
Diseño e implementación de una metodología para cargar y monitorear bancos de baterías utilizando celdas Li-Ion para aplicaciones LEV

Pablo Fernando Moreno Lemus



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de una metodología para cargar y
monitorear bancos de baterías utilizando celdas Li-Ion para
aplicaciones LEV**

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por Pablo
Fernando Moreno Lemus para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



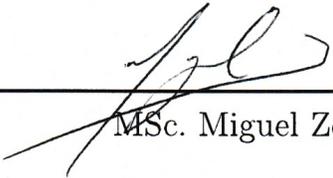
**Diseño e implementación de una metodología para cargar y
monitorear bancos de baterías utilizando celdas Li-Ion para
aplicaciones LEV**

Trabajo de graduación presentado por Pablo Fernando Moreno Lemus
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

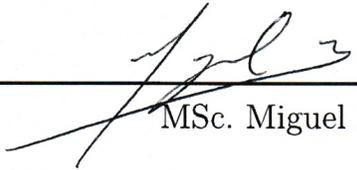
Guatemala,

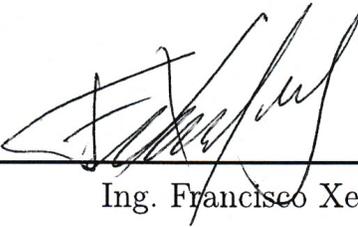
2023

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Miguel Zea

(f) 
Ing. Francisco Xet

(f) 
Ing. Jonathan Mansilla

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2024.

Mi motivación principal de seguir mis metas siempre ha sido el deseo de contribuir al mundo. Una de las cosas que más me apasionan son los carros, y este trabajo de graduación es el inicio del recorrido hacia ese camino, donde llegue a ser capaz de contribuir en el cambio del parque vehicular. Grandes empresas como TESLA apuntan al uso de carros eléctricos, energizados principalmente por baterías de iones de litio, sin embargo utilizar este tipo de baterías conlleva ciertos retos, como la necesidad de monitorear la temperatura a la que opera, medir el voltaje de cada celda de la que está compuesta la batería, entre otras cosas. Para poder cumplir con los requerimientos del uso de baterías de iones de litio nacieron los Battery Management Systems (BMS), crear uno de estos requiere de muchos conocimientos de ingeniería y este trabajo de graduación es un simple aporte que permitirá la utilización del circuito integrado BQ34Z100-G1, que al unificarse con trabajos futuros formará parte de una guía para crear BMS.

Doy un especial agradecimiento a las personas que más me han apoyado a lo largo de mi recorrido académico, no solo económicamente, sino creyendo en mi capacidad.

Pablo A. Moreno Arreaga y Brenda L. Lemus Palencia

Prefacio	III
Lista de figuras	VII
Lista de cuadros	VIII
Resumen	IX
Abstract	X
1 Introducción	1
2 Antecedentes	3
3 Justificación	5
4 Objetivos	6
5 Alcance	7
6 Marco teórico	8
6.1 Celdas electroquímicas	8
6.1.1 Cómo funciona una celda	9
6.1.2 Cómo almacenan y liberan energía	11
6.2 Circuito integrado BQ34Z100-G1	11
6.2.1 Configuraciones de pines y funciones del IC	13
6.2.2 Rendimiento del IC	13
6.2.3 Interfaces de comunicación del IC	13
6.2.4 Medición de Energía (<i>Fuel Gauging</i>)	15
6.2.5 Algoritmo de seguimiento de impedancia (<i>Impedance Track™</i> , por su nombre en inglés)	16
6.2.6 Variables del <i>Impedance Track™</i>	17
6.2.7 <i>Data Flash</i> del IC	18

6.2.8	Procedimiento paso a paso de diseño para modificar los valores de la <i>Data Flash</i>	21
6.2.9	Configuración del <i>Impedance Track™ Gauge</i>	24
6.2.10	Configuración del IC desde bqStudio para realizar el ciclo de aprendizaje y pruebas de carga y descarga	29
6.3	Módulo de evaluación BQ34Z100EVM	34
6.3.1	Conexiones eléctricas del módulo de evaluación	34
6.3.2	Conexiones de configuración del módulo de evaluación (EVM)	35
6.3.3	Indicación de terminación de carga o descarga de la batería/celda	41
7	<i>Firmware</i> para utilizar el IC BQ34Z100-G1	43
7.1	Metodología de desarrollo	43
7.1.1	Funciones privadas de la librería	44
7.1.2	Funciones de la librería para diagnosticar celdas Li-Ion	44
7.2	Forma de validar el funcionamiento del <i>firmware</i>	45
7.3	Hallazgos	48
7.4	Modificación de valores de la <i>Data Flash</i>	50
8	Diseño de un banco de baterías para un LEV	53
9	Caracterización de una celda Li-Ion para utilizar el IC BQ34Z100-G1	56
9.1	Determinación de la capacidad nominal, voltaje máximo, voltaje de terminación, corriente de abandono y <i>taper current</i> de una celda Li-Ion	58
9.1.1	Experimentos de descarga	58
9.1.2	Experimentos de carga	66
9.2	Determinación del voltaje en circuito abierto (OCV) de la celda	69
9.3	Determinación la resistencia interna de la celda	69
9.4	Determinación y programación del tipo de química de la celda (ChemID)	70
9.5	Configurar la <i>Data Flash</i>	71
10	Ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1	74
11	Conclusiones	79
12	Recomendaciones	81
13	Bibliografía	83
14	Anexos	85
15	Glosario	89

Figura 1	<i>Símbolo de batería y de celda..</i>	9
Figura 2	<i>Diagrama esquemático de una celda ión-litio..</i>	10
Figura 3	<i>Funciones de pines del IC BQ34Z100-G1..</i>	13
Figura 4	<i>Divisor de voltaje..</i>	22
Figura 5	<i>Base de datos de identificadores químicos de bqStudio..</i>	25
Figura 6	<i>Voltaje/corriente durante el ciclo de aprendizaje según TI..</i>	26
Figura 7	<i>Diagrama de flujo de los registros durante el ciclo de aprendizaje..</i>	26
Figura 8	<i>Pestaña de la imagen dorada en bqStudio..</i>	29
Figura 9	<i>Paso 1: abrir la pestaña de calibración..</i>	30
Figura 10	<i>Paso 2: calibración de voltaje..</i>	30
Figura 11	<i>Paso 3: calibración de temperatura..</i>	31
Figura 12	<i>Paso 4: calibración de corriente - desfase CC y de placa..</i>	32
Figura 13	<i>Paso 5: calibración de corriente..</i>	33
Figura 14	<i>Conexiones del EVM a una batería y un sistema de carga y cargador..</i>	35
Figura 15	<i>Esquema de conexiones eléctricas para BQ34Z100EVM..</i>	36
Figura 16	<i>Esquema de conexiones utilizar protocolo I²C en el BQ34Z100EVM..</i>	36
Figura 17	<i>Esquema de conexiones para configuraciones en el BQ34Z100EVM..</i>	37
Figura 18	<i>Lectura de datos utilizando un ESP32 y el integrado BQ34Z100-G1..</i>	46
Figura 19	<i>Voltaje utilizado para prueba de validación de firmware..</i>	46
Figura 20	<i>Valor de registros de control del BQ34Z100-G1 utilizando EV2400..</i>	47
Figura 21	<i>Valor de registro de Control Status del BQ34Z100-G1 utilizando ESP32..</i>	48
Figura 22	<i>Valor de registro de Flags del BQ34Z100-G1 utilizando ESP32..</i>	48
Figura 23	<i>Voltaje leído utilizando 0XAA como dirección del BQ34Z100-G1..</i>	49
Figura 24	<i>Dirección del BQ34Z100-G1 obtenida utilizando la función TryCommunication()..</i>	50
Figura 25	<i>Valor de Pack Configuration por defecto del IC..</i>	52
Figura 26	<i>Valor de Pack Configuration modificado a 0x55..</i>	52
Figura 27	<i>Consumos eléctricos estimados del Rover UVG..</i>	53
Figura 28	<i>Esquemático de la configuración de celdas para una batería para el Rover UVG..</i>	55

Figura 29	<i>Información básica de una celda LiitoKala NCR18650B Li-Ion MH12210..</i>	57
Figura 30	<i>Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 500 mAh de celda Samsung INR18650-29E..</i>	59
Figura 31	<i>Voltaje, temperatura y capacidad dedidos durante descarga a 1000 mAh de celda Samsung INR18650-29E..</i>	60
Figura 32	<i>Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 3000 mAh de celda Samsung INR18650-29E..</i>	60
Figura 33	<i>Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 500 mAh de una celda LiitoKala 18650..</i>	61
Figura 34	<i>Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 1000 mAh de una celda LiitoKala 18650..</i>	62
Figura 35	<i>Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 2000 mAh de una celda LiitoKala 18650..</i>	62
Figura 36	<i>Caída de voltaje de la celda Samsung INR18650-29E entre mediciones a distintas tasas de descarga..</i>	63
Figura 37	<i>Caída de voltaje de la celda LiitoKala 18650 entre mediciones a distintas tasas de descarga..</i>	63
Figura 38	<i>Capacidad medida de una celda Samsung INR18650-29E durante descarga a distintas tasas de corriente..</i>	65
Figura 39	<i>Capacidad medida de una celda LiitoKala durante descarga a distintas tasas de corriente..</i>	65
Figura 40	<i>Paso 1 - abrir la pestaña watch de bqStudio..</i>	66
Figura 41	<i>Paso 2 - abrir la pestaña watch de bqStudio..</i>	67
Figura 42	<i>Voltaje y corriente promedio durante carga a 500 mAh de una celda Samsung INR18650-29E..</i>	68
Figura 43	<i>Voltaje y corriente promedio durante carga a 1000 mAh de una celda Samsung INR18650-29E..</i>	68
Figura 44	<i>ChemID Samsung INR18650-29E..</i>	70
Figura 45	<i>Pestaña watch para ChemID..</i>	71
Figura 46	<i>Datos modificados de la Data Flash 1..</i>	72
Figura 47	<i>Datos modificados de la Data Flash 2..</i>	72
Figura 48	<i>Datos modificados de la Data Flash 3..</i>	72
Figura 49	<i>Datos modificados de la Data Flash 4..</i>	73
Figura 50	<i>Resultados del primer ciclo de aprendizaje ejecutado..</i>	75
Figura 51	<i>Resultados del segundo ciclo de aprendizaje ejecutado..</i>	75
Figura 52	<i>Diagrama de flujo de primer ciclo de aprendizaje..</i>	76
Figura 53	<i>Diagrama de flujo de segundo ciclo de aprendizaje..</i>	77
Figura 54	<i>Terminación de carga de una celda NiXX..</i>	86
Figura 55	<i>Perfil de carga típico de una batería/celda..</i>	86
Figura 56	<i>Esquemático del BQ34Z100EVM..</i>	87
Figura 57	<i>Carga electrónica ajustable XY-FZ25 DE 25W 4Ar..</i>	87
Figura 58	<i>WISSBLUE 18650 Battery Charger..</i>	88

Lista de cuadros

Cuadro 1	<i>Funciones de los pines del IC.</i>	14
Cuadro 2	<i>Especificaciones técnicas del IC.</i>	15
Cuadro 3	Modelo de Corriente Constante, Load Mode = 0.	17
Cuadro 4	Modelo de Potencia Constante, Load Mode = 1.	18
Cuadro 5	Fragmento de Tabla 7-11. <i>Data Flash</i> Summary.	19
Cuadro 6	<i>Pines de señales de alerta y modos de LED.</i>	38
Cuadro 7	<i>Definición de Bits del registro de Alert Configuration.</i>	38
Cuadro 8	<i>Bits de Configuración de LED/COMM.</i>	40
Cuadro 9	<i>Información básica de una celda INR18650-29E Samsung.</i>	58

La creación de bancos de baterías con celdas Li-Ion implica dos componentes clave: conocer las características de la celda y disponer de un dispositivo para supervisar su estado. En este trabajo, se desarrolló una metodología que aborda la creación, prueba y diagnóstico de bancos de baterías compuestos por celdas de iones de litio. Para cumplir con el requerimiento de diagnóstico, se desarrolló un código de *firmware* en lenguaje de programación C++, en una plataforma de Arduino y se utilizó como protocolo de comunicación el estándar I^2C . Para hacer uso del *firmware*, se utilizó un micro controlador (μC) ESP32. Con el μC como anfitrión, fue posible aprovechar las capacidades del IC BQ34Z100-G1, lo que permitió monitorear el estado de una celda Li-Ion 18650. Las pruebas de medición de voltaje con la celda Li-Ion 18650 demostraron la funcionalidad del *firmware* desarrollado y su capacidad para acceder a las funciones de diagnóstico del circuito integrado (IC).

Este trabajo simplifica el acceso a información crucial sobre el diseño y la caracterización de baterías, ofreciendo una plataforma en la que solo se requieren funciones ya creadas para monitorear el estado de la batería. En resumen, se presenta como una guía que permitirá a los usuarios llevar a cabo de manera más sencilla, el proceso completo de creación, diseño, pruebas y uso de baterías con el fin de desarrollar un BMS.

Palabras clave: celdas Li-Ion, BQ34Z100-G1, *firmware*, pruebas de caracterización.

The creation of battery banks with Li-Ion cells involves two key components: understanding the cell's characteristics and having a device to monitor its status. In this work, a methodology was developed that addresses the creation, testing, and diagnosis of battery banks composed of lithium-ion cells. To meet the diagnostic requirement, firmware code was developed in the C++ programming language on an Arduino platform, and the I^2C standard was used as the communication protocol. To use the firmware, an ESP32 microcontroller (μC) was employed. With the μC as the host, it was possible to leverage the capabilities of the IC BQ34Z100-G1, allowing for the monitoring of the status of a Li-Ion 18650 cell. Voltage measurement tests with the Li-Ion 18650 cell demonstrated the functionality of the developed firmware and its ability to access the diagnostic functions of the integrated circuit (IC)

This work simplifies access to crucial information regarding battery design and characterization, offering a platform where only pre-existing functions are required to monitor battery status. In summary, it is presented as a guide that will enable users to more easily carry out the entire process of battery creation, design, testing, and usage in order to develop a BMS.

Keywords: Li-Ion cells, BQ34Z100-G1, firmware, characterization tests.

En la actualidad, una de las preocupaciones principales al crear vehículos, robots o máquinas que utilicen energía eléctrica, es la forma de almacenar energía. Las celdas convencionales tienen una relación energía-tamaño mala, debido a que se necesita una gran cantidad de espacio para guardar una pequeña cantidad de energía. A razón de esto, surgen las celdas Li-Ion, que en menor cantidad de espacio son capaces de contener mayor capacidad energética. Sin embargo, con esta ventaja de poder tener mayores reservas de energía en baterías compuestas de celdas Li-Ion, surge una nueva necesidad: el requerimiento de sistemas de control que brinden seguridad en el uso de estas. Todas las celdas Li-Ion deben mantener siempre la misma diferencia de potencial al momento de cargarse y descargarse, de lo contrario, pueden llegar a estallar, generando daños a equipos e incluso a personas. Por ese motivo, se crearon los sistemas de gestión de baterías, BMS (*Battery Management System*, por sus siglas en inglés), encargados de realizar el diagnóstico de los bancos de baterías, asegurando su correcto funcionamiento.

En la Universidad del Valle de Guatemala se creó un vehículo eléctrico ligero LEV (*Light Electric Vehicle*, por sus siglas en inglés) llamado Rover. Este LEV tiene un consumo estimado de 32V y 15.8A. La forma en la que se energiza es utilizando un UPS (*Uninterruptible power supply*, por sus siglas en inglés), limitando su movilidad. En la actualidad se busca utilizar baterías Li-Ion como fuente de energía, pero no se cuenta con una metodología que permita el diseño del banco de baterías y de un BMS para la aplicación. Por ese motivo, en este trabajo de graduación se estableció y diseñó una metodología para la creación, prueba y diagnóstico de bancos de baterías Li-Ion utilizando un micro controlador ESP32 y el circuito integrado BQ34Z100-G1 como componentes principales. El IC fue el encargado de realizar mediciones de la batería en general, es decir, es capaz de dar datos como el voltaje de la batería, corriente de la batería, temperatura de la batería, estado de carga de la batería SOC (*State of Charge*, por sus siglas en inglés) y estado de salud de la batería SOH (*State of Health*, por sus siglas en inglés).

Para utilizar el IC (*Integrated Circuit*, por sus siglas en inglés) se creó una librería basada en lenguaje de programación C++, esto es parte del *firmware* que permitió el diagnóstico y

la caracterización de las baterías. La metodología que se desarrolló se divide en tres capítulos principales: primero, determinación de las características energéticas necesarias para diseñar un banco de baterías para un aplicación específica; segundo, caracterizar el banco de baterías en el IC BQ34Z100-G1; y tercero, realizar pruebas de carga y descarga para las baterías. Es importante destacar que la metodología que se creó será de utilidad para trabajos futuros, en los que se busque crear un BMS, pues como se mencionó anteriormente, el IC es capaz de dar el diagnóstico de la batería, pero un BMS necesita del diagnóstico de la batería y de cada celda individual.

Con el mercado creciente en EV (*Electrical Vehicles*, por sus siglas en inglés), se han detectado ciertas necesidades y demandas, entre ellas el uso de nuevas formas de almacenaje de energía. Como respuesta a esta necesidad aparecen las baterías Li-Ion que proveen una de las mejores relaciones energía-peso/tamaño y presentan bajo efecto de descarga cuando no se utilizan. Por las propiedades mencionadas, y características como que operan a voltajes relativamente altos (3.7 V), dando la capacidad de alimentar circuitos con menor cantidad de celdas, las baterías Li-Ion se han vuelto el candidato principal para reemplazar las baterías convencionales. No obstante, estas baterías requieren un mayor control para poder operar de forma segura, confiable y que tengan una mayor durabilidad (INSTRUMENTS, 2021a). Sin embargo, en Latinoamérica el uso de EV es muy limitado, representando solo un 1.8% de la contribución mundial, aún más al tratarse de LEV. Por lo tanto, el uso de baterías Li-Ion y sus sistemas de control es escaso. Un dato importante a resaltar es que Chile es uno de los principales exportadores de litio para su uso en baterías, a pesar de eso no es productor de baterías ni las utiliza en el país, lo que resulta desalentador ya que poseen los recursos pero no los utilizan más que como materias primas de exportación. En los países latinoamericanos la investigación sobre EV es baja, siendo Brasil la que mayor documentos citados posee, 170 (Ramírez, 2021).

La programación necesaria para controlar los datos que se reciben del integrado BQ34Z100-G1 (circuito integrado (IC) que se utiliza para monitorear temperatura, estado de carga (SOC), estado de salud (SOH) y compensar autodescarga de las celdas Li-Ion) se presenta como el mayor reto al utilizar estas baterías, pues debe de implementar los sistemas matemático-químicos que describen el comportamiento dinámico de las celdas Li-Ion. Sin embargo, esta tecnología ya se ha utilizado desde la invención de dispositivos móviles, es decir, que se han utilizado para bajas cantidades de potencia y voltaje. A medida que se desarrollan más las celdas Li-Ion, va aumentando su medida de densidad energética, entre 5% y 6% anualmente, volviendo plausible que bancos grandes de baterías Li-Ion se utilicen en aplicaciones aéreas, marítimas y de riel, así como mejorar la eficiencia de las energías renovables (Weicker, 2014).

En Guatemala, las aplicaciones para estas baterías son escasas pues aún se mantiene el estándar de almacenaje de energía con baterías convencionales. En el año 2022 se trabajó un proyecto de un LEV en la Universidad del Valle de Guatemala, donde se lograron especificar los requerimientos energéticos del mismo, se definieron los parámetros a controlar y se propuso un diseño de un banco de baterías conformado por celdas Li-Ion Samsung INR18650. Sin embargo, En el proyecto, no se emplearon los bancos de baterías Li-Ion diseñados ni se utilizó un *Battery Managment System* (BMS) (Garcia, 2023). Además se identificó, gracias a una entrevista con Noel Prado, que en una empresa existente en Guatemala, Kingo, sí utiliza BMS para bancos de baterías Li-Ion grandes, de hasta 36 celdas, que sirven para alimentar aparatos eléctricos en casas donde las empresas eléctricas no distribuyen energía. Los bancos se alimentan por medio de paneles solares.

La empresa de tecnología Texas Instruments (TI) desarrolló un BMS utilizando circuitos integrados similares al BQ34Z100-G1. El monitor de celdas de batería BQ79718-Q1 y el monitor de paquete de batería BQ79731-Q1, son los productos más nuevos en la oferta completa de BMS. Los dispositivos BQ79731-Q1 y BQ79718-Q1 proporcionan un nivel sin precedentes de precisión en la medición del voltaje, corriente y temperatura de la batería para determinar eficazmente el rango real de un vehículo y aumentar la vida útil y seguridad general del paquete de baterías (Insruments, s.f.).

Sam Wong, gerente general de los sistemas de gestión de baterías BMS en TI dijo en una entrevista:

Los fabricantes de automóviles buscan obtener la mayor autonomía posible de sus vehículos eléctricos (EV), y las estimaciones precisas del estado de carga son vitales para lograrlo. Nuestros nuevos dispositivos aportan una precisión sustancialmente mayor en la medición de tensión y corriente, brindando a los fabricantes de automóviles la confianza para medir con precisión la autonomía real de un VE. (Wong, 2023)

TI demostró su tecnología de BMS con los nuevos dispositivos BQ79718-Q1 y BQ79731-Q1 en el CES (*Consumer Electronics Show*, por sus siglas en inglés) 2023.

Las baterías con celdas Li-Ion han surgido por la necesidad de generar una nueva forma de almacenaje de energía, en un espacio reducido, en equipos que demanden grandes y medianas cantidades de potencia como vehículos eléctricos ligeros (LEV). De igual forma, la relación que poseen entre energía-peso/tamaño ha logrado facilitar y mejorar su uso, permitiendo que puedan sustituir a las baterías convencionales (Plett, 2015). A pesar de esto, en Guatemala y Latinoamérica en general, estas han tenido bajo impacto pues países como Chile y Brasil han sobresalido mayormente en la exportación de litio como materia prima, y no por utilizarlo a nivel aplicación. Por estos motivos, se vuelve importante incursionar en la utilización a nivel aplicación de celdas Li-Ion y desarrollar metodologías con las cuales se pueda cargar, diagnosticar y monitorear el estado de estas en aplicaciones de LEV, EV e investigaciones que requieran de suministrar grandes y medianas cantidades de potencia (Sanchez-Lopez, 2023) y (Calva, 2022).

En el año 2022, la Universidad del Valle de Guatemala comenzó un proyecto con un LEV con el que se pretendía utilizar baterías con celdas Li-Ion, a pesar de esto, solamente se establecieron los requerimientos energéticos necesarios para diseñar bancos de baterías con celdas Li-Ion por lo que en el presente trabajo se requiere establecer y validar un protocolo para la generación, prueba y diagnóstico de bancos de baterías con celdas Li-Ion para aplicarlas a LEV, con el fin de contribuir en proyectos futuros que promuevan el uso de baterías con celdas Li-Ion a través de una metodología confiable y válida.

Objetivo general

Establecer y validar una metodología para la creación, prueba y diagnóstico de bancos de baterías Li-Ion para aplicaciones en LEV (*Light Electric Vehicles*).

Objetivos específicos

- Determinar las pruebas que deben hacerse para caracterizar un banco de baterías y configurar los dispositivos, usando el integrado BQ34Z100-G1 y un módulo de carga.
- Desarrollar el *firmware* que permita la comunicación de los integrados con un ESP32.
- Validar la metodología en el diseño de un banco de baterías adecuado para el Rover UVG.

Este proyecto se centró en establecer y validar una metodología para crear, probar y diagnosticar bancos de baterías Li-Ion destinados a aplicaciones en LEV. Para ello, se desarrolló un *firmware* que puede utilizarse en un ESP32 a través del protocolo de comunicación I^2C , aprovechando las librerías *wire* de Arduino. El *firmware* brinda acceso a las funciones de diagnóstico del circuito integrado BQ34Z100-G1, como la estimación del estado de carga SOC en celdas Li-Ion, el voltaje, la temperatura y la corriente promedio. Sin embargo, este *firmware* no tuvo el propósito de generar funciones para realizar el ciclo de aprendizaje que requiere el BQ34Z100-G1 y modificar registros internos del mismo; fue creado únicamente para acceder a las funciones de diagnóstico. Durante el desarrollo, surgió una limitación importante relacionada con la validación de los datos proporcionados por el *firmware*, y es que el valor de algunos registros que se indicaban en la hoja de datos no coincidía con el valor real. Para abordar este problema, fue necesario utilizar un módulo de interfaz llamado EV2400, distribuido por Texas Instruments. Este módulo es esencial para obtener los valores predeterminados de algunos registros internos del IC, ya que no se pueden acceder de otra manera. Otra limitación notable fue la disponibilidad de la placa de evaluación BQ34Z100EVM, ya que no se encuentra a la venta en Guatemala.

Por otro lado, la metodología para el desarrollo y caracterización de bancos de baterías no ofrece implementar el banco de baterías para el Rover UVG, sino que brinda las consideraciones que deben tenerse en cuenta al diseñar el banco. Además, la caracterización se refiere a una serie de experimentos necesarios para conocer las características principales de una celda Li-Ion. La capacidad nominal, el valor del voltaje en circuito abierto V_{OC} , la resistencia interna (R_i) y el tipo de química son los parámetros que se desean conocer al caracterizar una celda y, por ende, una batería. Solo uno de los experimentos (determinar el voltaje en circuito abierto) puede llegar a tardar hasta 50 horas, lo que significa que llevar a cabo todos los experimentos requiere aproximadamente 100 horas para caracterizar una sola celda.

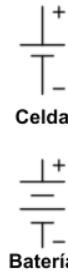
6.1. Celdas electroquímicas

Las celdas electroquímicas son los componentes más pequeños de una unidad electroquímica, capaces de entregar un voltaje que depende de su química interna. Estas se dividen en primarias y secundarias, las primarias son de un solo uso y las secundarias son recargables. Los bancos de baterías (varias baterías unidas) que utilizan los EV y LEV están conformados por múltiples celdas secundarias. Es importante saber que una batería no es lo mismo que una celda, la batería está compuesta de celdas y pueden conectarse en paralelo, en serie y en alguna combinación de las dos formando así una batería, por ejemplo las baterías de plomo-ácido de 12V de un carro están compuestas por 6 celdas de 2V cada una. Para distinguir entre una batería y una celda en un esquemático se presentan con diferentes símbolos, como se muestra en la figura 1.

El “voltaje nominal”, medido en voltios (V), de las celdas está definido por su química interna, este es el máximo voltaje que es capaz de entregar. Por otra parte la “capacidad nominal” especifica la cantidad de carga que puede contener, en amperios por hora (Ah) o miliampers por hora (mAh). Estos datos suelen estar indicados en el empaquetado de las celdas. Lo anterior es importante debido a que para las celdas electroquímicas hay una tasa conocida como “C” que indica una medida relativa de la corriente electroquímica, en otras palabras, la tasa C indica la tasa de carga o descarga de corriente constante que la celda puede mantener por una hora, por ejemplo, una celda de 20Ah es capaz de entregar 20A por una hora, lo equivalente a “1C” o 2A por 10 horas (“C/10”), esto se resuelve con una simple regla de tres (Plett, 2015).

La multiplicación del voltaje nominal y la capacidad nominal da como resultado la *capacidad energética nominal* (mWh, Wh o kWh) que una celda es capaz de almacenar en forma electroquímica, que después puede ser utilizada para hacer trabajo. Y la tasa instantánea a la que se libera la energía se conoce como el *poder*(mW, W o kW) (Plett, 2015).

Figura 1: *Símbolo de batería y de celda.*



Nota: símbolos de celda y batería para circuitos esquemáticos. Adaptado y traducido de Plett, 2015.

En aplicación las celdas no suelen utilizarse individualmente, sino que se utilizan en agrupaciones de ellas mismas denominadas como “bancos”, estos bancos difieren entre cada uno en sus propiedades dependiendo de la configuración en la que se coloquen las celdas, estas pueden ser: celdas conectadas en paralelo, en esta configuración el voltaje de la batería es igual que el de las celdas y la capacidad de la batería es la suma de la capacidad de todas las celdas, aplica lo mismo para la corriente, es la suma de la corriente de cada una de las celdas. Por ejemplo, una batería construida a partir de cinco celdas de 3V y 20Ah, esta batería tiene un voltaje nominal de 3V, una capacidad nominal de 100Ah (5x20Ah) y capacidad energética nominal de 300Wh (5x3Vx20Ah). Pero si las celdas se conectan en serie el voltaje de la batería se vuelve la suma de los voltajes individuales de cada celda y la capacidad sería equivalente a la de una celda, pues la corriente es la misma al estar en serie (si las celdas se cargan y descargan a la misma tasa). Por ejemplo, una batería construida a partir de tres celdas de 3V y 20Ah tiene un voltaje nominal de 9V (3x3V), una capacidad nominal de 20Ah (1x20Ah) y capacidad energética nominal de 180Wh (3x3Vx20Ah). Las celdas siguen el mismo principio de las resistencias, en serie la corriente es la misma y en paralelo el voltaje es el mismo (Plett, 2015).

6.1.1. Cómo funciona una celda

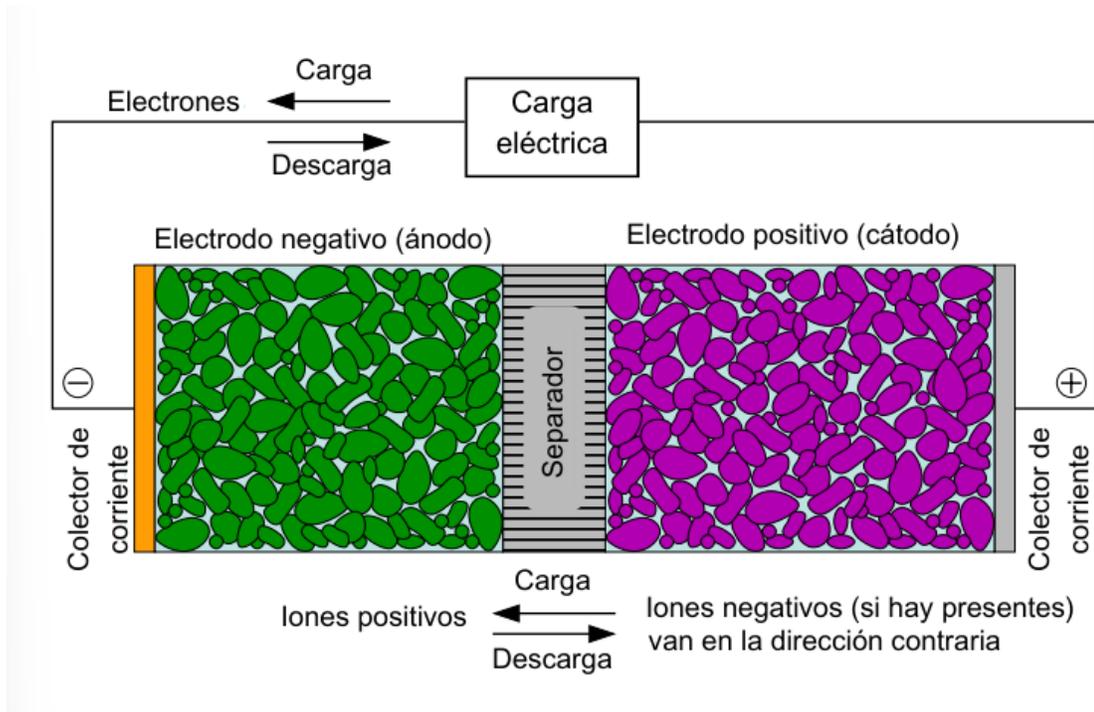
Una celda electroquímica no funciona de la misma forma que lo hace una celda Li-Ion, sin embargo los componentes de los que están conformadas son similares. Estos incluyen el “electrodo negativo”, “electrodo positivo”, “electrolito” y el “separador”. Algunos tipos de celdas tienen “colectores” de corriente, que son diferentes a los electrodos, la Figura 2 muestra un esquemático de una celda Li-Ion donde se aprecian sus componentes (Plett, 2015).

Durante la descarga, el electrodo negativo cede electrones al circuito externo (cualquier dispositivo al que la celda deba suministrarle poder), el electrodo entra en un proceso de “oxidación”: la oxidación de un elemento involucra la pérdida de electrones o, equivalentemente, un incremento de oxidación (se carga más positivamente). Durante carga, el electrodo negativo acepta electrones de circuito externo y pasa por un proceso de “reducción”: la reducción de un elemento involucra la ganancia de electrones, equivalente a un decaimiento en la oxidación. Por otro lado, el electrodo positivo durante la carga acepta electrones del circuito externo, y entra en un proceso de reducción. Durante

la carga, cede electrones al circuito externo y es oxidado (Plett, 2015).

El flujo de electrones es posible gracias al “electrolito”, que es un conductor iónico que funciona como un medio para la transferencia de carga interna iónica entre electrodos. El electrolito está hecho de un líquido “solvente” que contiene químicos disueltos (“soluto”) que proveen la conductividad iónica necesaria para el flujo de electrones (Plett, 2015).

Figura 2: Diagrama esquemático de una celda ión-litio.



Nota: representación gráfica del movimiento de electrones durante los procesos de carga y descarga de una celda Li-Ion. Adaptado y traducido de (Plett, 2015).

“El separador” sirve como un aislante físico que separa a los electrodos positivo y negativo. Este, al igual que el electrolito, es un conductor iónico pero un aislador eléctrico. Su función es prevenir corto circuitos internos entre los dos electrodos, que provocarían que la celda se auto-descargue rápidamente y se vuelva inservible (Plett, 2015).

Los “colectores de corriente”, si estuvieran presentes, son conductores electrónicos que se adhieren a los electrodos, o bien se mezclan con ellos. Los colectores no afectan en las reacciones químicas en la celda, sino ya sea que permiten conexiones eléctricas con materiales que de otra forma serían muy difíciles de conectar a una terminal de una celdas, o son incluidos para reducir la resistencia eléctrica de los electrodos. En celdas Li-Ion el electrodo negativo tiene un colector que es usualmente hecho de lámina de cobre, y el electrodo positivo tiene un colector usualmente hecho de lámina de aluminio (Plett, 2015).

6.1.2. Cómo almacenan y liberan energía

La forma de almacenar energía en celdas es en potencial electroquímico, que contiene energía que puede ser liberada posteriormente en forma de trabajo (Plett, 2015).

Durante el proceso de descarga el potencial energético electroquímico en el electrodo negativo induce a un proceso químico que provoca la liberación de electrones al circuito externo e iones cargados positivamente al electrolito. De forma paralela, en el electrodo positivo se da un proceso químico en el que se aceptan electrones del circuito externo y se aceptan iones cargados positivamente del electrolito. La diferencia de potencia resultante entre las dos terminales de la celda se conoce como “voltaje de la celda” ó “fuerza electromotriz” (EMF). Para que los electrones puedan fluir la celda debe de conectarse a un circuito externo, conectando los electrodos positivos y negativos respectivamente. Cuando el circuito es completado, la celda descarga su energía en el circuito, y convierte la energía potencial química en energía eléctrica (Plett, 2015).

El proceso de carga. En celdas primarias las reacciones químicas que ocurre al liberarse energía son irreversibles, en cambio en celdas secundarias estos procesos si son reversibles. Esto ocurre debido a que los compuestos químicos se reconstituyen debido a la aplicación de potencial eléctrico a través de los electrodos, este potencial debe de ser mayor al existente dentro de la celda. Esto “inyecta” energía dentro de la celda, provocando el regreso de electrones e iones positivos del electrodo positivo hacia el electrodo negativo, almacenando así energía.

Durante este proceso los cationes se mueven del electrodo positivo al negativo por el electrolito y los electrones se mueven del electrodo positivo al negativo a través del circuito externo. En conclusión, la energía que se le inyecta a la celda retorna los elementos químicos de la celda a su estado previo a la descarga, regresando así el potencial electroquímico (Plett, 2015).

6.2. Circuito integrado BQ34Z100-G1

El BQ34Z100-G1 es un circuito integrado (IC) que predice con precisión el combustible de baterías Li-Ion, PbA, NiMH, and NiCd utilizando el algoritmo de *Impedance Track™* desarrollado por Texas Instruments. Funciona independientemente de la cantidad de celdas que se conectan en serie. Baterías desde 3V a 65V pueden ser manejados sin problema. Su aplicación es variada desde vehículo eléctricos ligeros, instrumentos médicos, radios móviles, herramientas de poder y fuentes de poder interrumpibles (UPS, por sus siglas en ingles), proporcionando información precisa sobre el estado de carga las baterías, voltaje, corriente promedio, capacidad restante, tiempo de vida, temperatura, tiempo promedio de descarga, tiempo promedio de carga, poder promedio entre otros datos más, necesarios para generar un BMS (INSTRUMENTS, 2021a).

La información se accede a través de una serie de comandos llamados Comandos de Datos Estándar. Capacidades adicionales se proporcionan mediante otro conjunto de comandos denominados Comandos de Datos Extendidos Hoja de datos (*datasheet*) del IC BQ34Z100-G1. Ambos conjuntos de comandos se utilizan para leer y escribir información

contenida en los registros de control y estado del IC así como en sus ubicaciones de memoria flash de datos. Los comandos se envían desde el *host* al IC utilizando las interfaces HDQ e *I²C* (INSTRUMENTS, 2022b).

La información de las celdas se almacenan en el IC en una memoria flash de datos no volátil (*Data Flash*). Muchas de las ubicaciones de la *Data Flash* son accesibles durante el desarrollo de aplicaciones y fabricación de bancos de baterías. Sin embargo, no es posible acceder directamente a ellas durante la operación de equipos finales. El acceso a estas ubicaciones se logra mediante *software*, a través de comandos individuales o a través de una secuencia de comandos de acceso a la *Data Flash*. Para acceder a una ubicación de la *Data Flash* deseada, se debe conocer la sub clase correcta y el desfase (INSTRUMENTS, 2022b).

La clave para la predicción de la medición de gas de alta precisión del IC es el algoritmo Impedance Track™ de Texas Instruments. Este algoritmo utiliza mediciones de voltaje, características y propiedades de la celda para crear predicciones de estado de carga que pueden lograr una precisión con tan solo un error del 1% en una amplia variedad de condiciones de funcionamiento (INSTRUMENTS, 2022b).

El IC mide la actividad de carga/descarga monitoreando el voltaje a través de una resistencia de sensado de valor pequeño conectada en el lado bajo del circuito de la batería. Cuando una carga se aplica, la impedancia de la celda se mide, comparando su voltaje de circuito abierto (OCV) con su voltaje en condiciones de carga. Para las mediciones de temperatura, el IC puede utilizar un termistor NTC (el predeterminado es Semitec 103AT o Mitsubishi BN35-3H103FB-50), o también puede configurarse para utilizar su sensor de temperatura interno. El IC utiliza la temperatura para monitorear el entorno de la batería, que se utiliza para la medición de energía y la funcionalidad de protección de celdas (INSTRUMENTS, 2022b).

Para minimizar el consumo de energía, el IC cuenta con tres modos de energía: NORMAL, SLEEP y FULL SLEEP. El IC pasa automáticamente entre estos modos, dependiendo de la ocurrencia de eventos específicos (INSTRUMENTS, 2022b).

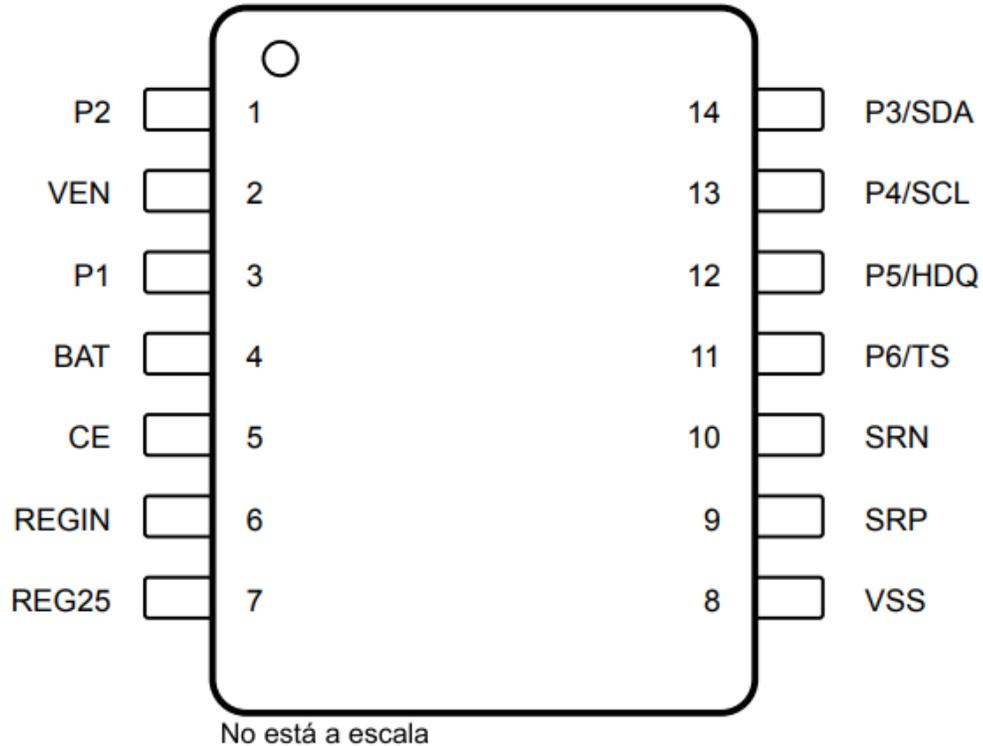
En este documento se utilizarán ciertas convenciones de escritura, que indicarán que cierta palabra se refiere a una función, un bit, un comando o una variable del IC, como se muestra a continuación (INSTRUMENTS, 2021a):

- Comandos: en cursiva con paréntesis y sin espacios de separación; por ejemplo, *RemainingCapacity()*.
- Registro de *Data Flash*: en cursiva, negrita y con espacios de separación; por ejemplo, ***Design Capacity*** .
- Bits de registro y banderas: únicamente entre corchetes; por ejemplo, datos [TDA].
- Bits de la *Data Flash*: en cursiva y negrita; por ejemplo, ***[LED1]***.
- Modos y estados: todo en mayúsculas; por ejemplo, modo UNSEALED.

6.2.1. Configuraciones de pines y funciones del IC

En la Figura 3 se muestra la distribución y nombre de los pines del IC. Además, en el Cuadro 1 se encuentran las funciones y configuración de cada pin.

Figura 3: *Funciones de pines del IC BQ34Z100-G1.*



Nota: el circuito integrado BQ34Z100-G1 tiene los pines que se identifican como se muestran en la Figura. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.2. Rendimiento del IC

La cantidad de corriente, poder, energía y voltaje que puede manejar el IC es esencial para evitar dañarlo y sobre todo, para conocer cuál es el límite energético de diseño para una batería. Las características se resumen en el Cuadro 2

6.2.3. Interfaces de comunicación del IC

El dispositivo puede utilizar 2 tipos de interfaces para comunicación: esclavo I^2C y esclavo HDQ. Para utilizar I^2C es necesario conectar el pin P3/SDA del IC hacia el pin SDA del μC , el pin P4/SCL del IC hacia el pin SCL del μC y por último conectar tierra (GND). Para utilizar HDQ solo es necesario conectar el pin P5/HDQ del IC hacia el HDQ del μC y tierra (INSTRUMENTS, 2021a).

Cuadro 1: *Funciones de los pines del IC.*

PIN		I/O	DESCRIPCIÓN
NOMBRE	NÚMERO		
P2	1	O	LED 2 o No Utilizado (conectar a Vss)
VEN	2	O	Esta señal se usa opcionalmente para activar o desactivar el divisor de voltaje de entrada con el fin de reducir el consumo de energía (típico 45 μ A) de la red de división. Si no se utiliza, este pin puede dejarse desconectado o conectarse a Vss.
P1	3	O	LED 1 ó No utilizado (conectar a Vss). Este pin también se utiliza para controlar un LED en modo de LED único.
BAT	4	I	Entrada de Voltaje de Batería Traducido
CE	5	I	Habilitar Chip. El regulador interno se desconecta de REGIN cuando se lleva a nivel bajo.
REGIN	6	P	Entrada interna del regulador LDO integrado. Desacoplar con un condensador cerámico de 0,1 μ F a Vss.
REG25	7	P	Voltaje de salida de 2.5 V del regulador LDO integrado interno. Desacoplar con un capacitor cerámico de 1 μ F a Vss.
VSS	8	P	Tierra del dispositivo.
SRP	9	I	Pin de entrada analógica conectado al periférico interno del contador de coulombs para integrar un pequeño voltaje entre SRP y SRN, donde SRP está más cerca de la conexión BAT-
SRN	10	I	Pin de entrada analógica conectado al periférico interno del contador de coulombs para integrar un pequeño voltaje entre SRP y SRN, donde SRN está más cerca de la conexión PACK-
P6/TS	11	I	Sensado de voltaje del termistor del paquete (utilice un termistor tipo 103AT).
P5/HDQ	12	I/O	Línea de comunicación serie HDQ de drenaje abierto (esclavo). Si no se utiliza, este pin puede dejarse flotando o conectarse a Vss.
P4/SCL	13	I	Entrada de reloj de comunicación serie I^2C en modo esclavo. Úsese con una resistencia pull-up de 10 K Ω (típica). Este pin también se utiliza para el LED 4 en el modo de cuatro LEDs. Si no se utiliza, este pin puede dejarse flotando o conectarse a Vss.
P3/SDA	14	I/O	Línea de datos de comunicación serie I^2C en modo esclavo de drenaje abierto. Úsese con una resistencia pull-up de 10 k Ω (típica). Este pin también se utiliza para el LED 3 en el modo de 4 LEDs. Si no se utiliza, este pin puede dejarse flotando o conectarse a Vss.

Nota: el cuadro da información de la función que cada pin tiene del circuito integrado BQ34Z100-G1. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

Cuadro 2: Especificaciones técnicas del IC.

Especificaciones	Min	Max	Unidad
Voltaje de entrada BAT+ a BAT- con 1 celda en serie	3	5	V
Voltaje de entrada BAT+ a BAT- con múltiples celdas	6	48	V
Corriente de carga y de descarga	0	7	A
Capacidad nominal de la batería	100	32000	mAh
Temperatura de operación	-40	80	°C

Nota: este Cuadro contiene las especificaciones de funcionamiento del circuito integrado BQ34Z100-G1. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.4. Medición de Energía (*Fuel Gauging*)

El BQ34Z100-G1 mide el voltaje de la celda, la temperatura y la corriente para determinar el estado de carga de la batería basándose en el algoritmo Impedance Track (revisar el Capítulo 6.2.5 para obtener más información sobre la teoría del Algoritmo de medición de energía). El BQ34Z100-G1 monitorea la actividad de carga y descarga al detectar el voltaje a través de una resistencia de valor pequeño (típicamente de $5\text{ m}\Omega$ a $20\text{ m}\Omega$) entre los pines SRP y SRN y en serie con la celda. Integrando la carga que pasa a través de la batería, se ajusta el estado de carga de la celda durante la carga o descarga de la batería (INSTRUMENTS, 2021a).

La capacidad total de la batería se determina al comparar los estados de carga antes y después de aplicar la corriente eléctrica, teniendo en cuenta la cantidad de carga transferida. Cuando se introduce una corriente eléctrica, se evalúa la impedancia de la celda al comparar el Voltaje de Circuito Abierto (OCV), obtenido a partir de una función predefinida para el Estado de Carga (SOC) actual con el voltaje medido durante el proceso de carga. Las mediciones de OCV e integración de carga, determinan el estado de carga químico y la Capacidad Química (Q_{\max}). El valor inicial de Q_{\max} se toma de la hoja de datos del fabricante de la celda, multiplicado por el número de celdas en paralelo. El resultado de lo anterior también se utiliza para la cantidad programada en la Capacidad de Diseño (*Design Capacity*). El BQ34Z100-G1 adquiere y actualiza el perfil de impedancia de la batería durante el uso normal de esta. Este perfil es Utilizado, junto con el SOC y el valor de Q_{\max} , para determinar *FullChargeCapacity()* y *StateOfCharge()* específicamente para la carga y la temperatura actuales. El registro *FullChargeCapacity()* representa la capacidad disponible de una batería completamente cargada en las condiciones actuales de corriente eléctrica y temperatura, hasta que *Voltage()* alcanza el voltaje de terminación (Terminate Voltage). *NominalAvailableCapacity()* y *FullAvailableCapacity()* son las versiones no compensadas de *RemainingCapacity()* y *FullChargeCapacity()*, respectivamente, y se refieren a la capacidad disponible sin carga o con carga ligera (INSTRUMENTS, 2021a).

Durante el uso normal de la batería, puede haber instancias en las que ocurra un pequeño aumento de SOC durante un corto período de tiempo al comienzo de la descarga. La opción *[RSOC_HOLD]* en el registro de Configuración del Paquete C (*Pack Configuration C*) evita aumentos de SOC durante la descarga. El SOC se mantendrá hasta que el valor calculado caiga por debajo del estado actual (INSTRUMENTS, 2021a).

El BQ34Z100-G1 tiene dos banderas a las que se accede mediante la función *Flags()* que advierten cuando el SOC de la batería ha disminuido a niveles críticos. Cuando *RemainingCapacity()* cae por debajo del primer punto de corte de capacidad, especificado en ***SOC1 Set Threshold***, se activa la bandera **[SOC1]** (Estado de Carga Inicial). La bandera se borra una vez que *RemainingCapacity()* sube por encima de ***SOC1 Clear Threshold***. Hay que notar que todas las unidades con las cuales se mide la capacidad están en mAh (INSTRUMENTS, 2021a).

Cuando *RemainingCapacity()* cae por debajo del segundo punto de corte de capacidad, ***SOCF Set Threshold***, se establece la bandera **[SOCF]** (Estado de Carga Final), sirviendo como una advertencia de descarga final. Si ***SOCF Set Threshold*** = -1, la bandera no está operativa durante la descarga. De manera similar, cuando *RemainingCapacity()* sube por encima de ***SOCF Clear Threshold*** y la bandera **[SOCF]** ya se ha activado, la bandera **[SOCF]** se desactiva (INSTRUMENTS, 2021a).

El BQ34Z100-G1 incluye compensación de eficiencia de carga que utiliza cuatro factores de Eficiencia de Carga para corregir la energía perdida debido al calor. Esto se usa comúnmente en químicas de NiMH y Plomo-Ácido y no siempre es lineal con respecto al estado de carga (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.5. Algoritmo de seguimiento de impedancia (*Impedance Track™*, por su nombre en inglés)

El algoritmo del medidor de energía (*Gas Gauge*, por su nombre en inglés) utiliza tres tipos de datos distintos para calcular la capacidad restante (*Remaining Capacity()*) y la capacidad de carga completa (*FullChargeCapacity()*), estos son (INSTRUMENTS, 2022a):

1. Parámetros Químicos: Se utiliza la profundidad de descarga (DOD) y la capacidad química total Q_{\max} .
2. Parámetros Eléctricos: en este caso, solo se usa la resistencia interna de la batería dependiente de DOD.
3. Parámetros Externos: para estos se considera la carga y la temperatura.

FullChargeCapacity() se define como la cantidad de carga pasada desde un estado completamente cargado hasta que se alcanza el voltaje definido en la constante *Terminate Voltage*, de la *Data Flash*, a una velocidad de descarga dada, después de restar la capacidad de reserva *Reserve Capacity* (INSTRUMENTS, 2022a).

Se debe tener en cuenta que *FullChargeCapacity()* depende de la velocidad de descarga y es menor a tasas más altas y a bajas temperaturas, ya que la caída de voltaje $I \cdot R$ de la celda provoca que el punto de corte de voltaje de terminación se alcance antes (INSTRUMENTS, 2022a).

6.2.6. Variables del Impedance Track™

El BQ34Z100-G1 cuenta con diversas variables en la *Data Flash* que permiten al usuario personalizar el algoritmo Impedance Track™ para lograr un rendimiento optimizado. Estas variables dependen de las características de potencia de la aplicación, así como de la celda misma (INSTRUMENTS, 2021a).

Load Mode

El *Load Mode* se utiliza para seleccionar el modelo de corriente constante o potencia constante para el algoritmo Impedance Track™, según se establezca en *Load Select*. La explicación detallada de los modos de carga se encuentra en la sección 6.2.6 en “*Load Select*”. Cuando *Load Mode* es 0, se utiliza el Modelo de Corriente Constante (valor predeterminado). Cuando el Modo de Carga es 1, se utiliza el Modelo de Potencia Constante. El bit *[LDMD]* de CONTROL_STATUS refleja el estado del Modo de Carga (INSTRUMENTS, 2021a).

Load Select

Load Select establece el tipo de modelo de potencia o corriente que se utilizará para calcular la capacidad compensada durante la carga en el algoritmo Impedance Track™. Si *Load Mode* = 0 (Corriente constante), las opciones presentadas en el Cuadro 3 están disponibles (INSTRUMENTS, 2021a).

Cuadro 3: Modelo de Corriente Constante, *Load Mode* = 0.

Valor de Load Select	Funcionamiento del Modelo
0	Corriente media de descarga del ciclo anterior: existe un registro interno que registra la corriente media de descarga durante cada ciclo completo de descarga. En este registro se almacena la media anterior. Sin embargo, si se trata del primer ciclo del medidor, se utilizará la corriente media actual.
1 (por defecto)	Corriente de descarga media actual: es la corriente de descarga media desde el inicio del ciclo de descarga hasta el momento actual.
2	Corriente Media: se obtiene de <i>AverageCurrent()</i> .
3	Corriente: basado en una versión filtrada de paso bajo de <i>AverageCurrent()</i> ($\tau = 14s$)
4	Capacidad de diseño/5: Tasa <i>C</i> basada en la capacidad de diseño /5 o una tasa <i>C</i> /5 en mA.
6	Utilizar el valor en <i>User_Rate-mA</i> : esto proporciona un método completamente configurable por el usuario.

Nota: adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

Si *Load Mode* = 1 (Potencia constante), entonces las opciones del Cuadro 4 estarán disponibles.

Cuadro 4: Modelo de Potencia Constante, *Load Mode* = 1.

Valor de Load Select	Funcionamiento del Modelo
0 (por defecto)	Potencia media de descarga del ciclo anterior: existe un registro interno que registra la potencia media de descarga durante cada ciclo completo de descarga. En este registro se almacena la media anterior.
1	Potencia de descarga media actual: es la potencia de descarga media desde el inicio del ciclo de descarga hasta el momento actual.
2	$CorrienteMedia \cdot Voltaje$: se obtiene de $AverageCurrent()$ y $Voltage()$.
3	$Corriente \cdot Voltaje$: basado en una versión filtrada de paso bajo de $AverageCurrent()$ ($\tau = 14s$) y $Voltage()$
4	Capacidad de diseño/5: Tasa C basada en la capacidad de diseño /5 o una tasa C/5 en mA.
6	Utilizar el valor en $User_Rate-mW/cW$: esto proporciona un método completamente configurable por el usuario.

Nota: adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.7. *Data Flash* del IC

El IC cuenta con una memoria flash no volátil, lo que significa que no se borran al momento de reiniciar o apagar el dispositivo. En ella están almacenados los parámetros del IC de inicialización, de funcionamiento, de configuración, además de los parámetros externos del sistema con el que se estará trabajando, por ejemplo, cuenta con información como capacidad nominal de la batería, química de las celdas, el valor del divisor de voltaje que se utiliza para hacer las mediciones de corriente y voltaje, información de usuario, entre otros. Es posible acceder a la *Data Flash* de diferentes formas, dependiendo de en qué modo esté operando el BQ34Z100-G1 y a qué datos se requiera acceder (INSTRUMENTS, 2021a).

Los registros más comunes a los que se accede de la *Data Flash*, frecuentemente leídos por el μC maestro, son convenientemente fáciles de obtener por medio de comandos específicos que se pueden encontrar en las sección 7.3.1 de la datasheet del IC BQ34Z100-G1. Sin embargo, la mayoría de los registros solo son accesibles cuando el BQ34Z100-G1 está funcionando en modo des sellado (UNSEAL MODE), realizando transferencias de bloque de la *Data Flash*.

Los registros de la *Data Flash* del IC deben de ser optimizados o sustituidos durante el desarrollo y proceso de manufactura. Estos se vuelven parte de un archivo dorado de imagen (Golden Image File), que en síntesis es el archivo que caracteriza el IC para cierta aplicación específica, que después es utilizado en múltiples paquetes de baterías. Una vez establecidos los valores, permanecen sin cambios en aplicaciones finales (INSTRUMENTS, 2021a).

Por estos motivos es necesario conocer la forma en la que se acceden y modifican los registros de la *Data Flash*. Para acceder a las ubicaciones individuales de la *Data Flash*, el bloque que contiene las ubicaciones de la *Data Flash* deseada debe transferirse a las ubicaciones del registro de comandos, desde donde se puede leer y modificar directamente por el μC maestro. Esto se logra enviando el comando de configuración $BlockDataControl()$ (código 0x61) con datos 0x00, este comando se usa para controlar el acceso a la *Data Flash*, habilita que el $BlockData()$ sea capaz de acceder a cualquier ubicación de la *Data Flash*. Es posible leer directamente hasta 32 bytes de datos desde las ubicaciones de comandos $BlockData()$ 0x40...0x5F, modificarlos externamente y luego volver a escribirlos en el espacio de comandos $BlockData()$. Además, se puede leer, modificar y volver a re escribir ubicaciones específicas si se utilizan sus desfases correspondientes para indexar en el espacio de comandos

BlockData(). Finalmente los datos que residen en el espacio de comandos se transfieren a la *Data Flash* una vez que se escribe el *checksum* correcto para el bloque completo en *BlockDataChecksum()* (número de comando 0x60), este byte contiene el chequeo de la suma de los 32 bytes del bloque de datos leídos o escritos a la *Data Flash* (INSTRUMENTS, 2021a).

Eventualmente, una clase de la *Data Flash* será más grande que el tamaño del bloque de 32 bytes. En este caso, se utilizará el comando *DataFlashBlock()* para designar en qué bloque de 32 bytes residen las ubicaciones deseadas. La dirección de comando correcta se obtiene mediante $0x40 + \text{desfase módulo de } 32$ (el residuo de dividir el desfase entre 32). Por ejemplo, para acceder a **Terminate voltage** en la clase Gas Gauging, se utiliza *DataFlashClass()* con el valor 80 (0x50) para configurar la clase. Debido a que el desfase es 48, debe residir en el segundo bloque de 32 bytes. Por lo tanto se emite *DataFlashBlock()* con valor 0x01 para configurar el desfase del bloque, y el desfase utilizado para indexar en el área de memoria *BlockData()* es $0x40 + 48 \text{ módulo } 32 = 0x40 + 16 = 0x40 + 0x10 = 0x50$. La información de las direcciones se obtiene de la tabla de direcciones de la *Data Flash*. El fragmento pertinente al anterior ejemplo de esta tabla se presenta en el Cuadro 5. Es importante notar que el ID de sub-clase y el desfase se encuentran en formato decimal en la documentación.

Cuadro 5: Fragmento de Tabla 7-11. *Data Flash* Summary.

CLASE	SUB CLASE	ID DE SUB CLASE	DESFASE	TIPO	NOMBRE	MIN	MAX	DEFAULT	UNIDAD
Gas Gauging	IT Cfg	80	53	I2	Cell Terminate Voltage	1000	3700	3000	mV
Configuration	Registers	64	0	H2	Pack Configuration	0	fff	161	flags

Nota: adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

Ejemplo de modificación de un registro de la *Data Flash*:

Se tomará como ejemplo modificar el bit **[VOLTSEL]** de 0 a 1 de la configuración de paquete (**Pack Configuration**) para habilitar la opción de medición de voltaje externo. En Este ejemplo **Pack Configuration** tiene dirección 64 en decimal, equivalente a 0x40 en hexadecimal (ver segunda fila del Cuadro 5). Para cambiar el bit de **[VOLTSEL]** se deben seguir los siguientes pasos, asumiendo que **[VOLTSEL] = 0**:

1. Romper el sello del IC usando el comando *Control()* (0x00/0x01) si el dispositivo está sellado.
 - a) Escribir los primeros 2 bytes de la llave de UNSEAL utilizando el comando *Control(0x0414)* → (Write 0x00 0x14 0x04).
 - b) Escribir los 2 bytes restantes de la llave de UNSEAL utilizando el comando *Control(0x3672)* → (Write 0x00 0x72 0x36).
2. Escribir 0x00 usando el comando *BlockDataControl()* (0x61) para habilitar bloque de control de la *Data Flash*. → (Write 0x61 0x00).
3. Escribir 0x40 (sub clase de **Pack Configuration**) usando el comando *DataFlashClass()* (0x3E) para acceder a la sub clase del registro. → (Write 0x3E 0x40).

4. Escribir el desfase de la ubicación del bloque utilizando el comando *DataFlashBlock()* (0x3F). Para acceder a datos localizados en un desfase de 0 a 31, utilizar desfase = 0x00. Y para acceder a datos localizados en un desfase de 32 a 63, usar desfase = 0x01, y así consecutivamente, como se requiera.
 Por ejemplo, **Pack Configuration** (desfase = 0) se encuentra en el primer bloque, por lo tanto se utiliza (Write 0x3F 0x00).
5. Para leer los datos de un desfase específico, utilizar la dirección 0x40 + (modulo del desfase entre 32). Por ejemplo, **Pack Configuration** (desfase = 0) está ubicado en 0x40 y 0x41; sin embargo, [VOLTSEL] se encuentra en el byte más significativo (MSB), por lo que solo es necesario leer 0x40. Leer un byte empezando en la dirección 0x40. → (Read 0x40 old_Pack_Configuration_MSB).
6. Para leer el byte de checksum, se debe utilizar el comando *BlockDataChecksum()* (0x60). → (Read 0x60 OLD_checksum).
7. En este ejemplo, volver [VOLTSEL] = 1 se hace al activar el bit 3 de old_Pack_Configuration_MSB para crear un new_Pack_Configuration_MSB, debido a que el registro ya no tiene el mismo valor.
8. el nuevo valor para new_Pack_Configuration_MSB puede escribirse colocando la ubicación específica del desfase. Por ejemplo, para escribir el valor del byte de new_Pack_Configuration_MSB en **Pack Configuration** (desfase = 0) ubicado en 0x40, se debe utilizar el comando (Write 0x4B new_Pack_Configuration_MSB).
9. la información en realidad se transfiere a la *Data Flash* cuando el checksum correcto para el bloque completo (0x40 a 0x5F) es escrito a *BlockDataChecksum()* (0x60) → (Write 0x60 NEW_checksum).
 El checksum es (255-x) donde x es la suma de 8 bits de *BlockData()* (0x40 a 0x5F) byte por byte.
 Una forma rápida de calcular el nuevo checksum es hacer uso del checksum antiguo:
 - a) $temp = \text{mod}(255 - \text{OLD_checksum} - \text{old_Pack_Configuration_MSB}, 256)$
 - b) $\text{NEW_checksum} = 255 - \text{mod}(temp + \text{new_Pack_Configuration_MSB}, 256)$
10. Reiniciar el medidor (gauge) para asegurar que los nuevos parámetros de la *Data Flash* tengan efecto, esto se hace mediante el comando *Control(0x0041)*. → (Write 0x00 0x41 0x00).
 Si anteriormente el medidor estaba en modo SEALED, este regresará de nuevo a ese modo al efectuar RESET.
11. Si no estaba en modo SEALED anteriormente, entonces cambiarlo a modo SEALED usando el comando *Control(0x0020)*. → (Write 0x00 0x20 0x00).

La lectura y escritura de datos de subclase son operaciones de bloque de 32 bytes de longitud. Sin embargo, los datos pueden escribirse en tamaños de bloque más cortos. Los bloques pueden tener una longitud menor a 32 bytes. Escribir estos bloques de nuevo en la memoria flash de datos no sobrescribirá los datos que se extiendan más allá de la longitud real del bloque (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.8. Procedimiento paso a paso de diseño para modificar los valores de la *Data Flash*

Mientras muchos de los parámetros que la *Data Flash* trae por defecto son adecuados para la mayoría de aplicaciones, los siguientes parámetros se deben de revisar y cambiar para que coincidan con la aplicación prevista.

Paso 1: Revisión y Configuración de los Datos de Configuración (*Configuration Data*) de la *Data Flash*.

1. Capacidad de diseño (*Design Capacity*, por su nombre en inglés): Este espacio de memoria almacena la capacidad de la batería en mAh.
2. Energía de diseño (*Design Energy*, por su nombre en inglés): El valor en mWh de la batería
3. Voltaje de carga de la celda Tx-Ty (*Cell Charge Voltage*, por su nombre en inglés): Se debe ingresar el voltaje de carga deseado de la celda para cada rango de temperatura JEITA.

Paso 2: Revisión y Modificación de los Registros de Configuración (*Configuration Registers*) de la *Data Flash*.

1. Configuración de **LED_Comm**: aquí debe de seleccionarse el modo de LED en que se trabajará, para ello se utilizará la información del Capítulo 6.3.2 en “Conexiones de pantalla de LEDs (*LED display*) del EVM” para conocer qué configuraciones distintas del LED hay y el Cuadro 6 para cómo afecta el modo de LED al pin de señal de Alerta. Es importante notar que dependiendo del modo de LED que se seleccione cambiará el pin donde se dará la señal de Alerta, esto se explica en el Capítulo 6.3.2 en “Conexiones de alerta del EVM”.
2. Configuración de Alerta (**Alert Configuration**): se debe de seleccionar qué eventos activarán el pin de \overline{ALERT} . Los distintos eventos que se pueden detectar se encuentran en el Cuadro 7.
3. Número de celdas en serie: este dato se modifica en la *Data Flash* en CLASE *Configuration* → SUBCLASE *Registers* → ID DE SUBCLASE 64 → *OFFSET* 7.
4. Configuración del Pack (**Pack Configuration**): Asegurarse de que el bit [VOLSEL] está activado para aplicaciones multi-celda y desactivado para aplicaciones de una sola celda. Este bit se encuentra en la clase *Configuration* → subclase *Registers* → ID de subclase 64 → *OFFSET* 0.

Paso 3: Diseñar y Configurar el Divisor de Voltaje.

Si la batería contiene más de 1 celda, se requiere de un divisor de voltaje (ver Figura 4). Se debe diseñar el divisor según la Ecuación 1. La división de voltaje requerida es desde

el voltaje de la batería esperado más alto hasta aproximadamente 900 mV. Por ejemplo, utilizando una resistencia $R2$ de 16.5 K Ω donde el voltaje esperado más alto es de 32000 mV:

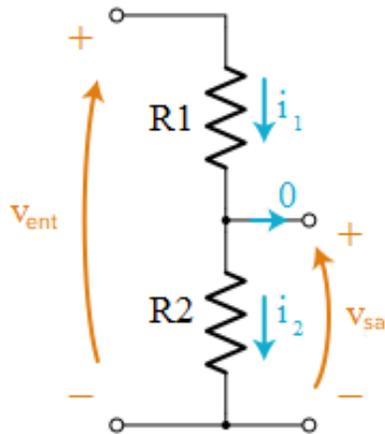
$$R_{\text{serie}} = 16.5 \text{ K}\Omega \times \frac{(32000 \text{ mV} - 900 \text{ mV})}{900 \text{ mV}} = 570.2 \text{ K}\Omega \quad (1)$$

Según el precio y la disponibilidad, se podría usar una resistencia de 600 K Ω o un par de resistencias de 300 K Ω para R1 junto con una resistencia de 16.5 K Ω como R2. Con esta información, lo siguiente es configurar el Divisor de Voltaje en la sección de Calibración de la *Data Flash* del a 32000 mV. Utilizar el *software* de Evaluación (bqStudio) para calibrar al voltaje nominal aplicado; por ejemplo, 24000 mV. Después de la calibración, aparecerá un valor ligeramente diferente en el parámetro del Divisor de Voltaje, que se puede utilizar como valor predeterminado para el proyecto.

Después de la exitosa calibración del voltaje, calcular y aplicar el valor a *Flash Update OK Cell Volt* de la siguiente manera:

$$\text{Flash Update OK Cell Volt} = 2800 \text{ mV} \times \text{Número de Celdas en Serie} \times \frac{5000}{\text{Divisor de Voltaje}}$$

Figura 4: Divisor de voltaje.



Nota: esquemático de un circuito divisor de voltaje que muestra las diferentes variables de corriente y voltaje. Obtenido de (Plett, 2015).

Paso 4: Determinar el Valor para Resistencia de Sensado.

Para garantizar una medición precisa de la corriente, la tensión de entrada generada a través del resistor de sensado de corriente no debe superar los ± 125 mV. Para aplicaciones con un rango dinámico muy alto, se permite extender este rango a un máximo absoluto de

+/-300 mV para condiciones de sobrecarga donde un dispositivo protector tomará una acción protectora independiente. En tal estado de sobrecarga, la precisión de informe de corriente y la medición de capacidad no funcionarán correctamente. El valor del resistor de sentido de corriente debe ingresarse tanto en los parámetros de CC Gain como en CC Delta en la sección de Calibración de la Memoria Flash de Datos del *software* de Evaluación.

Paso 5: Revisar y Modificar la clase de *Gas Gauging* de sus Sub-Clases *IT Cfg*, *Current Thresholds* y *State* en la *Data Flash*.

Según el documento (INSTRUMENTS, 2021a) los pasos son los siguientes:

- ***Load Select***: En el Capítulo 6.2.6 hay información sobre ***Load Select***. Prestar especial atención a los Cuadros 3 y 4.
- ***Load Mode***: En el Capítulo 6.2.6 hay información sobre ***Load Select***. Prestar especial atención a los Cuadros 3 y 4.
- Voltaje de Terminación de la Celda: Este es el voltaje teórico donde el sistema comenzará a fallar. Se define como el estado de carga cero. Generalmente, se utiliza un nivel más conservador para tener cierta capacidad de reserva. Nota: el valor es para una sola celda.
- Corriente de Abandono (*Quit Current*): Generalmente debería establecerse en un valor ligeramente superior a la corriente de reposo esperada del sistema.
- Qmax Celda 0: Se debe colocar el valor de tasa C de la celda/batería, es decir, la capacidad máxima que tiene.

Paso 6: Determinar y Programar el Identificador Químico (*ChemID*).

Utilizar la función BQChem en el *software* de evaluación para seleccionar y programar el identificador químico que coincida con la celda que se esté utilizando. Si no se encuentra ninguna coincidencia, se debe utilizar el procedimiento definido en la herramienta de selección de identificación química de TI GPCHEM (INSTRUMENTS, 2021a).

Paso 7: Calibrar el IC

Se debe seguir los pasos del capítulo 6.2.10 sobre la calibración para el Gas Gauge. Lograr la mejor calibración posible es importante antes de pasar al Paso 8. Para la producción en masa, la calibración no es necesaria para aplicaciones de célula única. Para aplicaciones con múltiples celdas, solo se requiere la calibración de voltaje. La corriente y la temperatura se pueden calibrar para mejorar la precisión de la medición. Sin embargo, calibrar siempre dará un mejor resultado en la operación en general (INSTRUMENTS, 2021a).

Paso 8: Ejecutar un Ciclo de Optimización

Se debe de llevar a cabo un ciclo de aprendizaje, que hará que el BQ34Z100-G1 sea capaz de estimar el SOC y SOH de la celda, así como tener mayor precisión. Las instrucciones para esto se encuentran en el capítulo 6.2.9 (INSTRUMENTS, 2021a).

6.2.9. Configuración del *Impedance Track™ Gauge*

El medidor (*Gauge*) usa una combinación de medidas de voltajes de circuito abierto (OCV) y conteo de coulomb para determinar el estado de carga absoluto (SOC) (INSTRUMENTS, 2022b).

Típicamente son necesarios cinco pasos, como se muestra a continuación, que son necesarios previo a utilizar el medidor con una batería.

1. Determinar el *ChemID*.
2. Llevar a cabo un ciclo de aprendizaje.
3. Probar el medidor y optimizarlo.
4. Finalizar el archivo de oro.
5. Programar y probar el PCB.

Paso 1: determinar el *ChemID*

Se debe encontrar un *ChemID* apropiado para la celda con la que se esté trabajando, debido a que de esta manera funciona mejor el algoritmo Impedance Track™ (INSTRUMENTS, 2022b).

Para determinar el *ChemID* de una celda se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Ir a buscar la base de datos de Texas Instruments si ya existe un *ChemID* para la celda con la que se estará trabajando. Para hacerlo es necesario descargar la base de datos más reciente que proporciones TI e instalarla en bqStudio. Una vez que se tenga la base de datos actualizada se debe buscar el modelo de la celda, apoyado de la descripción de la misma, de esta forma se determina el identificador químico que TI le asignó a esa celda. En la Figura 5 se muestra donde identificar los datos en bqStudio.
2. Si no es posible identificar un *ChemID*, será necesario utilizar la Calculadora de parámetros de medición Química de comparación (GPCCHEM), para encontrar un *ChemID* que se aproxime a la celda que se está utilizando. Para esto debe de seguirse la guía que proporciona TI *Simple Guide to Chemical ID Selection Tool (GPC)*
3. Si no es posible realizar ni (1) ni (2), las celdas se pueden mandar a TI para caracterizarlas y generar un *ChemID* personalizado.

Figura 5: Base de datos de identificadores químicos de bqStudio.



Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés en la configuración. Elaboración propia.

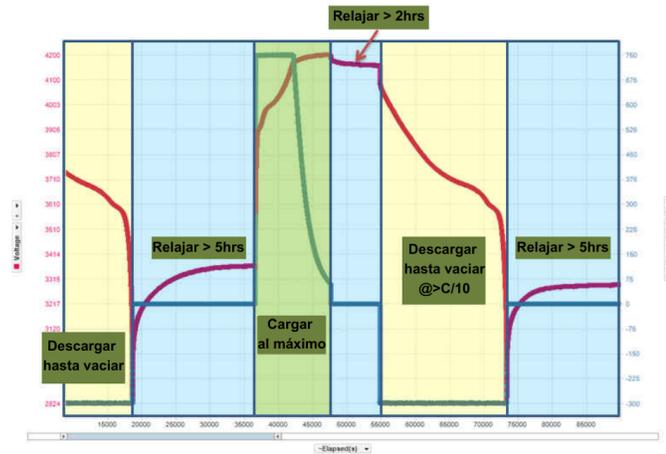
Paso 2: ciclo de aprendizaje del IC

Para una medición más precisa, el pack/celda debe pasar por un ciclo de aprendizaje (como se ve en la Figura 6) con el medidor (el IC BQ34Z100-G1). El medidor indica el progreso del ciclo de aprendizaje por medio bits de banderas de control, cada uno de los bits tiene un significado que se describe en las siguientes viñetas (INSTRUMENTS, 2022b).

- VOK: este bit rastrea cuando el medidor mide el voltaje de la batería. Este bit está normalmente activo cuando inicia una carga/descarga, y se desactiva cuando la descarga se detiene. Prácticamente indica cuando el medidor detecta que el voltaje de la batería/celda se ha estabilizado, y ha tomado una medida del OCV. Es una buena forma de rastrear cuando ocurre una medición del OCV.
- RUP_DIS: si está activado, el medidor no puede determinar su estado actual y realizar los cálculos, y no actualizará las tablas de resistencia de la batería/celda con el valor actual medido. Se desactiva cuando se realiza una buena medición de OCV ya que el indicador reconoce el estado de carga absoluto en función de este valor.
- FC: esta bandera indica si el medidor detecta o no que la batería/celda esté completamente cargada .
- **Update Status:** este registro de la *data flash* contiene el estado actual del ciclo de aprendizaje.

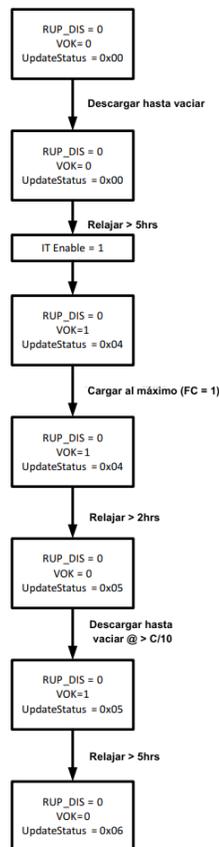
La actualización de las banderas de los registros, durante el ciclo de aprendizaje debe de seguir el mismo comportamiento que se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 7

Figura 6: Voltaje/corriente durante el ciclo de aprendizaje según TI.



Nota: esta figura es un diagrama de fases por las cuales debe de pasar el BQ34Z100-G1 para funcionar correctamente. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2022b).

Figura 7: Diagrama de flujo de los registros durante el ciclo de aprendizaje.



Nota: la Figura muestra el cambio que deben de tener [RUP_DIS], [VOK] y UpdateStatus(). Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2022b).

Problemas comunes durante el ciclo de aprendizaje

Durante el ciclo de aprendizaje suelen darse algunas fallas. Para diagnosticar un ciclo de aprendizaje fallido, es crítico configurar bqStudio para registrar los datos de la memoria RAM durante el ciclo cada ~ 5 -10 segundos. También es recomendable exportar automáticamente los datos de la *data flash* en intervalos menos frecuentes (cada ~ 1 -10 minutos). De esta manera, se recopila toda la información para determinar el punto de falla. Además de esto, es recomendable seguir los siguientes consejos:

1. Asegurarse de que la batería tenga un SOC bajo y esté relajada al ejecutar *IT_ENABLE*. Esto generalmente no es un problema, pero es importante.
2. Durante la carga, asegurarse de que el medidor detecte la condición de carga completa. Si después del ciclo de aprendizaje, *Update Status* no se ha actualizado a 05 (es decir, sigue siendo 04), esto puede ser el problema. El medidor detecta la condición de carga completa con tres criterios:
 - a) El voltaje de la batería está dentro de 0.1 V del Voltaje de Carga definido en bqStudio.
 - b) La corriente de la batería está por debajo de la Corriente de Reducción (*Taper Current*), según se define en BQStudio. la Figura 55 muestra cómo se ve la *Taper Current*.
 - c) La corriente de la batería permanece por debajo de esta *Taper Current* y por encima de la Corriente de Abandono (*Quit Current*) durante más de 40 segundos. Esto significa que la batería debe cargarse con una corriente significativa por debajo de la Corriente de Reducción durante casi un minuto. Si el cargador se apaga antes o justo después de que la corriente cae por debajo de la Corriente de Reducción, como se indica en bqStudio, entonces el medidor no detecta la condición “completa”.
3. Cuando la batería está completamente cargada, es necesario esperar el tiempo suficiente para que se borre el bit **VOK**. Esto generalmente son dos horas. El registro de la memoria RAM de datos muestra si esto ha ocurrido. *Update Status* permanecerá en 04 si esto no sucede. Si **VOK** nunca se establece, significa que no comenzó con una batería vacía, o no cargó completamente la batería, o el ciclo de carga se interrumpió de alguna manera (ver Paso 7 para información de carga).
4. Cuando comienza la descarga, asegúrate de que el bit **VOK** esté establecido. El medidor tiene el parámetro de la *data flash Dsg Threshold* que determina la corriente mínima necesaria para entrar en el estado de descarga. Si descarga con menos corriente que esto, el bit VOK no se establecerá. El medidor nunca entrará en el estado de descarga, y las tablas Ra nunca se actualizarán. *Update Status* será 05. Disminuye el *Dsg Threshold* en el flash de datos o aumenta la velocidad de descarga.
5. Durante la descarga, la tabla de resistencia nunca se actualiza. Si durante un ciclo de aprendizaje, el registro de la *Data Flash* muestra que la tabla de resistencia nunca cambió, esto indica que la corriente de descarga fue demasiado ligera. El medidor necesita medir una caída de voltaje significativa a través de la impedancia interna

de la batería antes de poder medir la impedancia. Si la carga es demasiado ligera, la medición falla y nunca obtendrá actualizaciones de la tabla de resistencia.

6. Durante la descarga, la tabla de resistencia puede actualizarse durante un tiempo y luego detenerse. Cuando esto sucede, se establece *RUP_DIS*. Esto indica que la elección del ID de química es incorrecta. Esto significa que el medidor ha medido un valor de resistencia que simplemente no tiene sentido (es decir, es negativo). Se necesita un ciclo de química para identificar el perfil de química correcto.
7. Información general del perfil de carga/descarga: La mayoría de los ciclos de aprendizaje fallan porque hay algo incorrecto con el perfil de carga/descarga. A continuación, se presentan sugerencias:
 - a) Asegurarse de que se corte la alimentación del cargador al completar la carga: La mayoría de los usuarios no tienen una configuración de automatización de ciclo de batería, por lo que se utiliza una fuente de alimentación de banco para cargar una batería durante la noche. Esto no se recomienda. El sistema sigue un perfil CC/CV, pero no hay un corte. Por lo tanto, cuando el medidor reconoce una carga completa e intenta realizar una medición OCV, en realidad mide el voltaje de la fuente de alimentación y afecta al sistema.
 - b) Perfil de carga CC/CV: En línea con lo anterior, asegúrate de usar un cargador con perfil CC/CV y valores razonables: tasa de carga rápida de C/2, corriente de reducción de C/100 a C/10.
 - c) Perfil de carga continua: Aunque no es estrictamente necesario, es recomendable asegurarse de que el perfil de carga sea continuo. Si el ciclo de carga se detiene, entonces el ciclo puede fallar. Si la batería se descarga por alguna razón durante este tiempo, el ciclo fallará.
 - d) Después de la carga, dejar la celda relajarse al menos dos horas SIN carga/cargador. Esperar lo suficiente para ver **VOK** desactivarse. Dos horas generalmente son suficientes.
 - e) Descarga con corriente constante de C/5. Usa una corriente de C/5. Esto es preferido, y puede haber algún error; sin embargo, si la corriente fluctúa demasiado alto o demasiado bajo, el ciclo puede fallar. Demasiado bajo es alrededor de C/10; demasiado alto es alrededor de C/3 a C/2. Las celdas más pequeñas (<800 mAh) son mucho menos tolerantes en este sentido.
 - f) Descarga continua: Esto es absolutamente necesario. Si la descarga se detiene antes de llegar al voltaje de terminación, el ciclo fallará.
 - g) Voltaje de terminación: Asegúrate de que cuando se alcance el voltaje de terminación, se retire la carga. Deja que la celda se relaje. Si la carga permanece conectada a la batería y hace que el voltaje de la batería caiga por debajo del nivel de terminación, no solo fallará el ciclo de aprendizaje, sino que también dañará la batería.
8. Si el *Impedance Track™* no está habilitado (*IT_ENABLE = 0*), las actualizaciones de *Qmax* aún pueden ocurrir si un período de relajación dura más de 5 horas.

Paso 3: probar el medidor y optimizar

Una vez completado el aprendizaje, el medidor de energía puede ser probado en un entorno de aplicación real para comenzar a optimizar el rendimiento en diferentes condiciones de temperatura y carga. TI ofrece la herramienta GPCRA0 como parte del Calculador de Parámetros del Medidor para ayudar a los usuarios. Para obtener más detalles, se debe consultar la Guía Sencilla de la Herramienta GPC Golden GG Maker en la Nota de Aplicación (SLUUBC9). Para operaciones a temperaturas muy bajas (normalmente por debajo de 5°C), la distribución de la temperatura del sistema puede desviarse de las condiciones de laboratorio, por lo que es necesario ajustar los parámetros de compensación de temperatura de resistencia. TI ofrece la herramienta GPCRB como parte del Calculador de Parámetros del Medidor para ayudar a lograr esto. Para obtener más detalles, consultar la Nota de Aplicación Golden GG Maker and Resistance Temperature (SLUUBD0).

Paso 4: finalizar el archivo de oro

Después de realizar todas las optimizaciones y completar la validación, el archivo dorado puede ser creado y exportado desde bqStudio en la pestaña “Golden Image”, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8: Pestaña de la imagen dorada en bqStudio.



Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés en la configuración. Elaboración propia.

5: Programar y probar el PCB

Una vez que el archivo dorado final esté listo, puede ser programado en el PCB del banco de baterías y luego probado directamente con el banco de baterías.

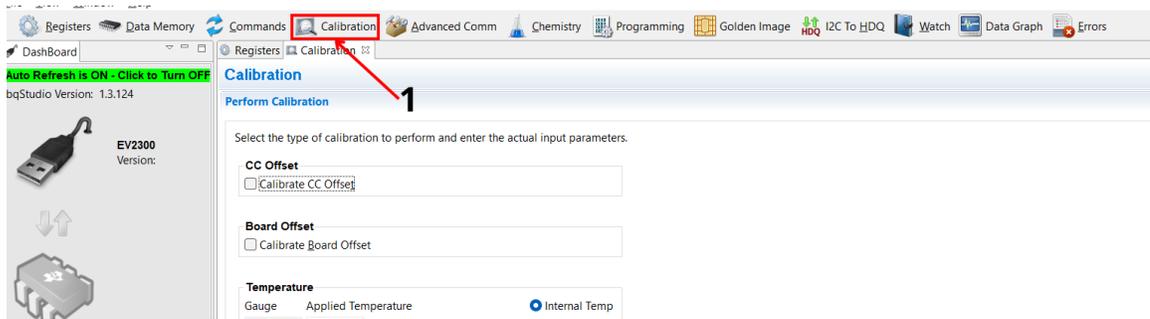
6.2.10. Configuración del IC desde bqStudio para realizar el ciclo de aprendizaje y pruebas de carga y descarga

Calibración para el *Gas Gauge*

Para que las mediciones que realice el IC sean correctas es necesario calibrarlo previamente a utilizarlo. Es importante ya haber realizado las conexiones que se muestra en la Figura 14. Los pasos de calibración son los siguientes:

Primero, se debe de abrir la pestaña de calibración, como se muestra en la Figura 9. Posteriormente se calibra el voltaje, para ello es necesario medir el voltaje entre la terminal

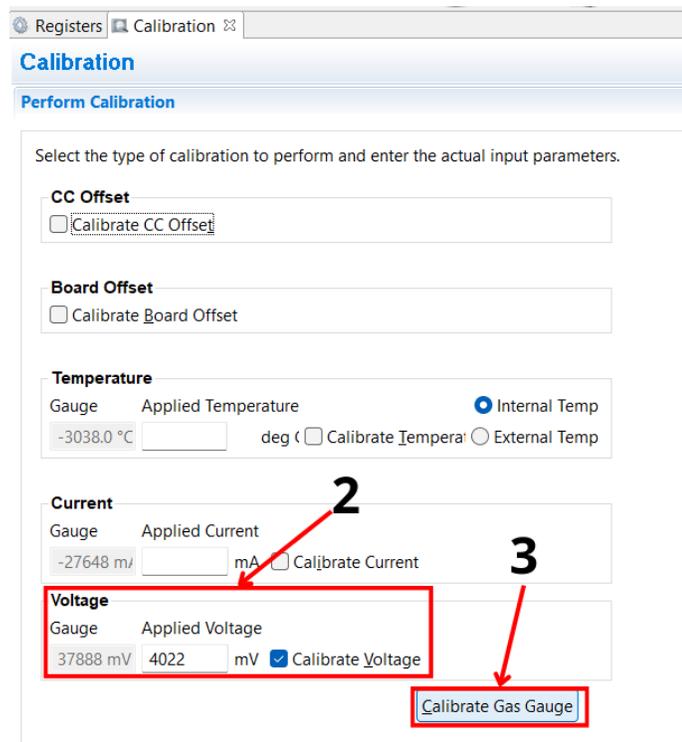
Figura 9: Paso 1: abrir la pestaña de calibración.



Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés para la calibración del BQ34Z100-G1. Elaboración propia, basado en instrucciones indicadas en (INSTRUMENTS, 2021b).

BAT+ y BAT- del integrado, es decir, el voltaje de la celda sin ninguna carga conectada. Este valor se coloca en en la casilla “*Applied Voltage*” y se selecciona la opción de “*Calibrate Voltage*”, esto se identifica como el recuadro 1 de la Figura 10, posteriormente se debe presionar el botón de “*Calibrate Gas Gauge*”, identificado como el recuadro 2 de la Figura 10, para iniciar con la calibración de voltaje (INSTRUMENTS, 2021b).

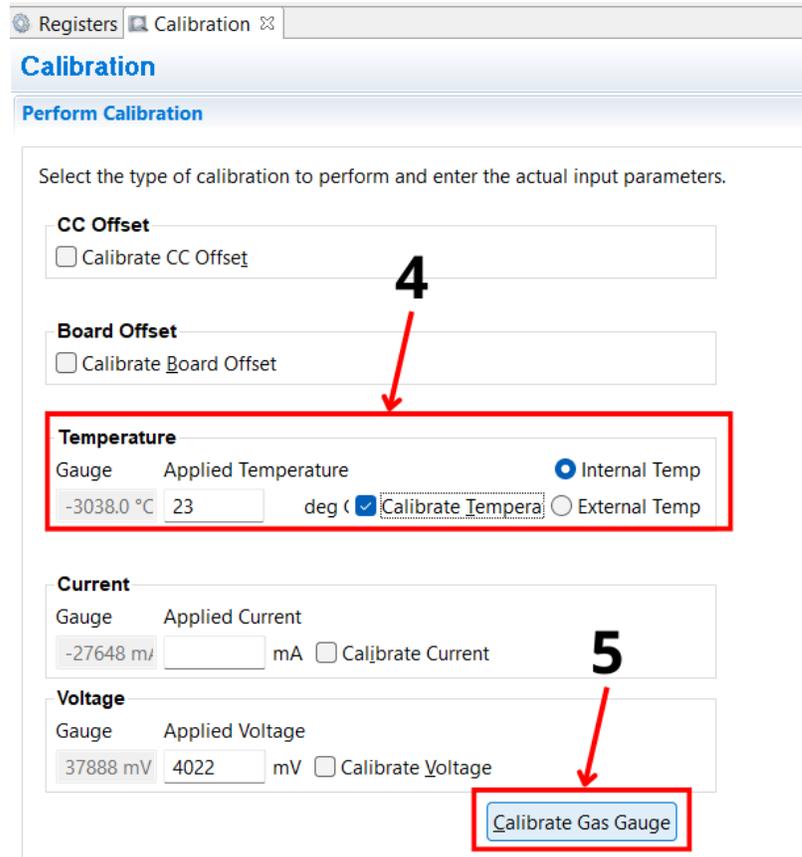
Figura 10: Paso 2: calibración de voltaje.



Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés para la calibración del BQ34Z100-G1. Elaboración propia, basado en instrucciones indicadas en (INSTRUMENTS, 2021b).

Una vez con el voltaje calibrado, se debe de des-seleccionar la opción de “*Calibrate Voltage*”. Como tercer paso se debe calibrar la temperatura. El procedimiento es similar, con la única diferencia de que se debe colocar la temperatura ambiente en la casilla de “*Temperature*” y seleccionar las opciones “*Calibrate Temperature*” e “*Internal Temp*”, esta última para indicarle al IC que se utilizará el sensor de temperatura que trae incorporado. El resto del procedimiento es el mismo que el del paso 2 y se muestra en la Figura 11.

Figura 11: Paso 3: calibración de temperatura.



Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés para la calibración del BQ34Z100-G1. Elaboración propia, basado en instrucciones indicadas en (INSTRUMENTS, 2021b).

Posterior a calibrar la temperatura, sigue el último parámetro a calibrar, la corriente. Para calibrarla, primero se debe ajustar el “*CC Offset*” y el “*Board Offset*” sin aplicar ninguna corriente, como se muestra en la Figura 12. Una vez que esto se realizó, se deben de des-seleccionar las opciones de “*CC Offset*” “*Board Offset*”. Luego se selecciona “*Calibrate Current*”, se aplica una corriente de descarga de -2000 mA y se inicia la calibración, los pasos se presentan en la Figura 13.

Figura 12: Paso 4: calibración de corriente - desfase CC y de placa.

The screenshot shows the 'Calibration' window in bqStudio. The 'Perform Calibration' section is active. Under 'CC Offset', the 'Calibrate CC Offset' checkbox is checked and highlighted with a red box. A red arrow labeled '6' points to this checkbox. Under 'Board Offset', the 'Calibrate Board Offset' checkbox is also checked. The 'Temperature' section shows 'Internal Temp' selected. The 'Current' section has 'Calibrate Current' unchecked. The 'Voltage' section has 'Calibrate Voltage' unchecked. A red arrow labeled '7' points from the 'Calibrate Voltage' section down to a red-bordered box containing the 'Calibrate Gas Gauge' button.

Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés para la calibración del BQ34Z100-G1. Elaboración propia, basado en instrucciones indicadas en (INSTRUMENTS, 2021b).

Figura 13: Paso 5: calibración de corriente.

The screenshot shows the 'Calibration' window in bqStudio. The 'Perform Calibration' section is active, displaying several calibration options. The 'Current' section is highlighted with a red box and a red arrow pointing to it from the number '8'. The 'Current' section includes a 'Gauge' field with '-27648 mV', an 'Applied Current' field with '-2000 mA', and a checked 'Calibrate Current' checkbox. The number '9' is placed to the right of the 'Current' section. Below the 'Current' section is the 'Voltage' section, which includes a 'Gauge' field with '37888 mV', an 'Applied Voltage' field with '4022 mV', and an unchecked 'Calibrate Voltage' checkbox. A red arrow points from the number '9' to a 'Calibrate Gas Gauge' button, which is also highlighted with a red box.

Nota: esta Figura es una captura de pantalla de la interfaz gráfica de bqStudio que tiene resaltados los datos de interés para la calibración del BQ34Z100-G1. Elaboración propia, basado en instrucciones indicadas en (INSTRUMENTS, 2021b).

De esta forma, la calibración para las mediciones que realizará el IC queda completa, permitiendo así mediciones precisas.

6.3. Módulo de evaluación BQ34Z100EVM

Este módulo es un sistema completo de evaluación indicador de carga de amplio rango para el circuito integrado BQ34Z100-G1, utilizado en el monitoreo de químicas de iones de litio, hidruro metálico de níquel (NiMH) y Níquel cadmio (NiCd) cuando se combina con el adaptador de USB EV2300 ó EV2400 y el *software* que proporciona *Texas Instruments* llamado *bqStudio*. El módulo incluye otros componentes necesarios para monitorear y predecir la carga en una o más celdas en bancos de baterías. Una de las funciones más importantes es la posibilidad de acceder a los registros de la dataflash del BQ34Z100-G1 que permite caracterizar al banco de baterías, colocando las especificaciones energéticas del mismo y así programarlo para diferentes configuraciones de bancos. También sirve para registrar los datos de temperatura, voltaje, etc. de los ciclos para evaluación y evaluar la funcionalidad de la solución del algoritmo del BQ34Z100-G1 en diferentes condiciones de carga y descarga (INSTRUMENTS, 2021b).

Para hacer funcionar al módulo y probarlo es necesario tener un dispositivo capaz de comunicarse por medio de I^2C o HDQ y así interactuar con el sistema, tener el *software* de evaluación que proporciona Texas Instruments o bien un *software* con el que pueda hacerse la programación necesaria para acceder a los registros y programar el módulo, una batería con la química mencionada anteriormente, un cable USB para establecer la comunicación entre el módulo y la computadora, y una fuente DC que pueda proveer 50V y 3A de forma constante. Para iniciar las pruebas del módulo primero es necesario hacer la conexión adecuada de los pines dependiendo de la configuración en la que se trabajará. Al comprar el módulo de evaluación viene incluido con conectores que permiten hacer conexión de 1 par de pines (2 pines en serie), estos se utilizarán para hacer las conexiones pertinentes dependiendo del funcionamiento que se desee (INSTRUMENTS, 2021b).

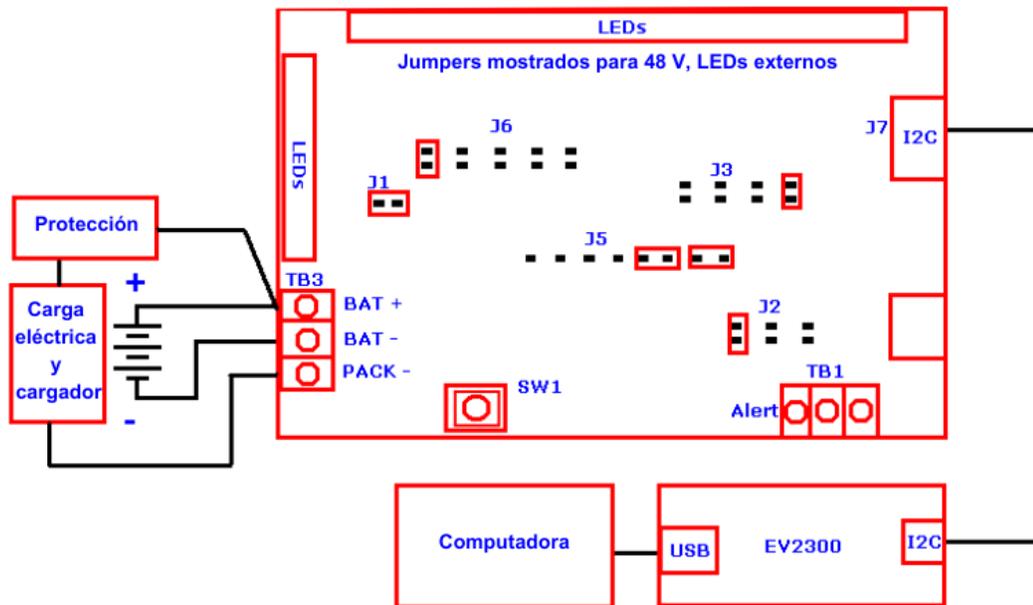
Texas Instruments provee un esquemático de conexiones para empezar con las pruebas del módulo de evaluación, sin embargo, no especifica el porqué de las conexiones. En la Figura 14 puede observarse el esquemático del que se habla. En los siguientes capítulos se describirá a detalle qué función tiene cada conexión y cómo afecta al uso del EVM.

6.3.1. Conexiones eléctricas del módulo de evaluación

En la Figura 14 se muestran las conexiones pertinentes para una configuración en la que se utilizará más de 5V, para ser específico, 48V. Lo que determina la cantidad de voltaje con la que se trabajará en la placa son los pines de J5 y de J2. J5 siempre debe conectarse en 2 pares de pines, los del lado izquierdo están identificados como $\leq 5V$, estos 2 pares deben de conectarse cuando se va a trabajar con más de 3V y menos de 5 voltios, en esta configuración no se conecta ningún par de pines de J2. Si fuera necesario trabajar con más de 5 voltios es imperativo conectar los otros 2 pares de pines de J5, los que están identificados como $> 5V$ y conectar en J2 el par de pines correspondiente al voltaje máximo con el que se trabajará, ya sea 16V, 32V o 48V. En la Figura 15 se puede observar de una manera más clara los pines descritos en este párrafo, donde las conexiones que se realizaron son las adecuadas para trabajar con menos de 5V (INSTRUMENTS, 2021b).

Las conexiones se realizan como se muestra en la Figura 14, en la terminal BAT+ se

Figura 14: Conexiones del EVM a una batería y un sistema de carga y cargador.



Nota: esta Figura muestra el esquemático de la conexión que se debe de hacer para probar el BQ34Z100EVM. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021b).

conecta la terminal positiva de la batería, la terminal positiva de la carga a alimentar y la terminal positiva del cargador. en BAT- se conecta la terminal negativa de la batería. Por último, en PACK- se debe de conectar la terminal de tierra de la carga y del cargador (INSTRUMENTS, 2021b).

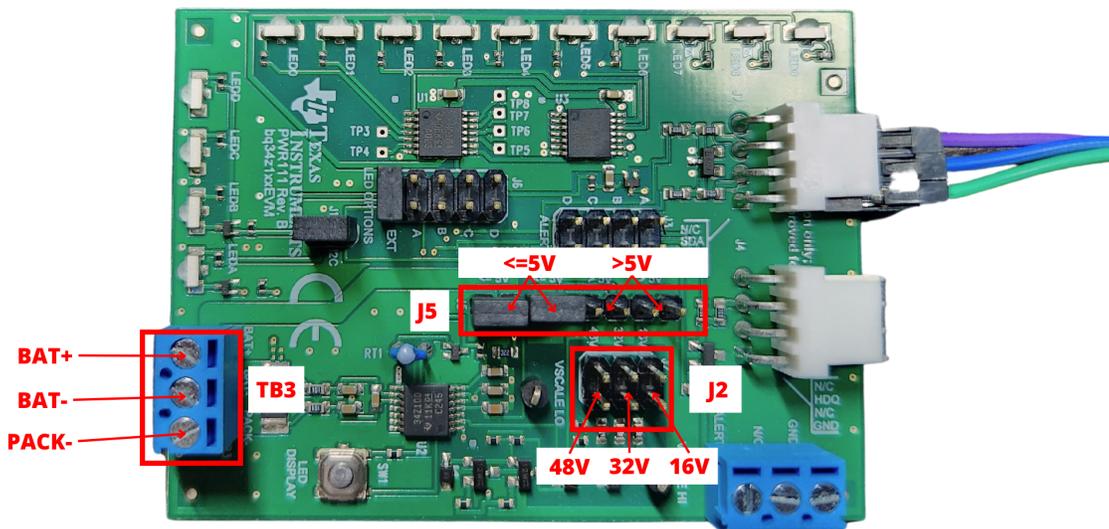
6.3.2. Conexiones de configuración del módulo de evaluación (EVM)

En esta sección se detallarán los diversos tipos de conexiones disponibles en el módulo de evaluación, se explorarán sus implicaciones y se explicará su relación con el IC BQ34Z100-G1. Al configurar el funcionamiento de la placa de desarrollo, resulta fundamental establecer las conexiones adecuadas para aprovechar al máximo sus capacidades, lo que incluye el acceso a interrupciones y modos de alerta que informan sobre eventos relevantes en la batería.

Conexiones de interfaz del EVM

Una de las primeras conexiones a considerar, especialmente al utilizar un dispositivo distinto al EV2300/EV2400, es la de la terminal a través de la cual se transmitirá la información, ya sea mediante el protocolo I^2C o HDQ. En la Figura 16 se ilustra la forma de realizar la conexión para utilizar el protocolo I^2C . Además, en la Figura 17 se muestra la ubicación de los pines que se deben de conectar al momento de configurar un registro de alerta o de uso de LEDs dentro de la *Data Flash*.

Figura 15: Esquema de conexiones eléctricas para BQ34Z100EVM.



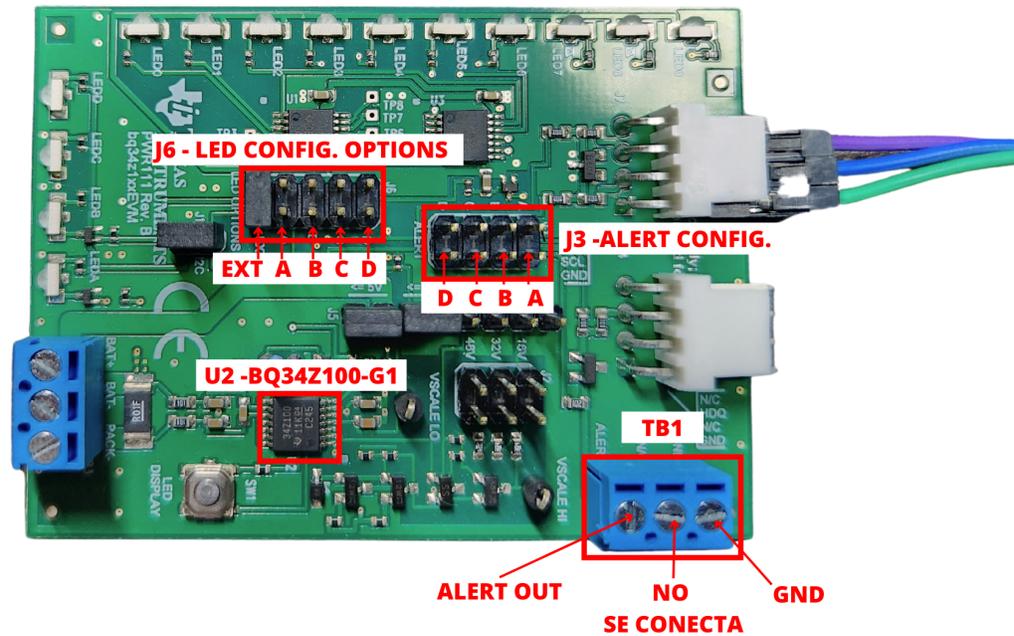
Nota: esta Figura muestra dónde se encuentran físicamente los pines de conexión eléctrica del BQ34Z100EVM, además muestra los jumpers que deben conectarse en J5 para trabajar con menos de 5 V. Elaboración propia.

Figura 16: Esquema de conexiones utilizar protocolo I²C en el BQ34Z100EVM.



Nota: esta Figura muestra dónde se encuentran físicamente los pines de transmisión de datos del BQ34Z100EVM. Elaboración propia.

Figura 17: Esquema de conexiones para configuraciones en el BQ34Z100EVM.



Nota: esta Figura muestra dónde se encuentran físicamente los pines de configuraciones de registros de datos del BQ34Z100EVM. Elaboración propia.

Conexiones de alerta del EVM

Continuando con las configuraciones, se verá la implicación de los pines de configuración de alerta. La salida de *ALERT* (TB1) del módulo, es el pin encargado de brindar señales de interrupciones activas de bit bajo, es decir, 0 cuando hay una alerta. El pin de *ALERT* es una salida de drenaje abierto y se debe conectar una resistencia pull-up a TB1 para utilizar esta función.

Para configurar las alertas es necesario activarlas desde el registro de *Alert Configuration*, este registro es de 2 bytes, y dependiendo de qué bits se activen (se coloquen en 1) esas serán las señales que activarán la interrupción, los bits de este registro se muestra en el Cuadro 7. Por defecto todas las interrupciones viene desactivadas y, deben de activarse en la *Data Flash* del IC en *Alert configuration*. Para ver cómo configurar la *Data Flash* ir a la sub sección *Registros de Data Flash del IC* en la página 18. Una vez que ya se configuraron las alertas, por ejemplo, si se activa la alerta de sobre calentamiento en condición de carga [OTC], el pin de alerta dará una señal 0, indicando que ocurrió un evento. Por último, la forma de hacer las conexiones en el módulo BQ34Z100EVM es por medio de los pines que se encuentran en J3, sin embargo, antes de hacer las conexiones, es necesario saber qué pines del IC dan las señales de alerta y, por lo tanto, los pares de pines que se deben de conectar en J3. El par de pines identificado como D está conectado al pin P5 de IC, el B está conectado a P2, el A a P6 y el C a P4 (INSTRUMENTS, 2021a).

El pin del IC que entregue la señal dependerá del modo en que se configure el *LED/Comm Configuration*, estos modos se muestran en el Cuadro 6, y también su relación con el pin de salida de alerta. Por ejemplo, si se configuran los bits para el modo 0, es decir, ningún LED, el par de pines que habría que conectar en el módulo serían los correspondientes a B, de esta forma cuando ocurrieran interrupciones se podría utilizar el pin de ALERT OUT. Si se selecciona el modo 1 de igual forma se deben puentear los pines de B; si se selecciona el modo 2 se deben puentear los pines de A; para el modo 3 los pines de D y para el modo 4 los pines de C. Estas son consideraciones provenientes del propio diseño del módulo de evaluación. En la Figura 56 se tiene un fragmento de las conexiones del módulo.

Cuadro 6: Pines de señales de alerta y modos de LED.

Modo	Descripción	PIN ALERT	Nombre de PIN ALERT	Código Hex de registro de configuración	Comentarios
0	No LED	1	P2	0	
1	Un solo LED	1	P2	0	
2	4 LEDs	11	P6	2	Se necesitan filtros y FETs para eliminar errores de pulso de temperatura en el sensado. Ver sección 8.2 de (INSTRUMENTS, 2022b)
3	Expansión a 5-LEDs por medio de un anfitrión común con I ² C	12	P5	43	
3	Expansión a 10-LEDs por medio de un anfitrión común con I ² C	12	P5	93	
4	Expansión a 5-LEDs por medio de un anfitrión común con HDQ	13	P4	44	
4	Expansión a 10-LEDs por medio de un anfitrión común con HDQ	13	P4	94	

Nota: este Cuadro muestra la relación que hay entre el modo de funcionamiento de LEDs, el pin de salida de alerta y el funcionamiento del modo. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2022b).

Cada bit del Cuadro 7 tiene un título que indica a qué alerta pertenece, ya sea una alerta de temperatura, energía, etc. Las definiciones de lo que representa cada bit se muestra después del Cuadro 7.

Cuadro 7: Definición de Bits del registro de Alert Configuration.

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
Bit más significativo	OTC	OTD	BAT_HIGH	BATLOW	CHG_INH	XCHG	FC	CHG
Bit menos significativo	OCVTAKEN	RSVD	RSVD	[CF]	RSVD	RCA	EOD	DSG

Nota: esta Cuadro muestra de qué bits está compuesto el registro de *Alert Configuration*. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

- SVD: reservado.
- OTC: se detecta sobre calentamiento en condición de carga. \overline{ALERT} es habilitado cuando [OTC] se activa.
- OTD: se detecta sobre calentamiento en condición de descarga. \overline{ALERT} es habilitado cuando [OTD] se activa.

- BAT_HIGH: bit alto de batería (Battery High bit) que indica una condición de alto voltaje en la batería. El parámetro que establece el punto de corte es [CELL BH], de la *Data Flash*. \overline{ALERT} es habilitado cuando [BAT_HIGH] se activa.
- BATLOW: bit bajo que indica una condición de bajo voltaje en la batería. El parámetro que establece el punto de corte es [CELL BL], de la *Data Flash*. \overline{ALERT} es habilitado cuando [BATLOW] se activa.
- CHG_INH: inhibición de carga. Imposible de iniciar carga. Esto depende de la temperatura a la que esté operando la batería/celda. Los parámetros que establecen los puntos de corte son los registros de Configuración (*Configuration*) de la *Data Flash Chg Inhibit Temp High* (inhibición de carga por temperatura alta) y *Chg Inhibit Temp Low* (inhibición de carga por temperatura baja) \overline{ALERT} es habilitado cuando [CHG_INH] se activa.
- XCHG: carga no permitida. el bit \overline{ALERT} es habilitado cuando [XCHG] se activa.
- FC: se detecta carga completa. [FC] es activado cuando la terminación de carga se alcanza y **FC Set %** = -1 (ir a la sección 6.3.3 para entender los detalles de esta alerta) o *StateOfCharge()* es mayor a **FC Set %** y **FC Set %** no es -1. \overline{ALERT} es habilitado cuando [FC] se activa.
- CHG: carga rápida permitida. Se habilita el pin \overline{ALERT} cuando CHG se activa.
- OCVTAKEN: desactivado al entrar en el modo RELAX y establecido en 1 cuando se realiza la medición de [OCV] en el modo RELAX. \overline{ALERT} es habilitado cuando [OCVTAKEN] se activa.
- CF: bandera de condición encendida. \overline{ALERT} es habilitado cuando [CF] se activa.
- RCA: alarma de capacidad restante alcanzada. \overline{ALERT} es habilitado cuando [RCA] se activa.
- EOD: punto de corte de fin de descarga alcanzado. se habilita el bit \overline{ALERT} cuando [EOD] se activa.
- DSG: descarga detectada. se habilita el bit \overline{ALERT} cuando [DSG] se activa.

Conexiones de pantalla de LEDs (*LED display*) del EVM

El IC BQ34Z100-G1 puede manejar múltiples opciones para usar 1 a 16 LEDs como dispositivo de salida para desplegar el estado restante de carga (SOC), ó, si el bit [SOH_DISP] del paquete de configuración C (*Pack Configuration*, por su nombre en inglés) se activa, entonces el estado de salud (SOH) se desplegará. La Configuración del registro LED/COMM, que se muestra en el Cuadro 8, determina el comportamiento del modo de LEDs del IC, estos modos se describen a mayor detalle en el Cuadro 6 (INSTRUMENTS, 2021a).

Los Bits 0, 1, 2 son un código para uno de cinco modos. 0 = ningún LED, 1 = un solo LED, 2 = cuatro LEDs, 3 = LEDs externos con comunicación I^2C , 4 = LEDs externos con

Cuadro 8: *Bits de Configuración de LED/COMM.*

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
EXT_LED3	EXT_LED2	EXT_LED1	EXT_LED0	LED_ON	LED_Mode2	LED_Mode1	LED_Mode0

Nota: este Cuadro muestra los bits que se deben de activar del registro LED/COM dependiendo del modo de LED que se desee emplear. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2021a).

comunicación HDQ. Por defecto, el IC se encuentra en el modo 0, donde ningún LED está funcionando (INSTRUMENTS, 2021a).

Activar el Bit 3, [LED_ON], va a provocar que el LED *display* esté siempre encendido, excepto en el modo de un solo LED, donde esto no es aplicable. Cuando esté desactivado (valor predeterminado), el patrón LED solo se mostrará después de mantener presionado un botón de LED *display* por uno o dos segundos. El botón aplica 2.5 V desde REG25 (pin 7) hacia VEN (pin 2). El parámetro de Tiempo de Retención del LED (**LED Hold Time**), por su nombre en inglés se puede utilizar para configurar cuánto tiempo permanece encendida el LED *display* si [LED_ON] está desactivado. **LED Hold Time** configura el intervalo de actualización del LED *display* si [LED_ON] está activado (INSTRUMENTS, 2021a).

Los Bits 4, 5, 6 y 7 forman un código binario para el número de LEDs externos. El código 0 está reservado. Los códigos del 1 al 15 representan de 2 a 16 LEDs externos. Por lo tanto, el número de LEDs externos es 1 + el valor del código binario de 4 bits. La visualización de Capacidad Restante *RemainingCapacity()* o Estado de Salud *StateOfHealth()* se dividirá de manera equitativa entre el número seleccionado de LEDs (INSTRUMENTS, 2021a).

Cada uno de los modos de LEDs implica diferentes comportamientos, estos se describen a continuación:

- Modo de un solo LED: al detectar un valor Analógico o Digital (A/D) que representa 2.5 V en el pin VEN, el modo de un solo LED alternará el LED como ciclo de trabajo dentro de un período de 1 s, donde cada 1 % de RSOC es un tiempo flanco positivo de 7.8125 ms. Por ejemplo, el 10 % de RSOC o SOH tendrá el LED encendido durante 78.1 ms y apagado durante 921.9 ms. El 90 % de RSOC o SOH tendrá el LED encendido durante 703.125 ms y apagado durante 296.875 ms. Cualquier valor > 90 % se mostrará como 90 %.
- Modo de cuatro LEDs: al detectar un valor A/D que representa 2.5 V en el pin VEN, el modo de cuatro LEDs mostrará el RSOC o SOH mediante la activación de los pines RC2 (LED1), RC0 (LED2), RA1 (LED3) y RA2 (LED4) de manera proporcional, donde cada LED representa el 25 % de la capacidad de carga restante. Por ejemplo, si RSOC o SOH = 67 %, se iluminarán tres LEDs.
- Modo de LEDs externos: al detectar un valor A/D que representa 2.5 V en el pin VEN, el modo de LEDs externos transmitirá el RSOC a través de un SN74HC164 (para 2-8 LEDs) o dos dispositivos SN74HC164 (para 9-16 LEDs) utilizando un enfoque bit-banged con RC2 como reloj y RC0 como datos (vea la Figura 14). Los LEDs se encenderán durante un número de segundos definido en un parámetro de *data flash*. Consulte la Hoja de Datos del SN54HC164, SN74HC164 8-Bit Parallel-Out Serial Shift Registers (SCLS115E) para obtener detalles sobre estos dispositivos.

Después de configurar los registros de la *data flash* y seleccionar el modo de funcionamiento de LEDs, se debe conectar el par de pines en J6 (ver Figura 14) correspondientes a la configuración que se programó. Para el modo de un solo LED, se debe conectar el par de pines identificados como A. Para el modo de cuatro LEDs, es necesario colocar una interconexión (*jumper*) en los pares de pines A, B, C y D (Nota: es importante saber que esta configuración está disponible únicamente cuando se está usando HDQ como modo de comunicación) (INSTRUMENTS, 2021a).

6.3.3. Indicación de terminación de carga o descarga de la batería/celda

Para el correcto funcionamiento del BQ34Z100-G1, la tensión de carga por celda de la batería debe ser especificada por el usuario en *Cell Charging Voltage*. El valor predeterminado para esta variable es *Charging Voltage* = 4200 mV. Este parámetro debería ajustarse a la tensión de carga recomendada para todo el conjunto de baterías dividida por el número de celdas en serie. El dispositivo detecta la terminación de carga válida de una de tres maneras (INSTRUMENTS, 2021a):

1. Durante dos períodos consecutivos de *Current Taper Window*, y *AverageCurrent()* es menor que *Taper Current* y.
2. Durante los mismos períodos, el cambio acumulado en capacidad > 0.25 mAh/*Current Taper Window* y.
3. *Voltage()* es > *Charging Voltage* - *Charging Taper Voltage*. Cuando esto ocurre, el bit [CHG] de *Flags()* se borra. Además, si el bit [RMFCC] de *Pack Configuration* está activado y *RemainingCapacity()* se establece con el mismo valor que *FullChargeCapacity()*.

Método de temperatura delta ($\Delta T/\Delta t$):

Para $\Delta T/\Delta t$, el BQ34Z100-G1 detecta un aumento de temperatura durante varios segundos. La configuración de $\Delta T/\Delta t$ es programable en el paso de temperatura, *Delta Temp* ($0^{\circ}C - 25.5^{\circ}C$), y el paso de tiempo, *Delta Temp Time* ($0 s - 1000 s$). Configuraciones típicas para $1^{\circ}C/\text{minuto}$ incluyen $2^{\circ}C/120s$ y $3^{\circ}C/180s$ (predeterminado). Se pueden usar tiempos más largos para una mayor resolución de la pendiente (INSTRUMENTS, 2021a).

Además del temporizador de $\Delta T/\Delta t$, un temporizador de espera comienza cuando la batería se carga con más de *Holdoff Current* (por defecto es 240 mA) y la temperatura está por encima de *Holdoff Temp*. Hasta que este temporizador expire, la detección de $\Delta T/\Delta t$ se suspende. Si *Current()* baja por debajo de *Holdoff Current* o *Temperature()* por debajo de *Holdoff Temp*, el temporizador de espera se reinicia solo cuando las condiciones de corriente y temperatura se cumplen nuevamente (INSTRUMENTS, 2021a).

Método de voltaje delta negativo ($-\Delta V$):

Para el delta de voltaje negativo, el BQ34Z100-G1 detecta una terminación de carga cuando la tensión del paquete baja durante la carga por *Cell Negative Delta Volt* durante un período de *Cell Negative Delta Time*, durante el cual *Voltage()* debe ser mayor que

Cell Negative Qual Volt. Cuando ocurre cualquiera de estas condiciones, el bit *[CHG]* de *Flags()* se borra. Además, si el bit *[RMFCC]* de *Pack Configuration* está activado y *RemainingCapacity()* se establece igual a *FullChargeCapacity()*. Para los LEDs externos que utilizan la opción de registro de desplazamiento, se debe colocar un único puente en EXT. En todos los casos en los que se utilice uno o más LEDs, coloque un puente en el encabezado J1 para proporcionar energía al LED, como se muestra en la Figura 14) (INSTRUMENTS, 2021a).

7.1. Metodología de desarrollo

Para el desarrollo de las funciones de la librería que se encuentra en la sección 13.1 de Anexos 14 se comenzó con la investigación del funcionamiento del IC, utilizando como documentos de referencia los manuales oficiales que provee Texas Instruments de los dispositivos. Un vez que se identificaron todas las funciones y comandos necesarios, se comenzó con la estructuración del código y se separó en secciones. El motivo de esto, fue facilitar el entendimiento de las funciones de la librería, pues cada sección clasifica las tareas del conjunto de comandos que yacen dentro de ella. Las secciones en que se dividió el código fueron:

- Interfaz: las funciones que están en esta sección están relacionadas a la estimación de rango, comunicaciones, registro de datos, informes y calibración.
- Sensado y control de alto voltaje: en esta sección, se encuentran las funciones encargadas de medir voltaje, corriente, temperatura; control de contactor, precarga; detección de fallos fundamentales y gestión térmica.
- Protección: en esta sección se encuentra el código de las funciones contra: sobrecarga, sobre-descarga, sobre-corriente, corto circuito y temperaturas extremas.
- Administración de rendimiento: estimación del estado de carga (SOC), cálculo del límite de potencia y balance/equilibrado de celdas.
- Diagnóstico: detección de abuso, estimación del estado de salud (SOH) y estado de vida (SOL).

Las secciones, además de facilitar la navegación por el código, también cumplen con el propósito, de que en el futuro, se sepa dónde agregar el resto de funciones necesarias para crear un BMS.

7.1.1. Funciones privadas de la librería

Se desarrollaron funciones que sirven como la estructura fundamental del sistema de diagnóstico. Estas funciones desempeñaron un papel crucial en la implementación del *firmware*, ya que su objetivo principal es la lectura y escritura de comandos. Aunque estas funciones no son accesibles para el usuario, forman la base sobre la cual se construyen las funciones que el usuario puede ejecutar, las funciones principales son las que se describen a continuación.

El Algoritmo 1, se diseñó para permitir la lectura y escritura del anfitrión hacia el IC. El objetivo de la forma en que se estructuró la función, fue aprovechar la conveniencia de que los comandos de datos estándar (ver Capítulo 6, apartado 6.2) están compuestos de 2 bytes consecutivos. Por ejemplo, para acceder a la medición de voltaje el comando de lectura es 0x08/0x09, por lo tanto, el comando que se implementó fue `bq34z100::Read(0x08, 1)`.

Algoritmo 1 Función `bq34z100::Read(add, length)`

```

returnVal ← 0
for i desde 0 hasta length do
  Comenzar Transmisión  $I^2C$  hacia BQ34Z100
  Escribir ( $add + i$ ) en el bus  $I^2C$ 
  Finalizar Transmisión  $I^2C$ 
  Solicitar datos desde BQ34Z100 de 1 byte
  Leer el byte recibido desde el bus  $I^2C$            ▷ Desplaza y acumula el byte leído en
returnVal
  returnVal ← returnVal + (byteLeído  $\ll$  (8 · i))
end for
Devolver returnVal

```

Otro algoritmo fundamental que se diseñó fue el Algoritmo 2. La función de este es similar a la del Algoritmo 1, con la diferencia de que este se utiliza para acceder a datos de control como: entrar en modo de calibración, forzar al dispositivo a medir datos de calibración y reportar información del dispositivo. La forma en que se ingresan las direcciones es tal cual aparecen en (*datasheet*), por ejemplo para entrar al modo de calibración la dirección del comando es 0x0081, entonces en la función se escribiría de la siguiente forma → `bq34z100::Control(0x00, 0x81)`.

7.1.2. Funciones de la librería para diagnosticar celdas Li-Ion

Las funciones destinadas al diagnóstico fueron más sencillas de implementar. Utilizando la estructura que se construyó, el formato de la mayoría de las funciones es el mismo que se ve en el Algoritmo 3. Las principales diferencias entre una y otra función son las operaciones que hay que realizar con el dato que se recibe. Por ejemplo, la función `getVoltage()` recibe un

Algoritmo 2 Función `bq34z100::Control(subcommand1, subcommand2)`

Iniciar Transmisión I^2C hacia BQ34Z100
Escribir 0x00 en el bus I^2C
Escribir `subcommand2` en el bus I^2C
Escribir `subcommand1` en el bus I^2C
Finalizar Transmisión I^2C
Iniciar Transmisión I^2C hacia BQ34Z100
Escribir 0x00 en el bus I^2C
Finalizar Transmisión I^2C
Solicitar datos desde BQ34Z100 de 2 bytes
Leer el primer byte recibido desde el bus I^2C
Leer el segundo byte recibido desde el bus I^2C
Combinar los bytes leídos para formar `temp`
Devolver `temp` (dato en decimal)

entero sin signo con valor entre 0 y 65535 mV, pero al desplegar los datos crudos (*rawData*) directamente con la función `Serial.print()` de Arduino, el resultado no es legible, por es motivo dentro de la función `getVoltage()` se realizan una serie de operaciones que se aplican directamente a *rawData* para convertir la variable en algo entendible. Esto se realizó con el fin de que fuera más sencillo implementar las funciones de la librería, para que el usuario final solo tenga que usar `Serial.print()`. Como se ve en el Algoritmo 4, las operaciones que se realizan son simplemente pasar *rawData* a un formato legible.

Algoritmo 3 Función `bq34z100::getSOC()`

Declarar `SOC` como tipo `uint8_t`
Asignar a `SOC` el valor retornado por `Read(0x02, 1)`
Retornar `SOC`

Algoritmo 4 Función `bq34z100::getVoltage()`

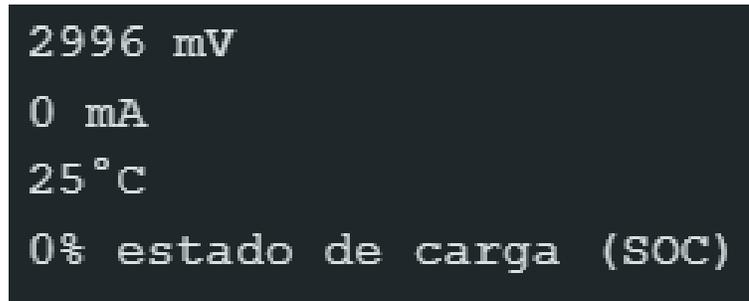
Declarar `rawData` como tipo `uint16_t`
Leer `rawData` como el resultado de `Read(0x08, 1)` ▷ Obtiene el voltaje en formato UNSIGNED INTEGER, donde el voltaje máximo legible es 65535 mV
Declarar `maxRawValue` como constante de tipo `uint16_t` y asignarle el valor 65535 ▷ Valor máximo en formato sin signo
Declarar `maxVoltage` como constante de tipo `float` y asignarle el valor 65535.0 ▷ Voltaje máximo en milivoltios
Declarar `voltage` como tipo `float` y asignarle el valor $(rawData/maxRawValue) \times maxVoltage$
Retornar `voltage` ▷ Retorna el valor del voltaje en formato de punto flotante

7.2. Forma de validar el funcionamiento del *firmware*

Una vez que se crearon las funciones de comunicación 7.1.1, fue necesario comprobar que funcionaran correctamente. La forma de llevar a cabo esta validación, fue realizando

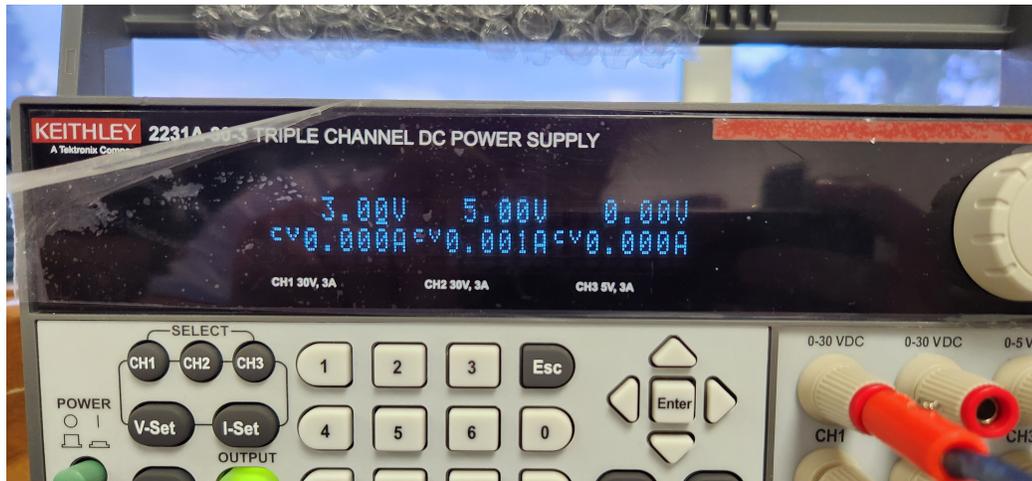
mediciones de voltaje, esto se logró utilizando una fuente de voltaje KEITHLEY 2231A-30-3, variando el voltaje entre 2.7 V y 4 V y utilizando la función `getVoltage()` para medir el voltaje desde el IC. Los resultados que se obtuvieron se observan en la Figura 18, donde se ve el voltaje medido, la corriente, la temperatura y SOC (el SOC es 0 debido a que el IC no detecta la química de una batería). En la Figura 19 se muestra el voltaje que se colocó en la fuente. La medición del voltaje que realizó el IC fue de 2996 mV, y el voltaje que la fuente entregó fue de 3000 mV, esto deja un porcentaje de error de la medición de tan solo 0.13%. Como primera verificación, se concluyó que tanto la función de medición `getVoltage()`, como la función de comunicación `Read()` funcionan de forma adecuada.

Figura 18: Lectura de datos utilizando un ESP32 y el integrado BQ34Z100-G1.



Nota: esta Figura muestra una lectura de datos realizada con el BQ34Z100EVM y el firmware que se desarrolló. Elaboración propia.

Figura 19: Voltaje utilizado para prueba de validación de firmware.



Nota: esta Figura muestra una lectura de voltaje que proporcionó la fuente de poder KEITHLEY durante las pruebas de funcionamiento de firmware. Elaboración propia.

Posteriormente a realizar mediciones, y comprobar que los datos capturados fueran adecuados se comprobó la otra función de comunicación I^2C , `Control()`. Para llevar a cabo esta validación, primero se definió qué registros se iban a utilizar, para posteriormente comparar qué resultado se obtenía utilizando el módulo de interfaz que distribuye Texas

Instruments (EV2400) al leer los registros estipulados. Para poder utilizar el EV2400 fue necesario verificar la versión de *firmware* que tiene el Módulo, para ello fue necesario seguir la guía proporcionada por Texas Instruments, EV2400 EVM *Interface Board* en el capítulo 3 de la *datasheet* del módulo. Esta guía tiene los pasos detallados para actualizarlo, esto con el fin de que se esté trabajando con la versión más reciente y evitar errores.

Una vez que se actualizó el módulo EV2400, se conectó la placa BQ34Z100EVM. El EVM se conectó de la misma forma en la que se conectó para la primera prueba. Posterior a realizar las conexiones, se utilizó la aplicación de bqStudio para acceder al valor de los registros de control de control del estado (*Control Status*) y Banderas (*Flags*) del IC. Los resultados que se obtuvieron del módulo EV2400 son los que se muestran en la Figura 20, estos están encerrados en un recuadro rojo. Los bloques verdes equivalen a un bit 0, los bloques rojos a un bit 1 y los bloques grises a bits reservados.

Figura 20: Valor de registros de control del BQ34Z100-G1 utilizando EV2400.

Bit Registers		Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Name	Value								
Control Status (high)	0x0014	RSVD	FAS	SS	CALEN	CCA	BCA	CSV	RSVD
Control Status (low)		RSVD	RSVD	FULLSLEEP	SLEEP	LDMD	RUP_DIS	VOK	QEN
Pack Configuration (high)	0x0161	RESCAP	CAL_EN	SCALED	RSVD	VOLSEL	WAKE	RSNS1	RSNS0
Pack Configuration (low)		RFACTSTEP	SI_FFP	RMFCC	NIDT	NIDV	PR_RESTART	GNDSFI	TFMPS
Flags (high)	0x0100	OTC	OTD	BATH	BATLOW	CHG_INH	XCHG	FC	CHG
Flags (low)		OCVTAKEN	RSVD	RSVD	CF	RSVD	SOC1	SOCF	DSG
Flags B (high)	0xFFFF	SOH	LIFE	FIRSTDOD	RSVD	RSVD	DODEOC	DTRC	RSVD
Flags B (low)		RSVD	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD

Nota: esta Figura muestra el valor leído desde el EV2400 de los registros encerrados en los recuadros rojos. Los valores que se muestran son los que el BQ34Z100G1 traía por defecto. Elaboración propia.

Utilizando la función *Control()* que se desarrolló para el ESP32, al acceder al registro de *Control Status* se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 21. La secuencia de bits que se obtuvo (10100), fue la misma que la que se extrajo utilizando el módulo EV2400. De la misma forma, al acceder al registro de *Flags* el resultado es el que se muestra en la Figura 22, donde de nuevo, la secuencia de bits (100000000) obtenida fue la misma que la que se leyó con el EV2400. En conclusión, las dos funciones estructurales que se desarrollaron funcionan de forma adecuada, además de que se comprobó la forma en la que hay que escribir los comandos desde el ESP32 para acceder a los registros del IC.

Figura 21: Valor de registro de *Control Status* del BQ34Z100-G1 utilizando ESP32.

```
Message (Enter to send message to 'Node32s' on '
--
CONTROL STATUS FLAGS
10100
Device type
14
CONTROL STATUS FLAGS
```

Nota: esta Figura muestra el valor leído desde el ESP32 del registro *Control Status*. Se encerró en un recuadro rojo el valor de interés. Elaboración propia.

Figura 22: Valor de registro de *Flags* del BQ34Z100-G1 utilizando ESP32.

```
10000000
Gas Gauge Status register (FLags)
100000000
Gas Gauge Status register (FLags)
```

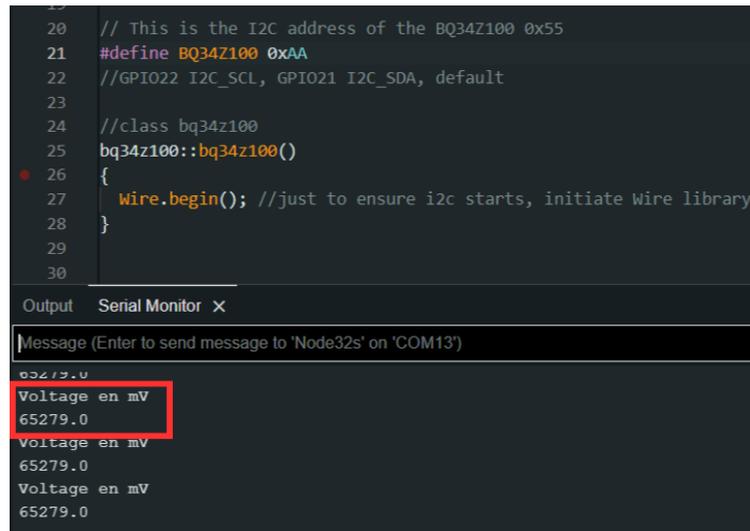
Nota: esta Figura muestra el valor leído desde el ESP32 del registro *Flags*. Se encerró en un recuadro rojo el valor de interés. Elaboración propia.

7.3. Hallazgos

En las primeras pruebas de comunicación las lecturas que se obtenían no eran congruentes con el resultado que se esperaba. Por ejemplo, al utilizar la función *getVoltage()* la lectura del voltaje resultaba en 3 V, sino en una saturación, es decir que se leía el voltaje máximo que el IC es capaz de sensar. En la Figura 23 se muestra el resultado obtenido. Esto representó un problema grave, pues no se sabía si el problema eran las funciones de comunicación *I²C* que se desarrollaron. Entonces, para comprobar que la comunicación de *I²C* se estuviera dando de forma adecuada se desarrolló otra función, esta fue la se observa en el Algoritmo *TryCommunication()* 5. Con ella, fue posible identificar un resultado interesante.

La función *TryCommunication()* realiza pruebas de comunicación *I²C*, iterando con todas las direcciones posibles que se puedan construir con un byte, en concreto, prueban

utilizar una dirección hexadecimal, se manda vía I^2C y espera una respuesta, si no hay respuesta en la dirección a la que se mandó la solicitud, se prueba con la subsecuente dirección superior. Si no se encuentra ninguna dirección que de una respuesta, el código indica que no se ha detectado ningún chip. Y, como se mencionó anteriormente, esta función dio un resultado intrigante. Según la *datasheet* del IC BQ34Z100-G1 del integrado, se esperaría que da una respuesta en la dirección 0xAA ó 0xAB, pues son las direcciones que Texas Instruments menciona que hay que utilizar para poder comunicarse desde un anfitrión (*host*), que en este caso fue el ESP32, hacia el IC BQ34Z100-G1. Sin embargo, el resultado que se obtuvo de *TryCommunication()* es el que se muestra en la Figura 24; evidentemente, la dirección que se obtuvo no fue la que se esperaba, pero al utilizar esa dirección y utilizar de nuevo la función *getVoltage()* se obtuvieron lecturas congruentes, como se observó en el Capítulo 7.2.



```
20 // This is the I2C address of the BQ34Z100 0x55
21 #define BQ34Z100 0xAA
22 //GPIO22 I2C_SCL, GPIO21 I2C_SDA, default
23
24 //class bq34z100
25 bq34z100::bq34z100()
26 {
27     Wire.begin(); //just to ensure i2c starts, initiate Wire library
28 }
29
30
```

Output Serial Monitor x

Message (Enter to send message to 'Node32s' on 'COM13')

032/3.0
Voltage en mV
65279.0
Voltage en mV
65279.0
Voltage en mV
65279.0

Figura 23: Voltaje leído utilizando 0XAA como dirección del BQ34Z100-G1.

Nota: esta Figura muestra el valor de voltaje que se obtuvo al utilizar 0XAA como dirección de comunicación I^2C . Elaboración propia.

Figura 24: Dirección del BQ34Z100-G1 obtenida utilizando la función *TryCommunication()*.

```
26
27 void loop()
28 {
29   //Serial.println("Voltage en mV");
30   //dtostrf(BQ34Z100.getVoltage(),6,1,VOLTAGE);
31   //Serial.println(VOLTAGE);
32   BQ34Z100.TryCommunication();
33   //Serial.println("Device type");
34   //Serial.println(BQ34Z100.DeviceType(), BIN);
35   delay(2000); //delay 2 seconds
}

Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'Node32s' on 'COM13')
-----
done
Scanning...
I2C device found at address 0x55
done
Scanning...
I2C device found at address 0x55
done
```

Nota: esta Figura muestra la dirección de comunicación que el algoritmo encontró tras hacer múltiples pruebas de comunicación entre el ESP32 y el BQ34Z100-G1. Elaboración propia.

7.4. Modificación de valores de la *Data Flash*

Una vez que se conozca las características esenciales de la celda Li-Ion 18650, será necesario ingresarlas a la *Data Flash* del IC. Para ello se desarrolló el Algoritmo *modifyDataFlash()* 6. Una vez que se finalizó el desarrollo del algoritmo, la forma en que se comprobó su funcionamiento fue probando modificar diferentes registros de la *Data Flash*. El primer registro que se modificó fue el de *Pack Configuration*, este se mencionó en la sub-sección 6.2.7 del marco teórico.

Inicialmente el registro de *Pack Configuration* tenía un valor de 0x0161 en hexadecimal, que en binario es equivalente a 0000000101100001. Lo anterior se muestra en la Figura 25, esto fue la lectura que el módulo EV2400 obtuvo del registro. Para comprobar el funcionamiento la el Algoritmo 6, se modificó el Byte Más Significativo (MSB) de Pack Configuration a 0x55, lo equivalente a... en binario, una vez que se subió el código desde el ESP32 al IC, se conectó de nuevo el módulo EV2400 para comprobar si el cambio se realizó con éxito, el resultado que se obtuvo se presenta en la Figura 26

Algoritmo 5 Función bq34z100::TryCommunication()

```
Declarar error, address como tipo byte
Declarar devicesFound como tipo int
Inicializar devicesFound a 0
Imprimir "Scanning..."
for address desde 1 hasta 127 do
  Iniciar Transmisión  $I^2C$  hacia address
  Escribir en el bus  $I^2C$ 
  Finalizar Transmisión  $I^2C$ 
  Leer error como resultado de la transmisión
  if error es igual a 0 then
    Imprimir " $I^2C$  device found at address 0x"
    if address < 16 then
      Imprimir "0"
    end if
    Imprimir address en formato hexadecimal
    Incrementar devicesFound en 1
  else if error es igual a 4 then
    Imprimir "Unknown error at address 0x"
    if address < 16 then
      Imprimir "0"
    end if
    Imprimir address en formato hexadecimal
  end if
end for
if devicesFound es igual a 0 then
  Imprimir "No  $I^2C$  devices found"
else
  Imprimir "done"
end if
Retardar la ejecución por 5000 milisegundos
```

Figura 25: Valor de *Pack Configuration* por defecto del IC.

Bit	Field
Bit 7	ResCap
Bit 6	CalEn
Bit 5	SCALED
Bit 4	RSVD
Bit 3	VOLSEL
Bit 2	IWAKE
Bit 1	RSNS1
Bit 0	RSNS0
Bit 7	RFACTSTEP
Bit 6	SLEEP
Bit 5	RMFCC
Bit 4	NI_DT
Bit 3	NI_DV
Bit 2	PB_RESTART
Bit 1	GNDSEL
Bit 0	TEMPS

Nota: esta Figura muestra el valor que tiene el registro *Pack Configuration* por defecto. Este valor se obtuvo utilizando el EV2400. Elaboración propia.

Figura 26: Valor de *Pack Configuration* modificado a 0x55.

Bit	Field
Bit 7	ResCap
Bit 6	CalEn
Bit 5	SCALED
Bit 4	RSVD
Bit 3	VOLSEL
Bit 2	IWAKE
Bit 1	RSNS1
Bit 0	RSNS0
Bit 7	RFACTSTEP
Bit 6	SLEEP
Bit 5	RMFCC
Bit 4	NI_DT
Bit 3	NI_DV
Bit 2	PB_RESTART
Bit 1	GNDSEL
Bit 0	TEMPS

Nota: esta Figura muestra el valor al que se modificó el registro *Pack Configuration* utilizando el *firmware* desarrollado. Elaboración propia.

Algoritmo 6 Función modifyDataFlash()

- Desbloquear el dispositivo ▷ Llamar a la función unseal
 - Habilitar el control de la memoria flash de datos ▷ Llamar a la función enableBlockDataControl
 - Seleccionar la subclase de configuración de pack ▷ Llamar a la función selectDataFlashClass con el argumento PACK_CONFIG_SUBCLASS
 - Seleccionar el primer bloque de la subclase ▷ Llamar a la función selectDataFlashBlock con el argumento 0x00
 - Leer el byte alto de la configuración de pack y almacenar en oldPackConfigMSB ▷ Llamar a la función readBlockDataByte con el argumento PACK_CONFIG_OFFSET
 - Leer el checksum del bloque y almacenar en oldChecksum ▷ Llamar a la función readBlockDataChecksum
 - Establecer newPackConfigMSB en 0x55 ▷ o realizar cualquier otro cálculo deseado
 - Escribir el nuevo byte alto de la configuración de pack ▷ Llamar a la función writeBlockDataByte con los argumentos PACK_CONFIG_OFFSET y newPackConfigMSB
 - Calcular el valor temporal temp como $(255 - \text{oldChecksum} - \text{oldPackConfigMSB}) \bmod 256$
 - Calcular el nuevo checksum newChecksum como $255 - (\text{temp} + \text{newPackConfigMSB}) \bmod 256$
 - Escribir el nuevo checksum del bloque ▷ Llamar a la función writeBlockDataChecksum con el argumento newChecksum
-

Diseño de un banco de baterías para un LEV

Para el diseño de una de batería, se tomó como referencia el Rover UVG. Los parámetros energéticos de este se obtuvieron del trabajo de graduación titulado “Diseño mecánico y de potencia para el rover de la Universidad del Valle de Guatemala”, del Ingeniero Jorge Hurtado.

Figura 27: *Consumos eléctricos estimados del Rover UVG.*

Descripción	Voltaje	Corriente nominal (estimada)
Motores	12V	10 amperios
Controlador Central	5V	1 amperio
Controlador ROS	5V	3.5 amperios
Modulo DWM	5V	0.3 amperios
Cámaras	5V	1 amperio

Nota: esta Figura muestra los consumos eléctricos, tanto en voltaje como en amperaje de los distintos módulos del Rover UVG. Obtenido de (Garcia, 2023).

Según Jorge Hurtado, el sistema eléctrico del Rover está diseñado para operar a 12V y con un consumo estimado de 14 Ah. Por lo que se diseñó un banco de baterías de litio que pudiera alimentar al Rover por al menos 2 horas, este banco constó de 39 celdas en la configuración de 3 celdas en serie y 13 bancos en paralelo, utilizando celdas 18650 manufacturadas por Samsung INR18650-25R con 3.7 V y 2200 m Ah, con la finalidad de que el arreglo final cumpliera con la especificación de 11.1 V y 28.6 Ah. El diseño que se realizó cuanta con algunos inconvenientes, uno de ellos es el espacio necesario para almacenar varios bancos de

baterías, menciona colocar 13 bancos en paralelo, esto resultaría en un desaprovechamiento de espacio. Otro inconveniente sería la cantidad de sensores, o circuitos integrados, necesarios para medir el voltaje de cada celda.

Posterior a analizar el caso ya presentado, se realizó una propuesta distinta para diseñar un banco de baterías, tomando en consideración aspectos como el espacio y el costo en materiales necesarios. Hay una forma de diseñar que resultan ser más eficiente y económica. Es el extremo de diseño de módulos de celdas paralelas (PCM). A pesar de poder crear baterías con diferentes configuraciones, donde se colocan cierta cantidad de celdas en paralelo y ciertas en serie, se utilizó PCM, ya que existe una ventaja, y es que, solo sería necesario medir el voltaje de una celda de todas las celdas que estén en paralelo cuando se implemente un BMS. de acuerdo a la ley de voltaje de Kirchoff, pues el resto de celdas que estén en paralelo tendrían el mismo voltaje y se auto-balancearían debido a su dinámica.

Conociendo los requerimientos energéticos del Rover, y las características de la celda con la que construirá el banco de baterías, es posible realizar cálculos simples para determinar la cantidad de celdas que se requerirá. La celda que se utilizó, fue una celda Samsung INR18650-29E de 2900 mAh de capacidad y 3.65 V de voltaje medio de operación, de la cuál hay mayor información en la Figura 29. Entonces, los cálculos que se realizaron para diseñar una batería, con la metodología de diseño PCM, compuesta por celdas 18650, fueron los siguientes:

$$V_R = V_C \times n_{cs}$$

$$n_{cs} = V_R \div V_C$$

$$n_{cs} = 12 V \div 3.65 V$$

$$n_{cs} \approx 4 \text{ celdas}$$

Donde V_R es voltaje mínimo que el Rover necesita para operar, según lo que se extrajo del trabajo de graduación de Jorge Hurtado (García, 2023). V_C es el voltaje de la celda y n_{cs} es el número de celdas en serie necesarias para alcanzar el voltaje mínimo necesario. Entonces, utilizando la metodología de diseño PCM, se determinó que para cumplir con el requerimiento de voltaje del Rover, son necesarias 4 celdas en serie. Por último, se cálculo la cantidad de celdas que se requerirían para alcanzar la corriente que necesita el Rover para operar por dos hora (28 Ah), como se muestra a continuación:

$$C_R = C_C \times n_{cp}$$

$$n_{cp} = C_R \div C_C$$

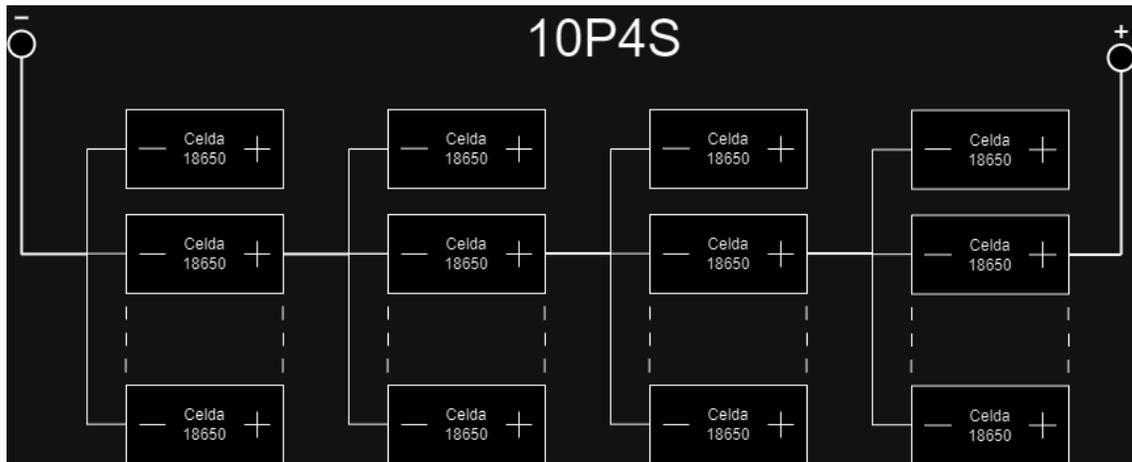
$$n_{cp} = 28 \text{ Ah} \div 2.9 \text{ Ah}$$

$$n_{cs} \approx 10 \text{ celdas}$$

Donde C_R es la corriente que el Rover necesita para operar por dos horas, según lo que se extrajo del trabajo de graduación de Jorge Hurtado. C_C es la capacidad nominal de la celda y n_{cp} es el número de celdas en paralelo para cumplir con los requerimientos. Se determinó que para cumplir con el requerimiento de corriente del Rover, son necesarias 10 celdas en paralelo.

La batería que cumpla con los requerimientos energéticos del Rover UVG sería de una configuración 10P4S, es decir, 4 conjuntos en serie compuestos de 10 celdas en paralelo. La representación visual de la batería se muestra en la figura 28.

Figura 28: Esquemático de la configuración de celdas para una batería para el Rover UVG.



Nota: esta Figura muestra una configuración de celdas Li-Ion 18650 apropiadas para formar una batería que alimente al Rover UVG por 2 horas seguidas. Elaboración propia.

Caracterización de una celda Li-Ion para utilizar el IC BQ34Z100-G1

Para iniciar con la caracterización de un banco de baterías, es fundamental identificar los parámetros que definen la celda electroquímica. Estos datos incluyen:

- Capacidad nominal del tipo de celda que se utilizará. Esto es la cantidad de Ah que contiene la celda.
- Voltaje en circuito abierto de la celda V_{OC} .
- Resistencia interna (R_i).
- Tipo de química de la celda, este dato es necesario para el correcto funcionamiento del BQ34Z100-G1, debido a que para los diferentes tipos de químicas de celdas existentes, Texas Instruments creó identificadores químicos llamados ChemID, que dentro de la memoria de cada IC se utilizan para definir características químicas de la celda, como su capacidad máxima, resistencia interna, etc.

Estos datos son necesarios para caracterizar una celda y por ende, un banco de baterías. Además, esta caracterización es requerida para el funcionamiento del algoritmo de *Impedance Track*, necesario para determinar el estado de carga (SOC). Se trabajó con dos tipos de celdas: INR18650-29E Samsung y NCR18650B Li-Ion MH12210. Se seleccionaron estas celdas debido a que cuentan con información teórica, que se obtiene mediante sus hojas de datos. Esta información se utilizó para validar el método diseñado para caracterizar celdas, comparando los resultados obtenidos contra los resultados esperados según la hoja de datos.

No hay que olvidar que aparte de las características básicas de una celda, para poder utilizar el BQ34Z100-G1, se deben conocer los parámetros que se mencionan en el Capítulo

6, apartado 6.2.8. Estos son esenciales para el correcto funcionamiento del IC, y son los siguientes:

- Energía de diseño.
- Voltaje de carga de la celda.
- Voltaje de terminación de la celda.
- Corriente de abandono.

Todas las características importantes de las celdas con las que se trabajó se presentan en el Cuadro 9 y la Figura 29. Una vez conociendo los datos de las celdas, se llevaron a cabo pruebas de descarga y carga, utilizando las celdas mencionadas anteriormente, con la finalidad de encontrar las características mencionadas al inicio del capítulo. Se utilizaron dos fuente de poder DC: KEITHLEY 2231A-30-3 y PRL-25 para alimentar un módulo de carga electrónica ajustable XY-FZ25 de 25W y 4A (ver Figura 57) para hacer las pruebas de descarga y para hacer las pruebas de carga se utilizó un cargador Wissblue para celdas Li-Ion (ver Figura 58). Es importante resaltar que las fuentes de poder se utilizaron únicamente para alimentar la carga electronica, dependiendo de qué fuente se tuviera a disposición, esa se utilizaba. El uso de una u otra no influyó en los resultados de las pruebas.

El motivo por el cuál se seleccionó la carga electrónica mencionada anteriormente fue su versatilidad, debido que esta permite ajustar la cantidad de corriente exacta que se drena, así como visualizar el voltaje restante de la celda, la capacidad total medida, la potencia actual y el tiempo transcurrido. Otras funciones útiles de la carga electrónica son la posibilidad de establecer el voltaje de corte, es decir, el voltaje en el cual la carga dejará de demandar corriente (este cambio es automático) y la posibilidad de utilizar comunicación UART para configurar y extraer datos del dispositivo.

En las Secciones 9.1, 9.2 y 9.3 se describirán a detalle las pruebas que se realizaron para caracterizar distintas celdas Li-Ion.

Figura 29: Información básica de una celda LiitoKala NCR18650B Li-Ion MH12210.



Nota: información sobre las características de una celda Li-Ion LiitoKala NCR18650B. Adaptado y traducido de (LiitoKala, 2023).

Cuadro 9: Información básica de una celda INR18650-29E Samsung.

Nombre	Especificaciones
Capacidad nominal	2850 mAh (descarga de 0.2C, 2.50 V)
Capacidad típica	2850 mAh (descarga de 0.2C, 2.50 V)
Capacidad mínima	2750 mAh (descarga de 0.2C, 2.50 V)
Voltaje de carga	4.20 ± 0.05 V
Voltaje nominal	3.65 V (descarga de 0.2C)
Método de carga	CC-CV (voltaje constante con corriente limitada)
Corriente de carga	Carga estándar: 1375 mA
Tiempo de carga	Carga estándar: 3 horas
Corriente máxima de carga	2750 mA (no para vida de ciclado)
Corriente máxima de descarga	2750 mAh (descarga continua) 8250 mAh (no apropiado para descarga continua)
Voltaje de abandono en descarga	2.50 V
Peso de la celda	48 g
Dimensiones de la celda	Diámetro (máx.): 18.40 mm Alto (máx.): 65.00 mm
Temperatura de operación (temperatura superficial de la celda)	Carga: 0 a 45°C Descarga: -20 a 60°C
Temperatura de almacenamiento	1 año: -20 a 25°C (1*) 3 meses: -20 a 45°C (1*) 1 mes: -20 a 65°C (1*)

Nota: información sobre las características de una celda Li-Ion INR18650-29E Samsung. Adaptado y traducido de (SDI, 2012)

9.1. Determinación de la capacidad nominal, voltaje máximo, voltaje de terminación, corriente de abandono y *taper current* de una celda Li-Ion

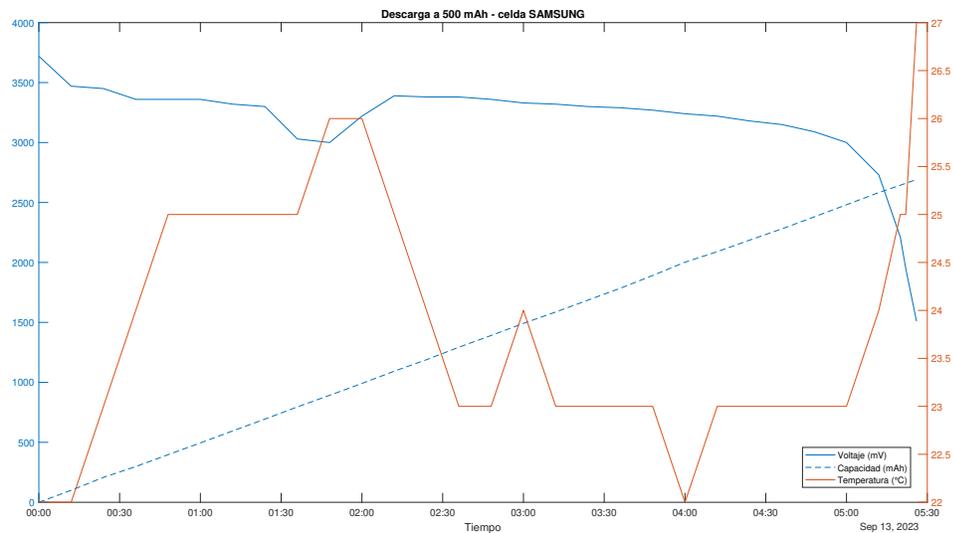
9.1.1. Experimentos de descarga

Las primeras pruebas que se llevaron a cabo fueron de descarga. Esto consistió en descargar las celdas a distintas tasas de corriente constante, hasta alcanzar el voltaje más bajo (voltaje de terminación). La forma de tomar datos fue manual, realizando mediciones cada cierta cantidad de tiempo, dependiendo de la tasa de descarga a modo de tener 30 datos por cada descarga realizada. Debido a que el valor de la capacidad depende principalmente de la temperatura y la corriente de descarga, fueron estos datos los que se consideraron en las pruebas. Es importante recordar que la relación que tiene la corriente con el tiempo de carga/descarga da como resultado la capacidad de la celda. Lo anterior se encuentra en el capítulo 6.1 y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Capacidad nominal} = \frac{\text{Tiempo carga}}{\text{Tiempo descarga}} \cdot CC \text{ de descarga}$$

Para las pruebas de descarga con celda Samsung IRN18650-29E se utilizaron tres diferentes tasas: 500 mAh, 1000 mAh y 3000 mAh. Los resultados de estas pruebas se muestran en las Figuras 30, 31 y 32. Cada gráfica contiene tres datos que se obtuvieron durante los experimentos: la temperatura en grados celsius, el voltaje en milivoltios y la capacidad en mAh. En la primera prueba de la celda, con una descarga de 500 mAh (Figura 30) se observa que la temperatura se mantiene dentro de los estándares de operación que se muestran en el Cuadro 9. También se aprecia que a partir de los 3000 mV (aproximadamente) el voltaje de la celda decae abruptamente a comparación de su comportamiento anterior en el decaimiento. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue de 2500 mAh aproximadamente.

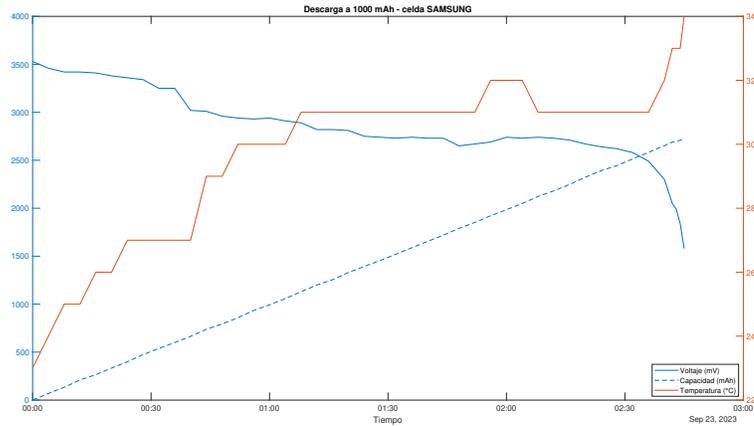
Figura 30: Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 500 mAh de celda Samsung INR18650-29E.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

En la segunda prueba de la celda Samsung IRN18650-29E, con una descarga de 1000 mAh (Figura 31) se observa que, al igual que en la descarga a 500 mAh, la temperatura se mantiene dentro de los estándares de operación de la celda (referirse a Cuadro 9). De igual forma, al alcanzar los 2580 V el voltaje de la celda decae abruptamente como en la prueba de descarga de 500 mAh, siguiendo el comportamiento esperado de la celda según los datos que se muestran en el Cuadro 9. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue de un poco más que 2500 mAh, 2600 mAh aproximadamente.

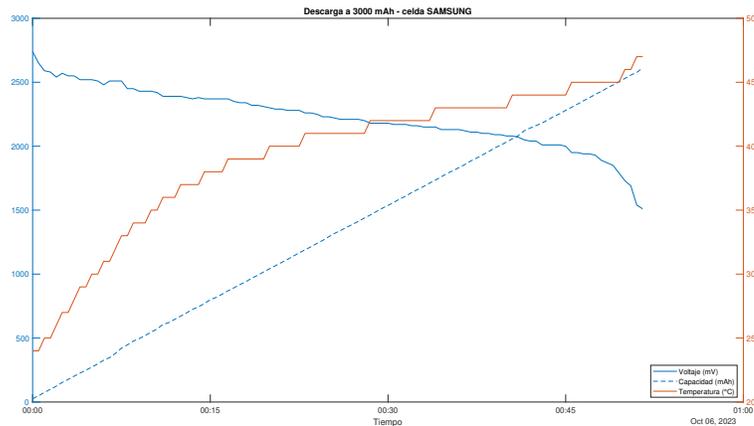
Figura 31: Voltaje, temperatura y capacidad dedidos durante descarga a 1000 mAh de celda Samsung INR18650-29E.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

En la tercera y última prueba, la celda INR18650-29E se descargó a una tasa de 3000 mAh (Figura 32) se observa que, al igual que en la descarga a 500 mAh y de 1000 mAh, la temperatura se mantiene dentro de los estándares de operación de la celda, aunque acercándose cada vez más al límite de 60°C (referirse a Cuadro 9). En este caso, el voltaje presenta un decaimiento rápido por debajo de 2040 mV, comportándose de manera distinta a los anteriores dos experimentos. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue de un poco más que 2500 mAh, 2650 mAh aproximadamente.

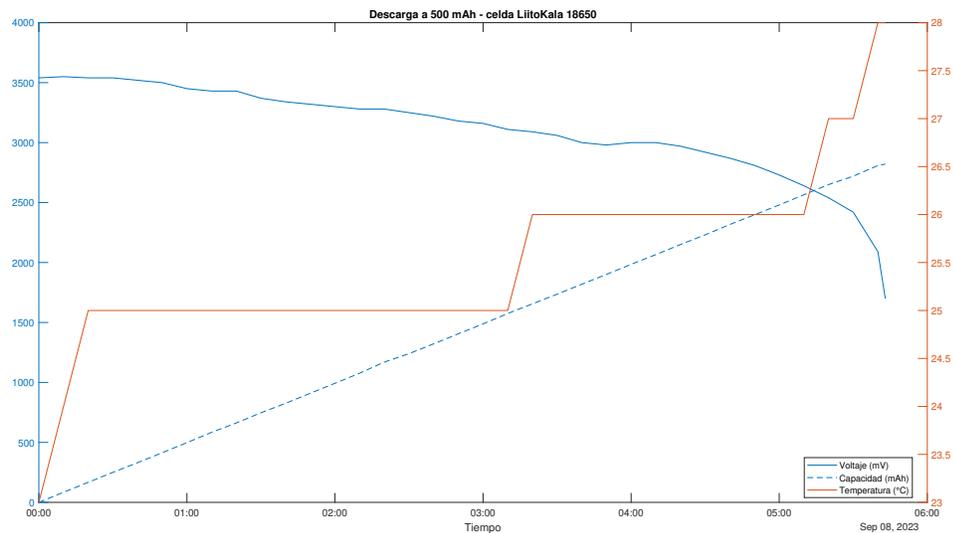
Figura 32: Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 3000 mAh de celda Samsung INR18650-29E.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

Para las pruebas de descarga con celda LiitoKala 18650 se utilizaron dos tasas iguales al anterior experimento y una distinta, siendo estas de: 500 mAh, 1000 mAh y 2000 mAh. Los resultados de estas pruebas se muestran en las Figuras 33, 34 y 35. Al igual que con las celdas Samsung, la gráfica contiene tres datos: la temperatura en grados celsius, el voltaje en milivoltios y la capacidad en mAh. En la primera prueba con una descarga de 500 mAh (Figura 33) se observa que la temperatura se mantiene dentro de los estándares de operación que se muestran en la Figura 29. También se aprecia que a partir de los 2420 mV (aproximadamente) el voltaje de la celda decae de forma rápida. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue de 2600 mAh aproximadamente.

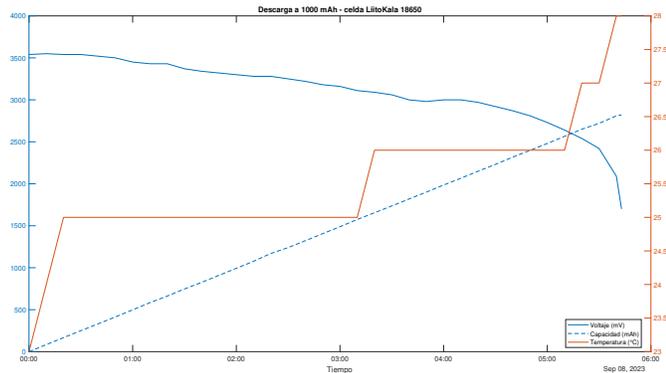
Figura 33: Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 500 mAh de una celda LiitoKala 18650.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

En la segunda prueba, la celda se descargó a una tasa de 1000 mAh (Figura 34) se observa que, al igual que en la descarga a 500 mAh la temperatura se mantiene dentro de los estándares de operación de la celda. En este caso, el voltaje presenta un decaimiento rápido en un valor muy cercano al anterior, 2460 mV. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue, de igual forma, 2600 mAh aproximadamente.

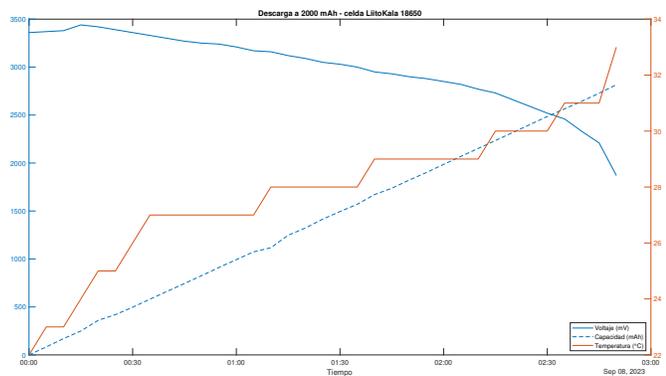
Figura 34: Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 1000 mAh de una celda LiitoKala 18650.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

En la última prueba, la celda se descargó a una tasa de 2000 mAh (Figura 34). En este caso la temperatura comenzó a alcanzar los límites de operación establecidos por el fabricante, de 45°C . Por otro lado, el voltaje presenta un decaimiento rápido a partir de 1820 mV, muy alejado al voltaje observado en las otras dos pruebas de la celda. Por último, la capacidad que se obtuvo de la celda fue, de igual forma, 2700 mAh aproximadamente, un poco mayor a las anteriores capacidades medidas.

Figura 35: Voltaje, temperatura y capacidad medidos durante descarga a 2000 mAh de una celda LiitoKala 18650.

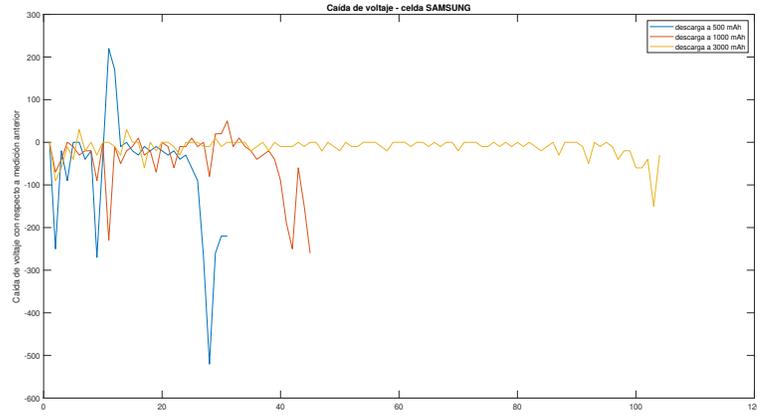


Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal es el tiempo transcurrido. Elaboración propia.

Además de la medición del comportamiento de los parámetros de voltaje, temperatura y capacidad, se comparó la caída del voltaje a las distintas tasas a las que se realizó la descarga de las dos celdas utilizadas. Esta comparación de voltajes se muestran en la Figura 36 para

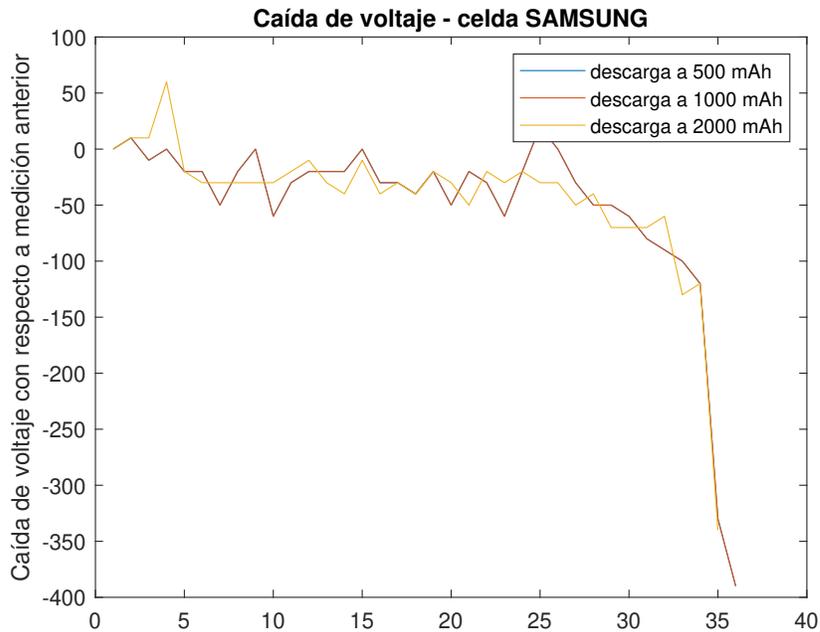
la celda Samsung INR18650-29E y en la Figura 37 para la celda LiitoKala 18650.

Figura 36: *Caída de voltaje de la celda Samsung INR18650-29E entre mediciones a distintas tasas de descarga.*



Nota: la Figura está compuesta de los voltajes medidos durante las pruebas de descarga de la celda SAMSUNG INR18650-29E. Elaboración propia.

Figura 37: *Caída de voltaje de la celda LiitoKala 18650 entre mediciones a distintas tasas de descarga.*

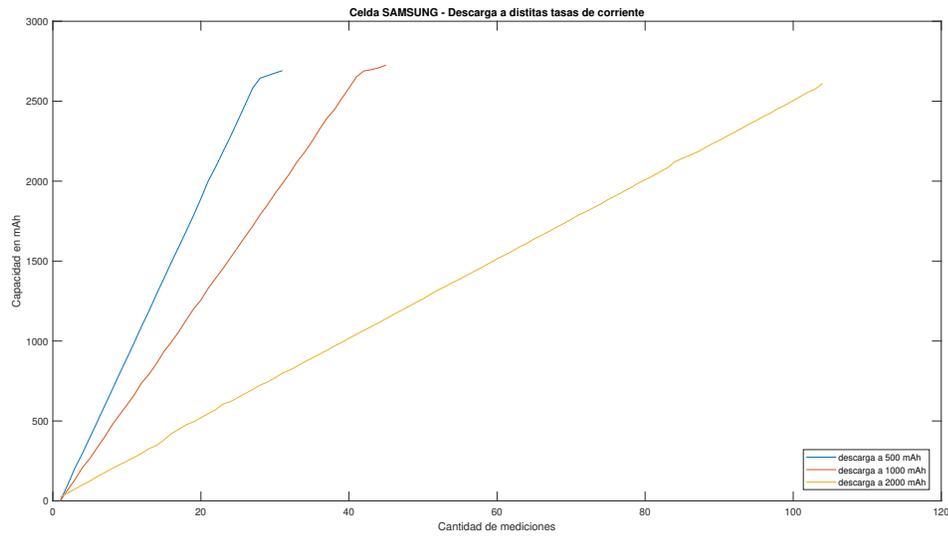


Nota: la Figura está compuesta de los voltajes medidos durante las pruebas de descarga de la celda LiitoKala 18650. Elaboración propia.

De esta prueba es posible obtener el valor de la **capacidad máxima, voltaje de terminación** y además, también consignar la **corriente máxima** a la que es posible descargar la celda. Tras analizar la línea que representa el voltaje de las gráficas de las Figuras 30, 31, 32, 33, 34 y 35, fue posible determinar que voltaje de terminación de las celdas se obtiene tras el razonamiento de que una caída de voltaje mayor a 50 mV seguida entre mediciones es demasiado alta, pues normalmente esta caída de voltaje oscila entre 10 y 30 mV. Es decir, que si tras cada medición el voltaje decae 50 mV con respecto a la anterior y sigue sucesivamente, esto indica que ya se ha alcanzado el voltaje de terminación, que sería el voltaje en el cuál el decaimiento comenzó. Estas caídas de voltaje se representan en las Figuras 36 y 37, donde se aprecia que el voltaje al final de cada gráfica decae a una mayor tasa. Además, al analizar de nuevo las Figuras mencionadas al inicio del párrafo se observa que el valor del voltaje de terminación se ve afectado por la tasa de descarga. Por ejemplo, para la celda LiitoKala a una tasa de descarga de 500 mAh el voltaje de terminación fue de 2420 mV, a 1000 mAh de 2460 mV y a 2000 mAh de 1820 mV, es decir, un voltaje de corte promedio de 2233.33 mV con una desviación estándar de ± 292.73 mV. Según la hoja de fabricante (ver Figura 29) el voltaje de terminación de la celda es de 2750 mV a una descarga continua de 5000 mAh o menor, sin embargo por los resultados obtenidos, se determinó que el voltaje de terminación no se aproxima a 2750 mV, pero esto cambiará dependiendo de la tasa de descarga, esto se confirmó con las pruebas con la celda Samsung ya que a una tasa de descarga de 500 mAh el voltaje de terminación fue de 3000 mV, a 1000 mAh de 2580 mV y a 3000 mAh de 2040 mV, es decir, un voltaje de corte promedio de 2476.67 mV con una desviación estándar de ± 475.13 mV y teóricamente su voltaje de terminación es de 2500 mV. En conclusión, se recomienda establecer el voltaje de terminación entre 2500 mV, siendo conservador, para evitar dañar la celda y 1500 mV corriendo el riesgo de comprometer la integridad de la celda (Lu et al., 2013).

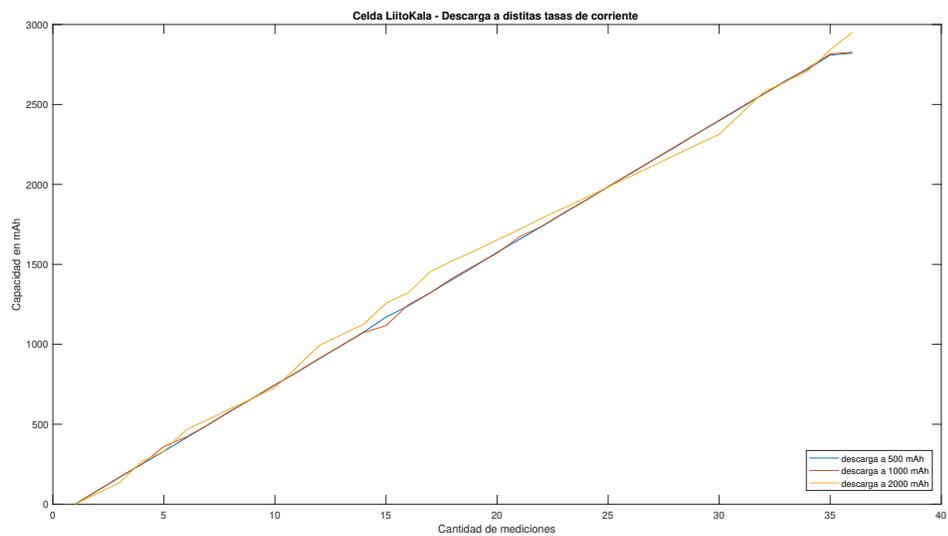
De las pruebas de descarga también se pudo obtener la **capacidad máxima** de la celda. La forma en la que se determinó esto, fue dejando que el voltaje de la celda decayera hasta 1500 mV durante la descarga, y tomando mediciones durante el proceso de la capacidad drenada medida por la carga electrónica. Entonces, en las Figuras 38 y 39 se muestra la capacidad medida en cada prueba de descarga llevada a cabo. De esta forma, pudo definirse que la celda Samsung tienen una capacidad media de 2676.33 mAh con una varianza de ± 47.68 mAh y la celda LiitoKala 2864.67 mAh con una varianza de ± 60.36 mAh; muy cercanos a sus capacidades teóricas observables en el Cuadro 9 y la Figura 29, con la excepción de la celda LiitoKala, que no se acerca a la capacidad mínima que indica el fabricante. Entonces, de esta prueba puede saberse la capacidad real que tiene la celda. Por último, para obtener el la energía de la batería se realizó una simple multiplicación del voltaje de operación medio (3.5 V) por la capacidad máxima medida, resultando en 10585 mWh.

Figura 38: Capacidad medida de una celda Samsung INR18650-29E durante descarga a distintas tasas de corriente.



Nota: combinación de las capacidades nominales medidas de una celda Samsung INR18650-29E a través de experimentos de descarga. Elaboración propia.

Figura 39: Capacidad medida de una celda LiitoKala durante descarga a distintas tasas de corriente.



Nota: combinación de las capacidades nominales medidas de una celda LiitoKala 18650 a través de experimentos de descarga. Elaboración propia.

Otro punto importante a resaltar es la caída de voltaje de las celdas durante operación (cuando se les demanda energía). Normalmente, el voltaje de operación de las celdas Li-Ion

se encuentra entre 1.5 V y 3.6 V (Lu et al., 2013). Esto quiere decir que si al momento de demandar corriente, el voltaje de la celda cae por debajo de 1.5 V, no es recomendable utilizar esa tasa de descarga. Además, es importante agregar que la temperatura de operación es un dato clave para identificar que la celda esté operando en condiciones adecuadas, si la temperatura de la superficie de la celda sube a más de 40°C es un indicador de que la tasa de descarga/carga es demasiado alta. Si se quiere ser más conservador, para prologar la vida de la celda, se recomienda no dejar que la celda opere a menos de 2.5 V y a más de 40°C. Por ello, tras analizar los experimentos de descarga y carga, se concluyó que no es recomendable descargar las celdas Li-Ion 18650 a más de C/2, debido a que esto conlleva a una acelerada descomposición de las celdas (Chombo & Laonual, 2020).

9.1.2. Experimentos de carga

En las pruebas de carga se utilizó el BQ34Z100-G1 y el módulo de evaluación EV2400, para obtener el voltaje máximo que alcanza la celda, la corriente de abandono y la *taper current*. Lo primero que se realizó fue calibrar el IC para que sus mediciones de voltaje y corriente fueran adecuadas, los pasos que se siguieron fueron los que se menciona en el capítulo 6.2.10. Con el IC listo para funcionar, se configuró la pestaña watch de bqStudio para almacenar datos importantes para del ciclo de aprendizaje y las pruebas de carga. Los pasos que se siguieron para esto se muestra en las Figuras 40 y 41.

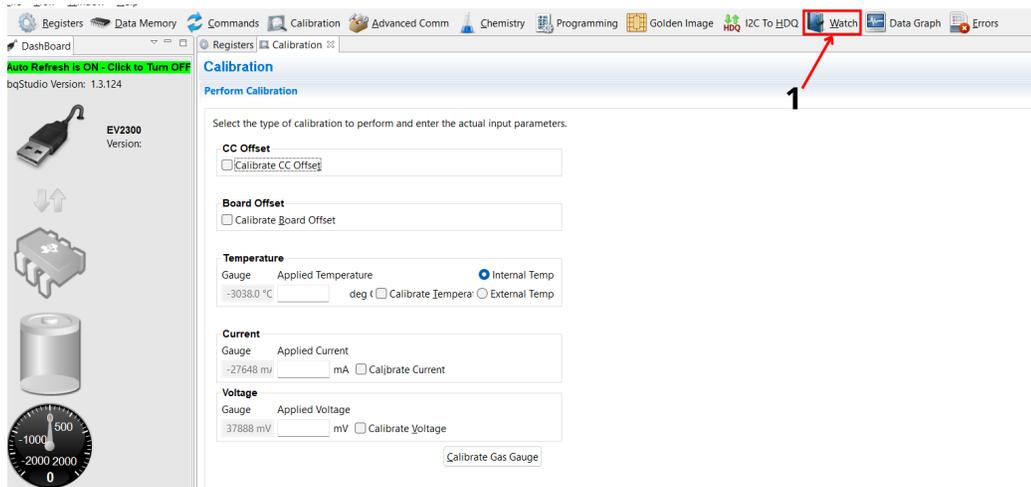
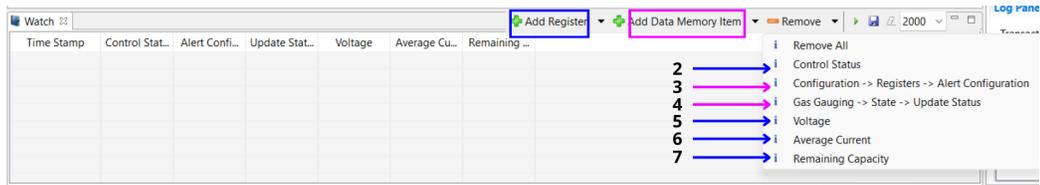


Figura 40: Paso 1 - abrir la pestaña watch de bqStudio.

Nota: la Figura muestra la ventana a la que se debe de ingresar para configurar el EV2400 y así registrar los datos que se deben de observar al momento de realizar el ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1 y un experimento de carga. Basado en (INSTRUMENTS, 2021b).

Figura 41: Paso 2 - abrir la pestaña watch de bqStudio.

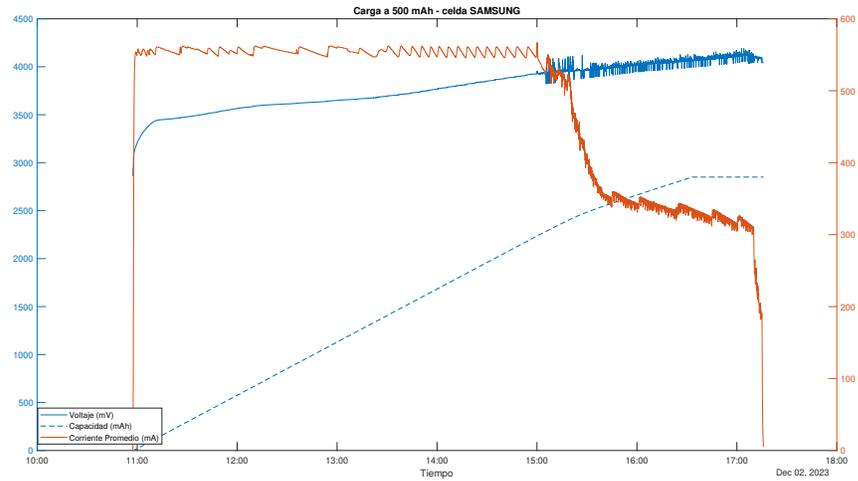


Nota: se señalan los datos que se deben de observar y registrar al realizar el ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1 y un experimento de carga. Las flechas azules indican que el registro se encuentra en el recuadro azul, de la misma forma con el otro color. Basado en (INSTRUMENTS, 2021b).

Los registros de *Update Status*, *Control Status* y *Alert Configuration* se colocan para verificar el estado del ciclo de aprendizaje, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 6.2.9. Y el resto de datos son para visualizar el comportamiento de la celda. Con esto preparado, se procedió a realizar las pruebas de carga utilizando celdas Samsung INR18650-29E descargadas y los resultados que se obtuvieron se presentan en las Figuras 42 y 43

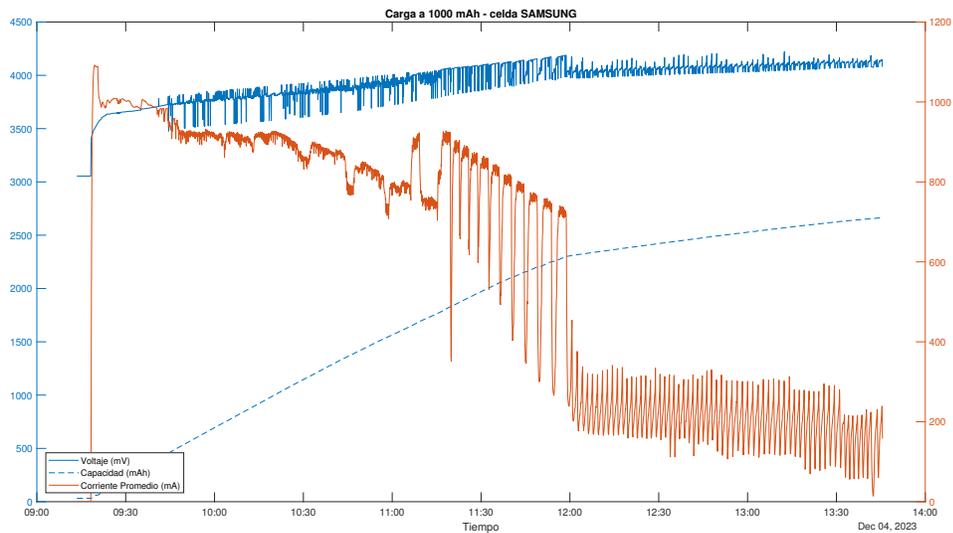
De esta prueba se pudo obtener el voltaje máximo de la celda, así como la corriente de abandono y la *taper current*, además, se corroboró que los resultados de la capacidad medida en las pruebas de descarga diera resultados similares. De esta forma, tras analizar las gráficas de voltaje se pudo determinar que el voltaje máximo de la celda se encuentra entre 4150 mV y 2550 mV. Este dato es importante, pues el IC dentro de sus espacios de memoria cuenta con el “Voltaje de carga de la celda Tx-Ty” mencionado en el capítulo 6.2.8, que es en realidad el voltaje máximo al que llega la celda durante la carga y es importante porque utiliza este y otros datos para detectar la condición de carga completa (FC), que es de suma vital durante el ciclo de aprendizaje.

Figura 42: Voltaje y corriente promedio durante carga a 500 mAh de una celda Samsung INR18650-29E.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. el eje horizontal representa el tiempo. Elaboración propia.

Figura 43: Voltaje y corriente promedio durante carga a 1000 mAh de una celda Samsung INR18650-29E.



Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y capacidad, y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de la temperatura. El eje horizontal representa el tiempo. Elaboración propia.

Posteriormente se analizó la gráfica de corriente promedio de la Figura 42. De esto se

identificó que la *taper current*, al utilizar el cargador Wissblue, inicia en 535 mA, sin embargo, esta medición pudo haber sido errónea, ya que al colocar una corriente de descarga de -500 mA el IC medía -630 mA, esto fue provocado por un error en la calibración, proveniente de tratar de ajustar las mediciones de la carga electrónica y el cargador par que fueran iguales, es decir, se calibraba el IC para ajustarse a la medición de la carga electrónica y luego se calibró de nuevo para ajustarse al cargador, entonces esto provocó que las mediciones de voltaje y corriente promedio tuvieran una desviación de ± 150 aproximadamente. Es importante mencionar que la *taper current* es otro de los parámetros que el IC toma para detectar una condición de carga completa. Otro parámetro importante para la detección de carga completa es la corriente de abandono, que en este caso fue de 310 mA; se tomó esta corriente debido a que fue esta la última corriente medida antes de que el cargador Wissblue detectara que la celda estaba completamente cargada.

Se corroboró que el cargador Wissblue no funciona bien al realizar las conexiones que se muestran en la Figura 14 y tratar de cargar a una tasa mayor a 500 mAh, pues las mediciones de voltaje y corriente promedio oscilan demasiado, como se ve en la Figura 43, esto no solo provoca que el cargador nunca llegue a cargar la celda por completo, sino que provoca que el BQ34Z100-G1 no sea capaz de detectar el estado en el que se encuentra la celda. Incluso con la tasa de carga de 500 mAh no se alcanzó el comportamiento ideal de la carga, según la teoría presentada en el capítulo 6.3.3, esto afectó directamente en el ciclo de aprendizaje, pues como se ve en ese capítulo, las condiciones de detección de carga completa influyen en el correcto funcionamiento del BQ34Z100-G1, pero esto se explica a mayor profundidad en el capítulo de Ciclo de aprendizaje.

9.2. Determinación del voltaje en circuito abierto (OCV) de la celda

Un aspecto importante en la caracterización de una celda Li-Ion es determinar el voltaje en circuito abierto, debido a que tiene relación con el SOC de la celda. Se investigó la forma en la que se hacen los experimentos para determinar este parámetro y se encontró en el Artículo (Soto et al., 2019) que se utiliza la técnica llamada “titulación intermitente galvanostática (GITT)” para encontrar la relación del OCV y el SOC. El artículo indica que el método consiste en aplicar una corriente de carga o descarga constante hasta alcanzar el estado SOC deseado, luego, se permite que la celda descanse durante un cierto período para que se estabilice. Sin embargo, se encontró que durante el ciclo de aprendizaje por el que debe de pasar el BQ34Z100-G1 antes de estar completamente calibrado, el IC obtiene mediciones automáticas del OCV tras habilitar el algoritmo de Impedance Track en los periodos de relajación. Por este motivo, esta prueba no fue necesario llevar a cabo la técnica GITT.

9.3. Determinación la resistencia interna de la celda

Por último, otra característica que es necesaria para caracterizar una celda Li-Ion es la resistencia interna (R_i) de esta. En el artículo *Analysis of the main battery characterization*

techniques and experimental comparison of commercial 18650 Li-Ion cells mencionan que la forma más simple de obtener R_i se basa en introducir un paso de corriente (δI) generando una caída de voltaje (δV). Entonces, de acuerdo con la ley de Ohm, $R_i = (\delta V) \times (\delta I)$. Donde el valor de R_i dependerá de la duración del paso (Soto et al., 2019). Sin embargo, este experimento no fue necesario, porque de nuevo, el BQ34Z100-G1 realiza mediciones de la resistencia interna de la celda durante el ciclo de aprendizaje cuando se habilita el algoritmo de Impedance Track.

9.4. Determinación y programación del tipo de química de la celda (ChemID)

El ChemID es propio del BQ34Z100-G1, ya que utiliza este dato para el funcionamiento del algoritmo de *Impedance Track*. Este identificador químico da características propias de la celda, entonces, para este seleccionar el ChemID de una celda Samsung INR18650-29E se siguió la guía presentada en el marco teórico en el capítulo 6.2.9 en “Determinar el ChemID” y se utilizó bqStudio para programar el identificador químico debido a que la celda con la que se trabajó ya está caracterizada por Texas Instruments, por este motivo solo fue necesario el paso 1 de la guía y el resultado se presenta en la Figura 44.

Figura 44: *ChemID Samsung INR18650-29E.*

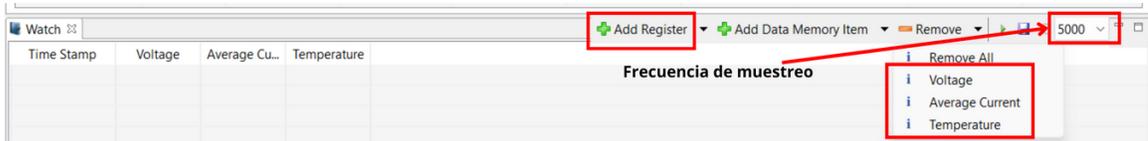
Manufacturer	Model	Chemistry ID	Description
Saftey	SF802452SH15-HV (1100mAh)	2451	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.35V
Samsung	INR18650-25R (2500mAh)	2068	NiCoMn/carbon
Samsung	ICR18650-26H (2600mAh)	2077	NiCoMn/carbon
Samsung	INR18650-30Q (3000mAh)	2085	NiCoMn/carbon
Samsung	INR21700-50E	2250	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
Samsung	INR18650-25R (2500mAh)	2268	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
Samsung	INR18650-35E (3450mAh)	2361	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
Samsung	INR21700-50E (4900mAh)	2591	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
Samsung	Prismatic 94Ah (94000mAh)	5396	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.15V
Samsung SDI	ICR18650-22P	1850	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
SamsungInventus	INR18650-29E (2900mAh)	1737	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V
SamsungInventus	INR18650-29E (2900mAh)	2237	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.2V, -30C
Sanyo	18650 ICBFK16	0100	LiCoO2/graphitized carbon (default)
Sanyo	UR18650F (FK)	0100	LiCoO2/graphitized carbon (default)
Sanyo	UR18650F (IH)	0100	LiCoO2/graphitized carbon (default)

Nota: en el recuadro rojo se señala el identificador químico apropiado para trabajar con una celda Li-Ion 18650. Elaboración propia.

Si en caso no hubiera sido posible encontrar un ChemID apropiado, lo que proseguía era el paso 2 de la guía que indica que hay que utilizar la herramienta *Gauging Parameter Calculator: Match chemistry for Impedance Track gauges*. Esta herramienta es una calculadora que encuentra un identificador químico más cercano que describa el comportamiento de la celda con la que se está trabajando. Para utilizarla es necesario llevar a cabo un experimento de carga-relajación-descarga-relajación y generar un archivo .log, estos archivos son generado directamente en bqStudio desde la pestaña “Watch” como se menciona en el capítulo 9.1.2, con la diferencia de que los registros que se deben de almacenar son el voltaje, la corriente media y la temperatura, como se muestra en la Figura

45. algo importante para que la herramienta funcione es configurar la frecuencia de muestreo adecuada, entre 2000 ms y 5000 ms.

Figura 45: Pestaña watch para ChemID.



Nota: los recuadros rojos se señalan los datos que deben de grabarse durante el proceso carga-descarga para posteriormente generar el archivo necesario para determinar el ChemID. Además, se ve la frecuencia de muestreo a la que hay que medir los datos. Elaboración propia.

Sin embargo, al ser la temperatura un factor importante para que la herramienta funcione, sería necesario utilizar un sensor externo de temperatura, ya sea un termistor NTC Semitec 103AT o Mitsubishi BN35-3H103FB-50. Sin embargo, se determinó que es posible utilizar el sensor de temperatura interno que incluye el BQ34Z100EVM en la terminal RT1 (ver Figura 56), solo habría que des-soldarlo del PCB, soldar sus dos terminales a cables y la punta libre de los cables soldarla de nuevo al PCB. El motivo de agregar una extensión es que el sensor debe de pegarse a la superficie de la celda para que pueda tomar mediciones de la temperatura de esta.

Con los datos ya generados, el siguiente paso es subir el archivo .log a la herramienta de *Gauging Parameter Calculator: Match chemistry for Impedance Track gauges* de Texas Instruments, al cabo de una hora ellos mandarán el identificador químico más apropiado para la celda para programarlo al IC desde bqStudio.

9.5. Configurar la *Data Flash*

Tras los experimentos realizados que se describen en el Capítulo 9 apartado 9.1, el último paso previo a realizar el ciclo de aprendizaje fue configurar los datos de la *Data Flash* con la información que se obtuvo. Los parámetros que se modificaron se presentan en las Figuras 46, 47, 48 y 49.

Figura 46: Datos modificados de la Data Flash 1.

Read/Write Data Memory Contents			
Configuration	Name	Value	Unit
System Data	OT Chg	55.0	1degC
System Data	OT Chg Time	2	Seconds
System Data	OT Chg Recovery	50.0	1degC
System Data	OT Dsg	60.0	1degC
System Data	OT Dsg Time	2	Seconds
System Data	OT Dsg Recovery	55.0	1degC
Charge	Chg Inhibit Ctg		
Charge	Chg Inhibit Temp Low	0.0	1degC
Charge	Chg Inhibit Temp High	45.0	1degC
Charge	Temp Hys	5.0	1degC
Charge	Suspend Low Temp	-5.0	1degC
Charge	Suspend High Temp	55.0	1degC
Charge	Pb Temp Comp	0.000	%
Charge	Pb Reduction Rate	0.000	%
Charge Termination	Taper Current	535	mAmp
Charge Termination	Min Taper Capacity	25	mAmpHr
Charge Termination	Cell Taper Voltage	10	mVolt

Nota: El dato que se modificó fue *Taper Current* en el registro *Configuration*, señalados con recuadros verdes. Elaboración propia.

Figura 47: Datos modificados de la Data Flash 2.

Configuration	Name	Value	Unit
System Data	NMH Cell Negative Delta Time	0	Seconds
System Data	NMH Cell Neg Delta Qual Volt	0	mVolt
Data	Manuf Date	1980-12-16	Day + Mo'32 + (Yr -1980)/256
Data	Ser Num	000a	hex
Data	Cycle Count	3600	Count
Data	CC Threshold	900	mAmpHr
Data	Max Error Limit	12	%
Data	Design Capacity	2850	MillAmpHour
Data	Design Energy	10585	MillWattHour
Data	SOH Load I	-400	MilliAmp
Data	Cell Charge Voltage T1-T2	4200	mV
Data	Cell Charge Voltage T2-T3	4250	mV
Data	Cell Charge Voltage T3-T4	4150	mV
Data	Charge Current T1-T2	10	Percent
Data	Charge Current T2-T3	50	Percent
Data	Charge Current T3-T4	30	Percent
Data	JEITA T1	112	degC
Data	JEITA T2	90	degC
Data	JEITA T3	16	degC
Data	JEITA T4	104	degC
Data	Design Energy Scale	16	Number
Data	Device Name		-
Data	Manufacturer Name	b34z100	-
Data	Device Chemistry	1737	-
Discharge	SOC1 Set Threshold	150	mAh
Discharge	SOC1 Clear Threshold	175	mAh
Discharge	SOCF Set Threshold	75	mAh

Nota: del registro *Configuration* se modificaron los datos señalados con recuadros verdes. Elaboración propia.

Figura 48: Datos modificados de la Data Flash 3.

Configuration	Name	Value	Unit
System Data	Cell BL Set Volt Time	8	Seconds
System Data	Cell BL Clear Volt Threshold	5	mVolt
System Data	Cell BH Set Volt Threshold	4300	mVolt
System Data	Cell BH Volt Time	2	Seconds
System Data	Cell BH Clear Volt Threshold	5	mVolt
System Data	Cycle Delta	0.00	%
Manufacturer Data	Pack Lot Code	0000	hex
Manufacturer Data	PCB Lot Code	0000	hex
Manufacturer Data	Firmware Version	0000	hex
Manufacturer Data	Hardware Revision	0000	hex
Manufacturer Data	Cell Revision	0000	hex
Manufacturer Data	DF Config Version	0000	hex
Integrity Data	Static Chem DF Checksum	670d	Number
Lifetime Data	Lifetime Max Temp	30.0	1degC
Lifetime Data	Lifetime Min Temp	20.0	1degC
Lifetime Data	Lifetime Max Chg Current	1003	mAmp
Lifetime Data	Lifetime Max Dsg Current	-515	mA
Lifetime Data	Lifetime Max Pack Voltage	4244	20mV
Lifetime Data	Lifetime Min Pack Voltage	2236	20mV
Lifetime Data	Lifetime Temp Samples		
Lifetime Data	LT Flash Cnt	54	Count
Registers	Pack Configuration	0161	flags
Registers	Pack Configuration B	ff	flags
Registers	Pack Configuration C	30	flags
Registers	LED_Cmn Configuration	a8	flags
Registers	Alert Configuration	0000	flags
Registers	Number of series cell		num

Nota: los últimos datos que se modificaron del registro *Configuration* se señalan con recuadros verdes. Elaboración propia.

Figura 49: Datos modificados de la Data Flash 4.

System Data	Value	Unit
Load Select	0	Number
Load Mode	0	Number
Gas Gauging	60	num
Max Res Factor	14	num
Min Res Factor	10	num
Ra Filter	2	%
Min PassedChg NIMH-LA 1st Qmax	25	%
Maximum Qmax Change	2500	mVolt
Cell Terminate Voltage	256	mVolt
Cell Term V Delta	803	Seconds
ResRelax Time	9562	MilliAmp
User Rate-mA	3870	miliC/W
User Rate-Pwr	0	MilliAmpHour
Reserve Cap-mAh	0	mWh/cWh
Reserve Energy	0	num
Max Scale Back Grid	4	mVolt
Cell Min DeltaV	0	%
Ra Max Delta	42	mOhms
Design Resistance	0	num
Reference Grid	0	mAmpHour
Qmax Max Delta %	0	Num
Max Res Scale	0	Num
Min Res Scale	67	%
Fast Scale Start SOC	0	mVolt
Charge Hys V Shift	532	s
Smooth Relax Time	200	mAmp
Chg Current Threshold	400	mAmp
Chg Current Threshold	100	mAmp
Chg Relax Time	60	Seconds
Chg Relax Time	60	Seconds
Cell Max IR Correct	257	mV
Qmax Cell 0	2850	mAmpHr
Cycle Count	0	num
Update Status	00	num
Cell V at Chg Term	4200	mVolt

Nota: el último registro que se modificó fue el de *Gas Gauging*. Los datos modificados se señalan con recuadros verdes. Elaboración propia.

Es importante resaltar que a pesar de haber programado la química seleccionada en el capítulo 9.4, el ChemID tuvo que ingresarse de forma manual en los parámetros de la Data Flash, como se muestra en la Figura 47.

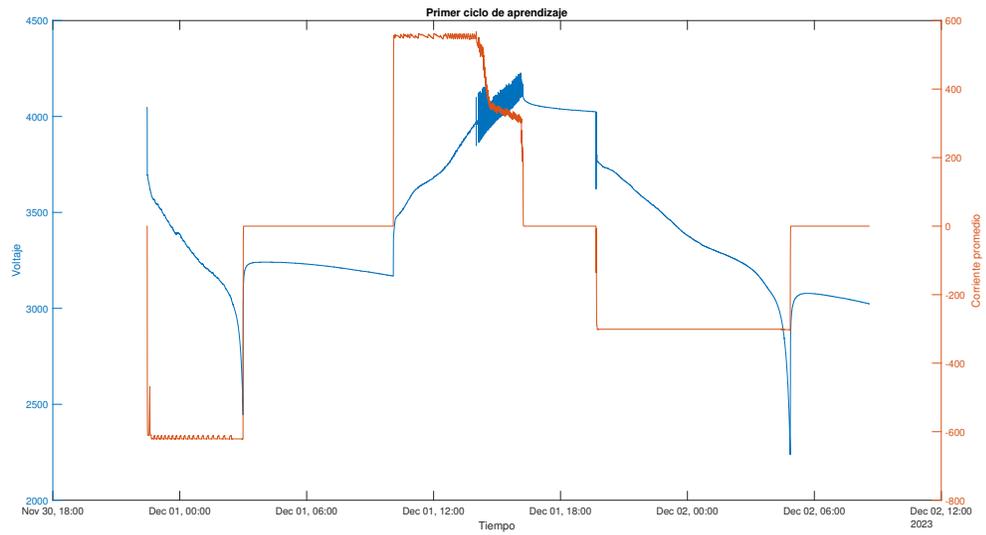
En las configuraciones que se muestran en la Figura 48 el modo de LED_Comm Configuration se seleccionó para utilizar las 10 LEDs que el módulo de evaluación BQ34Z100EVM trae integrado y en Alert Configuration se seleccionó únicamente la alerta de carga completa. Por otro lado, el modo de funcionamiento del algoritmo de Impedance Track que se escogió fue el correspondiente a 3 (ver Figura 49). Este modo de funcionamiento se explica a mayor profundidad en el Cuadro 3.

Ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1

Tras haber configurado la *Data Flash* y haber determinado el ChemID, se procedió a efectuar el ciclo de aprendizaje utilizando bqStudio y el módulo de evaluación EV2400. Para saber que el ciclo se diera de forma correcta se configuró la pestaña de Watch de bqStudio como se muestra en la Figura 41, pero sin *Remaining Capacity*. Por otro lado, tomando en consideración las recomendaciones mencionadas en el capítulo 6.2.9 en ‘**Problemas comunes durante el ciclo de aprendizaje**’, al iniciar la descarga se configuró la carga electrónica de tal forma que se cumpliera con una descarga de C/5. Al tener la celda una capacidad de 2900 mAh teóricos, la tasa de descarga que se utilizó fue de 580 mAh (2900/5) y para la carga se utilizó una tasa de 500 mAh, ya que el cargador no funciona a tasas mayores, como se indicó en el capítulo 9.1.2. Los resultados que se obtuvieron del ciclo de aprendizaje se presentan en las Figuras 50 y 51.

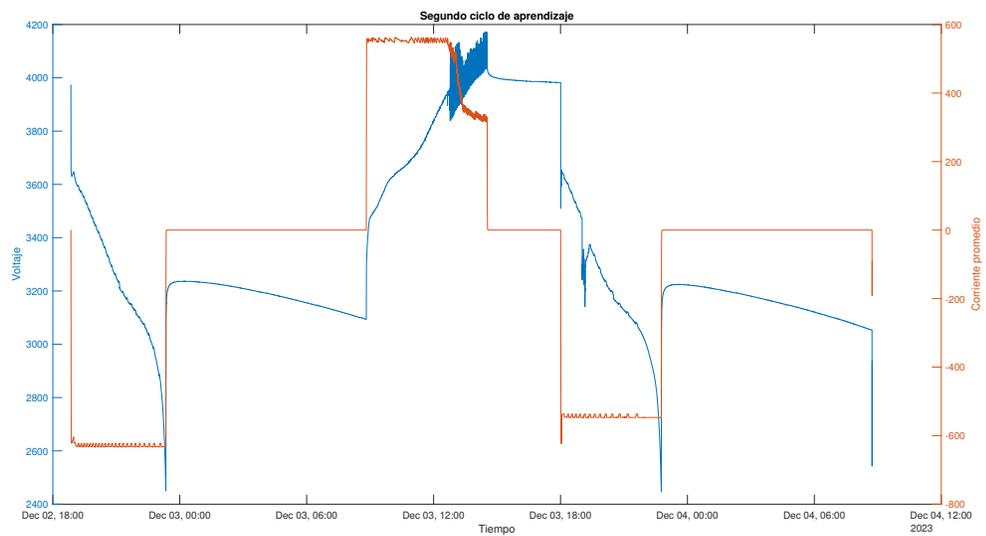
Después de analizar el diagrama de flujo de la Figura 52 correspondiente al primer ciclo de aprendizaje y compararlo con el diagrama de flujo de un ciclo de aprendizaje exitoso de la Figura 7, se concluyó que el ciclo de aprendizaje falló durante la carga máxima. Se identificaron dos eventos importantes. En primer lugar, durante el proceso de carga, *UpdateStatus* pasó a ser 0, lo cual no debería haber sucedido. Se especula que esto ocurrió debido a la tasa de corriente de carga, que según Texas Instruments debe ser C/2 de la capacidad total de la celda; sin embargo, esto no fue posible de conseguir debido al mal funcionamiento del cargador Wissblue. En segundo lugar, durante la primera descarga, nunca se alcanzó el voltaje de corte. Esto se debió a que la carga electrónica se configuró para hacer un corte en 2.5 V; sin embargo, cuando se hizo el corte, el IC aún no había detectado un voltaje de 2.5 V, sino uno un poco mayor (2.6 V).

Figura 50: Resultados del primer ciclo de aprendizaje ejecutado.



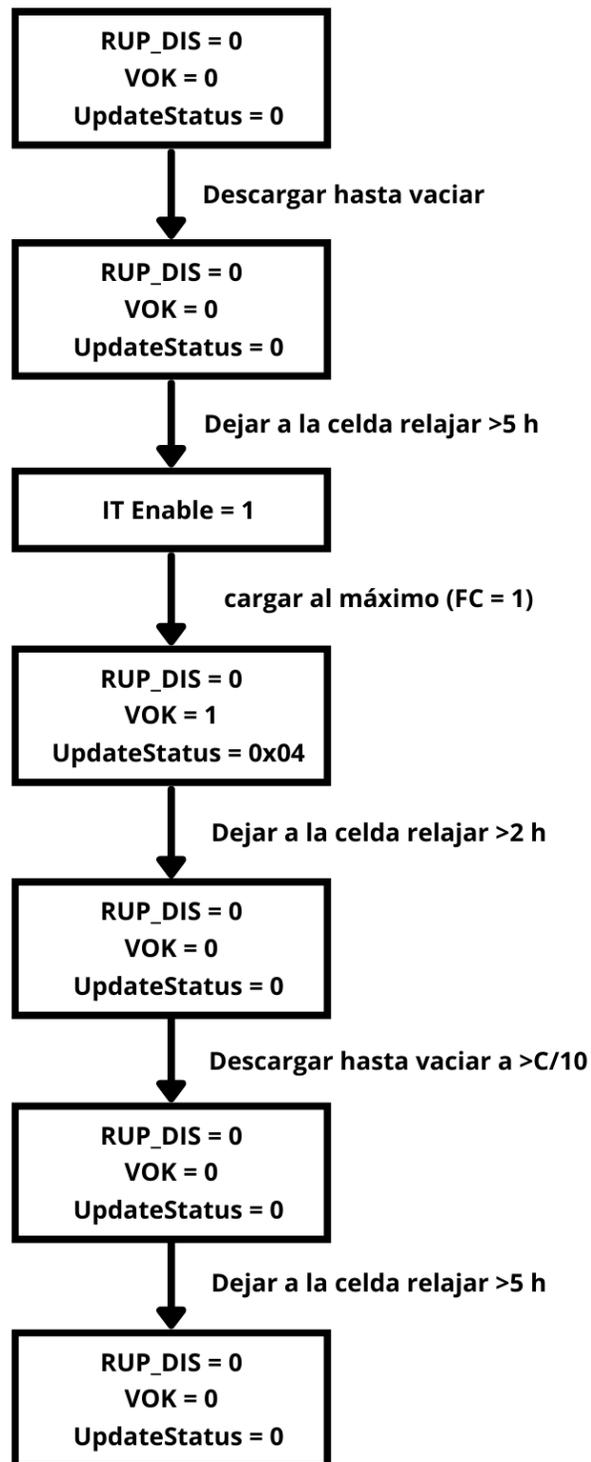
Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de corriente. El eje horizontal es el tiempo transcurrido durante el ciclo de aprendizaje. Elaboración propia.

Figura 51: Resultados del segundo ciclo de aprendizaje ejecutado.



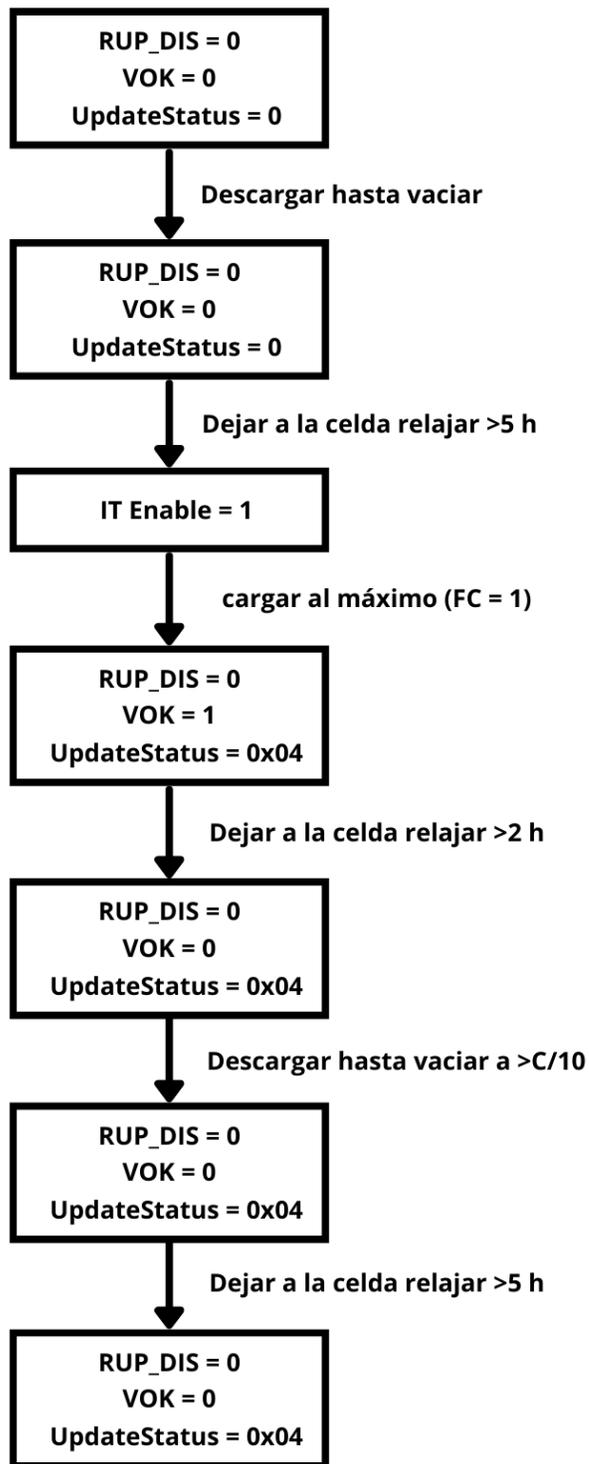
Nota: el eje vertical izquierdo tiene una escala apropiada para la medición de voltaje y el eje vertical derecho una escala menor para la medición de corriente. El eje horizontal es el tiempo transcurrido durante el ciclo de aprendizaje. Elaboración propia.

Figura 52: Diagrama de flujo de primer ciclo de aprendizaje.



Nota: se observa el cambio de [RUP_DIS], [VOK] y *UpdateStatus()* durante el ciclo de aprendizaje. Elaboración propia.

Figura 53: Diagrama de flujo de segundo ciclo de aprendizaje.



Nota: se observa el cambio de [RUP_DIS], [VOK] y *UpdateStatus()* durante el ciclo de aprendizaje. Elaboración propia.

Otro problema notorio fue que, durante la carga, no se siguió un perfil de corriente constante al inicio y, tras alcanzar el voltaje máximo, un perfil de voltaje constante. Esto se notó al comparar la Figura 50 resultado obtenido del ciclo de aprendizaje, con la Figura 6, resultado teórico del ciclo de aprendizaje. Durante la carga, no solo no se siguió el perfil de carga esperado, sino que también el voltaje y la corriente no eran estables; sus valores oscilaron demasiado, provocando que el IC nunca detectara correctamente las condiciones de voltaje máximo y de *taper current*. Incluso hubo un momento en el que el IC ya había detectado un estado de carga completa, pero el cargador no, lo que llevó a una carga prolongada de la celda. Se sabe, según la teoría vista en la sección 6.2.9 en “Problemas comunes durante el ciclo de aprendizaje” que continuar la carga cuando el IC detecta FC provocará un fallo en el ciclo de aprendizaje.

Dado que se identificó al cargador Wissblue como el principal problema, se investigó una alternativa de dispositivo para cargar las celdas y poder llevar a cabo el proceso de carga de forma controlada. El dispositivo que se encontró fue el BQ25890EVM-664, que es un módulo de evaluación diseñado para cargar una sola celda.

Se confirmó que el cargador da problemas al cargar a una tasa de 1000 mAh con el segundo ciclo de aprendizaje que se llevó a cabo. Al observar el diagrama de flujo de la Figura 53 se pudo notar que *UpdateStatus* nunca cambió a 0x05, y se mantuvo en 0x04. De nuevo, el ciclo volvió a fallar.

- Se creó una metodología que brinda la información y herramientas necesarias para la creación, prueba y diagnóstico de bancos de baterías Li-Ion aplicables para LEV. Por ello, se diseñó una batería capaz de alimentar al Rover UVG por 2 horas. La batería se compone de 4 grupos de celdas en serie, donde cada grupo contiene 10 celdas en paralelo (10P4S). Y para diagnosticar esta batería se desarrolló *firmware* para utilizar las funciones de diagnóstico del BQ34Z100-G1 a través de un ESP32, pudiendo así obtener información de las celdas, como: estado de carga (SOC), corriente promedio, voltaje promedio, temperatura, etc.
- Se determinó que para caracterizar una celda Li-Ion, es necesario realizar pruebas de carga y descarga de la misma, utilizando el circuito integrado BQ34Z100-G1 para almacenar y medir datos de voltaje, corriente y capacidad para posteriormente analizarlos y así obtener las características de la celda.
- Se concluyó que no es necesario realizar experimentos para determinar el voltaje en circuito abierto y la resistencia interna de la celda. Estas características se determinan automáticamente durante el ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1, mediante el algoritmo de Impedance Track.
- Se desarrolló un *firmware* capaz de acceder a las funciones de monitoreo del BQ34Z100-G1. Este es adecuado para aplicaciones finales, donde la función del ESP32 consista en recibir información sobre el estado de la batería para tomar decisiones basadas en esta información. No obstante, para cuestiones de calibración y procesos de ciclo de aprendizaje, se recomienda utilizar el módulo de evaluación EV2400 junto con la aplicación bqStudio debido a problemas potenciales en la escritura de la memoria flash y la programación del ChemID incluso con la aplicación oficial.
- Se dedujo que no hay manera de validar el *firmware* desarrollado sin uno de los dos módulos de interfaz que vende Texas Instruments (EV2300 o EV2400). Incluso los valores de los registros de la memoria no volátil que la *datasheet* indica como configurados por defecto no son correctos. Esta dificultad se observó al comparar los datos obtenidos desde bqStudio con los datos experimentales y los indicados en la

datasheet. Por lo tanto, trabajar y configurar el integrado BQ34Z100-G1 con *firmware* desarrollado se vuelve complicado sin estos módulos de interfaz.

- El BQ34Z100EVM contiene un sensor de temperatura incorporado, y es posible aprovechar este des-soldando el sensor de la placa, y soldándolo de nuevo pero con extensiones de cable, permitiendo así pegar el sensor a la superficie de las celdas para medir su temperatura. Esta modificación será de utilidad, debido a que parte importante de la caracterización de una celda Li-Ion es la temperatura a la que opera.
- Para llevar a cabo las pruebas de caracterización y la configuración del BQ34Z100-G1 de la forma más apropiada, el orden debe de ser el siguiente: Encontrar el ChemID de la celda con la que se trabajará, a través de un ciclo de carga-descarga-reposo (un ciclo de aprendizaje) utilizando el EV2400/EV2300. Para ello se deben almacenar los datos de voltaje, corriente promedio y la temperatura de la celda durante este ciclo, para posteriormente subirlos en formato zip hacia la calculadora GPC y así recibir el ChemID apropiado para la celda. Con el ChemID es posible conocer la información teórica de la celda, y para conocer su comportamiento real será necesario realizar las pruebas de descarga y carga a la tasa a la que operará en su aplicación final. Por último, ejecutar el ciclo de aprendizaje y con eso se tendrá el IC listo para funcionar.
- Se recomienda realizar pruebas de descarga de la celda/batería a la tasa de descarga promedio a la que estará expuesta en su aplicación final, ya que se determinó que el voltaje de terminación de la celda cambia dependiendo de la tasa de descarga y no será capaz de entregar toda su energía si el voltaje de terminación está mal seleccionado.
- La caracterización de una celda Li-Ion requiere aproximadamente 48 horas de experimentación. Por lo tanto, la solución más efectiva para tomar mediciones consiste en desarrollar un código para almacenar los datos recopilados por la carga electrónica ajustable XY-FZ25 de 25W y 4A durante el proceso de descarga. Esto en caso de no contar con un módulo como el EV2400 o el EV2300.
- Los experimentos de carga y descarga son apropiados para obtener todas las características importantes de la celda, como voltaje máximo, voltaje de corte, corriente de abandono, *taper current* y capacidad máxima de la celda. Además, de estos experimentos fue posible observar que no es recomendable descargar una celda/batería

a una tasa mayor a $C/2$ de manera constante, ya que esto podría ocasionar mal funcionamiento y deterioro acelerado, debido a que el voltaje y temperatura de operación no se encuentran dentro de los límites recomendables para una celda 18650.

- Para diseñar un BMS es necesario investigar sobre los sistemas para balancear las celdas durante la operación. Aunque este trabajo de graduación brinde herramientas necesarias para facilitar la creación del BMS todavía se requiere profundizar más en los temas. Por ello se recomienda llevar la especialización que ofrece la universidad de Colorado Boulder llamada: Algorithms for Battery Management Systems, en coursera.
- Para llevar a cabo el ciclo de aprendizaje del BQ34Z100-G1 para una celda/batería Li-Ion, es esencial contar con un cargador apropiado capaz de seguir un perfil de carga CC-CV. De lo contrario, el ciclo podría fallar si el IC detecta datos atípicos durante la carga. Por este motivo el cargador Wissblue no es funcional, y una mejor alternativa es el módulo BQ25890EVM-664.

- Calva, L. F. L. (2022). *Litio en América Latina: ¿Una nueva búsqueda de “El Dorado”?* <https://www.undp.org/es/latin-america/blog/graph-for-thought/lithium-latin-america-new-quest-el-dorado>
- Chombo, P. V., & Laonual, Y. (2020). A review of safety strategies of a Li-Ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>
- Garcia, J. R. H. (2023). *Diseño mecánico y de potencia para el rover* [Tesis de licenciatura].
- Instruments, T. (s.f.). *TI enables automakers to take full advantage of EV range with the industry’s most accurate battery cell and pack monitors*. <https://news.ti.com/ti-enables-automakers-to-take-full-advantage-ev-range-with-industrys-most-accurate-battery-cell-and-pack-monitors>
- INSTRUMENTS, T. (2021a, abril). *BQ34Z100-G1 Wide Range Fuel Gauge with Impedance Track™ Technology*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq34z100-g1.pdf?ts=1695785694267&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ34Z100-G1%253FkeyMatch%253D%2526tsearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253Dpartmatches
- INSTRUMENTS, T. (2021b, abril). *BQ34Z100EVM Wide Range Impedance Track Enabled Battery Fuel Gauge Solution*. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265.
- INSTRUMENTS, T. (2022a, enero). *Theory and Implementation of Impedance Track™ Battery Fuel-Gauging Algorithm in bq2750x Family*. <https://www.ti.com/lit/an/slua450a/slua450a.pdf?ts=1700850115747>
- INSTRUMENTS, T. (2022b, mayo). *BQ34Z100-G1 Technical Reference Manual*. https://www.ti.com/lit/ug/sluubw5a/sluubw5a.pdf?ts=1695853238926&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ34Z100-G1%253FkeyMatch%253D%2526tsearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253Dpartmatches
- LiitoKala. (2023). *34B-PCB 18650 3400mAh*. <https://www.liitokala.com.cn/LiitoKala-Battery/478.html>

- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>
- Plett, G. (2015). BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS VOLUME I: BATTERY MODELING. En J. Wang (Ed.). ARTECH HOUSE.
- Ramírez, W. G. (2021). Análisis de la contribución científica Latinoamericana en la temática de los vehículos eléctricos. *Revista de DIRECCIÓN Y ORGANIZACIÓN*.
- Sanchez-Lopez, M. D. (2023). Geopolitics of the Li-ion battery value chain and the Lithium Triangle in South America. *Latin American Policy*, 14(1), 22-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/lamp.12285>
- SDI, S. (2012, septiembre). *SAMSUNG SDI Confidential Proprietary Spec. No. INR18650-29E Version No. 1.1 SPECIFICATIONS OF PRODUCT 1. Customer*. <https://www.datasheet-pdf.com/PDF/INR18650-29E-Datasheet-Samsung-821874>
- Soto, A., Berrueta, A., Sanchis, P., & Ursúa, A. (2019). Analysis of the main battery characterization techniques and experimental comparison of commercial 18650 Li-Ion cells. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783862>
- Weicker, P. (2014). A SYSTEMS APPROACH TO Lithium-Ion Battery Management. En J. Wang (Ed.). ARTECH HOUSE.

Anexo 1. Repositorio de Github donde se encuentra el código del *firmware*.

El código del *firmware* que se desarrolló en C++, que permite utilizar las características de diagnóstico de circuito integrado BQ34Z100-G1 se encuentra en el siguiente enlace.

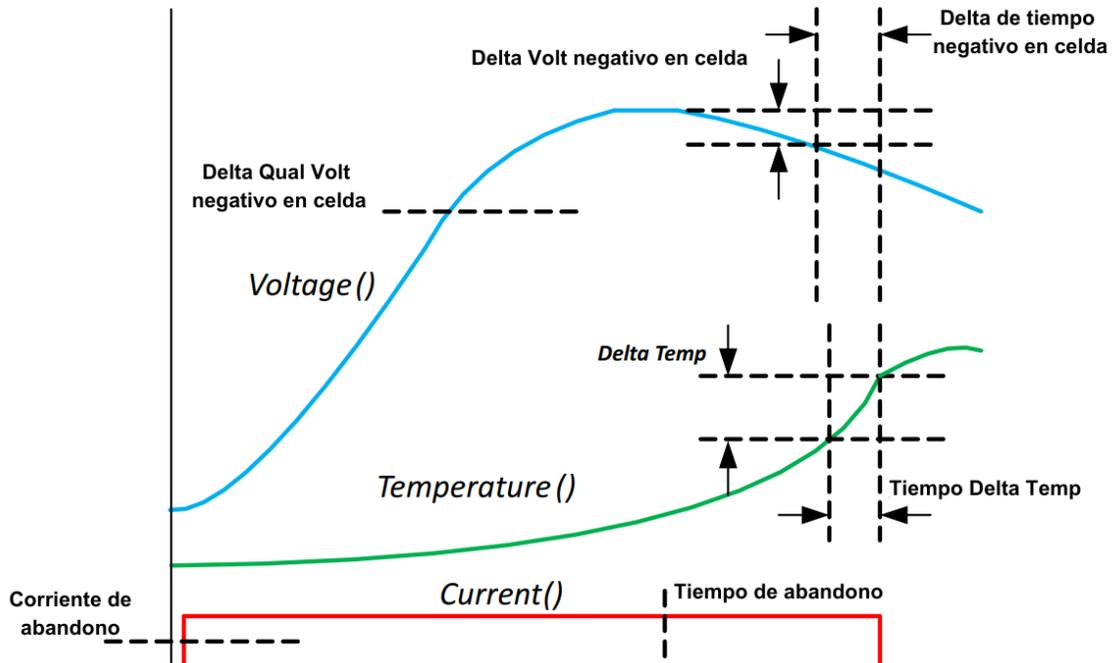
Anexo 2. Manual para caracterización de una celda Li-Ion.

Se desarrolló un manual que tiene los pasos a seguir, de forma ordena, para cracterizar una celda Li-Ion y así poder utilizar el circuito integrado BQ34Z100-G1. Este manual se encuentra en el siguiente hipervínculo: Guía para caracterizar una celda Li-Ion y diseñar un banco de baterías.

Anexo 3. Figuras varias.

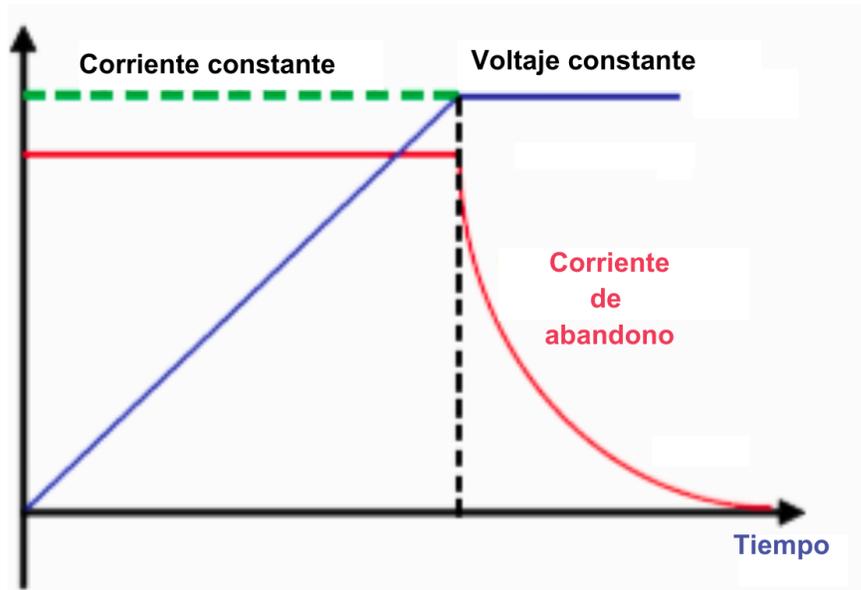
En esta sección se encuentran algunas figuras que se mencionan en el trabajo, pero no se colocaron dentro del texto.

Figura 54: Terminación de carga de una celda NiXX.



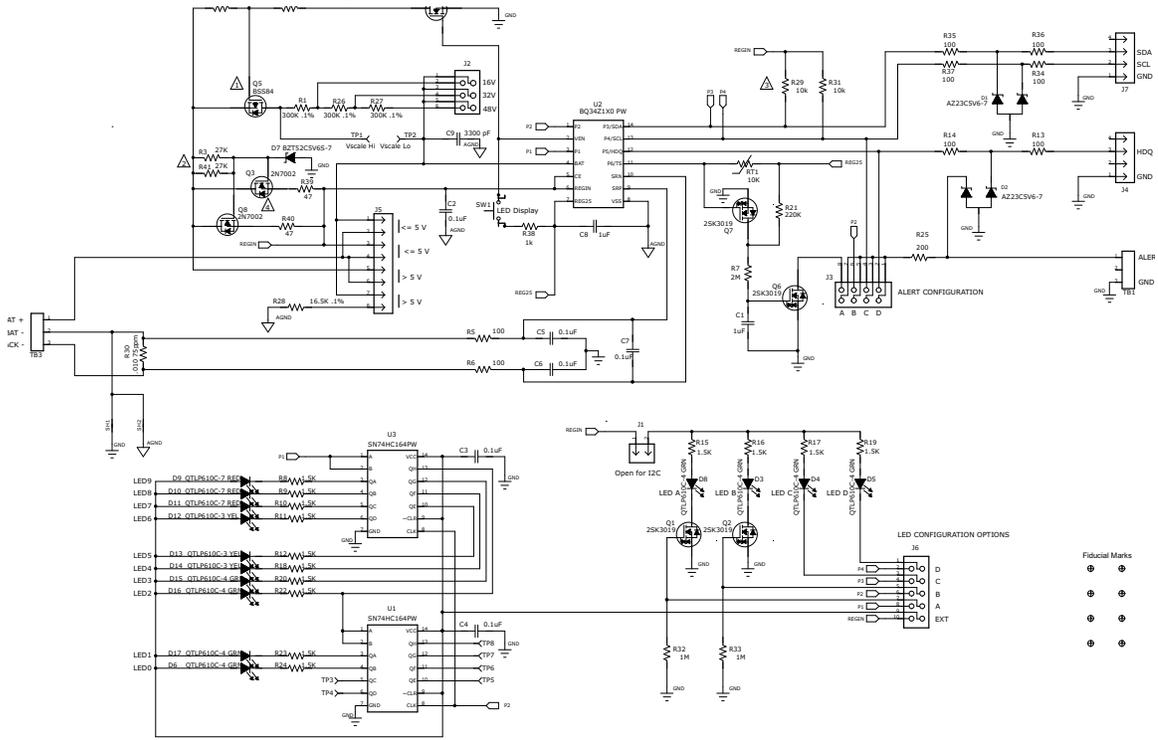
Nota: esta Figura muestra el comportamiento del voltaje, corriente y temperatura de una celda NiXX al momento de que la carga se completa. Adaptado y traducido de (INSTRUMENTS, 2021a).

Figura 55: Perfil de carga típico de una batería/celda.



Nota: esta Figura muestra un perfil de carga de una celda Li-Ion simplificado. Elaboración propia.

Figura 56: Esquemático del BQ34Z100EVM.



Nota: se observan todas las conexiones físicas que hay entre el IC BQ34Z100-G1 y el resto de módulos de los cuales está compuesto el BQ34Z100EVM. Extraído de (INSTRUMENTS, 2021b).

Figura 57: Carga electrónica ajustable XY-FZ25 DE 25W 4Ar.



Nota: obtenido de (La Electrónica, 2023).



Figura 58: WISSBLUE 18650 Battery Charger.

Nota: obtenido de (Amazon, 2023).

Capacidad Química Es una medida que indica cuánta energía puede retener una celda/batería. La unidad de esta medida es el mAh. 15

CC Es la abreviación que se utiliza para referirse a corriente constante. 58

Taper Current Conocida como corriente de terminación. Se presenta en la parte final del ciclo de carga de una batería, en esta etapa el voltaje se mantiene constante y la corriente empieza a decaer hasta un nivel mínimo, este nivel mínimo es la Corriente de Reducción (Taper Current). 27

Terminate Voltage Conocido como Voltaje de terminación. Es el punto en el que se determina que la celda/batería ha alcanzado su capacidad máxima de carga y se debe detener el proceso de carga para evitar daños o condiciones adversas, como la sobrecarga. Este valor varían según el tipo de química de la batería. 15