



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN
ELÉCTRICA

Título del proyecto:

“DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL
PARA EL CARGADOR DE BATERÍAS DE ION LITIO B6AC V2”

Alumno: Christian Daniel Casanova Vasco
Tutores: Alfredo Ursúa / Alberto Berrueta
Pamplona 28 de febrero de 2019

Resumen

Las baterías de litio son un sistema de almacenamiento cada vez más empleado, tanto a nivel industrial como docente y doméstico. El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un software de monitorización y control para un cargador de baterías de litio comercial de bajo coste, el B6AC v2. El software desarrollado en este trabajo aumenta considerablemente las prestaciones de este equipo comercial con un precio de 50€, permitiendo la programación, visualización y almacenamiento de datos de cargas y descargas de la batería. Estas nuevas prestaciones amplían la versatilidad del equipo y permiten su uso para una mayor variedad de ensayos, haciéndolo apto incluso para la realización de prácticas docentes de asignaturas relacionadas con el almacenamiento de la electricidad. Por ello, al final de este trabajo se recoge una propuesta de guion de laboratorio orientado al afianzamiento de los conceptos más importantes de baterías de litio a través del equipo B6AC v2.

Para el desarrollo de este software ha sido necesario analizar, descifrar y procesar mediante el software Labview las tramas de comunicación que el dispositivo B6AC v2 y un ordenador se envían cuando se conectan a través de un cable USB. El software desarrollado cuenta con una interfaz gráfica para visualizar en tiempo real y almacenar la corriente y la tensión de la batería, medidas por el B6AC v2, con una frecuencia segundal.

ABSTRACT

The use of lithium-ion batteries as energy storage systems is rapidly increasing, at industrial, educational, and domestic level. The aim of this work is the development of a monitoring and control software for a low-cost, commercial Li-ion battery charger named B6AC v2. The software developed in this work notably improves the capability of this commercial charger, with a price around € 50, allowing for the programming, visualisation and storage of battery charge and discharge data. This upgrade increases the versatility of the battery charger, enabling a wider variety of uses, even including an interesting application for laboratory courses at university. Therefore, a proposal for a laboratory script is presented at the end of this work. Its aim is to strengthen important knowledge about Li-ion batteries by means of the device B6AC v2.

The development of this software has required an analysis, decode and processing by means of Labview of the data frames exchanged by the B6AC v2 and a computer through USB. The developed software includes an interface for the real-time visualisation and storage of the battery voltage and current measured by the B6AC v2 with a frequency of 1 second.

Contenido

1	Introducción	2
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Estructura del trabajo	2
2	Baterías de ion litio	4
2.1	Celda de ion litio.....	5
2.2	Arreglos de celdas de ion litio	5
2.3	Características de una batería de litio	6
2.3.1	Capacidad	6
2.3.2	C-rate.....	6
2.3.3	Zona de operación segura (SOA)	7
2.3.4	Estado de carga (SOC)	7
2.3.5	Eficiencia coulombica	7
2.3.6	Eficiencia energética:.....	8
2.3.7	Modelado de una batería de litio.....	8
2.3.8	Medición de la resistencia interna de una batería	9
2.3.9	Algoritmo de carga.....	9
3	Dispositivo B6AC v2	11
3.1	Partes del cargador	11
3.2	Características de funcionamiento con baterías de litio	12
3.2.1	Modos de funcionamiento con baterías de litio.....	13
3.2.2	Funcionamiento eléctrico del cargador	13
3.3	Conexión de un pack de baterías.....	13
3.4	Configuración del sistema	14
3.4.1	Limitación por temperatura	14
4	Precisión y caracterización de medidas.....	15
4.1	Calibración	16
4.1.1	Pruebas de calibración	17
4.1.2	Factor de corrección para corriente en descarga	19
4.1.3	Factor de corrección para voltaje en descarga	24
4.1.4	Factor de corrección para corriente en carga	26
4.1.5	Factor de corrección para voltaje en carga.....	29
5	Realización de ensayos con el cargador B6AC	32

5.1	Precauciones antes de iniciar un ensayo	32
5.1.1	Especificaciones de carga y descarga.....	33
5.2	Control manual.....	34
5.2.1	Medición del voltaje de la batería	34
5.2.2	Medición de resistencia interna	34
5.3	Programa ChargeMaster.....	35
5.4	Limitaciones de operación.....	38
5.4.1	Rangos de operación con baterías de litio.....	38
5.4.2	Limitaciones del software	39
6	Interfaz de control y monitoreo	40
6.1	Conexión con ordenador	40
6.1.1	Bus universal en serie (USB).....	40
6.2	Driver de comunicación.....	40
6.2.1	Driver de comunicación VISA	40
6.3	Tramas de datos	42
6.3.1	Captura de datos USB por medio de Wireshark	43
6.3.2	Procedimiento de captura.....	43
6.4	Descripción de tramas de datos.....	44
6.4.1	Tramas de datos generadas por el ordenador.....	44
6.4.2	Tramas de datos enviadas por el cargador	46
6.5	Desarrollo del software.....	49
6.5.1	Interfaz de usuario	49
6.5.2	Uso del programa	52
6.5.3	Programación	52
6.5.4	Archivo de registro de datos	57
6.5.5	Creación de pasos programados.....	57
6.5.6	Software de visualización en MATLAB	58
7	Práctica: Baterías de ion litio.	59
7.1	Sesión 1 – Práctica con una celda de ion litio	62
7.2	Sesión 2 – Práctica: Conexión de dos celdas desbalanceadas	69
8	Conclusiones	75
9	Trabajo futuro	75
10	Referencias	77

1 Introducción

En los últimos años el almacenamiento de energía eléctrica ha sido extensamente estudiado y se han desarrollado diversas tecnologías de baterías como elemento clave para el desarrollo sostenible. Cada tecnología de batería presenta unas características y restricciones que orientan su campo de aplicación.

En este contexto, el crecimiento y penetración de las baterías de ion litio para el almacenamiento de energía tanto en redes eléctricas como en tecnologías de vehículos eléctricos, hace necesario un mejor entendimiento de esta tecnología.

A través de este proyecto se desarrolla una herramienta en forma de aplicación que permita realizar ensayos de carga y descarga de celdas de ion litio con registro de los datos principales para cada experimento, además se elabora una guía de laboratorio sobre los conceptos relevantes del almacenamiento con celdas Li-ion.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Desarrollo de un sistema de monitoreo y control basado en Labview, para el registro, análisis y visualización de datos para el dispositivo B6ACv2 en ensayos con baterías de ion litio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del material bibliográfico seleccionado sobre baterías de ion litio.
- Describir y caracterizar el funcionamiento del dispositivo de gestión de baterías de ion litio.
- Desarrollar un software de registro y visualización de la información generada por el dispositivo.
- Desarrollar de una guía de laboratorio con la herramienta desarrollada para ensayos con celdas ion litio

1.2 Estructura del trabajo

En primer lugar, se realiza una revisión de conceptos generales sobre las baterías de ion litio estableciendo un entorno de trabajo para las siguientes secciones.

A continuación, se realiza una descripción del equipo de experimentación, características, limitaciones y comunicación, para determinar el alcance de la herramienta de ensayos.

Posteriormente se implementan las entradas y salidas de la herramienta para el control y monitoreo del dispositivo, además de la generación de archivos de registro para el usuario. Una vez el usuario programe el experimento la aplicación

registra y muestra automáticamente los datos más relevantes sobre el ensayo en tiempo real.

Por último, se desarrolla una guía de laboratorio para la realización de una práctica correspondiente al almacenamiento de energía con celdas de ion litio, con los respectivos recursos y resultados esperados.

2 Baterías de ion litio

Una batería de ion litio está compuesta por una o varias celdas electroquímicas interconectadas en serie/paralelo. Cada celda electroquímica es un dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica y viceversa. Se compone de dos electrodos y un electrolito donde los iones de litio se mueven entre el electrodo positivo y electrodo negativo creando un flujo de corriente, debido a que la reacción fisicoquímica es reversible la batería puede ser recargada.[1]

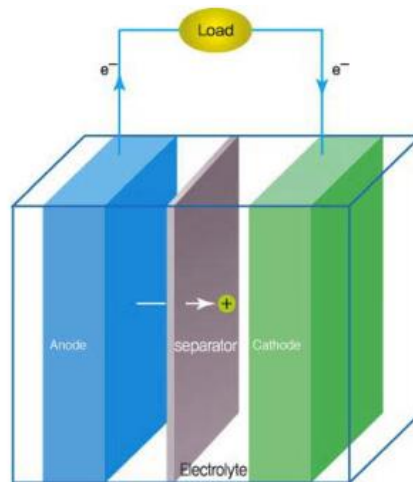


Figura 1 Partes de una celda electroquímica [1]

Las baterías de litio son una familia de dispositivos que combinan diferentes materiales constructivos para elementos internos (electrodos, separador, electrolito, etc.) y elementos externos (conectores, carcasa, protecciones, etc.), estas combinaciones determinan el rendimiento, seguridad, costo y otros parámetros de la batería. Debido a que es un campo de constante investigación se desarrollan nuevas composiciones constantemente.[2]

La flexibilidad de las baterías ion litio permite construir baterías en diferentes formas y configuraciones que se encuentran disponibles comercialmente. Figura 2

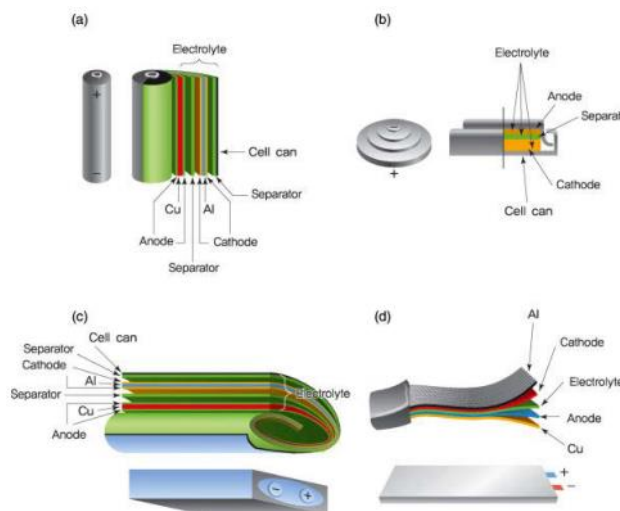


Figura 2 Formas comerciales de baterías de ion litio[1]

Las baterías de litio poseen características superiores de: voltaje, densidad de energía, mayor número de ciclos, ausencia de efecto memoria, buen rendimiento, en comparación con tecnologías de almacenamiento electroquímico. Desde su aparición en el mercado ha venido expandiendo su campo de aplicación desde pequeños dispositivos portátiles a grandes unidades de almacenamiento en vehículos eléctricos e integración de energías renovables.[3]

2.1 Celda de ion litio

Una celda de ion litio posee capas de electrodos positivos y negativos intercaladas y separadas por una lámina porosa. Contiene también un electrolito que sirve como medio de transporte para los iones de litio. Las capas de electrodos se enrollan y se encapsulan dentro de un contenedor para su protección y sellado.[2]

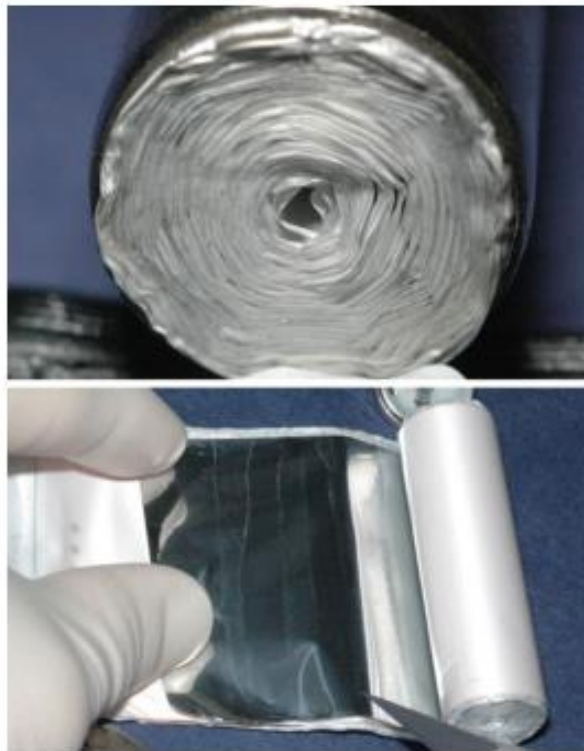


Figura 3 Estructura interna de una celda cilíndrica [2]

2.2 Arreglos de celdas de ion litio

Las celdas de ion litio se pueden interconectar en arreglos para obtener la capacidad y el voltaje deseado: conectando celdas en paralelo se puede incrementar la capacidad del pack de baterías y en serie se puede incrementar el voltaje de salida. [2]

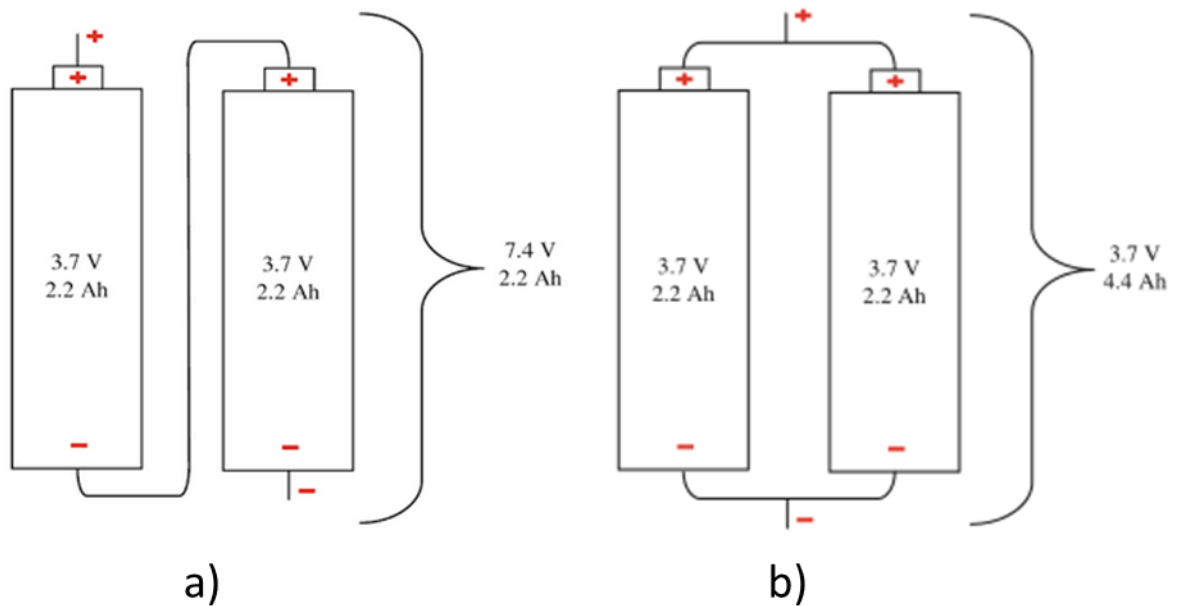


Figura 4 Conexión de dos celdas: a) conexión en serie, b) conexión en paralelo [2]

Los arreglos construidos se pueden clasificar de la siguiente manera [4]:

- **Bloque:** Celdas conectadas en paralelo.
- **Batería:** Conjunto de celdas o bloques conectados en serie en un mismo módulo que suministra mayor voltaje.
- **Pack:** Conjunto de baterías conectadas en combinaciones serie y/o paralelo.

2.3 Características de una batería de litio

2.3.1 Capacidad

Es la carga que puede suministrar una batería durante un tiempo determinado hasta su descarga que tiene como unidades Ah. Está determinada por la corriente de descarga, el voltaje de carga, voltaje de corte, temperatura, el tipo y cantidad de material activo [5], especificadas por el fabricante. Se puede calcular integrando la corriente en el tiempo según la siguiente ecuación:

$$cap = \int_{v_{min}}^{v_{max}} I(t)dt \quad (1)$$

2.3.2 C-rate

Relaciona la corriente con el tiempo de carga o descarga realizada en la batería, describiendo la capacidad de la batería en Amperios-Hora.

$$C_{rate} = \frac{i}{C_p}$$

Donde i : corriente empleada (A), C_p : capacidad nominal de la batería (Ah).

2.3.3 Zona de operación segura (SOA)

Describe la zona de operación de una batería de litio estableciendo para carga y descarga rangos de valores de corriente, voltaje y temperatura. Estos valores pueden variar dependiendo de las características constructivas de cada celda. [5]

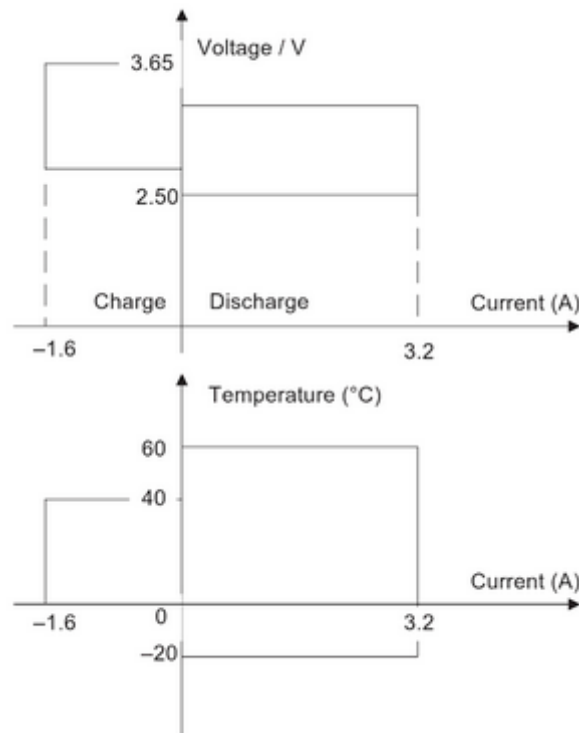


Figura 5 Zona segura de operación para una celda C/LiFePO₄[5]

El sistema electrónico al que esté conectado la batería debe encargarse de mantener los valores de funcionamiento en un rango seguro. En la Figura 5 se aprecia el rango de operación para una celda de tecnología C/LiFePO₄.

2.3.4 Estado de carga (SOC)

Indica en porcentaje el estado de carga disponible de una batería en determinado momento comparado con la carga total disponible cuando está completamente cargada expresado en porcentaje del 0 al 100%.

Para la determinación del SOC existe gran variedad de algoritmos de estimación dependiendo de la aplicación. Un método básico, el método **ampere-hour counting** consiste en la integración de la corriente que circula por la batería durante un tiempo determinado.

$$SoC(t) = SoC_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2)$$

En donde SoC₀: es el estado inicial de carga de la batería, C: es la capacidad nominal de la batería, t el tiempo y τ es la variable de integración.

2.3.5 Eficiencia coulombica

Describe la eficiencia de la carga con la cual se transfieren los electrones en la batería generando una reacción electroquímica. Se puede calcular mediante la

relación entre la capacidad extraída cargada y la necesaria para volver al estado inicial.[6]

$$\eta_c = \frac{Ah. descargados}{Ah. cargados} \quad (3)$$

2.3.6 Eficiencia energética:

Se refiere a la relación entre la energía empleada para cargar la batería y la energía extraída medida en Wh.

$$\eta_e = \frac{Wh. desargados}{Wh. cargados} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la resistencia interna de las celdas de ion litio es usualmente baja, las perdidas internas de energía en calor dadas por la relación I^2R serán bajas.[4] Al emplear corrientes de carga/descarga mayores, más energía es consumida térmicamente reduciendo la eficiencia energética.

2.3.7 Modelado de una batería de litio

El modelo eléctrico equivalente de una batería permite el estudio del comportamiento de la batería en diferentes escenarios de aplicación y diseño.

Los modelos básicos de baterías son:

- Modelo ideal: Representado la batería por una fuente de voltaje
- Modelo lineal: Consiste en una fuente de voltaje en serie con una resistencia equivalente (R_s).
- Modelo de Thevenin: Consiste en la conexión de una fuente de voltaje (E_o), resistencia interna (R), capacitancia (C) por las placas paralelas y la resistencia de sobre tensión (R_o).

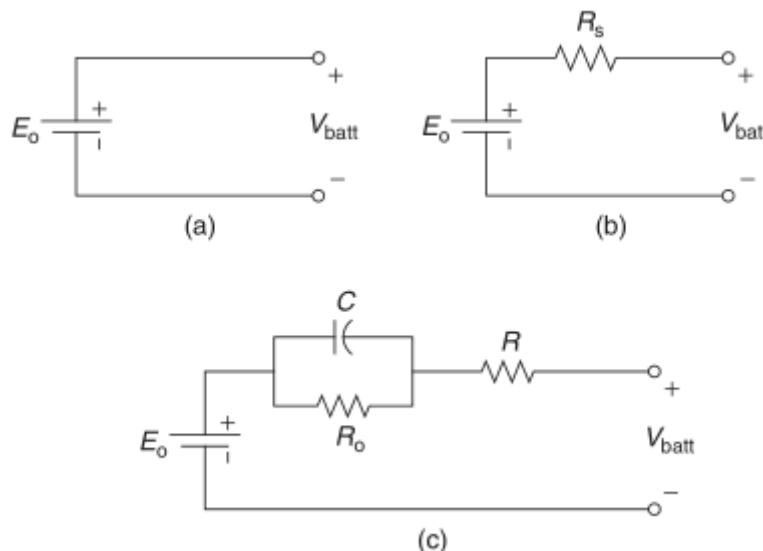


Figura 6 Modelos eléctricos de baterías: a) ideal, b) modelo lineal y c) modelo de Thevenin [7]

La resistencia interna en serie representa la resistencia: consecuencia de los procesos químicos, en los conductores y terminales de la celda. [4]

2.3.8 Medición de la resistencia interna de una batería

Para conocer la resistencia interna de una batería se pueden aplicar diferentes técnicas e instrumentos de medida según el tipo de batería. Un método empleado para las baterías de ion litio consiste en la medición en dos fases.

El método consiste en la medición de la resistencia DC aplicando dos descargas consecutivas a diferentes valores de corriente, voltaje y duración a la batería. Con estos valores se puede calcular la resistencia interna R_{DC} según la siguiente ecuación[8]:

$$R_{DC} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} \quad (5)$$

Los métodos se encuentran descritos en los estándares IEC 61960 para baterías de ion litio en dispositivos pequeños portables y IEC 62920 para baterías de aplicación industrial.

2.3.9 Algoritmo de carga

En una batería de litio se introduce energía eléctrica cargando la batería siguiendo un perfil de dos pasos: corriente constante a tensión variable y tensión constante a corriente variable. Inicialmente se aplica una pequeña carga al inicio para que la celda esté preparada para una corriente mayor, aunque usualmente no se necesita.

Los cargadores empleados para cargar baterías consisten en fuentes controladas que implementan las etapas CC y CV para cargar baterías. Su comportamiento está delimitado en correspondencia a las dos etapas de carga:[4]

- CC. **Corriente constante:** La primera etapa de carga se realiza a una corriente constante permitiendo un aumento del voltaje de la batería. El valor de la corriente es usualmente $<1C$ hasta que la batería alcanza su voltaje máximo.
- CV: **Voltaje constante:** La segunda etapa se desarrolla cuando la batería está cerca de la carga completa, una vez alcanzando un voltaje constante la corriente decae exponencialmente hasta que la batería está completamente cargada, usualmente los cargadores finalizaran esta etapa cuando se alcance una corriente de $0.1C$.

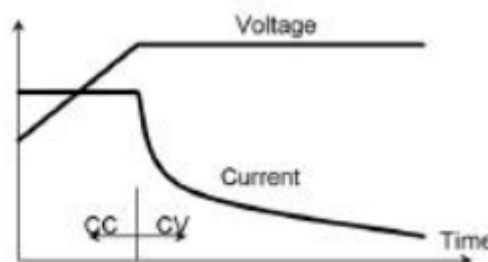


Figura 7 Curva característica CC-CV para la carga de una batería de litio [4]

- Opcionalmente cuando el voltaje inicial de una batería es muy bajo se aplica una pequeña carga al inicio a 10% de la corriente para que la celda esté preparada para una corriente mayor.

3 Dispositivo B6AC v2

El cargador B6AC es un dispositivo electrónico de gestión de baterías de litio que permite la carga y descarga de hasta máximo 6 celdas de litio en serie, que se puede controlar manualmente o por medio del software de ordenador suministrado por el fabricante.

3.1 Partes del cargador

El cargador es un dispositivo pequeño y compacto, que consta de los elementos mostrados en la Figura 8.

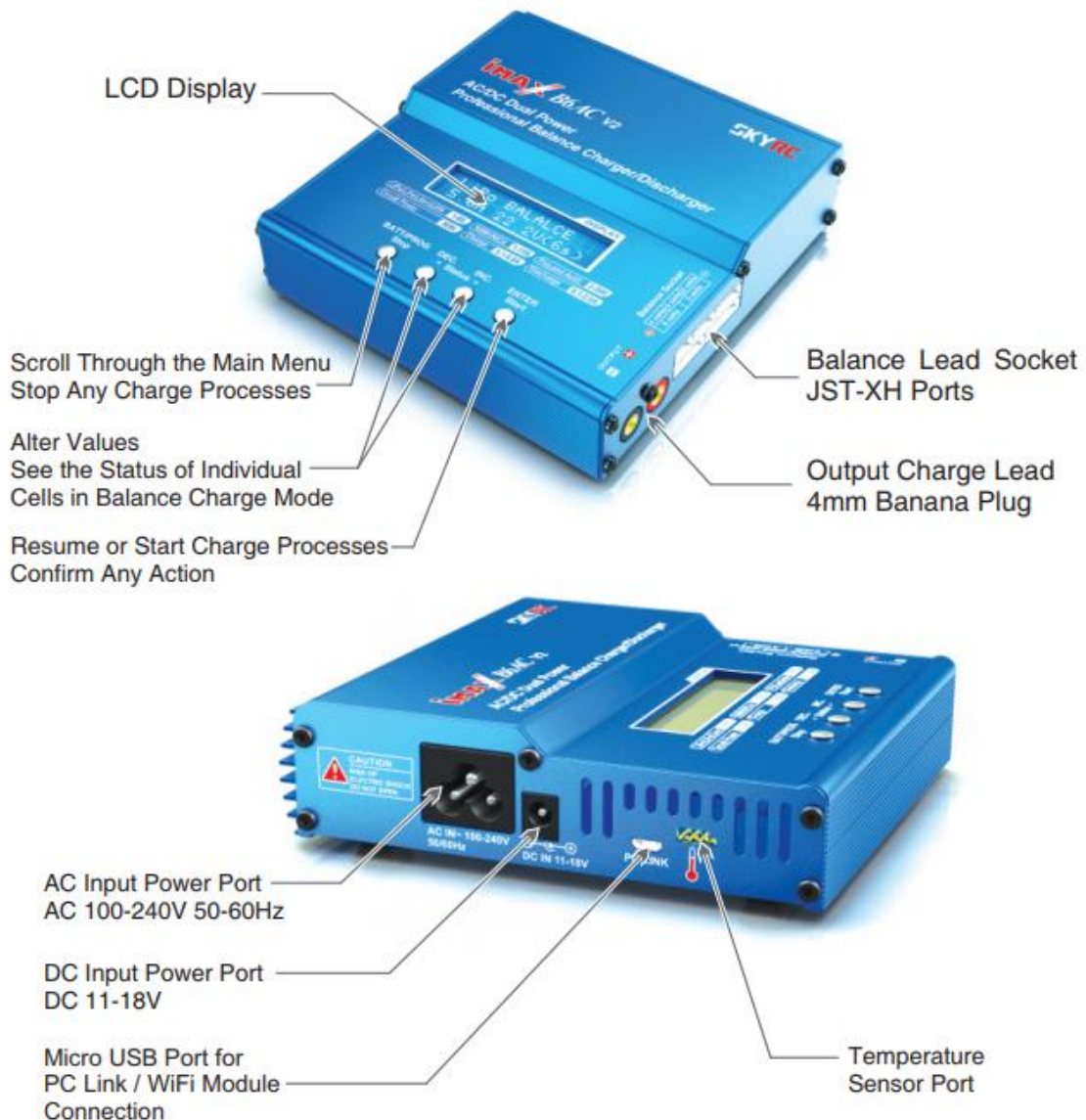


Figura 8 Partes del cargador B6AC [9]

1. Pantalla LCD. Se utiliza para indicar al usuario parámetros del ensayo actual, menú de elección de modo de funcionamiento, configuración del cargador.
2. Botones frontales. Permiten interactuar manualmente al usuario con las opciones del cargador, y los estados de funcionamiento.

3. Puerto de balanceo (JST-XH). Puerto utilizado con arreglos de baterías que posean de 2-6 celdas, que se utiliza para medir el voltaje individual, así como también para el balanceo de las celdas.
4. Salida de potencia. Salida de dos terminales del cargador que se conecta con la batería.
5. Entrada AC y DC. Entrada de potencia.
6. Conexión micro USB.
7. Conector de sensor de temperatura externo.

3.2 Características de funcionamiento con baterías de litio

Los rangos de funcionamiento y de trabajo están delimitados por las especificaciones energéticas del cargador B6AC, según el manual de instrucciones suministrado por el fabricante, el cargador posee las siguientes características:

- **Características generales**, relacionadas con la potencia y rangos eléctricos del cargador. Tabla 1

Tabla 1 Características generales

Característica	Valor	Característica	Valor
Entrada AC	100-240V	Potencia máxima circuito de carga	50W
Entrada DC	11-18V	Potencia máxima circuito de descarga	5W
Rango de corriente de carga	0.1-6A	Rango de corriente de descarga	0.1-2A

- **Características para baterías de ion litio** Relacionados con packs de baterías, su disposición y modo de funcionamiento. Tabla 2

Tabla 2 Características eléctricas para packs de baterías de ion litio

Característica	Valor	Característica	Valor
Celdas de ion litio en serie	1-6S	Voltaje de carga	4.08-4.2V por celda
Corriente de balanceo	200mA/Celda	Rango de voltaje	0.1-25.8V
Rango de capacidad	100-50000mAh	Voltaje de descarga	2.9-3.2V/Celda
Método de carga	Corriente constante a voltaje variable y corriente variable a voltaje constante automático.		
Corriente de balanceo	200mA/Celda		

3.2.1 Modos de funcionamiento con baterías de litio

Los modos de funcionamiento para ensayos con baterías de litio son:

- **Carga.** Carga de la batería de ion litio en modo normal.
- **Descarga.** Descarga de la batería de ion litio en modo normal.
- **Almacenamiento.** Consiste en la carga o descarga de una batería de litio llevando su carga a un valor intermedio cuando no va a ser usada por largo tiempo.
- **Balanceo.** Consiste en balancear el voltaje de las celdas de la batería de litio mientras se realiza un proceso de carga a determinada corriente.
- **Carga rápida.** Reduce el tiempo de carga de la batería así la capacidad final será menor que una carga normal.
- **Medición de voltaje.** Opción de acceso manual que permite medir el voltaje total de la batería, y el voltaje individual de cada celda conectada al puerto de balance desde 2 a 6 celdas.
- **Medición de resistencia interna.** Opción manual que permite medir la resistencia total de la batería, así como también las resistencias internas de cada celda en arreglos de 2 a 6 celdas de la batería conectada al puerto de balanceo.

3.2.2 Funcionamiento eléctrico del cargador

El cargador B6AC consiste en un sistema de gestión de baterías basado en una fuente conmutada que permite ejecutar el perfil de carga y descarga a partir de un convertidor DC-DC. El circuito integrado se encarga de controlar y monitorizar los valores de corriente y voltaje automáticamente.

3.3 Conexión de un pack de baterías

Al trabajar con baterías que posean arreglos de 2 a 6 celdas, es necesario realizar la conexión tanto del puerto de potencia (salida + y salida -) como del puerto de balance presente en el cargador por medio del conector JST-XH, como se muestra en la Figura 9

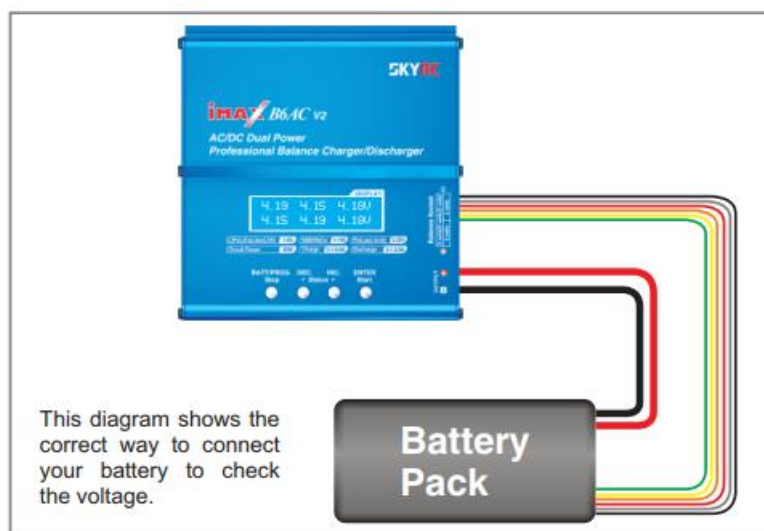


Figura 9 Conexión de un pack de baterías al cargador B6AC [9]

3.4 Configuración del sistema

El cargador B6AC posee 8 valores específicos localizados en el microcontrolador interno configurados como parámetros de seguridad para los ensayos, los valores por defecto son:

Elemento	Valor	Elemento	Valor
Tiempo de seguridad	1-720min	Corte de temperatura	20°C-80°C
Corte de capacidad	100-50000mAh	Tiempo de descanso (En baterías de ciclado)	1-60min
Corte por voltaje de alimentación bajo	10-11v	Corte de temperatura	20°C-80°C
Sonido teclado	ON	Sonido sistema	ON

Al superar alguno de estos valores el cargador detendrá el ensayo actual, mostrando un mensaje de error correspondiente al elemento superado.

3.4.1 Limitación por temperatura

El cargador posee un puerto para conectar un sensor de temperatura externo. Es esta la temperatura que se utiliza para limitar los ensayos [9]. Configurado por defecto en 50°C, cuando el cargador llega a este valor el sistema detiene el ensayo que actualmente se esté realizando.



Figura 10 Sensor de temperatura para el cargador B6AC [9]

Este dispositivo se conecta en el puerto para sensor de temperatura del cargador B6AC, y se asegura en la batería que se realizaran los ensayos.

4 Precisión y caracterización de medidas

La precisión de un instrumento de medida electrónico representa el grado de incertidumbre para las medidas realizadas en unas determinadas condiciones, estos valores están relacionados con las especificaciones del instrumento y de las etapas internas del equipo para el procesamiento de la magnitud medida física.

El comportamiento de un sistema de medida se puede describir por medio del análisis de las respuestas a entradas controladas. Para ello se definen los parámetros de: rango de medida, fondo de escala y curva de transferencia.[10]

1. **Rango de medida:** Conjunto de valores para los cuales el instrumento proporciona una respuesta correcta.

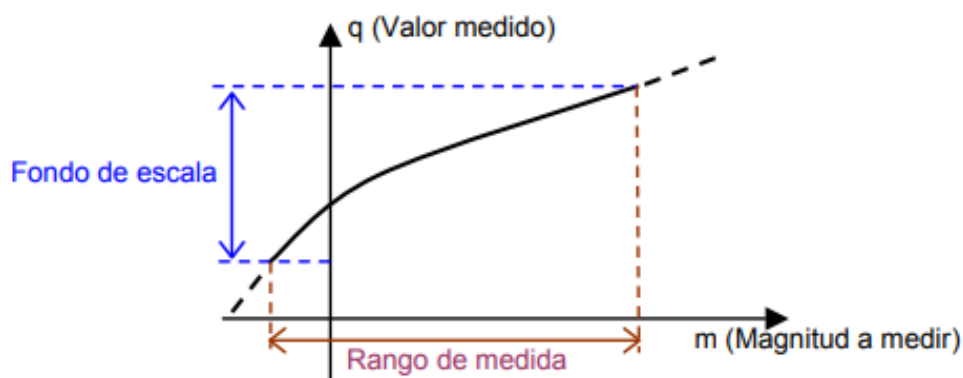


Figura 11 Gráfica de los parámetros para caracterización de un instrumento [10]

2. **Fondo de escala:** Conjunto de salidas que genera el sistema para la entrada cuando ésta varía en el rango de medida.
3. **Curva de transferencia.** Relaciona un valor medido dentro del rango de medida con los valores de respuesta generados por el instrumento. La curva está delimitada por el fondo de escala y el rango de medida.

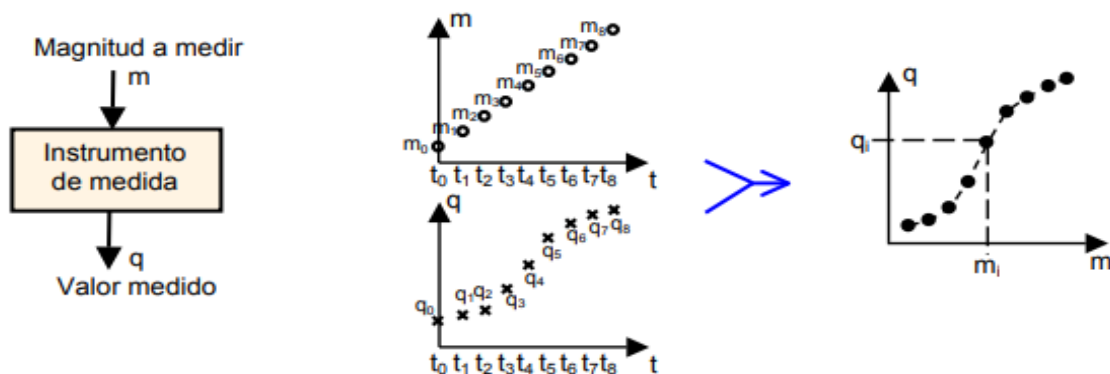


Figura 12 Curva de transferencia de un instrumento y relación de magnitudes medidas con valores generados[10]

Cuando la curva de transferencia del instrumento es lineal se puede describir según la siguiente ecuación:

$$q = a \times m + b \quad (6)$$

Donde a: sensibilidad, b: offset, q: valor real y m: respuesta del instrumento.

4.1 Calibración

Consiste en modificar la curva de transferencia de un sistema de medida para que proporcione valores de salida que correspondan más exactamente con el valor medido. En el caso de un sistema lineal, se ajustan los parámetros de nivel y sensibilidad. [10]

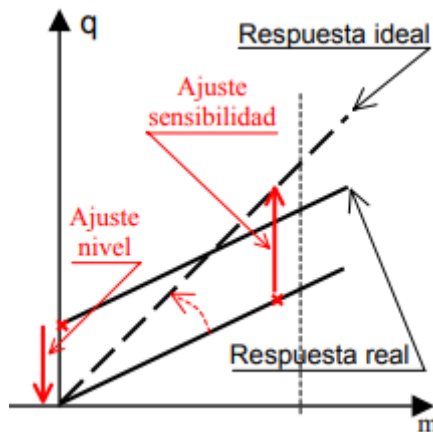


Figura 13 Ajuste de la curva de transferencia para un instrumento de medida [10]

El proceso de calibración requiere hacer mediciones con valores conocidos o un instrumento de mayor precisión, registrando los valores de entrada y los valores de salida generados por el instrumento a calibrar y el instrumento patrón.

A partir de los valores registrados con el instrumento a calibrar y los valores registrados con un instrumento de mayor precisión, se establece una relación lineal entre variable independiente (x) y dependiente (y) calculando los coeficientes por medio del método de mínimos cuadrados que minimice la suma de cuadrados residuales (7):

$$S = \sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

Donde y_i es el valor real de la variable dependiente e \hat{y}_i el valor estimado por la función ajustada para cada valor y_i . [11]

Los valores correspondientes al coeficiente de sensibilidad (a) y al offset (b) se calculan por medio de las siguientes ecuaciones(8):

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (8)$$

Utilizando Excel se representa los datos registrados empleando un gráfico de dispersión, y agregando una línea de tendencia lineal. A continuación, se establece el valor b como valor de paso por 0 y se presenta la ecuación de la recta junto con el coeficiente de determinación r en la misma gráfica. [11]

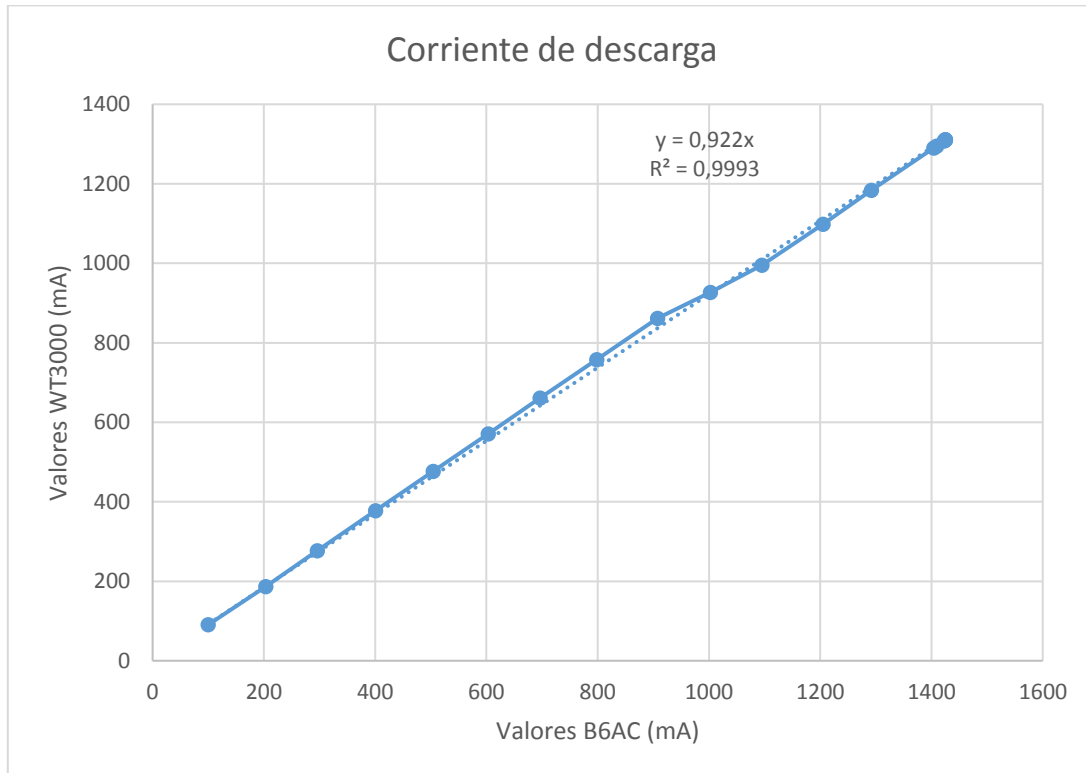


Figura 14 Curva de transferencia generada en Excel, con los parámetros: (a)=0.922 y (r^2)=0.9993

El coeficiente de determinación se calcula según la siguiente ecuación (9):

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

Este coeficiente indica el ajuste de la relación lineal indicando si la aproximación por la recta para la variable independiente y dependiente es:

- Fiable ($0.8 < r < 1$).
- No es fiable ($r < 0.8$).
- No están correlacionados ($r = 0$).

4.1.1 Pruebas de calibración

El cargador mide la corriente y el voltaje del proceso actual por medio de los terminales de potencia, y el conector de balance en caso de pack de baterías. Los valores de corriente y voltaje se transforman por medio de etapas de

amplificadores operacionales en voltajes, que se llevan a las entradas A/D del microcontrolador del cargador B6AC.

Para caracterizar la curva de transferencia del cargador, se realizan 10 experimentos de carga y descarga para celdas individuales y packs de baterías de ion litio dentro de los rangos permitidos por el cargador.

Se programan escalones de 120 s. cada uno a determinada corriente registrando los valores de voltaje y corriente mediante el cargador B6AC y el instrumento de precisión WT3000.

- Montaje para pruebas

Se dispone el cargador conectado por medio de la salida de potencia a los terminales de la batería, en conjunto con el instrumento WT3000 conectado en paralelo para medir el voltaje y en serie para medir la corriente actual.

Para la medida de voltaje se presenta el diagrama de la Figura 15, a partir de este esquema se puede identificar el error generado en la medición de voltaje por los cables de conexión del cargador.

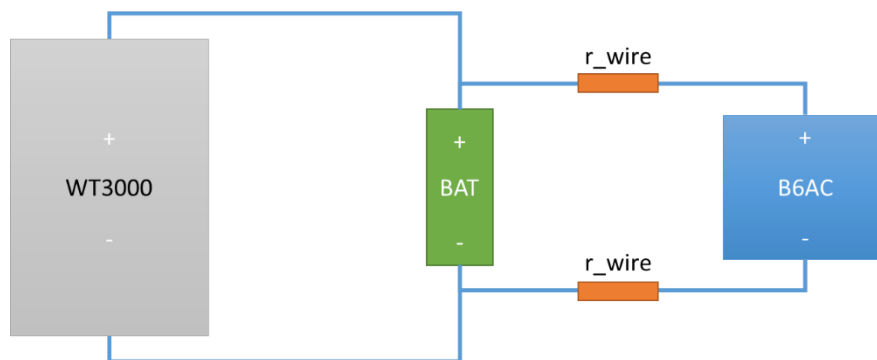


Figura 15 Conexión del instrumento WT3000 para medida de voltaje

En consecuencia, se plantea la siguiente relación entre el valor medido por el cargador y el instrumento WT3000.

$$V_{WT300} = V_{B6AC} \pm 2 * r_{wire} * I \quad (10)$$

La medida de corriente se realiza conectando el medidor WT3000 en serie con la batería y el cargador, como se muestra en la Figura 16.

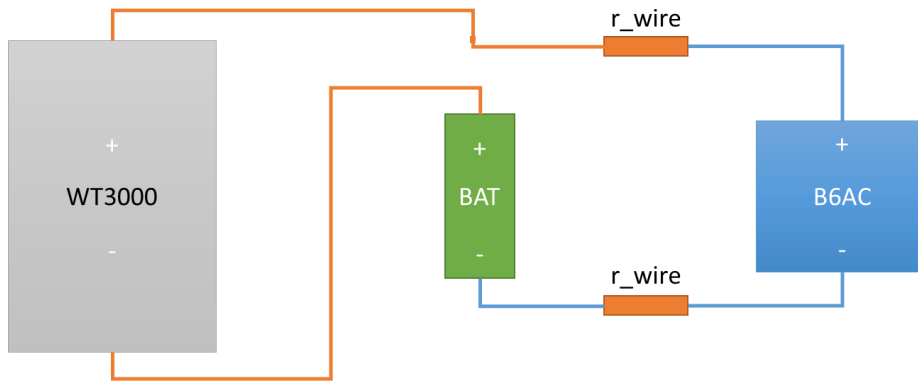


Figura 16 Conexión del instrumento WT3000 para la medida de corriente

Al ser una medida de corriente se plantea la equivalencia:

$$I_{WT300} = I_{B6AC} \quad (11)$$

- Mediciones de precisión con el instrumento WT3000

Para realizar mediciones precisas se debe tener un tiempo de calentamiento del instrumento de 30 minutos después del encendido. Después de esto al iniciar la medición se debe realizar la compensación de nivel cero fijando el valor para entrada nula de corriente y de voltaje.[12]

Procedure

To exit the menu during operation, press **ESC** located above the soft keys.

In the procedural explanation below, the phrase "press the **cursor keys**" may be used. This phrase refers to the procedures for selecting items and entering values and character strings. For details on the procedures, see section 3.14.

Press **SHIFT+SINGLE (CAL)**. Zero-level compensation is executed.

Explanation

Zero-Level Compensation

This function is used to create a zero input condition using the internal circuit of the instrument and setting the level at that point to zero level. Zero-level compensation must be performed to meet the specifications of this instrument (see chapter 12).

- Pressing CAL executes the zero-level compensation.
- Zero-level compensation is automatically performed after changing the measurement range or input filter.

For Making Accurate Measurements

- Allow the instrument to warm up for at least 30 minutes after turning ON the power switch.
- Perform zero-level compensation after warm-up (see section 10.1, "Performing Zero-Level Compensation").

Figura 17 Inicialización del instrumento WT3000 y ajuste de nivel cero [12]

4.1.2 Factor de corrección para corriente en descarga

Se realizan 10 experimentos estableciendo escalones de corriente incrementando la corriente 0.1A en cada paso. Empleando Matlab se obtienen

las matrices de datos del cargador B6AC y el instrumento WT3000, para los cuales se realiza la comparación de los registros de voltaje y corriente como se muestra en la Figura 18.

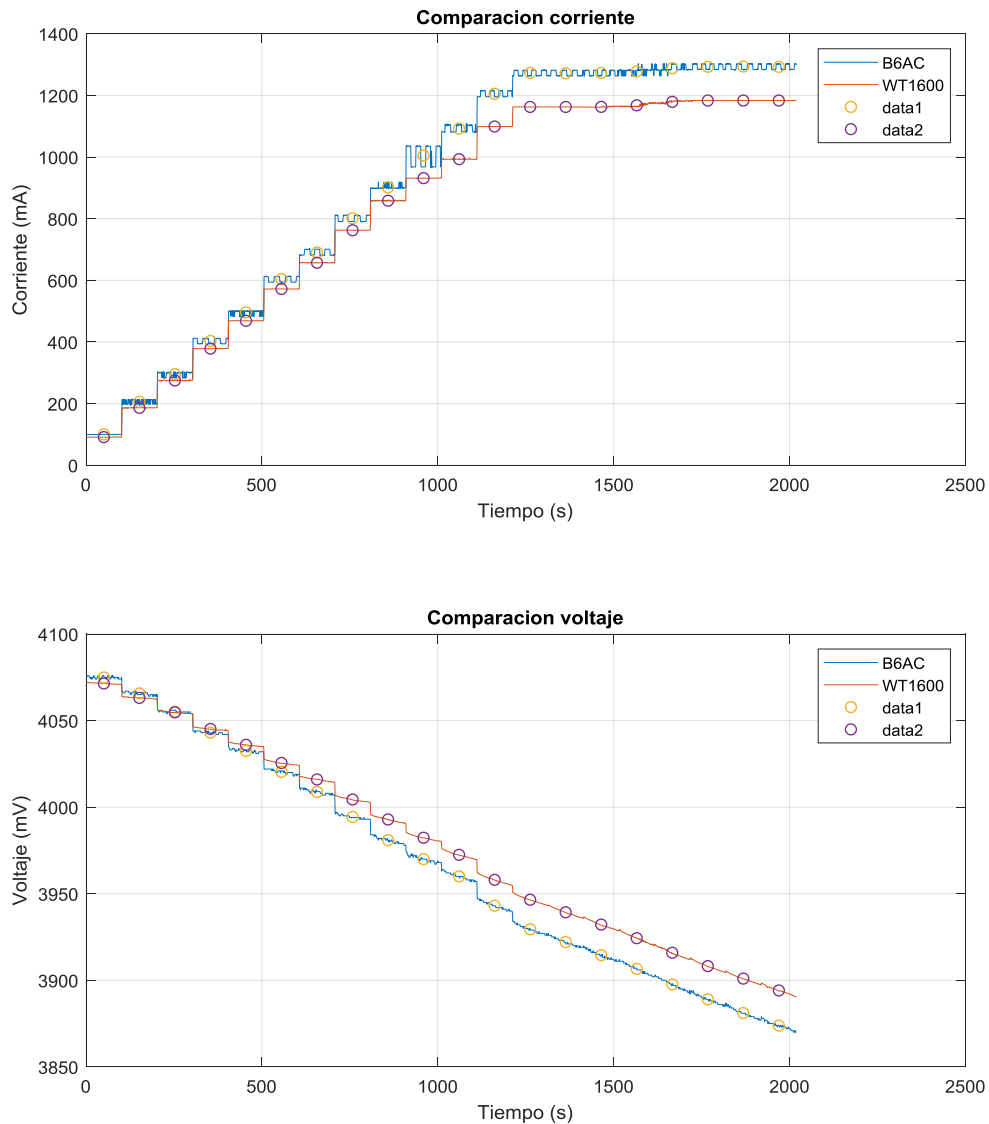


Figura 18 Comparación de valores de corriente y voltaje del cargador B6AC y el instrumento WT3000

Para analizar la diferencia entre los datos del cargador B6AC y el instrumento WT3000, se calcula el promedio de los valores para cada tramo de medida, según la siguiente ecuación (12):

$$y_t = \sum_0^n m_t/n \quad (12)$$

Donde Y_t : Valor promedio del tramo, m_t : medida de corriente o voltaje para el tiempo t del tramo y n número de elementos del tramo.

A partir de los puntos obtenidos y empleando Excel, se obtiene la recta equivalente para una respuesta lineal por el método de mínimos cuadrados, para

la cual se calcula la pendiente (a) y el coeficiente de determinación como se muestra en la Figura 22 .

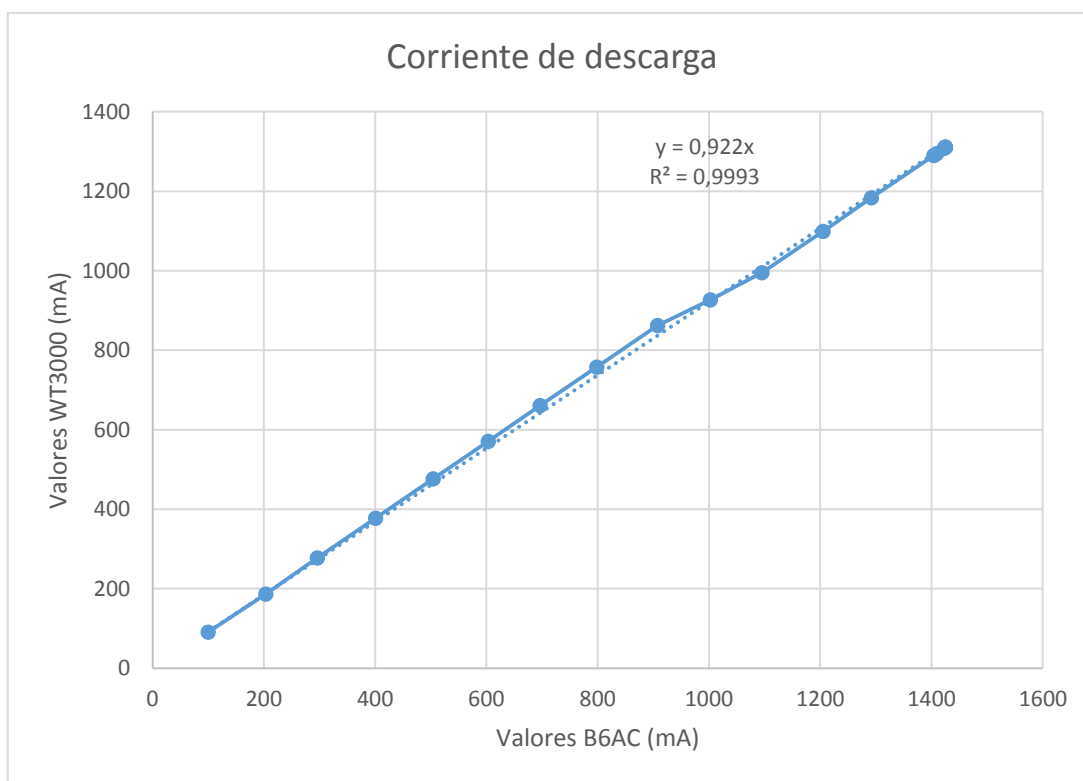


Figura 19 Gráfica de relación de valores del cargador B6AC y el instrumento WT3000

Este procedimiento se repite 10 veces para los experimentos con corriente de descarga, de los cuales se obtiene la sensibilidad y el coeficiente de determinación como se muestra en la Tabla 3. A partir de esta tabla se establece el factor de sensibilidad en 0.92 para la calibración de los valores registrados por el cargador B6AC, debido a que su coeficiente de determinación indica un buen ajuste lineal.

Tabla 3 Valores de sensibilidad y coeficiente de determinación para los experimentos

Experimento	Sensibilidad (a)	Coeficiente de determinación (R)
1	0,922	0,999
2	0,921	0,999
3	0,922	0,998
4	0,922	0,999
5	0,919	0,998
6	0,922	0,998
7	0,920	0,999
8	0,922	0,999
9	0,923	0,999
10	0,922	0,998
Promedio	0,922	0,999

Una vez obtenido el factor de ajuste de sensibilidad (a), se procede a corregir los valores registrados por el cargador B6AC, multiplicando por este factor a los valores promedios por tramo de corriente de descarga como se indica en la ecuación (13).

$$i_{corr} = a \cdot i_{b6a} \quad (13)$$

Los valores obtenidos se muestran en la Figura 20, en color verde el valor corregido por tramo. Se observa como los valores corregidos del cargador B6AC se comportan y son similares en magnitud con los valores registrados por el instrumento WT3000.

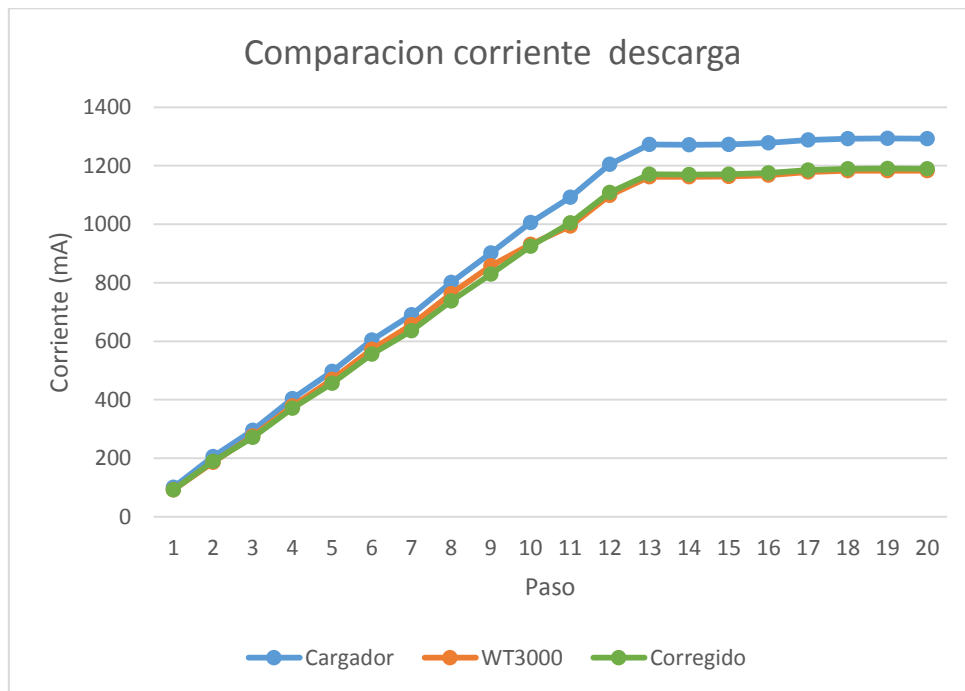


Figura 20 Valores promedio por tramo: cargador B6AC (azul) , instrumento WT3000 (naranja) y corregido (verde) .

A continuación, se calcula el error de medida absoluto para los 10 experimentos a partir de los valores promedios del cargador B6AC corregidos y los valores registrados por el instrumento WT30000, según la ecuación:

$$e = \max |mp_{WTXXX} - mp_{b6ac}| \quad (14)$$

Se registran los valores de error absoluto para cada ensayo en la Tabla 4.

Tabla 4 Valores de error absoluto para los experimentos de corriente de descarga

Experimento	Error absoluto (mA)
1	26,863
2	29,771
3	29,091
4	28,524
5	29,130
6	28,660

7	27,591
8	29,229
9	29,349
10	28,833
Error Absoluto Máximo	29,771 (mA)

Con este valor se establece la precisión de la medida para la corriente de carga registrada por el cargador B6AC, según la siguiente ecuación (15):

$$I = I_{B6AC} * Fc \pm 0.03A \quad (15)$$

Donde I: corriente medida, I_{B6AC} : valor de corriente registrado por el cargador B6AC, Fc: factor de corrección para descarga = 0.92.

Con los valores obtenidos se grafica el comportamiento del error para una medida de corriente de descarga en la Figura 21.

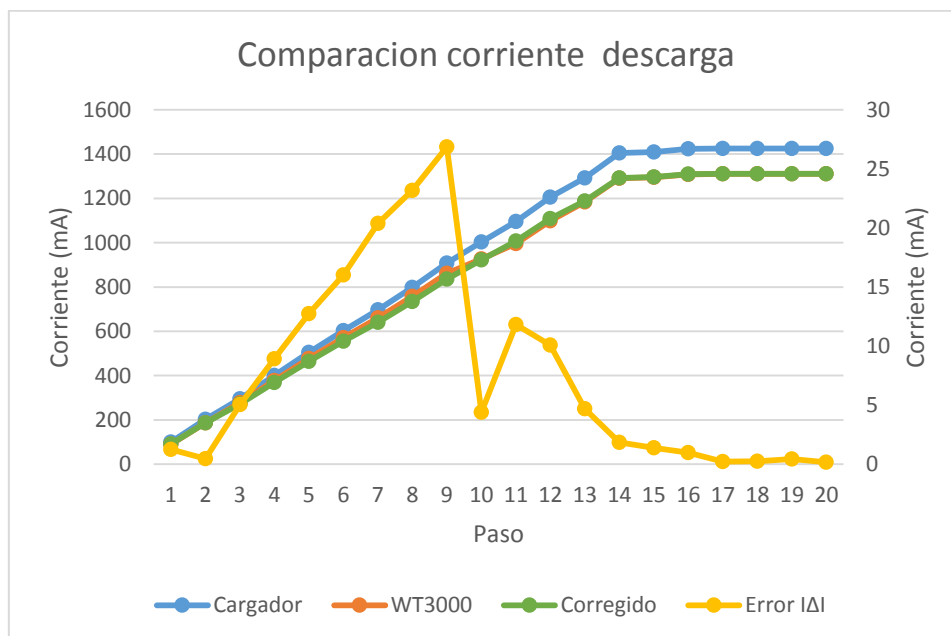


Figura 21 Comparacion de valores de coriente de descarga y error (eje secundario)

Una vez se comprueba que el error es bajo y está dentro de la precisión establecida para las medidas de corriente de descarga, se procede a verificar la corrección con la totalidad de valores registrados por el cargador B6AC y el instrumento WT3000.

En la Figura 22 se visualiza los valores corregidos del cargador, en rojo con línea punteada los valores del instrumento WT3000 y en naranja el error $|\Delta I|$ de corriente para cada punto.

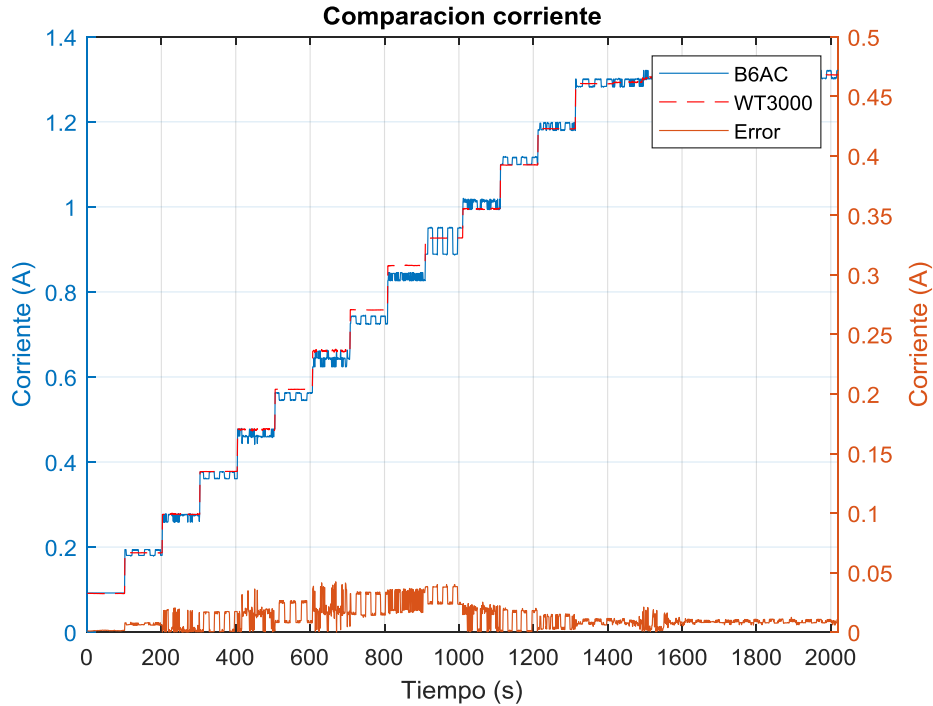


Figura 22 Comparación de valores para corriente de descarga WT3000 y cargador B6AC

4.1.3 Factor de corrección para voltaje en descarga

Como se comentó previamente el voltaje medido por el instrumento WT3000 se relaciona con el valor registrado por el cargador B6AC por medio de la ecuación (16):

$$V_{WT300} = V_{B6AC} + 2 * r_{wire} * I \quad (16)$$

Con esta relación se corrigen los valores registrados por el cargador B6AC, a partir de los valores de voltaje eliminando la caída de voltaje en los cables que se calcula a partir de la resistencia y la corriente corregida del cargador.

En la Figura 23 se muestran los valores correspondientes, en azul los valores del cargador B6AC antes de la corrección, en naranja los valores de referencia del WT3000 y en verde el valor corregido empleando la ecuación (16).

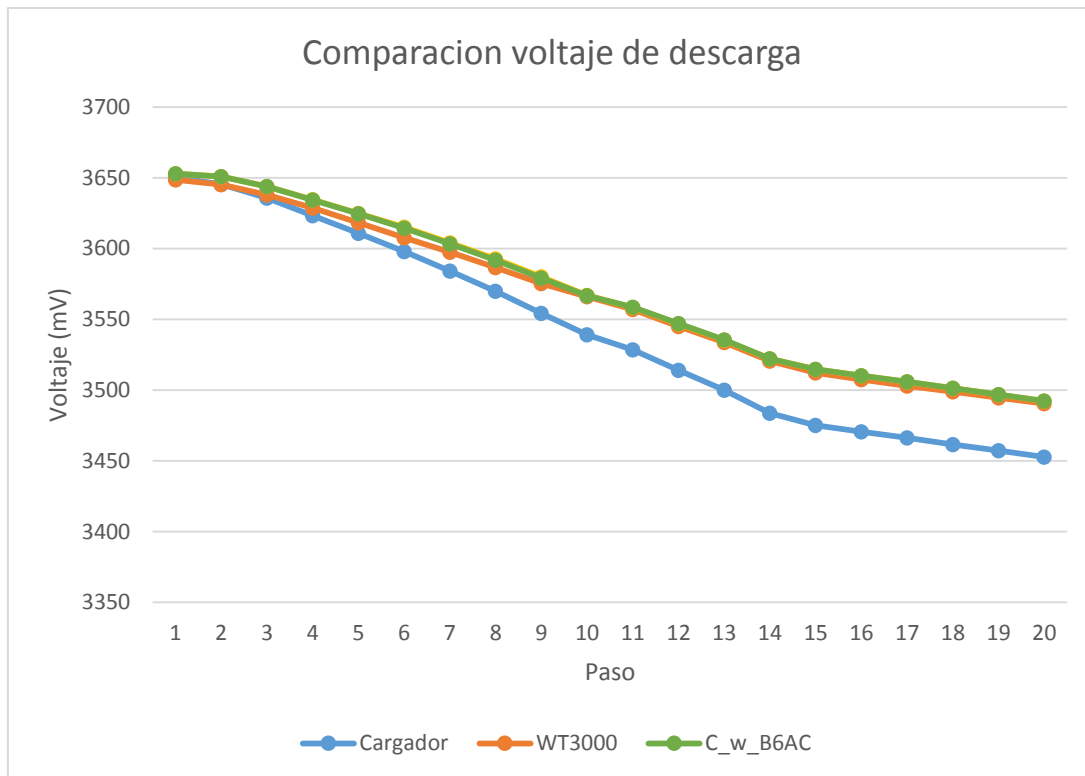


Figura 23 Comparación de voltajes del cargador B6AC, WT3000 y valor corregido.

Después de corregir la caída de voltaje en los cables de conexión en los datos registrados se observa que los valores de voltaje corregidos del cargador B6AC se comportan y son similares en magnitud a los valores registrados por el instrumento WT3000.

Posteriormente se caracteriza el error absoluto para los valores registrados por el cargador B6AC para los 10 experimentos en la Tabla 5.

Tabla 5 Error de voltaje para corriente de descarga

Experimento	Error absoluto (mV)
1	9,817
2	12,947
3	10,235
4	6,737
5	18,091
6	14,170
7	13,485
8	10,368
9	7,242
10	12,657
Error absoluto máximo	18,091

A partir de los valores calculados se establece el rango de precisión para la medida de voltaje en descarga según la ecuación (17):

$$V = V_{B6AC} \pm 0.02V \quad (17)$$

Donde V: Voltaje medido, VB6AC: valor de voltaje registrado por el cargador.

En la se Figura 24 aprecia en azul se visualiza los valores corregidos del cargador, en rojo con línea punteada los valores del instrumento WT3000 y en naranja el error $|Δ|$ de voltaje por punto.

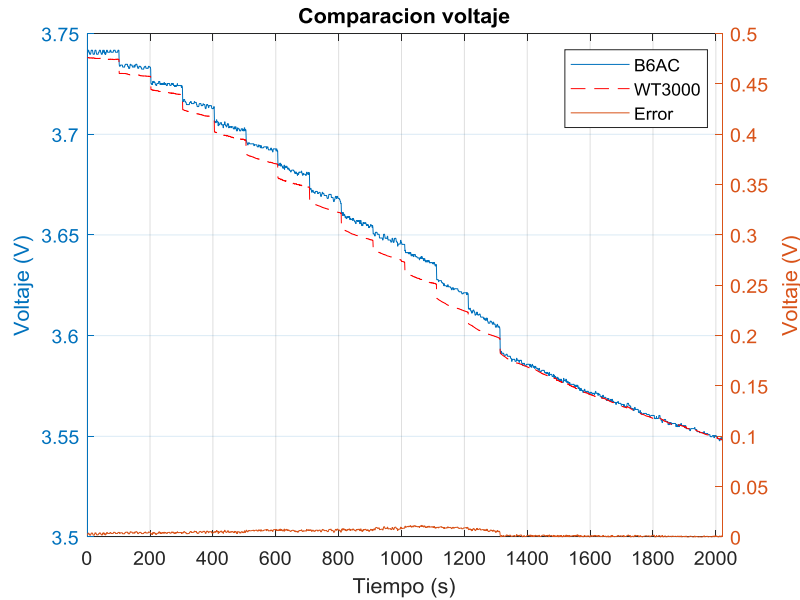


Figura 24 Comparación de voltajes para corriente de descarga WT3000 y cargador B6AC

4.1.4 Factor de corrección para corriente en carga

Se realizan 10 experimentos estableciendo escalones de corriente incrementando la corriente 0.1A en cada paso. Empleando Matlab se obtienen las matrices de datos del cargador B6AC y el instrumento WT3000, de los cuales se realiza la comparación de los registros de voltaje y corriente como se muestra en la Figura 25.

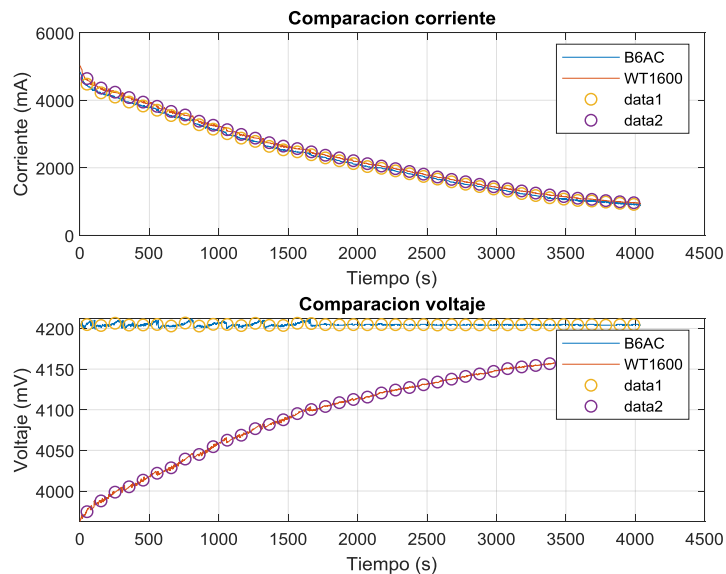


Figura 25 Graficas de corriente y voltaje para ensayo de descarga

Para analizar la diferencia entre las curvas se calculan los valores promedios por tramo para las medidas del cargador B6AC y el instrumento WT3000, a partir de estos valores se procede a trazar la curva de transferencia del cargador B6AC para corrientes en carga como se muestra en la Figura 26

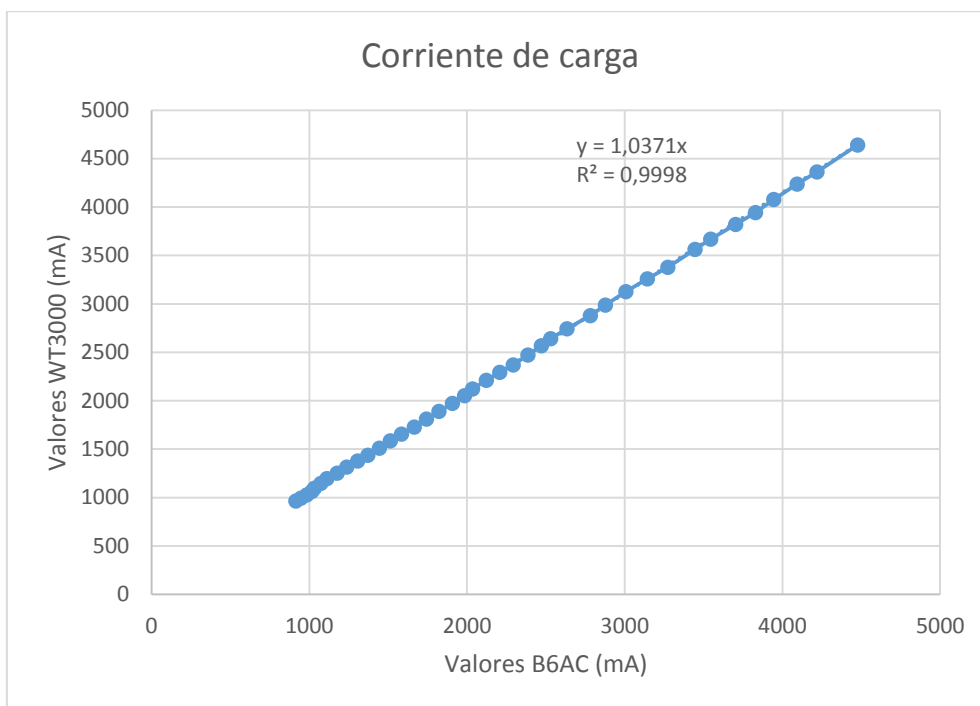


Figura 26 Curva de transferencia del cargador para corriente de carga

Este procedimiento se repite 10 veces para los experimentos con corriente de carga, de los cuales se obtiene la sensibilidad y el coeficiente de determinación como se muestra en la Tabla 6. A partir de esta tabla se establece el factor de sensibilidad en 1.03 para la calibración de los valores registrados por el cargador B6AC, debido a que su coeficiente de determinación indica un buen ajuste lineal.

Tabla 6 Valores de sensibilidad y coeficiente de determinación para los experimentos

Experimento	Sensibilidad (a)	Coefficiente de determinación (R)
1	0,999	1,037
2	0,999	1,038
3	0,999	1,038
4	0,997	1,039
5	0,998	1,031
6	0,997	1,034
7	0,998	1,032
8	0,999	1,039
9	0,997	1,038
10	0,997	1,037
Promedio	0,998	1,036

Con el factor de ajuste de sensibilidad (a), se procede a corregir los valores registrados por el cargador B6AC, multiplicando por este factor los valores por tramo de corriente de carga como se indica en la ecuación (18).

$$i_{corr} = a \cdot i_{b6a} \quad (18)$$

Los valores obtenidos se muestran en Figura 27, en color verde el valor corregido por tramo. Se observa como los valores corregidos del cargador B6AC se comportan y son similares en magnitud con los valores del instrumento WT3000, en color amarillo la diferencia entre el valor corregido y el valor guía.

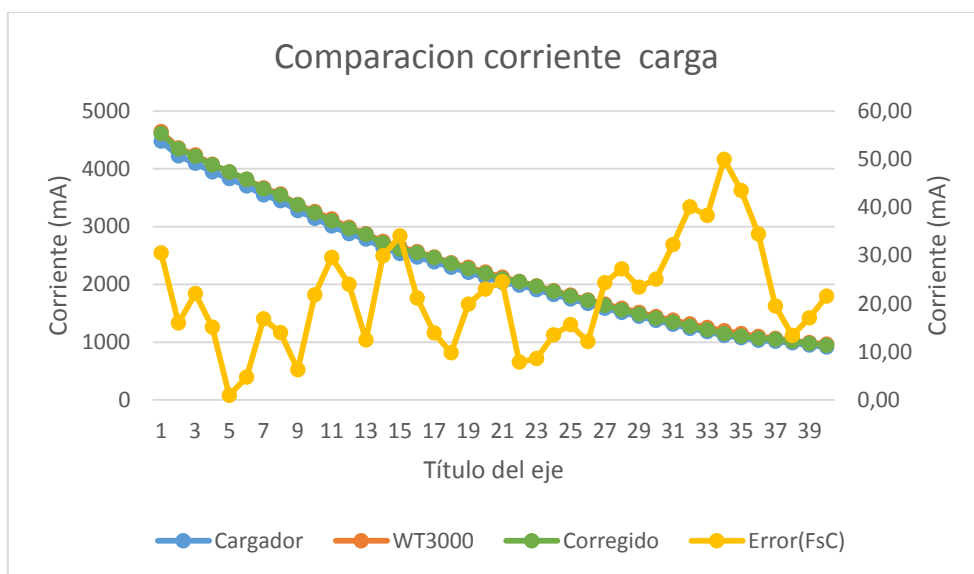


Figura 27 Comparacion de valores de coriente de carga y error (eje secundario)

Con los datos registrados se obtiene el error absoluto para los valores de corriente de carga, a continuación, se obtienen los valores para 10 experimentos como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Error absoluto para experimentos de corriente de carga

Experimento	Error absoluto (mA)
1	49,925
2	44,031
3	56,536
4	49,425
5	43,431
6	50,225
7	44,131
8	43,331
9	49,725
10	56,636
Total	56,636

Con este valor se establece la precisión de la medida de la corriente de carga del cargador B6AC corregida por el factor de sensibilidad (19):

$$I = I_{B6AC} * Fc \pm 0.06A \quad (19)$$

Donde I: corriente medida, I_{B6AC} : valor de corriente registrado por el cargador B6AC, Fc: factor de corrección para descarga = 1.03.

Posteriormente se aplica el factor de corrección al conjunto de datos registrados por el cargador B6AC como se muestra en la Figura 28.

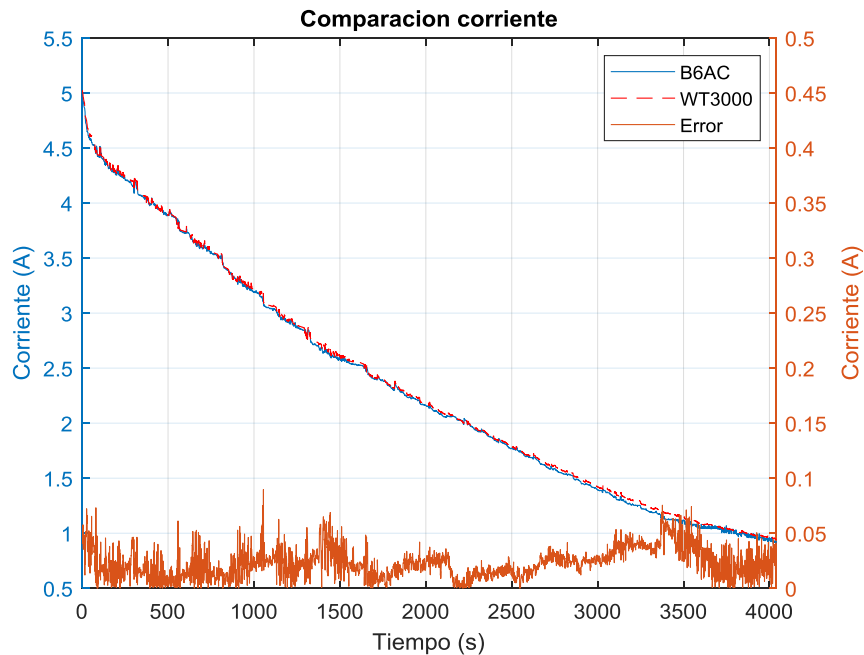


Figura 28 Comparación de corriente de descarga, valore corregido cargador B6AC, instrumento WT3000 y error.

Se observa en azul el valor corregido del cargador B6AC que tiene comportamiento y es similar en magnitud que en rojo en línea punteada el valor registrado por el instrumento WT3000, en naranja el valor de error punto a punto.

4.1.5 Factor de corrección para voltaje en carga

De acuerdo con la relación (20) entre el voltaje medido por el instrumento WT3000 y el cargador B6AC, se corrigen los valores registrados eliminando la caída de voltaje en la resistencia de los cables de conexión.

$$V_{WT3000} = V_{B6AC} - 2 * r_{wire} * I \quad (20)$$

En la Figura 29 se muestran los valores correspondientes, en azul los valores del cargador B6AC antes de la corrección, en naranja los valores de referencia del WT3000 y en verde el valor corregido empleando la ecuación (16).

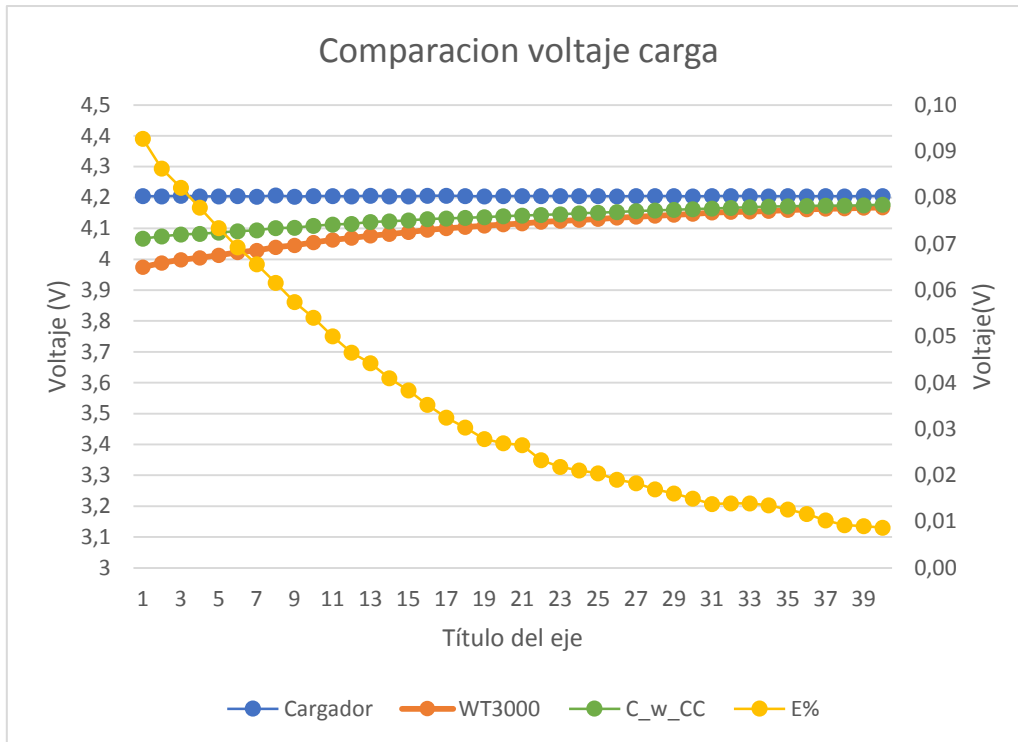


Figura 29 Comparación de voltaje para corriente de carga

Después de corregir la caída de voltaje en los cables de conexión en los datos registrados se observa que los valores de voltaje corregidos del cargador B6AC se comportan y son similares en magnitud a los valores registrados por el instrumento WT3000, con un error máximo de 0.01V, se realiza la recopilación para los 10 ensayos realizados:

Tabla 8 Error de voltaje para corriente de carga

Experimento	Error absoluto (mV)
1	92,74
2	89,546
3	98,417
4	93,235
5	89,946
6	98,517
7	93,035
8	89,246
9	88,346
10	97,617
Total	98,517

A partir de los valores calculados se establece el rango de precisión para la medida de voltaje en descarga según la ecuación (17):

$$V = V_{B6AC} \pm 0.1V \quad (21)$$

Donde V: Voltaje medido, VB6AC: valor de voltaje registrado por el cargador.

En la Figura 30 se aprecia en azul se visualiza los valores corregidos del cargador, en rojo con línea punteada los valores del instrumento WT3000 y en naranja el error $|\Delta|$ de voltaje por punto.

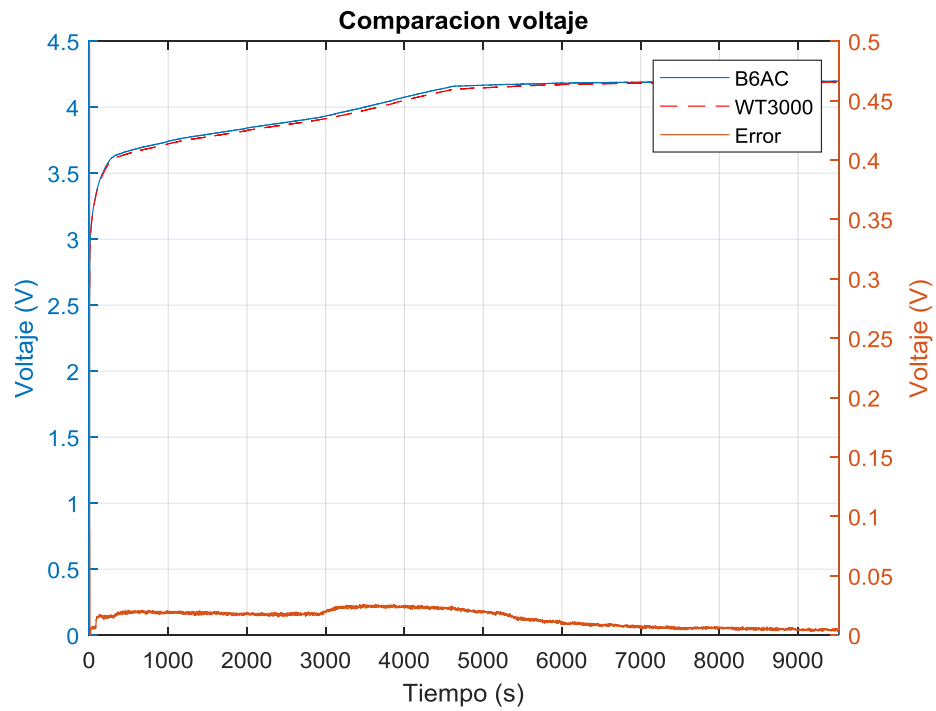


Figura 30 Comparación de valores de voltaje para corriente de carga.

5 Realización de ensayos con el cargador B6AC

Para la realización de ensayos de baterías ion litio con el cargador, debe seguir una secuencia de pasos que aseguran el éxito del ensayo [9], estos procedimientos se detallan a continuación:

1. Conexión
 - El cargador se conecta a la fuente de energía directamente al conector AC (100-240V AC) o por medio de la entrada DC (11-18V).
 - Se verifica que las opciones escogidas sean adecuadas para el tipo de batería con el que se está trabajando.
 - La batería se conecta a la salida de poder del cargador antes de realizar el ensayo evitando corto circuitos con las terminales.
 - Puerto de balanceo. Para arreglos de baterías se debe conectar el puerto de balanceo orientando ubicando correctamente la polaridad con la señalada en el cargador.
2. Puesta en marcha
 - Una vez seleccionado el programa para baterías de ion litio, se procede a configurar el modo, el número de celdas, y la corriente del ensayo.
 - Configurados los parámetros del ensayo, el cargador verifica la conexión y pasa al modo de monitoreo que muestra información durante el ensayo.
3. Información durante el ensayo
 - El cargador permite visualizar información en la pantalla LCD presionando los botones INC/DEC durante los ensayos, permitiendo conocer en tiempo real los valores de: tipo de baterías, celdas, corriente, voltaje, tiempo y capacidad.
 - Voltaje de cada celda con el puerto de balanceo, voltaje de finalización, temperatura interna, corte de temperatura, alarma de tiempo, límite de carga.

5.1 Precauciones antes de iniciar un ensayo

Para realizar experimentos con baterías de ion litio y el cargador es deben tomarse precauciones y debe verificarse el correcto estado de los elementos de trabajo.[9]

Nunca intentar descargar o cargar baterías con las siguientes condiciones:

- Pack de baterías de celdas de diferentes tipos.
- Una batería que ya ha sido cargada o está ligeramente descargada.
- Baterías no recargables.
- Baterías que requieren diferente técnica de carga y descarga por su tipo.
- Baterías dañadas.
- Baterías con circuito de protección interna.

- Baterías que estén conectadas o hagan parte de otro dispositivo electrónico.
- Baterías en las que el fabricante no indica que son aptas para la carga.

Antes de iniciar un ensayo se debe asegurar de:

- Seleccionar el modo apropiado para el tipo de baterías.
- Seleccionar una corriente adecuada.
- Verificación del voltaje de las baterías.
- Asegurarse que no haya contactos intermitentes.

5.1.1 Especificaciones de carga y descarga

Los fabricantes de celdas y pack de baterías de ion litio especifican en la hoja de datos respectiva, las características y voltajes permitidos para el dispositivo. En la Figura 31 se observan las corrientes de carga y descarga, capacidad y voltajes permitidos para una celda ICR18650-22F.

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	2200mAh (0.2C, 2.75V discharge)
3.2 Charging Voltage	4.2V±0.05 V
3.3 Nominal Voltage	3.6V
3.4 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.5 Charging Current	Standard charge: 1100mA Rapid charge : 2200mA
3.6 Charging Time	Standard charge : 3hours Rapid charge : 2.5hours
3.7 Max. Charge Current	2200mA
3.8 Max. Discharge Current	4400mA
3.9 Discharge Cut-off Voltage	2.75V
3.10 Cell Weight	44.5g max
3.11 Cell Dimension	Diameter(max.) : Φ18.4 mm Height(max.) : 65.0 mm
3.12 Operating Temperature	Charge : 0 to 45 °C Discharge: -20 to 60 °C
3.13 Storage Temperature	1 year : -20~25 °C (1*) 3 months : -20~45 °C (1*) 1 month : -20~60 °C (1*)

Figura 31 Datos principales de la hoja de datos de la celda ICR18650-22F [13]

La hoja de datos servirá de guía para establecer los valores de las corrientes de los ensayos con las baterías. La **carga rápida** solo se podrá realizar con baterías que soporten explícitamente ser cargadas a corrientes mayores que la corriente estándar.

Los valores de voltaje máximo y mínimo establecen los límites de seguridad para el pack de baterías y el voltaje de corte. Estos límites están predefinidos en el cargador B6ACv2 para baterías de ion litio para cada celda como V_{max} 4.2 y V_{min} 3V, estos parámetros evitan descargas profundas que dañen la batería y se pierda vida útil y capacidad.

5.2 Control manual

A través de los 4 botones situados en la parte frontal del cargador Figura 32, permiten la navegación por las diferentes opciones del cargador. Para el caso de experimentos con baterías de ion litio se tienen las siguientes opciones disponibles:

- Medición de voltaje
- Medición de resistencia
- Modos de funcionamiento para baterías de litio.

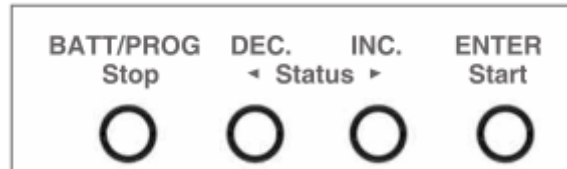


Figura 32 Botones de control manual del cargador B6AC [9]

Manualmente se escoge la opción deseada por medio del botón START/ENTER, dependiendo del tipo de ensayo se permitirá ajustar los valores permitidos con los botones DEC/INC. El valor escogido será guardado presionando el botón START/ENTER.

El ajuste de los parámetros se hará sucesivamente para los valores mostrados en la pantalla LCD hasta iniciar con el ensayo presionando el botón START/ENTER.

5.2.1 Medición del voltaje de la batería

Es una opción accesible manualmente a través del menú principal, permite medir el voltaje total y el voltaje individual de cada celda de la batería. Para realizar este procedimiento se deben conectar la salida de potencia y el puerto de balanceo la batería a examinar.

En el menú principal se navega hasta la opción BATTERY METER, al presionar el botón START/ENTER se mostrará en la pantalla LCD los valores correspondientes de la medida actual, valor mayor, valor menor, y valor total.

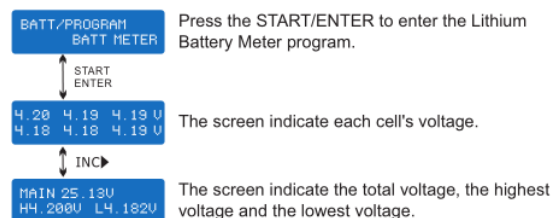


Figura 33 Selección manual de medida de voltaje de la batería [9]

5.2.2 Medición de resistencia interna

Permite la resistencia interna total y de cada celda de la batería. Para medirla se conecta la batería a la salida principal y al puerto de balance del cargador, luego a través del menú de acciones, en la opción "**Battery resistance**", se puede obtener el valor aproximado de la resistencia interna de la batería, el valor

obtenido se muestra en la pantalla LCD del cargador, indicando el valor total de la batería y los valores individuales para packs de baterías.

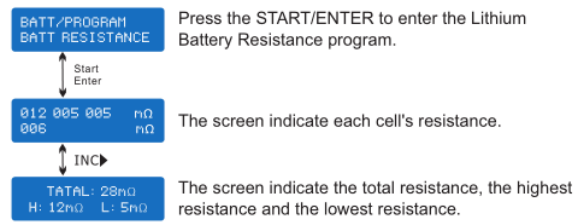


Figura 34 Selección manual de medida de la resistencia interna de la batería [9]

El cargador realiza la medida de la resistencia interna de la batería aplicando el método de dos descargas a diferentes corrientes y voltajes, en un tiempo de aproximadamente 2 segundos.

Se realizó una captura de la medición de resistencia, conectando el osciloscopio Tektronic 1001-EDU para registrar los valores de corriente y voltaje. La gráfica de los datos obtenidos se muestra en la Figura 35.

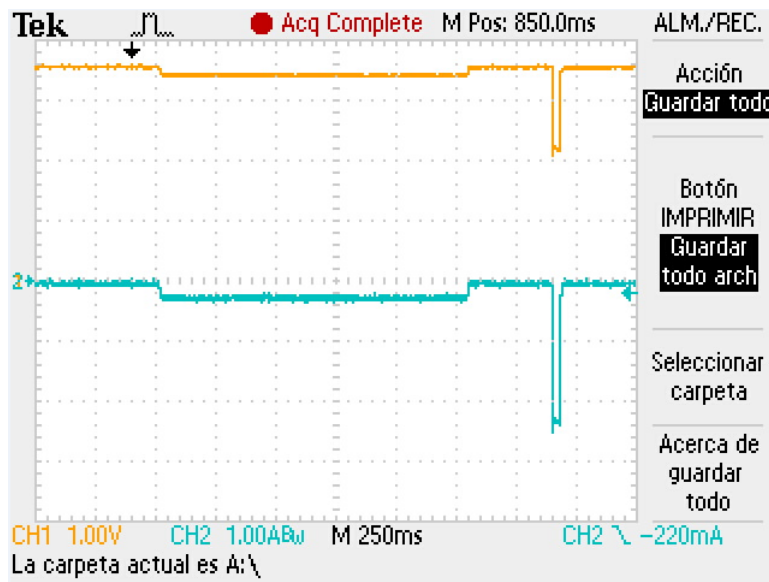


Figura 35 Captura de voltaje y corriente para medición de resistencia con el cargador B6AC

5.3 Programa ChargeMaster

Software suministrado por el fabricante para la plataforma Windows, permite la operación básica del cargador conectado a un puerto USB del ordenador. El software se descarga desde la página del fabricante. Una vez instalado, el software detecta automáticamente la conexión del cargador al puerto USB del computador.

A través de este software se puede iniciar ensayos, y visualizar el voltaje y la corriente mientras mediante gráficas en tiempo real de los valores mencionados. La vista principal del software presenta una interfaz con 3 pestañas de opciones: "Charge", "System" y "Program". Figura 36



Figura 36 Vista principal del programa ChargeMaster

- Opción Charge: Permite ajustar los valores de tipo de batería, modo de trabajo, número de celdas y corriente del ensayo. También permite cargar un paso elaborado previamente por medio del menú Charge Setup.

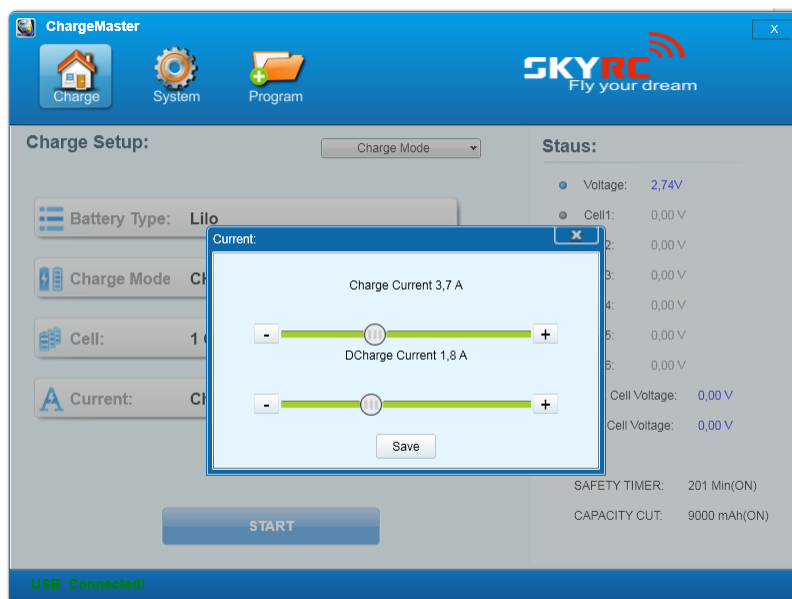


Figura 37 Configuración de valores de ensayo con el programa ChargeMaster

Una vez configurados los anteriores parámetros, y asegurándose que las conexiones del cargador con la batería son correctas, se procede a iniciar el ensayo con el botón START.

- Opción System: Permite modificar los parámetros límites de protección del cargador, como son: Tiempo de espera entre carga y descarga (min), tiempo de ensayo (min), capacidad limite (mAh), temperatura límites (°C) y las opciones de sonido del cargador. Estos valores se pueden cargar

desde y hacia el cargador, además se puede resetear los ajustes a los de fábrica.

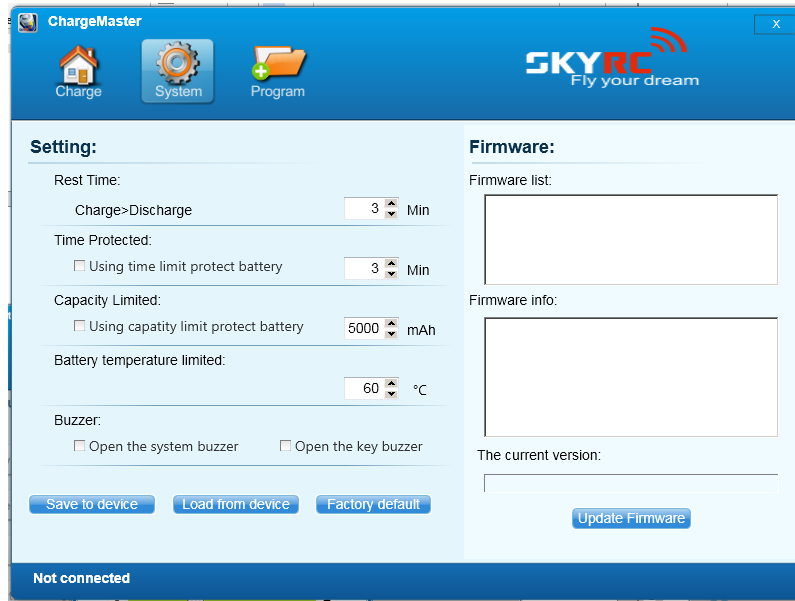


Figura 38 Vista de configuración del cargador B6AC

- Opción Program: Permite crear un paso de ensayo configurando los valores de voltaje, numero de celdas, corriente de carga y descarga. El resultado es equivalente a configurar un ensayo desde la opción "Charge".
- Ventana de monitoreo: una vez iniciado el ensayo, la ventana del programa muestra graficas en tiempo real de los valores de corriente o voltaje según se elija, y los valores de voltajes de las celdas, con la única opción detener el ensayo. Figura 39

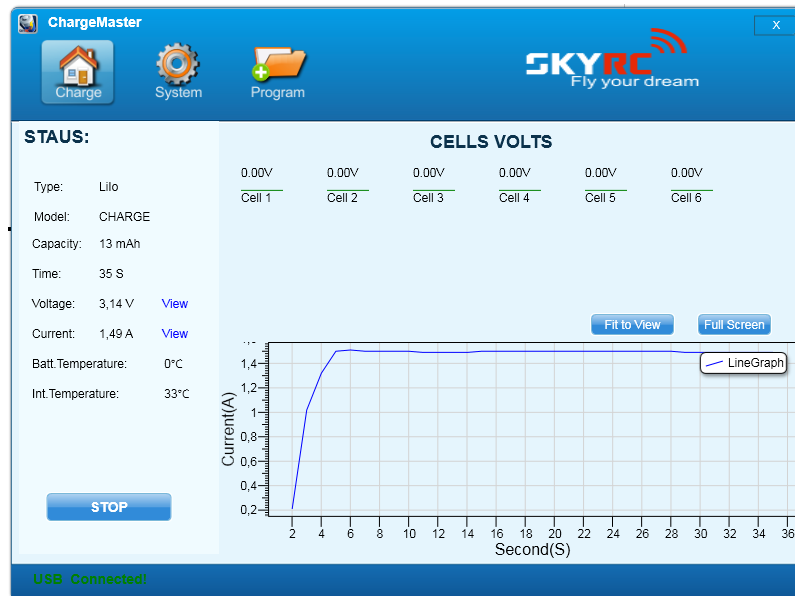


Figura 39 Vista de monitoreo del programa ChargeMaster

- Operación del cargador: Una vez conectado el cargador a la batería y al ordenador, el programa detecta la conexión por medio del puerto USB. A

continuación, se procede a configurar las opciones del ensayo en la opción “Charge” e iniciar el experimento; entonces la interfaz del programa pasa al modo de supervisión. Una vez detenido el ensayo el software retorna a la opción principal “Charge”.

5.4 Limitaciones de operación

El cargador B6AC es un dispositivo de gestión de baterías sencillo, por lo cual se tienen tanto limitaciones de hardware como de software, y a partir de estas restricciones se definen los puntos de funcionamiento con el cargador.

5.4.1 Rangos de operación con baterías de litio

A partir de los rangos eléctricos de funcionamiento del cargador B6AC se establecen los límites para corrientes de carga y descarga según la potencia admisible por cada circuito.

- Corriente de carga

La corriente de carga permitida por el cargador está limitada por la potencia del circuito interno de carga en 50W, permitiendo variar la corriente entre 0.1A y 6A. En la Tabla 9 se muestra la corriente máxima de carga por número de celdas cuando el voltaje de las celdas es de 4.2V.

Tabla 9 Límites de corriente de carga por número de celdas de la batería

N celdas	Corriente Max(A)	Voltaje(V)	Potencia(W)
1	6,00	4,20	25,20
2	5,95	8,40	49,98
3	3,96	12,60	49,90
4	2,97	16,80	49,90
5	2,38	21,00	49,98
6	1,98	25,20	49,90

- Corriente de descarga

La corriente de descarga permitida por el cargador está limitada por la potencia del circuito interno de descarga en 5W, permitiendo variar la corriente entre 0.1A y 2A. En la Tabla 10 se muestra la corriente máxima de descarga por número de celdas cuando el voltaje de las celdas es 4.2V.

Tabla 10 Límites de corriente de descarga por número de celdas de la batería

N celdas	Corriente Max(A)	Voltaje(V)	Potencia(W)
1	1,19	4,20	5,00
2	0,60	8,40	5,00
3	0,40	12,60	4,99
4	0,30	16,80	4,99
5	0,24	21,00	5,00
6	0,20	25,20	4,99

- Voltajes de funcionamiento

Según el modo de funcionamiento los valores máximos para baterías de ion litio serán los mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11 Rangos de funcionamiento por celda para baterías de ion litio

Característica	Valor
Voltaje nominal	3.6V por celda
Máximo voltaje de carga	4.1V por celda
Voltaje de almacenamiento	3.8V por celda
Tasa de carga rápida permitida	$\leq 1C$
Voltaje mínimo de descarga	3.0-3.3V por celda

5.4.2 Limitaciones del software

- No permite el registro de los valores puntuales en los ensayos limitando la posibilidad de realizar experimentos extendidos.
- No se cuenta con la opción de programar ensayos, sobre una interfaz unificada y que permita ver en tiempo real los valores del ensayo.
- No se permite copiar los datos actuales antes de terminar el ensayo para realizar cálculos pertinentes sobre los experimentos programados.
- Carece de la opción de limitar el tiempo de los ensayos, impidiendo el desarrollo de ensayos programados continuos.
- Al intentar realizar pasos de descarga a diferentes corrientes, el sistema no logra cambiar la corriente a una consigna menor cuando la corriente previa es mayor. Esto dificulta realizar experimentos con diferentes magnitudes de corrientes.

A partir de las limitaciones de software se plantea el desarrollo de una interfaz que permita el registro de datos en tiempo real, la programación de ensayos y la obtención de curvas del comportamiento de la corriente y el voltaje de las baterías de ion litio en procesos de carga y descarga.

6 Interfaz de control y monitoreo

Para desarrollar la nueva interfaz de software se inicia con el estudio de los datos de comunicación entre el software “ChargeMaster” en el ordenador y el cargador B6ACv2.

6.1 Conexión con ordenador

La conexión USB entre el ordenador y el cargador permite la transmisión de datos a través de tramas que contienen los comandos y valores registrados.

6.1.1 Bus universal en serie (USB)

Consiste en un estándar para la conexión de dispositivos a través de un bus universal. Establece los parámetros de hardware relacionados con la conexión y los protocolos de comunicación sobre el bus.

Cada dispositivo está identificado con una dirección respecto al ordenador al que está conectado y con un controlador específico que informa al sistema operativo del ordenador las características del dispositivo conectado. [14]

Para la comunicación se establece un canal bidireccional donde el ordenador y el cargador envían y reciben órdenes mutuamente, para esto se generan tramas de datos en cada extremo que viajan por la interfaz física USB llegando a su destino.

Cada punto de destino se encarga de interpretar las tramas de datos correspondientes al conjunto de órdenes implementado y su procesamiento.

El cargador B6AC genera tramas de datos de 91 bytes de longitud en los que envía la información solicitada, el programa de ordenador genera órdenes de 91 bytes que se modifican según la orden que se envíe al cargador.

6.2 Driver de comunicación

El cargador B6AC se instala en el ordenador con sistema operativo Windows, por medio de un controlador que identifica el dispositivo perteneciente a la clase USB HID.

La clase USB HID define un conjunto de dispositivos que poseen algún tipo de interacción con humanos y transfieren datos a un computador. Generalmente es usada para ratones, teclados y otros dispositivos, en ella se especifica los requerimientos básicos del dispositivo y el protocolo para la transferencia de datos. [15]

6.2.1 Driver de comunicación VISA

Debido a que el controlador del cargador B6AC no soporta la comunicación directa con el software Labview, se hace necesario cambiar el controlador a una interfaz de comunicación VISA.

La interfaz VISA (Virtual instrument software architecture), es un estándar que define un conjunto de funciones y procedimientos que permiten la creación de controladores para instrumentación electrónica ya sean dispositivos GPIB, VXI, PXI, Serial, Ethernet, y/o interfaces USB.[16]

Labview incluye un asistente para la creación de un controlador VISA para un instrumento conectado al ordenador. Empleando esta herramienta se crea un controlador basado en el descriptor del cargador B6AC que permite el control y comunicación como un instrumento electrónico a través del software Labview.

- **Creación del controlador VISA**

Por medio del asistente “NI-VISA Driver Wizard” se recopilan los datos de identificación del dispositivo USB B6AC: estado, dirección del dispositivo, buses de comunicación, “Vendor ID”, “Product ID” y fabricante. [17]

A continuación, se genera el controlador basado en la API VISA que actuará como interfaz de comunicación entre el cargador B6AC y ordenador de trabajo.

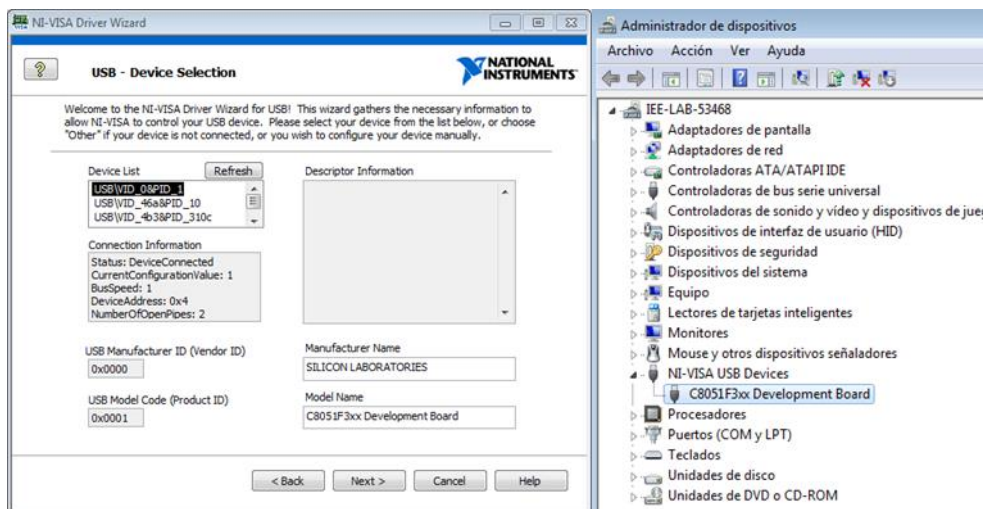


Figura 40 Asistente para creación del controlador y vista del administrador de dispositivos en Windows

En la Figura 40 se muestra, a la izquierda se puede la creación del controlador del cargador por medio del asistente. A la derecha se puede ver en el Administrador de dispositivos del cargador B6AC identificado como un dispositivo VISA, una vez instalado el software en el ordenador.

- **Comunicación con el dispositivo con Labview**

En Labview la comunicación con el controlador VISA se compone de:

- Referencia del dispositivo.
- Modo de comunicación.
- Trama de datos a enviar.
- Trama de datos recibida.

Una vez conectado el cargador B6AC al ordenador, el controlador VISA se encarga de identificar el dispositivo para que pueda ser accedido como instrumento electrónico por Labview.

Posteriormente el programa de Labview detecta el identificador del dispositivo, que se utiliza en los bloques de comunicación para direccionar el tráfico de datos entre el ordenador y el cargador B6AC.

El VI de comunicación con el cargador B6AC se compone de bloques para el control de dispositivos VISA, haciendo empleo de VISA Enable, VISA write, VISA get Data, se muestra en la Figura 41.

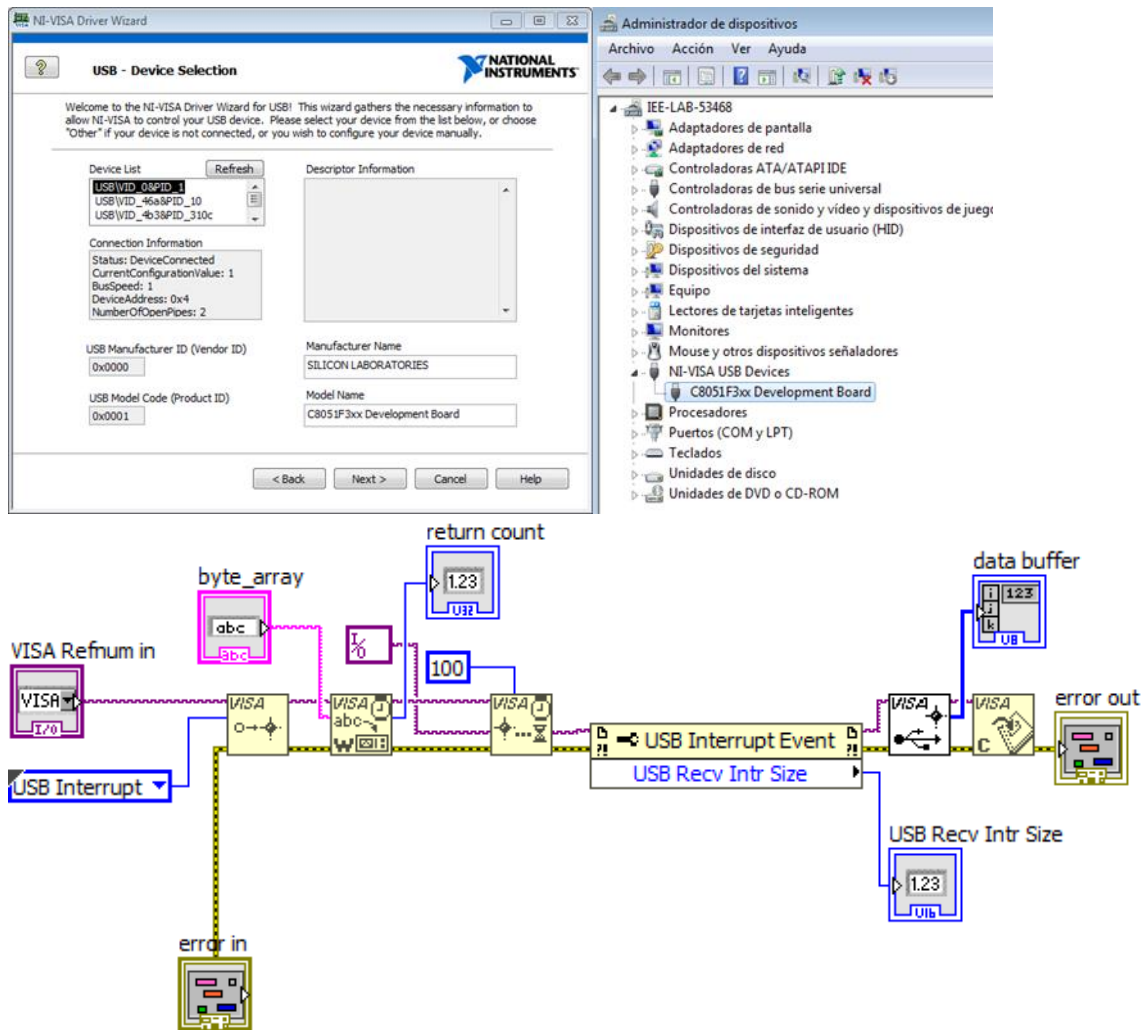


Figura 41 VI de comunicación con el cargador B6AC

Una vez se inicia la comunicación con el cargador, se puede transferir tramas de datos desde el ordenador por medio de la entrada **“byte_array”** y se puede recibir tramas de datos desde el cargador que se transfieren al buffer de recepción **“data buffer”**.

En seguida, corresponde analizar las tramas de datos del cargador B6AC y el ordenar para identificar su propósito y lograr obtener los datos requeridos en el monitoreo y la supervisión de experimentos con baterías de litio.

6.3 Tramas de datos

Para implementar un software que pudiera controlar el cargador B6AC se hace necesario identificar las tramas de datos entre el ordenador y el cargador. Para esto se realiza la captura de tramas de datos que se están produciendo en la comunicación, se emplea el programa libre Wireshark para realizar este proceso.

6.3.1 Captura de datos USB por medio de Wireshark

Wireshark es un programa libre de computadora compatible con Windows, diseñado para analizar protocolos para el desarrollo de software, redes de comunicaciones y como herramienta didáctica. Figura 42

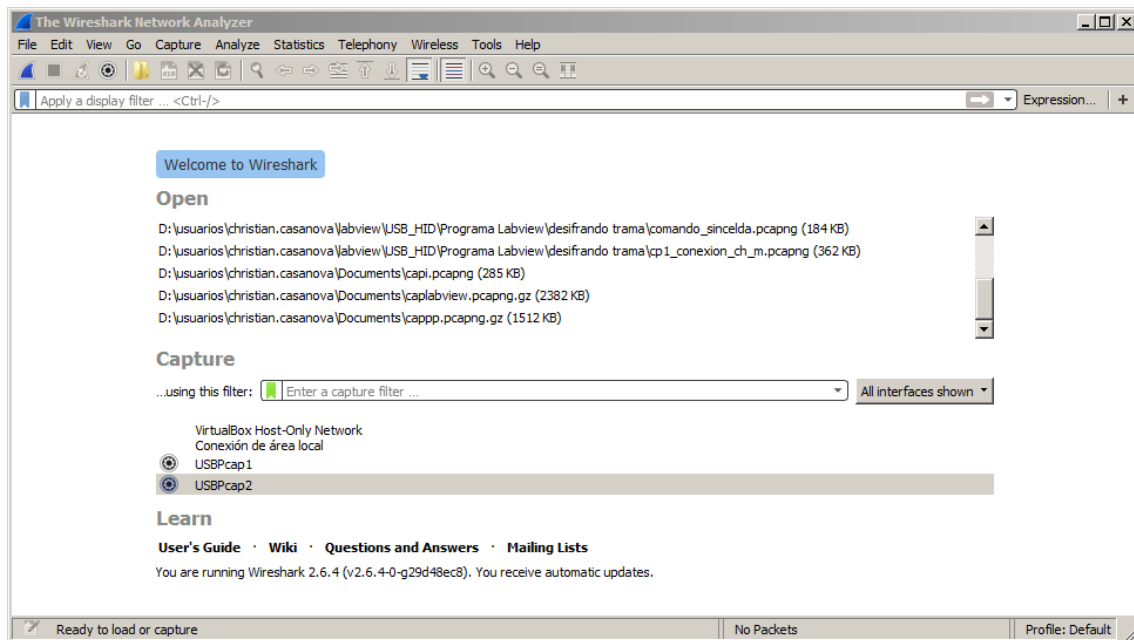


Figura 42 Ventana principal de Wireshark

Posee una interfaz gráfica con opciones de organización y filtrado de información para realizar el análisis de tramas de datos. Así permite ver el tráfico que pasa por una red de comunicaciones como Ethernet o en el caso del presente proyecto la comunicación USB.

Permite estudiar los datos en tiempo real o desde un archivo de captura existente. Este análisis se realiza por medio de las particularidades de cada paquete y con ayuda del lenguaje de filtrado implementado en el programa.

La captura de datos USB se realiza por medio de la librería **USBcap**, libre y de código abierto, que genera registra los datos en formato pcap para su posterior análisis con el programa Wireshark.

6.3.2 Procedimiento de captura

Para realizar la captura de los datos se debe identificar el bus de conexión del dispositivo USB para el cual se requiere realizar la captura. Esto se identifica por medio del número de puerto y dirección de comunicación con el ordenador. Para el caso de este proyecto el cargador B6ACv2 posee el bus #2, con la dirección #4.

Posteriormente, se debe iniciar el programa de captura Wireshark con el comando de USBcap. En la ventana de usuario mostrará la captura en tiempo real de todos los dispositivos USB conectados al bus 2 del ordenador. Figura 43

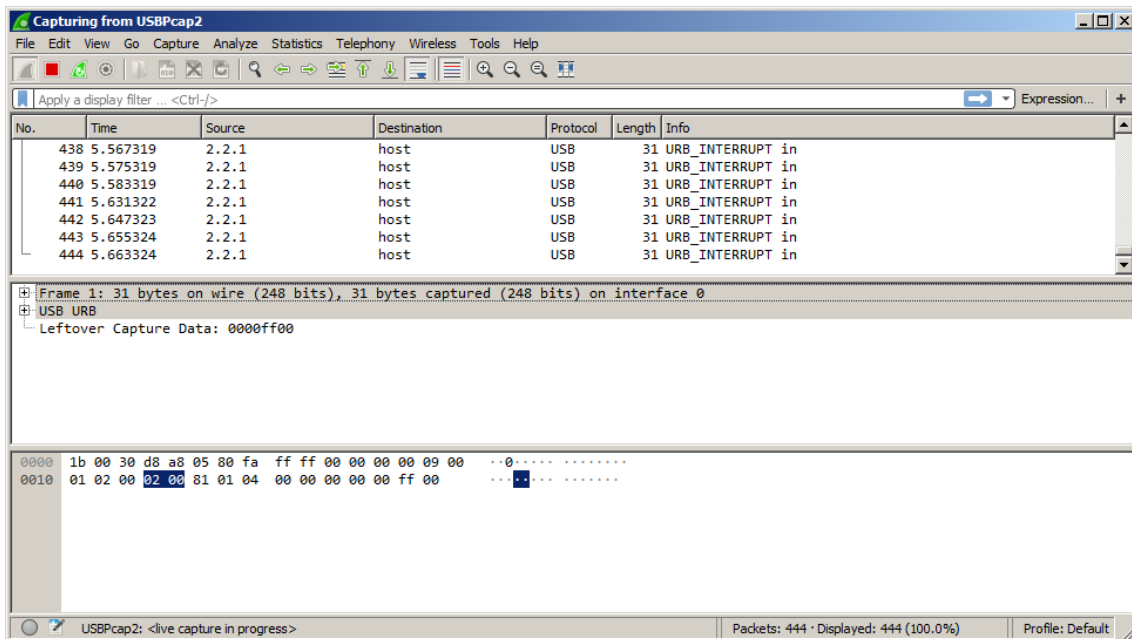


Figura 43 Tráfico de datos capturado por Wireshark en el ordenador

1. El tráfico USB capturado en el ordenador se filtra empleando la dirección conocida del cargador #4, por medio del comando **(usb.device_address==4)**.
2. No todo el tráfico USB entre el cargador y el ordenador contiene datos, por ello se utiliza el comando **(usb.device_address==4)&&(usb.capdata)** para obtener las tramas con datos.
3. Se emplea el filtro **(usb.src == "host")** o **(usb.src == "2.4.1")**, identificando host como el ordenador de trabajo y el "2.4.1" como el identificador del cargador.

6.4 Descripción de tramas de datos

Tanto el ordenador como el cargador generan diferentes tramas de datos para realizar el intercambio de órdenes e información. Teniendo esto en cuenta se realiza la descripción de las tramas empleadas en cada punto de la comunicación.

6.4.1 Tramas de datos generadas por el ordenador

Las tramas generadas por el ordenador cambian dinámicamente según se envíen órdenes al cargador. Poseen una longitud de 91 bytes, de los cuales se identifican 2 partes: encabezado USB de la trama (27 bytes) y trama de datos (64 bytes).Figura 44.

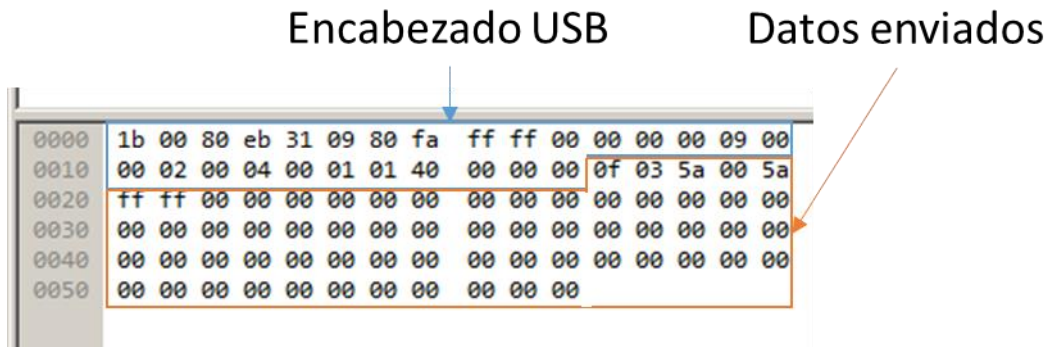


Figura 44 Partes de la trama de datos generada por el ordenador

El encabezado de la trama contiene la información de la comunicación USB relacionada con el direccionamiento de la trama, dispositivo de origen y destino, tipo de interrupción y longitud de datos.

En los datos enviados se identifican los comandos que se envían al cargador por medio de códigos hexadecimales en los 64 bytes transmitidos. Dentro de estos comandos se identifican secuencias de bytes constantes y variables según la Tabla 12.

Tabla 12 Códigos de datos enviados en las tramas generadas por el ordenador

Comando	Código de datos enviados
Parada	0F03 FE00 FEFF FF
Espera	0F03 5A00 5AFF FF
Monitoreo	0F03 5500 55FF
Inicio de ensayo	0F03 5F00 5FFF FF
Información de ensayo*	0F1605000101010064032009C41004000000000000000070FFFF00

*El comando información de ensayo cambia de acuerdo a los valores requeridos por el ensayo.

- Descripción del comando ensayo

En el comando de información de ensayo se identifican las partes y los bytes que contienen los valores deseados para el ensayo, según la Tabla 13.

Tabla 13 Secuencia de bytes del comando información de ensayo

Bytes	Código en hexadecimal	Identificación
1-4	0F160500	Encabezado
5	01	Batería de ion litio
6	01	Numero de celdas
7	01	Modo de ensayo
8	0064	Corriente de carga
9	0320	Corriente de descarga
10	09C4	Voltaje mínimo por celda
11	1004	Voltaje máximo por celda
12-19	0000000000000000	Secuencia de 0
20	70	Checksum de bytes de comando
21-23	FFFF00	Bytes de finalización

Los valores numéricos se ingresan en representación decimal y deben transformarse al valor correspondiente hexadecimal antes de ser ensamblados en la trama de datos, para ello se implementa el VI **num_build_stream**. A continuación, en Labview se genera la secuencia de bytes correspondiente a la información del ensayo por medio del VI **build_stream**. Primeramente se concatenan los bytes de información junto con el encabezado y luego se calcula el checksum correspondiente de la trama. Figura 45.

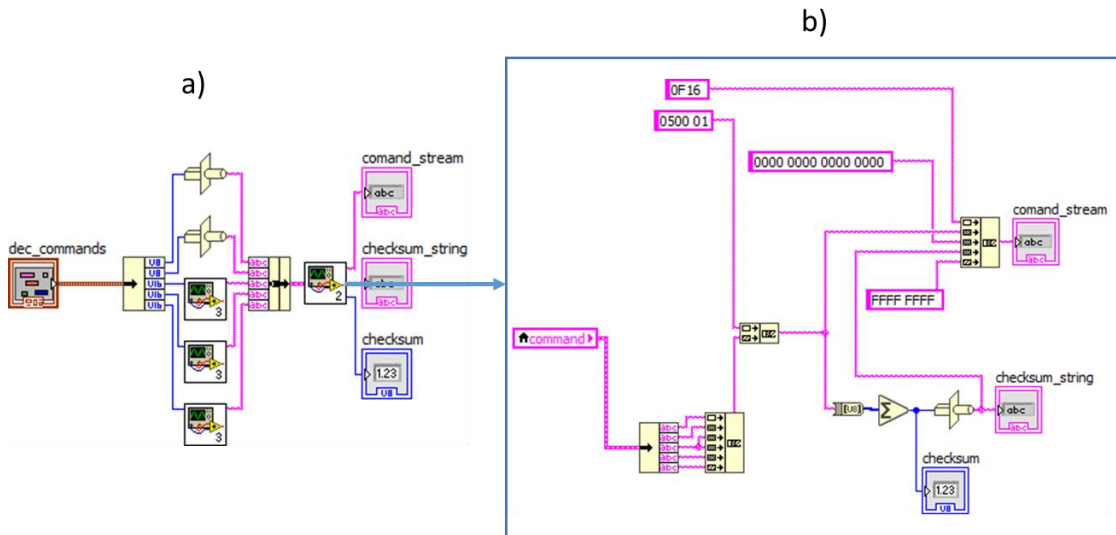


Figura 45 VIs de creación del comando información de ensayo, a): conversión de decimal a hexadecimal, b) ensamblado de comando.

6.4.2 Tramas de datos enviadas por el cargador

La trama de datos generada por el cargador cambia dinámicamente y está compuesta de 91 bytes. Al igual que las tramas generadas por el ordenador posee 2 partes, encabezado USB (27 bytes) y datos enviados (64 bytes).

Dentro de los datos enviados en las tramas capturadas se identifican 2 tipos de secuencias de bytes: estado del cargador y valores medidos, que varían dinámicamente dependiendo del estado actual del cargador.

- Códigos de estado del cargador B6AC

El cargador informa el comportamiento del sistema a través de los pares de bytes 3-4 referentes al estado y 5-6 referentes al código de error presentado.

Los códigos de estado del cargador se describen en la Tabla 14. Indican si el cargador está desarrollando un ensayo, o se puede realizar uno nuevo.

Tabla 14 Códigos de estado del cargador B6AC, bytes 3-4 y descripción

Estado	Bytes (3-4)	Descripción
Running	0001	Ejecutando un ensayo
Idle	0002	Espera
Finish	0003	Ensayo finalizado
Error	0004	Error y tipo de error en bytes 5-6

Cuando el cargador detecta un error en su funcionamiento, envía en la trama generada el código correspondiente según se describen en la Tabla 15. Indica el error correspondiente, para que el operador del equipo pueda solucionar el problema y habilitar la ejecución de ensayos.

Tabla 15 Códigos de error del cargador B6AC, bytes 5-6 y descripción

Código de error	Bytes (5-6)	Descripción
CELL ERROR VOLTAGE INVALID	000C	Voltaje de una celda en el pack de baterías es inválido.
BALANCE CONNECT ERROR	000D	Conexión inválida en conector de balance
NO BATTERY	000E	No se ha conectado la batería
CELL NUMBER INCORRECT	000F	Numero incorrecto de celdas
CONNECTION ERROR, CHECK MAIN PORT	0010	Error de conexión de la salida de potencia
BATTERY WAS FULL	0011	Batería cargada, voltaje final
NOT NEED CHARGE	0012	No se necesita cargar
CELL ERROR HIGH VOLTAGE	0013	Voltaje de una celda el pack de baterías alto
CONNECTION BREAK	0014,0015,0016	Conexión rota
EXT. TEMP TOO HIGH	0200	Temperatura de la batería alta
REVERSE POLARITY	0700	Polaridad inversa
OVER TIME LIMIT	0500	Límite de tiempo superado
OVER CHARGE CAPACITY LIMIT	0600	Límite de carga superado

La validación del estado actual y códigos de error informados por el cargador B6AC se realiza por medio del VI **error_codes** Figura 46. La trama recibida desde el cargador se toma desde el buffer de entrada en Labview, por medio de 2 estructuras **case** se identifica el estado y código de error generando: una salida binaria y una salida de texto para ser utilizadas en el VI principal.

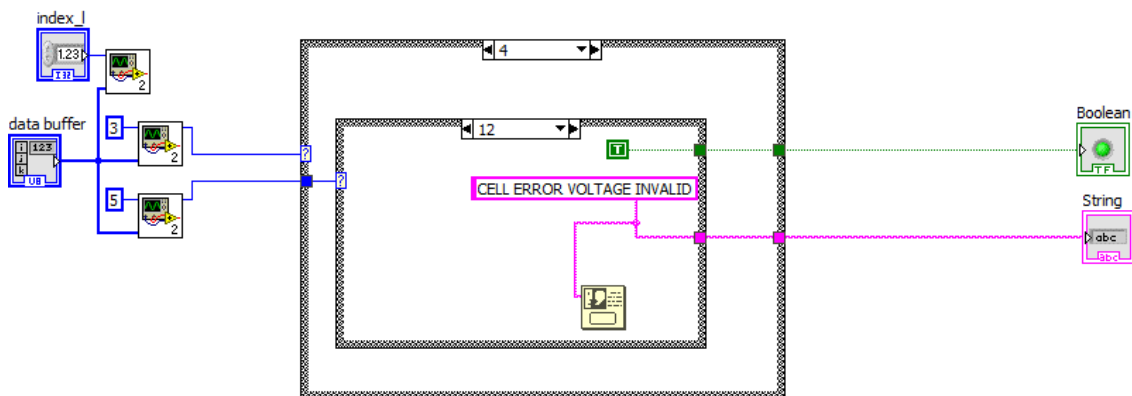


Figura 46 VI error codes para la identificación de estado y códigos de error del cargador B6AC

Cuando se presenta un error en el ensayo, el cargador automáticamente detiene el proceso actual, por lo cual corresponde al operador solucionar el error corrigiendo las conexiones que corresponda.

- Valores medidos por el cargador B6AC

Al realizar un ensayo, el cargador envía en la trama de datos los valores medidos actualmente en valor hexadecimal. En la secuencia de bytes se identifican los valores de ensayo según la Tabla 16.

Tabla 16 Valores registrados por el cargador y bytes correspondientes

Bytes	Descripción
5-6	Carga (mAh)
7-8	Tiempo (s)
9-10	Voltaje (mV)
11-12	Corriente (mA)
14	Temperatura interna (°C)
17-18, 19-20, 21-22, 23-24, 25-26, 27-28	Voltajes individuales de celdas: VC1—VC6
35	Checksum de datos

La trama generada por el cargador se recibe en el buffer de datos, que sirve de entrada del VI **stream info** Figura 47, con el cual se extrae y convierte los valores de información para ser enviados al VI principal por medio de las salidas **values** que contiene los valores de carga, tiempo, voltaje y corriente y **v_by_cell** que contiene los voltajes individuales para ensayos con más de una celda.

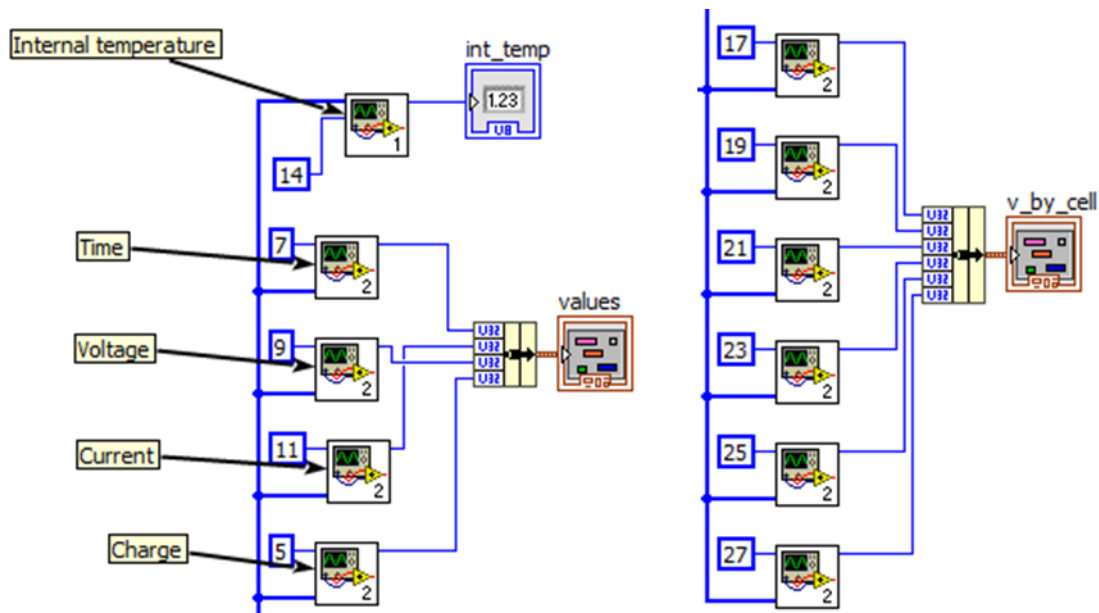


Figura 47 VI stream info, extrae los valores de la trama generada por el cargador

Se garantiza la integridad de la trama de datos del cargador calculando el checksum en Labview correspondiente de los bytes 2—33 verificando que sea igual al checksum enviado por el cargador B6AC (byte 35). Figura 48

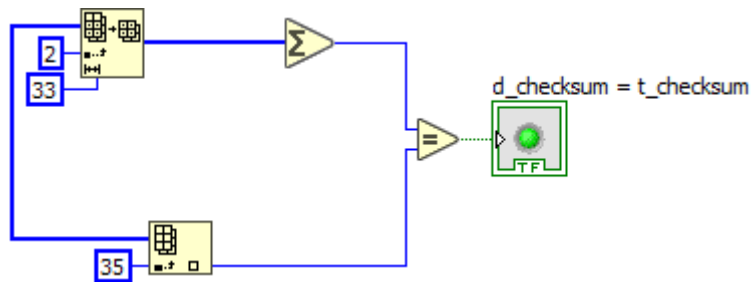


Figura 48 Verificación de checksum de trama generada por el cargador en el VI stream info

6.5 Desarrollo del software

Teniendo en cuenta las necesidades de monitoreo y control para desarrollar experimentos con baterías de ion litio, se plantea el desarrollo de una interfaz que permita el registro de los datos transmitidos por el cargador al ordenador, así como también la programación de ensayos.

El programa de monitoreo y control está desarrollado en el entorno Labview. A partir de la comunicación establecida a través del controlador VISA, se logra transmitir y recibir datos para el control del cargador. Este desarrollo está conformado por la programación en diagrama de bloques y la interfaz de usuario.

6.5.1 Interfaz de usuario

La ventana principal del programa está dividida en dos secciones: la parte de monitoreo y la parte de control. La parte de monitoreo presenta dos gráficos en tiempo real del voltaje y la corriente, simultáneamente el software va registrando en un archivo separado por comas los datos recopilados correspondientes a los valores medidos por el cargador B6AC.

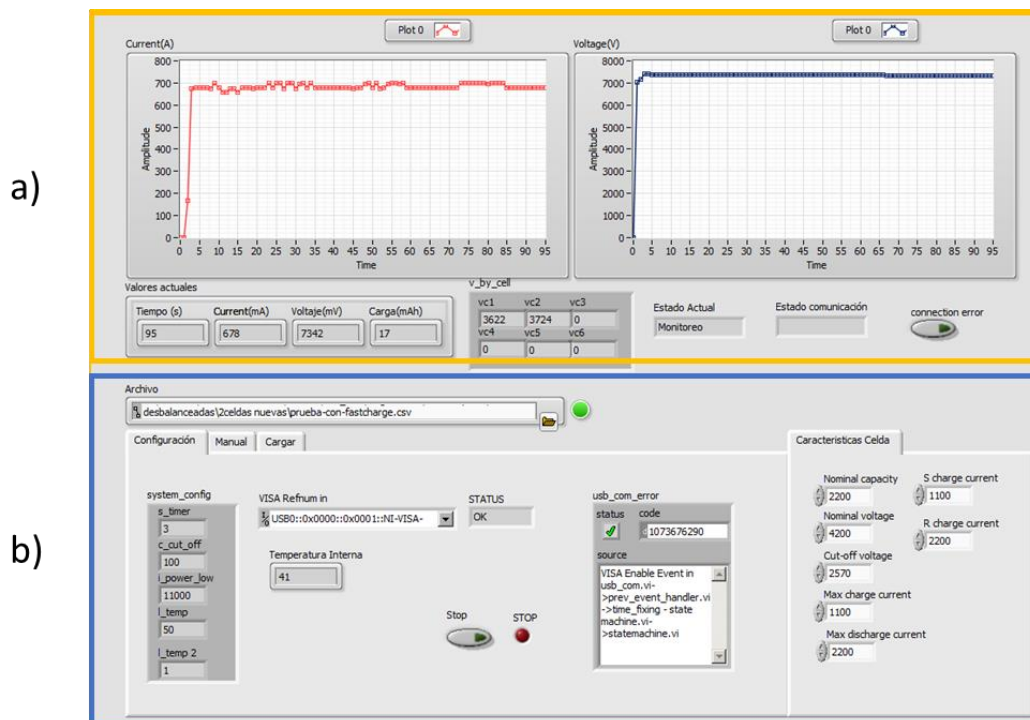


Figura 49 Interfaz principal del programa, a) sección de monitoreo, b) sección de control.

- **Sección de monitoreo.**

Permite visualizar en tiempo real los valores de corriente (mA) y voltaje (mV) por medio de 2 graficas. En la sección de **valores actuales** se presentan los datos correspondientes al segundo actual de medición de tiempo(s), corriente (mA), voltaje (mV) y carga (mAh). En el caso de ensayos con más de una celda se pueden ver los datos puntuales de voltajes individuales en la sección de **voltaje por celda**.

- **Sección de control**

Está dividida en 3 pestañas: Configuración, Manual y Cargar.

- **Pestaña configuración**

En la pestaña de **configuración** se tiene el control de la comunicación del ordenador con el cargador. El usuario al iniciar el programa debe configurar la conexión por medio del identificador VISA del cargador, en seguida el programa verifica el enlace con el cargador.

Esta pestaña también muestra los valores de seguridad configurados en el cargador en la sección **valores configuración**.

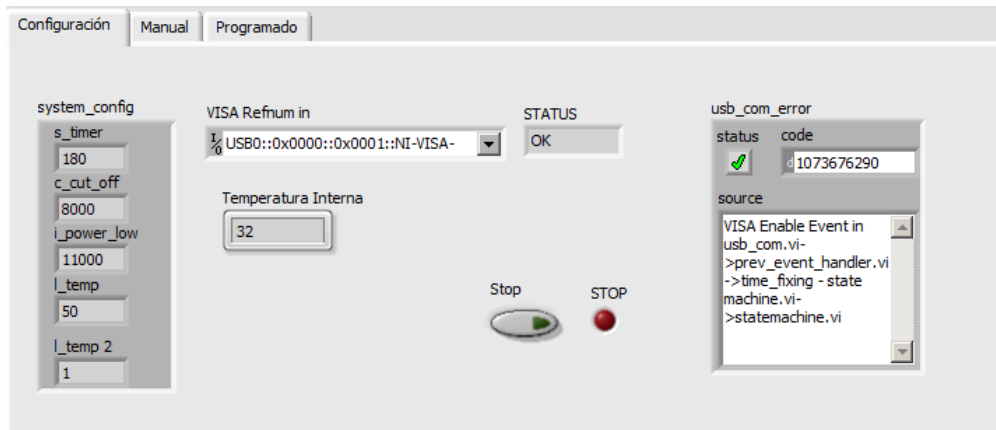


Figura 50 Pestaña de configuración

Una vez la comunicación es exitosa se pasa al estado de **espera** en el cual se habilitan los controles de ensayo en la interfaz de usuario.

- **Pestaña de ensayo manual**

Permite configurar los valores de: número de celdas, corriente (carga/descarga) (mA), voltaje (superior/inferior) (mV), tiempo del ensayo (s) o fin de paso y modo de funcionamiento. Figura 51

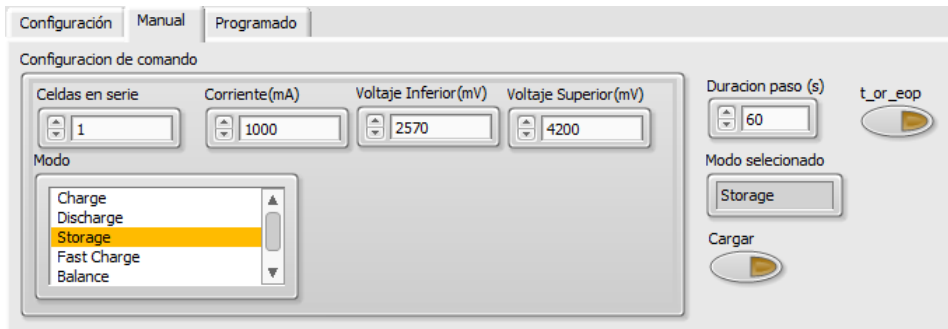


Figura 51 Pestaña de ensayo manual

Para cada ensayo es posible configurar solo uno de los seis modos de funcionamiento del cargador descritos en la página 13 de este documento y brevemente en la Tabla 17.

Tabla 17 Descripción de los modos de funcionamiento del cargador

Modo	Descripción
Charge	Carga
Discharge	Descarga
Storage	Almacenamiento
Fast Charge	Carga rápida
Balance	Balanceo

- **Pestaña de ensayo programado**

Permite cargar un archivo csv, que contenga pasos de ensayo para el cargador B6AC y la batería que se ha conectado. Cada paso se identifica por un número decimal en la columna “Step”, además para cada paso se especifican los siguientes valores: número de celdas, modo, corriente, tiempo o fin de paso. Figura 52

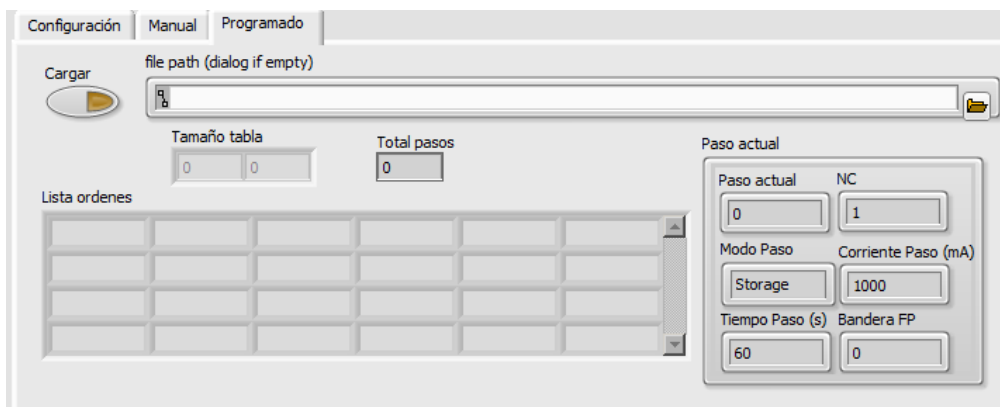


Figura 52 Pestaña de ensayo programado

El programa de ensayo se carga por medio de la ventana localizando en el explorador un archivo .csv valido. Después de cargar el archivo se muestran los diferentes pasos en la sección **lista de órdenes** y el total de pasos de ensayo.

6.5.2 Uso del programa

Para realizar ensayos con el programa se debe seguir la siguiente secuencia de pasos:

1. Se establece los parámetros de carga o descarga, corriente, numero de celdas para el experimento por medio de la pestaña de ensayo manual o ensayo programado.
2. Se comprueba que los valores proporcionados estén dentro del rango de funcionamiento especificado en la hoja de datos de la batería.
3. Se establece el archivo y directorio donde se guardarán los datos.
4. Se verifica que el programa esté en modo “Espera”.
5. Se inicia el ensayo, que permite visualizar las gráficas en tiempo real de corriente y voltaje del paso actual para la batería a la vez que se registran los datos en el fichero especificado.
6. En cualquier momento del ensayo, se puede parar el programa con la función “Parada”.
7. En caso de que se presenten errores se registran en archivo de muestreo y se detiene el proceso.
8. Durante el experimento, el cargador muestra en la pantalla LCD los valores actuales de corriente, voltaje, carga y tiempo correspondientes.

6.5.3 Programación

El programa principal del diagrama de bloques está basado en una máquina de estados, que permite organizar el VI en secciones que representan las funcionalidades del VI.

Los estados están desarrollados dentro de la estructura “Case”. Donde cada paso contiene todos los elementos de ejecución respectivos, una vez completado el estado actual por medio de un se transfiere el control al siguiente estado en el registro.[18]

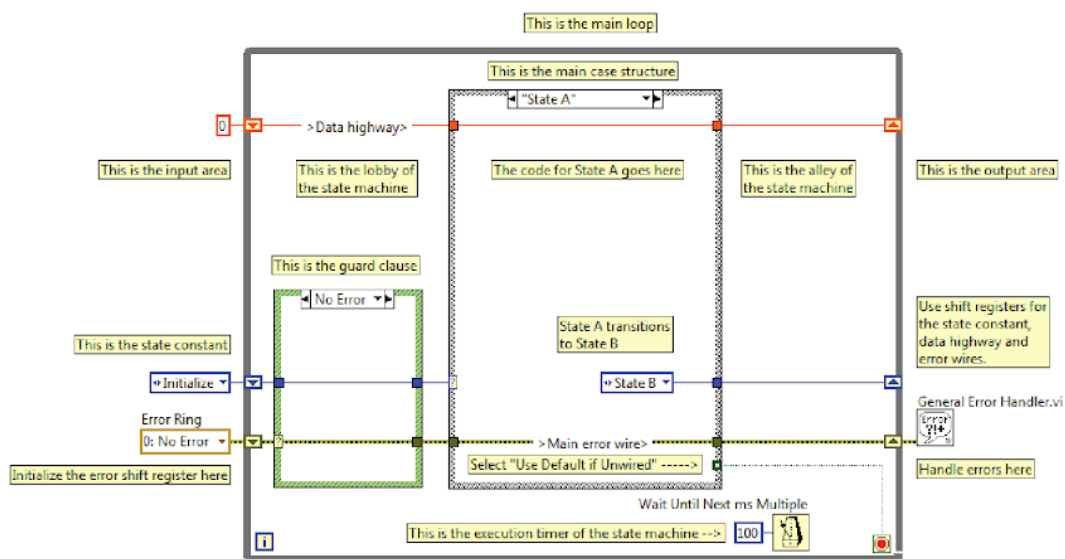


Figura 53 Diagrama de bloques de una máquina de estados en Labview [18]

La máquina de estados interactúa con la interfaz de usuario en todo momento, de tal forma que gestiona las tramas de datos entre el ordenador y el cargador B6AC en todo momento. Los estados que la conforman son:

- **Estado de espera**

Consiste en el estado principal del programa de Labview que se encarga de verificar las acciones del usuario transfiriendo la máquina de estados a la opción seleccionada. Consiste en 7 comparadores que escriben en el registro el siguiente estado del programa. Figura 54

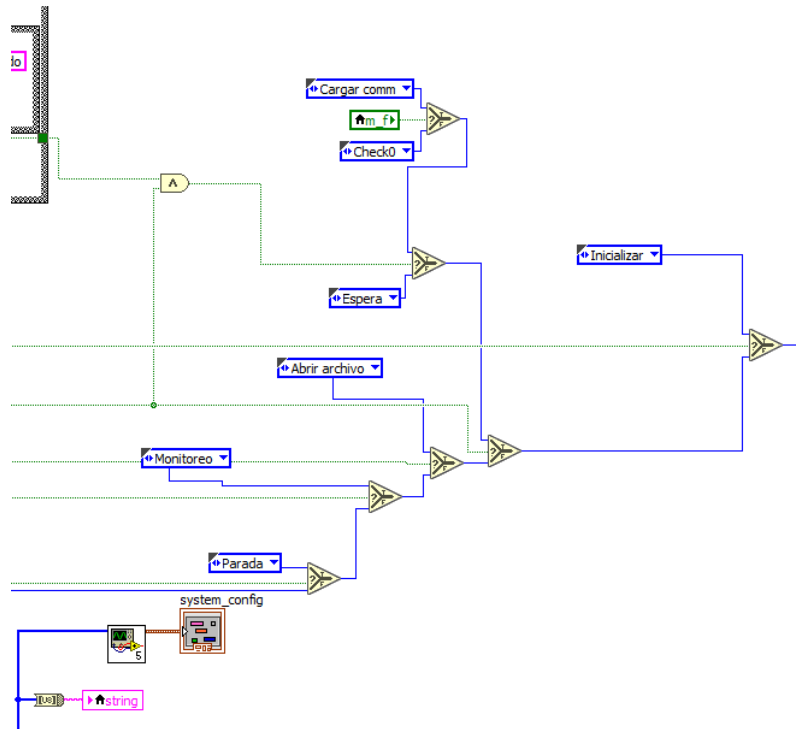


Figura 54 Diagrama de bloques correspondiente al estado de espera del software

A partir de este estado, el usuario por medio de los botones de la interfaz se puede interactuar con los estados de la maquina llevándola al estado requerido por el usuario. Así después de especificar los parámetros de un ensayo, con el botón Start, se inicia el flujo de trabajo hasta llevar al estado de monitoreo de las variables experimentales.

- **Estado abrir archivo**

Cuando el usuario carga el archivo por medio del navegador de archivos, primero se verifica que corresponda a una secuencia de pasos programados valida, en caso favorable se transfiere los valores al indicador de la sección **Lista de órdenes**. Figura 55

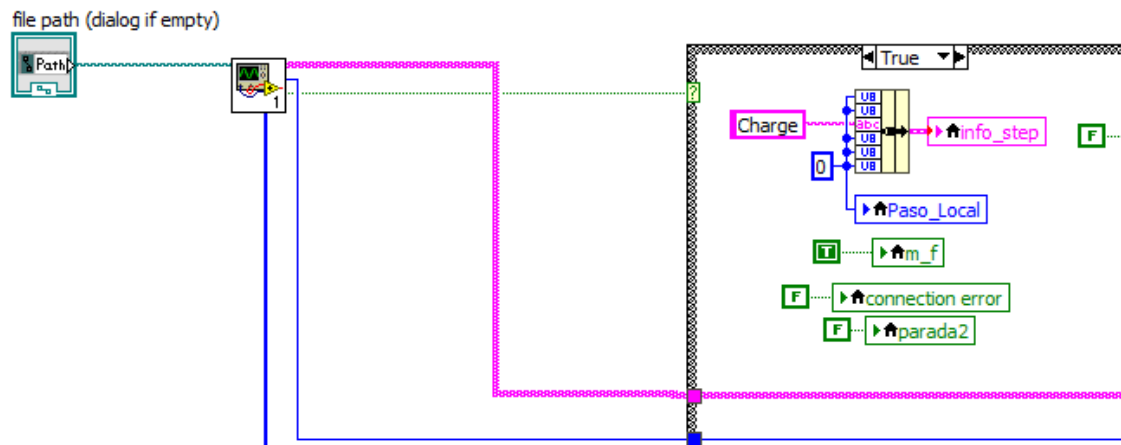


Figura 55 Diagrama de bloques del estado abrir archivo

- Estado comando

Transfiere los valores de los controles de la sección “**configuración de comando**” al VI **num_build_stream**, éste ensambla la trama de datos de **información de ensayo** para ser transferida al bloque **usb_com** y enviada al cargador B6AC. A continuación, se escribe en el archivo de referencia el encabezado del ensayo compuesto por: paso, numero de celdas, modo, corriente (mA), tiempo(s) y fin de paso. Seguidamente se transfiere el control al estado **buffer**. Figura 56

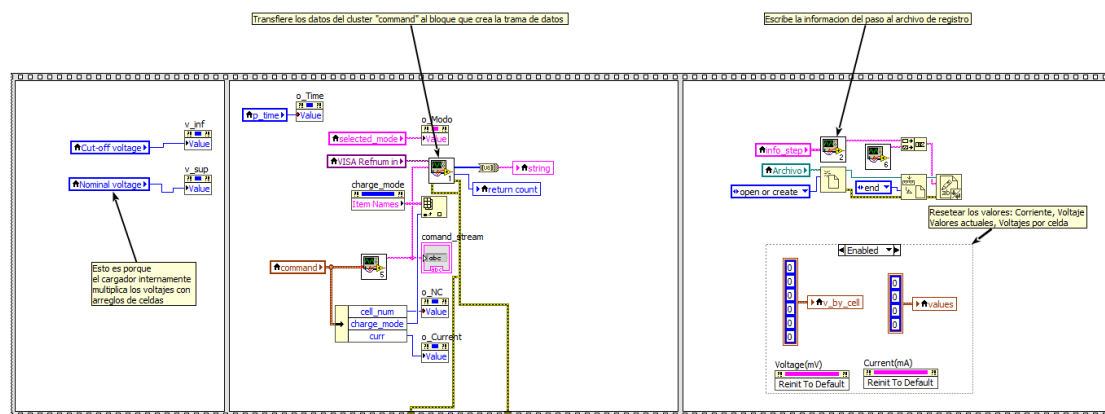


Figura 56 Diagrama de bloques del estado comando

- Estado buffer

Después de enviar la orden de ensayo el programa verifica la disponibilidad del cargador B6AC por medio del comando **iniciar_ensayo**, de acuerdo al estado se permite o no el inicio del paso actual. Figura 57

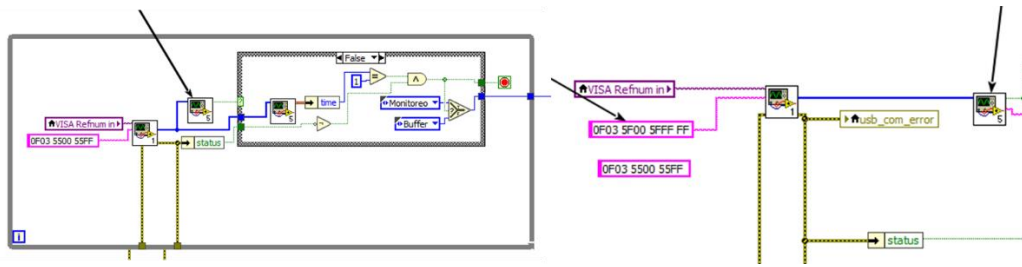


Figura 57 Diagrama de bloques del estado buffer

- **Estado monitoreo**

Se encarga de solicitar las tramas de datos al cargador por medio del comando **monitoreo**, la información ingresa en el buffer de recepción. Entonces se examina las tramas caracterizándolas según sean datos validos o tramas de mensajes de error. Figura 58

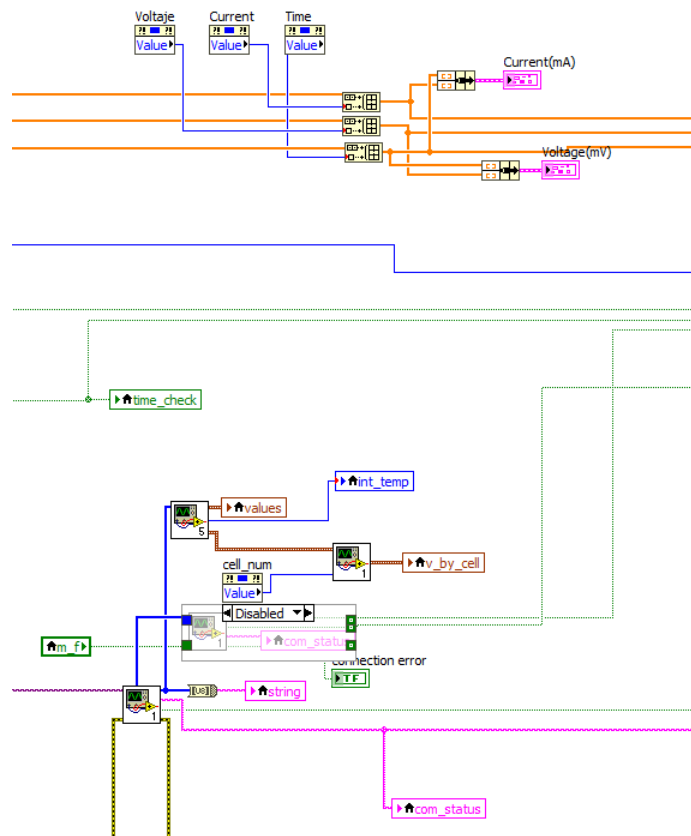


Figura 58 Diagrama de bloques del estado monitoreo

Para las tramas validas se extraen los valores individuales del tiempo(s), corriente (mA), voltaje (mV) y carga (mAh), por medio de los VI **stream_info** y **v_cell_cluster**. Los valores de corriente y voltaje son transferidos a los vectores de registro para ser mostrados por medio del bloque **grafica_XY**.

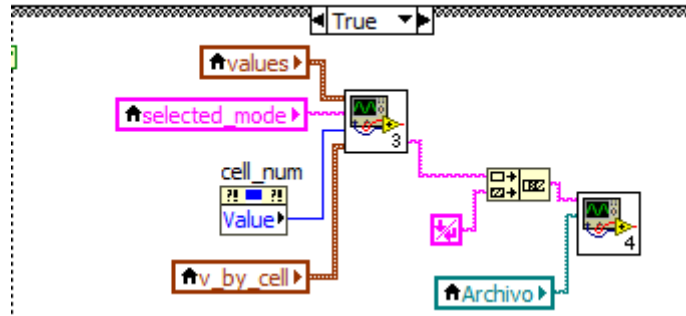


Figura 59 Diagrama de bloques de registro de datos en archivo

Los valores se registran en el archivo .csv especificado, concatenando para cada segundo los valores de: tiempo (s), corriente (mA), voltaje (mV), carga (mAh) y estado. Una vez terminado el paso actual se escribe una nueva línea en el archivo de registro describiendo el evento correspondiente de finalización. Figura 59

- **Estado parada**

Se encarga de la finalización del ensayo que se esté realizando, en el caso de ensayos programados incrementa el contador del paso local para que en el **estado comando** se transfiera la información del paso posterior hasta llegar al final de la lista de pasos, para ensayos manuales se vuelve al **estado de espera** del programa. Figura 60

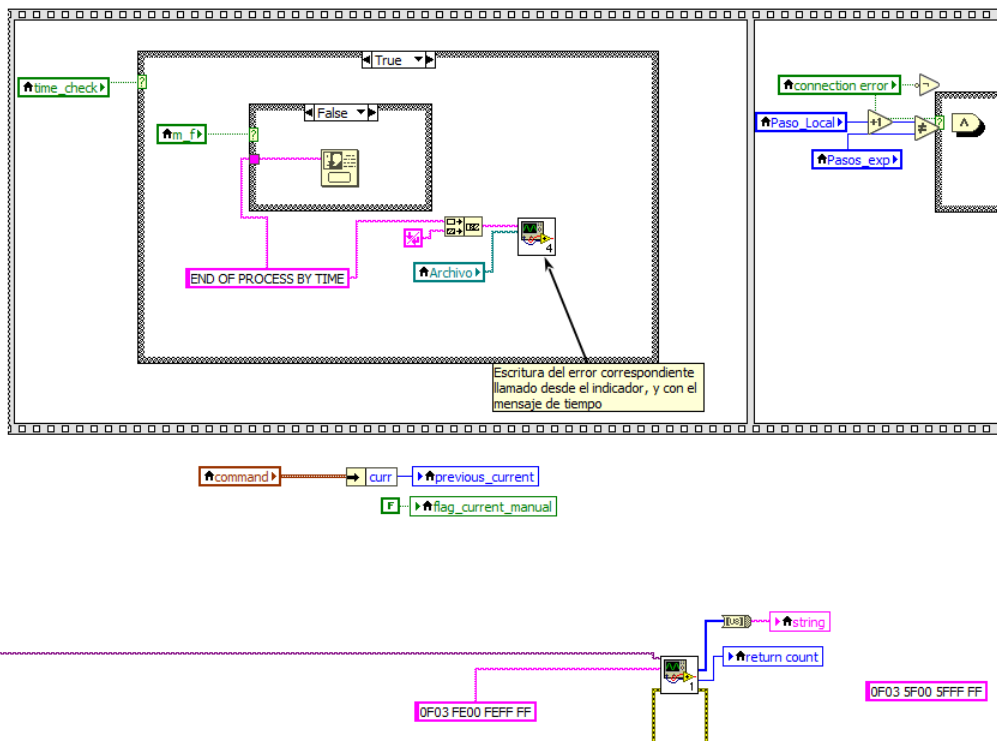


Figura 60 Diagrama de bloques del estado parada

Finalmente se reinician las variables temporales y las gráficas para que estén disponibles para un nuevo ensayo.

6.5.4 Archivo de registro de datos

Los datos transmitidos por el cargador B6AC son registrados en el archivo .csv que el usuario especifica al inicio de los ensayos. Este archivo se divide en n secciones correspondientes a n pasos del experimento. Figura 61

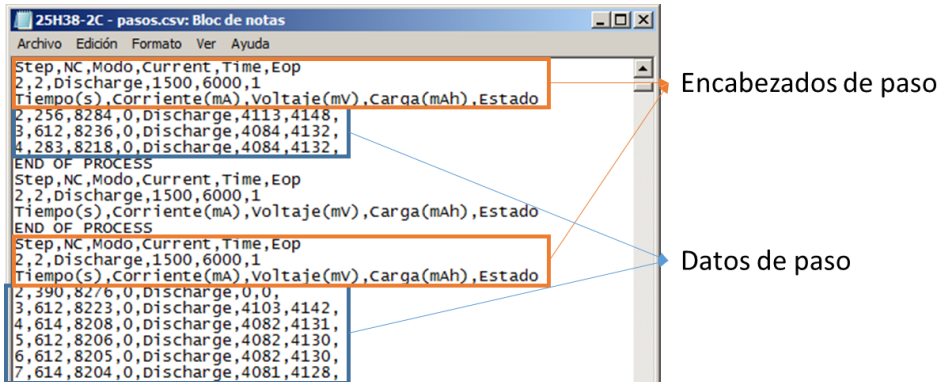


Figura 61 Secciones de un archivo de registro con varios pasos

Para cada paso se registra en su encabezado los valores especificados para el ensayo. A continuación, se registran los datos puntuales para cada segundo del paso.

6.5.5 Creación de pasos programados

Se implementa en Labview un VI independiente con el cual el usuario puede crear una secuencia de pasos programados en un archivo .csv.

Por medio de la interfaz del programa el usuario inicialmente especifica el nombre del archivo .csv. Posteriormente determina para cada paso por medio de los controles: el número de celdas, modo, corriente, tiempo y fin de paso, los valores correspondientes a cada transición deseada. Figura 62.



Figura 62 Interfaz de usuario para la creación de pasos programados

Después de especificar los valores para cada paso por medio de la opción **Añadir paso** se agrega a la lista de ensayo y se escribe en el archivo .csv, en caso de ser necesario se puede eliminar el último paso escrito seleccionando **Borrar paso**. Al terminar de configurar los pasos del ensayo se tiene un archivo .csv de ensayos programados preparado para cargarse en el programa principal.

```

p-p1.csv: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Step,NC,Mode,Current,Time,Eop
1,1,Charge,1500,0,0
2,1,Discharge,1500,0,0
3,1,Charge,1500,0,0
4,1,Discharge,1500,0,0

```

Figura 63 Ejemplo de archivo .csv generado de un ensayo programado para una celda

6.5.6 Software de visualización en MATLAB

Se ha desarrollado una herramienta para visualizar los datos de los ensayos realizados con el cargador B6ACv2. Este software toma un fichero de registro a partir del cual genera las gráficas de corriente y voltaje para la batería empleada.

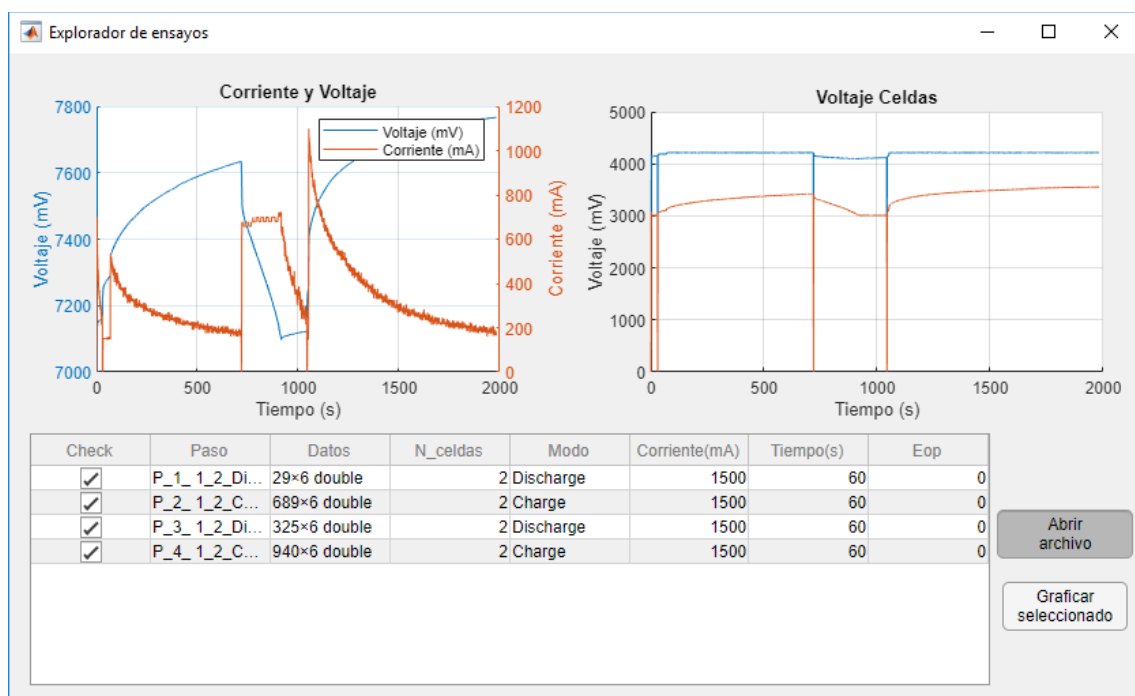


Figura 64 Ventana del software de visualización desarrollado en MATLAB.

7 Práctica: Baterías de ion litio.

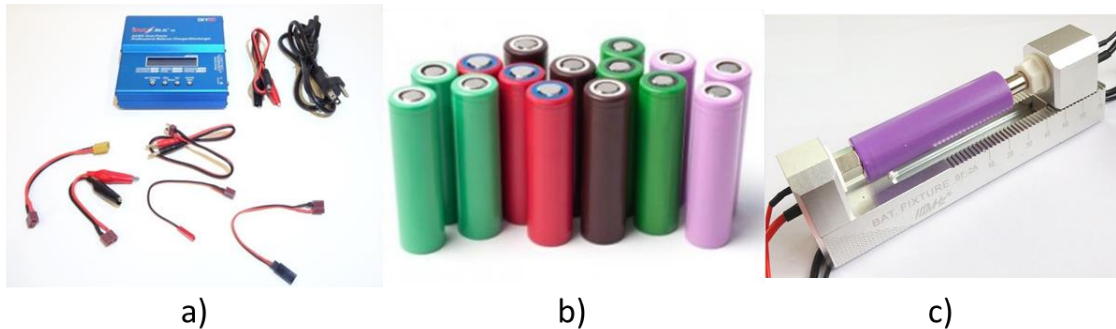


Figura 65 Elementos para ensayos: a) Dispositivo B6ACv2, b) celdas de ion litio, c) soporte para celdas

Introducción

Las prácticas se desarrollarán utilizando el dispositivo B6ACv2, celdas de ion litio y soporte para celdas. Se tiene como objetivo dar una ilustración rápida del comportamiento de las baterías en diferentes fases de trabajo en carga/descarga. Se plantea el análisis sobre los datos obtenidos y realizar algunos cálculos para comprobar el funcionamiento esperado.

- **Cargador B6ACv2**

El cargador B6ACv2 es un dispositivo electrónico de gestión de baterías de litio que permite la carga y descarga de hasta máximo 6 celdas de litio en serie, que se puede controlar manualmente o por medio del software de ordenador.

El equipo funciona de la siguiente manera:

1. Se conecta a la alimentación AC o DC de entrada al cargador.
2. Se conecta el cargador al ordenador por medio del puerto USB.
3. Se conecta el pack de baterías a la salida de potencia y al conector de balanceo.
4. Se inicia el programa de monitoreo y control.
5. Se configura ensayo y se inicia proceso, el ensayo se detendrá manualmente o según se haya programado.
6. Los valores medidos se registran en un archivo .CSV que contiene los valores de corriente, voltaje, carga para el ensayo realizado.

- **Partes del cargador B6AC**

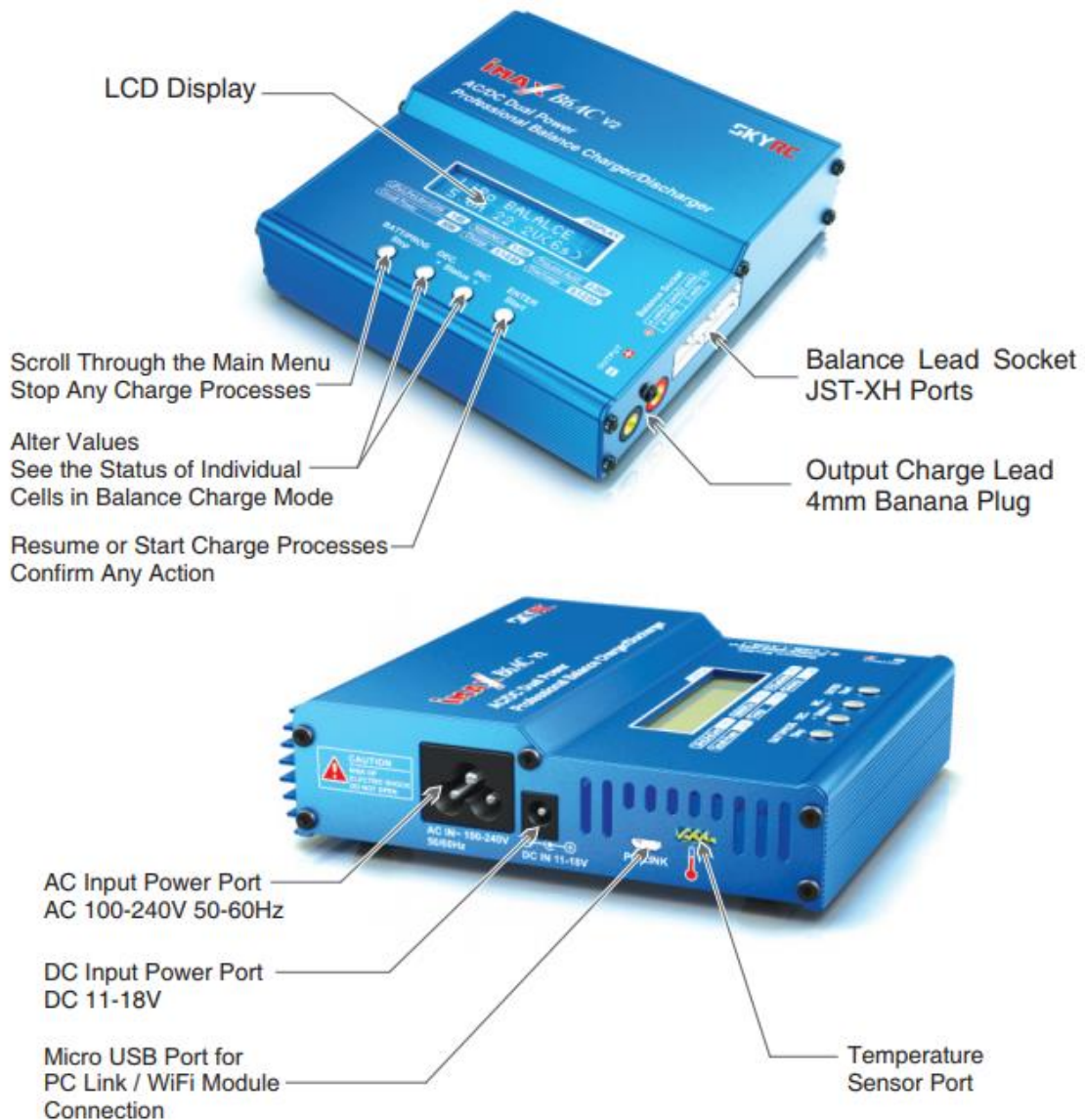


Figura 66 Partes del cargador B6AC

1. Pantalla LCD. Se utiliza para indicar al usuario parámetros del ensayo actual, menú de elección de modo de funcionamiento, configuración del cargador.
2. Botones frontales. Permiten interactuar al usuario con las opciones del cargador, y los estados de funcionamiento.
3. Puerto de balanceo (JST-XH). Puerto utilizado con arreglos de baterías que posean de 2-6 celdas, que se utiliza para medir el voltaje individual, así como también para el balanceo de las celdas.
4. Salida de potencia. Salida de dos terminales del cargador que se conecta con la batería.
5. Entrada AC y DC. Entrada de potencia.
6. Conexión micro USB.
7. Conector de sensor de temperatura externo.

- **Celda de ion de litio**

Una celda de ion litio es una unidad de almacenamiento de energía que se puede encontrar comercialmente en diferentes presentaciones. La celda 18650 es un formato estándar que se emplea masivamente en la actualidad. Cada celda posee unas determinadas características de corriente y voltaje para carga y descarga según la hoja de datos correspondiente especificada por el fabricante.

En la Figura 31 se observan las corrientes de carga y descarga, capacidad y voltajes permitidos para una celda ICR18650-22F.

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	2200mAh (0.2C, 2.75V discharge)
3.2 Charging Voltage	4.2V±0.05 V
3.3 Nominal Voltage	3.6V
3.4 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.5 Charging Current	Standard charge: 1100mA Rapid charge : 2200mA
3.6 Charging Time	Standard charge : 3hours Rapid charge : 2.5hours
3.7 Max. Charge Current	2200mA
3.8 Max. Discharge Current	4400mA
3.9 Discharge Cut-off Voltage	2.75V
3.10 Cell Weight	44.5g max
3.11 Cell Dimension	Diameter(max.) : Φ18.4 mm Height(max.) : 65.0 mm
3.12 Operating Temperature	Charge : 0 to 45 °C Discharge: -20 to 60 °C
3.13 Storage Temperature	1 year : -20~25 °C (1*) 3 months : -20~45 °C (1*) 1 month : -20~60 °C (1*)

Figura 67 Datos principales de la hoja de datos de la celda ICR18650-22F [13]

La hoja de datos servirá de guía para establecer los valores de las corrientes de los ensayos con las baterías. La **carga rápida** solo se podrá realizar con baterías que soporten explícitamente ser cargadas a corrientes mayores que la corriente estándar.

- **Soporte de baterías**

Es un dispositivo mecánico diseñado para asegurar y mantener una celda de ion litio de referencia 18650 con terminales que permiten un contacto completo sobre la superficie de los electrodos de la celda. Posee 2 pares de cables: el primero que emplea cables 20AWG se utiliza para medir voltajes, el segundo de referencia 14AWG que permite la circulación de corriente de carga y descarga entre la celda y el cargador B6ACv2.

Objetivos de las prácticas

- Medición de capacidad (Ah y Wh). Interpretando las ventajas e inconvenientes tiene cada una de estas unidades.
- Eficiencia energética y coulombica.
- Influencia de la corriente en las en las anteriores variables.
- Conexión de celdas en serie y problemas de desequilibrado de celdas.

7.1 Sesión 1 – Práctica con una celda de ion litio

Se realizará un proceso de carga y descarga empleando una celda de ion litio conectada al dispositivo B6AC junto con el sistema de monitoreo.

Elementos
<ul style="list-style-type: none">• Cargador B6AC• Celda cargada al 100%.• Computadora• Software de monitoreo y control• Soporte de batería

Requerimientos: En el computador empleado para el monitoreo, antes de iniciar cualquier ensayo se debe instalar el controlador VISA (**Controlador VISA cargador B6AC.zip**) del cargador suministrado con el fin de que el dispositivo pueda ser identificado y se realice la comunicación con el software de monitoreo y control.

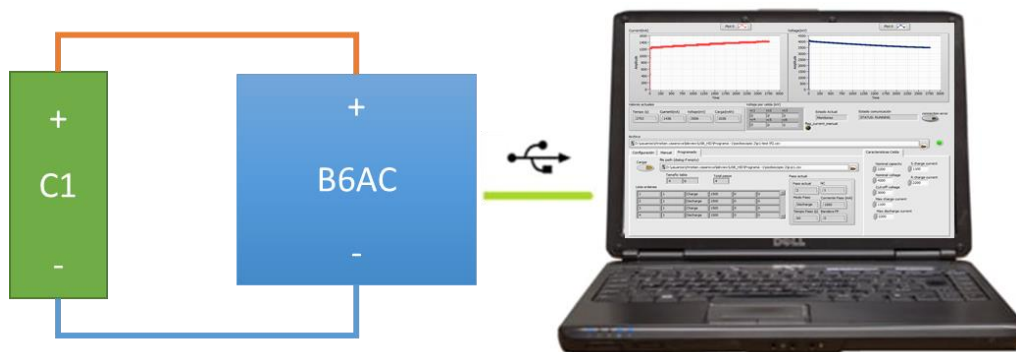


Figura 68 Montaje de laboratorio 1

Procedimiento

1. Disponer el sistema según la Figura 68.
2. A través el menú manual del cargador utilizar la opción **Batt Meter** para medir y registrar el valor del voltaje inicial de la celda.
3. A través el menú manual del cargador utilizar la opción **Resistance Meter** para medir y registrar el valor de la resistencia interna de la celda.
4. Empleando el software de monitoreo y control programar una descarga de la celda a 1C y una carga a 1C.

Evaluación

1. A partir de la hoja de datos de la celda se elabora el diagrama de la SOA para los valores de corriente y voltaje de la celda. Este diagrama permite visualizar los rangos de trabajo seguros en los que se puede variar la corriente y los valores de voltaje nominal finales en cada paso.

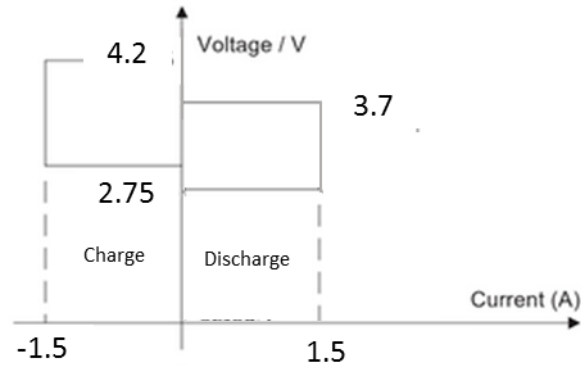


Figura 69 Diagrama de SOA para corriente y voltaje

2. Trazar la gráfica voltaje vs tiempo y corriente vs tiempo para el proceso de carga y descarga.

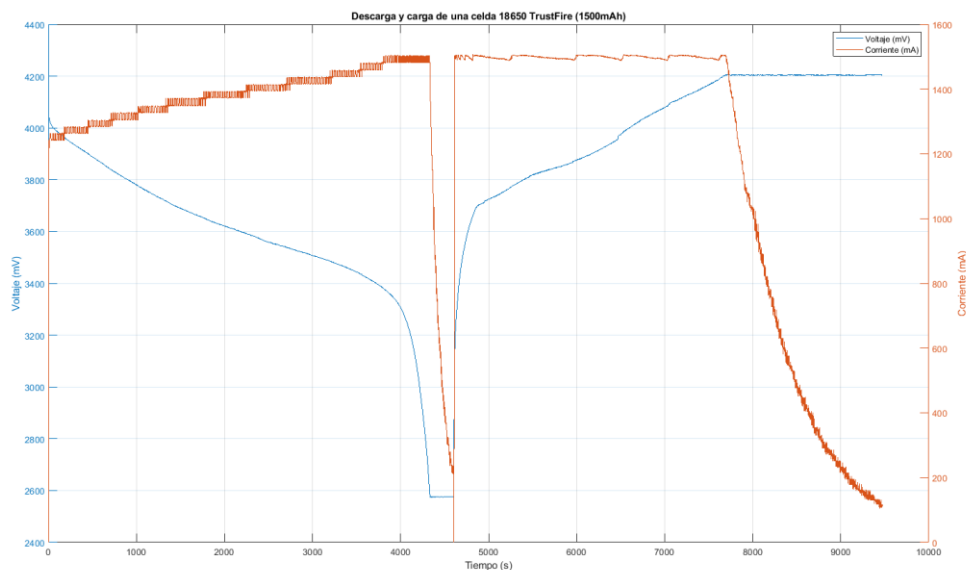


Figura 70 Curva de descarga y carga para una celda TrustFire (1500mAh)

3. Interpretación la curva característica.

Descarga

En la primera etapa del ensayo se observa el comportamiento de descarga a corriente constante con voltaje variable cuando la celda tiene entre 100 y 50% del estado de carga. A continuación, al disminuir la carga disponible en la batería se observa como la corriente empieza a disminuir conforme el voltaje de la

batería se acerca al voltaje de corte estableciéndose un comportamiento de voltaje constante con corriente variable.

Inicialmente la corriente de descarga se va incrementando a medida que disminuye el voltaje de celda, esto debido a la limitación de potencia en descarga del dispositivo B6AC de 5W.

Carga

En la primera etapa se tiene un comportamiento de corriente constante a voltaje variable conforme la carga de la batería se incrementa. Una vez el voltaje de la batería alcanza el valor de 4.2V se establece un modo de corriente variable a voltaje constante hasta que la corriente de carga disminuye a un 10% de la inicial.

4. Determinar la capacidad de la batería.

La evolución de la corriente en el tiempo está directamente relacionada con la variación de la capacidad de la celda tanto en carga como en descarga. En la Figura 71 se muestra el comportamiento de la corriente en los dos pasos del ensayo.

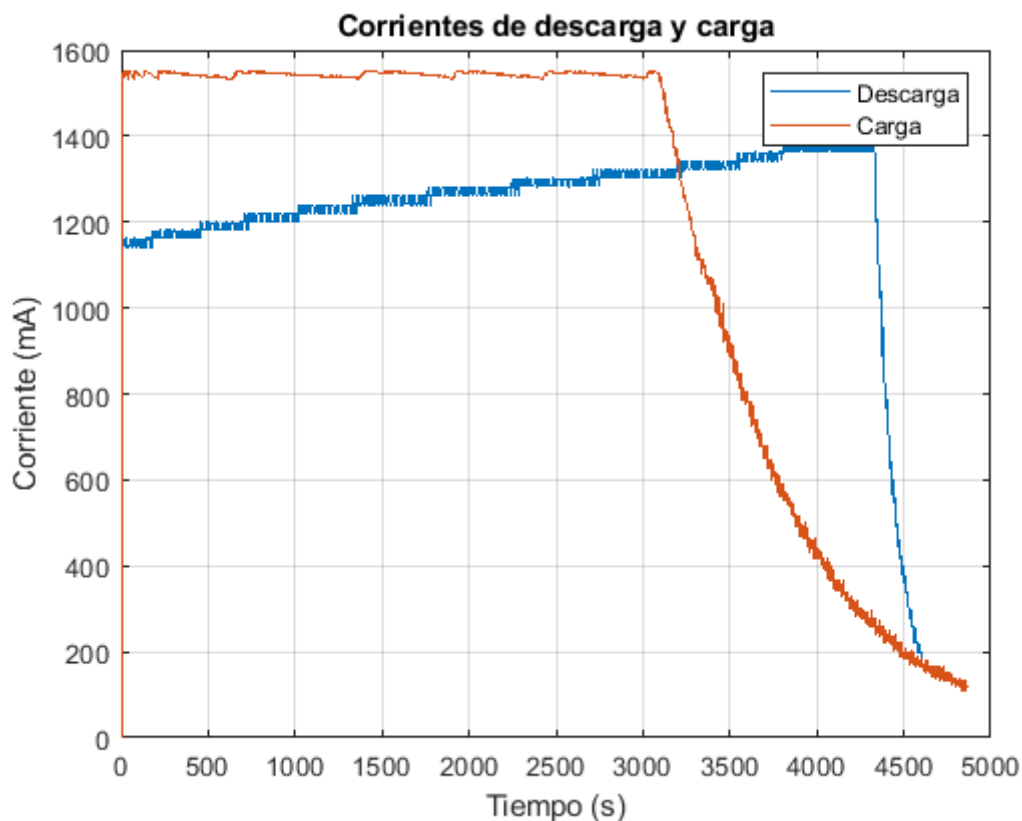


Figura 71 Grafica de corriente en carga y descarga

El valor de capacidad en mAh para cada etapa se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$Cap = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} I}{3600} \quad (22)$$

Donde Cap: Capacidad de la batería (mAh), I: Corriente en mA, t: muestra en el tiempo.

Para el ejemplo se calcula a partir de los valores de corriente (mA), realizando la suma de todos los valores para la descarga y dividiendo por 3600s.

Capacidad en descarga

Se realiza una suma del conjunto de valores de corriente de descarga dividiendo por el factor 3600s, obteniéndose una capacidad similar a la nominal:

$$1575\text{mAh}$$

Capacidad en carga

Se realiza una suma del conjunto de valores de corriente de carga dividiendo por el factor 3600s, obteniéndose una capacidad similar a la nominal:

$$1605\text{mAh}$$

5. Cálculo de eficiencia coulombica

Con las capacidades calculadas de carga y descarga se calcula la eficiencia coulombica según la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \frac{Ah. \text{descargados}}{Ah. \text{cargados}} \tag{23}$$

Capacidad Descarga	Capacidad Carga	Eficiencia
1575mAh	1605 mAh	98.13%

6. Cálculo de eficiencia energética

Se toman los vectores de corriente y voltaje registrados, convirtiéndolos a valores de corriente en A y voltaje en V y aplicando el factor de 3600. La energía empleada en cada paso del ensayo se puede calcular por medio de la siguiente relación:

$$En = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} (I * V)}{3600} \tag{24}$$

Donde En: Capacidad de la batería (Wh), I: Corriente en A, Voltaje en V y t: muestra en el tiempo.

En cada proceso de carga y descarga se produce una pérdida de energía en forma de calor en la resistencia interna de la batería, para visualizar este fenómeno se grafica los valores de corriente, voltaje, potencia total y potencia en la resistencia interna para cada paso. Esta potencia se calcula con $P = I^2 * R_{int}$ para cada instante del ensayo.

La resistencia interna de la celda es medida por el cargador al inicio de la práctica y tiene un valor de:

$$R_{int} = 88 \text{ mohms}$$

En la Figura 72 se muestra el comportamiento de la corriente, voltaje, potencia total y potencia en la resistencia interna. Se observa que la potencia entregada es mucho más grande que la potencia disipada internamente en la celda.

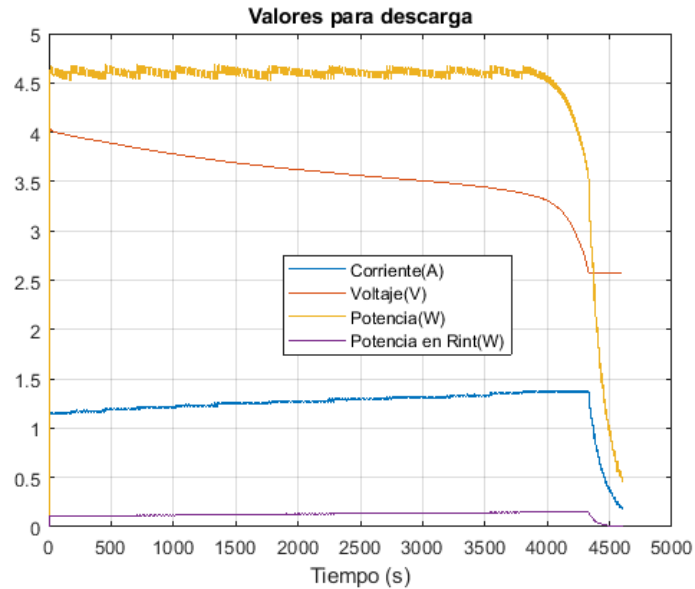


Figura 72 Valores para descarga de corriente, voltaje, potencia total y potencia en la resistencia interna de la celda.

Energía en descarga

$$5.6108 \text{ Wh}$$

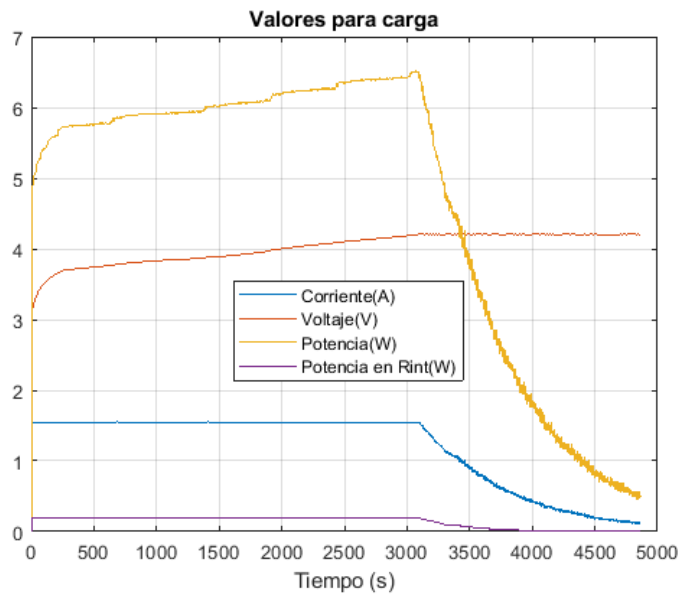


Figura 73 Valores para carga de corriente, voltaje, potencia total y potencia en la resistencia interna de la celda.

Energía en carga

6.3591Wh

Con las capacidades calculadas de carga y descarga se calcula la eficiencia coulombica según:

$$\eta_e = \frac{Wh. desargados}{Wh. cargados} \quad (25)$$

Energía Descarga	Energía Carga	Eficiencia
5.6108 Wh	6.3591Wh	88.23%

Comparando los rendimientos se evidencia que debido a que las reacciones electroquímicas no son ideales, el $V_{carga} > V_{descarga}$ y en consecuencia $\eta_e < \eta_c$. Cabe destacar que el rendimiento dependerá del SOC, SOH y la temperatura.

8. Comparación de unidades

La unidad de Ah depende de la corriente que se utiliza para descargar o cargar la batería, por ello en la hoja de datos de la celda está determinada la corriente estándar relacionada directamente con la capacidad nominal. Entonces para la comparación de dos baterías se requiere conocer los valores de corriente, capacidad y el voltaje.

La unidad Wh indica la energía almacenada en la batería independientemente del voltaje o la corriente utilizada, por ello se puede tener baterías de distinto voltaje y capacidad Ah que permitan almacenar la misma energía.

9. Evolución del SOC carga y descarga

Los datos de la celda obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Eficiencia Coulombica	Resistencia interna	Capacidad nominal	SOC(0)
98.13%	88mOhms	1500mAh	100%

Con estos valores y aplicando la siguiente ecuación:

$$SoC(t) = SoC_0 + \eta_c \cdot \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (26)$$

Se realiza la evaluación y grafica del SOC a partir de los datos medidos para cada etapa del ensayo.

En el método de “ampere-counting” se debe tener en cuenta el signo del corriente visto desde la batería como positivo en carga y negativo en descarga.

- **Valores en descarga**

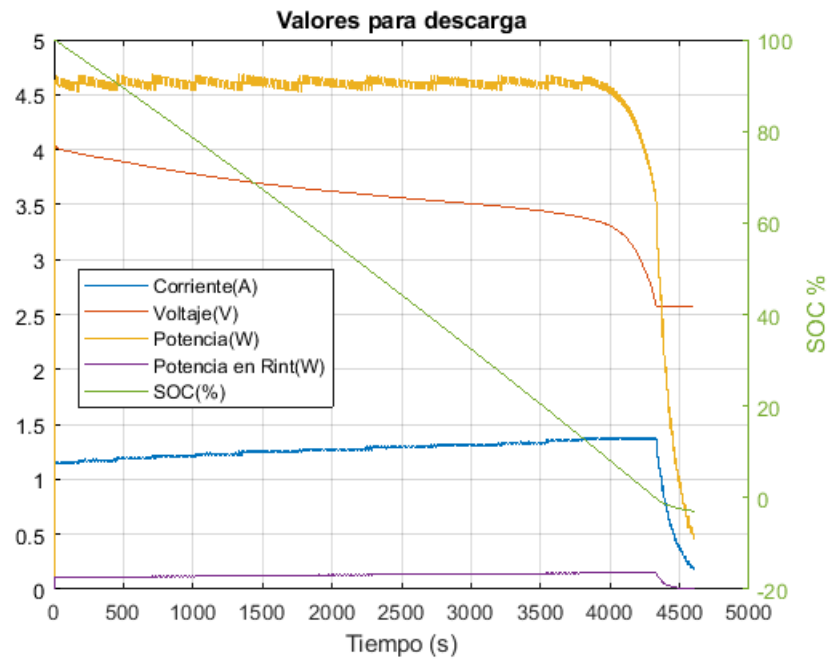


Figura 74 Comportamiento del SOC en descarga

Al iniciar con SOC al 100%, en la descarga este valor va disminuyendo conforme transcurre el ensayo.

- **Valores en carga**

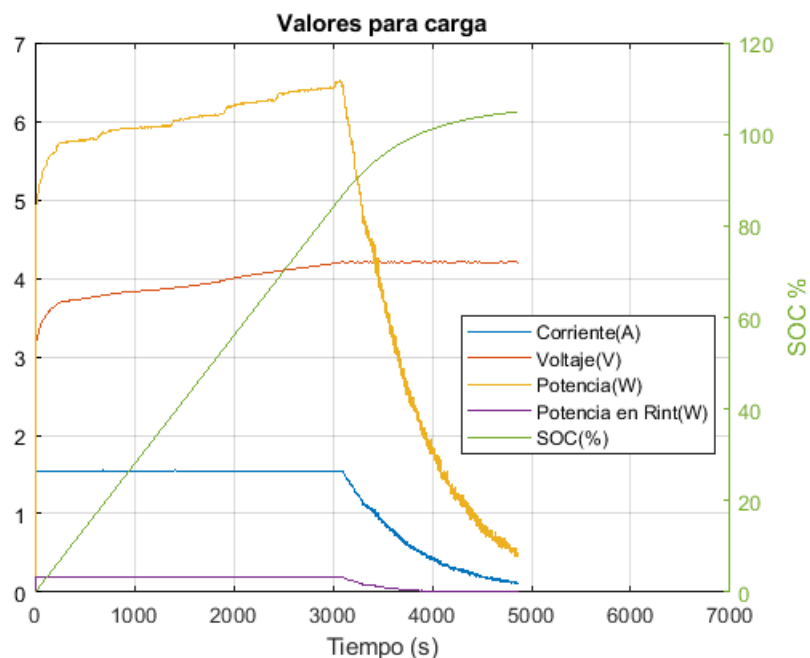


Figura 75 Comportamiento del SOC en carga

Al iniciar con SOC al 0%, en la carga este valor va incrementándose conforme transcurre el ensayo.

7.2 Sesión 2 – Práctica: Conexión de dos celdas desbalanceadas

Las celdas de ion litio se pueden interconectar en arreglos para obtener la capacidad y el voltaje deseado: conectando celdas en paralelo se puede incrementar la capacidad del pack de baterías y en serie se puede incrementar el voltaje de salida.

Elementos
<ul style="list-style-type: none">• Cargador B6AC• Celda cargada al 100%.• Celda descargada al 0%.• Computadora• Software de monitoreo y control• Soportes de batería

Para esta sesión se conectan dos celdas en serie: la primera cargada al 100% y la segunda descargada 0% como se muestra en la Figura 76. Para este montaje se emplean 2 soportes de batería conectando el terminal negativo de la primera al terminal positivo de la segunda, los otros dos terminales se conectan a la salida de potencia del cargador.

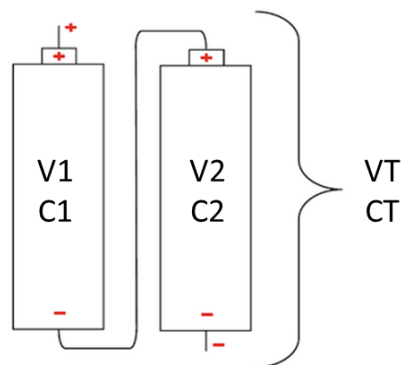


Figura 76 Conexión de celdas en serie

Este ensayo permitirá visualizar el comportamiento de un arreglo de celdas desbalanceadas para un escenario de carga y descarga.

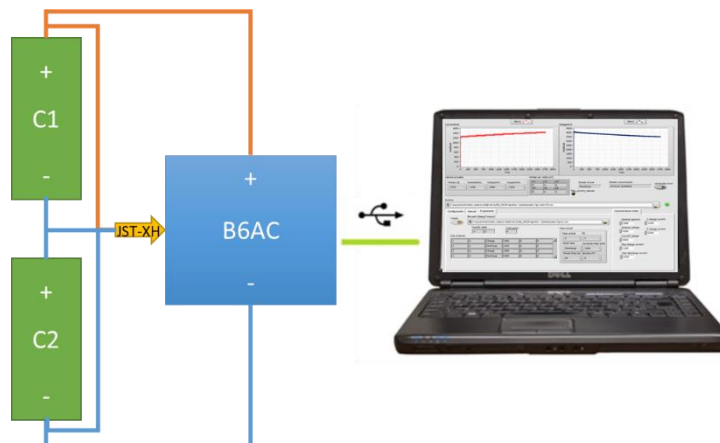


Figura 77 Montaje de laboratorio 2

Procedimiento

1. Disponer el sistema según la Figura 77.
2. Se requiere conectar al puerto de balanceo el arreglo de celdas por medio del conector JST-XH para el monitoreo de los voltajes individuales de las celdas.
3. A través el menú manual del cargador utilizar la opción **Batt Meter** para medir y registrar el valor del voltaje inicial total y de cada celda.
4. A través el menú manual del cargador utilizar la opción **Resistance Meter** para medir y registrar el valor de la resistencia interna total y de cada celda.
5. Empleando el software de monitoreo y control programar 2 ciclos de descarga y carga consecutivos a 1C.

Evaluación

1. Valores iniciales medidos para el montaje.

Valor	Celda 1	Celda 2	Total
Voltaje (V)	4.18	3.08	7.26
Resistencia interna (mhoms)	48	33	121

2. A partir de los datos registrados graficar los valores de corriente, voltaje total y voltaje de cada celda.

La gráfica total de los datos permite visualizar el comportamiento en la totalidad del ensayo, identificándose los 4 pasos realizados de carga y descarga. Figura 78

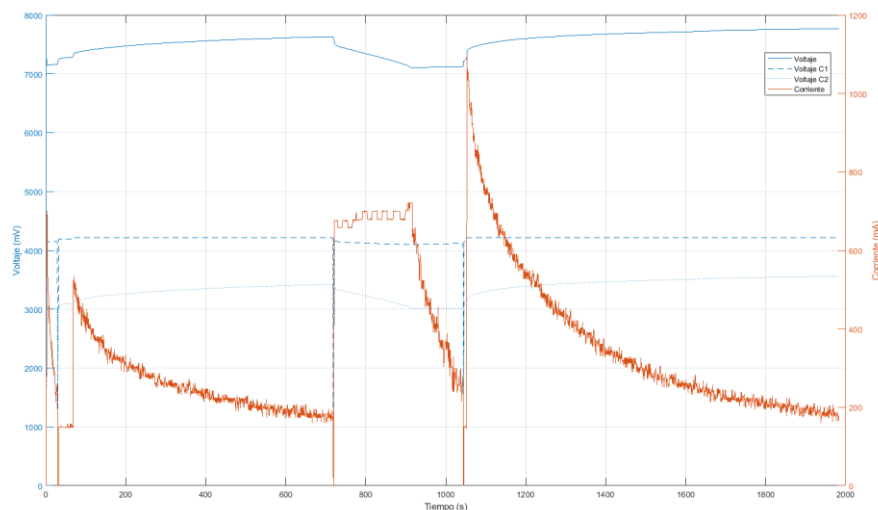


Figura 78 Curva de 2 ciclos descarga y carga para 2 celdas conectadas en serie

Se grafican los 4 ensayos realizados en el cargador. Figura 79 Se aprecia en línea azul continua el voltaje total de la batería conformada por las dos celdas, en consecuencia, el voltaje de salida es:

$$VT = V_{C1} + V_{C2}$$

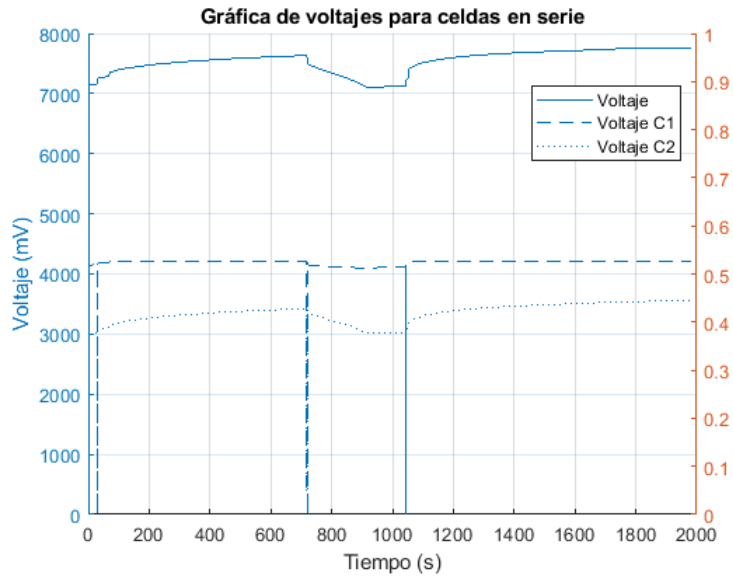


Figura 79 Grafica de voltaje total y por cada celda

3. Interpretación la curva característica.

Paso 1: Descarga

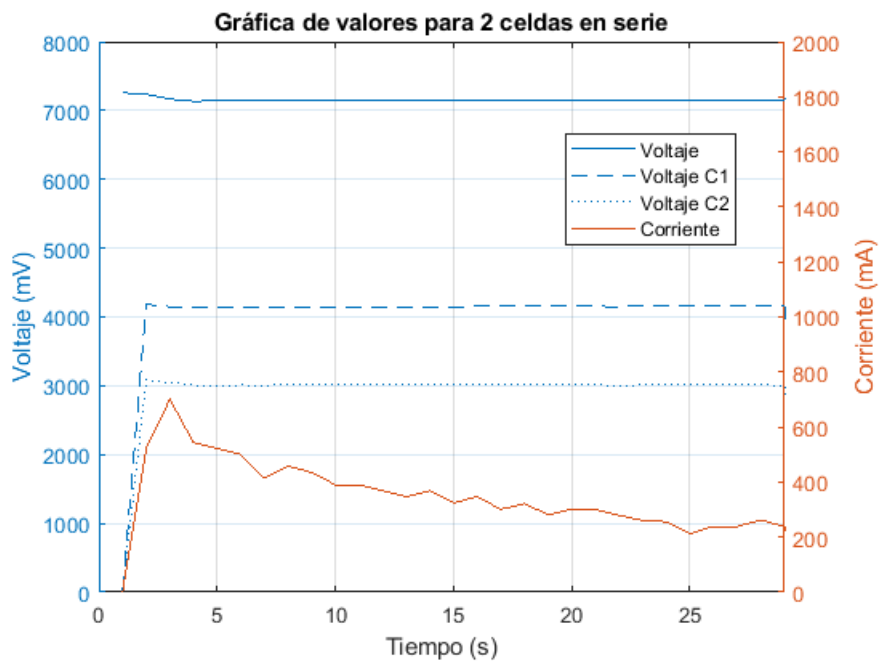


Figura 80 Paso 1: Descarga de 2 celdas desbalanceadas

En la primera etapa de descarga se observa que la corriente no llega al valor asignado en el ensayo, esto como consecuencia de la limitación que presenta desbalanceo de las celdas para el cual la celda C2 inicia con un voltaje aproximado de 3V correspondiente al voltaje de corte configurado por defecto en el cargador B6ACv2. A continuación, la corriente disminuye rápidamente haciendo que esta etapa finalice.

Cabe resaltar que el circuito de descarga del dispositivo B6AC presenta limitación de 5W lo que se traduce en una corriente máxima de 0.6A con dos celdas en serie a 4.2V.

Se calculan para esta etapa la capacidad y energía del proceso, identificándose claramente la poca capacidad energética del arreglo consecuencia del desbalanceo de las celdas.

Capacidad Descarga	Energía Descarga	Tiempo
2.587mAh	0.0185Wh	29s

3.1. Paso 2 Carga

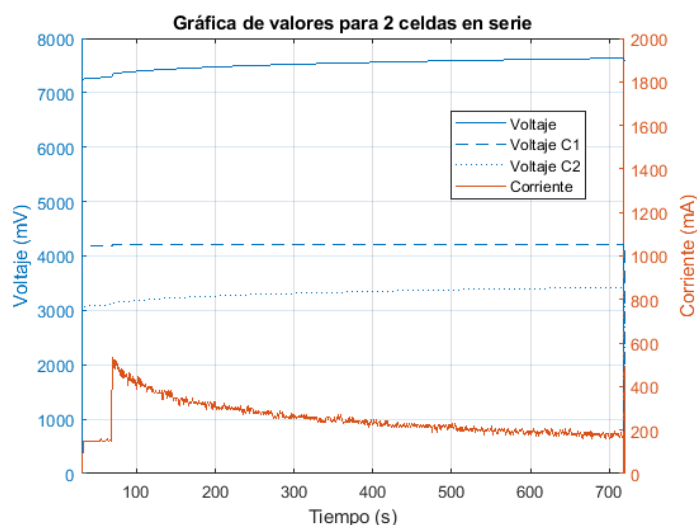


Figura 81 Paso 2: Carga de dos celdas desbalanceadas

En la etapa de carga se puede observar dos etapas en el comportamiento de la corriente: Al inicio el dispositivo aplica una corriente baja con el fin de preparar la celda de menor voltaje para una corriente mayor, una vez la celda ha alcanzado un voltaje de 3.1V se aplica una carga de aproximadamente 0.5A que empieza a disminuir conforme se transcurre el ensayo. Esta corriente se refleja directamente en el incremento de voltaje de la celda C2 y en menor proporción en la celda C1. Posteriormente la celda C2 muy cercana al voltaje máximo nominal finaliza el ensayo.

Se calculan los valores de capacidad y energía en esta etapa observándose un incremento de carga y energía en el arreglo de celdas.

Capacidad Carga	Energía Carga	Tiempo
49.329mAh	0.3705Wh	689s

3.2. Paso 3 Descarga

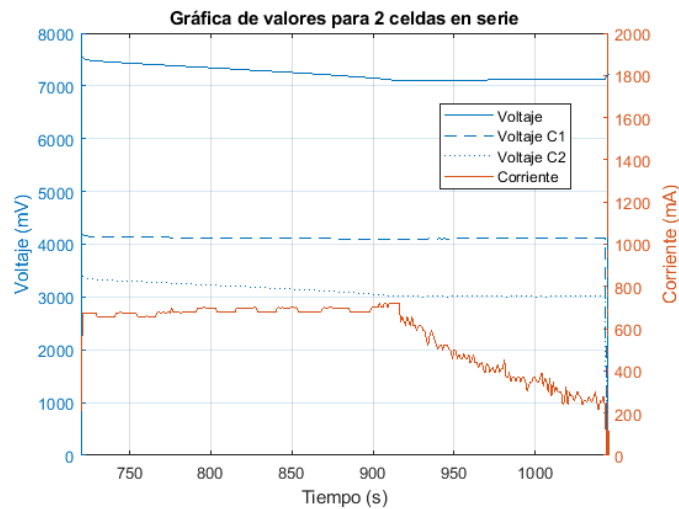


Figura 82 Paso 3: Descarga de dos celdas desbalanceadas

En el siguiente paso de descarga se evidencia la presencia de carga del paso anterior, en consecuencia, el dispositivo puede extraer una corriente constante de aproximadamente 0.7A durante 900s, reflejando la primera etapa de corriente constante a voltaje variable en el cual disminuye el voltaje de las celdas, pero más rápidamente el de la menor. A continuación, empieza la etapa de voltaje constante a corriente variable que finaliza el proceso de descarga al aproximarse la C2 al voltaje de corte.

Los valores calculados de capacidad y energía son similares al paso anterior, la diferencia de corriente en los dos ensayos genera la diferencia de tiempo.

Capacidad Descarga	Energía Descarga	Tiempo
47.6969mAh	0.3459Wh	325s

3.3. Paso 4 Carga

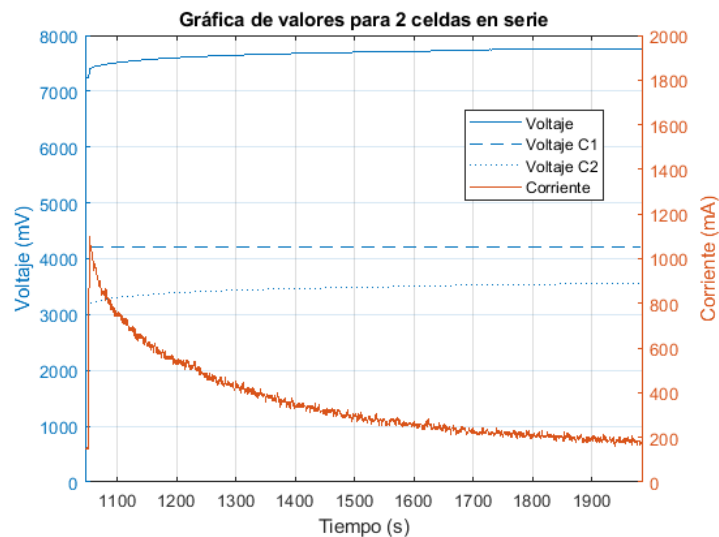


Figura 83 Paso 4: Carga de dos celdas desbalanceadas

En el paso final de carga del arreglo de las celdas se observa un incremento considerable en la energía almacenada. En este paso el cargador inicia con una corriente baja preparando la celda C2 para mayor corriente, posteriormente la corriente llega a un máximo de 1A, conforme transcurre el ensayo se observa el incremento de los valores de voltaje, en mayor medida el de la celda C2.

Finalmente se calculan los valores de capacidad y energía de este paso.

Capacidad Carga	Energía Carga	Tiempo
95.526mAh	0.7295Wh	940s

8 Conclusiones

El crecimiento de las baterías ion litio como tecnología de almacenamiento en redes eléctricas, tecnologías de vehículo eléctrico, nivel industrial y doméstico hace necesario el estudio y experimentación con estos dispositivos. En el mercado existen dispositivos comerciales especializados para estos procedimientos sin embargo presentan grandes costos.

En este proyecto se ha desarrollado un software de monitoreo y control para el dispositivo B6ACv2, cargador de bajo coste para baterías de ion litio. La interfaz desarrollada mejoro considerablemente las características originales brindando un entorno interactivo a través un software de registro, monitoreo y control, de los valores de corriente y voltaje medidos por el dispositivo electrónico, permitiendo la programación, visualización y almacenamiento de los datos.

En la primera etapa se han revisado los conceptos básicos relacionados con las características y comportamiento de las baterías de litio, resaltando los conceptos más relevantes para el aprendizaje de esta tecnología.

Se ha descrito el dispositivo electrónico B6ACv2 según los rangos de eléctricos, características, modos de funcionamiento, uso y restricciones, para determinar el alcance de la herramienta desarrollada. Cabe destacar que para experimentos de carga y descarga las corrientes y voltajes están limitadas por la potencia nominal del dispositivo.

Se han estudiado y descrito las tramas de datos que se transmiten por el puerto USB empleadas en la comunicación entre el dispositivo de gestión de baterías de ion litio y el ordenador, indicando los pasos realizados y herramientas empleadas, para futuros desarrollos.

Finalmente se ha descrito una guía de laboratorio empleando la herramienta desarrollada, para el aprendizaje del comportamiento de las baterías de litio a partir de los datos registrados en los ensayos.

9 Trabajo futuro

Debido a las limitaciones de potencia del cargador se plantea adaptar el software de monitoreo y ensayo a un sistema de gestión de baterías de mayor potencia, basándose en los procedimientos realizados en este proyecto, posibilitando realizar experimentos con mayores corrientes de carga, descarga y baterías de más capacidad.

Al sistema desarrollado se puede integrar un sistema externo de medición de corriente y voltaje por medio de un microcontrolador para incrementar la precisión de los datos recopilados, empleando un controlador VISA se puede integrar al software de monitoreo y control complementando la información del ensayo.

Desarrollar un sistema electrónico empleando electrónica de potencia en conjunto con un microcontrolador que permita crear arreglos de celdas de baterías configurables dinámicamente con el fin de tener un sistema de conexión fiable entre las baterías y el cargador. Integrando este sistema por medio de un controlador VISA al programa de monitoreo y control desarrollado permitiría realizar ensayos programados que varíen el número de celdas interconectadas.

Implementar un sistema electrónico para controlar las opciones manuales de medida de voltaje y medida de resistencia del dispositivo B6AC transfiriendo los valores obtenidos al software desarrollado complementando la información sobre el estado de las baterías a lo largo de los ensayos.

Desarrollar en el software implementado la opción de funcionamiento con baterías basadas en níquel y plomo soportadas por el dispositivo B6AC para el estudio con estas tecnologías de almacenamiento de energía.

10 Referencias

- [1] J.-K. Park, *Principles and Applications of Lithium Secondary Batteries*, Edición: 1. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2012.
- [2] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White, y R. T. Long, *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Boston, MA: Springer US, 2011.
- [3] R. J. Brodd, Ed., *Batteries for sustainability: selected entries from the Encyclopedia of sustainability science and technology*. New York: Springer, 2013.
- [4] D. Andrea, *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, 2010.
- [5] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. Newnes, 2013.
- [6] I. Buchmann, *Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers*, 3. ed. Richmond, British Columbia: Cadex Electronics, 2011.
- [7] M. H. Rashid, Ed., *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook*, 3rd ed. Burlington, MA: Elsevier, 2011.
- [8] *Springer handbook of electrochemical energy*, 1st edition. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [9] SKYRC TECHNOLOGY, «Instruction Manual B6AC V2 -SkyRC». SKYRC, 2018.
- [10] M. G. Miguel y J. M. D. Moyano, *Instrumentación electrónica de comunicaciones*. 1996.
- [11] J. M. Jurado, R. Muñoz-Valencia, A. Alcázar, S. G. Ceballos-Magaña, y J. González, «Ajustando datos químicos con Excel: un tutorial práctico», *Educ. Quím.*, vol. 27, n.º 1, pp. 21-29, ene. 2016.
- [12] «WT3000 Precision Power Analyzer - User's manual». Yokogawa Electric Corporation, 2007.
- [13] Samsung, «Specification of product for lithium-ion rechargerable cell Model: ICR18650-22F». Samsung energy business division, 2009.
- [14] J. Corbet, A. Rubini, y G. Kroah-Hartman, *Linux Device Drivers: Where the Kernel Meets the Hardware*. O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [15] Jan Axelson, *USB Complete: The Developer's Guide; Fifth Edition*. Lakeview Research, 2015.
- [16] R. Bitter, T. Mohiuddin, y M. Nawrocki, *LabView advanced programming techniques*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2007.

[17] «Using the NI-VISA Driver Wizard and NI-VISA to Develop a PXI(e)/PCI(e) Driver in Windows - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/tutorial/4713/en/>. [Accedido: 16-feb-2019].

[18] T. Bress, *Effective LabVIEW Programming*. NTS Press, 2013.

ANEXOS
[En medio digital]

- ANEXO A. Manual de usuario del dispositivo B6ACv2 del fabricante.
- ANEXO B. Software de monitoreo y control en Labview.
- ANEXO C. Controlador VISA para el dispositivo B6ACv2 para Windows.
- ANEXO D. Software de visualización de muestras en MATLAB