



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“ESTIMACION DE LOS ESTADOS DE CARGA Y SALUD  
DE UNA BATERIA DE ION-LITIO”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:  
**ALINA ARACELI CONTRERAS SILLERO**

DIRECTOR DE TESIS:  
**M.C. CLAUDIA HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**

CO-DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. NIMROD VAZQUEZ NAVA**

**CELAYA, GTO., JUNIO, 2018**

“La diferencia entre una persona exitosa y los demás no es la falta de fuerza ni de conocimiento, sino la falta de voluntad”

**Vince Lombardi**

# Contenido

I.-Agradecimientos .....	4
II.-Introducción .....	5
III.-Abstract .....	7
IV.-Glosario .....	9
Capítulo 1.- Estado del Arte .....	11
1.1.-Conceptos básicos.....	11
Capítulo 2.- Métodos de Estimación .....	16
2.1.- Métodos para el cálculo del SOC .....	16
2.1.1.-Método de 2 pulsos [3].....	17
2.1.2.-Conteo de Coulomb .....	20
2.1.3.-Técnica de voltaje en circuito abierto.....	23
2.1.4.-Impedancia espectroscópica .....	24
2.1.5.-Filtro de Kalman [24] .....	26
2.2.- Métodos para el cálculo del SOH .....	28
2.2.1.-Técnicas de estimación de la capacidad .....	31
2.2.2.-Técnica por resistencia interna.....	34
2.2.3.-Prueba de descarga completa .....	36
Capítulo 3.-Métodos y materiales.....	38
3.1.-Método usado.....	38
3.1.1.-Método de carga .....	41
3.1.2.-Método de descarga .....	44
3.1.3.-Método para el SOH.....	44
3.2.-Materiales Usados .....	45
3.2.1.-Baterías .....	45
3.2.2.-Elementos de conmutación .....	45
3.2.3.-Sensor de corriente.....	46
3.2.4.-Tarjeta de adquisición de datos .....	47
3.2.5.-Etapas de acondicionamiento.....	48
3.2.6.-Cargador comercial .....	49
Capítulo 4.-Implementación.....	50
4.1.-Construcción placa estándar.....	50
4.2.-Construcción placa de prueba de carga.....	51

Capítulo 5.-Interfaz y programa .....	52
5.1.-Monitoreo de entradas/ salidas.....	54
5.2.- Acondicionamiento de sensor de corriente.....	54
5.3.-Máquina de estados & seguridad .....	55
5.4.-Exportación de datos Labview-Excel.....	58
5.5.-Interfaz del sistema y funcionamiento .....	59
Capítulo 6.-Pruebas Experimentales .....	61
6.1.-Caso I Carga con fuente controlada & Descargas .....	63
6.1.1.-Carga 1 C .....	63
6.1.2.-Descarga 0.2 C.....	64
6.1.3.-Carga 1 C .....	68
6.1.4.-Descarga 0.4C .....	69
6.1.5.-Carga 1 C .....	73
6.1.6.-Descarga 0.6 C.....	74
6.1.7.-Carga 1 C .....	78
6.1.8.-Descarga 0.8 C.....	79
6.1.9.-Carga 1 C .....	83
6.1.10.-Descarga 1C .....	84
6.2.-Caso II Carga con Cargador Comercial & Descargas .....	88
Descarga 0.8C.....	89
Capítulo 7.-Regresión Lineal.....	93
7.1.- Regresión Lineal Carga 1C.....	94
7.2.- Regresión Lineal Descarga 0.8 C .....	96
Capítulo 8.- Conclusiones y discusión .....	98
Capítulo 9.- Bibliografía .....	99

## I.-Agradecimientos

- **A Dios** por estar conmigo en cada momento y permitirme llegar a este punto de mi vida.
- **A mis padres** por su apoyo incondicional.
- **Al Ing. Omar Campos Mendoza** por su apoyo y todas sus enseñanzas a lo largo de estos años.
- **A mis directores de tesis el Dr. Nimrod Vázquez Nava y M. C. Claudia V. Hernández Gutiérrez** por todo el apoyo a lo largo de mi formación.
- **A mis compañeros de grupo**, que de una u otra forma ayudaron en mi formación profesional, en especial a Julio Cesar Peña Aguirre, Pablo Israel Guzmán Tafoya, Hamza SD, Jaime Adame y Luis Cruz.
- Finalmente, a **CONACYT**, por el apoyo económico que me permitió concluir mis estudios.

## II.-Introducción

Actualmente las tecnologías se han inclinado por el uso de energía verde proveniente de recursos naturales, sin embargo, el mayor inconveniente de estas es que no es posible controlar la cantidad y/o su duración, por lo que deben ser usados dispositivos de almacenamiento tales como las baterías [1].

La batería es un dispositivo que se encarga de almacenar el excedente instantáneo de energía proveniente de fuentes intermitentes y proveerla cuando éstas son incapaces de satisfacer la demanda.

Dichos dispositivos han cobrado importancia en varias aplicaciones, tales como sistemas híbridos para la generación de energía, pues estos necesitan dispositivos de respaldo dónde almacenar la energía. Recientemente en la industria automotriz los acumuladores cumplen con la función de reducir la emisión de dióxido de carbono producido por el combustible, pues el objetivo a futuro es construir automóviles que usen energía de una batería en lugar de combustible tal como la gasolina o el Diesel [2].

Una batería envejece en proporción a los ciclos de carga y descarga; dichos procesos degradan las sustancias químicas que componen al dispositivo de almacenamiento; una baja carga tiene como consecuencia efectos de sulfatación y estratificación que acortan la duración de la batería, mientras que la sobrecarga provoca gases y pérdidas de agua [3].

Debido a que la energía almacenada en una batería es limitada se vuelve importante contar con la habilidad de determinar la capacidad disponible, el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) y el estado de salud (SOH, por sus siglas en inglés) de dicho dispositivo; esto asegura que la batería tenga la energía disponible para ser utilizada.

Este trabajo consiste en el diseño e implementación de un sistema de administración para una batería de Ion Litio (Por sus siglas en inglés BMS) el cual nos permite monitorear el SOC y SOH de la misma.

El método que fue utilizado para llevar a cabo el cálculo del estado de carga y estado de salud fue por el “Conteo de Coloumb” debido a su eficiencia y practicidad, así mismo este nos permitió la caracterización de la batería y así la obtención de su función de transferencia.

La organización de este trabajo es de la siguiente manera:

- **Capítulo I: Estado del arte**, aquí se hace un glosario explicado los conceptos básicos, que son planteados en los demás capítulos.
- **Capítulo II: Métodos de estimación**, se dan a conocer los métodos actuales para la obtención del SOC y SOH respectivamente, así como sus ventajas y desventajas.
- **Capítulo III: Métodos y materiales**, se hace mención del método y los materiales usados para el cálculo del SOC y del SOH en este trabajo.
- **Capítulo IV: Implementación**, se detalla la construcción de los prototipos, así como los detalles de la tarjeta.
- **Capítulo V: Pruebas experimentales**, muestra el comportamiento del sistema a los diferentes estímulos de cargas y condiciones, así mismo se hace la comparativa de la carga entregada por cargador comercial contra la curva de carga sugerida por el fabricante.
- **Capítulo VI: Regresión lineal**, se realiza la regresión lineal para uno de los casos de carga y descarga obteniendo la ecuación para cada uno de ellos respectivamente y finalmente hacer la comprobación de la misma.
- **Capítulo VII: Conclusiones y discusión**, en esta parte se realiza una comparativa de los resultados experimentales con los de referencia en [8], posteriormente se evalúa que tan efectiva es la carga de un cargador comercial, se comprueba la efectividad de la regresión lineal y finalmente se mencionan las áreas de oportunidad que este trabajo tiene a futuro.

### III.-Abstract

Currently, technologies have been inclined to use green energy from natural resources. Research has overseen extracting and incorporating these energies into the electrical grid, however, the biggest drawback of techniques it is that is not possible to control quantity and/or duration, consequently, storage devices such as batteries must be used.

Batteries currently play a significant role in the use of electric power. Such devices have applications on a small and large scale; for low power applications (low scale), batteries are used in portable electronic devices such as cell phones, computers, fans, etc.; on the other hand, for high power applications (large scale), these sources are used as energy reserve for automotive applications, energy injection to the grid, among others.

The battery is the most used device to store energy by its practicality and efficiency that it grants to the user. A battery ages in proportion to the charging and discharging cycles; Such processes degrade the chemicals that make up the storage device; a low charge results in stratification and sulphation effects that shorten battery life, while overcharging causes gas and water loss.

Because power is stored in a limited battery, it is important to have the ability to determine the available capacity, the state of charge (SOC), and health state of health (SOH) of said device; this ensures that the battery has the power available to be used.

This work consists of the design and implementation of a battery management system (BMS) for a Lithium-Ion battery which allows us to know the SOC and SOH of it. The method that was used to carry out the calculation was by the "Coulomb count" due to its efficiency and practicality, likewise, this allowed us to characterize the battery and thus obtain its transfer function.

Additionally, a comparison was made of the charging methods indicated in [8] but also using a commercial charger.

The organization of this work is as follows:

- **Chapter I:** State of the art, here is mentioned what has been done previously in relation to the SOC study and SOH.
- **Chapter II:** Estimation methods, current methods for obtaining SOC and SOH respectively, as well as their advantages and disadvantages are disclosed.
- **Chapter III:** Methods and materials, mention is made of the method and materials used to calculate SOC and SOH in this work.
- **Chapter IV:** Implementation, detailing the construction of the prototypes, as well as the details of the card.
- **Chapter V:** Experimental Tests, shows the behavior of the system to the different stimuli of loads and conditions, likewise it makes the comparison of the load delivered by commercial loader vs the load curve suggested by the manufacturer.
- **Chapter VI:** Linear Regression, the linear regression is performed for one of the loading and unloading cases, obtaining the equation for each of them respectively and finally making the verification of it.
- **Chapter VII:** Conclusions and discussion, in this part a comparison of the experimental results with the reference results is made in [8], later it is evaluated how effective is the loading of a commercial loader, the effectiveness of the linear regression is checked and finally the areas of opportunity that this work has in the future are mentioned

## IV.-Glosario

- **Voltaje Nominal:** El voltaje que se utiliza como el voltaje de la batería que figura en la batería [8].
- **Características de ciclo de vida:** Atributo que indica el tiempo que toma por carga y el ciclo de descarga cuando la batería se carga y descarga repetidamente según los parámetros especificados [8].
- **Relación de tiempo (CR por sus siglas en inglés Current Rate):** Esta medida se utiliza para indicar la magnitud de la corriente eléctrica durante la carga o descarga, se indica en múltiplos de la capacidad de la batería, y el valor se expresa en unidades de corriente eléctrica [8].
- **Auto descarga:** El proceso por el cual se reduce la capacidad de la batería sin que haya descarga de corriente y/o un circuito externo [8].
- **Voltaje de corte:** Voltaje que indica el límite en el cual se debe detener la descarga eléctrica. este voltaje de forma aproximada corresponde al límite para su uso en aplicaciones prácticas [8].
- **Cantidad de Carga:** Es la cantidad de unidades de carga eléctrica que se usó para cargar la batería. Cuando existe la corriente especificada durante la carga, es la integral del valor actual durante el tiempo de carga. Las unidades son amperios horas (AHC) [8].
- **Capacidad Estándar:** Valor de estándar para la cantidad de carga eléctrica que se puede usar desde una batería completamente cargada a la temperatura estándar, con una corriente de carga /descarga hasta la tensión final. Las unidades son amperios hora (AHC) [8].

- **Estado de carga completo practico ( $FULL_p$  ,Por sus siglas en inglés):** Es el estado de carga, que se puede alcanzar en un sistema bajo condiciones normales de operación en sistemas de energía renovable (dependiendo de la tensión de carga, la corriente de carga máxima y el historial de la batería) [9].

- **Capacidad práctica ( $C_p$  por sus siglas en inglés):** La capacidad práctica es la capacidad entre el estado práctico de carga completo y el umbral de fin de descarga definido en el sistema [9].

- **Balance de carga ( $Q_B$  por sus siglas en inglés):** La carga neta descargada de una batería desde el último estado de carga completo. Dada por:

$$Q_B = \int_{t_0}^t I_{MR} dt \quad (1)$$

Donde  $I_{MR}$  es la corriente de carga y/o descarga según la operación que se efectuó.

- **Capacidad medida ( $C_M$  por sus siglas en inglés):** Es la capacidad entregada después de una prueba de descarga con un  $C_R$  de  $I_{10}$  a partir del estado de carga completo.

- **Capacidad nominal ( $C_N$  por sus siglas en inglés):** La capacidad nominal es el valor de la capacidad dada por el fabricante en condiciones de funcionamiento nominales (definidas por temperatura, corriente y voltaje de fin de descarga) [9].

- **Profundidad de descarga ( $DOD$  por sus siglas en inglés):** Es la relación entre el balance de carga y la capacidad nominal. El DOD es la suma de la carga drenada durante el proceso de descarga, y la resta de la carga acumulada en la batería durante la carga [4].

# Capítulo 1.- Estado del Arte

## 1.1.-Conceptos básicos

La protección al ambiente y la sustentabilidad energética juegan un papel importante actualmente., de ahí la necesidad de reemplazar la dependencia energética proveniente del petróleo [7].

La batería, ha jugado un papel importante como medio de almacenamiento para las energías alternativas, ejemplo de ello está en el uso de las baterías en el área automotriz pues estas ofrecen una operación confiable, eficiente y segura, sin embargo, se requiere de un monitoreo, control y administración.

La importancia el estado de las baterías radica en evitar condiciones de operación peligrosas y minimizar las valoraciones de errores en la realización de las lógicas de control [2].

Los sistemas de administración de baterías (BMS por sus siglas en inglés) han sido diseñados para proporcionar funciones de monitoreo, diagnóstico y control con el fin de mejorar el desempeño de la batería. Una función crítica de un BMS es estimar con precisión el estado de carga de la batería (SOC) y el estado de salud (SOH) en tiempo real [6][7].

Por otro lado, la estimación precisa del SOC y SOH de una batería es un factor clave para gestionarla de manera eficiente y llevar a cabo la estrategia de distribución de potencia en sus diversas aplicaciones, así como proporcionar eficientemente la gestión energética en los sistemas que son usados [7].

Mientras que el SOC es una medida para indicar la carga que una batería puede liberar en un ciclo, el SOH indica la capacidad disponible de la batería en relación con el primer ciclo de utilización. De acuerdo con esto, el SOH relativo a un SOC específico da información sobre el contenido de energía real de una batería. [2]

La caracterización de una batería se considera completa cuando se pueden medir sus tres parámetros principales [5]:

- **Capacidad Ampere-Hora (AHC, por sus siglas en inglés):** Es la carga total que se le puede demandar a una batería completamente cargada bajo condiciones de carga definidas [3].
- **Estado de carga (Por sus siglas en inglés SOC):**

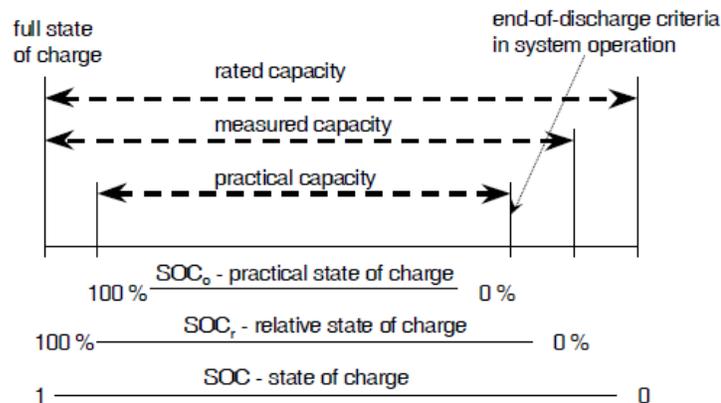


Fig. 1 Comparación de diferentes definiciones de la capacidad de la batería y de las correspondientes definiciones del estado de carga.

En la Fig. 1 se muestran diferentes definiciones de la capacidad de la batería, así como del estado de carga [9]. Las diferencias se deben al estado completo de carga, la carga medida y práctica, resultando diferentes conceptos para cada una de ellas:

La capacidad medida de una batería puede ser menor o incluso superior a la capacidad nominal dada por el fabricante, durante el periodo de vida la capacidad medida va disminuyendo debido al envejecimiento del acumulador [9].

Por otro lado, la capacidad práctica, es la que se mide cuando las baterías que son dependientes de fuentes de energía renovables, pues casi nunca son completamente recargadas (el número de horas de carga es limitado) sin contar que cada sistema define un final de carga con criterios diferentes, lo que hace que la

capacidad práctica sea la más pequeña con respecto a la medida y a la establecida por el fabricante [9].

El concepto general que establece la literatura para el estado de carga es la cantidad de carga aún disponible en relación con la capacidad (AHC) de la batería. Sin embargo, la capacidad de la batería no es constante, diferentes parámetros como temperatura, corriente de descarga, voltaje de corte y estado de salud de la batería influyen en ella.

Por lo que el estado de carga se puede definir en diferentes formas, de acuerdo a la Fig. 1:

- *Estado de Carga Práctico ( $SOC_p$ , por sus siglas en inglés)*: Es la diferencia de la capacidad practica y el equilibrio de carga, en relación con la capacidad práctica. El estado de carga práctico es “1” cuando el estado de carga práctico se alcanza y “0” después de una descarga neta de la capacidad práctica. Está definido por [9]:

$$SOC_p = \frac{C_p - Q_B}{C_p} \quad (2)$$

- *Estado de Carga Relativo ( $SOC_r$ , por sus siglas en inglés)*: Es la diferencia de la medida capacidad y el equilibrio de carga, en relación con la capacidad medida. El estado de carga relativo es 1 cuando el estado de carga total se alcanza y 0 después de una descarga neta de la capacidad medida [9].

$$SOC_r = \frac{C_m - Q_B}{C_m} \quad (3)$$

- *Estado de Carga ( $SOC$  por sus siglas en inglés)*: Es la diferencia de la capacidad nominal y el equilibrio de carga en relación con la capacidad nominal. El estado de carga es 1 cuando se alcanza el estado de carga completa y 0 después de una descarga de la capacidad nominal [9].

$$SOC = 1 - DOD = \frac{C_N - Q_B}{C_N} \quad (4)$$

Sin embargo, la capacidad del acumulador no es del todo constante; algunos parámetros como temperatura, corriente de descarga, voltaje de corte y el estado de salud de la batería influyen en la capacidad de esta [9].

- **Estado de salud** (SOH, por sus siglas en inglés): Se puede definir en términos de degradación de la capacidad, es decir, la relación de la capacidad actual y la capacidad de la batería cuando era nueva [1].

$$SOH = \frac{Q_{MÁXIMA}}{Q_{NOMINAL}} \times 100.. \quad (5)$$

Donde:

$Q_{MÁXIMA}$ : Es la capacidad máxima actual en el acumulador y sus unidades están en Amper- Hora (Ah, por sus siglas en inglés).

$Q_{NOMINAL}$ : Es la capacidad nominal de la batería establecida por el fabricante y sus unidades está en Amper- Hora.

Sin embargo, el SOH también puede ser definido en términos del aumento de la resistencia interna de la batería, es decir, la relación de la resistencia interna actual a la resistencia interna de la batería cuando era nueva [1].

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R_{CURRENT}}{R_{EOL} - R_{NOMINAL}} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

$R_{EOL}$ : Es la resistencia interna de la batería cuando ha alcanzado su fin de vida.

$R_{CURRENT}$ : Es la resistencia interna actual de la batería.

$R_{NOMINAL}$ : Es la resistencia nominal de la batería establecida por el fabricante.

Otra manera en la que el estado de salud de una batería puede ser clasificado es: [12]

- **Estado de salud absoluto** (por sus siglas en inglés ASOH): Se define como la capacidad de energía especificada cuando la batería es nueva.

- Estado relativo de salud (por sus siglas en inglés RSOH), capacidad de almacenamiento disponible cuando la batería está en uso.

Actualmente las técnicas para el cálculo de SOH sólo toman en cuenta la capacidad y resistencia interna del acumulador. Sin embargo, aunque estos indicadores son importantes en su contribución, no representan confiablemente la salud de la batería debido a que los efectos de sus comportamientos son considerados individualmente [1].

El concepto de SOH no puede definirse igual para todas las baterías, necesita ser modificado en base a química de la batería. Incluso para la misma química, el tipo de electrodos utilizados hace una diferencia en el rendimiento de la batería [1]. Los electrodos y electrolitos determinan rendimiento y comportamiento de la batería. La temperatura de la operación también juega un papel en el rendimiento de la batería, por lo que puede tomarse en consideración. Actualmente, la capacidad y la resistencia interna de la batería son los principales índices que se utilizan para representar el SOH de la batería. Sin embargo, hay otros índices como la porosidad de los electrodos, números de ciclos, y la tensión de las terminales que también se puede usar para representar el SOH de la batería además de la capacidad y la resistencia interna. Por lo que el efecto de todos estos factores en el SOH de la batería debe examinarse. [1].

La determinación del estado de carga de una batería no es suficiente para predecir el perfil general de la misma, debido a su envejecimiento y deterioro con el paso del tiempo. La determinación del SOC no reconoce el cambio en la máxima capacidad útil de una batería; por lo tanto, se produce un error en la predicción de la potencia suministrada, éste se propaga conduciendo a errores mayores a medida que disminuye el estado de salud; por tanto, la determinación de SOH de una batería es esencial en un sistema pues ayuda de una manera más eficaz a determinar las capacidades de energía de la batería. Adicionalmente el SOH permite establecer el régimen de carga adecuado y ayuda en la determinación de la capacidad de descarga o del perfil de potencia que queda en la batería.

## Capítulo 2.- Métodos de Estimación

Actualmente se han propuesto diferentes maneras para la determinación del estado de carga y el estado de salud de una batería. A continuación, se describen las principales técnicas para la estimación de dichos parámetros, así como algunas de sus aplicaciones.

### 2.1.- Métodos para el cálculo del SOC

La determinación del SOC ha cobrado importancia en las aplicaciones con baterías. Actualmente, el funcionamiento de estas es administrado por un BMS donde el SOC es un factor clave, para determinar el desempeño, salud y vida de la batería [11].

El voltaje de la terminal y la resistencia interna de la batería son dos parámetros que pueden obtenerse fácilmente y por lo tanto son convenientes para la estimación de SOC. Sin embargo, estos dos parámetros no sólo cambian irregularmente con la profundidad de descarga (DOD, por sus siglas en inglés), la velocidad de carga / descarga y la temperatura ambiente, también dependen en gran medida del estado de salud (SOH) de la batería. La compleja interrelación de estos factores causa las dificultades en la búsqueda de un método de estimación SOC preciso [5].

Mostrar la capacidad restante de la batería es importante para su gestión, pues muchos sistemas son sensibles a la descarga profunda o a la sobrecarga debido a que estos pueden provocar daños irreversibles en la batería y por consecuencia al sistema. [11]

La determinación del SOC de una batería puede ser un problema de mayor o menor complejidad según el tipo de batería y la aplicación en la que se utiliza la batería. [11]

En este trabajo se hará referencia al SOC como: la relación entre la diferencia de la capacidad nominal y la cantidad neta de carga descargada desde una batería desde el último SOC completo, por una parte, y la capacidad nominal por la otra. A continuación, se enlistan algunos de los métodos más importantes para la determinación del SOC.

### 2.1.1.-Método de 2 pulsos [3]

Los parámetros tales como AHC, SOC y SOH de una batería están relacionados con la caída de tensión después de cada pulso de descarga de corriente. El primer pulso restablece a la batería de su historia anterior y el segundo establece parámetros que tienen una relación directa con el estado de carga y salud de ésta.

El método consta de tres pasos (Fig. 2).

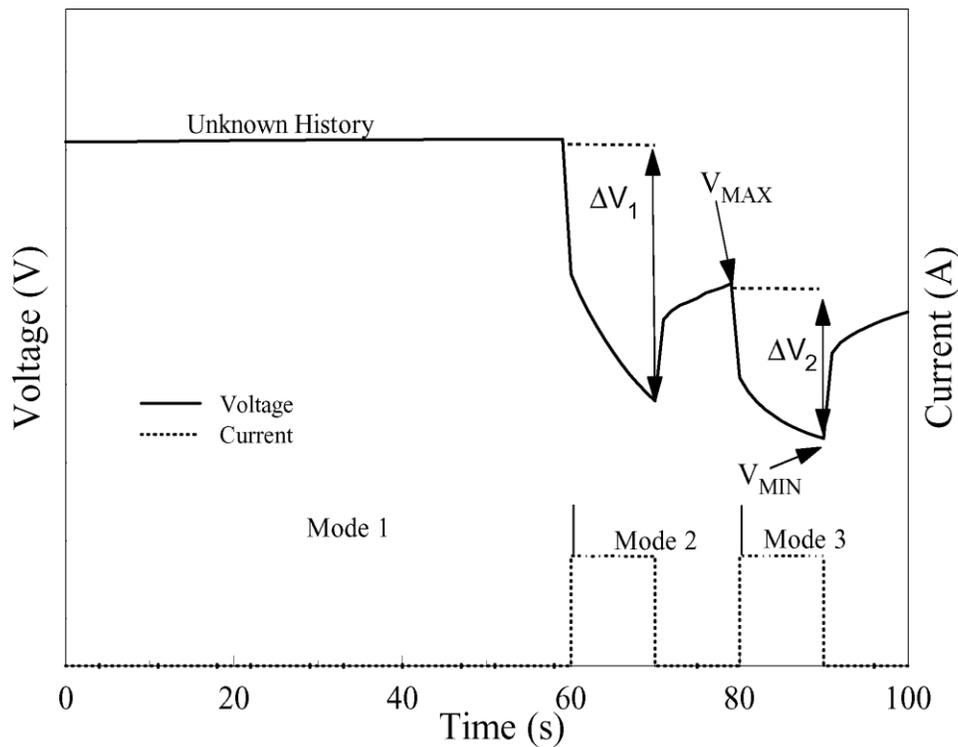


Fig. 2 Método de dos pulsos

1. Se comienza con una batería de historia desconocida, la cual debe estar en circuito abierto, la duración mínima de éste dependerá del perfil de carga de la batería y de los pulsos de corriente.
2. Un pulso conocido de corriente de carga se aplica a la batería durante 10s, aunque puede ser de 3s, pero los estudios demuestran que uno de 10s da resultados consistentes. La tensión  $\Delta V_1$  en el transcurso del primer pulso decae, después de que el pulso es eliminado el voltaje se recupera durante otros 10s a  $V_{Max}$ .

3. Un segundo pulso idéntico al primero se aplica,  $\Delta V_2$  decae de la misma manera que  $\Delta V_1$  recuperándose y dando como resultado  $V_{MIN}$

Una vez obtenidos los valores de  $I, V_{Max}$ , y  $\Delta V_2$  estos pueden ser interpretados para la obtención del estado de la batería, como se muestra a continuación:

- *Paso 1.*- El voltaje de equilibrio  $V_{EMF}$  es deducido de  $V_{MAX}$  y la hoja de datos del fabricante.
- *Paso 2.*- El SOC de la batería es deducido de  $V_{EMF}$  y de la hoja de datos del fabricante.
- *Paso 3.*- El  $C_R$  es deducido de  $\Delta V_2$
- *Paso 4.*- El AHC se obtiene del paso 1.
- *Paso 5.*- El SOH está dado por el paso 3

$V_{EMF}$  Es la fuerza electromotriz de la batería, y es el voltaje de circuito abierto después de que la batería ha estado en equilibrio por 24 hrs. El fabricante suministra la tensión de equilibrio como una función del SOC [3]:

$$V_{EMF} = \sigma SOC + EMF_{MIN} \quad (7)$$

Donde:  $\sigma$  es la pendiente entre el % SOC y el voltaje en la batería

$EMF_{MIN}$  está dado por la hoja del fabricante.

Como esta mostrado en la Fig. 2 para este método se puede escribir que:

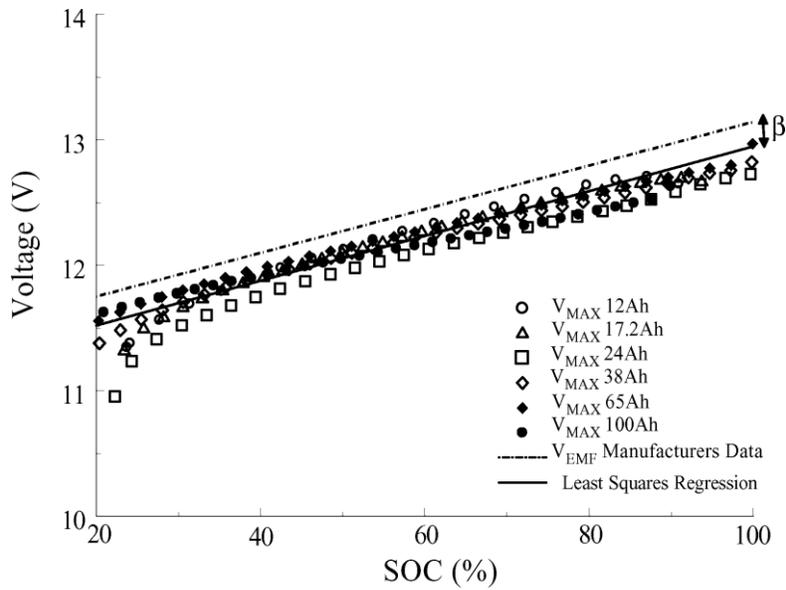


Fig. 2 Grafica de experimentación para la obtención de beta.

$$V_{EMF} = V_{MAX} + \beta \dots \quad (8)$$

Donde  $\beta$  es el "offset" que el voltaje de equilibrio.

Sabiendo  $V_{MAX}$  y  $\beta$  podemos encontrar el SOC:

$$SOC = \frac{V_{MAX} + \beta - EMF_{Min}}{\sigma} \quad (9)$$

$\beta$  y  $\sigma$  dependen del tipo de batería, pero de manera general la relación se mantiene.

Al final del modo 2 existe una relación entre  $\Delta V_2$  y  $C_R$ :

$$C_R = \partial \Delta v_2 + \gamma \quad (10)$$

Donde los valores de  $\partial$  y  $\gamma$  se obtienen a través de una regresión lineal de las mediciones de los parámetros  $\Delta V_2$  y  $C_R$ . Los coeficientes  $\partial$  y  $\gamma$  son consistentes para las baterías VRLA, pero depende del tipo de batería donde se mantiene la relación general.

Finalmente, la capacidad restante de la batería bajo prueba está dada por:

$$AHC = \frac{I}{C_R} \quad (11)$$

$$SOH = \frac{AHC_{Aged}}{AHC_{Nom}} \quad (12)$$

Un aspecto importante de la técnica de 2 pulsos es que se puede realizar en menos de 5 minutos una vez que el batería haya sido caracterizada. Hay que tener en cuenta que para esto se requieren de pruebas preliminares donde es posible utilizar otras técnicas tales como el conteo de Coloumb, descarga completa, etc. con el fin de obtener los coeficientes  $\beta$  y  $\sigma$  por lo que se requiere más tiempo para dicho proceso.

### 2.1.2.-Conteo de Coulomb

El voltaje y la resistencia interna de una batería son dos parámetros que se pueden obtener fácilmente y por lo tanto son convenientes para la estimación de SOC. Sin embargo, estos no sólo cambian irregularmente con la profundidad de descarga, la velocidad (carga / descarga) y la temperatura ambiente, sino que también dependen en gran medida del estado de salud (SOH) de las baterías, las pérdidas reducen la energía total entregada, y lo que está disponible al final es siempre menos de lo que se había puesto, sin embargo a pesar de esto, el conteo de Coulomb funciona bien, especialmente con baterías de Li-ion quienes ofrecen una alta eficiencia colómbica y baja auto descarga [12].

Se han realizado mejoras teniendo en cuenta el envejecimiento y la auto descarga basada en la temperatura, pero aún se recomienda la calibración periódica para que la "batería digital" esté en armonía con la "batería química" [12].

Los fabricantes de BMS avanzados afirman una alta precisión, pero la vida real a menudo muestra lo contrario. Gran parte de la fantasía está oculta detrás de una lectura elegante. Los teléfonos inteligentes pueden mostrar una carga del 100 por ciento cuando la batería tiene solo un 90 por ciento de carga. Los ingenieros de diseño afirman que las lecturas de SOC en las nuevas baterías de EV pueden disminuir en un 15 por ciento. Hay casos reportados donde los controladores EV se agotaron con una lectura de SOC del 25 por ciento todavía en el medidor de combustible [12].

El conteo de Coulomb funciona calculando la corriente de carga y descarga, e integrándola para obtener el SOC. El valor SOC inicial es la variable principal en este método. La estimación de SOC se puede describir en la siguiente ecuación [13].

$$SOC_{(t)} = SOC_{(t_0)} - \frac{1}{AHC} \int_{t_0}^t i_{(t)} dt.. (13)$$

Donde:

$SOC_{(t)}$ : Es el estado de carga actual

$SOC_{(t_0)}$ : Es el estado de carga inicial en la batería; generalmente este método utiliza técnicas de apoyo para estimar este parámetro.

$AHC$ : Este parámetro puede ser la capacidad nominal o bien la capacidad máxima a la que se carga la batería (Depende del tipo de SOC que se desee obtener).

$i_{(t)}$ : Es la corriente de carga y/o descarga proveniente de la batería respectivamente.

Este método calcula la capacidad restante acumulando la carga transferida hacia adentro o fuera de la batería [4].

La estimación se inicia probando el voltaje en circuito abierto con el fin de verificar que la batería no se encuentre por debajo del voltaje de corte establecido por el fabricante [4].

El proceso de estimación se basa en el control de la tensión de la batería ( $V_B$ ) y corriente de carga o descarga ( $I_B$ ) de la misma; su modo de funcionamiento puede ser conocido de acuerdo a la cantidad y dirección de la corriente. Cuando la batería está en circuito abierto con corriente cero, se realiza una compensación de auto descarga para la realización de una corrección de los estados iniciales de carga y salud de la batería [4].

Se dice que cuando el voltaje  $V_B$  sea menor al voltaje de corte (especificado en la hoja del fabricante) durante la descarga, la batería ya no puede ser usada y se debe recargar. Por otro lado, la batería está completamente cargada si  $V_B$  alcanza el límite superior especificado en la hoja de datos e  $I_B=0$  [4].

Así mismo el SOH y SOC son calculados con:

$$SOC_{(t)} = SOH_{(t)} - DoD_{(t)} \dots (14)$$

$$SOH = \frac{Q_{M\acute{a}x}}{Q_{Rated}} \quad (15)$$

Donde:  $DoD_{(t)}$ : es la profundidad de descarga

$Q_{M\acute{a}x}$ : es la carga Máxima

$Q_{Rated}$ : es la carga Nominal

Al final del ciclo de carga se obtiene un nuevo SOH, acumulando la suma de la carga total puesta en la batería.

El envejecimiento es una condición crucial para la aplicación de este método, ya que el método de conteo de Coloumb no tiene la capacidad de seguir los cambios de estado deteriorado de la batería debido al envejecimiento.

Una de las desventajas del método de conteo de Coulomb es un crecimiento gradual del acumulado en la medición del SOC. Para superar este problema, básicamente la corriente debe medirse con alta precisión junto con el SOC y reiniciar el algoritmo. Sin embargo, tiene una limitación de hardware inherente, como el sensor de corriente, OP-AMP, de analógico-digital conversión (ADC), y así sucesivamente sin embargo para compensar este problema se utilizan técnicas alternas tale como el método voltaje en circuito abierto (OCV por sus siglas en inglés) [14].

Otras de las complicaciones principales que surgen con este método: esta la medición imprecisa de la corriente, pues esta puede sumar un gran error y la

medición precisa de la corriente es costosa. En segundo lugar, no toda la corriente suministrada a la batería se consume mediante la carga y las pérdidas correspondientes deben tenerse en cuenta.

### 2.1.3.-Técnica de voltaje en circuito abierto

Medir el estado de carga por voltaje es simple, pero puede ser impreciso puesto que los materiales de las celdas y la temperatura se ven afectados. El error más evidente del estado de carga basado en voltaje se produce al alterar una batería con una carga o descarga. La agitación resultante distorsiona el voltaje y ya no representa una referencia SOC correcta. Para obtener lecturas precisas, la batería necesita descansar en el estado de circuito abierto durante al menos cuatro horas; aunque los fabricantes de baterías recomiendan 24 horas para el ácido de plomo. Esto hace que el método SOC basado en voltaje sea poco práctico para una batería en servicio activo [12].

El voltaje de circuito abierto se relaciona de forma lineal con el SOC. En la Figura 3 se muestra la dependencia lineal de una batería de ácido plomo [11].

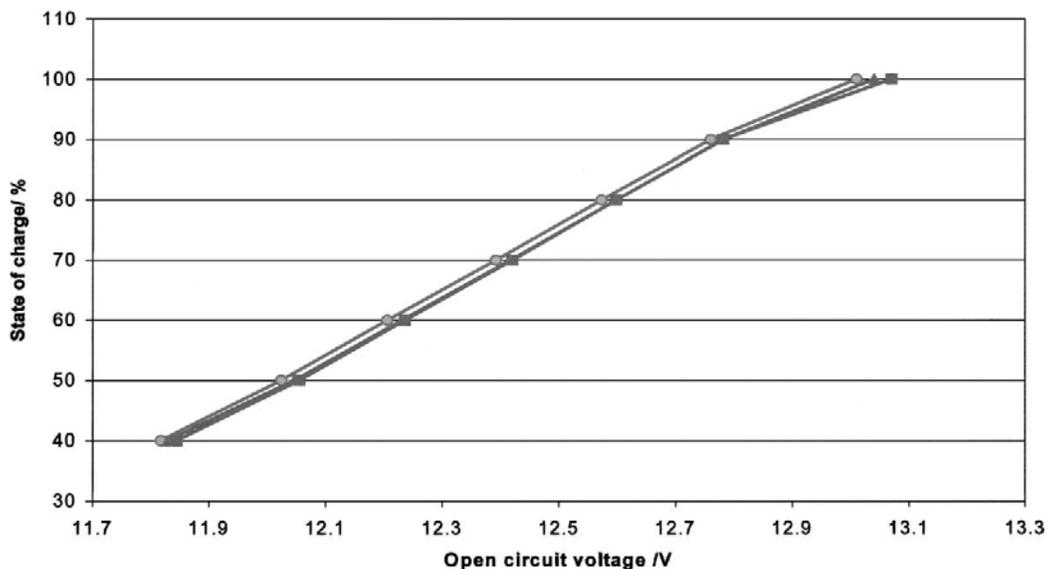


Fig. 3 Dependencia del estado de carga en la tensión de circuito abierto de cuatro baterías VRLA del mismo tipo.

La curva de descarga de una batería depende de su química. Mientras que el SOC basado en voltaje funciona razonablemente bien para una de plomo-ácido, para las de níquel y litio el método de voltaje es impráctico [12].

Cuando se mide el SOC mediante voltaje, el voltaje de la batería debe ser "flotante" sin carga. Sin embargo, para aplicaciones automotrices las cargas parásitas para las funciones de limpieza ponen la batería en una condición de voltaje de circuito con carga (CCV, por sus siglas en inglés) [12].

A pesar de las imprecisiones, la mayoría de las mediciones SOC dependen, en parte o completamente, del voltaje debido a la simplicidad. El SOC basado en voltaje es popular en sillas de ruedas, patinetas y coches de golf. Algunos sistemas de gestión de baterías (BMS por sus siglas en inglés) innovadores usan los períodos de descanso para ajustar las lecturas SOC como parte de una función de "aprendizaje" [12].

La medición de voltaje de circuito abierto suele combinarse con otras técnicas para asegurar una indicación continua de SOC, en tal combinación, la medición de voltaje de circuito abierto puede utilizarse para ajustar las otras técnicas. Finalmente, el desgaste químico que se produce en la batería debido a la carga y descarga de la misma, tales como la concentración de ácido y las estratificaciones ácidas pueden generar resultados inexactos [12].

El voltaje en circuito abierto podría usarse como indicador de estimación SOC, debido a que voltaje en circuito abierto y el estado de carga de la batería tienen relación uno a uno. Por esta razón, el método de restablecimiento SOC utilizando OCV puede ofrecer un valor de SOC inicial en la ecuación del método de conteo de Coulomb (Ecuación (13)) durante un período de descanso y también restablece el error del SOC acumulado a cero al mismo tiempo.

#### 2.1.4.-Impedancia espectroscópica

Muchos trabajos de investigación se han llevado a cabo en espectroscopía de impedancia pues este método es una técnica de medición común para procesos

electroquímicos y se ha estudiado para todos los sistemas de baterías, no sólo para la determinación del SOC sino también para determinación SOH [15].

En la Fig. 4 muestra un diagrama de Nyquist de la impedancia compleja de una batería de ácido de plomo durante la descarga [11].

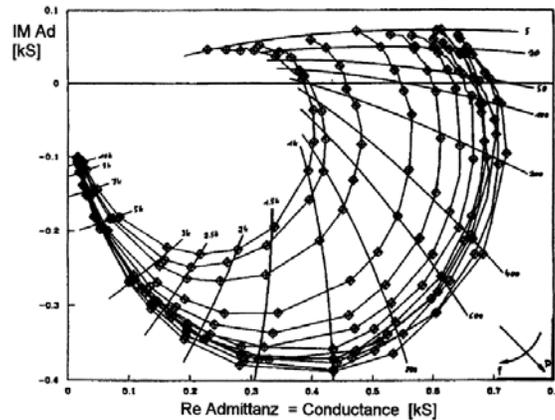


Fig. 4 Medidas de impedancia de una batería de plomo y ácido durante la descarga.

Las curvas de impedancia están fuertemente influenciadas por los efectos de la temperatura, por lo que para usar este método es recomendable un entorno con temperatura controlada [11].

Las aplicaciones más comunes son en el sector automotriz, donde algunas baterías se descargan más que otras durante las pruebas y es necesario cargarlas antes del tránsito. La medición de SOC por espectroscopía de impedancia también se puede usar para sistemas de nivelación de carga en los que una batería está continuamente bajo carga y descarga [12].

Sin embargo, la medición de SOC por espectroscopía está restringida a una batería nueva, con una buena capacidad conocida; la capacidad debe ser definida y tener un valor no variable. Si bien las lecturas de SOC son posibles con una carga constante, la batería no puede cargarse durante la prueba [12].

### 2.1.5.-Filtro de Kalman [24]

La estimación del estado de carga es de gran importancia para el funcionamiento el buen funcionamiento de la batería. La eficiencia y precisión del algoritmo son dos indicadores importantes de su rendimiento. El filtro de Kalman es un algoritmo de optima estimación el cual representa un progreso obvio en términos del estado de las baterías.

El filtro Kalman es adecuado para sistemas lineales, sin embargo, los acumuladores muestran características dinámicas no lineales obvias. Ejemplo, las características SOC-OCV de una batería tiene una no linealidad obvia, algunos parámetros importantes en el modelo equivalente, como resistencia, la polarización, capacitancia, muestran algunas características variables en el tiempo debido al cambio condiciones de trabajo. El filtro de Kalman extendido (EKF, por sus siglas en inglés), el filtro de Kalman sobrio (UKF, por sus siglas en inglés) son algoritmos desarrollados a partir del filtro de Kalman, los cuales resuelven mejor los problemas de estimación del estado para de la batería no lineal, adicionalmente se pueden obtener resultados de estimación ideales. Para mejorar aún más la precisión de la estimación del estado de baterías, algunas tecnologías relacionadas, como la teoría del observador, algoritmos adaptativos, algoritmos de inspiración biológica se han combinado con el filtro de Kalman.

El rendimiento de un filtro de Kalman (incluido su algoritmo derivado) depende de la precisión del modelo de sistema. Hay muchos tipos de modelos de batería típicos, por ejemplo, los modelos basados en física, modelos basados en datos y modelos de circuitos equivalentes. Entre ellos los modelos de circuitos equivalentes los cuales tienen las ventajas de una estructura simple y un concepto físico claro.

Teniendo en cuenta la precisión del modelo y la complejidad del sistema, el modelo de circuito equivalente de primer y segundo orden han sido ampliamente utilizado en el campo de la estimación de estado de baterías basado en el filtro de Kalman.

A continuación, se presenta una tabla comparativa donde se hace mención de las ventajas, desventajas y aplicaciones de los métodos para la estimación del SOC (Ver Tabla I).

Tabla I- Tabla Comparativa de los métodos para la estimación del estado de carga

<b>Método de Estimación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Parámetros Obtenidos</b>	<b>Monitoreo</b>	<b>Aplicaciones</b>
Métodos 2 Pulsos	*Una vez encontrados los coeficientes es rápido de implementar. *Resultados consistentes	*Requiere de tiempo, así como de apoyo de otras técnicas de estimación para encontrar los coeficientes.	SOC, SOH	Fuera de línea	Banco de baterías
Conteo de Coulomb	*Implementación Sencilla *Alta Eficiencia Colombiana. A potencia media	*Es sensible a desbalances de carga, temperatura y pérdidas internas. *Dependencia de la resolución del sensor de corriente *Problema para determinar valores iniciales	SOC, SOH	En línea	Computadoras, equipos médicos, elementos portátiles.
Técnica de voltaje en circuito abierto	*Fácil Implementación	*Solo funciona en circuito abierto y después de un tiempo de reposo. *Interrupción de las funciones del sistema.	SOC	Fuera de línea	Aplicaciones domésticas
Filtro de Kalman	Dinámico	Complejo Calculo Necesita un modelo de la batería confiable Problemas al determinar parámetros iniciales	SOC	En Línea	Aplicaciones Fotovoltaicas

Impedancia Espectroscópica	Precisión	Requiere de tiempo Complejidad en la interpretación de resultados	SOC SOH	Fiera de Línea	Aplicaciones Químicas
-------------------------------	-----------	--	------------	-------------------	--------------------------

## 2.2.- Métodos para el cálculo del SOH

El envejecimiento de la batería se puede disociar en dos partes:

- Ciclo de envejecimiento.
- Calendario.

Cada término define las alteraciones causadas por diferentes usos del acumulador. Por lo que, el calendario de envejecimiento corresponde a las consecuencias del almacenamiento de la batería a través del tiempo. Por otro lado, el ciclo de envejecimiento está asociado con los períodos de uso, llamados ciclos (carga o descarga). El ciclo de vida de las baterías está influenciado por muchos factores tales como temperatura, SOC, corriente de carga y descarga, voltaje, máximo de carga y voltaje de corte, métodos de carga, etc. [16].

Los mecanismos de envejecimiento en las celdas se pueden distinguir aproximadamente en la disminución de la capacidad y el aumento de la resistencia interna durante el almacenamiento y el ciclo. El origen de los mecanismos de envejecimiento puede ser químico, térmico o mecánico y son fuertemente dependientes de la composición del electrodo [16].

El estado de salud (SOH) es el indicador más utilizado en la literatura para evaluar el nivel de envejecimiento en el acumulador.

Los tres indicadores principales de estado de la salud de una batería son [12]:

- *Capacidad de almacenar energía.*
- *Resistencia interna: capacidad de entregar corriente.*

- Auto descarga: refleja la integridad mecánica y las condiciones relacionadas con el estrés.

Hay una serie de parámetros que afectan el SOH de una batería entre los más destacados son [1].

#### A. Temperatura de operación

La temperatura de operación juega un papel muy importante en la degradación de la salud de la batería. Si durante la operación, la temperatura es más alta que la temperatura máxima de funcionamiento definida por el fabricante, entonces la salud de la batería se degrada exponencialmente. Del mismo modo, si la temperatura está por debajo de la temperatura mínima de funcionamiento, la salud de la batería disminuye. Esto a menudo se asocia con la disminución en la capacidad de la batería [1].

#### B. Ciclo de carga / descarga

La carga y la descarga son procesos importantes en el uso eficiente de la batería. Sin embargo, afectan el rendimiento de esta. Durante el proceso de descarga, el ion de litio se mueve del cátodo al electrolito y luego del electrolito se mueve hacia el ánodo y libera un electrón. Este es el mismo proceso durante la carga, pero de forma inversa. A medida que este proceso se lleva a cabo, conduce a romper o desgastar el electrodo dando como resultado pérdida de capacidad [1].

#### C. Profundidad de descarga

La batería se somete a daño químico irreversible si se somete a una descarga profunda, es decir si la batería es descargada por debajo del voltaje de corte, lo cual además puede generar que los electrodos de la batería se cortocircuiten debido a la disociación del electrolito.

### C. Sobrecarga

La sobrecarga da como resultado la descomposición del electrolito debido a que el potencial a través de los electrodos está más allá de límite máximo de la batería completamente cargada. Esto resulta en pérdida de capacidad y aumento en la resistencia interna de la batería [1].

### D. Tasa de carga / descarga

La tasa de carga o descarga juega un papel importante en envejecimiento de la batería. Si la corriente utilizada al cargar es muy alta entonces la batería alcanza su voltaje máximo rápido. Sin embargo, esto da como resultado la formación de productos químicos irreversibles en el electrolito. Las altas corrientes de carga también afectan a los electrodos, resultando en agrietamiento del electrodo porque este no es capaz de acomodar los iones que se mueven a velocidades tan altas. Todos estos efectos combinados causan una disminución en la capacidad y un aumento significativo en la resistencia interna del batería [1].

### E. Envejecimiento del calendario

Se define como la disminución de capacidad de la batería para proporcionar la carga que fue capaz de proporcionar una vez que era nueva. Esto generalmente ocurre cuando la batería se usa con el tiempo debido a la disminución en la potencia, de los productos químicos que son usados en la construcción de la batería de igual manera, también involucra la formación de una capa sobre el electrodo y evita que el electrodo reaccione con el electrolito de manera inmediata para producir corriente, pues se requiere de cierto potencial para superar y romper la capa antes de que la batería pueda ser utilizada. Dando como resultado la disminución en la capacidad de la batería [1].

En general, se considera que la batería llega al final de su vida útil (EOL por sus siglas en inglés) cuando la capacidad de la batería se desvanece 80% de su valor inicial. Este indicador representa el desgaste de la batería.

A continuación, se enlistan algunos de los métodos más importantes para la determinación del SOH

### 2.2.1.-Técnicas de estimación de la capacidad

Las técnicas para medir la capacidad de una batería se pueden dividir en una serie de categorías basadas en la técnica utilizada para estimarla. Algunas de las categorías comúnmente observadas son observadores basados en modelos, técnicas basadas en inferencias, enfoque en el voltaje constante (CCCV por sus siglas en inglés), métodos de descarga pulsada y ajuste de curvas enfoque [1].

Los observadores basados en modelos son técnicas comúnmente utilizadas para estimar la capacidad de la batería. Hay dos principales técnicas que se utilizan para estimar la capacidad de la batería. Ellos son los modelos electroquímicos y el modelo eléctrico RC equivalente. Los modelos electroquímicos modelan el comportamiento del batería basado en reacciones químicas que tienen lugar dentro de la batería. Estas reacciones químicas modeladas por ecuaciones diferenciales parciales tienen en cuenta la concentración de iones de litio en el electrodo y electrolito para estimar la degradación de la capacidad de la batería. [1].

El modelo electroquímico esta descrito en la Fig. 5:

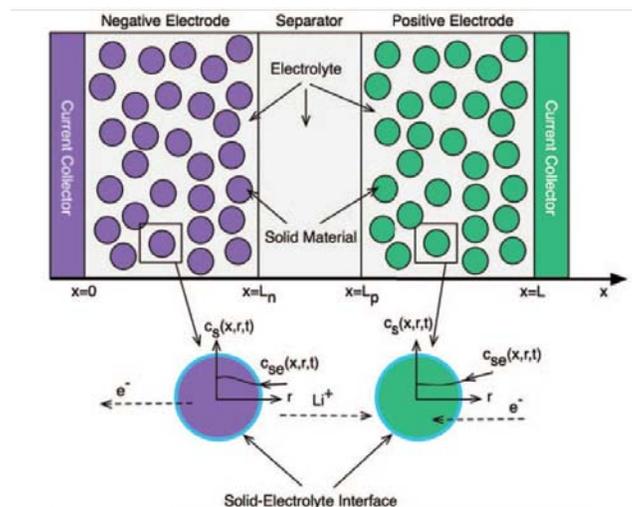


Fig. 5 Modelo electroquímico de la batería.

Por otro lado, cada batería puede considerarse como un circuito eléctrico y los parámetros eléctricos se pueden modelar por diferentes métodos, todos ellos se basan en circuitos eléctricos equivalentes [5].

Para representar las características eléctricas de las baterías se usan distintos modelos eléctricos. El modelo más simple consta de una fuente de voltaje ideal en serie con una resistencia interna, sin embargo, este modelo no tiene en cuenta el estado de carga de la batería [5].

Otro modelo se basa en una tensión de circuito abierto en serie con resistencia y en paralelo con circuitos RC paralelos con la llamada impedancia Warburg [3]. Por otro lado, el modelo dinámico de la batería de la Fig. 6 considera el deterioro y el efecto de la temperatura. Se puede apreciar que este modelo se compone de una serie de resistencias y arreglos RC que representan distintas tensiones y/o impedancias internas del dispositivo de almacenamiento.

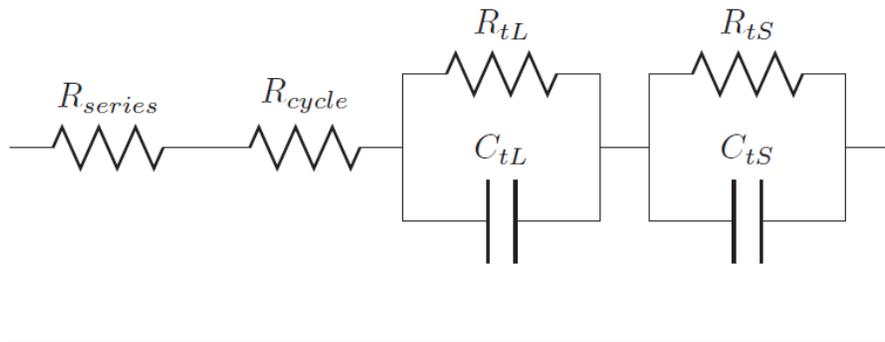


Fig. 6 Modelo dinámico de la batería.

Donde:

- $R_{series}$  representa la tensión de caída instantánea,
- $R_{cycle}$  representa una resistencia cíclica,
- $R_{tL}$ ,  $C_{tL}$ ,  $R_{tS}$ ,  $C_{tS}$  representan impedancias transitorias larga y corta respectivamente.

Los componentes RC en paralelo son convenientes para tomar en cuenta las pérdidas en la batería. Cabe mencionar que, de acuerdo al valor de la carga en la batería, los valores de componentes de la Fig. 6 van cambiando [13].

Los diferentes modelos eléctricos comparten una importante característica y es que hay una gran cantidad de simuladores que pueden realizar un análisis detallado de estos (de los más conocidos son Matlab, PowerSim, etc.), lo cual es una ventaja sobre otros modelos. Sin embargo, tener distintos modelos (uno para cada tipo de batería) representa un problema de estandarización; adicionalmente el modelado de cada uno de los parámetros del circuito eléctrico requiere de conocimientos electroquímicos y matemáticos, agregando cierto grado de complejidad en comparación con otras técnicas, lo cual es una desventaja para el uso de ésta [11].

### 2.2.2.-Técnica por resistencia interna

La resistencia interna de la batería se puede calcular basado en la caída en el voltaje del terminal. A medida que la batería envejece, se dice que la resistencia interna de la batería aumenta. Como un resultado, se han establecido diferentes técnicas para identificar el cambio en la resistencia interna de la batería en función de su uso y por lo tanto predecir el SOH de la batería [1].

Espectroscopía de impedancia electroquímica (Por sus siglas en inglés EIS) y modelo basado en observadores, son las dos técnicas principales que se utilizan para medir la resistencia interna de la batería. La técnica EIS implica enviar pulsos de corriente de muy pequeña magnitud y variando frecuencia para estimar la impedancia interna de la batería. El valor de la impedancia de la batería cuando la frecuencia es 0Hz da la resistencia interna de la batería. Las técnicas de observación basadas en modelos implican la electroquímica modelo o el modelo de circuito equivalente RC de la batería. En el modelo electroquímico de la batería, la degradación del electrodo, la disminución en la concentración de iones de litio y aumento en el espesor de la capa de interfaz de electrolito sólido son indicativo del aumento en la resistencia interna del batería. [1]

Las técnicas de impedancia han sido utilizadas para investigar la dinámica de las baterías, así como para determinar su estado de carga (SOC) y de salud (SOH). La impedancia es denotada como un parámetro eléctrico, también llamada resistencia interna, (cuyo significado depende de la técnica de medición) ésta es definida como la función de transferencia entre la diferencia de potencial y la corriente, que usualmente es una cantidad compleja y se mide usando un analizador de respuesta de frecuencia [15]

La resistencia interna varía con el estado de carga de la batería y los cambios más grandes son en baterías de níquel. En la Fig. 7 se observa la resistencia interna de una batería de níquel-metal cuando está descargada, durante la carga y a plena carga después de un período de reposo de cuatro horas. Los niveles de resistencia son más altos en estado bajo de carga e inmediatamente después de cargar.

Contrariamente a la creencia popular, el mejor rendimiento de la batería no se logra inmediatamente después de una carga completa, sino después de un período de descanso de unas pocas horas. Durante la descarga, la resistencia interna de la batería disminuye, alcanza el punto más bajo a la mitad de carga y empieza a subir de nuevo (línea punteada).

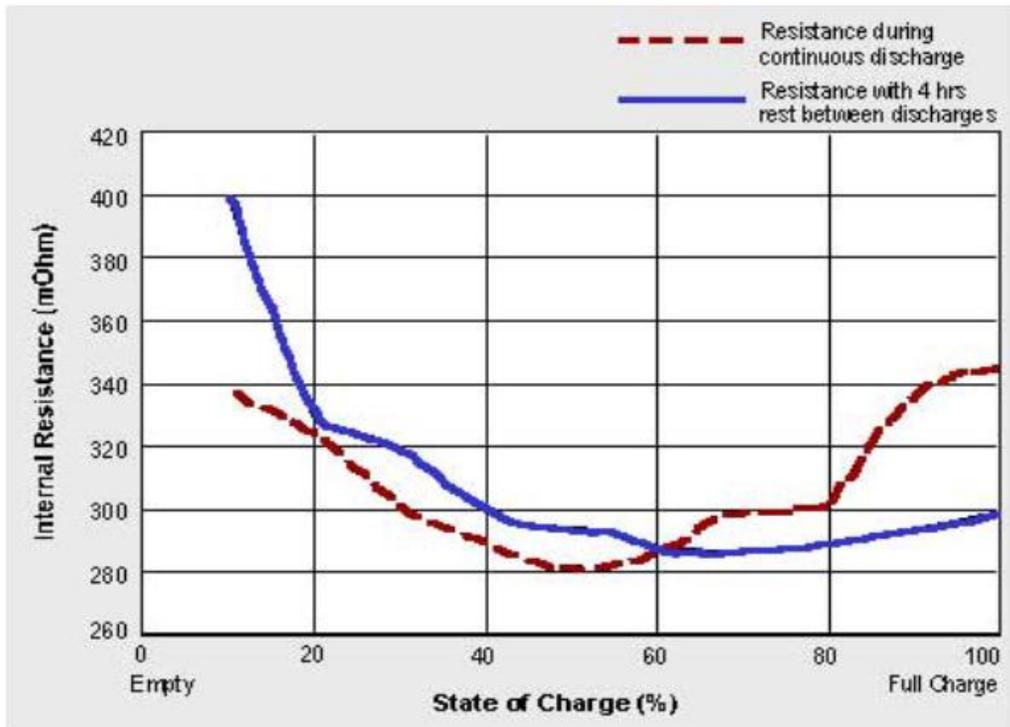


Fig. 7 Comportamiento de la resistencia interna de una batería.

La resistencia interna proporciona información valiosa sobre una batería, como indicaciones de lectura altas al final de su vida útil (SOH). Esto es especialmente cierto con los sistemas basados en níquel [12].

La prueba de resistencia interna consiste en aplicar una carga breve a la batería y medir los cambios de voltaje y corriente para determinar su resistencia interna; ésta aumentará con la edad debido a la degradación química del material activo, a medida que aumenta la resistencia en el acumulador disminuye el SOC. Cabe hacer mención que esta técnica no considera los cambios de temperatura, por lo cual las lecturas de corriente y voltaje se ven afectadas si dichos parámetros suelen variar constantemente [11].

### 2.2.3.-Prueba de descarga completa

El modelo de descarga es usado por muchos fabricantes, pues es la prueba de calidad que se realiza a una nueva batería para determinar su capacidad AHC nominal. Este tipo de prueba implica aplicar una descarga a la batería cuando se encuentra completamente cargada y medir la carga entregada, ésta se compara con la obtenida de una prueba de descarga completa cuando la batería era nueva [3].

La batería es descargada usando su índice de corriente (CR, por sus siglas en inglés) mientras que el voltaje de la batería se mide durante las 'n' horas requeridas para realizar la prueba. Si la tensión de la batería, al final de la prueba, es más alta que la mínima especificada, entonces se reconoce que la batería tiene la clasificación CR. Las especificaciones más elaboradas incluirán varios gráficos según diferentes clasificaciones CR.

Las estimaciones de SOC se realizan comparando con el gráfico suministrado por el fabricante. Aunque esto parece sencillo y directo, hay tres dificultades en el uso de este método: la primera es que los gráficos proporcionados por el fabricante muestran el voltaje bajo una carga específica; se requiere hacer extrapolaciones si la carga real es diferente de la proporcionada por la hoja de datos. La segunda es que los gráficos no proporcionan información sobre el voltaje de la batería sin carga.

Esta técnica normalmente incluye una recarga consecutiva, la cual es demasiado lenta para ser considerada en la mayoría de las aplicaciones, además durante la prueba la función del sistema es interrumpida [5].

A continuación, se presenta una tabla comparativa donde se hace mención de las ventajas, desventajas y aplicaciones de los métodos para la estimación del SOH (Ver Tabla II).

Tabla II- Tabla comparativa de los métodos para la estimación del estado de salud.

<b>Método de Estimación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Parámetros Obtenidos</b>	<b>Monitoreo</b>	<b>Aplicaciones</b>
Modelo Eléctrico	*Cuenta con varias plataformas de software para su simulación. *Suelen dar una buena aproximación.	*Problemas de estandarización *Requiere de conocimientos electroquímicos y eléctricos para la extracción de los parámetros	SOC, SOH	N/A (Sim.)	Aplicaciones de diseño eléctrico y software
Impedancia Interna	*Fácil implementación	*Carece de exactitud pues considera parámetros que varían con la temperatura.	SOH, SOC	Fuera de línea	Baterías comerciales
Descarga Completa	*Método Estándar elegido por los fabricantes comerciales por su sencilla aplicación.	, *Demanda mucho tiempo. *Son necesarias extrapolaciones si la carga difiere a las consideradas por el fabricante.	SOH	Fuera de línea	Baterías comerciales.

## Capítulo 3.-Métodos y materiales

En este capítulo se detallará el método y los materiales usados para la implementación de los prototipos para la obtención del SOC y SOH de batería de Ion-Litio.

### 3.1.-Método usado

Hay dos procesos importantes en el funcionamiento de la batería:

- Proceso carga: Cuando la batería se carga a través de corriente eléctrica.
- Proceso de descarga: Es mientras la batería vacía su carga al dejar fluir su carga en los dispositivos.

El proceso de carga y descarga inadecuadas podría disminuir el rendimiento y acortar la duración de uso de la batería. El estado de carga de las baterías no se puede medir directamente, sin embargo, este se estima a partir de la medición de varios parámetros tales como voltaje y corriente eléctrica.

Entre los métodos para la estimación del SOC, el filtro de Kalman y el conteo de Coulomb son los más usados. Sin embargo, el filtro de Kalman puede determinar la precisión SOC a través de la estimación recursiva, pero la implementación de este es compleja y la velocidad del proceso de cálculo es lento, por el contrario, el método de conteo de Coulomb se puede implementar fácilmente y representa una gran precisión de la estimación SOC con medición de corriente precisa. Por esto razón, el método de conteo de Ampere-Hora es considerado como el método más común en la práctica [14].

Para este trabajo se utilizó el método del conteo de Coloumb para la estimación del estado de carga SOC, pues es la técnica que presenta mayores prestaciones, debido a que es funcional para todo tipo de baterías; el cálculo es bastante eficiente en media potencia a pesar de factores cambiantes tales como la temperatura y la impedancia, permite conocer el estado de la batería en todo momento incluso cuando está en funcionamiento, es de fácil aplicación y de bajo costo, sin contar

que este método puede ser complementado por métodos que le permitan “re-calibrarse” en alguno de sus estados

Para el cálculo del SOC se usó la ecuación (13) por lo que para llevar a cabo la integral se usaron métodos numéricos, específicamente en este trabajo fue “La regla del trapecoide” propuesta en [10]:

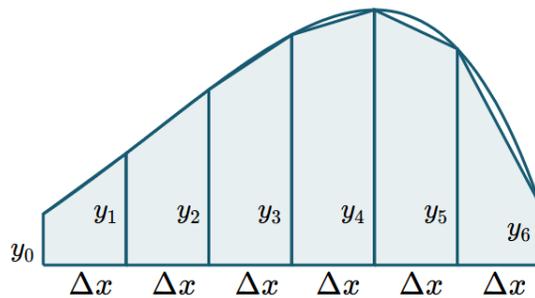


Fig. 8 Área debajo de la curva usando la regla trapezoidal.

Una integral puede definirse como el área bajo la curva por lo que, el área aproximada debajo de la curva se encuentra agregando el área de todos los trapezoides como es mostrado en la Fig. 8.

*Área del Trapecoide [10]*

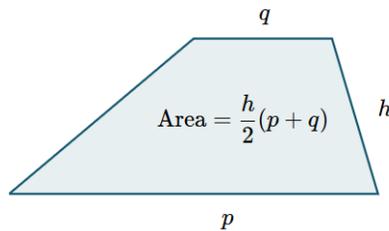


Fig. 9 Área del trapecio.

El área del trapecio se define como:

$$Area = \frac{h}{2}(p + q) \tag{16}$$

Suponemos trapezoides "ideales" (lo que significa que los lados paralelos están en ángulo recto con la base), y se rotan 90 ° para que su nueva base sea en realidad h, como sigue, y  $h = \Delta x$ .

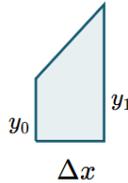


Fig. 10 Trapecio "Ideal".

Entonces el área está dada por:

$$Area \cong \frac{1}{2}(y_0 + y_1)\Delta x + \frac{1}{2}(y_1 + y_2)\Delta x + \frac{1}{2}(y_2 + y_3)\Delta x + \dots + \frac{1}{2}(y_{n-1} + y_n)\Delta x \quad (17)$$

Simplificando:

$$Area \cong \Delta x \left( \frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + \frac{y_n}{2} \right) \quad (18)$$

Volviendo a la referencia de la ecuación 13 la curva que tomamos en cuenta fue la de la corriente por lo que; haciendo la sustitución de la ecuación 17 en la ecuación 13 se tiene que:

$$SOC_{(t)} = SOC_{(t_0)} - \frac{1}{AHC} \left( \frac{1}{2}(y_0 + y_1)\Delta x + \frac{1}{2}(y_{n-1} + y_n)\Delta x \right) \quad (19)$$

Donde:

$SOC_{(t)}$ : Es el estado de carga actual.

$SOC_{(t_0)}$ : Es el estado de carga inicial en la batería; generalmente este método utiliza técnicas de apoyo para estimar este parámetro.

$AHC$ : Este parámetro puede ser la capacidad nominal o bien la capacidad máxima a la q se carga la batería

$\Delta x$ : Intervalo en el cual es tomada la muestra y el valor instantáneo de la corriente.

$y_{n-1}$ : Es el valor del corriente instantáneo en un tiempo  $t_{n-1}$ .

$y_n$ : Es el valor del corriente instantáneo después de un periodo de tiempo  $\Delta x$  definido en la ecuación 19 por  $t_n$

Es importante mencionar que a partir de la ec. (19) podemos obtener la cantidad de carga que la batería entrega o bien demanda según sea el caso. Pues la Capacidad-Ampere-Hora, hace relación de la corriente a través del tiempo con la capacidad, por lo que extrayendo de la ec. (19) este concepto se tiene que:

Donde:

$$AHC = \left( \frac{1}{2}(y_0 + y_1)\Delta x + \frac{1}{2}(y_{n-1} + y_n)\Delta x \right) \quad (20)$$

#### ➤ 3.1.1.-Método de carga

El Ion-Litio junto con los materiales de cátodo tradicionales de cobalto, níquel, manganeso y aluminio normalmente son cargados a 4.20V / celda. La tolerancia es +/- 50 mV / celda. Algunas variedades a base de níquel cobran a 4.10V / célula; alta capacidad de Li-ion puede ir a 4.30V / celda y superior. Aumentar el voltaje aumenta la capacidad, pero ir más allá de la especificación hace hincapié en la batería y compromete la seguridad.

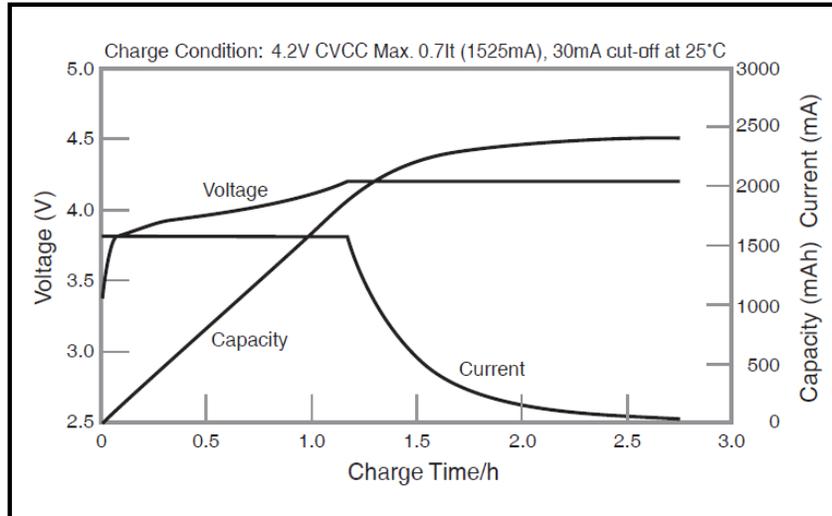


Fig. 11 Curvas de carga para una batería Ion-Litio.

En este trabajo la carga de la batería se llevó a cabo por el modo Corriente Constante – Voltaje Constante (CC-CV Por sus siglas en ingles). La Fig. 11 muestra las variaciones del voltaje y la corriente de la batería cuando una batería se carga por dicho modo. Así mismo la Fig. 12 muestra las etapas durante este modo de carga.

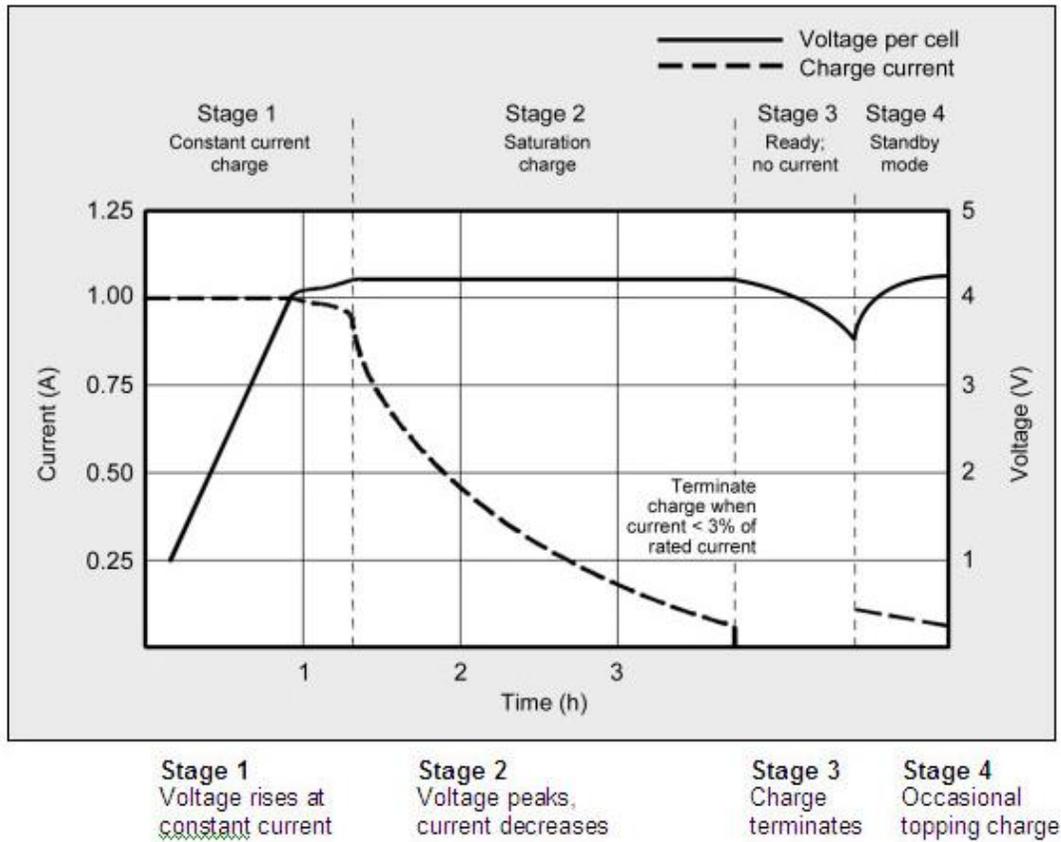


Fig. 12 Etapas de carga para una batería de Ion-Litio.

➤ 3.1.2.-Método de descarga

Para el caso de descarga se realizó con una carga electrónica a corriente constante, para diferentes casos (Ver Figura 13).

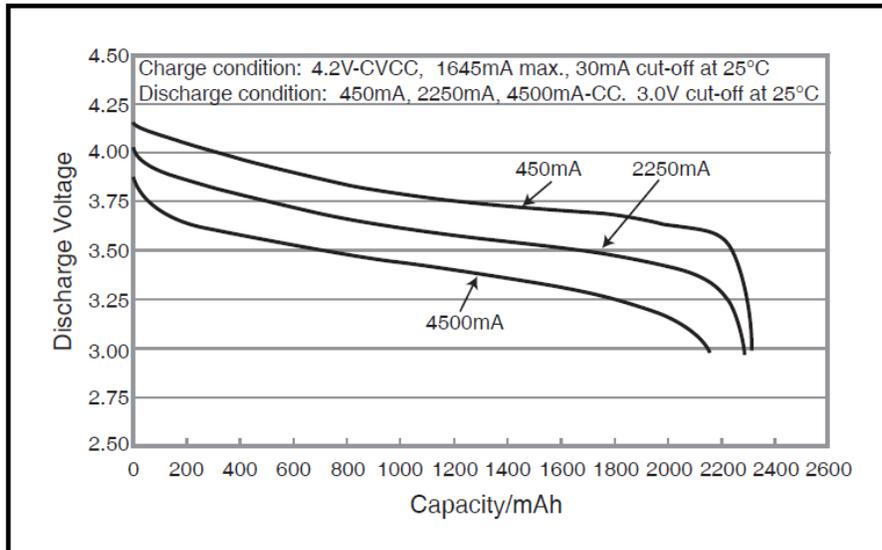


Fig. 13 Curvas de descarga para una batería de Ion-Litio.

➤ 3.1.3.-Método para el SOH

Para el cálculo del SOH se usó la ecuación (5).

En este trabajo el método que se usó para obtener el SOH fue el de descarga completa por lo que este sólo se obtiene una vez por cada ciclo completo (carga y descarga).

## 3.2.-Materiales Usados

### ➤ 3.2.1.-Baterías

Las baterías seleccionadas para la determinación del SOC & SOH en este trabajo fueron: Lithium Ion Batteries CGR18650D Panasonic. [8], cuyas especificaciones se muestran en la Tabla III.

Tabla III.- Comportamiento de la resistencia interna de una batería.

<b>Voltaje Nominal</b>		<b>3.6 Volts</b>
<b>Capacidad Estándar</b>		2350mAh
<b>Dimensiones</b>	<b>Diámetro</b>	18.6 +0/-0.7mm
	<b>Altura</b>	65.2 +0/-1.0mm
	<b>Peso</b>	Approx. 45g

### ➤ 3.2.2.-Elementos de conmutación

Los elementos de conmutación utilizados fueron relevadores electrónicos, quienes consumen menos corriente al momento de su activación. El modelo usado en este trabajo fue THD-0501L [18] (Ver Figura 15).

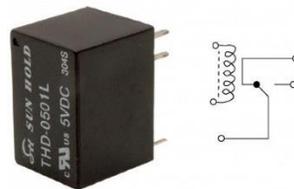


Fig. 15 Relevador Electrónico THD-0501L.

➤ 3.2.3.-Sensor de corriente

Para medir la corriente de carga y/o de descarga se utilizó el dispositivo ACS714, el cual es un sensor de corriente lineal basado en el efecto Hall  $\pm 5$ , ofrece una ruta de corriente de baja resistencia ( $\sim 1.2 \text{ m}\Omega$ ) y aislamiento eléctrico de hasta 2.1 kV RMS. Adicionalmente este acepta una entrada de corriente bidireccional con una magnitud de hasta 5A y emite una tensión analógica proporcional ( $185 \text{ mV / A}$ ) centrada a 2,5 V con un error típico de  $\pm 1,5\%$  [19] (Ver figura 16).

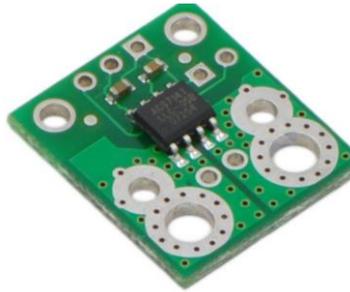


Fig. 16 Sensor de Corriente +/-5 Amperes.

➤ Sensor de voltaje

Debido a que se hizo el monitoreo por cada batería y esta tiene un voltaje nominal de 3.6 Volts y un voltaje máximo de 4.2 Volts, no fue necesario usar un sensor como tal, sino más bien un acondicionamiento para el voltaje de la batería con la entrada de la tarjeta de adquisición (DAQ por sus siglas en inglés). Por lo que se usó de un amplificador operacional con numero de parte LM358AP, en modo seguidor de voltaje [20] (Ver Figura 17).

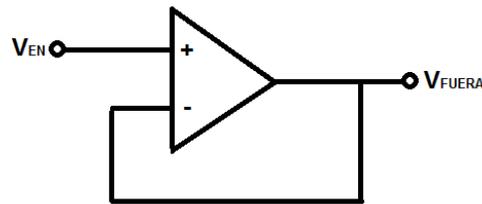


Fig. 17 Amplificador operacional dual / configuración seguidor de voltaje.

➤ 3.2.4.-Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición que se utilizó fue el dispositivo USB-6008 del fabricante National Instruments, el cual ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6008 NI brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. El dispositivo tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad [21].

Dicho dispositivo mostrado en la Fig. 18 cuenta con una serie de entradas/salidas acondicionadas para la medición y activación de elementos.

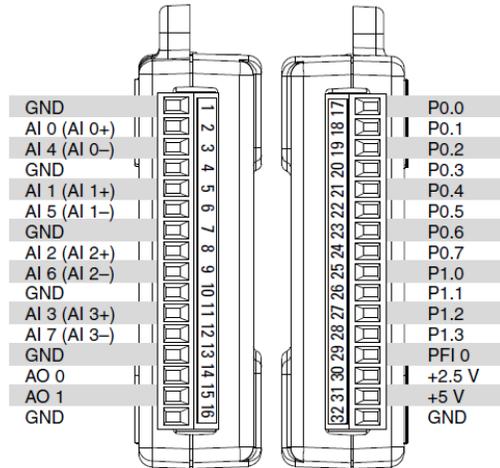


Fig. 18 Distribución Pin-Out correspondiente a la tarjeta DAQ 6008 NI.

➤ 3.2.5.-Etapas de acondicionamiento

Debido a la salida de la tarjeta USB-6008 no pueden proporcionarnos la suficiente corriente para activar los dispositivos de conmutación (Relevadores), se añadió un refuerzo de corriente a través de un transistor 2N2222A y una compuerta NOT. (7404) [22] [23] (Ver figura 19).



Fig. 19 Transistor 2N2222A / compuerta NOT 7404.

➤ 3.2.6.-Cargador comercial

El cargador comercial que se utilizó fue el dispositivo TP4056 el cual es un cargador lineal completo de corriente constante / constante para una sola batería de Ion-Litio. Este puede funcionar con USB y pared adaptador. El voltaje de carga es a 4.2V, y la corriente de carga puede programarse externamente con una sola resistencia (para este trabajo la resistencia fue programada para 1). El dispositivo TP4056 termina automáticamente el ciclo de carga cuando la corriente de carga cae a 1/10 del valor programado después de alcanzar el voltaje de flotación final [23] (Ver Figura 20).

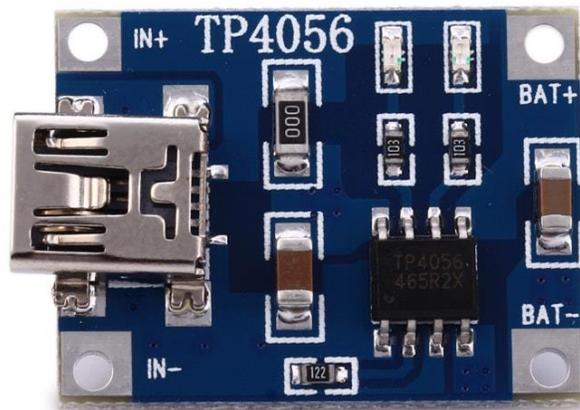


Fig. 20 Cargador Comercial TP4056 (acondicionado).

# Capítulo 4.-Implementación

Se hizo la construcción de dos placas prototipo, a continuación, se presenta el diagrama eléctrico propuesto para cada prototipo, así como su construcción final.

## 4.1.-Construcción placa estándar

1.- *Placa Estándar*: Prototipo de carga y descarga como se muestran en las figuras 21 y 22.

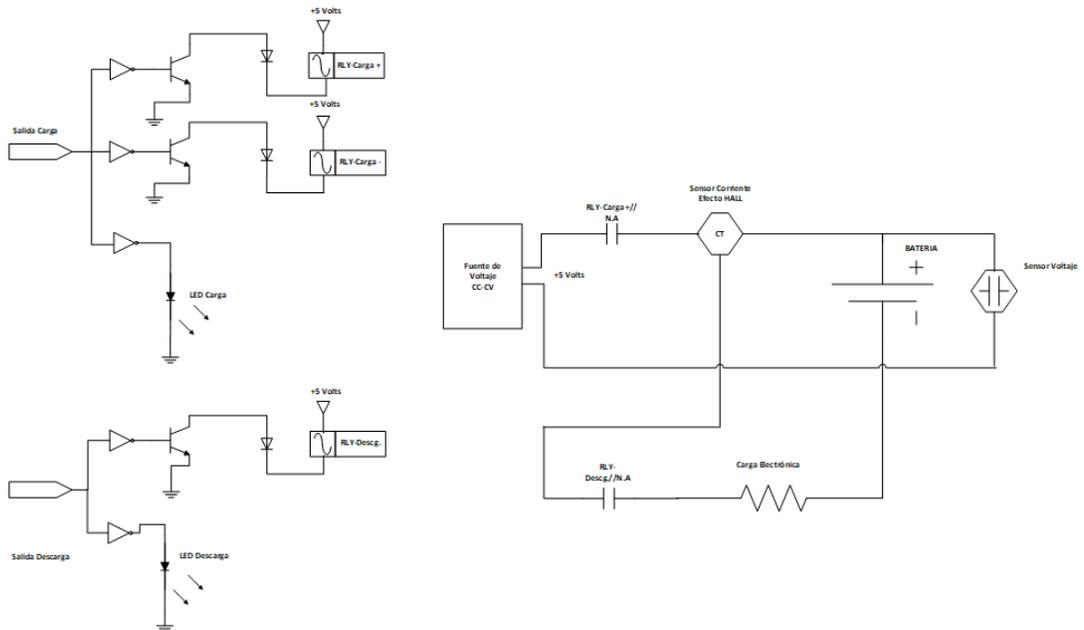


Fig.21 Diagrama eléctrico propuesto para la placa estándar.

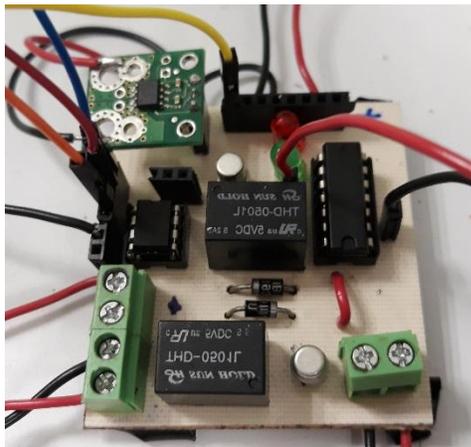


Fig.22 Placa estándar.

## 4.2.-Construcción placa de prueba de carga

1.- *Placa prototipo de carga:* Prototipo de carga de acuerdo al cargador comercial usado y las curvas de descarga como se muestran en la Fig. 23 Y 24.

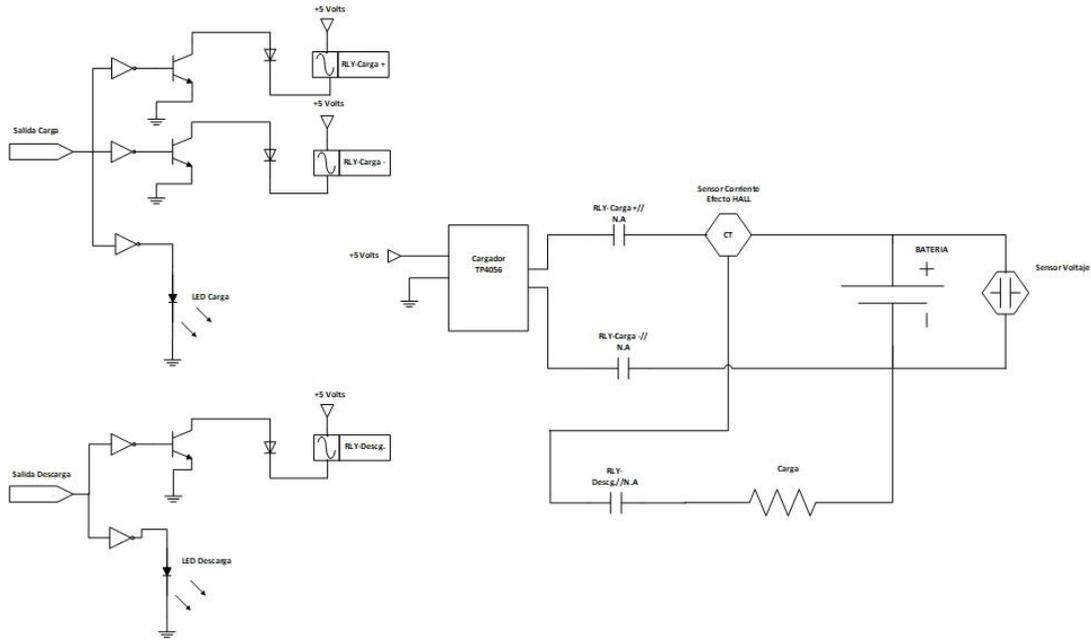


Fig. 23 Diagrama de placa para prueba carga / descarga estándar.

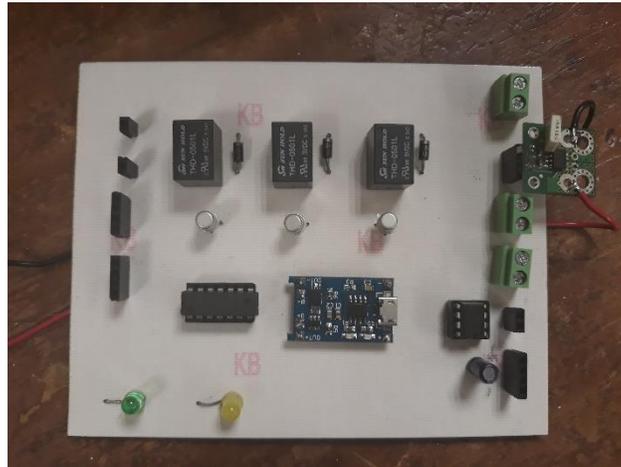


Fig. 24 Diagrama de placa para prueba carga / descarga estándar.

## Capítulo 5.-Interfaz y programa

Una vez que se acondicionó las señales de entrada y salida se procedió con la implementación del control. Como se mencionó anteriormente se utilizó la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB6008 NI la cual fue programada por medio de la herramienta Labview.

El sistema de administración de baterías está controlado a través de una máquina de estados la cual administra las entradas, salidas y su funcionamiento. A continuación, se muestra el diagrama de flujo de su funcionamiento (Ver Figura 25).

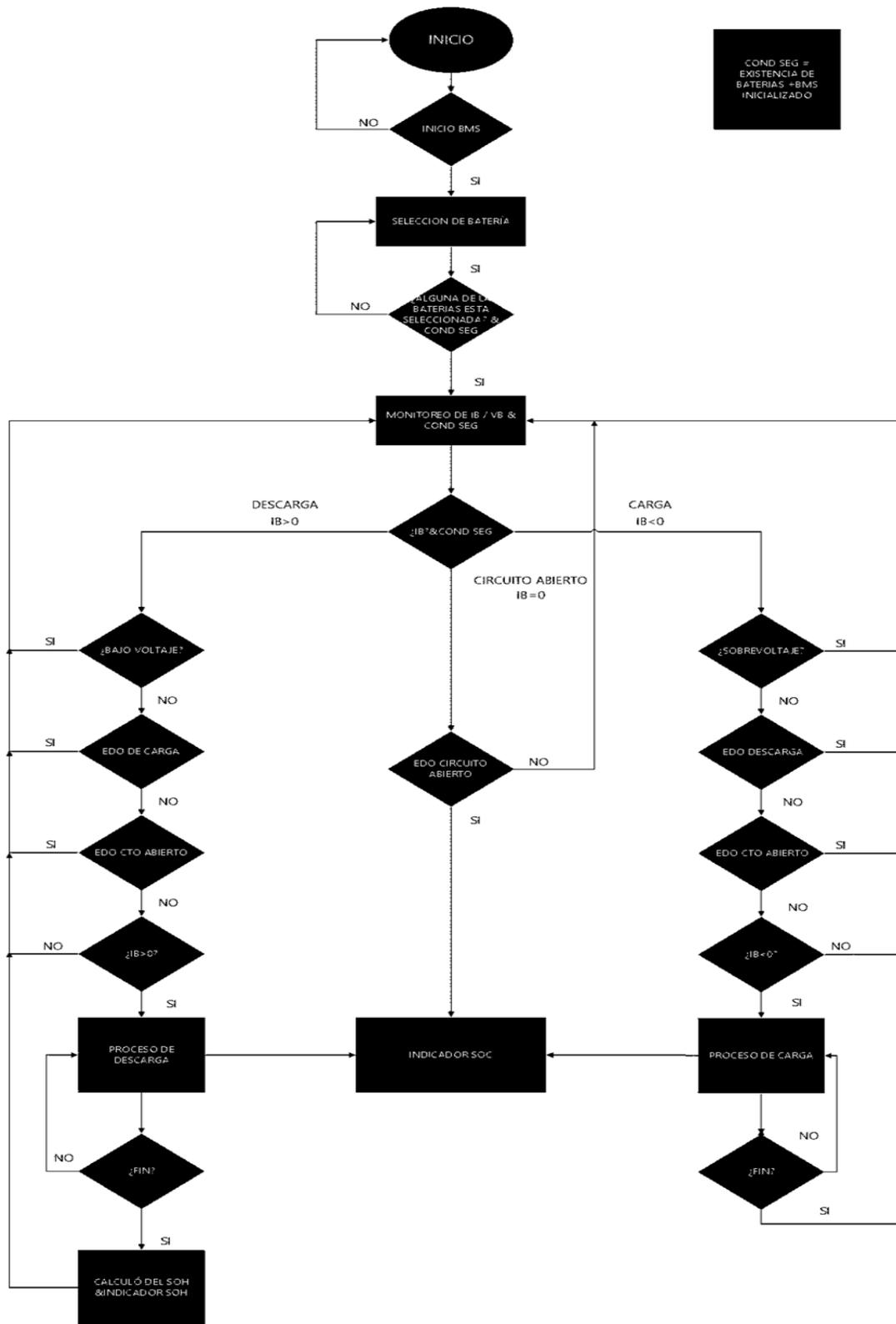


Fig.25 Diagrama de flujo del BMS propuesto.

A continuación, se hace una breve explicación de cada una de las partes que conforman el programa del sistema de baterías.

### 5.1.-Monitoreo de entradas/ salidas

A través de la tarjeta de adquisición NI 6008USB se muestrearon las señales del voltaje de las baterías ( $V_B$ ) y su respectiva corriente ( $I_B$ ), así mismo se configuran las salidas activar los relevadores de control, los cuales hacen que el sistema este en los estados de carga, descarga y circuito abierto respectivamente. Para la configuración y comunicación de entradas y salidas de la DAQ con Labview se hizo uso de bloque “DAQ Assistant” (Ver figura 26).

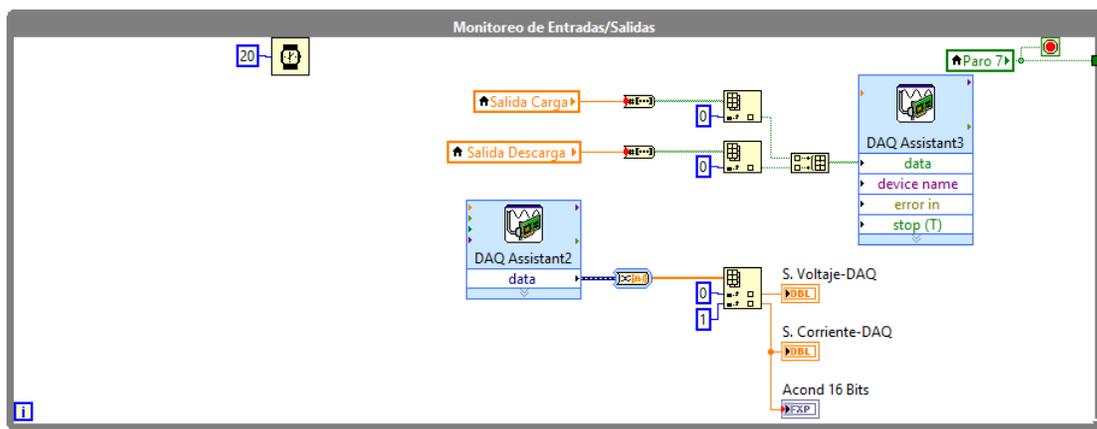


Fig. 26 Bloque de monitoreo de entradas / salidas del BMS.

### 5.2.- Acondicionamiento de sensor de corriente

Con el fin de obtener un valor promedio las señales de corriente y voltaje son filtradas y acondicionadas para posteriormente trabajarlas a lo largo del programa (Ver Figura 27).

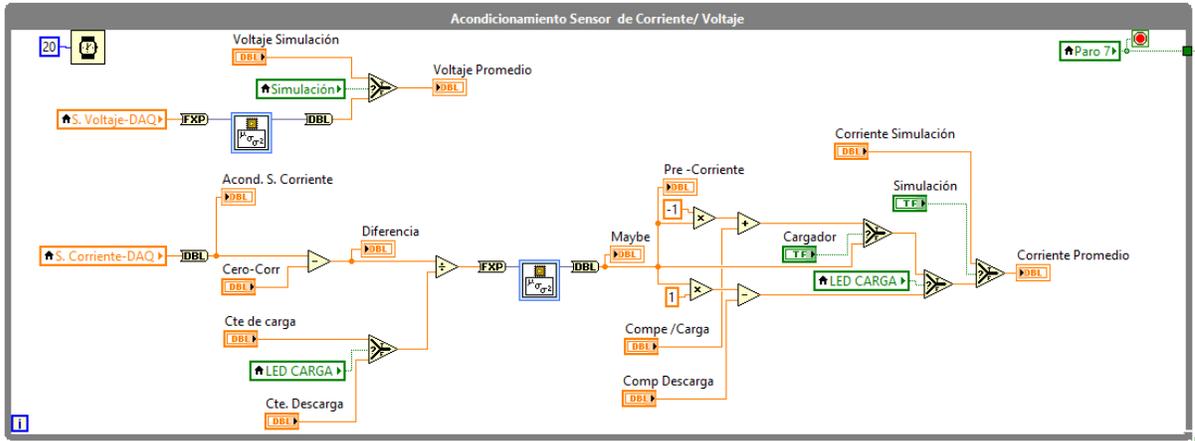


Fig. 27 Bloque de acondicionamiento de señales de corriente y voltaje.

### 5.3.-Máquina de estados & seguridad

El BMS cuenta con condiciones de seguridad, para evitar que el sistema funcione bajo condiciones de riesgo y/o inaceptables. Como se muestra en la Fig. 28 las condiciones de seguridad para el sistema propuesto son:

- Polarización Inversa: La pila colocada al revés
- Sobre voltaje: Cuando la batería posee un voltaje mayor al que sus hojas de datos.
- Bajo Voltaje: Cuando la batería tiene un valor inferior a su voltaje de corte.
- In Range: Es la calibración de los puntos de umbral del valor de la corriente en la batería, que sirve para determinar en qué estado se encuentra el acumulador.



## Seguridad & Control de Salidas

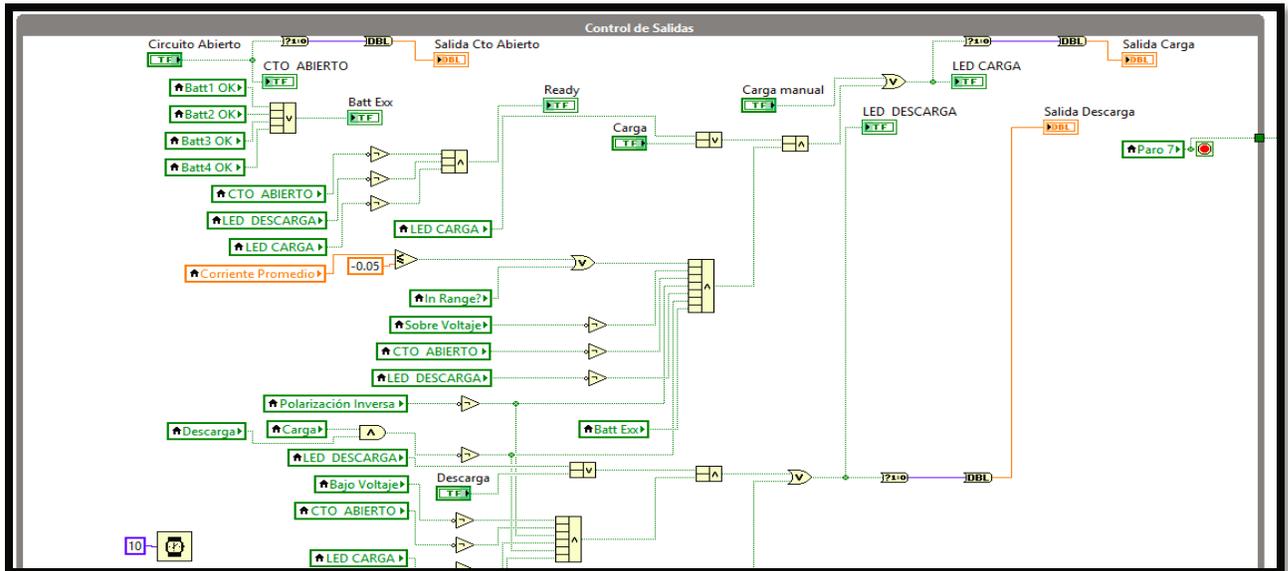


Fig. 30 Bloque referente al control de salidas & seguridad de estas (1/2).

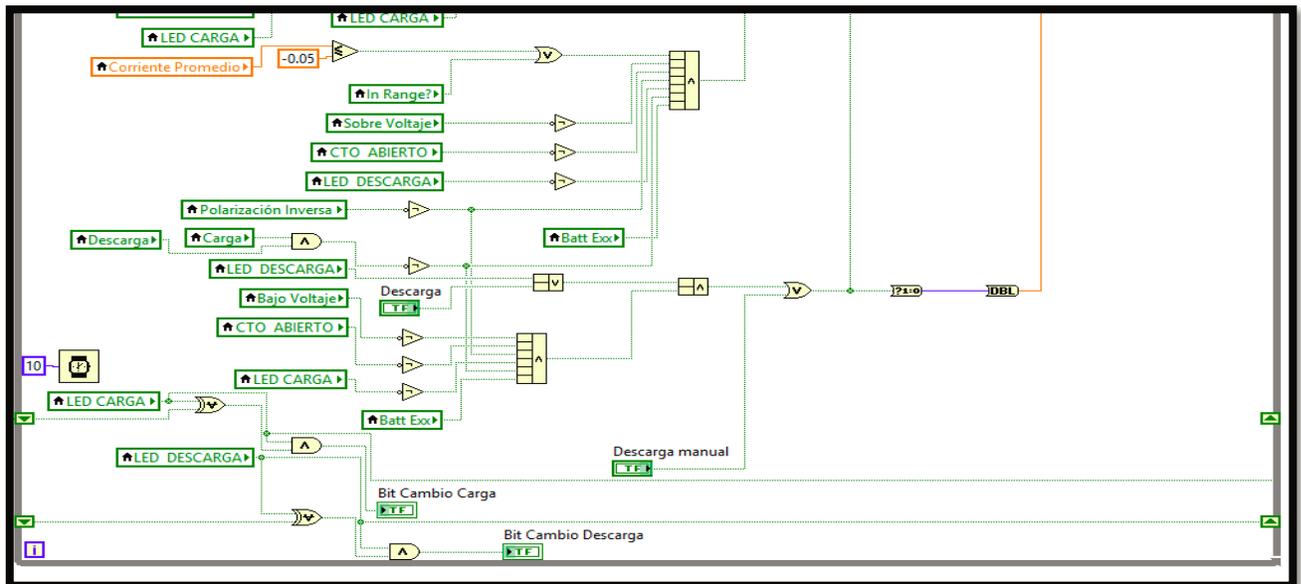


Fig. 31 Bloque referente al control de salidas y seguridad de estas (2/2).

En esta sección del programa se encuentran los permisos para la activación de cada uno de los estados del sistema los cuales están regidos por las condiciones de seguridad, condiciones de existencia de baterías y condiciones de bits. Básicamente este bloque administra las salidas del sistema (Ver Figs. 30 y 31).

## 5.4.-Exportación de datos Labview-Excel

Comúnmente los sistemas de adquisición de datos cuentan con la generación de reportes, con el fin de conocer las variables del sistema en cada lapso. Para este trabajo el reporte generado en Excel nos permite conocer los valores de: (Ver Fig. 32)

- Voltaje de la batería.
- Corriente.
- SOC.
- SOH.
- AHC.

El muestreo de los valores anteriores permitió la construcción de gráficas de carga / descarga y así determinar si dichos procesos se están llevando a cabo de manera correcta. Adicionalmente se conoce el comportamiento de las variables durante el proceso y así determinar si hay variaciones en su comportamiento durante algunas condiciones.

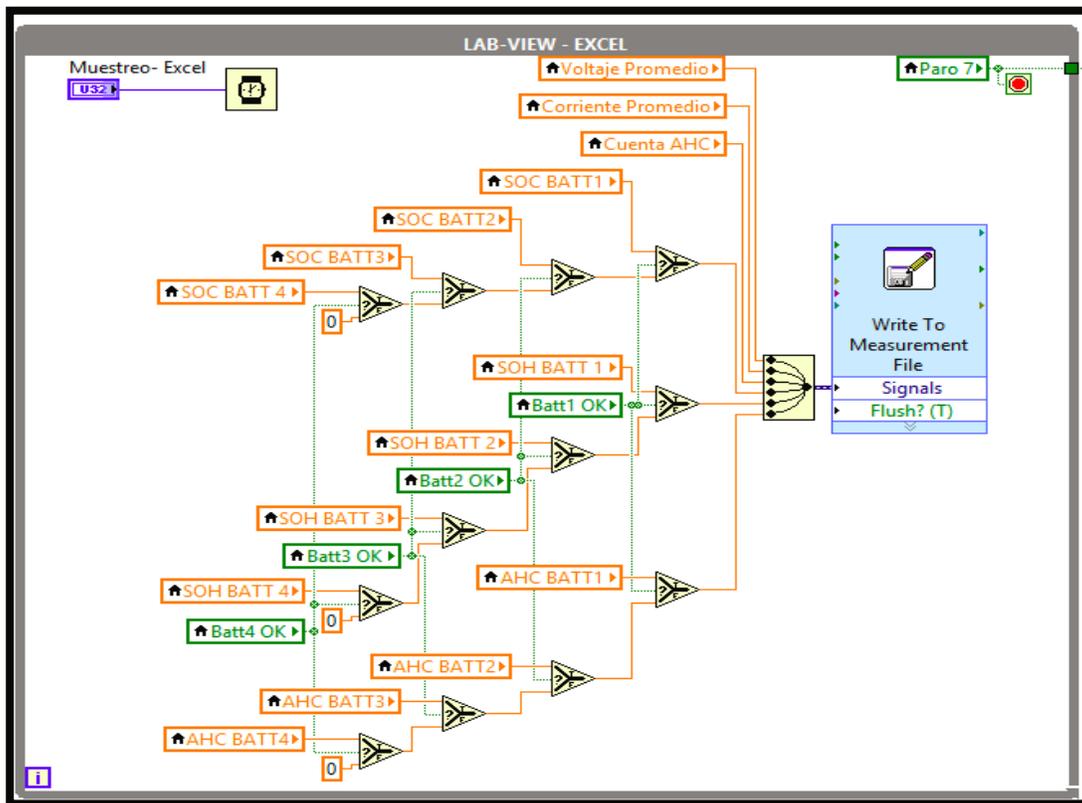


Fig.32 Bloque de Exportación de datos a Excel.

## 5.5.-Interfaz del sistema y funcionamiento

En la Fig. 33 se muestra el panel frontal de la interfaz del BMS propuesto, el cual cuenta con cuatro baterías para monitorear. A continuación, se muestra el procedimiento para arrancar el sistema:

1. Lo primero que se debe hacer es inicializar el sistema, esto se realiza con el botón llamado “Inicio BMS” (En caso de que el sistema no se esté inicializado el sistema no hará nada).
2. Una vez inicializado el sistema se procede a seleccionar la batería a usar, es importante mencionar que solo puede seleccionarse una batería a la vez de lo contrario el sistema se inhabilita.
3. Si la batería seleccionada no cuenta con un historial anterior en el sistema, se pueden ingresar los datos manualmente en la interfaz o bien, el sistema puede iniciarla con los valores que tiene cargados por defecto, para esto es requerido que el usuario seleccione la operación (Carga / Descarga) y posteriormente dar clic en el botón “Batería Nueva” (Referentes a la hoja de datos y tomando condiciones ideales).
4. Después de haber inicializado el sistema el usuario debe seleccionar la operación que desea realizar, cabe hacer mención que este BMS cuenta con dos modos de operación: Manual y Automático. El modo manual está destinado para pruebas de mantenimiento o bien de usuario pues se encarga únicamente de activar los relevadores de control sin importar las condiciones de la máquina de estados o bien de seguridad del sistema. Por otro lado, el Modo Automático está regido por la máquina de estados y condiciones de seguridad del sistema antes mencionados una vez activado el sistema de control comienza a realizar su trabajo y se comienza a generar un reporte.
5. Es importante mencionar que para este trabajo el banco de baterías está conformado por cuatro baterías de marca Panasonic como se mencionó anteriormente por lo que las especificaciones de las baterías son las mismas para las cuatro, sin embargo, si se desea cambiar el modelo o las especificaciones de baterías, se deben ingresar los datos en las secciones “Especificaciones Batería” esto antes de que se inicialice el sistema.
6. En la sección de “Muestreo” se indica cada cuando se muestrea cada bloque del programa, es sugerido que esta sección no sea movida por el usuario pues esto puede afectar la operación del sistema.
7. Como se mencionó anteriormente el sistema BMS propuesto hace el cálculo de SOH una vez que el proceso de descarga está terminado, sin embargo, si se desea obtener un valor de SOH instantáneo el sistema puede calcularlo a través del botón “SOH Manual”, adicionalmente otra de las funcionalidades que el sistema puede realizar de manera manual es el restablecimiento del conteo del AHC, esto a través del botón “Reset Cuenta”.

8. Para el uso del cargador comercial en el algoritmo es necesario activar el botón "Cargador" de lo contrario el algoritmo obedecerá las condiciones para la carga con la fuente controlada.
9. El sistema BMS cuenta con casillas de monitoreo las cuales nos indican el valor del Voltaje en la Batería, Corriente, AHC y el Voltaje en circuito abierto.

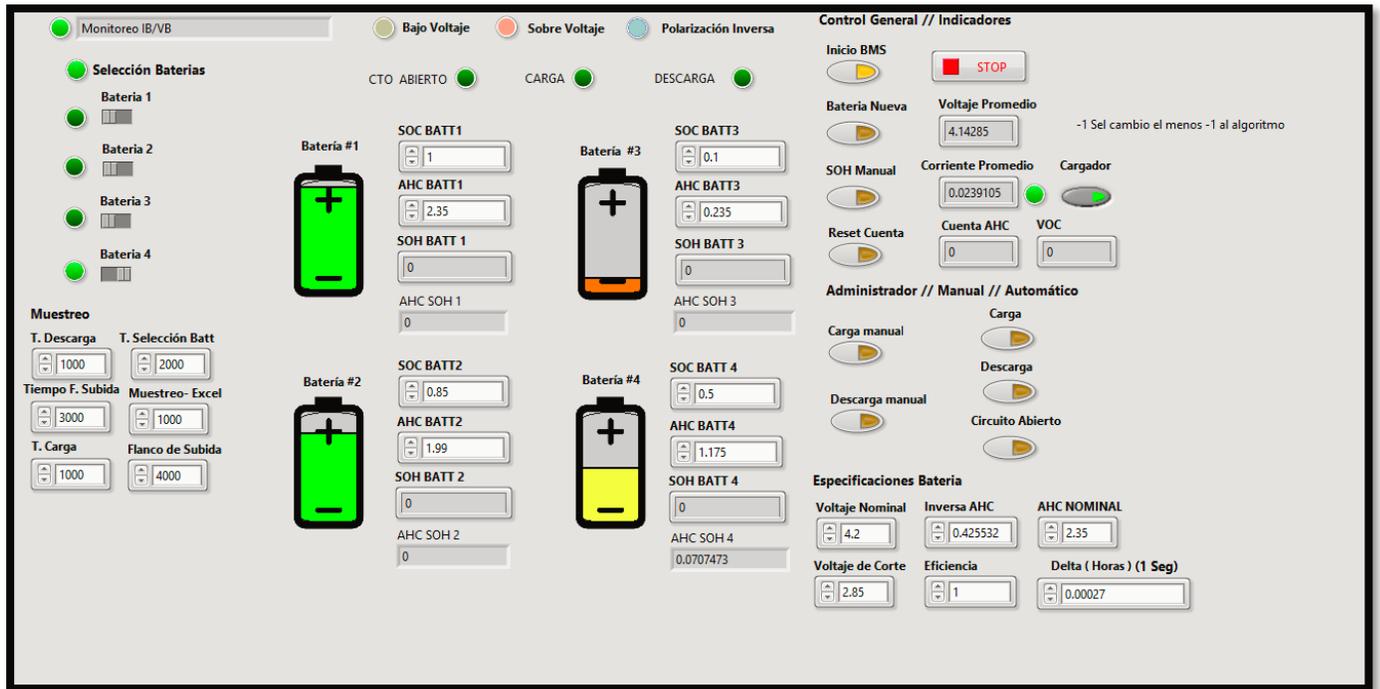


Fig.33 Interfaz del sistema de manejo de baterías propuesto.

## Capítulo 6.-Pruebas Experimentales

Para este trabajo se realizaron 5 pruebas Para el proceso de carga se usó un mismo  $C_R$  de 0.425C para todos los casos; por otro lado, durante el proceso descarga se aplicaron distintos valores de  $C_R$ .

Como se mencionó anteriormente el proceso de carga que se llevó a cabo fue el de CC.CV, sin embargo, aunque se aplicó el mismo principio se usaron distintos instrumentos para llevarlo a cabo. En un primer caso se usó una fuente de voltaje con control de corriente y voltaje como se muestra en la Fig. 34. La batería que se usó para los casos de prueba experimental con fuente constante fue la batería No. 3.

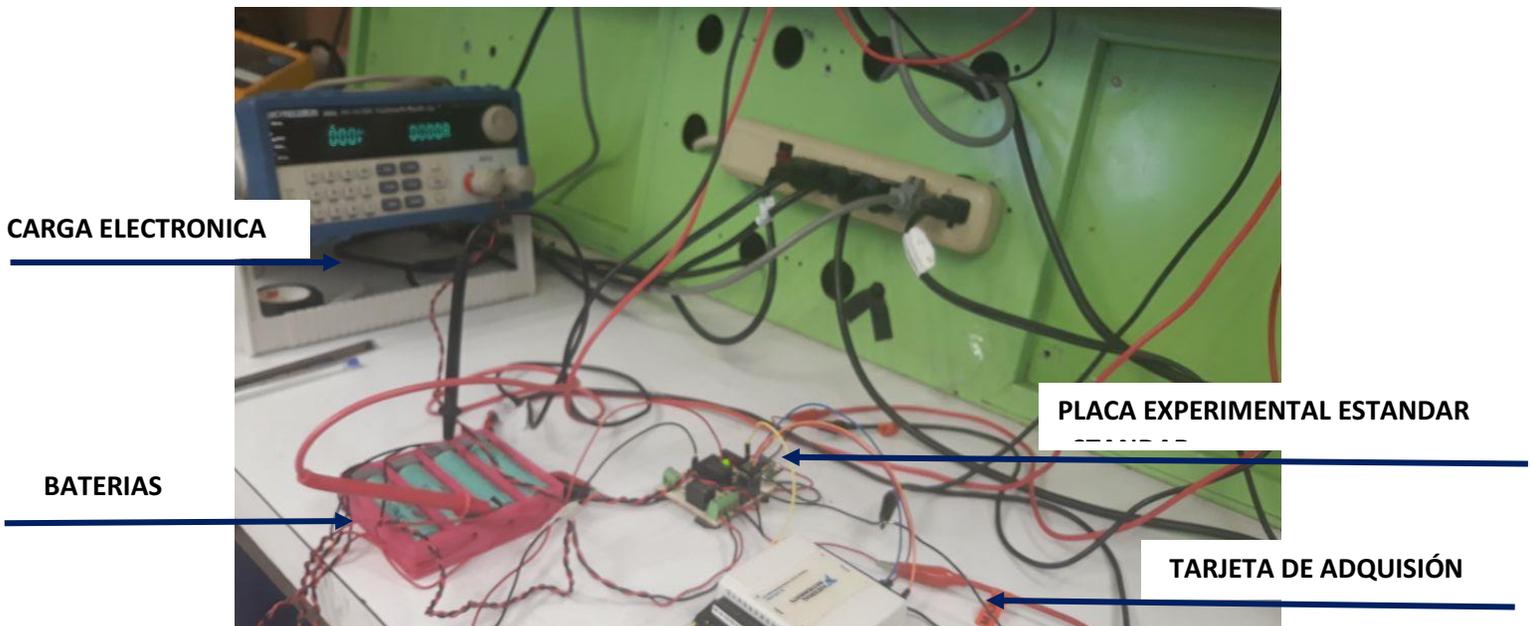


Fig.34 Sistema de carga a través de la fuente de voltaje.

Para el segundo caso se usó el cargador comercial con número de parte TP4056, tal como es mostrado en la figura 35. Para este se usó la batería No. 4.

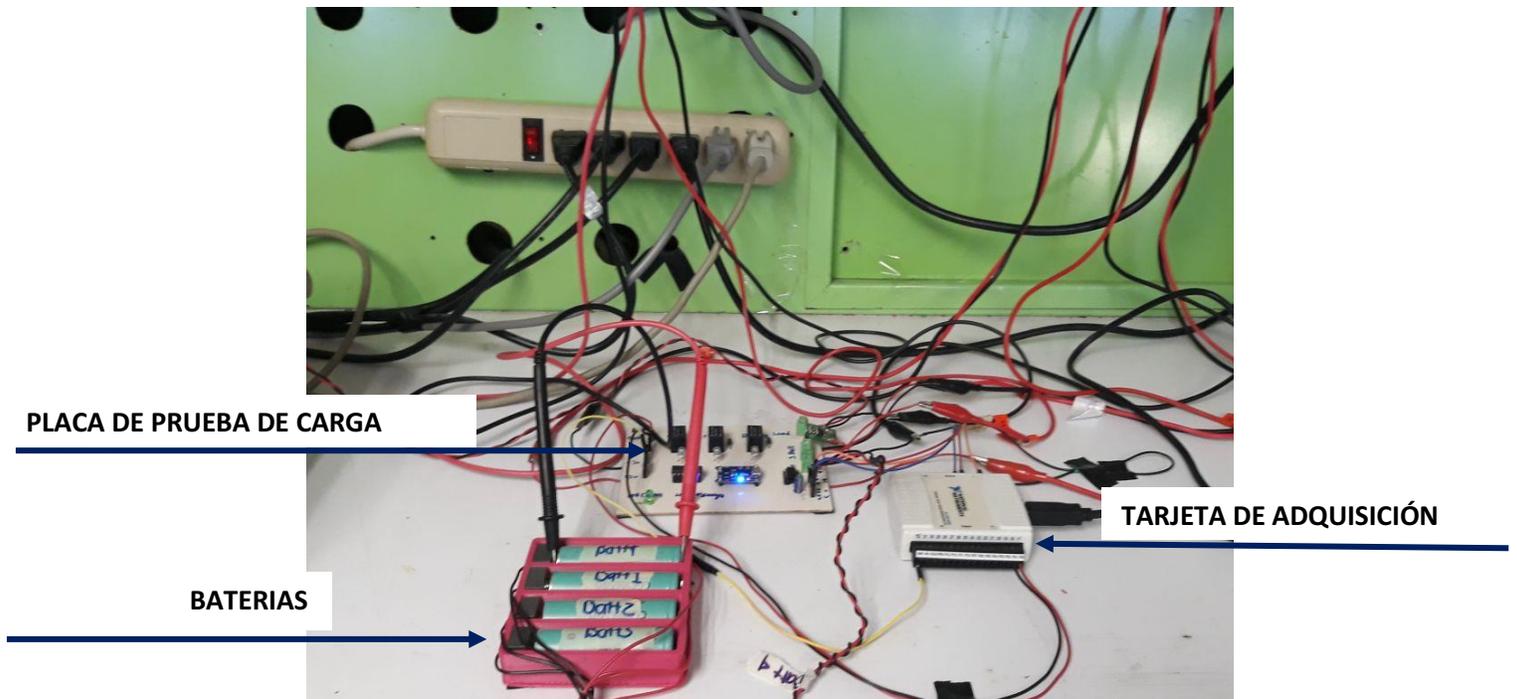


Fig.35 Sistema de carga a través del cargador comercial.

Para el caso de la descarga se usó una carga electrónica, con la cual se controló para que el  $C_R$  fuese constante. (Ver Fig. 36)

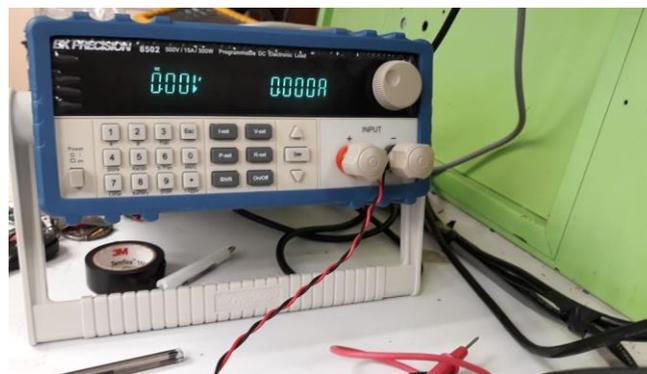


Fig.36 Carga Electrónica para descarga de baterías.

De acuerdo a los reportes generados por el sistema BMS a Excel fue posible la construcción de graficas de carga y descarga.

A continuación, se muestra las curvas de carga y descarga para cada caso:

## 6.1.-Caso I Carga con fuente controlada & Descargas

### 6.1.1.-Carga 1 C

Como se observa en la figura 37 el método de carga para todos los casos es por 2 etapas modo corriente y modo voltaje, el cual podemos corroborar con el usado en las hojas el fabricante en [8].

Para el caso “carga 1C/descarga 0.2C” se obtuvo lo siguiente:

#### **(Calibración de la fuente 4.2 Volts / 1 Amperio/18°C)**

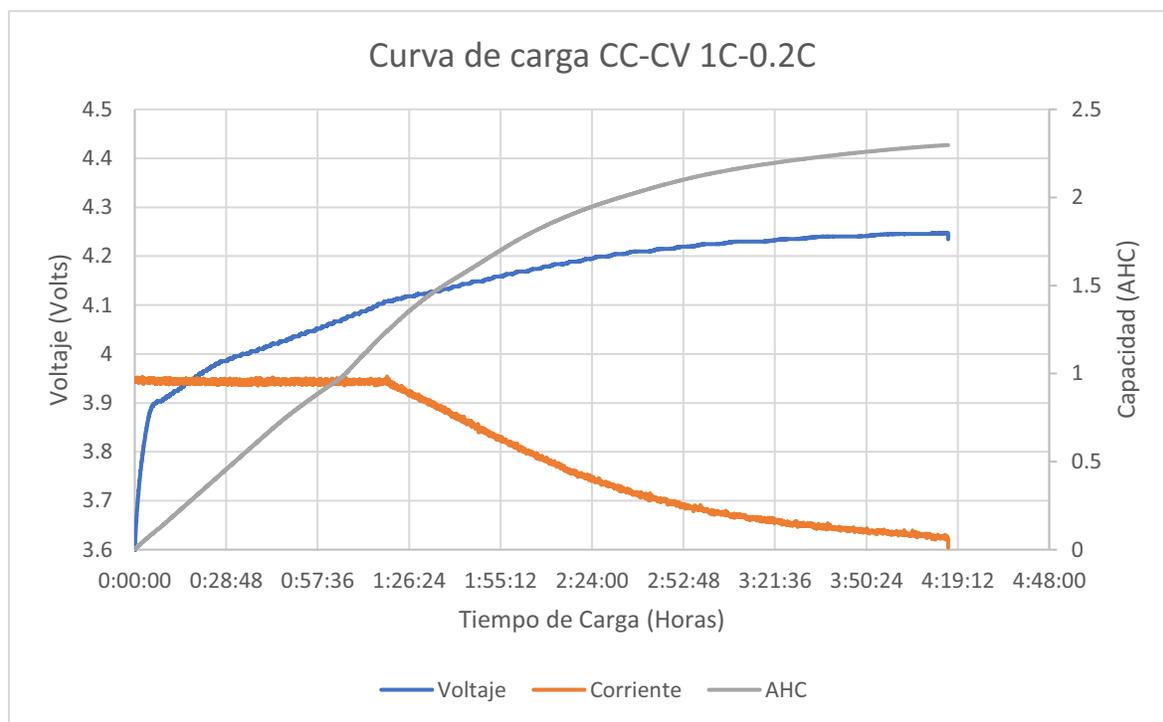


Fig.37 Curva obtenida a través del método CC—CV usado para cargar baterías de ION-Litio para el caso de descarga 0.2C.

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla IV.- Tabla de datos de carga caso 1C-0.2C.

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
Carga-1C-0.2C	3.333527	3.5979	2.29766	2.350*	0.05234	99%	97.77%

### 6.1.2.-Descarga 0.2 C

Los resultados para esta descarga se muestran en las siguientes figuras y tablas.

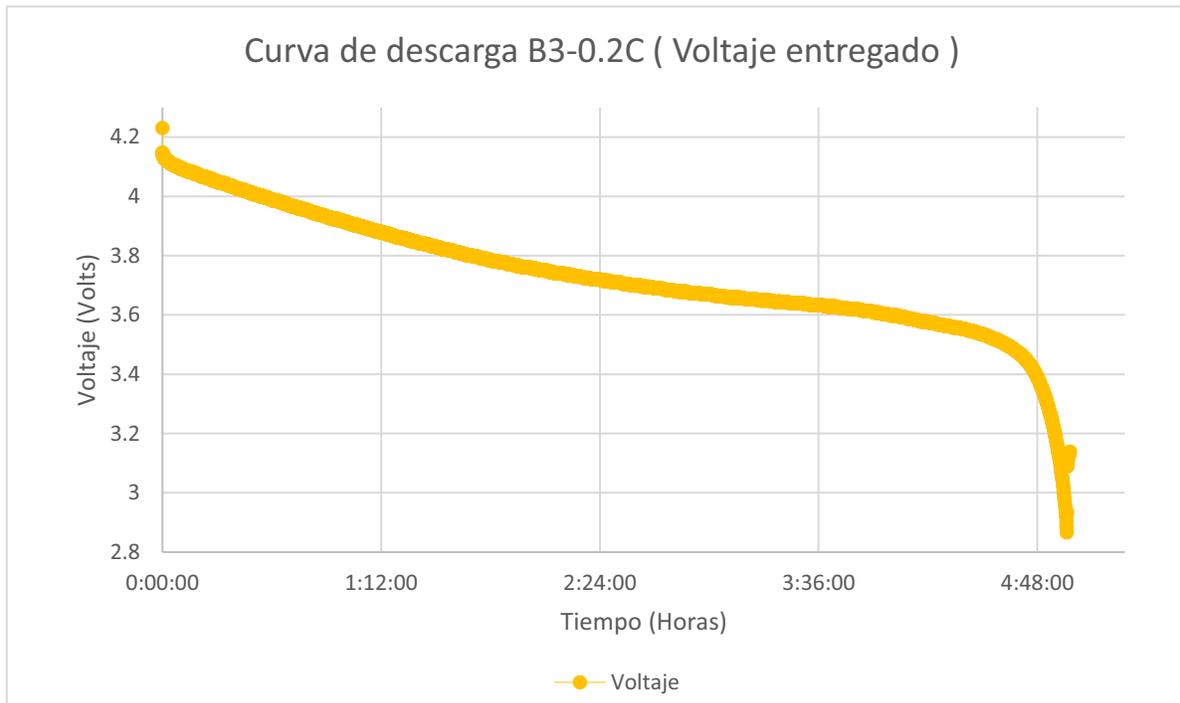


Fig. 38 Curva de descarga 0.2C en función al voltaje de la batería.

Tabla V.- Tabla de datos de voltaje para la Curva de Descarga 0.2C.

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga 0.2C	4.2312	4.1478	1.9710%	4.57 Hrs.

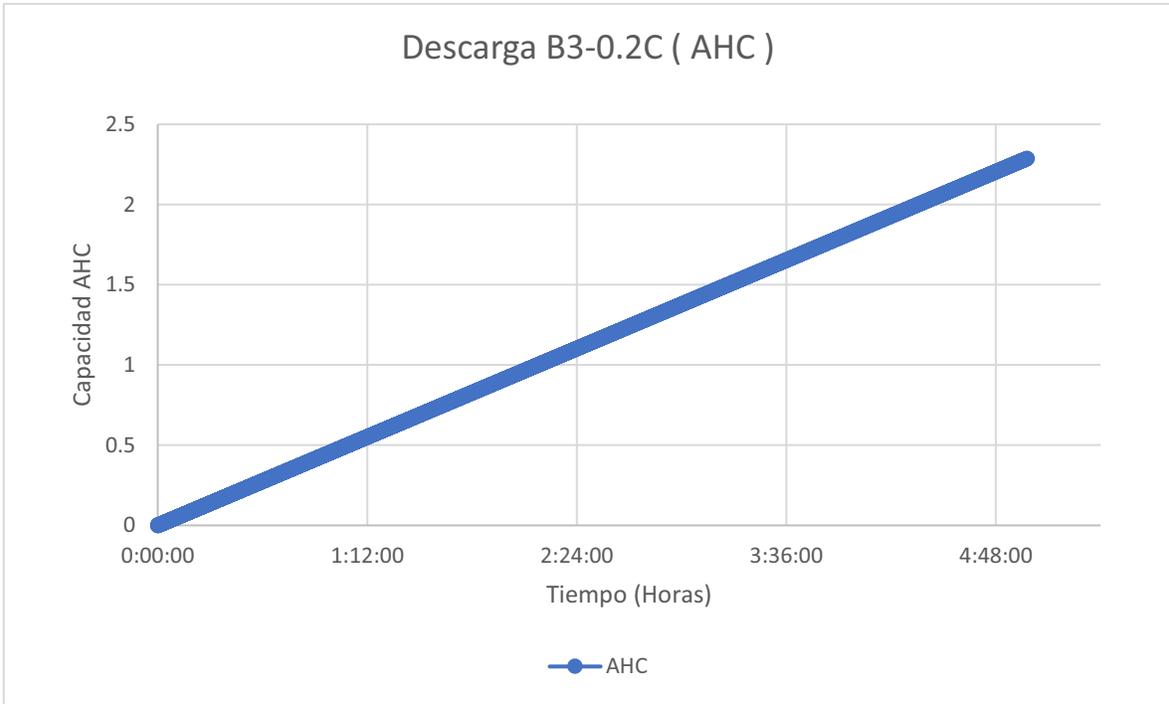


Fig.39 Capacidad entregada por la batería 0.2C.

Tabla VI. Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.2C.

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga 0.2C</b>	2.2714	2.350	+0.0786

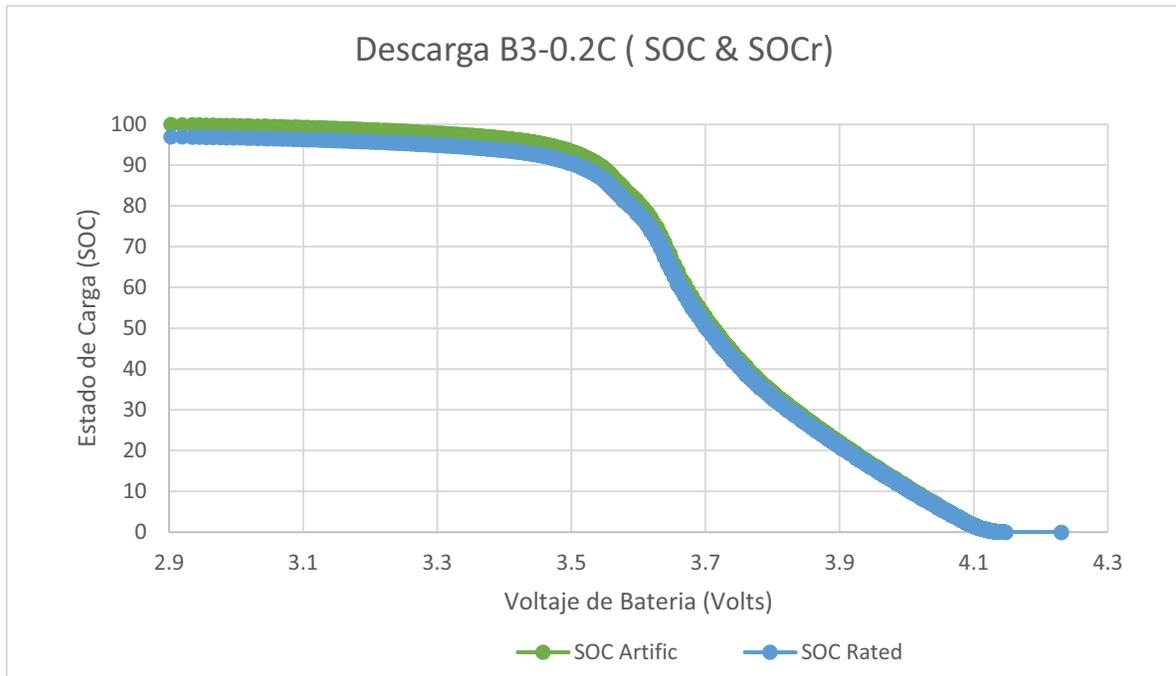


Fig.40 SOC Relativo VS SOC para 0.2C.

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla VII. Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.2C.

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 0.2C	96.6599%	99.9999%

### 6.1.2.1 Cálculo del SOH 0.2C

Usando el método de descarga completo para el caso de 0.2C, y con base a las tablas de carga y descarga, se tiene que:

Tabla VIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	<b>2.29766</b>
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	<b>2.2714</b>
<b>AHC Nominal</b>	<b>2.350</b>

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{2.2714}{2.29766} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 98.85\%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{2.2714}{2.350} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 96.65\%$$

De acuerdo a lo mostrado en la table VI para este caso, se observó que la batería tuvo una eficiencia arriba del 95%, es decir la batería está entregando la mayor parte de la energía que le fue suministrada.

### 6.1.3.-Carga 1 C

Para el caso “carga 1C/descarga 0.4C” se obtuvo lo siguiente:

#### **(Calibración de la fuente 4.2 Volts / 1 Amperio/ 18°C)**

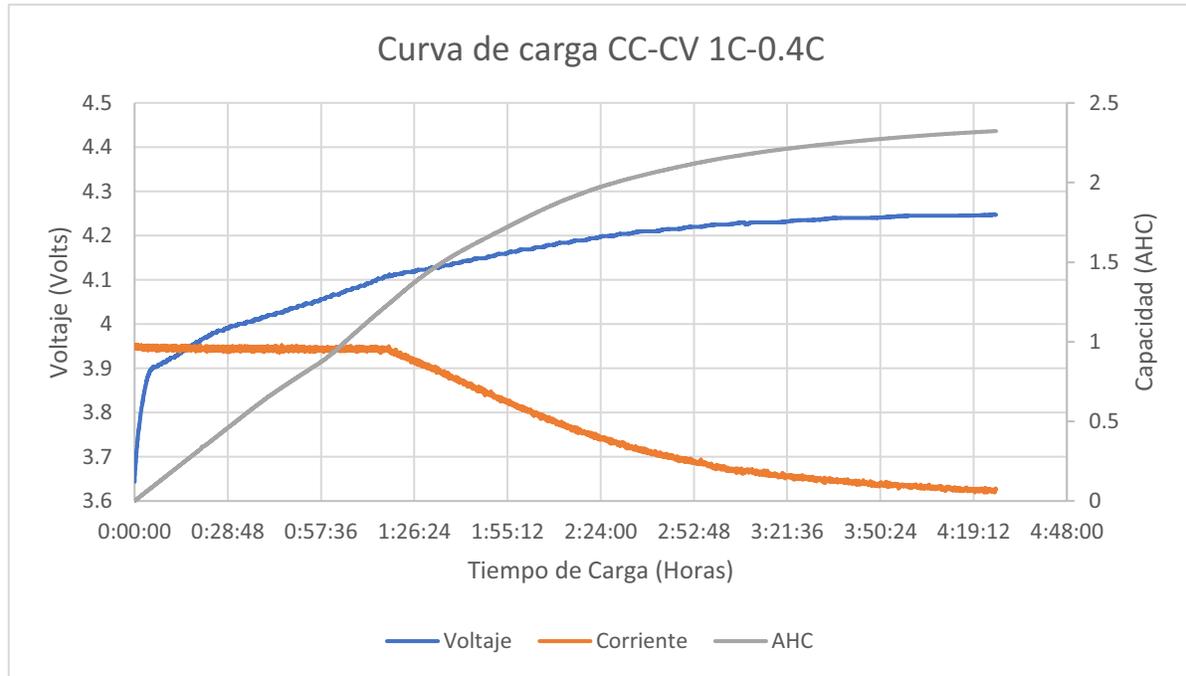


Fig.41 Curva obtenida a través del método CC—CV usado para cargar baterías de ION-Litio para el caso de descarga 0.4C.

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla XIX.- Tabla de datos de carga caso 1C-0.4C.

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
<b>Carga-1C-0.4C</b>	3.5481	3.6436	2.3234	2.350*	-0.0266	100%	98.871%

### 6.1.4.-Descarga 0.4C

Los resultados para esta descarga se muestran en las siguientes figuras y tablas.

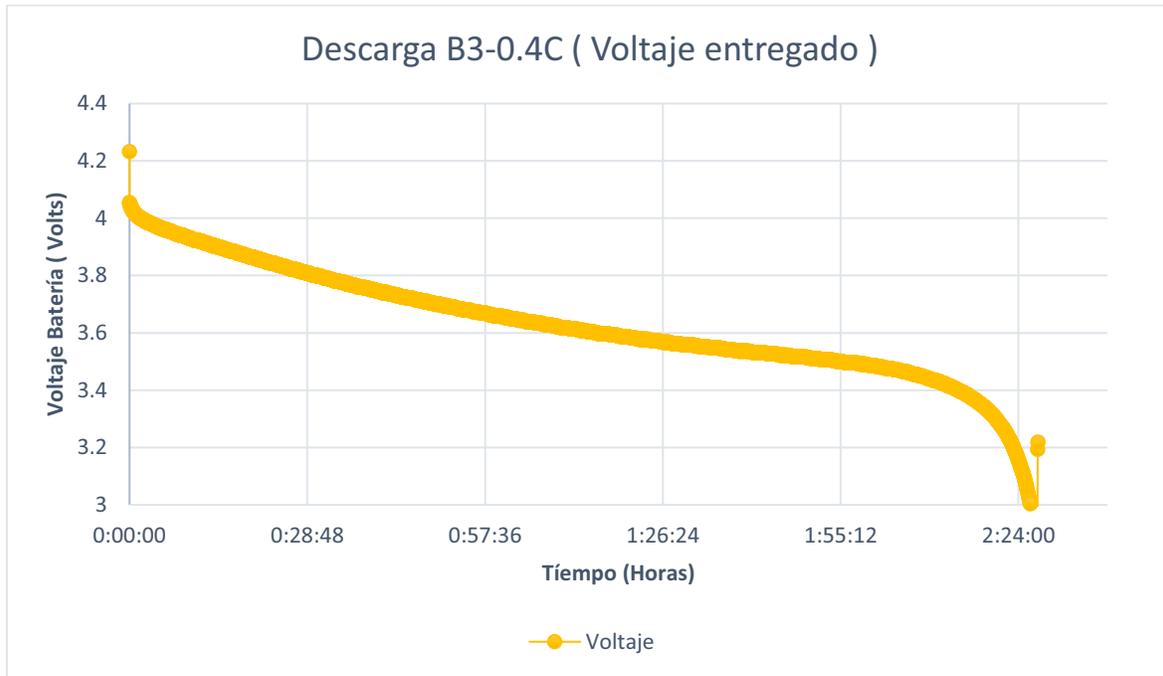


Fig. 42 Curva de descarga 0.4C en función al voltaje de la batería.

Tabla X.- Tabla de datos de voltaje para la Curva de Descarga 0.4C.

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga 0.4C	4.231979	4.05409	4.2034%	2.27 Hrs.

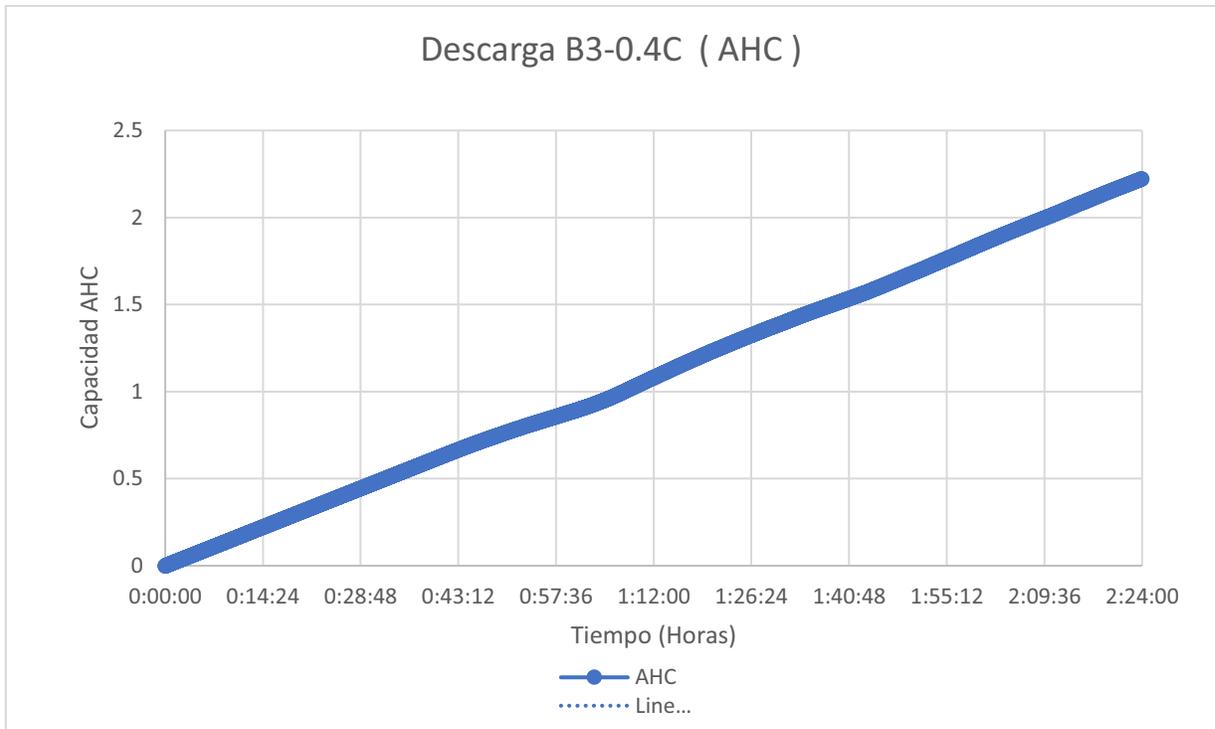


Fig.43 Capacidad entregada por la batería 0.4C.

Tabla XI.- Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.4C.

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga 0.4C</b>	2.26965	2.350	+0.08035

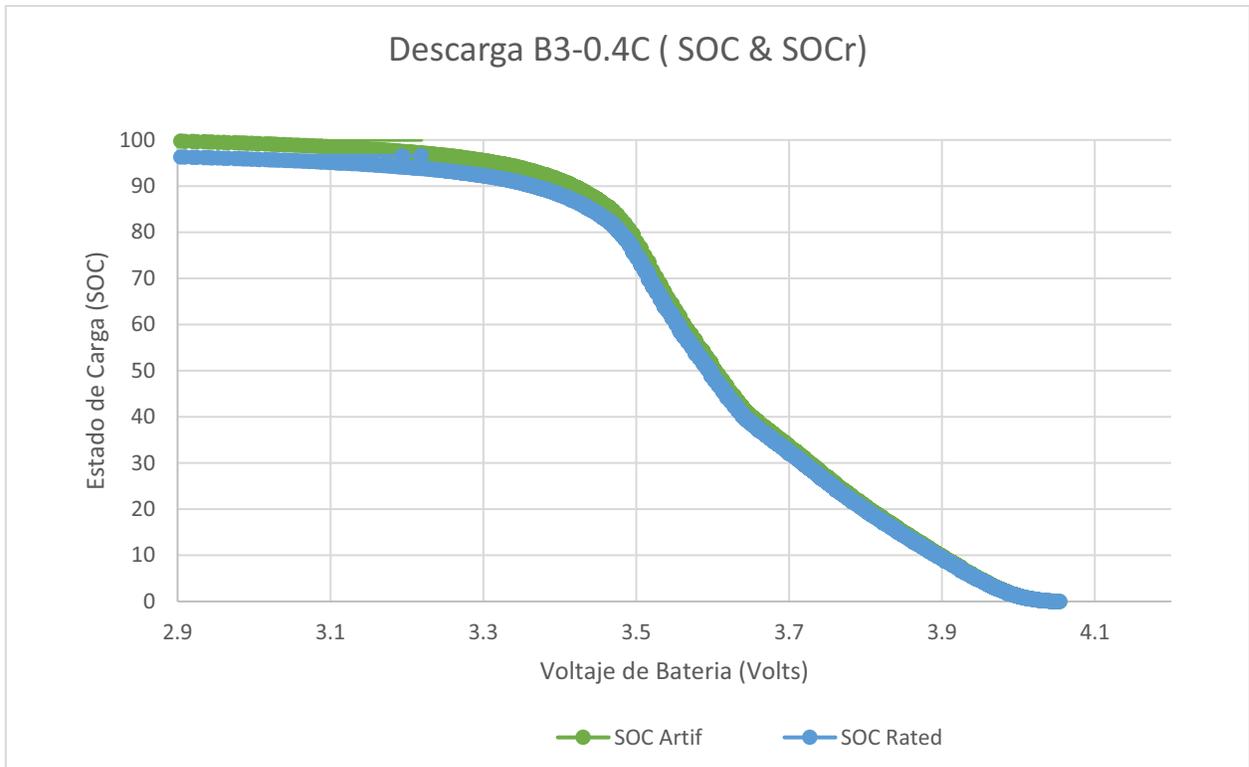


Fig.44 SOC Relativo VS SOC para 0.4C.

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla XII. Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.4C.

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 0.4C	96.5810%	99.9999%

#### 6.1.4.1.-Cálculo del SOH 0.4C

Tabla XIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	2.3234
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	2.26965
<b>AHC Nominal</b>	2.350

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{2.26965}{2.3234} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 97.68\%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{2.26965}{2.350} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 96.58\%$$

Para este caso la batería también se obtuvo una eficiencia arriba del 95% por lo que de la misma manera que en el caso anterior la batería se comporta casi ideal.

### 6.1.5.-Carga 1 C

Para el caso “carga 1C/descarga 0.6C” se obtuvo lo siguiente:

#### **(Calibración de la fuente 4.2 Volts / 1 Amperio/18°C)**

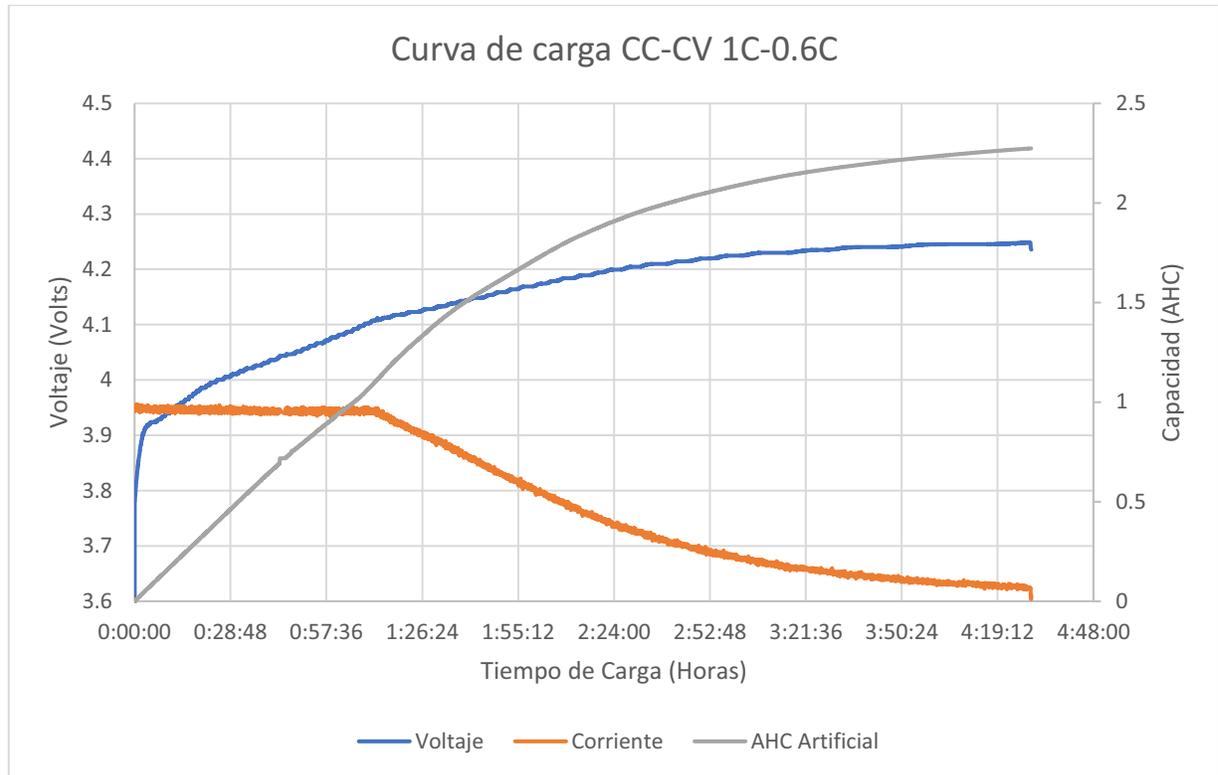


Fig.45 Curva obtenida a través del método CC—CV usado para cargar baterías de ION-Litio para el caso de descarga 0.6C.

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla XIV- Tabla de datos de carga caso 1C-0.6C.

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
<b>Carga-1C-0.6C</b>	3.540939	3.763275	2.24709	2.350	+0.1029	99.99%	96.75%

### 6.1.6.-Descarga 0.6 C

Los resultados para esta descarga se muestran en las siguientes figuras y tablas.

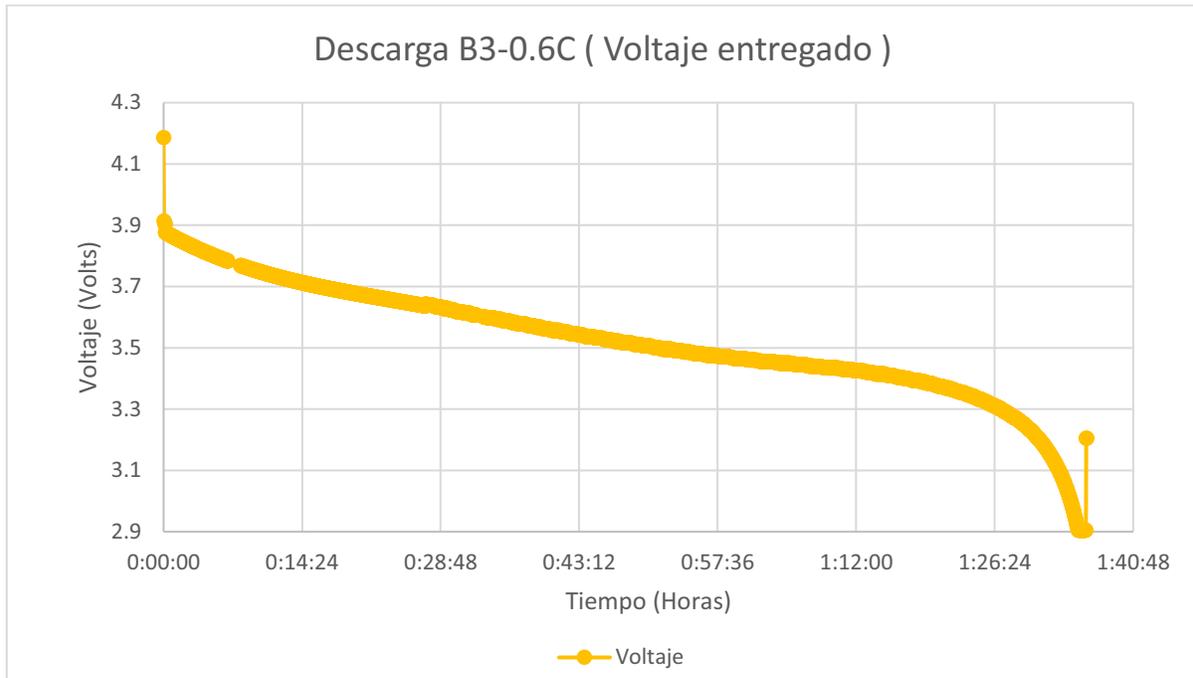


Fig. 46 Curva de descarga 0.6C en función al voltaje de la batería.

Tabla XV- Tabla de datos de voltaje para la curva de descarga 0.6C.

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga 0.6C	4.1863	3.9143	6.4973%	1.35 Hrs.

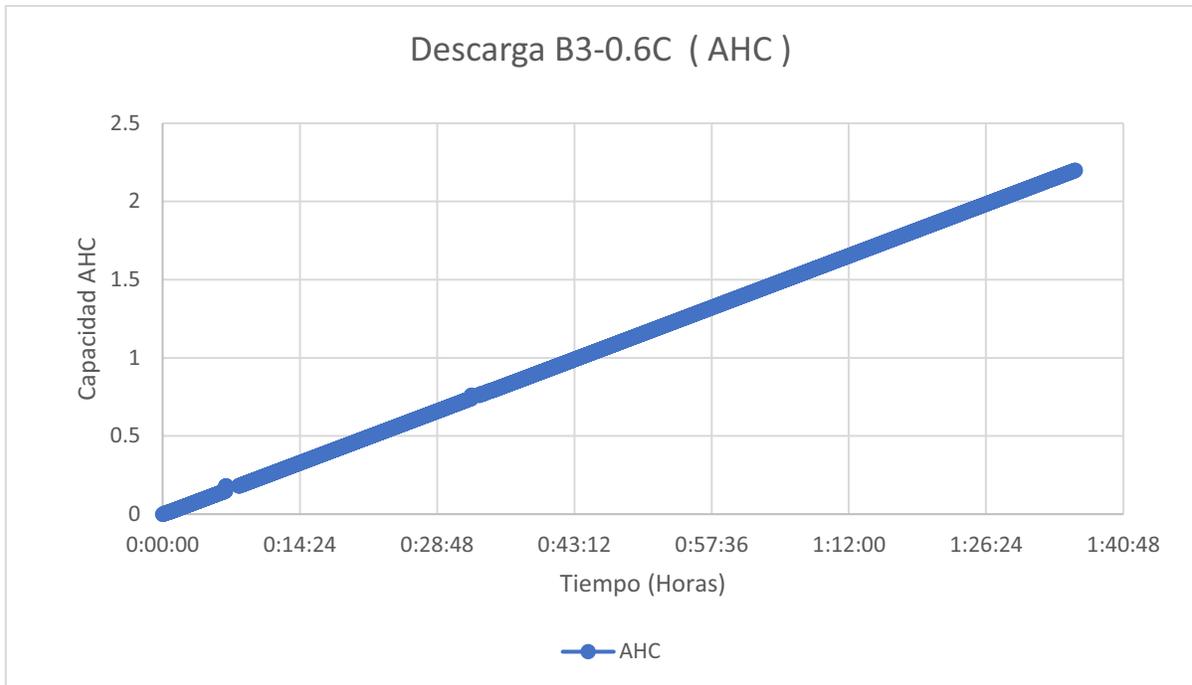


Fig.47 Capacidad entregada por la batería 0.6C.

Tabla XVI.- Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.6C.

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga 0.6C</b>	2.1452	2.350	+0.2048

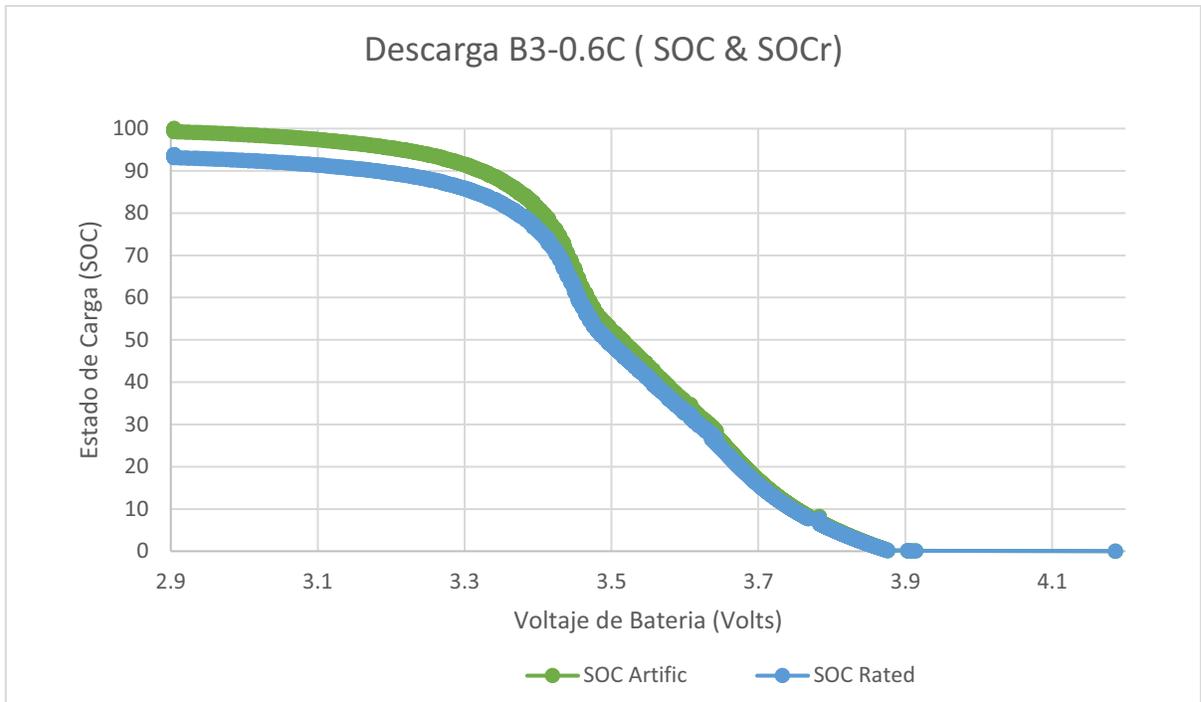


Fig.48 SOC Relativo VS SOC para 0.6C.

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla XVII Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.6C.

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 0.4C	93.8416%	99.9999%

### 6.1.6.1.-Calculó del SOH 0.6C

Tabla XVIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	<b>2.24709</b>
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	2.1452
<b>AHC Nominal</b>	2.350

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{2.1452}{2.24709} X 100..$$

$$SOH_{Practico} = 95.4658\%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{2.1452}{2.350} X 100..$$

$$SOH_{Practico} = 91.2851\%$$

Para este caso la eficiencia disminuyo cerca del 90% por cierto, por otro lado, notamos que la carga aumento, lo que da a pensar que entre mayor carga la cantidad de energía que la batería entrega es menor en comparación a la que le es suministrada.

### 6.1.7.-Carga 1 C

Para el caso “carga 1C/descarga 0.8C” se obtuvo lo siguiente:

#### **(Calibración de la fuente 4.5 Volts / 1.5 Amperio/18°C)**

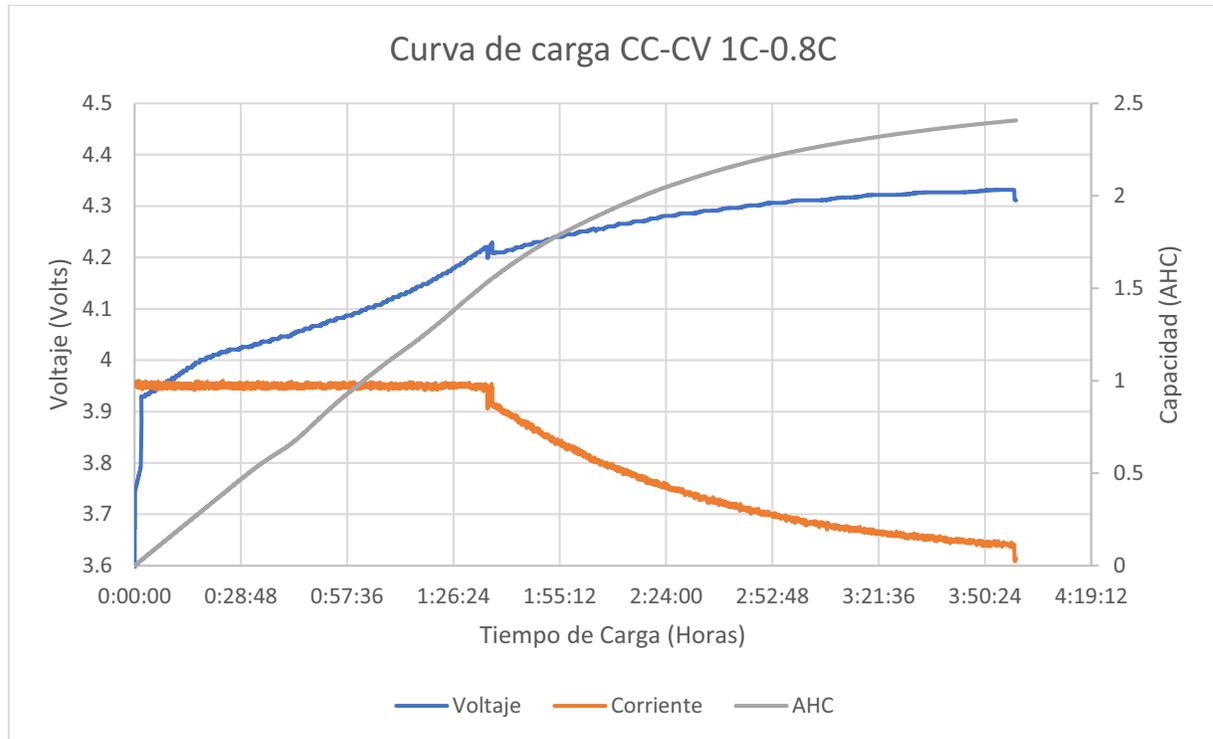


Fig.49 Curva obtenida a través del método CC—CV usado para cargar baterías de ION-Litio para el caso de descarga 0.8C.

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla XIX- Tabla de datos de carga caso 1C-0.8C.

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
Carga-1C-0.8C	3.46565	3.674133	2.4070	2.350	-0.057	100%	102.426%

### 6.1.8.-Descarga 0.8 C

Los resultados para esta descarga se muestran en las siguientes figuras y tablas.

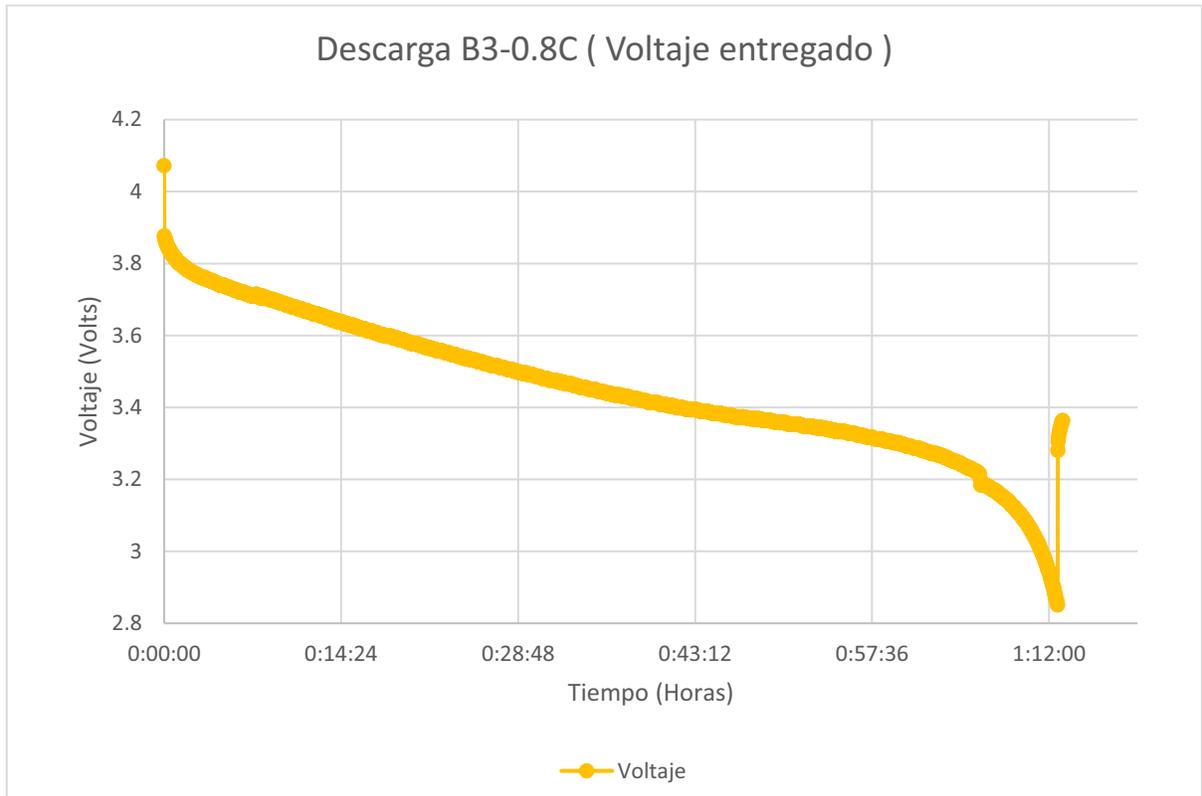


Fig. 50 Curva de descarga 0.8C en función al voltaje de la batería.

Tabla XX- Tabla de datos de carga caso 1C-0.8C.

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga 0.8C	4.22963	3.876465	91.6502%	1.12 Hrs.

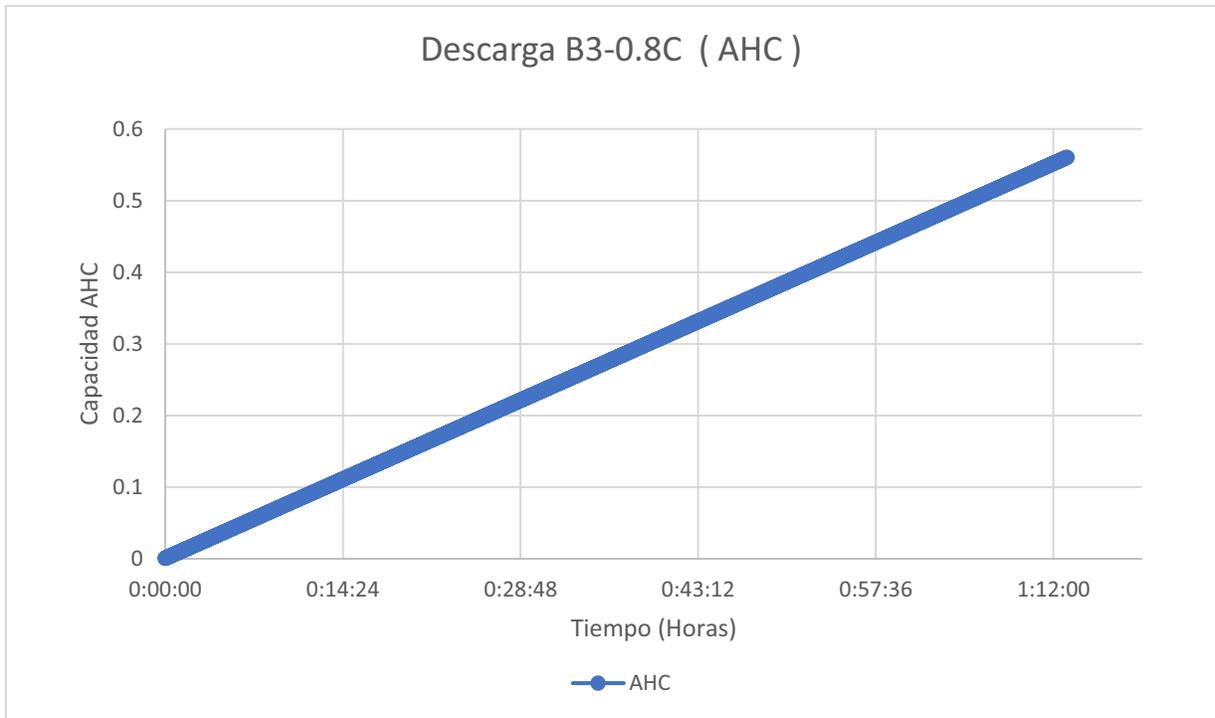


Fig.51 Capacidad entregada por la batería 0.8C.

Tabla XXI.- Tabla de datos de AHC para la curva de descarga 0.8C.

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga 0.8C</b>	2.307274	2.350	+0.0427

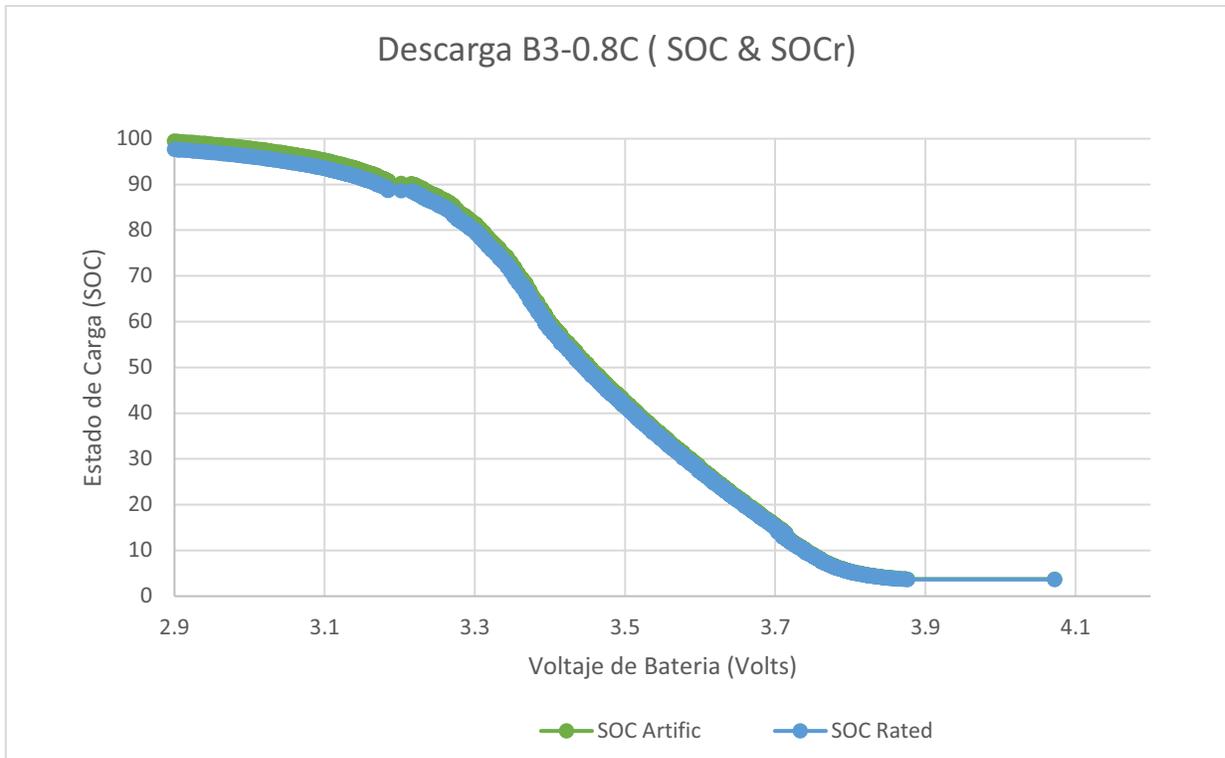


Fig.52 SOC Relativo VS SOC para 0.8C

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla XXII - Tabla de SOC & SOCr para una carga 0.8C

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 0.8C	98.179%	99.9999%

### 6.1.8.1.-Calculó del SOH 0.8C

Tabla XXIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	<b>2.4070</b>
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	<b>2.2572</b>
<b>AHC Nominal</b>	<b>2.350</b>

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{2.2572}{2.4070} X 100..$$

$$SOH_{Practico} = 94.5\%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{2.2572}{2.350} X 100..$$

$$SOH_{Practico} = 96.051\%$$

Para este caso las condiciones de carga cambiaron por lo a partir de este caso por lo que a la batería se le entrega más energía de acuerdo a la hoja de datos, por otro lado, la carga aumento en comparación a los casos anteriores, sin embargo, la eficiencia del acumulador disminuye en comparación a los casos anteriores.

### 6.1.9.-Carga 1 C

Para el caso “Carga 1C/Descarga 1C” se obtuvo lo siguiente:

#### **(Calibración de la fuente 4.5 Volts / 1 Amperio/18°C)**

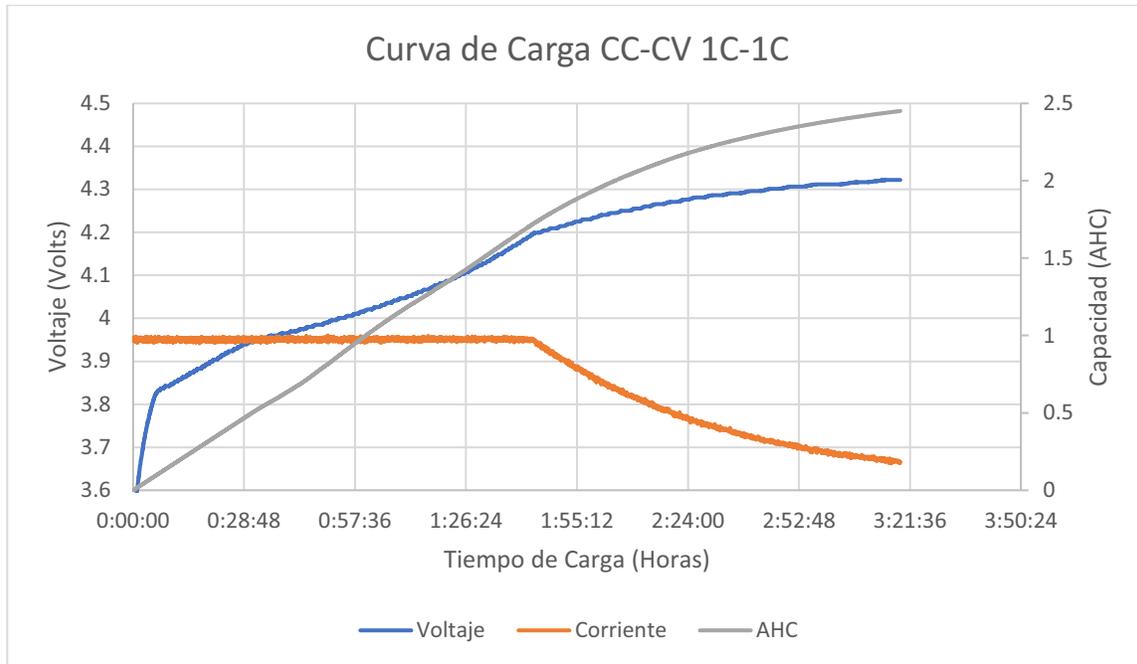


Fig.53 Curva obtenida a través del método CC—CV usado para cargar baterías de ION-Litio para el caso de descarga 1C

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla XXIV- Tabla de datos de carga caso 1C-1C

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
<b>Carga-1C</b>	3.3327	3.4850	2.450	2.350	-0.1	100%	104.264%

### 6.1.10.-Descarga 1C

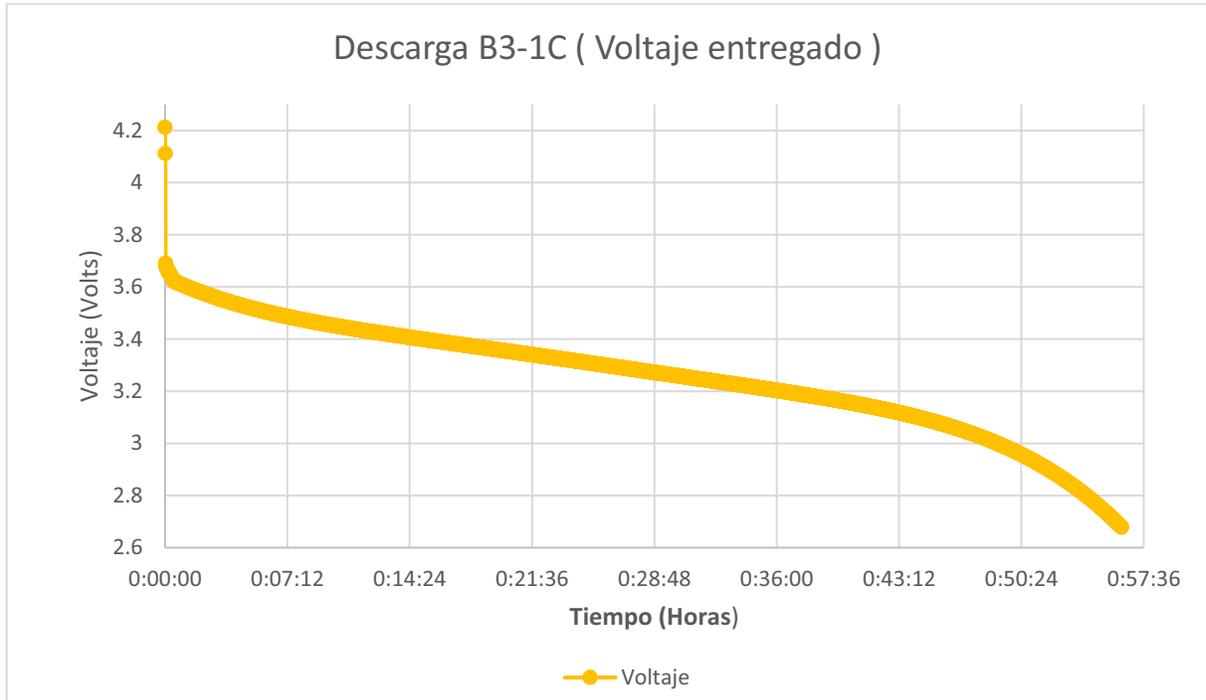


Fig. 54 Curva de descarga 1C en función al voltaje de la batería

Tabla XXV- Tabla de datos de carga caso 1C-1C

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga 1C	4.2134	3.6913	12.39%	0.56 Hrs.

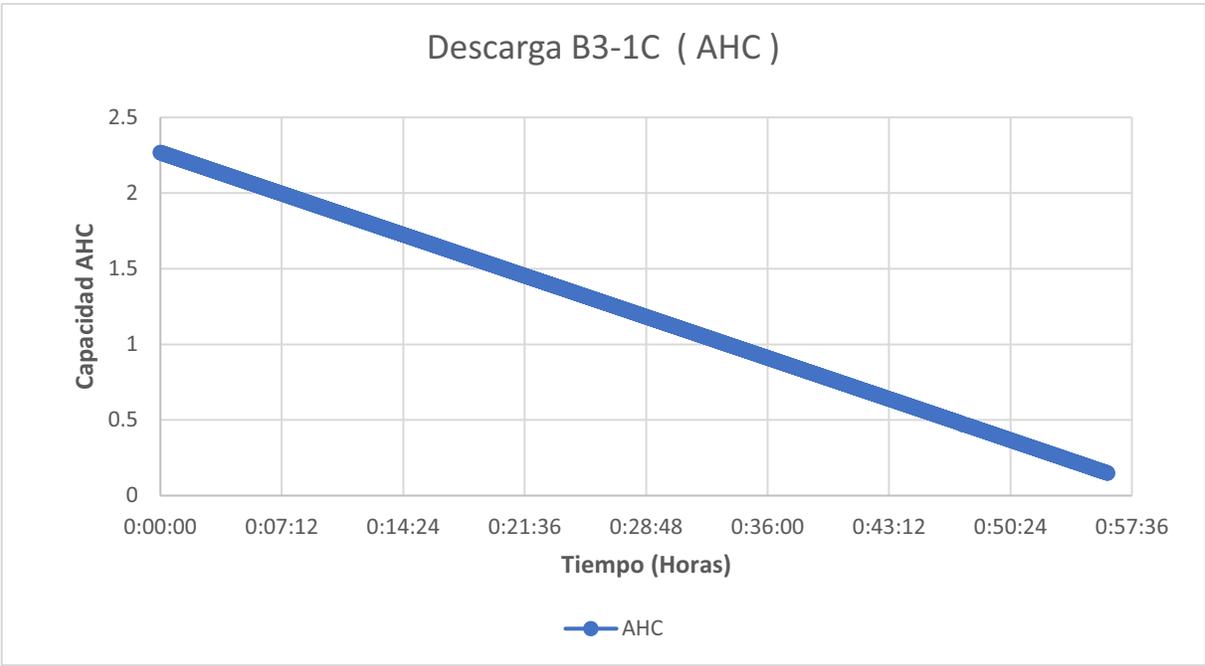


Fig.55 Capacidad entregada por la batería 1C

Tabla XXVI.- Tabla de AHC para una carga 1C

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga 1C</b>	2.12281	2.350	+0.2271

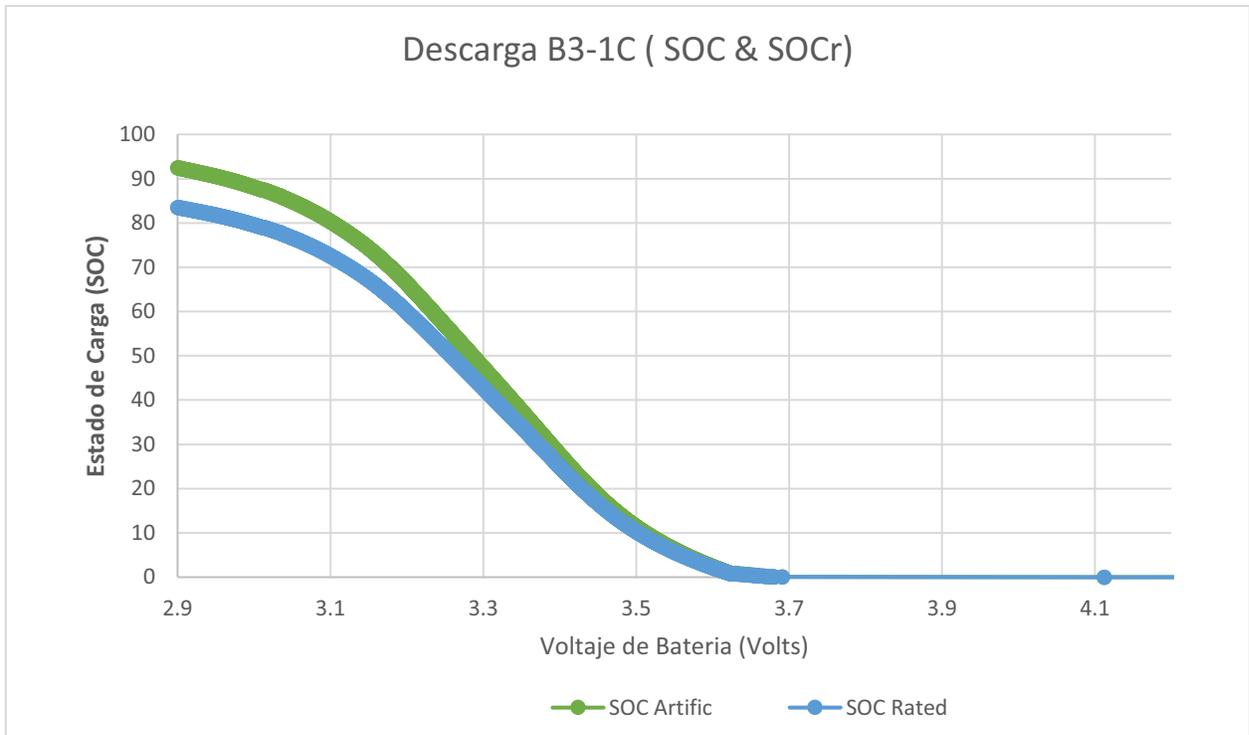


Fig.56 SOC Relativo VS SOC para 1C

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla XXVII- Tabla de SOC & SOCr para una carga 0.6C

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 1C	90.3326	99.9999%

### 6.1.10.1.-Cálculo del SOH 1C

Tabla XXVIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	<b>2.450</b>
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	<b>2.12281</b>
<b>AHC Nominal</b>	<b>2.350</b>

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{2.1228}{2.450} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 86.64 \%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{2.1228}{2.350} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 90.31\%$$

Como es mostrado en los resultados anteriores la cantidad de energía que la batería entrega es mayor cuando la carga que se le conecta es menor, así mismo este fenómeno es presentado para la eficiencia, es decir entre menos sea la carga más eficiencia ofrece la batería pues esta libera casi la misma energía que se le entrega a la carga.

Por otro lado, la batería puede entregar más o menos cantidad de carga de acuerdo a la calibración de la fuente, como es mostrado en los últimos dos casos (0.8 y 1 C) en donde la calibración varía en el voltaje en comparación con los 3 primeros casos, dando, así como resultado mayor carga entregada a la batería por parte de la fuente.

La eficiencia de energía 1 no se cumple usando este método pues como todo este tiene pérdidas en la transmisión de energía, temperatura y condiciones iniciales tal y como la literatura lo señala, sin embargo, para la aplicación de este proyecto se obtuvo una eficiencia promedio del 95.43%, la cual si bien no es perfecta es suficiente para este prototipo.

## 6.2.-Caso II Carga con Cargador Comercial & Descargas

Para el segundo caso se utilizó un cargador comercial para el proceso de carga, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

**(Temperatura 18°C)**

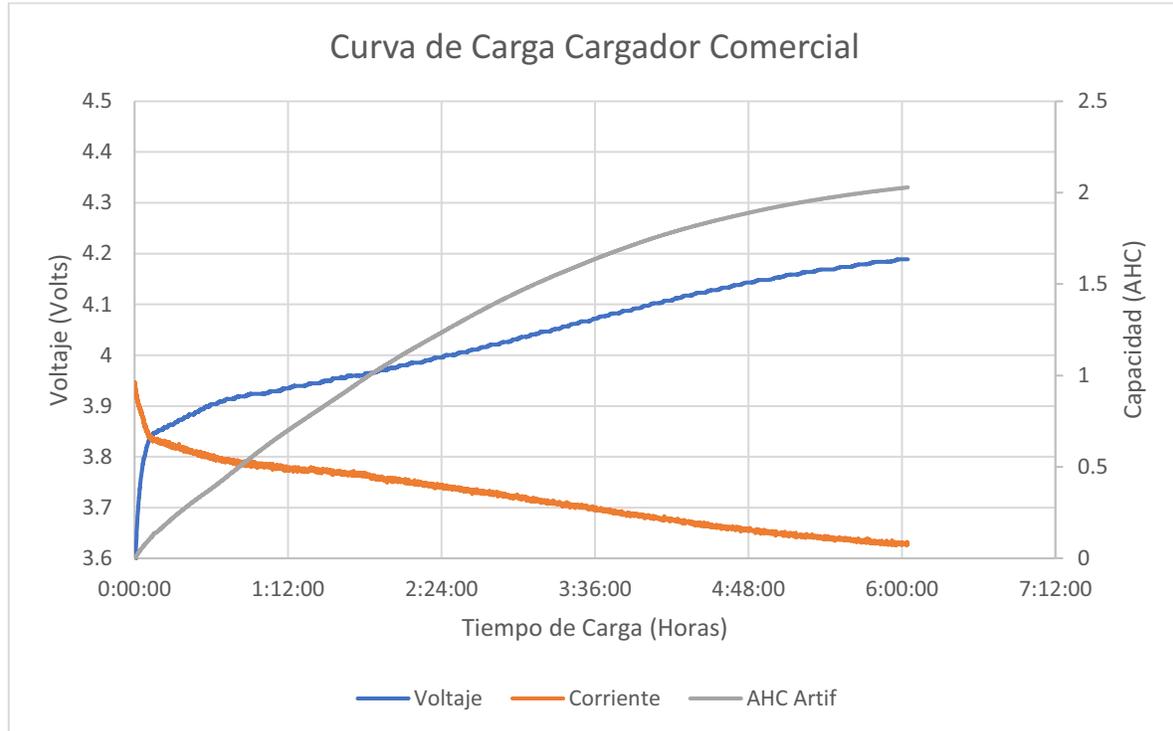


Fig.57 SOC curvas de carga usando un cargador comercial.

A continuación, se presentan los datos de carga obtenidos para este caso de carga:

Tabla XXIX- Tabla de datos de carga caso cargador comercial.

Operación	Voltaje Antes de Carga	Voltaje después de Carga	AHC	AHC Fábrica	Diferencia	SOC Relativo	SOC
<b>Carga-1C-1C</b>	3.22071	3.5055	1.9657	2.350	+0.3843	86.339%	100%

Como es mostrado en la Fig. 57 las curvas de carga difieren en comparación con el método usado anteriormente (CC-CV). La gráfica anterior nos muestra que el método de carga que usa realmente el cargador es a través de voltaje, pues una vez que la batería llega al voltaje nominal del cargador (4.2 Volts) el proceso de carga es interrumpido, añadiendo que la curva de corriente no se mantiene constante sino más bien presenta un comportamiento exponencial negativo, lo que nos da a entender que presenta un comportamiento de CV.

## Descarga 0.8C

El comportamiento de descarga a 0.8C se muestra en las siguientes figuras y tablas.

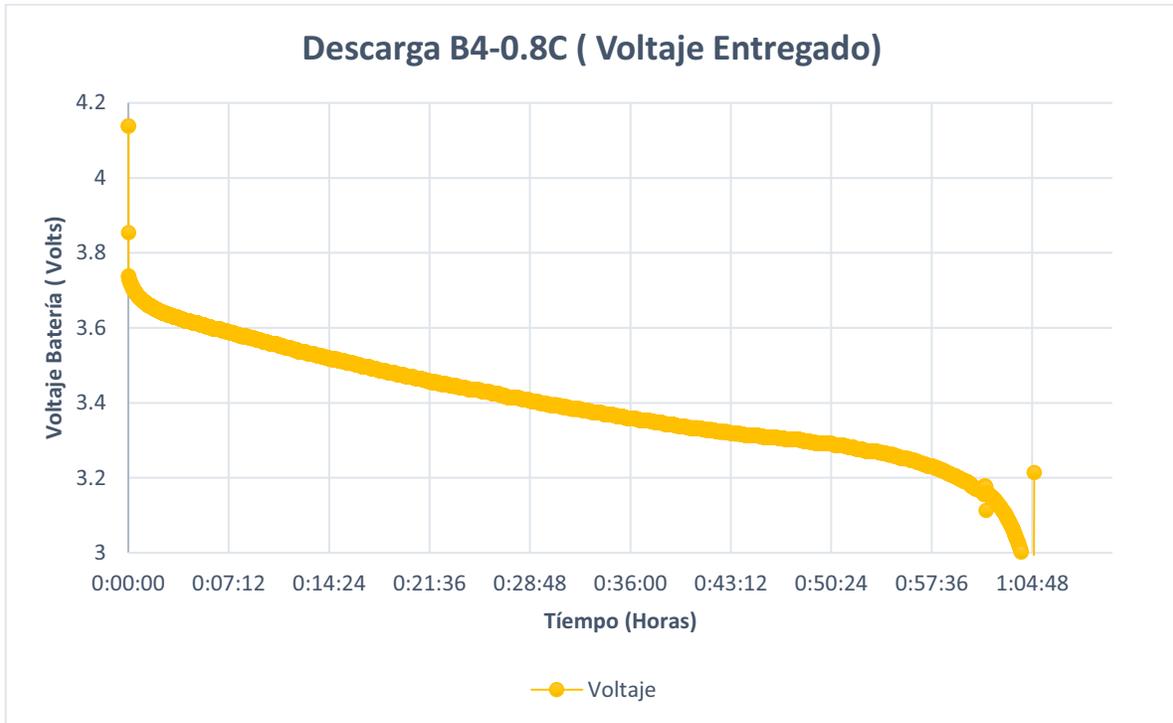


Fig. 58 Curva de descarga en función al voltaje de la batería.

Tabla XXX- Tabla de datos de carga caso 0.8C cargador-comercial.

Operación	Voltaje Antes Desp. Descarga	Voltaje Desp. Descarga	Sobretiro Inicial	Tiempo Total
Descarga Carg-Com	4.1356	3.85372	6.815%	1:05 Hr.

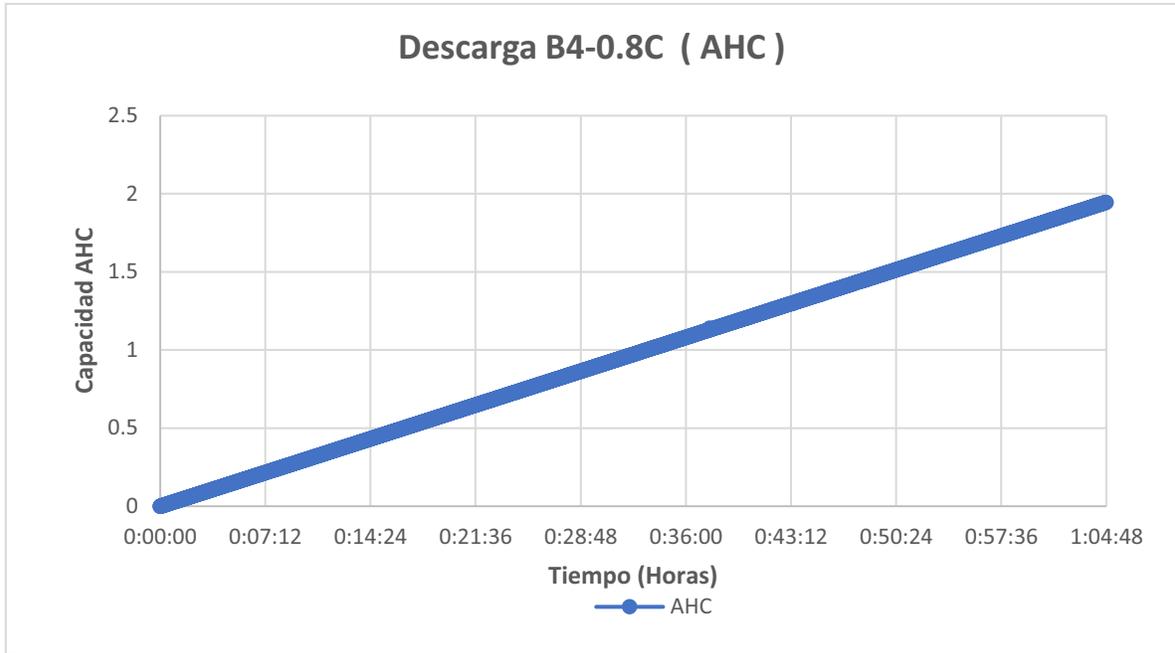


Fig. 59 Capacidad entregada por la batería B4-0.8.

Tabla XXXI.- Tabla de AHC para una carga 0.8C Carg-Com.

Operación	AHC Demandado	AHC Nominal	Diferencia
<b>Descarga Carg-Com</b>	1.9512	2.350	+0.3988

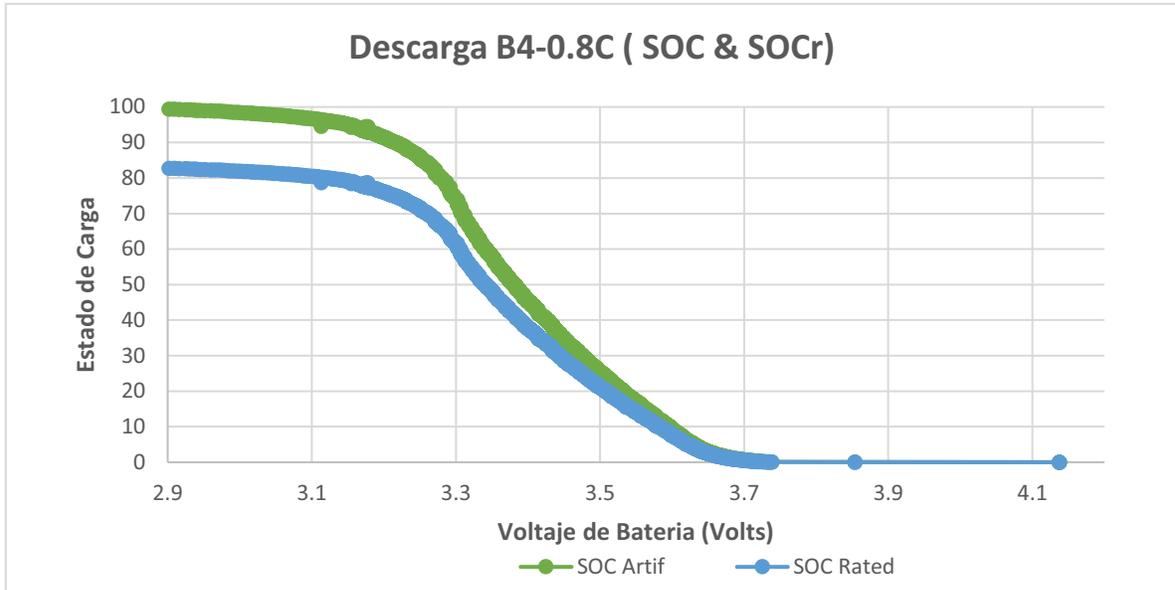


Fig. 60 SOC Relativo VS SOC para 0.8C Carg-Com.

De acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) correspondientes al estado de carga relativo y estado de carga correspondiente mente se tiene que:

Tabla XXXII- Tabla de SOC & SOCr para una carga 0.8C Carg-Com

Operación	SOC Descarga Relativo	SOC Descarga
Descarga 1C	83.033%	99.9999%

Calculó del SOH 0.8C C/ Cargado Comercial

Tabla XXXIII. Tabla de datos de AHC entregados, demandados y nominales.

<b>AHC Entregado Durante la Carga</b>	<b>1.9657</b>
<b>AHC Entregado Durante la Descarga</b>	<b>1.9512</b>
<b>AHC Nominal</b>	<b>2.350</b>

Por lo que:

$$SOH_{Practico} = \frac{1.9512}{1.9657} \times 100..$$

$$SOH_{Practico} = 99.26\%$$

$$SOH_{Nominal} = \frac{1.9512}{2.350} \times 100..$$

$$SOH_{Nominal} = 83.029\%$$

## Capítulo 7.-Regresión Lineal

La regresión lineal es una técnica de modelado estadístico utilizada para describir una variable de respuesta continua en función de una o más variables de predicción. Esta técnica ayuda a comprender y predecir el comportamiento de sistemas complejos o analizar datos experimentales, financieros y biológicos. [23]

Las técnicas de regresión lineal se utilizan para crear un modelo lineal. El modelo describe la relación entre una variable dependiente y (también llamada respuesta) como una función de una o más variables independientes  $X_i$  (llamadas predictoras). La ecuación general para un modelo de regresión lineal es:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon_i$$

Donde  $\beta_0$  representa las estimaciones de parámetros lineales que se deben calcular y  $\epsilon_i$  representa los términos de error.

Existen varios tipos de modelos de regresión lineal:

- Simple: Modelo con único predictor.
- Múltiple: Modelos con varios predictores.
- Multivariante: Modelo para varias variables de respuesta.

Para este trabajo el método que se utilizó fue el de la regresión simple pues solo estamos considerando dependemos de dos variables en cada gráfica (Voltaje, SOC) y solo usamos un modelo predictor que para este trabajo fue polinomial. [23]

En este trabajo solo se realizó una única muestra para la regresión lineal, para carga y descarga respectivamente en los casos de:

Carga 1C

Descarga 0.8C

Cabe hacer mención que la batería utilizada para este caso fue la No. 2

## 7.1.- Regresión Lineal Carga 1C

### (Calibración de la fuente 4.2 Volts / 1 Amperio /25°C)

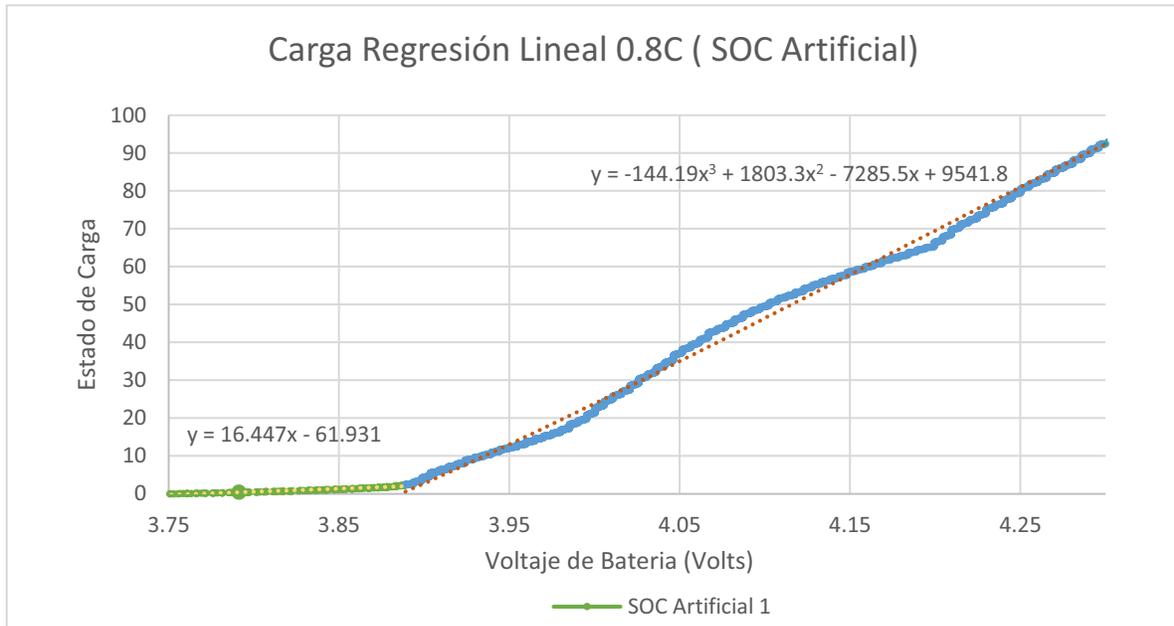


Fig.61 Carga Regresión Lineal 1C (SOC Artificial)

Se tiene la primera etapa de la carga está definida por la ecuación:

$$Y_0 = 16.447x - 61.931.. \quad (21)$$

Tanto la segunda:

$$Y_1 = -144.19x^3 + 1803.3x^2 - 7285.5x + 9541.8 \quad (22)$$

Siendo:

$y$  = Estado de Carga

$X$  = Voltaje de la batería

Haciendo la comparativa del caso de carga para el caso de 0.8C probada anteriormente en la batería No. 3 y haciendo una sustitución de valores en la batería No. 2 de donde se tomaron las curvas para la regresión lineal se tiene que:

Para la Ecuación 21:

Tabla XXXIV. Tabla de datos para regresión lineal de la ec. 21.

Muestra	Valor de la muestra	Resultado de Ec.21	Valor Real	% Diferencia
<b>Voltaje</b>	3.85	1.38995	1.250571	10%

Para la Ecuación 23:

Tabla XXXV. Tabla de datos para regresión lineal de la ec. 23.

Muestra	Valor de la muestra	Resultado de Ec.	Valor Real	% Diferencia
<b>SOC</b>	60	4.1562	4.197739	0.98%

De acuerdo a los resultados mostrados en las tablas anteriores y de acuerdo al margen de error presentado por estos, se pudo caracterizar la batería de ION-LITIO PANASONIC CGR18650D para el caso de carga 0.1C.

## 7.2.- Regresión Lineal Descarga 0.8 C

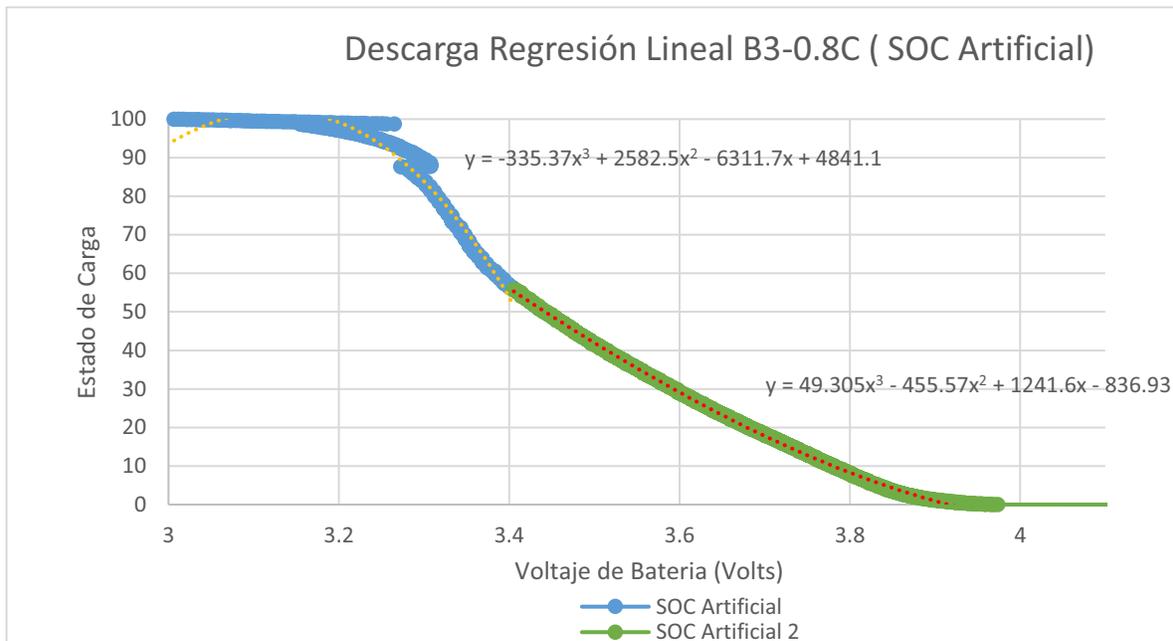


Fig.62 Descarga regresión lineal 0.8C (SOC artificial).

Se tiene la primera etapa de la descarga está definida por la ecuación:

$$Y_0 = -335.37x^3 + 2582.5x^2 - 6311.7x + 4841.1.. \quad (23)$$

Tanto la segunda:

$$Y_1 = 49.305x^3 - 455.57x^2 + 1241.6 - 836.93 \quad (24)$$

Siendo:

$y$  = Estado de carga

$X$  = Voltaje de la batería

Haciendo la comparativa del caso de carga para el caso de 0.8C probada anteriormente en la batería No. 3 y haciendo una sustitución de valores en la batería No. 2 de donde se tomaron las curvas para la regresión lineal se tiene que:

Para la ecuación (23):

Tabla XXXVI. Tabla de datos para regresión lineal de la ec. 23

Muestra	Valor de la muestra	Resultado de Ec.21	Valor Real	% Diferencia
<b>SOC</b>	60	3.3827	3.39389	0.003%

Para la Ecuación 24:

Tabla XXXVII. Tabla de datos para regresión lineal de la Ec. 24

Muestra	Valor de la muestra	Resultado de Ec.	Valor Real	% Diferencia
<b>SOC</b>	30	3.5920	3.581863	0.027%

De acuerdo a los resultados mostrados en las tablas anteriores y de acuerdo al margen de error presentado por estos, se pudo caracterizar la batería de ION-LITIO PANASONIC CGR18650D para el caso de descarga 0.8C.

## Capítulo 8.- Conclusiones y discusión

En este trabajo se presentó la estimación del estado de carga y salud para una batería de ION-LITIO a través de un sistema de administración de energía desarrollado el LABVIEW, así mismo se realizó la comparativa del tipo de carga que ofrece un cargador comercial vs el método de carga usado en este trabajo (CC-CV), y finalmente se caracterizó la batería para el caso de carga de 1C y descarga 0.8C, donde se hizo la comparativa con otra batería del mismo modelo.

El Conteo de Coloumb fue el método seleccionado para la estimación del estado de carga debido a las múltiples ventajas mencionadas anteriormente y en [4]. Sin embargo, durante el desarrollo de este trabajo fueron observadas ciertas “Desventajas “que pueden servir como puntos de mejora en trabajos futuros, tales como:

- Hay pérdidas entre la carga y descarga, es decir, aunque en el proceso carga lleguemos al 100%, al momento de la descarga la batería no nos entrega la misma cantidad de energía que durante el proceso de carga le fue entregada, esto hace pensar que hay una pérdida de AH durante ambos procesos y que el método de Coloumb por sí solo no compensa (No al menos en este trabajo)
- La temperatura es un factor que afecta a la medición de parámetros de carga, la adquisición de datos para la regresión lineal fue tomados a temperatura ambiente de 25°C, mientras que para los casos I y II de este trabajo fue a una temperatura controlada (por aire acondicionado en el laboratorio) de 18 °C afectando así la cantidad de carga (entregada y demandada) y el tiempo que estas duran.

En el caso del cálculo del SOH en la batería se utilizó el método de descarga completa, si bien este es un método algo tardado pues es necesario tener la batería completamente descargada, durante este trabajo por arriba se obtuvieron eficiencias del 80% lo cual se consideraron aceptables, pues aun el trabajo está en fase prototipo.

## Capítulo 9.- Bibliografía

- [1] B. Balagopal y M.-Y. Chow, «The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries,» de *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, In Industrial Informatics (INDIN), July 2015.
- [2] M. Galeotti, C. Giammanco, L. Cinà, S. Cordiner y A. Di Carlo, «Synthetic methods for the evaluation of the State of Health (SOH) of nickel-metal hydride (NiMH) batteries,» *Energy Conversion and Management*, 2015.
- [3] M. Coleman, W. G. Hurley y C. K. Lee, «An improved battery characterization method using a two-pulse load test,» *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, nº 2, 2008.
- [4] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen y Y.-C. Hsieh, «Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries,» *Applied energy*, vol. 86, nº 9, pp. 1506-1511., 2009.
- [5] J. Marchildon, M. L. Doumbia y K. Agbossou, «SOC and SOH characterisation of lead acid batteries,» pp. 001442-001446, November 2015.
- [6] Y. Zou, X. Hu, H. Ma y S. E. Li, «Combined state of charge and state of health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, vol. 273, pp. 793-803, 2015.
- [7] F. Sun, R. Xiong y H. He, «Estimation of state-of-charge and state-of-power capability of lithium-ion battery considering varying health conditions,» *Journal of Power Sources*, vol. 259, pp. 166-176., 2014.
- [8] Panasonic, «Lithium Batteries Ion Batteries Technical HandBook,» 1999.
- [9] D. U. Sauer, G. Bopp, A. Jossen, J. Garche, M. Rothert y M. Wollny, «State-of-charge-what do we really speak about?,» *In The 21st international telecommunications energy conference*, pp. 6-9, June 1999.
- [10] M. Bourne, «Interactive Mathematics,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.intmath.com/integration/5-trapezoidal-rule.php>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [11] S. Piller, M. Perrin y A. Jossen, «Methods for state-of-charge determination and their applications,» *Journal of power sources*, vol. 96, nº 1, pp. 113-120, 2001.
- [12] C. Design, «Battery University,» 2017. [En línea]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge). [Último acceso: Agosto 2017].

- [13] A. Purwadi, A. Rizqiawan, A. Kevin y N. Heryana, «State of charge estimation method for lithium battery using combination of coulomb counting and adaptive system with considering the effect of temperature,» *In Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2014 International Conference on IEEE*, pp. 91-95, December 2014.
- [14] Y.-M. Jeong, Y.-K. Cho, J.-H. Ahn, S.-H. Ryu y B.-K. Lee, «Enhanced Coulomb counting method with adaptive SOC reset time for estimating OCV,» *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1313-1318, September 2014.
- [15] F. Huet, «A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries,» *Journal of power sources*, vol. 70, nº 1, pp. 59-69., 1998.
- [16] C. Lin, A. Tang y W. Wang, «A review of SOH estimation methods in Lithium-ion batteries for electric vehicle applications,» *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1920-1925, 2015.
- [17] O. Tremblay, L. A. Dessaint y A. I. Dekkiche, «A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles,» *In Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007.VPPC 2007.IEEE*, pp. (pp. 284-289), September 2007.
- [18] SUN HOLD ELECTRIC INC., «Relevador Electrónico THD-0501L-SUN Data Sheet (THD Series),» [En línea]. Available: [http://www.sunhold.com/product\\_2.php?SNO2=42&SNO3=58&Vcode=107](http://www.sunhold.com/product_2.php?SNO2=42&SNO3=58&Vcode=107). [Último acceso: Agosto 2017].
- [19] Pololu, «Sensor de Corriente ACS714 Data Sheet (Mca. Allegro),» [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/1185>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [20] Texas Instrument, «Amplificador Operacional LM358A,» [En línea]. Available: <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1345692.pdf>. [Último acceso: 2017].
- [21] National Instruments, «Tarjeta de adquisición de datos USB6008 DAQ NI,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6008.html>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [22] Arduino, «Cargador comercial Ion-Litio TP4056,» [En línea]. Available: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [23] Mathworks, «Regresión Lineal,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/discovery/linear-regression.html>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [24] Z. Yu, R. Huai y L. Xiao, «State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using a kalman filter based on local linearization,» *Energies*, vol. 8, nº 8, pp. 7854-7873., 2015.