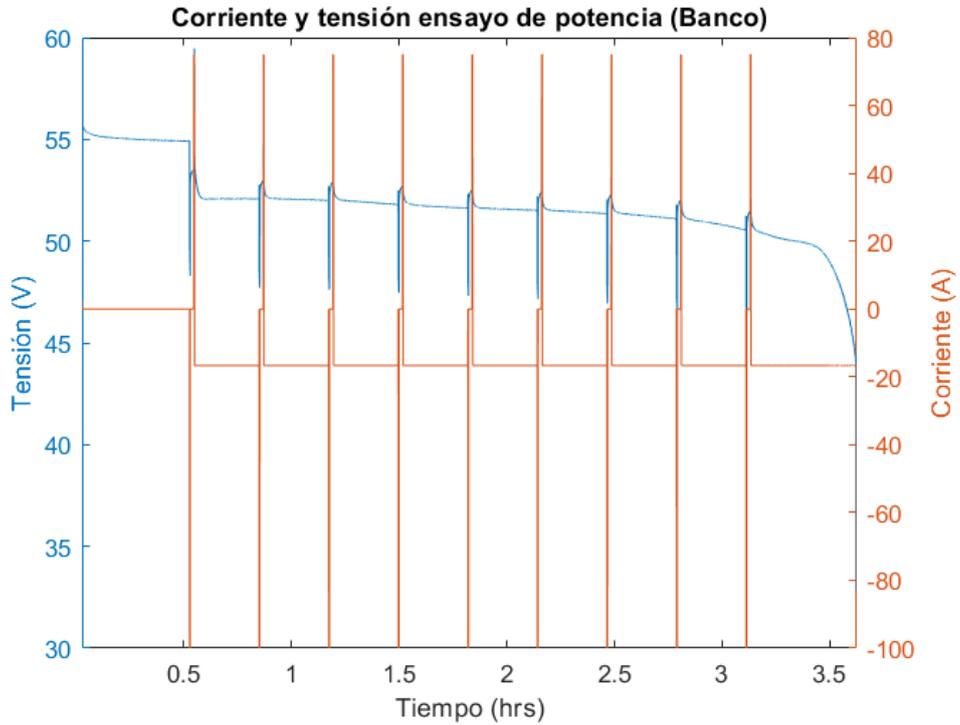


Figura B.3: Corriente y tensión en el ensayo de potencia del banco.

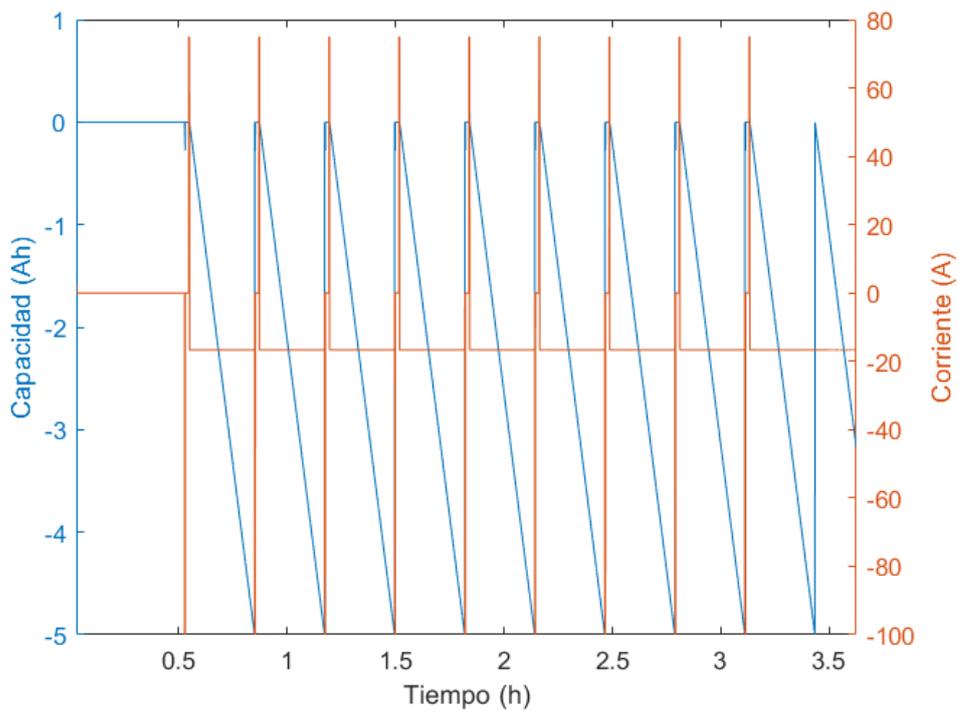


Figura B.4: Corriente y capacidad en el ensayo de potencia del banco.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

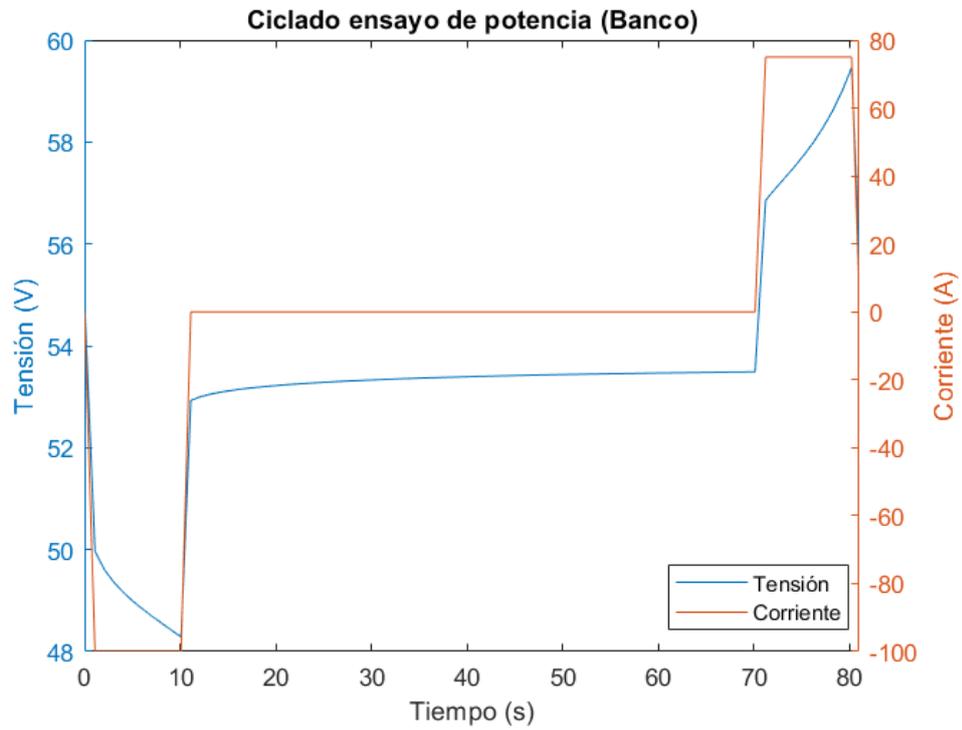


Figura B.5: Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia del banco.

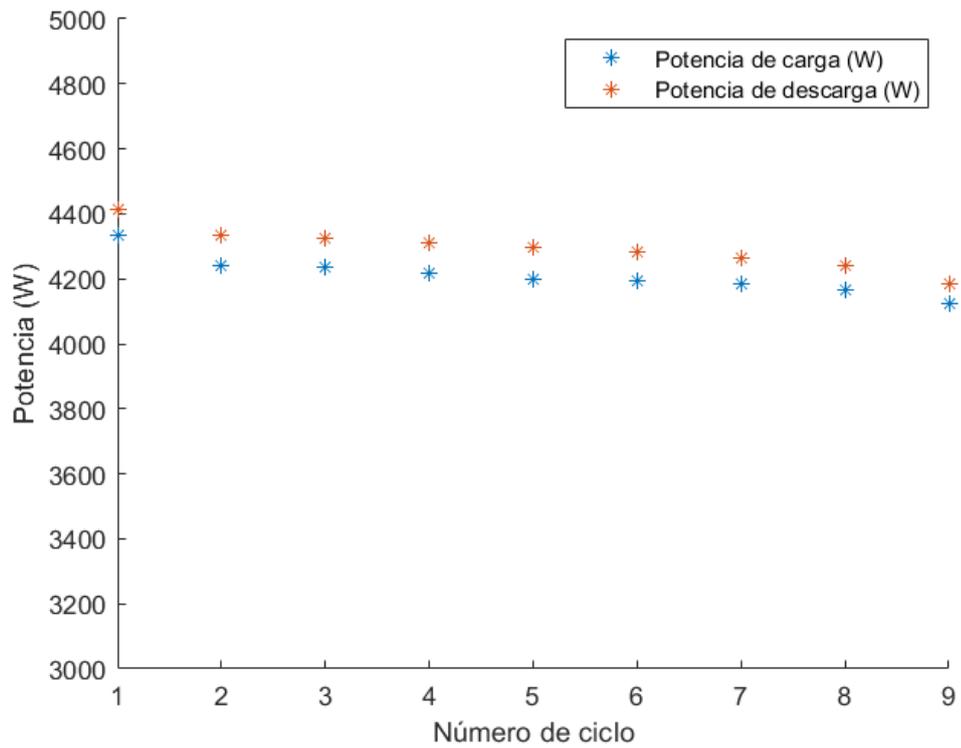


Figura B.6: Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia del banco.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

Se listan a continuación las curvas relevadas en el ensayo de estimación de autonomía, con y sin frenado regenerativo.

B.4.1. Con frenado regenerativo

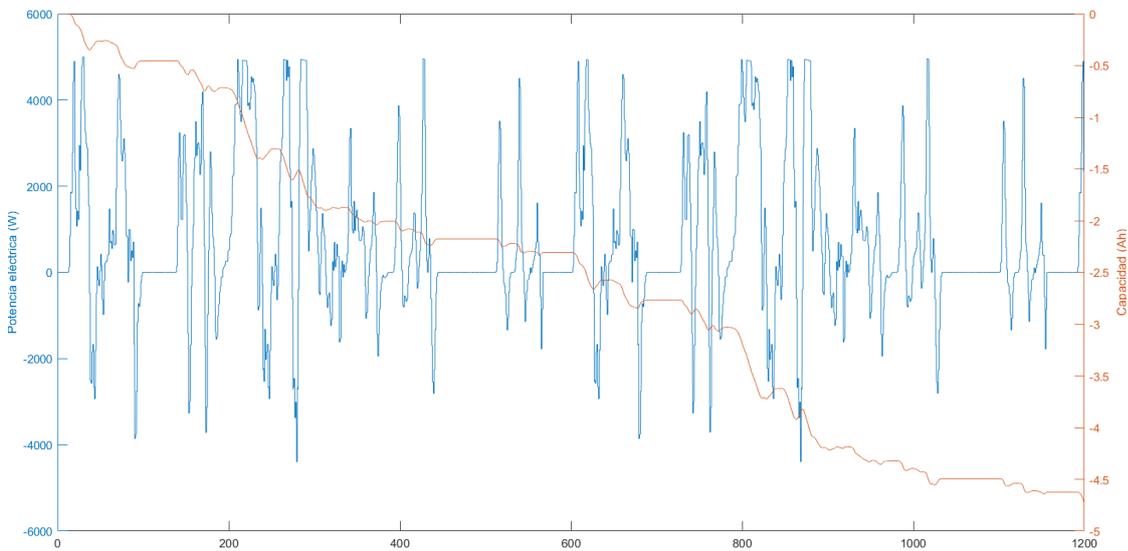


Figura B.7: Potencia y capacidad durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.

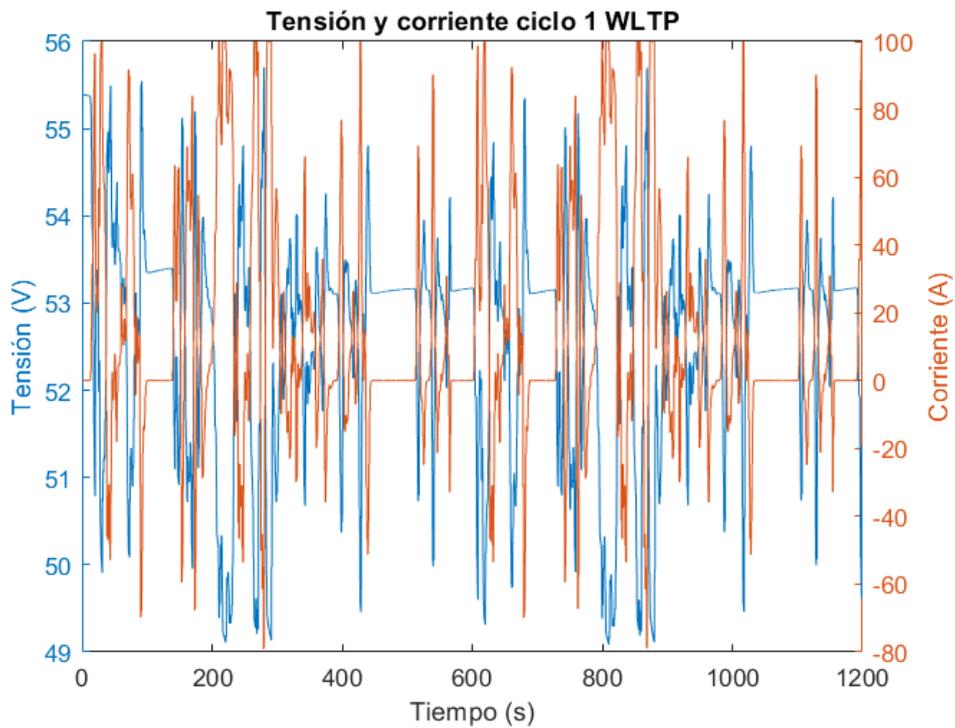


Figura B.8: Tensión y corriente durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

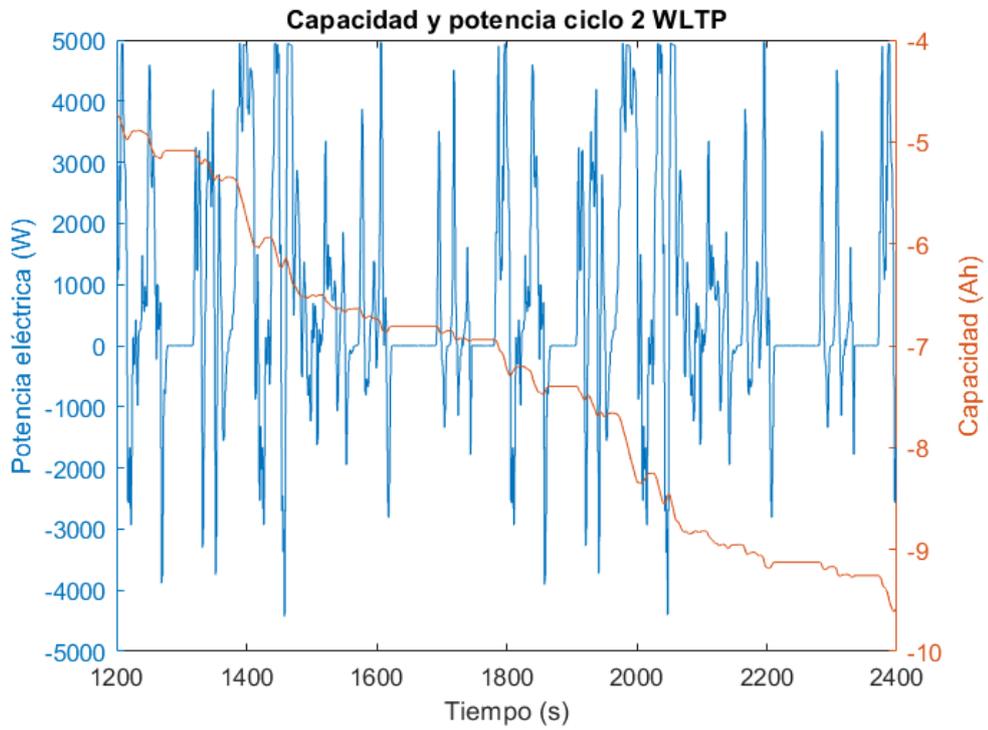


Figura B.9: Potencia y capacidad durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.

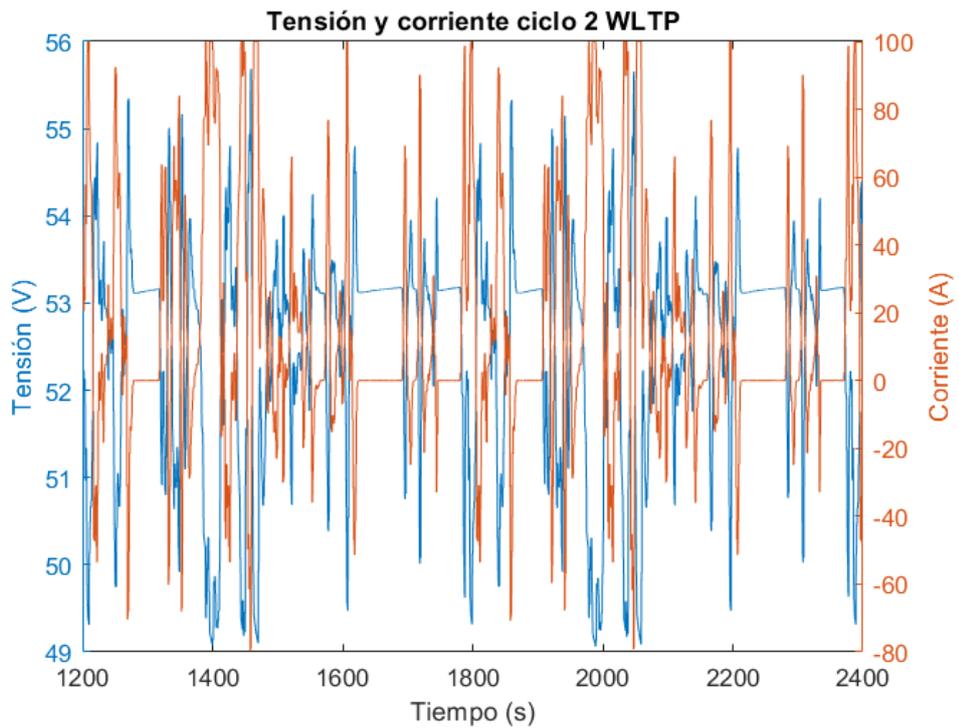


Figura B.10: Tensión y corriente durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

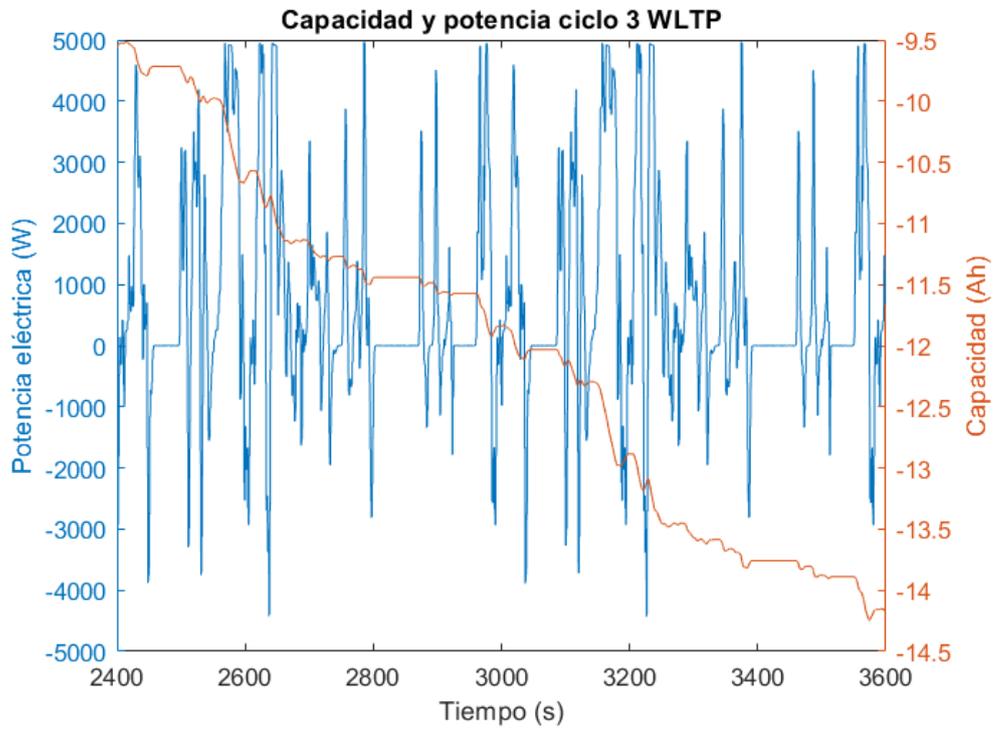


Figura B.11: Potencia y capacidad durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.

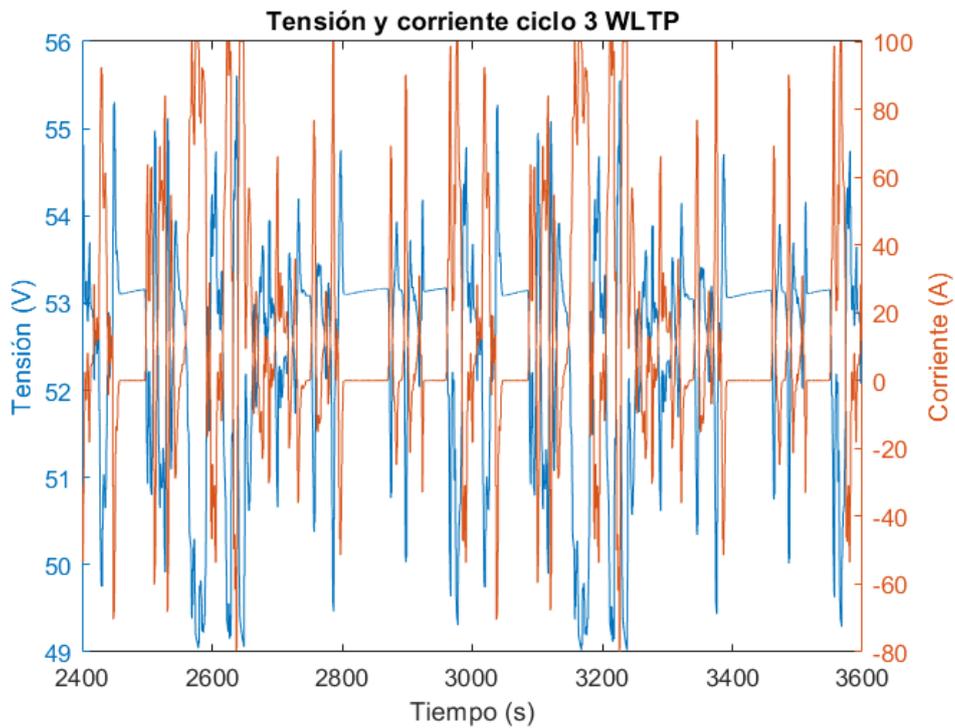


Figura B.12: Tensión y corriente durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

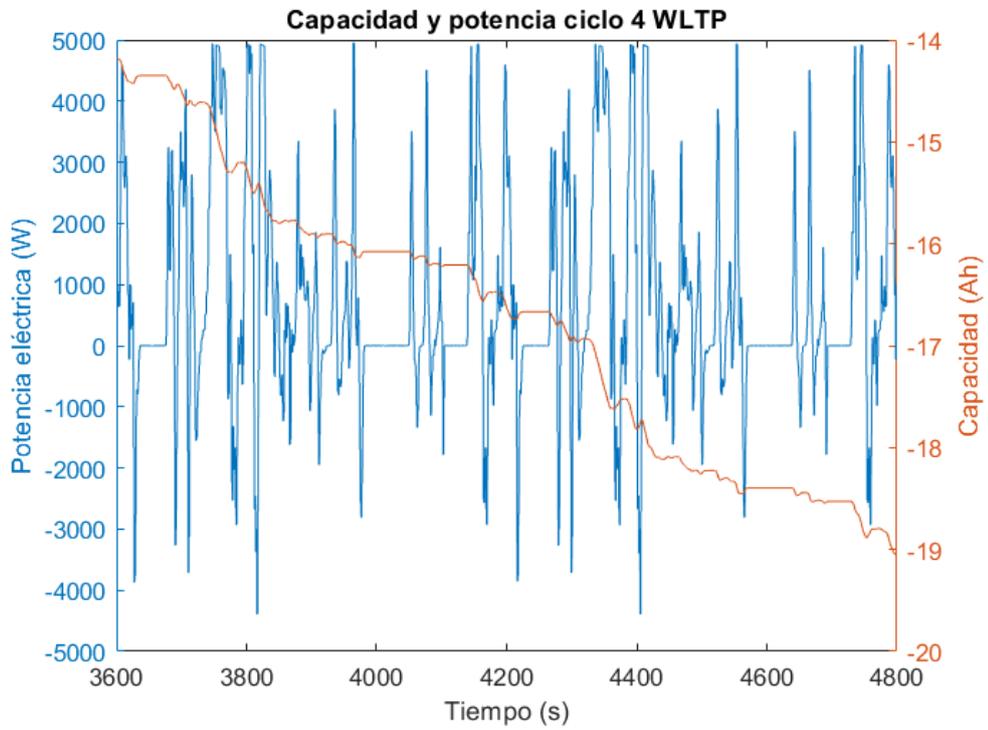


Figura B.13: Potencia y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.

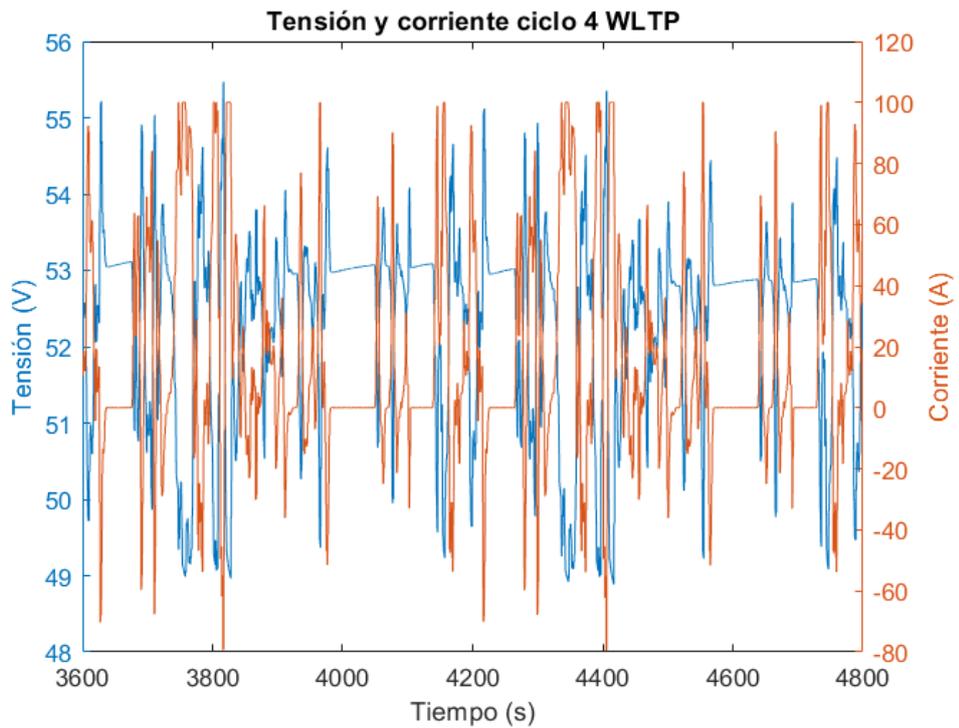


Figura B.14: Tensión y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

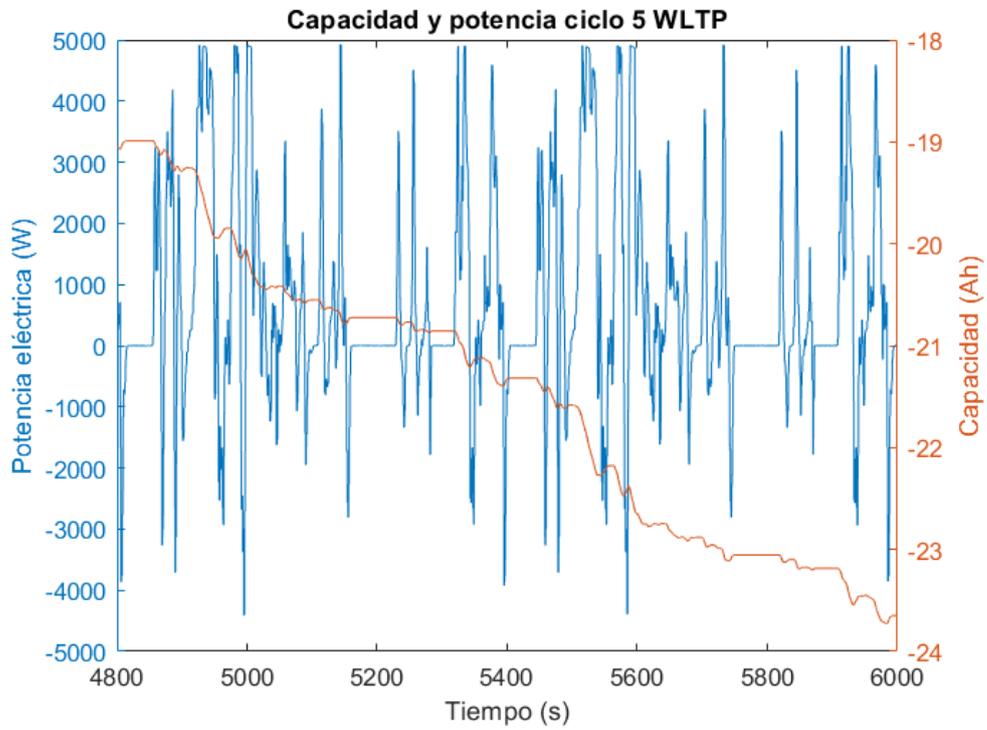


Figura B.15: Potencia y capacidad durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.

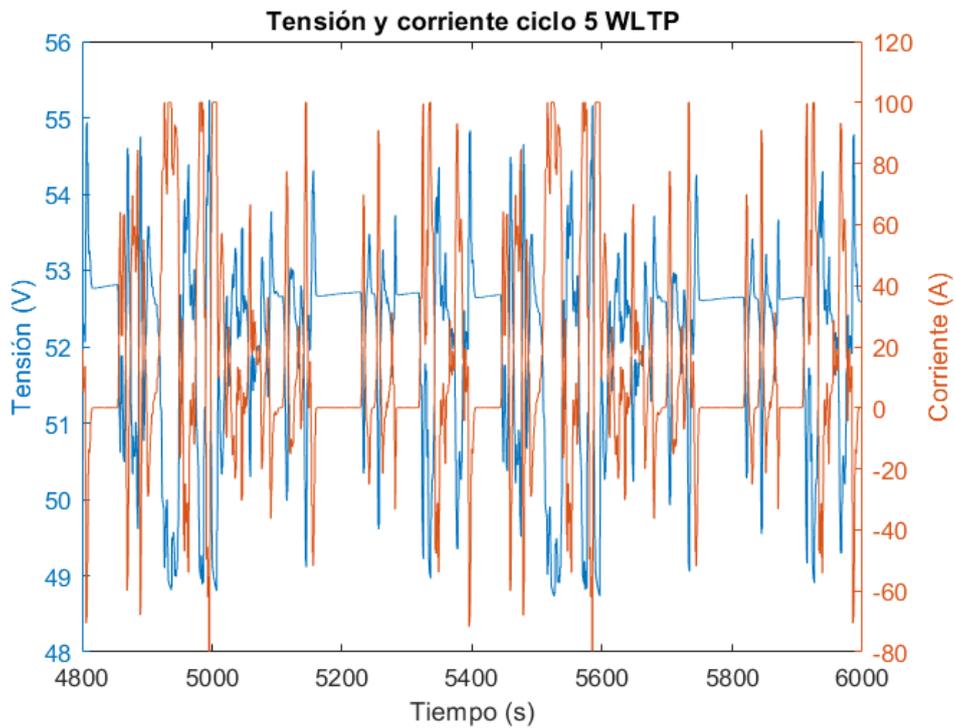


Figura B.16: Tensión y corriente durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

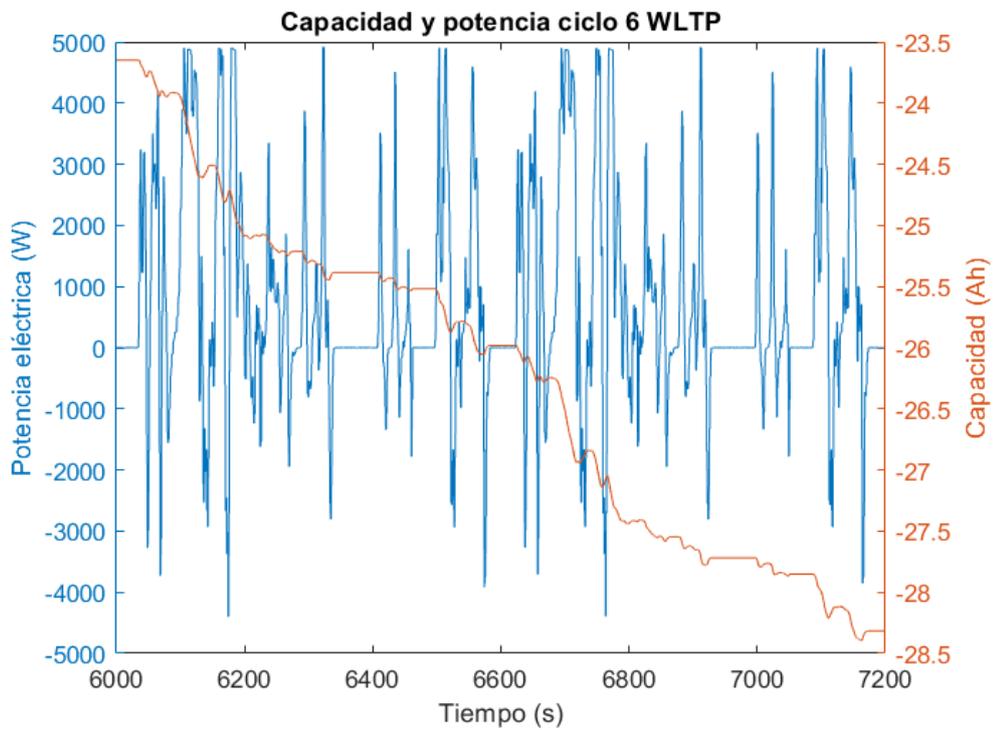


Figura B.17: Potencia y capacidad durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.

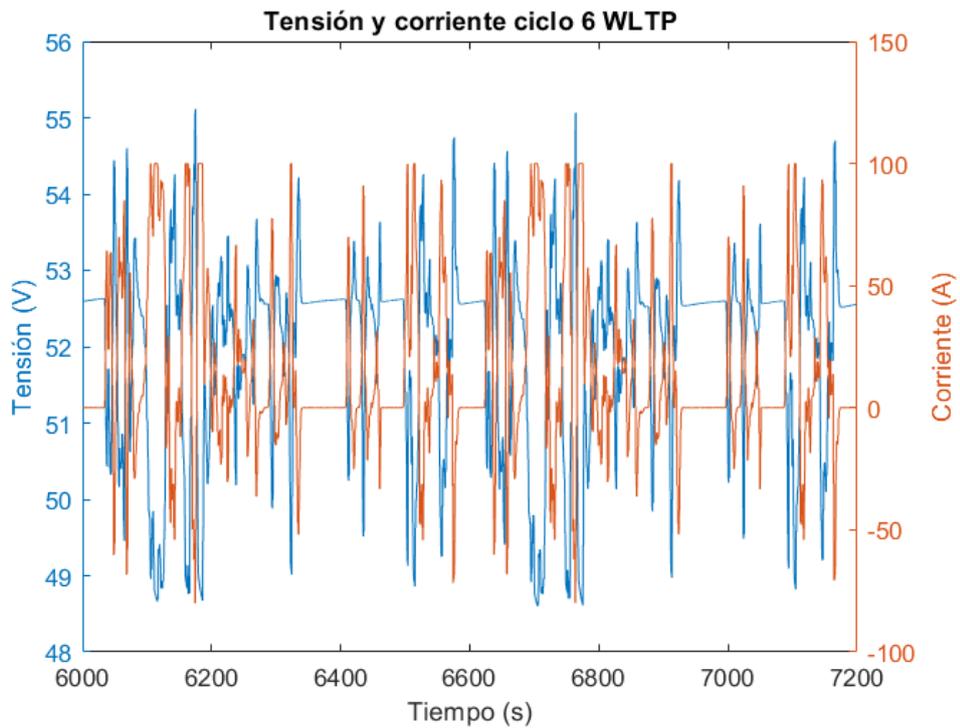


Figura B.18: Tensión y corriente durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

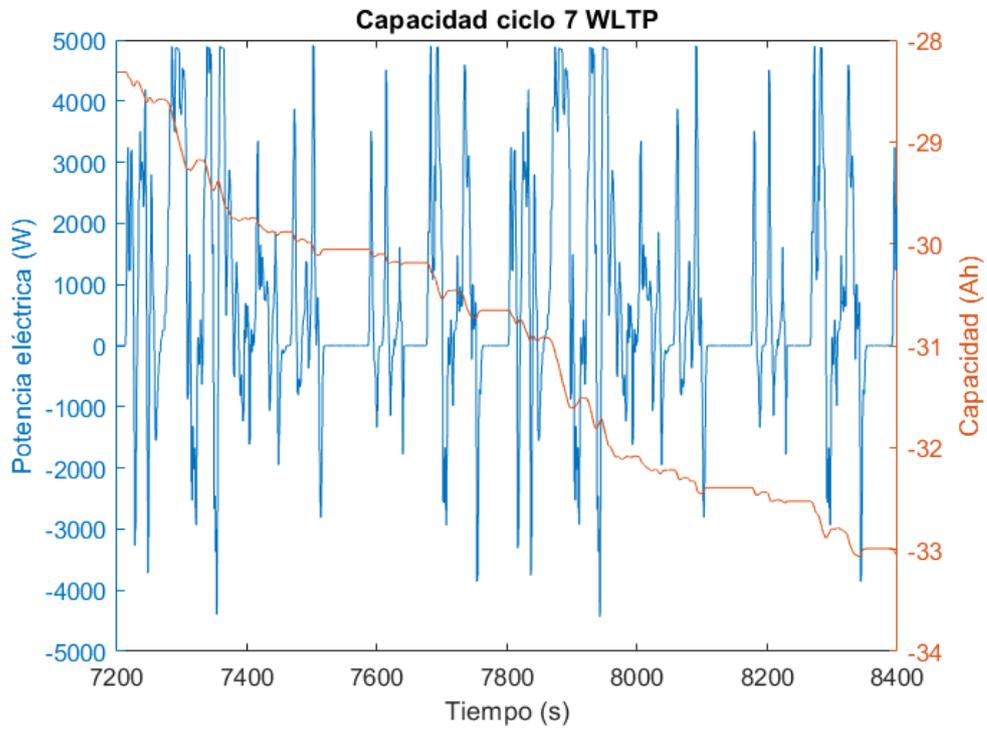


Figura B.19: Potencia y capacidad durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.

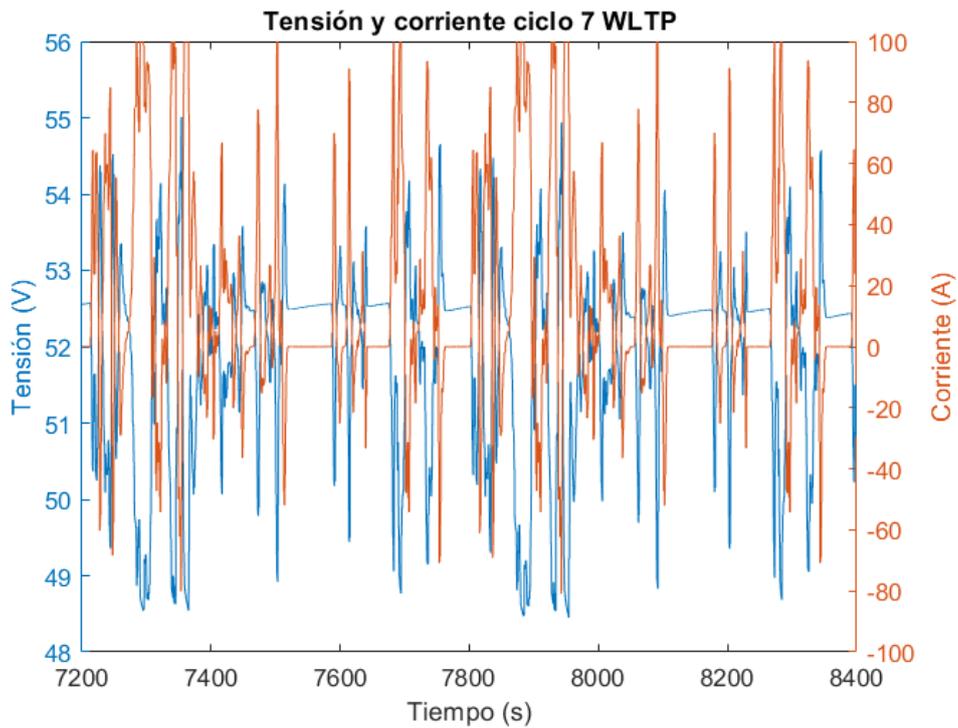


Figura B.20: Tensión y corriente durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

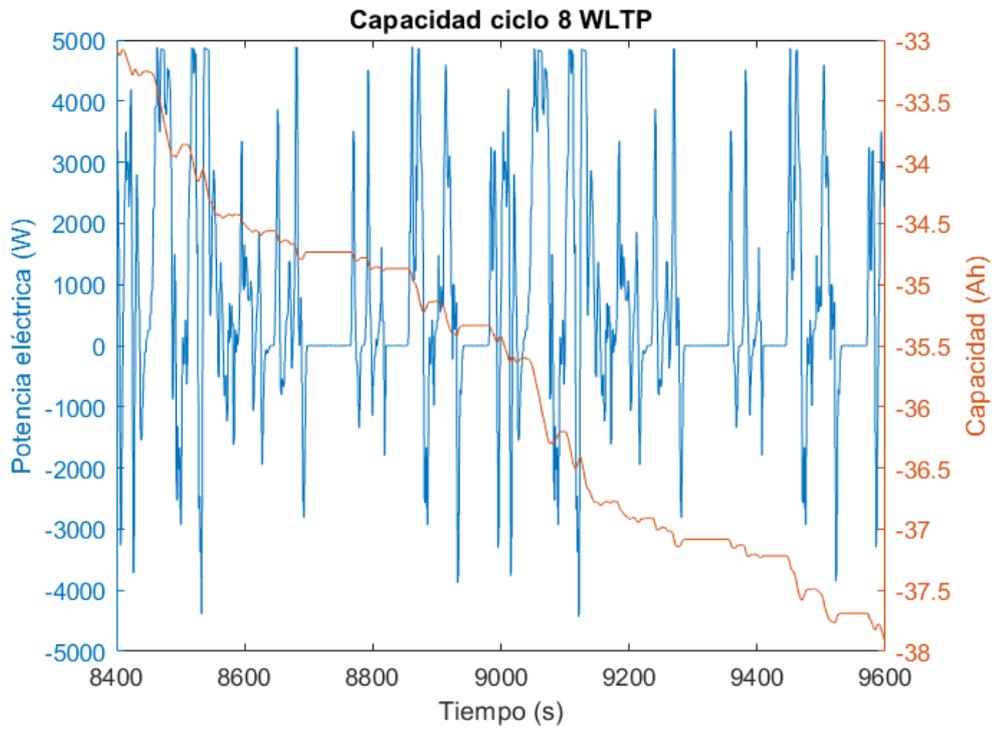


Figura B.21: Potencia y capacidad durante el ciclo 8 del ensayo WLTP.

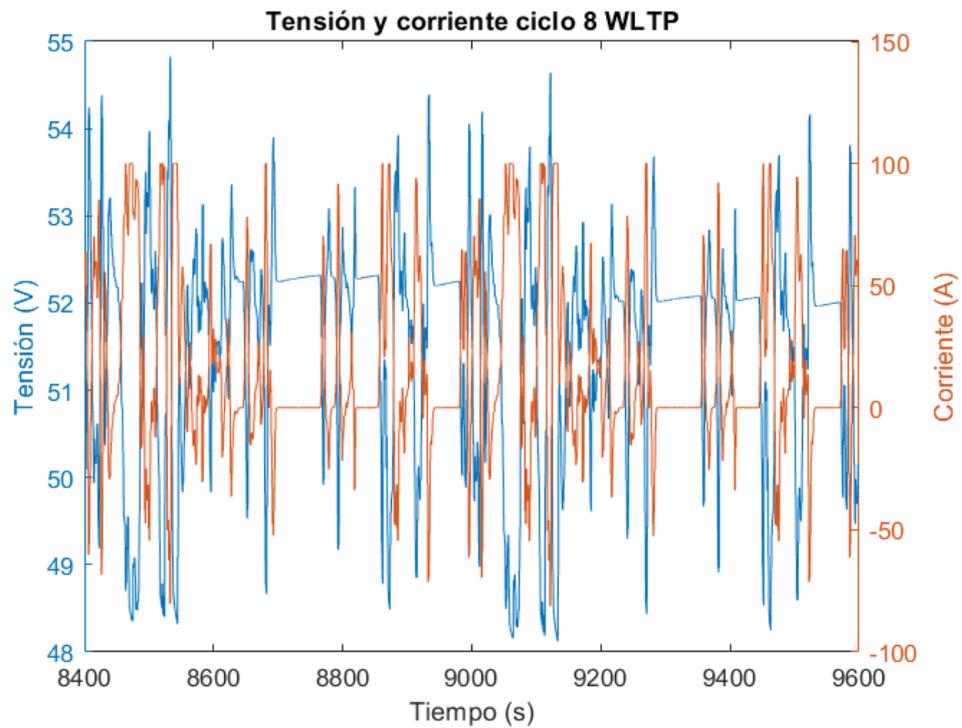


Figura B.22: Tensión y corriente durante el ciclo 8 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

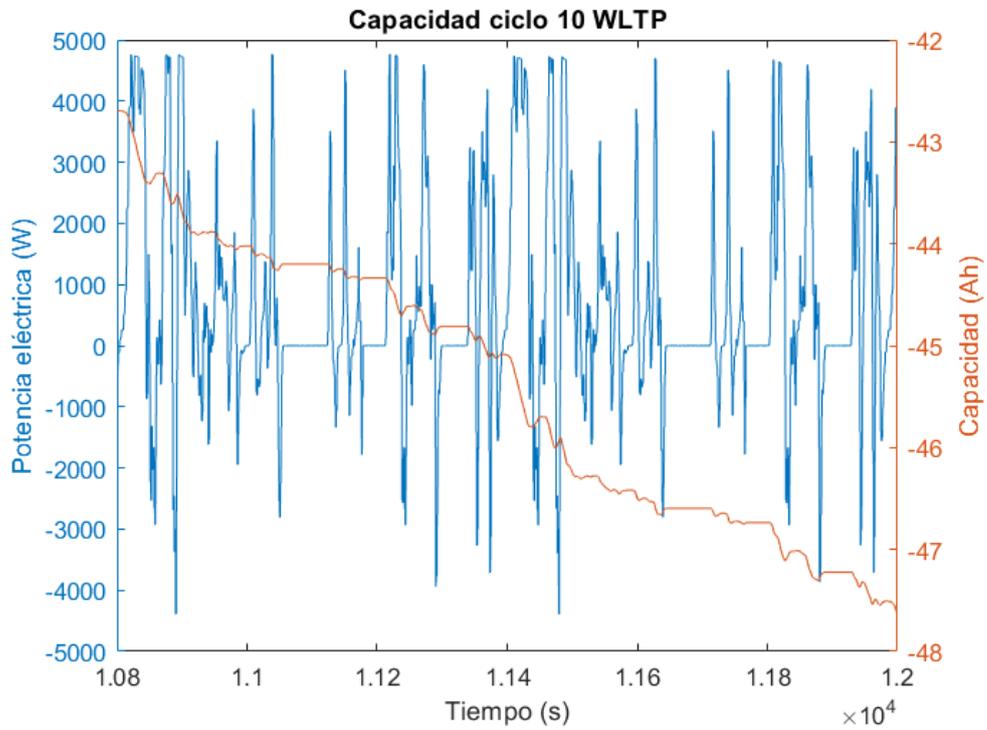


Figura B.23: Potencia y capacidad durante el ciclo 9 del ensayo WLTP.

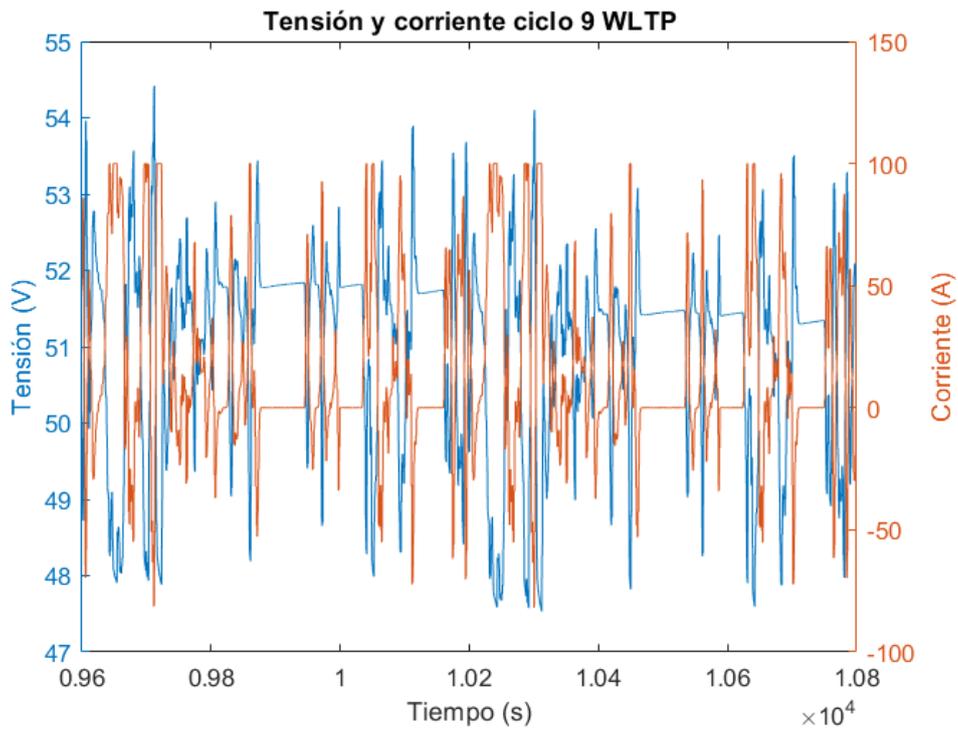


Figura B.24: Tensión y corriente durante el ciclo 9 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

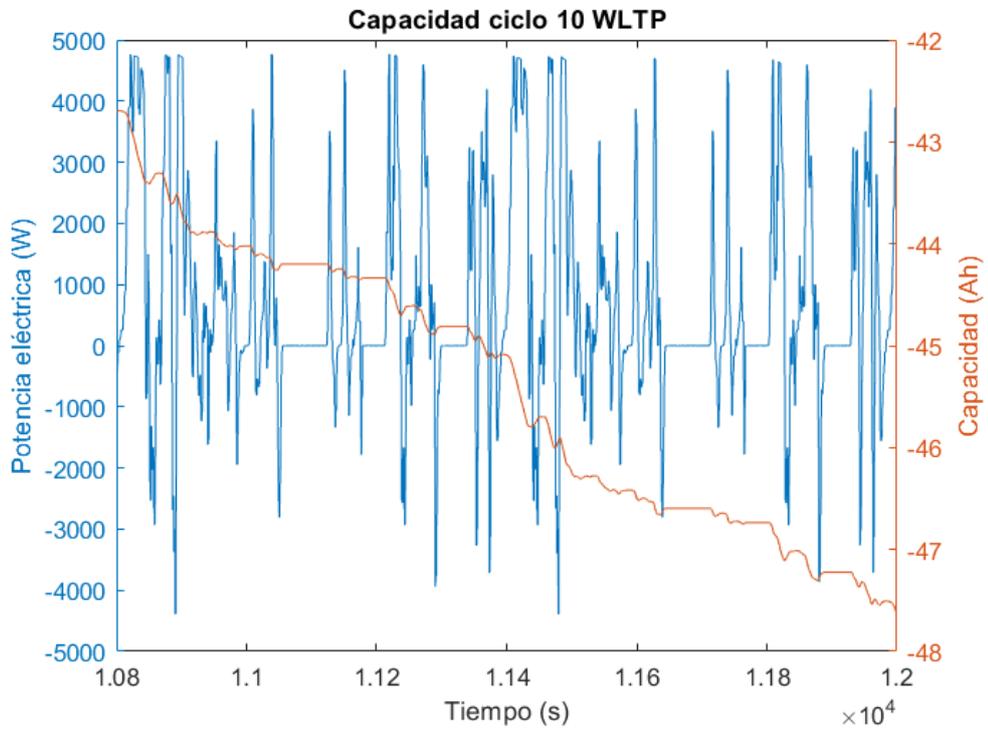


Figura B.25: Potencia y capacidad durante el ciclo 10 del ensayo WLTP.

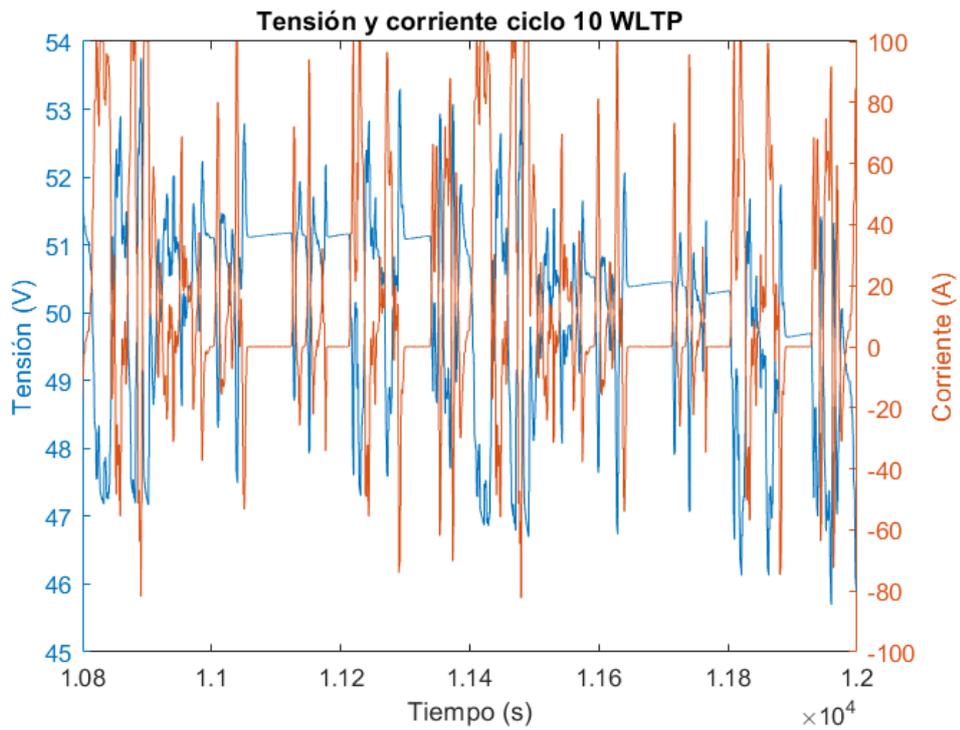


Figura B.26: Tensión y corriente durante el ciclo 10 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

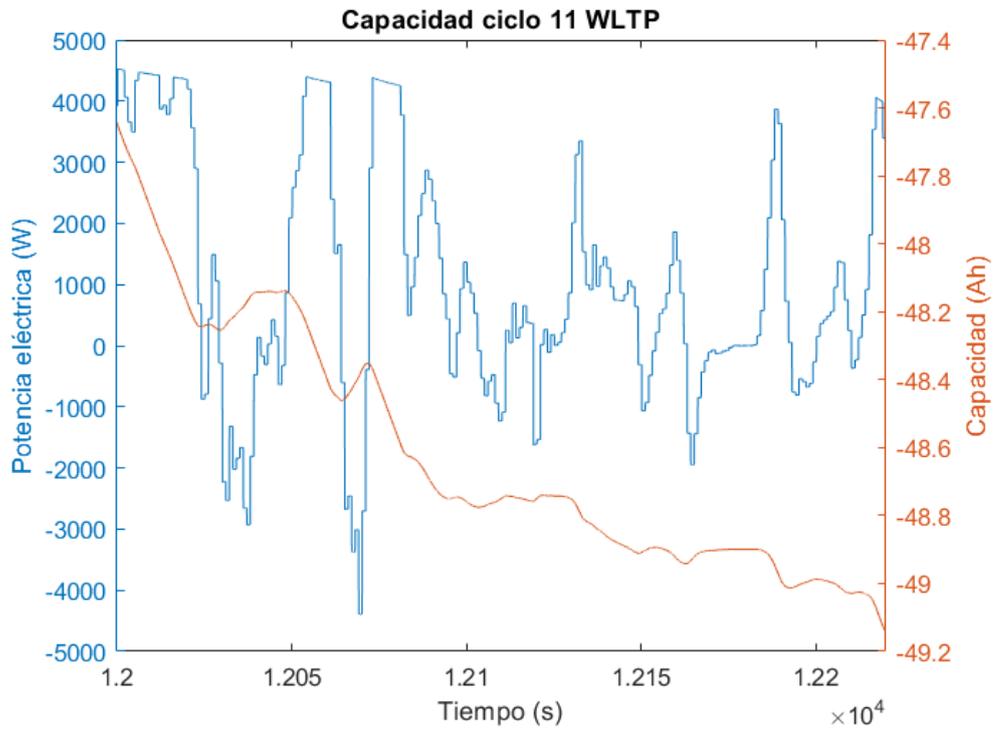


Figura B.27: Potencia y capacidad durante el ciclo 11 del ensayo WLTP.

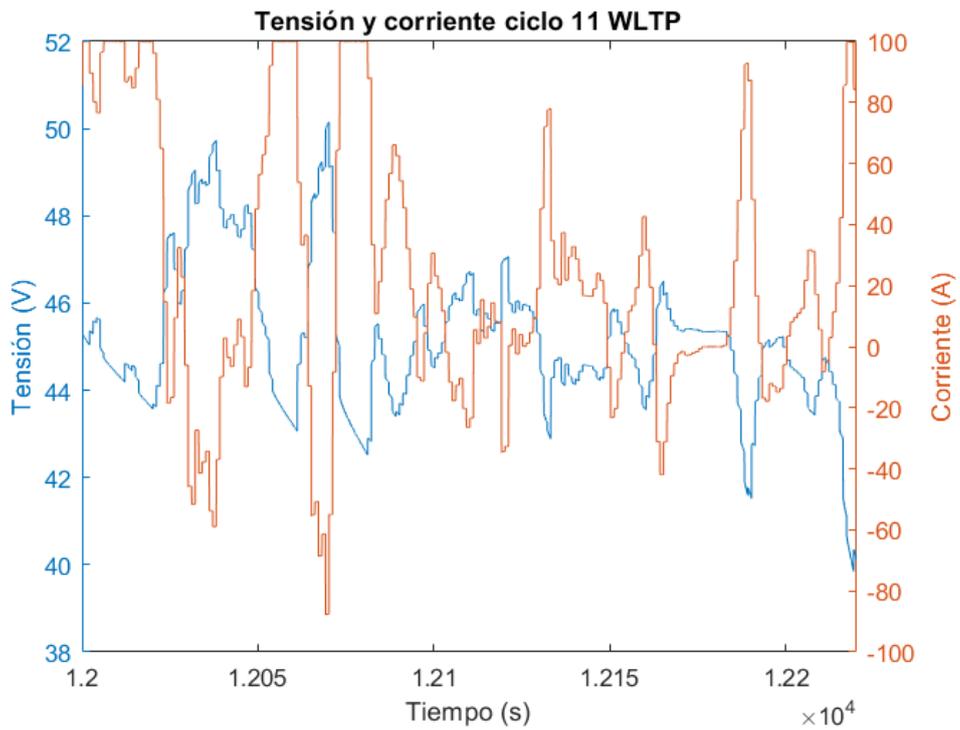


Figura B.28: Tensión y corriente durante el ciclo 11 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

B.4.2. Sin frenado regenerativo

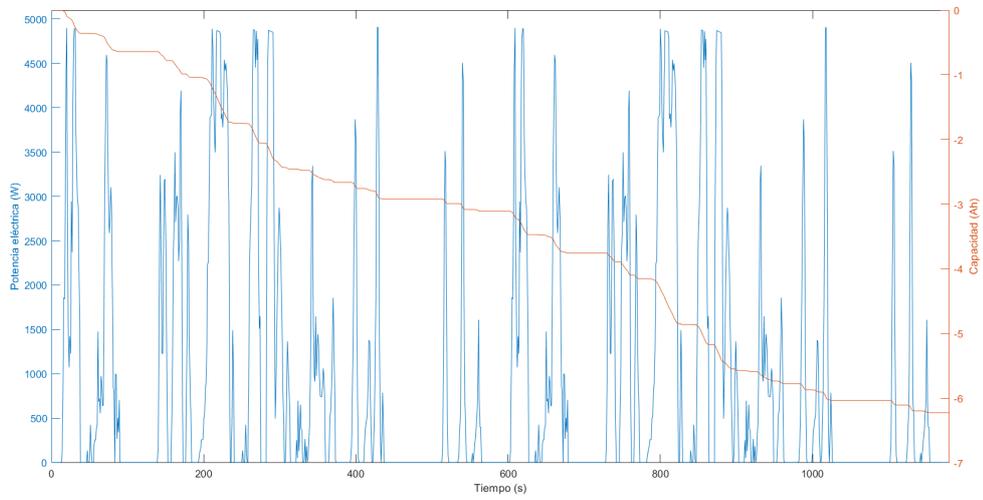


Figura B.29: Potencia y capacidad durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.

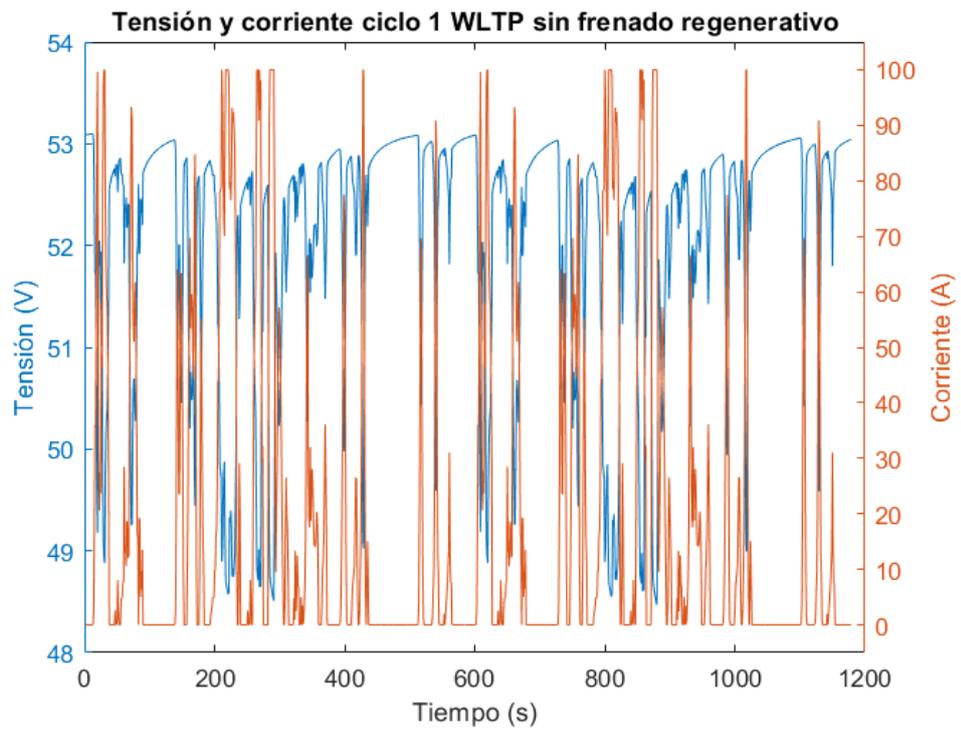


Figura B.30: Tensión y corriente durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

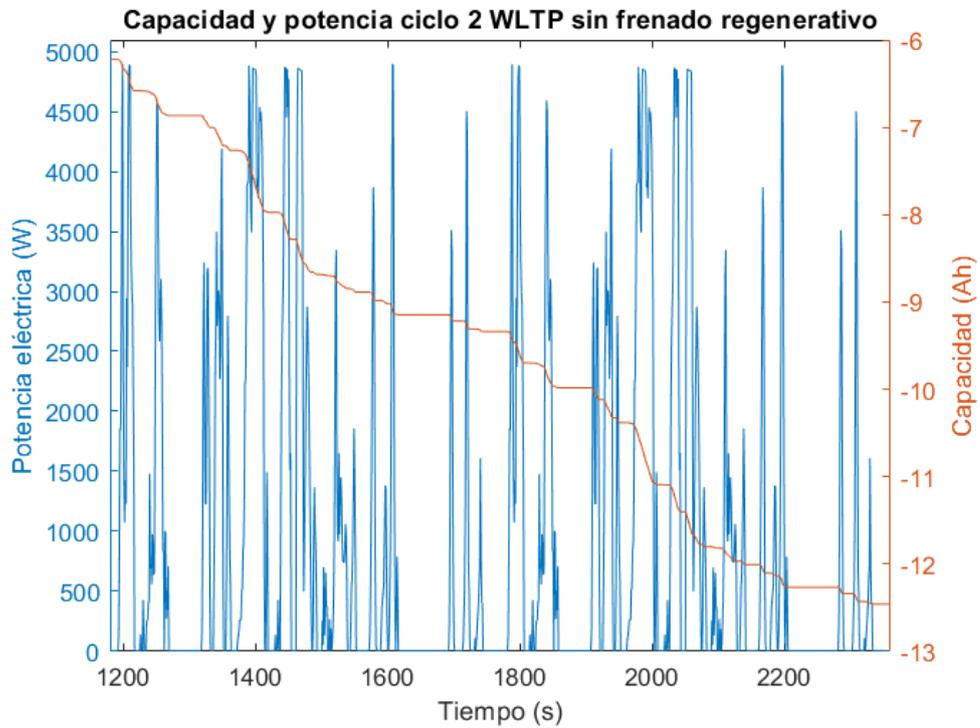


Figura B.31: Potencia y capacidad durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.

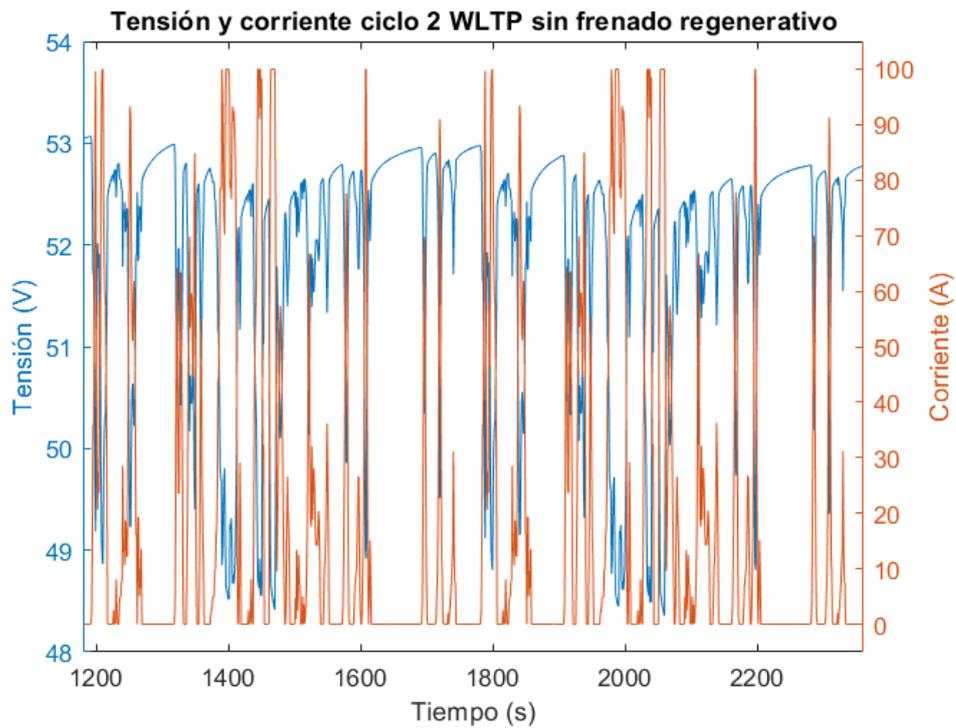


Figura B.32: Tensión y corriente durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

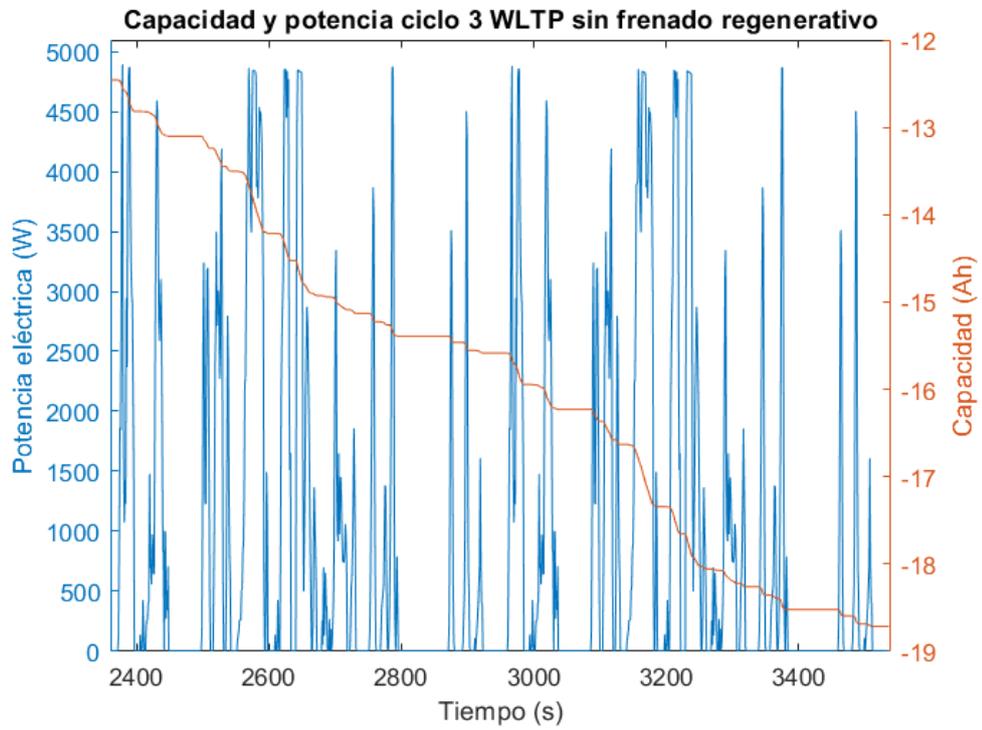


Figura B.33: Potencia y capacidad durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.

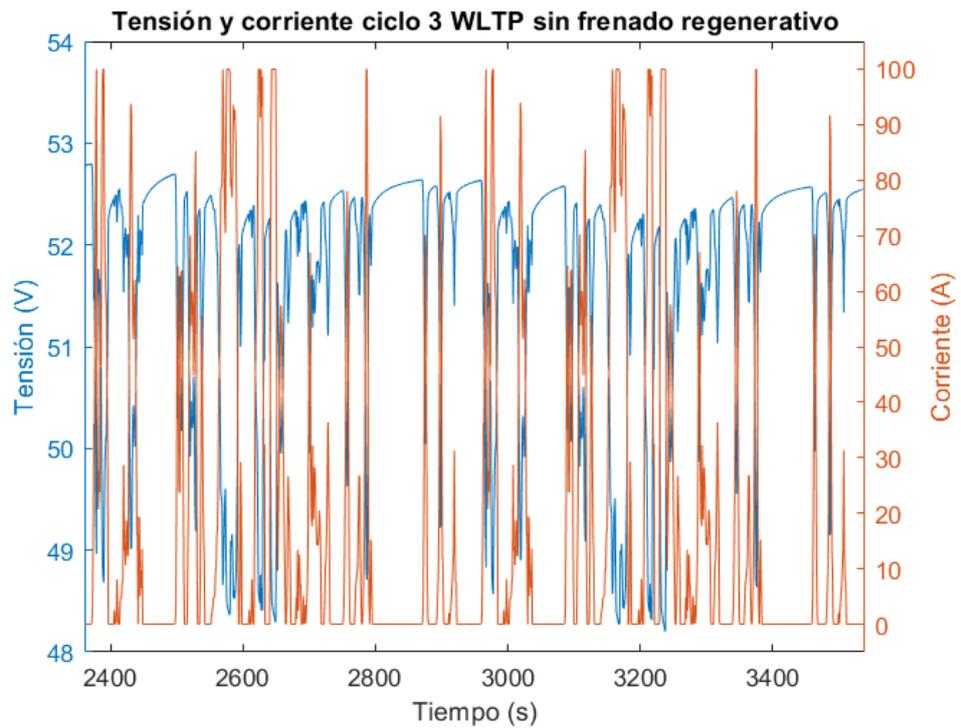


Figura B.34: Tensión y corriente durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

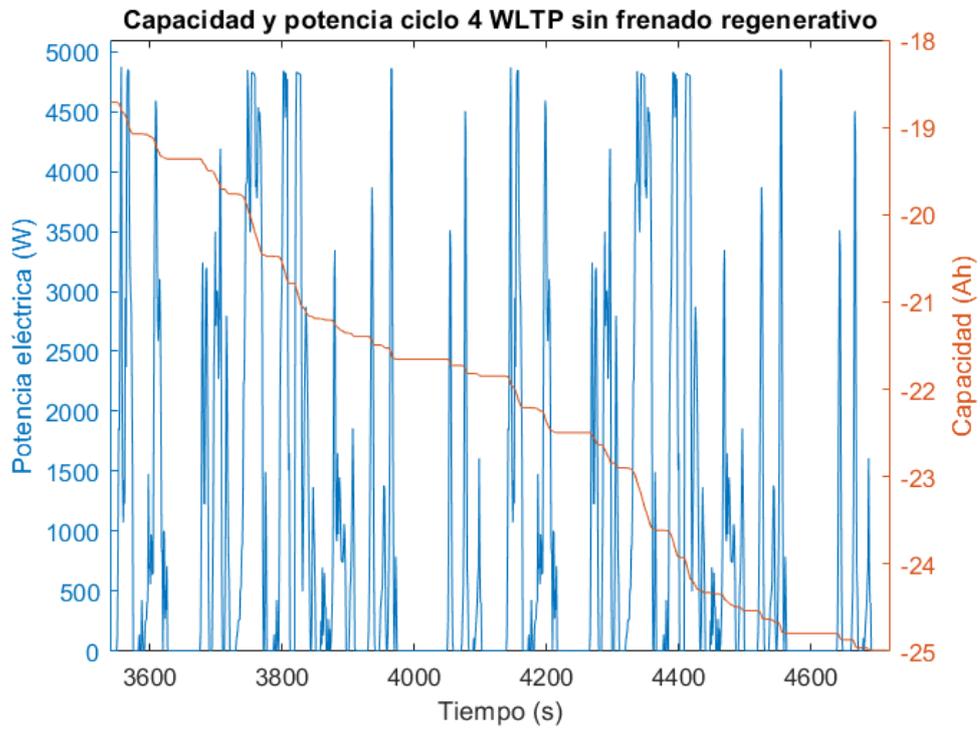


Figura B.35: Potencia y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.

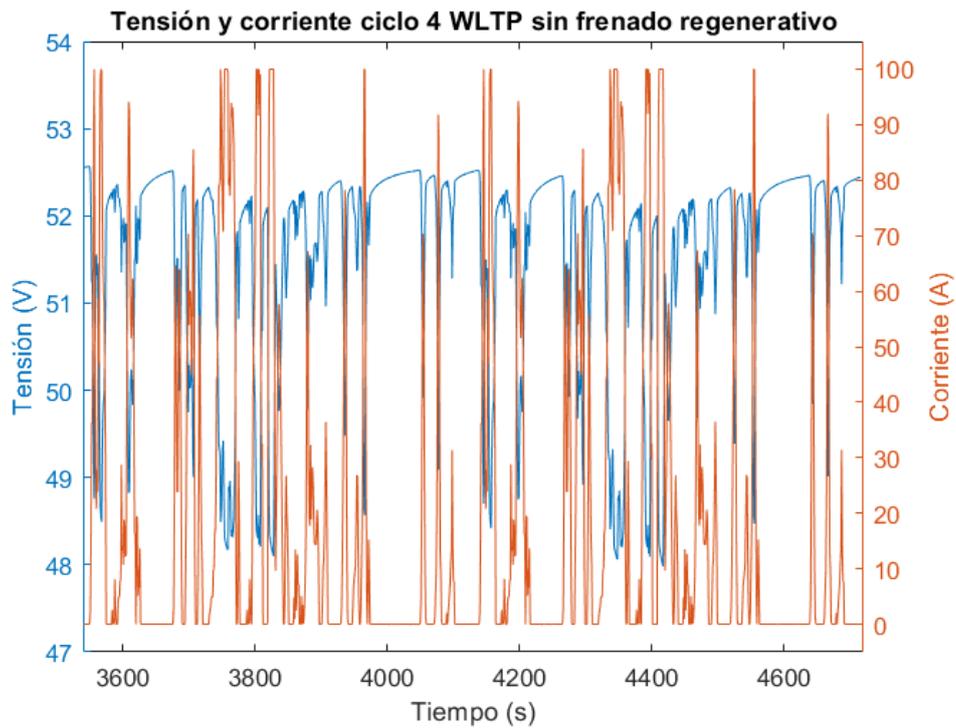


Figura B.36: Tensión y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

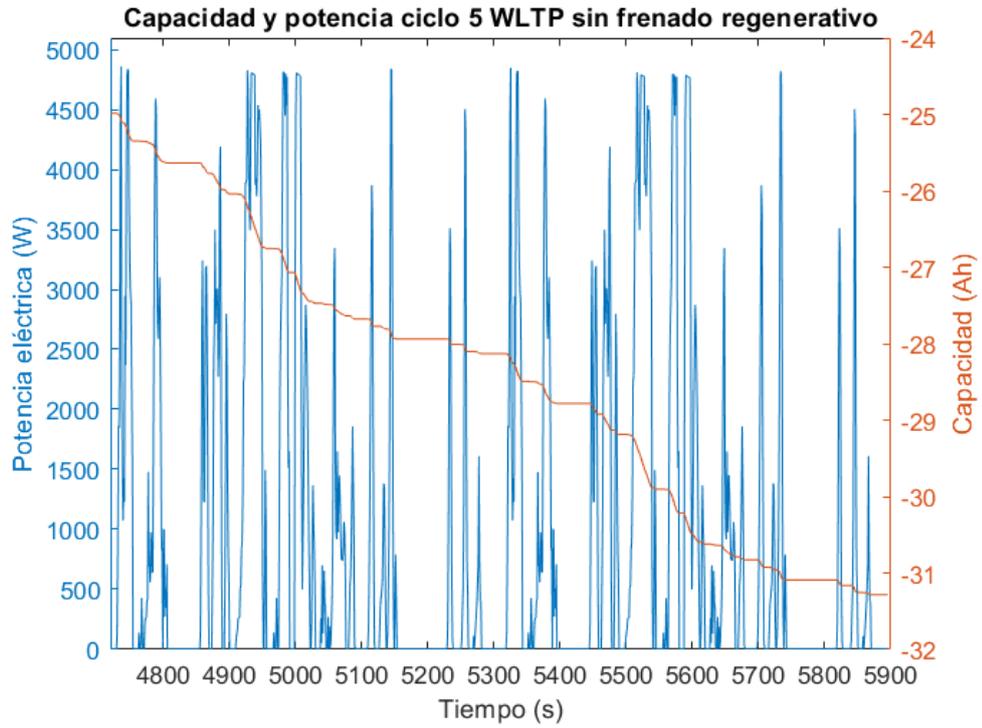


Figura B.37: Potencia y capacidad durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.

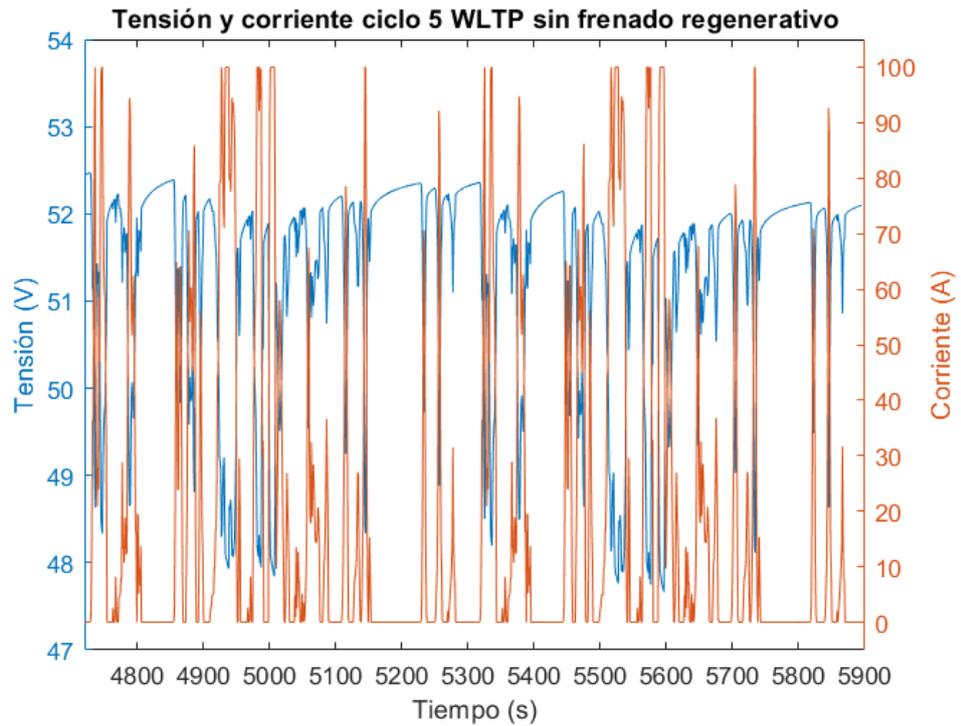


Figura B.38: Tensión y corriente durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.

B.4. Ensayo de estimación de autonomía (WLTP)

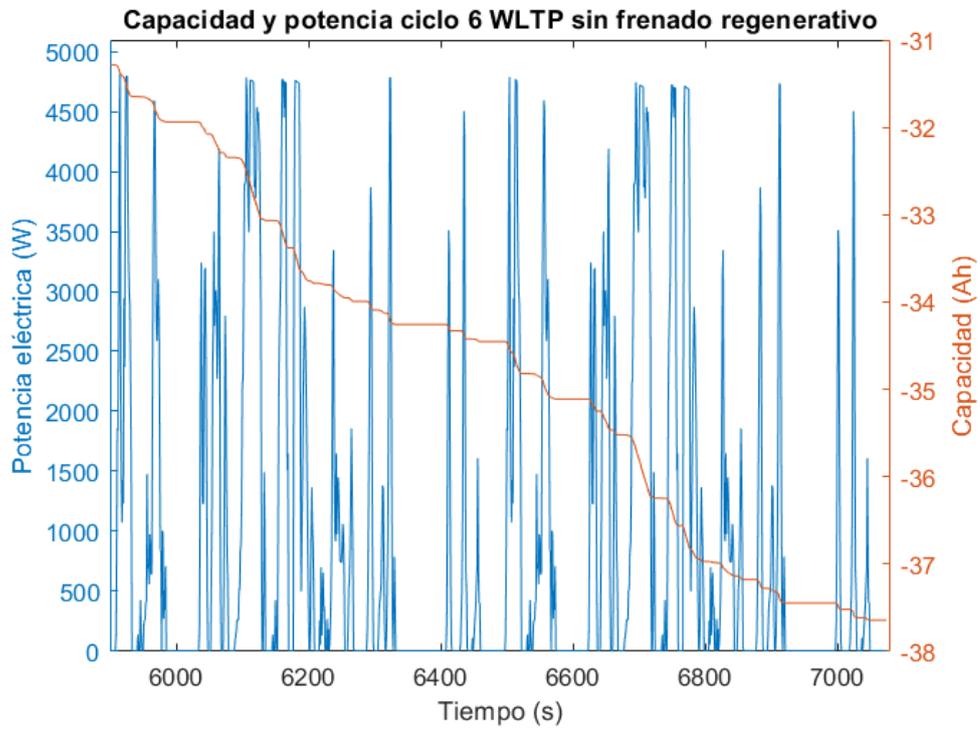


Figura B.39: Potencia y capacidad durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.

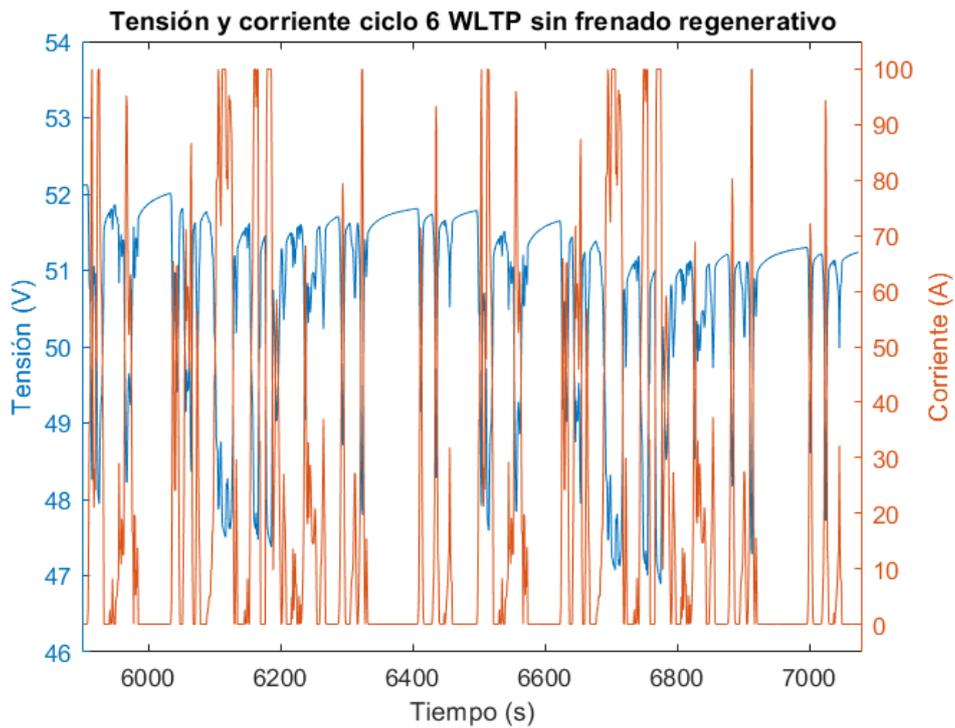


Figura B.40: Tensión y corriente durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.

Apéndice B. Ensayos realizados al banco de baterías

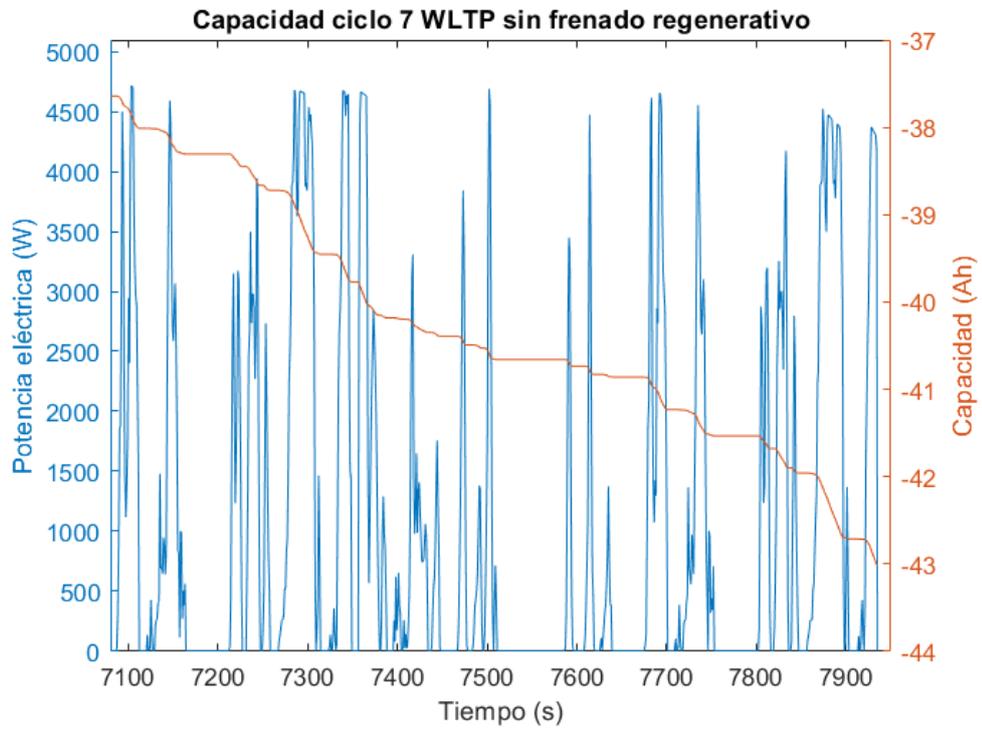


Figura B.41: Potencia y capacidad durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.

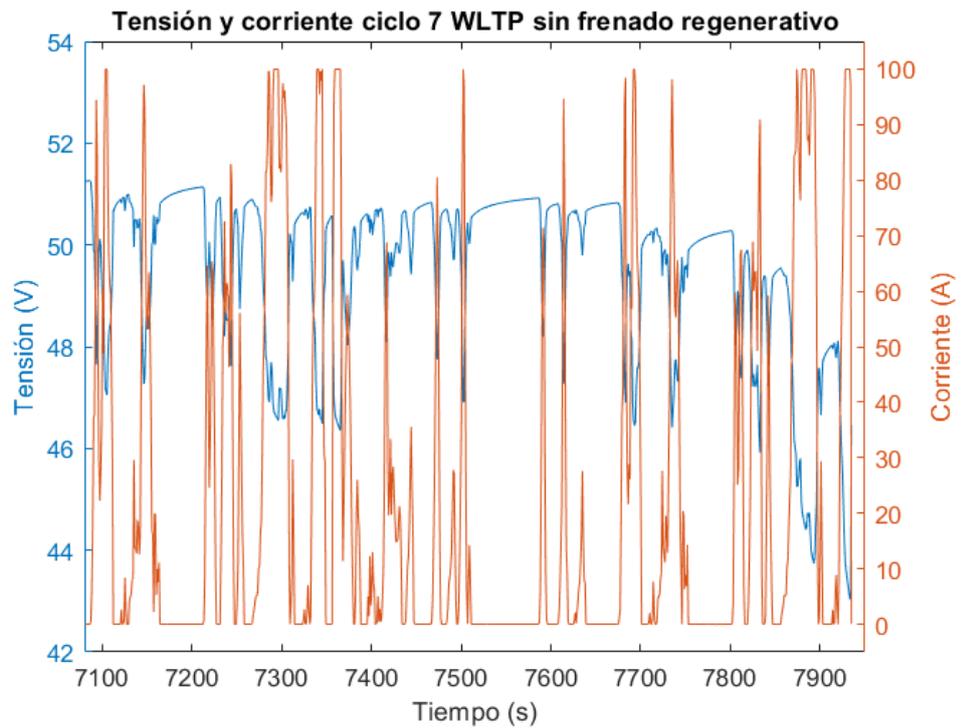


Figura B.42: Tensión y corriente durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.

Apéndice C

Construcción del banco

C.1. Piezas y partes que componen el gabinete

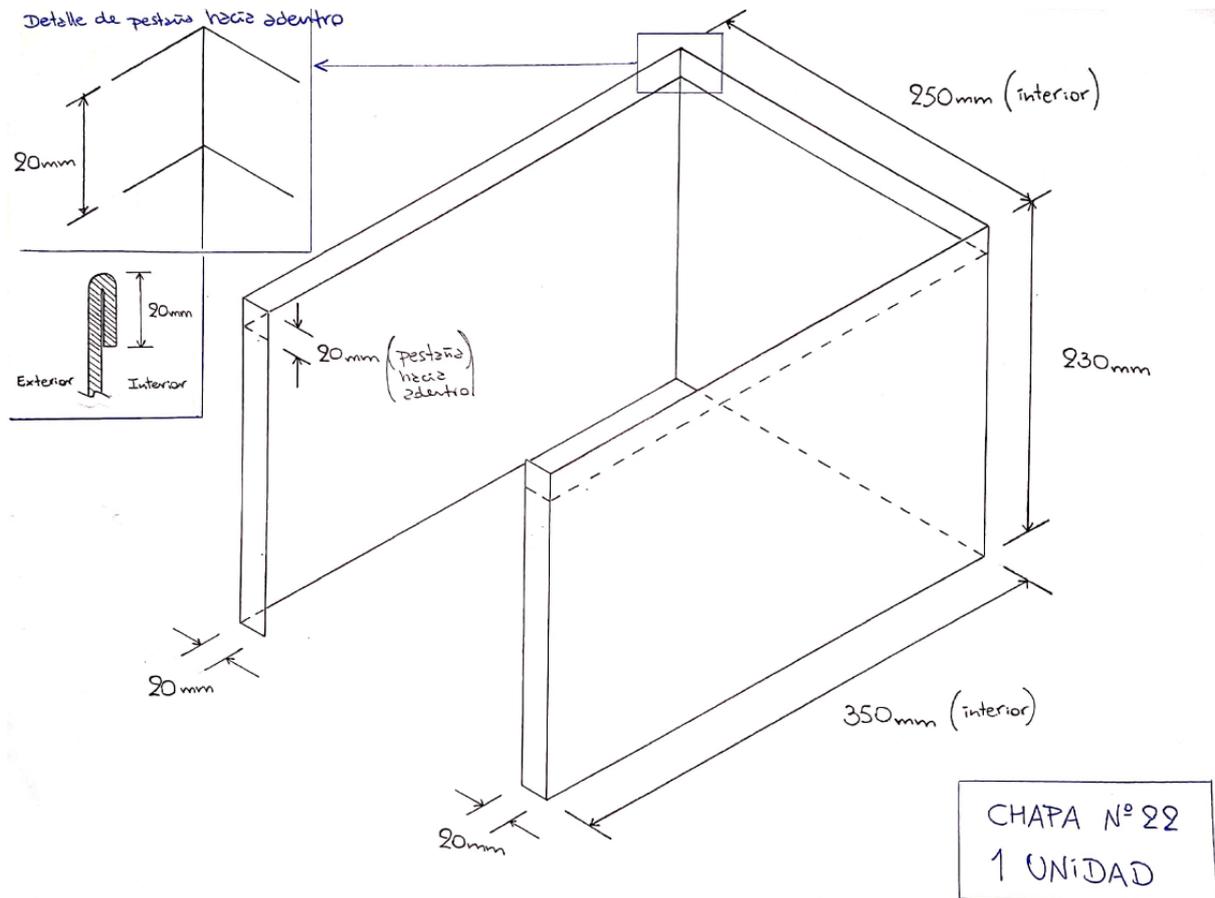


Figura C.1: Cuerpo general del gabinete.

Apéndice C. Construcción del banco

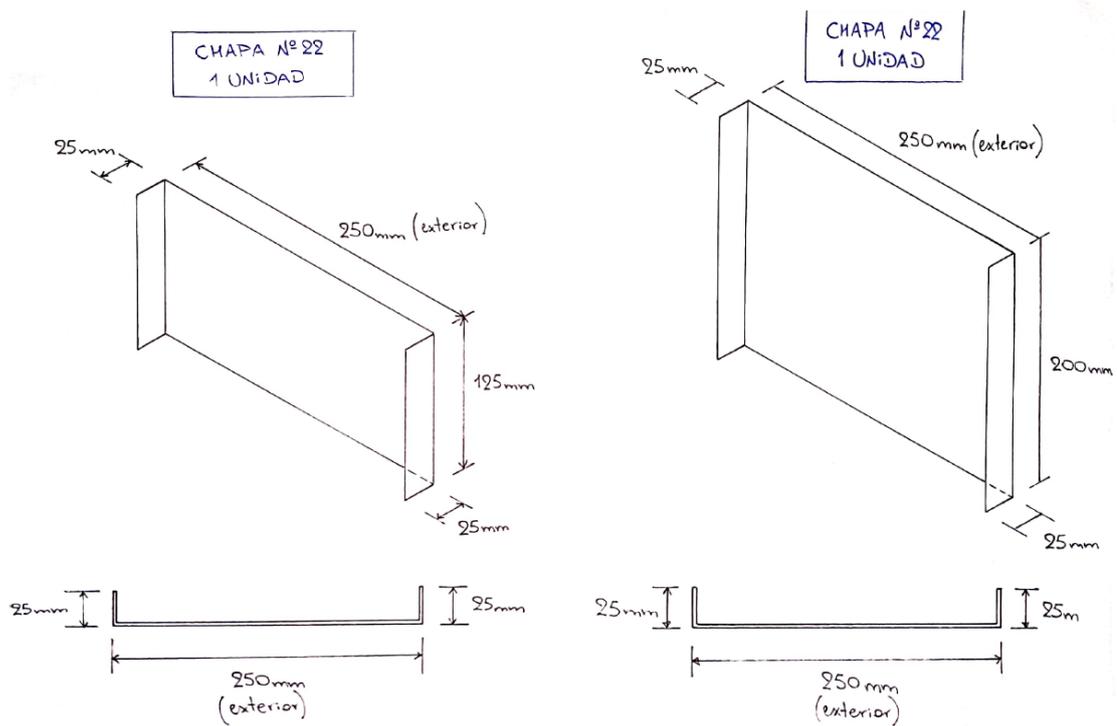


Figura C.2: Izquierda: tabique divisor de cavidad BMS. Derecha: tabique divisor de cavidad celdas.

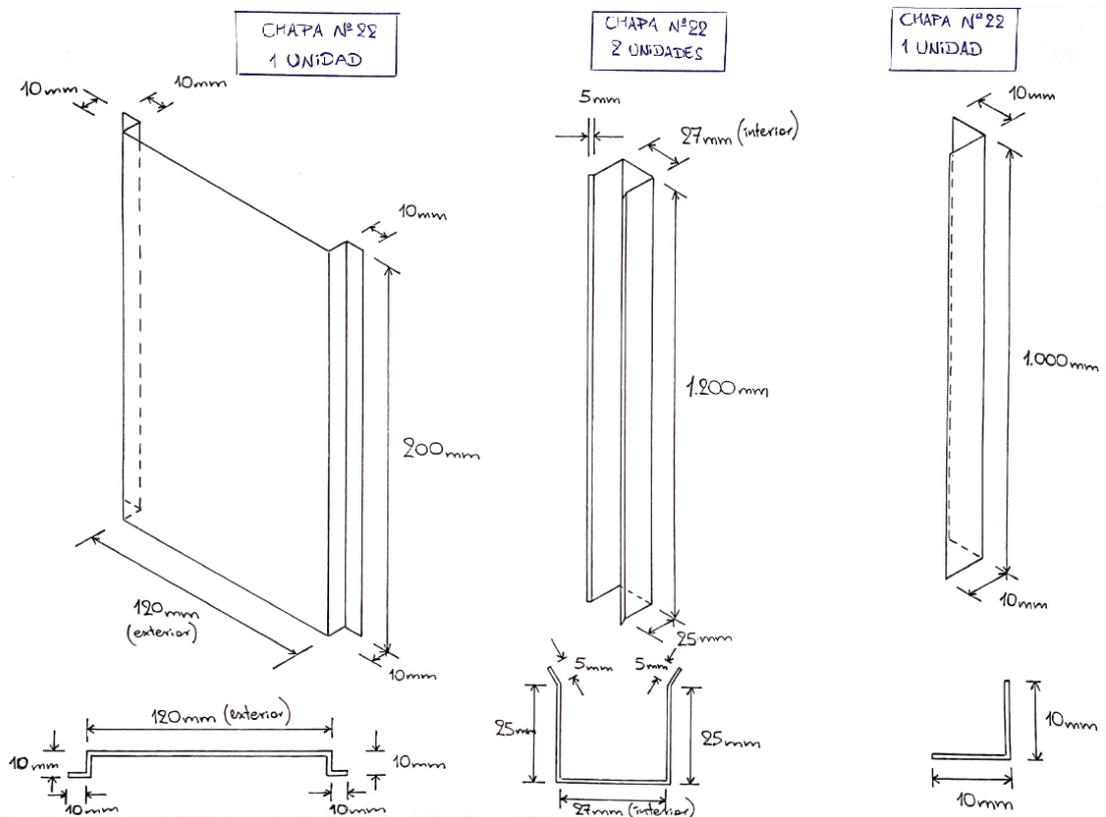


Figura C.3: De izquierda a derecha: zócalo para BMS, perfil "U" de sujeción de celdas y ángulo "L" de apoyo de celdas.

C.1. Piezas y partes que componen el gabinete

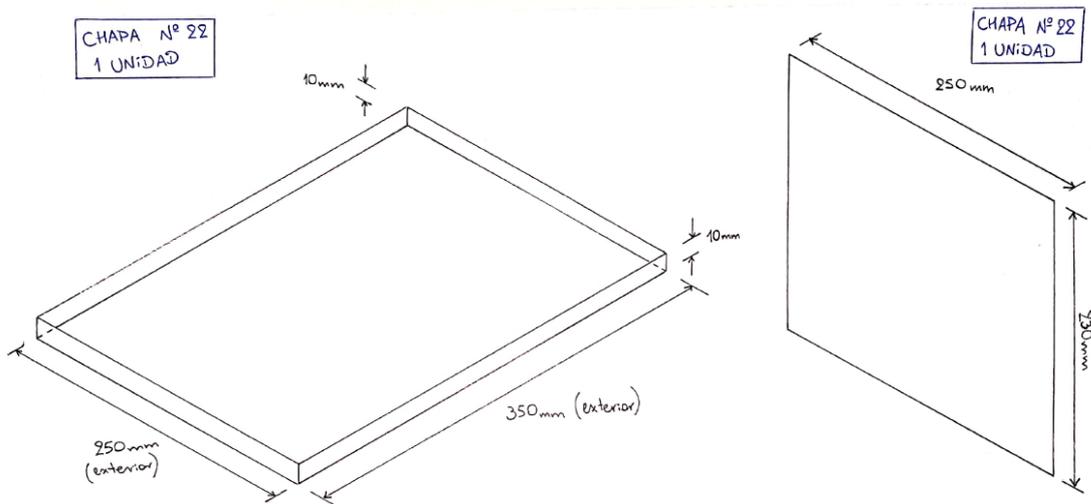


Figura C.4: Izquierda: fondo de gabinete. Derecha: tapa lateral de acceso a la cavidad BMS.

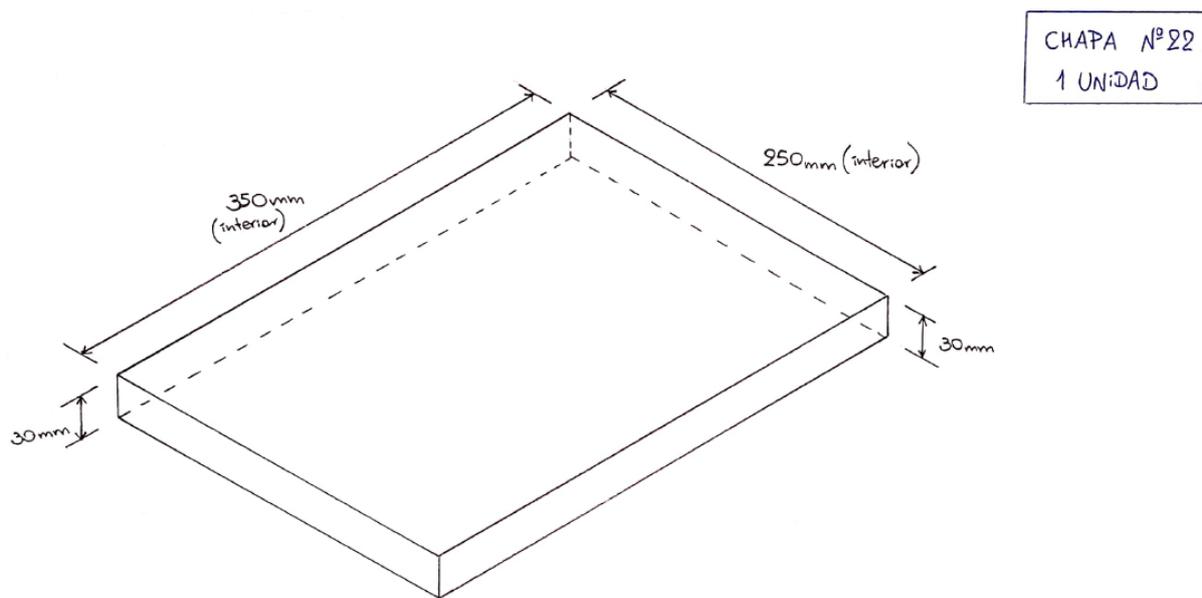


Figura C.5: Tapa superior.

Apéndice C. Construcción del banco

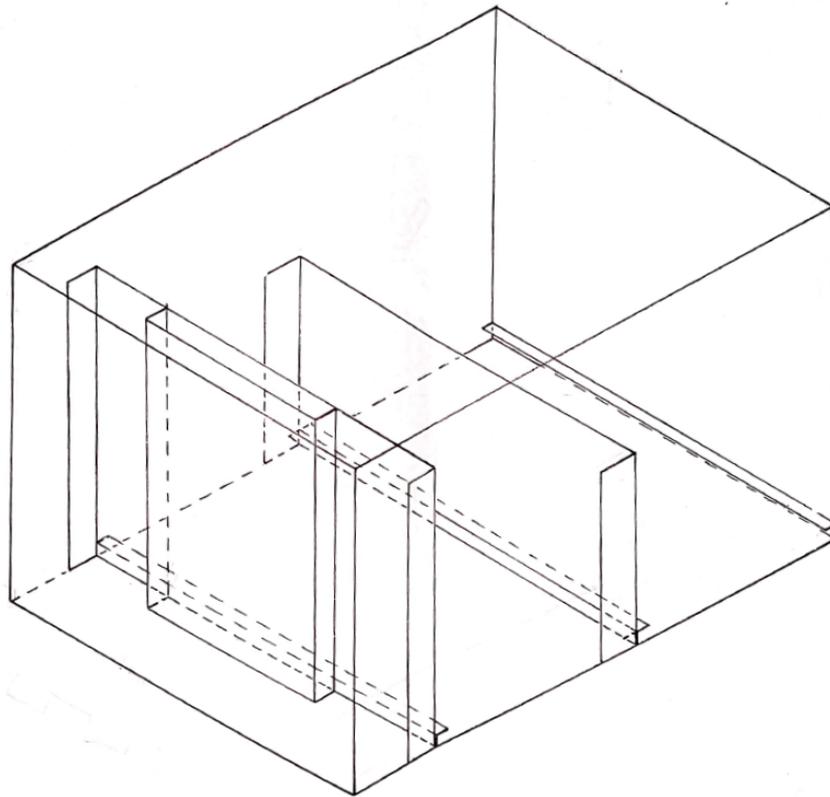


Figura C.6: Vista general de piezas en dentro del gabinete.

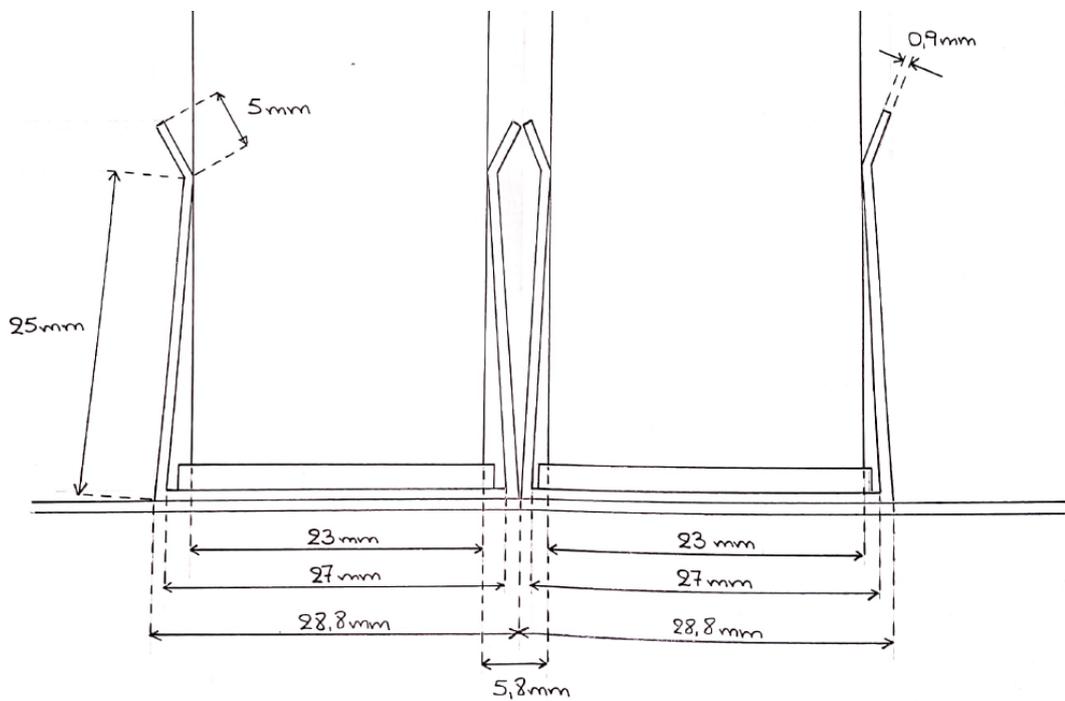


Figura C.7: Vista superior del sistema de sujeción de celdas mediante pinzas "U".

C.2. Fabricación de piezas

Las piezas se fabricaron en chapa de hierro N° 22.



Figura C.8: Cuerpo general del gabinete en chapa.



Figura C.9: Fondo del gabinete en chapa.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.10: Tapa superior en chapa.



Figura C.11: Perfil "U" con el que se construyen las pinzas de sujeción de celdas.

C.2. Fabricación de piezas

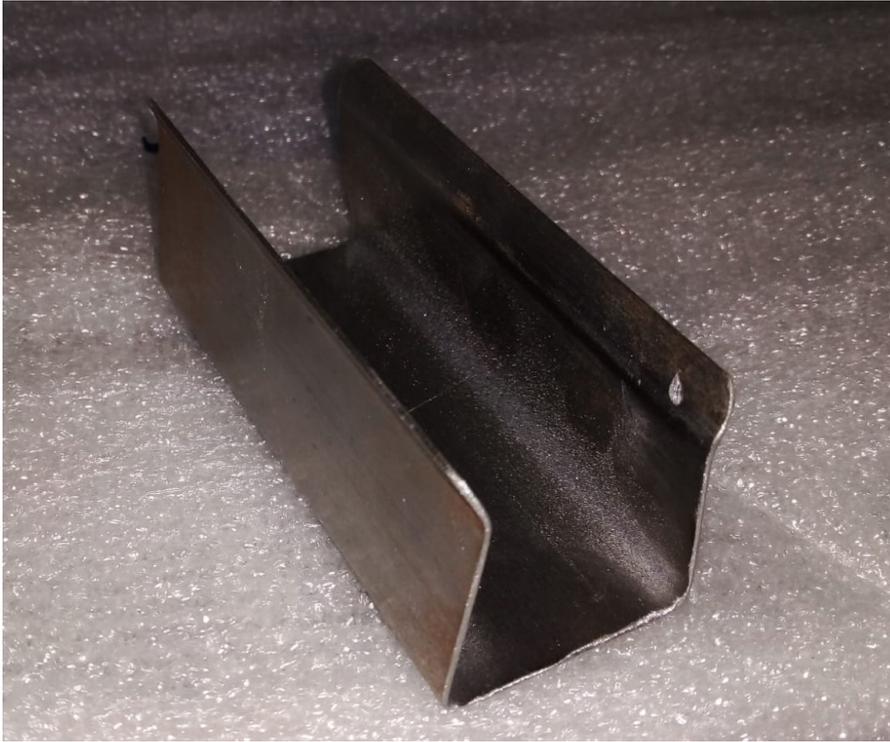


Figura C.12: Pinza "U" de sujeción de celdas que se obtiene cortando el perfil de la Figura C.11 cada 7,5 cm.



Figura C.13: Tapa lateral de acceso a la cavidad BMS.

Apéndice C. Construcción del banco

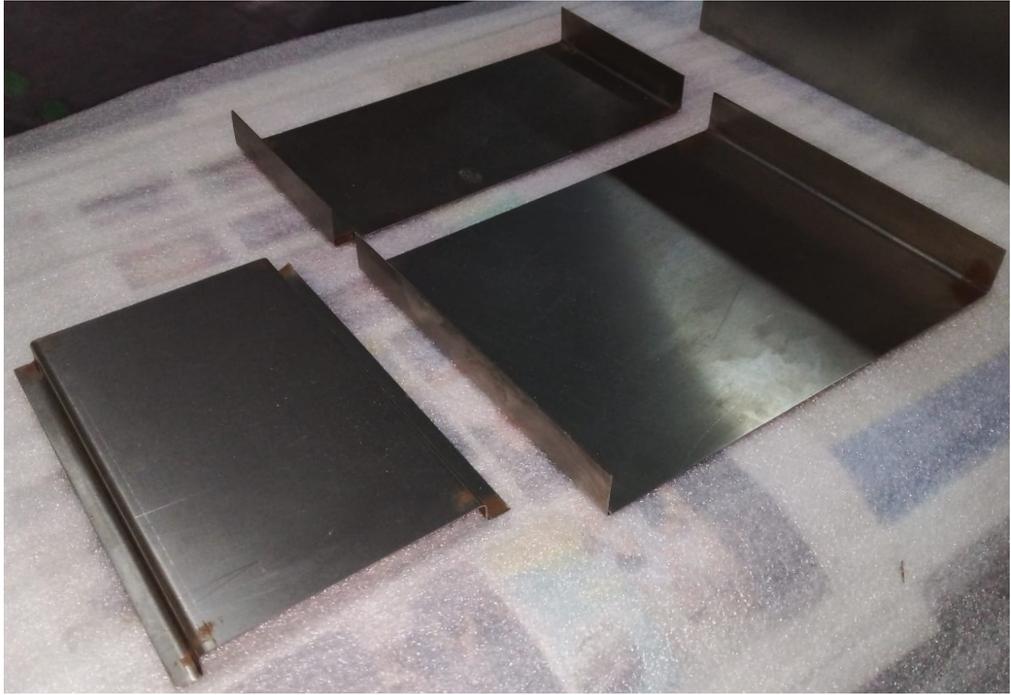


Figura C.14: Tabiques separadores y zócalo del BMS.

C.3. Ensamblado del gabinete

Las piezas del gabinete se soldaron mediante soldadura de punto como la que se muestra en la Figura C.15.

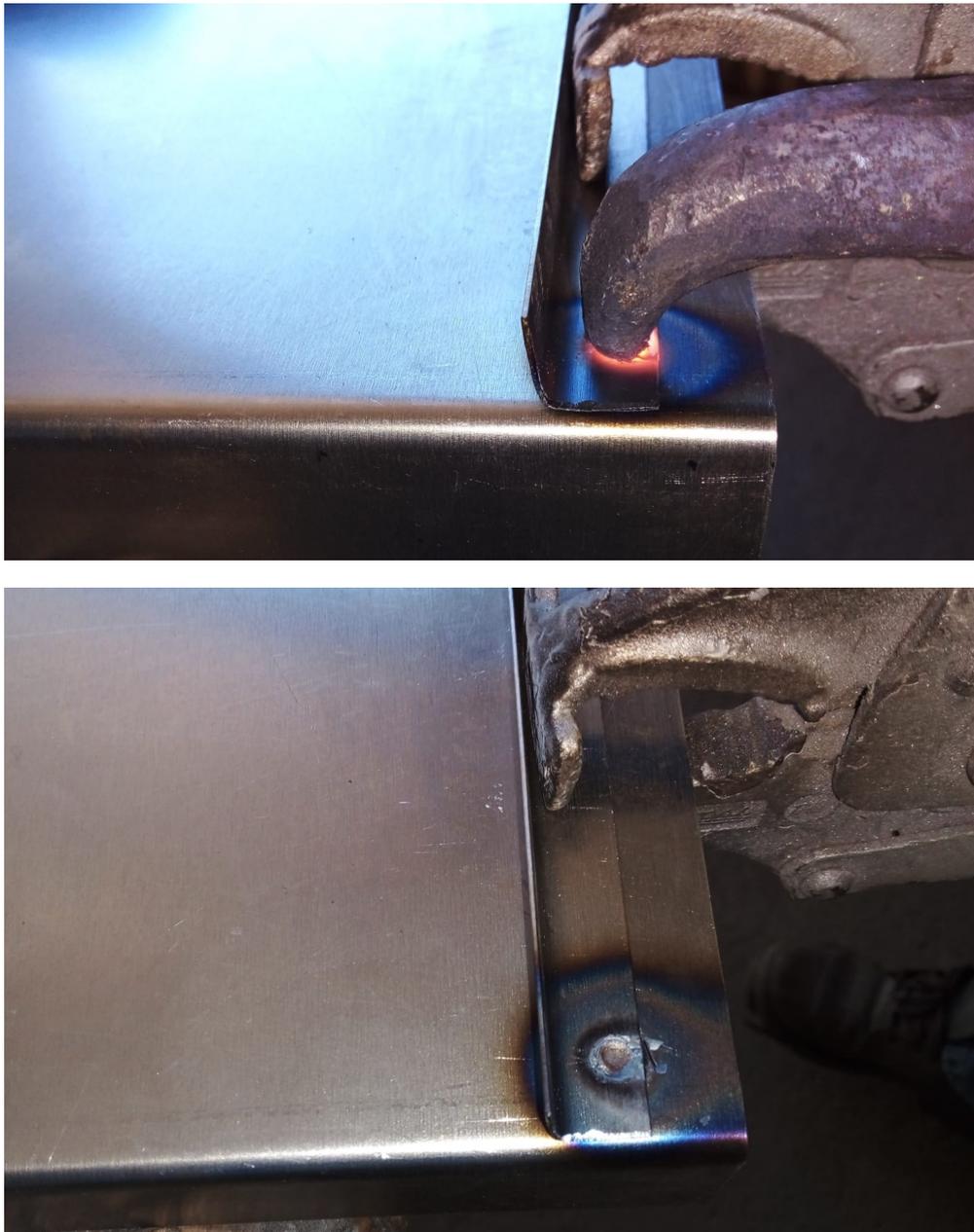


Figura C.15: Punto de soldadura realizado con la soldadora de punto con la que se soldaron las piezas del gabinete.

Apéndice C. Construcción del banco

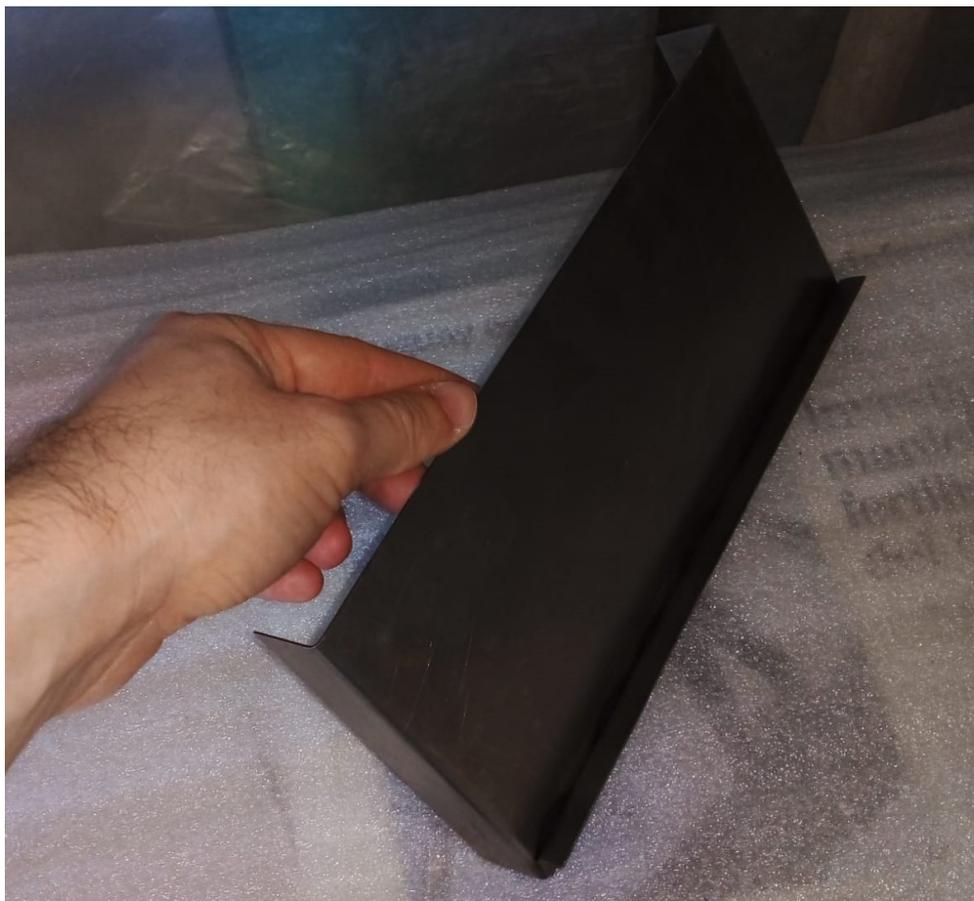


Figura C.16: Ángulo "L" soldado a los tabiques separadores y al cuerpo del gabinete, para brindar el apoyo de las celdas.

C.3. Ensamblado del gabinete



Figura C.17: Pinzas “U” de sujeción de celdas soldadas en una de las caras del cuerpo del gabinete.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.18: Arriba: tabique separador de cavidad de celdas con todas las pinzas “U” de sujeción soldadas. Abajo: tabique separador soldado en el cuerpo del gabinete.

C.3. Ensamblado del gabinete

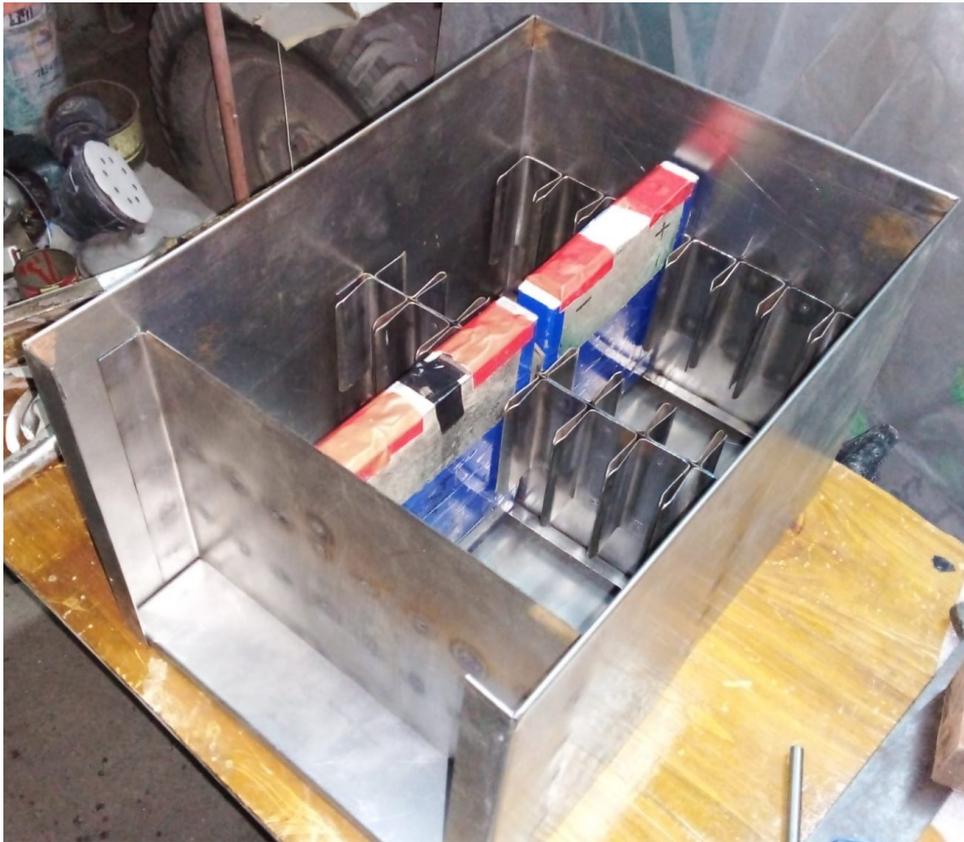


Figura C.19: Todos los tabiques separadores soldados con sus respectivas pinzas "U" de sujeción. Se colocan dos celdas de referencia para realizar las soldaduras a medida.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.20: Gabinete con tabiques soldados, pinzas de sujeción y tapa superior.

C.3. Ensamblado del gabinete



Figura C.21: Zócalo del BMS soldado al tabique separador de la cavidad BMS. Se sueldan tramos de riel DIN para colocar borneras.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.22: Manijas soldadas en las caras exteriores del gabinete para facilitar su transportación.



Figura C.23: Tapa lateral de acceso a la cavidad BMS colocada.

C.3. Ensamblado del gabinete



Figura C.24: Vista interior del gabinete con todas las piezas soldadas menos el fondo.



Figura C.25: Vista exterior del gabinete con la tapa superior.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.26: Interior pintado de negro.



Figura C.27: Exterior pintado con fondo gris mate.

C.3. Ensamblado del gabinete



Figura C.28: Vista exterior del gabinete terminado.

Apéndice C. Construcción del banco

C.4. Armado y conexionado del banco de baterías

Se muestra en las figuras cómo fueron conectadas las celdas para construir el banco de baterías y cómo se dispusieron dentro del gabinete. Se ilustra también la instalación del BMS y su conexionado.



Figura C.29: Celdas colocadas dentro del gabinete, sujetadas por las pinzas de sujeción.



Figura C.30: Celdas colocadas dentro del gabinete y conectadas mediante cable de cobre de 6 mm².

C.4. Armado y conexionado del banco de baterías



Figura C.31: Celdas colocadas dentro del gabinete con BMS instalado y conectado.



Figura C.32: Vista exterior del banco terminado con la tapa de acceso al BMS colocada.

Apéndice C. Construcción del banco



Figura C.33: Vista exterior del banco terminado con tapa superior.

Apéndice D

Cotización de batería

D.1. Cotización de batería nueva (Proveedor NAMI)

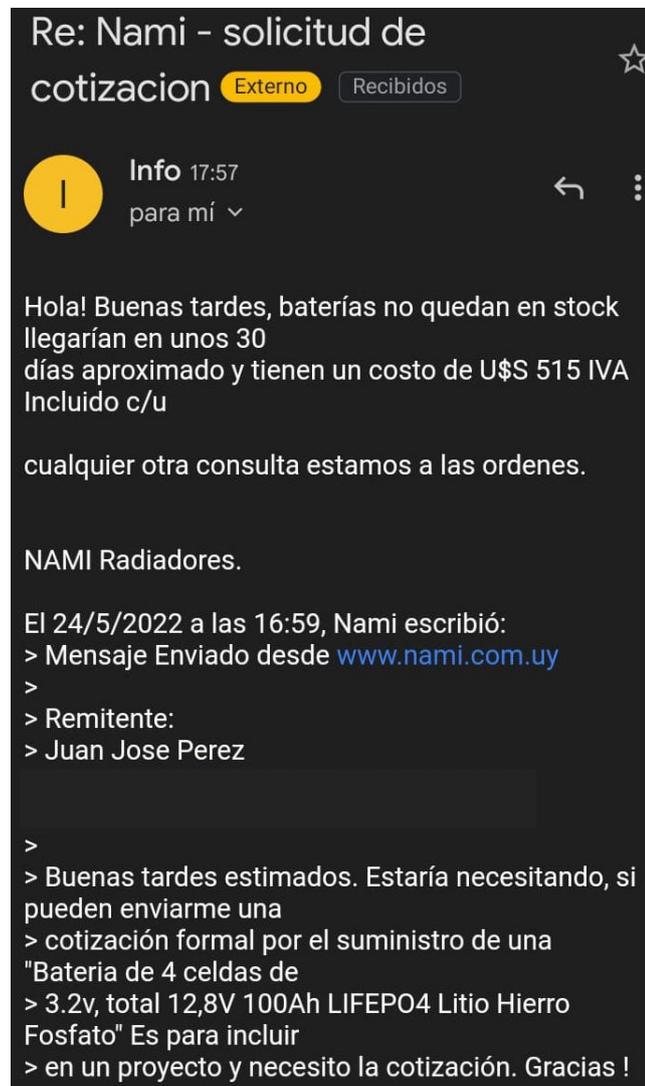


Figura D.1: Mail de respuesta por pedido de cotización al proveedor de baterías de EV.

Bibliografía

- [1] J. Lucendo. *Las Edades del Automóvil: Historia del Automóvil*. 2019.
- [2] Balance Energético Nacional. *Características generales - Emisiones de CO2*. <https://ben.miem.gub.uy/caracteristicas3.php>. Accedido: 2022-05-15.
- [3] *Informe anual 2020*. Inf. téc. ADME: Administración de Mercados Eléctricos, 2021.
- [4] Seth Leitman. “Build your own electric vehicle / Seth Leitman, Bob Brant”. En: 2009.
- [5] Paul Wolfram y Nic Lutsey. “Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions”. En: *The Internal Council on Clean Transportation* (jul. de 2016).
- [6] Comisión para la Cooperación Ambiental. “Manejo ambientalmente adecuado de baterías para vehículos de propulsión eléctrica al final de su vida útil en América del Norte”. En: 2015.
- [7] John Warner. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design - Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier Inc., 2015.
- [8] Asian Development Bank. *Handbook on Battery Energy Storage System*. Asian Development Bank, 2018.
- [9] Thomas B. Reddy y David Linden. *Handbook of Batteries*. 4th. McGraw Hill, 2011.
- [10] Thomas B. Reddy y David Linden. *Linden’s Handbook of Batteries*. 3rd. McGraw Hill, 2002.
- [11] Jiuchun Jiang y Caiping Zhang. *Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. 1st. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2015.
- [12] Reiner Korthauer. *Lithium-Ion Batteries - Basics and Applications*. Springer, 2018.
- [13] ABB Switzerland Ltd. “ABB UPS products and solutions. Power protection for critical infrastructures”. En: *IEC* (2017).
- [14] Jürgen Garche Bruno Scrosati y Werner Tillmetz. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Woodhead Publishing - Elsevier, 2015.
- [15] The Idaho National Laboratory. *United States Advanced Battery Consortium Battery Test Manual For Electric Vehicles*. U.S. Department of Energy. 2020.

Bibliografía

- [16] The Idaho National Laboratory. *United States Advanced Battery Consortium Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles*. U.S. Department of Energy. 2014.
- [17] Mahammad A. Hannan y col. “State of the Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: issues and Recommendations”. En: *IEEE Access* (abr. de 2018).
- [18] Siddharth Aphale y col. “Li-ion Batteries for Electric Vehicles: Requirements, State of Art, Challenges and Future Perspectives”. En: *IEEE* (2020). DOI: 10.1109/PECon48942.2020.9314515.
- [19] Jorge Varela Barreras. “Practical Methods in Li-ion Batteries: for Simplified Modeling, Battery Electric Vehicle Design, Battery Management System Testing and Balancing System Control”. English. PhD supervisor: Assoc. Prof. Erik Schaltz, Aalborg University Assistant PhD supervisor: Senior Systems Eng. Søren Juhl Andreasen, Serenergy A/S Assoc. Prof. Maciej Jozef Swierczynski, Aalborg University. Tesis doct. 2017. DOI: 10.5278/vbn.phd.eng.00003.
- [20] David J. Andrea. “Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs”. En: 2010.
- [21] J. M. B. Marques. “Battery Management Systems (BMS) for Li-Ion Batteries.” En: 2014.
- [22] Gregory Plett. *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. 2015, pág. 257.
- [23] Ricardo Velho y col. “Management System for Large Li-Ion Battery Packs with a New Adaptive Multistage Charging Method”. En: *Energies* 10.5 (2017). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10050605. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/605>.
- [24] Jian Cao, Nigel Schofield y Ali Emadi. “Battery balancing methods: A comprehensive review”. En: *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2008, págs. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677669.
- [25] M. Muneeb Ur Rehman y col. “Modular approach for continuous cell-level balancing to improve performance of large battery packs”. En: *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2014, págs. 4327-4334. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953991.
- [26] A. Hariprasad y col. “Battery Management System in Electric Vehicles”. En: *International Journal of Engineering Research and V9* (mayo de 2020), págs. 581-586. DOI: 10.17577/IJERTV9IS050458.
- [27] Young Power Technology Limited. “BMS-CAN Protocol”. En: 2022.
- [28] ECOLTO. *3.2v 50Ah LFP rechargeable li-ion battery for solar system*. <https://www.ecolto.com/product/3-2v-50ah-lfp-rechargeable-li-ion-battery-for-solar-system/>.

- [29] IEC. *Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing*. spa. Standard ISO/IEC TR 29110-1:2016. International Electrotechnical Commission, 2018.
- [30] *UN Regulation No 154 – Uniform provisions concerning the approval of light duty passenger and commercial vehicles with regards to criteria emissions, emissions of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range (WLTP) [2021/2039]*. Feb. de 2021.
- [31] Maximilian Schiffer, Sebastian Stütz y Grit Walther. “Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Green Energy and Technology.” En: 2018.
- [32] J. Arrillaga. *Armónicos en sistemas de potencia*. Ed. Universidad de Cantabria, 1994, pág. 262.
- [33] Thomas Gillespie. “Fundamentals of Vehicle Dynamics”. En: (ene. de 2000). DOI: 10.4271/R-114.
- [34] M. R. Calle Salinas y A. G. Guiracocha Cajamarca. “Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests”. En: *Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca - Ecuador* (2021).

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

2.1. Características de los materiales utilizados como electrodos en una celda [10].	7
2.2. Metas de USABC establecidas para 2020 para baterías de vehículos eléctricos con una autonomía de 200 millas según un ciclo UDDS [15].	21
2.3. Metas de USABC para 2018 para baterías de vehículos híbridos enchufables PHEV.	23
2.4. Comparación de requerimientos meta para el desempeño específico de las baterías de HEV y BEV [9].	25
2.5. Principales ventajas y desventajas de las celdas de NiMH [9].	26
3.1. Formato de datos de transmisión en protocolo CAN 2.0 del fabricante Young Power Technology Limited [27].	46
3.2. Tabla de grupos de parámetros que se pueden enviar como DATA [27].	46
4.1. Valores nominales de la celda modelo IFP23140160-50Ah del fabricante HEFEI HOYE ECOLENG TECHNOLOGY CO., LTD [28].	49
4.2. Tabla con valores máximos de corriente admisibles según el estado de carga y la operación que se esté realizando, a una temperatura ambiente de entre $15^{\circ}C$ y $35^{\circ}C$ [28].	49
4.3. Valores nominales de la batería de NiMH donada por Ajax S.A.	51
4.4. Valores nominales de la batería donada por Autolider Uruguay S.A.	53
6.1. Características constructivas de la caja contenedora de ensayos.	74
6.2. Resultados del ensayo de capacidad estática realizado a las celdas de $LiFePO_4$ de la batería A. Se presenta la capacidad en Ah, la energía disponible y la energía específica de cada celda ante una descarga de corriente constante de tasa $C/3$	80
6.3. Pulso de potencia de descarga y carga obtenido en el ensayo de potencia realizado a las celdas de $LiFePO_4$. También incluye el valor de los pulsos de potencia por unidad de masa. Cabe recordar que la potencia tabulada es el mínimo valor de potencia media obtenido de los 9 ciclos que conforman el ensayo de potencia.	85
6.4. Resumen de selección de celdas para la construcción del banco reutilizado.	87
6.5. Características constructivas de la caja contenedora de ensayos.	90

Índice de tablas

8.1. Valores nominales de los parámetros utilizados para la carga del banco construido.	112
8.2. Resumen de resultados obtenidos con el ensayo de capacidad estática realizado al banco bajo una descarga a CC de C/3.	115
8.3. Resumen de resultados obtenidos con el ensayo de potencia realizado al banco construido.	117
8.4. Datos del vehículo en el que se pretende utilizar el banco.	118
8.5. Autonomía estimada en base a WLTP para el vehículo modelado, según tipo de frenado.	125
8.6. Parámetros medidos en cada paso del ensayo de autodescarga.	126
8.7. Datos nominales del banco de baterías construido.	128
9.1. Valores de depreciación anual y vida útil de equipos y herramientas según Art. 137 del Estatuto Tributario Colombiano.	132
9.2. Valor del equipamiento adquirido para el laboratorio y su depreciación asociada.	132
9.3. Resumen de horas y costos según etapa del proceso de desmontaje de batería usada y acondicionamiento de celdas.	133
9.4. Resumen de horas y costos en el proceso de ensayos de celdas.	134
9.5. Resumen de horas y costos en el proceso de diseño y armado del banco.	134
9.6. Resumen de horas y costos en el proceso de ensayos al banco.	135
9.7. Resumen de cálculo de costo del banco reutilizado.	136
9.8. Resumen de cálculo de costo del banco nuevo.	136
9.9. Comparación entre el costo total del banco reutilizado y un banco nuevo.	136
A.1. Masas obtenidas para cada celda.	145
B.1. Masas del banco construido.	201

Índice de figuras

2.1. Caídas de tensión en una celda en operación producidas por la impedancia interna y efecto de la polarización [9].	8
2.2. Curvas características de descarga de dos celdas con impedancias internas diferentes [9].	11
2.3. Perfiles de descarga en diferentes modos de descarga. El nivel potencia es el mismo para cada tipo de descarga al final de la descarga e igual a la mínima potencia requerida por la carga [9].	12
2.4. Influencia de la temperatura y del modo de descarga en el perfil de descarga de una celda.	13
2.5. Perfiles de descarga de sistemas de baterías secundarias convencionales y baterías de iones de litio recargables a una tasa de descarga de aproximadamente C/5 [10].	17
2.6. Gráfico araña comparativo de algunas de las tecnologías más utilizadas para baterías secundarias. Escala del 1 (peor) al 5 (mejor). Elaboración propia en base a datos de [9].	18
2.7. Esquema de funcionamiento típico de una UPS [13].	19
2.8. Perfiles de descarga y carga de celdas de NiMH.	27
2.9. Fenómeno ocurrido en una celda de litio-ion durante la carga y descarga [17].	31
2.10. Comparación de las características de las diferentes celdas de litio-ion. Elaboración propia en base a datos extraídos de [17].	33
2.11. Tensión de descarga frente a capacidad para una celda de grafito/LiFePO ₄ modelo ANR26650M1A de A123 Systems descargada usando varias tasas de corriente [9].	34
2.12. Zona de operación segura (SOA) de una celda de litio-ion.	35
2.13. Perfil de carga CC-CV para una celda de litio-ion [9].	36
3.1. Esquema de métodos de balanceo [22].	39
3.2. Circuitos de balanceo pasivo con resistencias. Elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].	40
3.3. Circuitos de balanceo activo con capacitores. Elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].	41
3.4. Circuitos de balanceo activo con transformadores. Elaboración propia en base a los circuitos [22].	42

Índice de figuras

3.5. Circuito de balanceo activo con bus común. Fuente: elaboración propia en base a los circuitos presentes en [22].	43
4.1. Batería entregada por Mobility.	48
4.2. Una de las 24 celdas de LiFePO_4 que componen la batería donada por Mobility [28].	49
4.3. Batería de Toyota Prius donada por Ajax S.A.	52
4.4. Módulos que componen la batería del Toyota Prius donada por Ajax S.A. una vez desmontados.	52
4.5. Batería de un vehículo híbrido marca Mercedes Benz, donada por Autolider Uruguay S.A.	53
5.1. Perfil HPPC utilizado para el ensayo [15]. La corriente es relativa a I_{HPPC} . 63	
5.2. Puntos de toma de valores para el cálculo de parámetros en ensayo HPPC [15].	64
5.3. Perfil utilizado en el ensayo de potencia máxima [15].	65
5.4. Ciclo de conducción WLTC Clase 1 [30].	68
5.5. Ciclo de conducción WLTC Clase 2 [30].	68
5.6. Ciclo de conducción WLTC Clase 3 [30].	69
6.1. Equipo utilizado para los ensayos. Fuente: Manual de usuario Chroma.	72
6.2. Respuesta de una de las celdas al perfil de carga CC-CV utilizado.	76
6.3. Perfil de descarga estática de las celdas L003 y L018 bajo una corriente de descarga de $C/3$	77
6.5. Perfil de carga CC-CV de la celda L018, tensión y corriente en función del tiempo.	78
6.4. Capacidad en función del tiempo de celdas L003 y L018.	78
6.6. Perfil utilizado en el ensayo de potencia realizado. Fuente: elaboración propia.	81
6.7. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, celda L001. Se muestra ampliada la evolución de la tensión y corriente durante uno de los perfiles de potencia de la Figura 6.6.	82
6.8. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, celda L001.	83
6.9. Evolución de la potencia de descarga y carga durante los perfiles de potencia. 84	
6.10. Procedimiento de selección de celdas aptas para formar el banco en base a la realización de ensayos. Fuente: elaboración propia.	86
7.1. Banco de baterías construido. Se observan las 16 celdas interconectadas dentro del gabinete contenedor y el BMS con sus respectivas sondas de tensión conectadas a las celdas. Para facilitar la visión de los componentes, se extrajo la tapa superior y la tapa lateral.	91
7.2. Dimensiones de los bornes de las celdas.	92
7.3. Esquema de pieza roscada diseñada para interconectar las celdas. Elaboración propia.	93
7.4. Montaje de pieza de conexión del borne.	93

7.5. Terminales roscados colocados en los bornes de las celdas con el segundo método.	95
7.6. Termografía del banco a los 30 minutos de estar descargando una corriente de 16,7 A. Cabe señalar que la prueba se realizó con las celdas fuera del gabinete contenedor.	95
7.7. Diagramas de conexión y celdas conectadas en serie. Fuente: Elaboración propia.	97
7.8. Representación esquemática de vista superior del gabinete. Fuente: Elaboración propia.	99
7.9. BMS marca JIKONG adquirido. Fuente: manual de usuario del BMS JK.	103
7.10. Conexión e interfaz del BMS.	104
7.11. Perfiles de descarga estática de las celdas de LiFePO ₄ que componen el banco.	106
7.12. Marcado de celdas y del banco construido. Fuente: elaboración propia. . .	109
8.1. Etapa final de los perfiles de carga de las celdas LiFePO ₄ que componen el banco.	112
8.2. Curvas de carga CC-CV y descarga estática del banco de LiFePO ₄ construido.	113
8.3. Curva de capacidad estática del banco	114
8.4. Etapa final de los perfiles de descarga a C/3 de las celdas que componen el banco.	114
8.5. Corriente y tensión en el ensayo de potencia del banco. Se muestra ampliada la evolución de la tensión y corriente durante uno de los perfiles de potencia de la Figura 6.6.	116
8.6. Curvas de capacidad y potencia relevadas en el ensayo de potencia del banco de LiFePO ₄ construido.	117
8.7. Ciclo de conducción WLTC Clase 3, con etapas media y baja. En la etapa de velocidad media se recortaron los picos de velocidad que superaban la velocidad máxima del vehículo y se agregaron puntos adicionales a velocidad máxima para respetar la distancia recorrida.	119
8.8. Ciclo de conducción WLTC Clase 3 utilizado en el ensayo. Se sustituye la etapa de velocidad media por otra etapa de baja velocidad, quedando formado el ciclo por dos etapas bajas consecutivas.	120
8.9. Velocidad y potencia mecánica del ciclo de conducción WLTC Clase 3 de baja velocidad considerado.	120
8.10. Potencia eléctrica en función del tiempo en ensayo WLTP, con frenado regenerativo. Se distinguen 10 ciclos de conducción WLTC transcurridos antes de que la batería se descargue totalmente, recordando que cada ciclo está compuesto por dos etapas de baja velocidad.	121
8.11. Evolución de la capacidad descargada y cargada por el banco durante un ciclo del ensayo WLTP, con frenado regenerativo.	122
8.12. Velocidad y potencia eléctrica del ensayo WLTP, sin frenado regenerativo.	123

Índice de figuras

8.13. Potencia eléctrica en función del tiempo en el ensayo WLTP, sin frenado regenerativo. Se distinguen 6 ciclos completos de conducción WLTC transcurridos y un séptimo parcial antes de que la batería se descargue totalmente, recordando que cada ciclo está compuesto por dos etapas de baja velocidad.	123
8.14. Evolución de la capacidad durante un ciclo del ensayo WLTP, sin frenado regenerativo.	125
8.15. Punto de conexión de potencia del banco marcada con el círculo rojo. . .	129
8.16. Código QR para descargar la aplicación del BMS.	130
9.1. Gráfica de distribución de horas hombre según etapa.	137
A.1. Perfil de descarga L001.	146
A.2. Curva de capacidad estática L001.	146
A.3. Perfil de descarga L002.	147
A.4. Curva de capacidad estática L002.	147
A.5. Perfil de descarga L003.	148
A.6. Curva de capacidad estática L003.	148
A.7. Perfil de descarga L004.	149
A.8. Curva de capacidad estática L004.	149
A.9. Perfil de descarga L005.	150
A.10. Curva de capacidad estática L005.	150
A.11. Perfil de descarga L006.	151
A.12. Curva de capacidad estática L006.	151
A.13. Perfil de descarga L007.	152
A.14. Curva de capacidad estática L007.	152
A.15. Perfil de descarga L008.	153
A.16. Curva de capacidad estática L008.	153
A.17. Perfil de descarga L009.	154
A.18. Curva de capacidad estática L009.	154
A.19. Perfil de descarga L010.	155
A.20. Curva de capacidad estática L010.	155
A.21. Perfil de descarga L011.	156
A.22. Curva de capacidad estática L011.	156
A.23. Perfil de descarga L012.	157
A.24. Curva de capacidad estática L012.	157
A.25. Perfil de descarga L014.	158
A.26. Curva de capacidad estática L014.	158
A.27. Perfil de descarga L015.	159
A.28. Curva de capacidad estática L015.	159
A.29. Perfil de descarga L016.	160
A.30. Curva de capacidad estática L016.	160
A.31. Perfil de descarga L018.	161
A.32. Curva de capacidad estática L018.	161
A.33. Perfil de descarga L020.	162
A.34. Curva de capacidad estática L020.	162

A.35.Perfil de descarga L021.	163
A.36.Curva de capacidad estática L021.	163
A.37.Perfil de descarga L022.	164
A.38.Curva de capacidad estática L022.	164
A.39.Perfil de descarga L023.	165
A.40.Curva de capacidad estática L023.	165
A.41.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L001.	166
A.42.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L001.	166
A.43.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L001.	167
A.44.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L001.	167
A.45.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L002.	168
A.46.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L002.	168
A.47.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L002.	169
A.48.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L002.	169
A.49.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L003.	170
A.50.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L003.	170
A.51.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L003.	171
A.52.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L003.	171
A.53.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L004.	172
A.54.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L004.	172
A.55.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L004.	173
A.56.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L004.	173
A.57.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L005.	174
A.58.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L005.	174
A.59.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L005.	175
A.60.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L005.	175
A.61.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L006.	176
A.62.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L006.	176
A.63.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L006.	177
A.64.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L006.	177
A.65.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L008.	178
A.66.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L008.	178

Índice de figuras

A.67. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L008.	179
A.68. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L008.	179
A.69. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L009.	180
A.70. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L009.	180
A.71. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L009.	181
A.72. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L009.	181
A.73. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L010.	182
A.74. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L010.	182
A.75. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L010.	183
A.76. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L010.	183
A.77. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L011.	184
A.78. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L011.	184
A.79. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L011.	185
A.80. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L011.	185
A.81. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L012.	186
A.82. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L012.	186
A.83. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L012.	187
A.84. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L012.	187
A.85. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L015.	188
A.86. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L015.	188
A.87. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L015.	189
A.88. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L015.	189
A.89. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L016.	190
A.90. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L016.	190
A.91. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L016.	191
A.92. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L016.	191
A.93. Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L020.	192
A.94. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L020.	192
A.95. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L020.	193

A.96.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L020.	193
A.97.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L021.	194
A.98.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L021.	194
A.99.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L021.	195
A.100.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L021.	195
A.101.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L022.	196
A.102.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L022.	196
A.103.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L022.	197
A.104.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L022.	197
A.105.Corriente y tensión en el ensayo de potencia, L023.	198
A.106.Corriente y capacidad en el ensayo de potencia, L023.	198
A.107.Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia, L023.	199
A.108.Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia, L023.	199
B.1. Perfil de descarga del banco con C/3.	202
B.2. Curva de capacidad estática del banco con C/3.	202
B.3. Corriente y tensión en el ensayo de potencia del banco.	203
B.4. Corriente y capacidad en el ensayo de potencia del banco.	203
B.5. Corriente y tensión durante el primer ciclado en el ensayo de potencia del banco.	204
B.6. Evolución de la potencia de carga y descarga en función del número de ciclo, en el ensayo de potencia del banco.	204
B.7. Potencia y capacidad durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.	205
B.8. Tensión y corriente durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.	205
B.9. Potencia y capacidad durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.	206
B.10.Tensión y corriente durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.	206
B.11.Potencia y capacidad durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.	207
B.12.Tensión y corriente durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.	207
B.13.Potencia y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.	208
B.14.Tensión y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.	208
B.15.Potencia y capacidad durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.	209
B.16.Tensión y corriente durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.	209
B.17.Potencia y capacidad durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.	210
B.18.Tensión y corriente durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.	210
B.19.Potencia y capacidad durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.	211
B.20.Tensión y corriente durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.	211
B.21.Potencia y capacidad durante el ciclo 8 del ensayo WLTP.	212
B.22.Tensión y corriente durante el ciclo 8 del ensayo WLTP.	212

Índice de figuras

B.23.Potencia y capacidad durante el ciclo 9 del ensayo WLTP.	213
B.24.Tensión y corriente durante el ciclo 9 del ensayo WLTP.	213
B.25.Potencia y capacidad durante el ciclo 10 del ensayo WLTP.	214
B.26.Tensión y corriente durante el ciclo 10 del ensayo WLTP.	214
B.27.Potencia y capacidad durante el ciclo 11 del ensayo WLTP.	215
B.28.Tensión y corriente durante el ciclo 11 del ensayo WLTP.	215
B.29.Potencia y capacidad durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.	216
B.30.Tensión y corriente durante el ciclo 1 del ensayo WLTP.	216
B.31.Potencia y capacidad durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.	217
B.32.Tensión y corriente durante el ciclo 2 del ensayo WLTP.	217
B.33.Potencia y capacidad durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.	218
B.34.Tensión y corriente durante el ciclo 3 del ensayo WLTP.	218
B.35.Potencia y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.	219
B.36.Tensión y corriente durante el ciclo 4 del ensayo WLTP.	219
B.37.Potencia y capacidad durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.	220
B.38.Tensión y corriente durante el ciclo 5 del ensayo WLTP.	220
B.39.Potencia y capacidad durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.	221
B.40.Tensión y corriente durante el ciclo 6 del ensayo WLTP.	221
B.41.Potencia y capacidad durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.	222
B.42.Tensión y corriente durante el ciclo 7 del ensayo WLTP.	222
C.1. Cuerpo general del gabinete.	223
C.2. Izquierda: tabique divisor de cavidad BMS. Derecha: tabique divisor de cavidad celdas.	224
C.3. De izquierda a derecha: zócalo para BMS, perfil “U” de sujeción de celdas y ángulo “L” de apoyo de celdas.	224
C.4. Izquierda: fondo de gabinete. Derecha: tapa lateral de acceso a la cavidad BMS.	225
C.5. Tapa superior.	225
C.6. Vista general de piezas en dentro del gabinete.	226
C.7. Vista superior del sistema de sujeción de celdas mediante pinzas “U”. . .	226
C.8. Cuerpo general del gabinete en chapa.	227
C.9. Fondo del gabinete en chapa.	227
C.10.Tapa superior en chapa.	228
C.11.Perfil “U” con el que se construyen las pinzas de sujeción de celdas. . . .	228
C.12.Pinza “U” de sujeción de celdas que se obtiene cortando el perfil de la Figura C.11 cada 7,5 cm.	229
C.13.Tapa lateral de acceso a la cavidad BMS.	229
C.14.Tabiques separadores y zócalo del BMS.	230
C.15.Punto de soldadura realizado con la soldadora de punto con la que se soldaron las piezas del gabinete.	231
C.16.Ángulo “L” soldado a los tabiques separadores y al cuerpo del gabinete, para brindar el apoyo de las celdas.	232
C.17.Pinzas “U” de sujeción de celdas soldadas en una de las caras del cuerpo del gabinete.	233

C.18.Arriba: tabique separador de cavidad de celdas con todas las pinzas “U” de sujeción soldadas. Abajo: tabique separador soldado en el cuerpo del gabinete.	234
C.19.Todos los tabiques separadores soldados con sus respectivas pinzas “U” de sujeción. Se colocan dos celdas de referencia para realizar las soldaduras a medida.	235
C.20.Gabinete con tabiques soldados, pinzas de sujeción y tapa superior.	236
C.21.Zócalo del BMS soldado al tabique separador de la cavidad BMS. Se sueldan tramos de riel DIN para colocar borneras.	237
C.22.Manijas soldadas en las caras exteriores del gabinete para facilitar su transportación.	238
C.23.Tapa lateral de acceso a la cavidad BMS colocada.	238
C.24.Vista interior del gabinete con todas las piezas soldadas menos el fondo.	239
C.25.Vista exterior del gabinete con la tapa superior.	239
C.26.Interior pintado de negro.	240
C.27.Exterior pintado con fondo gris mate.	240
C.28.Vista exterior del gabinete terminado.	241
C.29.Celdas colocadas dentro del gabinete, sujetadas por las pinzas de sujeción.	242
C.30.Celdas colocadas dentro del gabinete y conectadas mediante cable de cobre de 6 mm ²	242
C.31.Celdas colocadas dentro del gabinete con BMS instalado y conectado.	243
C.32.Vista exterior del banco terminado con la tapa de acceso al BMS colocada.	243
C.33.Vista exterior del banco terminado con tapa superior.	244
D.1. Mail de respuesta por pedido de cotización al proveedor de baterías de EV.	246

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 27 julio, 2022.
<http://iie.fing.edu.uy/>