



# **UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**Trabajo de Titulación**

**“IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE UNA BATERIA HIBRIDA NI-MH  
MEDIANTE SIMULINK, PARA VERIFICAR LOS ESTADOS DE CARGA Y  
SALUD”.**

**Maestría en  
Sistemas Vehiculares**

**Maestrante:  
Milton Gustavo Romo Vélez.**

**Director de Tesis:  
Efrén Esteban Fernández Palomeque.**

**Diciembre 2019**

# IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE BATERÍA HÍBRIDA NI-MH EN SIMULINK, PARA VERIFICAR LOS ESTADOS DE CARGA Y SALUD.

Gustavo Romo  
Universidad del Azuay  
Escuela de Mecánica Automotriz  
Cuenca, Ecuador  
[mromo@es.uazuay.edu.ec](mailto:mromo@es.uazuay.edu.ec)

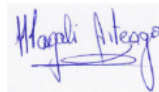
Efrén Fernández  
Universidad del Azuay  
Escuela de Mecánica Automotriz  
Cuenca, Ecuador  
[efernandez@uazuay.edu.ec](mailto:efernandez@uazuay.edu.ec)

**Resumen**—En la actualidad en los vehículos eléctricos e híbridos la tecnología eléctrica y renovable, está estrechamente relacionada con la biodiversidad y con la protección de los ecosistemas en general. El objetivo del presente trabajo, es el desarrollo e implementación de un modelo matemático-eléctrico de primer orden para llegar a obtener una verificación del estado de carga (SOC) y de salud (SOH) de las baterías híbridas de níquel-metal hidruro (Ni-MH) presentes en vehículos híbridos; Mediante la interpretación de estos parámetros permite conocer en porcentajes la vida útil y el estado de carga de la batería. Además, para el análisis y estimación del estado de carga es importante conocer diferentes magnitudes y sus valores de operación como son el voltaje, resistencia y corriente. Estas magnitudes son parámetros que son analizados por la Unidad de gestión de la batería (BMS) para determinar la estimación del estado de carga y de salud de este tipo de baterías. Para el desarrollo e implementación del modelo se utiliza herramientas de simulación como son Matlab y el toolbox de Simulink en donde se diseña un modelo eléctrico de primer orden para baterías de Ni-MH. Para la obtención de variables necesarias para el cálculo de modelo se utiliza el método denominado *Fitting Curve*. Para la validación se implementa un contador de amperios hora que se agrega al modelo propuesto y se toman diferentes valores de capacidad de voltaje y corriente de descarga en laboratorio.

**Palabras Clave**— Simulink, SOC, SOH, BMS.

**Abstract.** -Currently in electric and hybrid vehicles, renewable and electrical technologies are closely related to biodiversity and the protection of ecosystems in general. The purpose of the present research is to develop and implement an electronic-mathematical first order model, to verify the state of charge (SOC) and health (SOH) of nickel-metal hydride hybrid batteries, present in hybrid vehicles. The interpretation of this parameters will lead to know the useful life and state of charge of the battery in percentages. To analyze and estimate the state of charge, it is important to know different magnitudes and their operation values, such as the voltage, resistance and current. These magnitudes are turned into parameters that are analyzed by the Battery Management System (BMS). This system will dictate the state of charge and health of this type of batteries. To the development and application of this model, simulation tools such as Matlab and Simulink toolbox in which the design model will be apply, are used. Also to obtain the necessary variables for the model calculation, the method *Fitting Curve* is used. To validate an amp counter is implemented, which is added to the proposed model. Different values of voltage capacity and discharge current are taken in the laboratory.

Translated by



Milton Gustavo Romo Vélez

## I. INTRODUCCIÓN

El ser humano tiene la necesidad de consumir energía de diferentes fuentes, sean estas para la movilidad, alimentación, construcción, entre otras. Bajo este marco, se debe asumir que históricamente la energía se ha constituido en una fuente de vida para la humanidad [1].

En la industria automotriz existe grandes avances que día a día se van desarrollando con la finalidad de reducir el consumo de combustible y la contaminación ambiental. Por eso el estudio de nuevas energías y formas de movilidad, es el ejemplo de los vehículos híbridos eléctricos (HEV's), que trata de cumplir con dichas funciones. Uno de los componentes importantes de los vehículos HEV's son las baterías híbridas, que cumplen con la función de suministrar la cantidad de energía necesaria para alimentar el inversor eléctrico y con ello suministrar la energía para mover los motogeneradores presentes en el sistema de tracción eléctrica. Los vehículos híbridos se componen de un motor de combustión interna y un motor eléctrico (Fig.1); ambos elementos trabajan conjuntamente donde el motor eléctrico se encarga de generar energía eléctrica para la propulsión del vehículo y en caso de ser mayor la exigencia para velocidades superiores entra en funcionamiento el motor de combustión. En el momento de frenado, la energía generada por el motor eléctrico es aprovechada por el sistema inversor para ahora almacenar energía eléctrica en las baterías híbridas o de alta tensión, esta función se la conoce como "Frenos Regenerativos" [2].

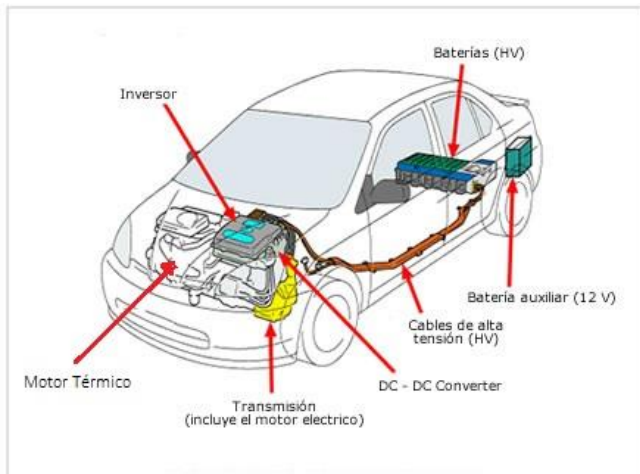


Fig. 1 Esquema Vehículo Híbrido.

El inconveniente en este tipo de baterías la vida útil del banco de baterías, para solucionar este problema se hacen muchos estudios y proyectos de avances y optimizaciones en la referida tecnología.

En artículos recientes se utilizan varios modelos matemáticos-eléctricos de primer orden y segundo orden para poder observar el rendimiento en tiempo real de la batería híbrida, antes de ser diseñada [3].

Un modelo, “Es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja [...] que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”.

En el estudio realizado sobre el modelado de la batería en vehículos eléctricos, explican que el SOC se puede comparar con el indicador de combustible de un vehículo de combustión interna, manifiestan que el cálculo del SOC debe estimarse con base en parámetros como temperatura, corriente y voltajes individuales de las celdas. En dicho estudio de la estimación del SOC y del SOH, propone que una buena estimación del SOC y SOH sirve para una gestión óptima de la BMS, para poder evitar sobrecargas o descargas excesivas que afecten a la batería. Este autor se basa en el modelo de circuito equivalente de segundo orden para obtener la estimación del SOC. Los resultados de este estudio fueron del 90% de confianza debido al método utilizado, aconsejan que los modelos que se utilicen para estos tipos de proyectos sean de fácil resolución y comprensión para poder obtener datos válidos y certeros [4].

El autor del artículo citado explica que los resultados con el modelado de las celdas bajo ciertas condiciones, obtuvieron resultados muy aproximados a los valores medidos mediante experimentos, el ajuste que se obtuvo fue bueno y la aproximación fue cercana a la medida [5].

Dichos artículos antes mencionados realizan estudios de baterías de composición de Ion-Litio, la mayoría implementan el modelo utilizando métodos complejos y poco entendibles para llegar a una estimación de SOC y SOH. El presente artículo plantea implementar un modelo de batería híbrida Ni-MH utilizando un método menos complejo y con mayor claridad sobre la obtención de parámetros necesarios para su

desarrollo y con ellos poder estimar el estado de carga y de salud mediante simulación. Para esto se propone un método denominado *fitting curve* para determinar las variables necesarias para el desarrollo del modelo. El *fitting curve*, es una herramienta de Matlab donde se encuentra la ecuación de la curva, por ellos los coeficientes de la ecuación de una curva, en el caso del estudio se ingresa una curva de voltaje y con la aplicación de Matlab se encuentra la ecuación de la curva con los respectivos coeficientes.

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección II se describen los diferentes tipos de modelos de baterías. En la sección III se presenta la implementación del modelo propuesto, las condiciones que se toman para el análisis experimentales y ecuaciones que se tomaran para los cálculos. En la sección IV se enfoca en el desarrollo del modelo en el software de Matlab-Simulink para visualizar el funcionamiento del modelo y estimar el SOC. En la sección V se contemplan los resultados obtenidos y se analiza la simulación del modelo propuesto. Finalmente, en la sección VI se sintetizan las conclusiones, validando la metodología llevada a cabo para la estimación del SOC.

## II. MODELOS DE BATERIAS

Los modelos de baterías principales más comunes dentro de estos estudios, se explican a continuación:

### A. Modelo Eléctrico.

Este método también es conocido como método directo, los modelos son representados en circuitos equivalentes, que utilizan elementos como resistencias y condensadores, que simulan el funcionamiento de la batería y representan variables como la carga y descarga de la misma. Estos modelos son simples de implementar y eficientes al momento de simular el comportamiento de una batería.

Dentro de esta sección se puede clasificar en los siguientes circuitos equivalentes [6]:

- *Modelo Eléctrico Thevenin.* - Consiste de una fuente de voltaje ( $V_{oc}$ ), una resistencia en serie ( $R_s$ ) y una combinación de una resistencia ( $R_{ts}$ ) y un condensador ( $C_{ts}$ ), la salida es el voltaje en el terminal.
- *Modelo Eléctrico Lineal.* - Este circuito se basa en el modelo de thevenin con mejoras que proporcionan una mejor precisión.
- *Modelo Eléctrico no Lineal.* - En este tipo de circuito toman en cuenta las variaciones de temperatura, autodescarga, que son aspectos que influyen también en el momento de modelar.
- *Modelos RC.* - En estos circuitos eléctricos pueden ser de primer, segundo y tercer orden, consisten en una fuente de voltaje abierto en función del SOC. La combinación de la resistencia y el condensador simulan la dinámica de la batería.
- *Modelos Equivalentes de Randle.* - Estos modelos se basan en experimentos de laboratorio de espectroscopia, simulan el comportamiento del electrolito y el colector de corriente.

### B. Modelo Térmico

Estos modelos de estudio de batería son más complejos computacionalmente de resolver en comparación con los circuitos equivalentes. Los modelos térmicos o también llamados electroquímicos utilizan ecuaciones diferenciales para implementar el efecto químico que proporciona la batería durante el estado de carga y descarga [6].

### C. Modelos de batería de comportamiento.

También conocidos como modelos empíricos, se utiliza ecuaciones y funciones empíricas para poder describir el comportamiento de la batería, son similares a los circuitos equivalentes fáciles de implementar computacionalmente, los parámetros que se utilizan en estos modelos son menos y se pueden utilizar en tiempo real [7].

## III. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO

En esta sección se presenta el modelo propuesto para el estudio de los estados de carga y salud, también se muestra los parámetros, condiciones y ecuaciones que se implementan para el desarrollo del mismo.

El objetivo de un modelo eléctrico-matemático es la de predecir o aproximar el comportamiento de la batería en sus estados de funcionamiento, se aplica un circuito eléctrico RC de primer orden que representa la actividad de una celda o del banco de baterías, este modelo consiste en: Una fuente, dos resistores y un condensador. La fuente de alimentación ( $V_{oc}$ ), la tensión existente entre los terminales, que es la tensión que entrega la batería ( $V_{bat}$ ), la resistencia modela los efectos de la resistencia interna de la batería ( $R_s$ ), el condensador y la resistencia (conjunto  $R_{ts}$ - $C_{ts}$ ) representa el comportamiento dinámico del banco de baterías, la capacidad de la batería ( $C_{cap}$ ) y la corriente de la batería ( $I_{bat}$ ) Fig. 2.

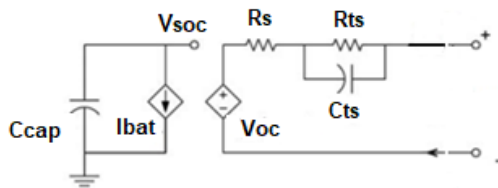


Fig. 2. Circuito RC.

Antes de iniciar el estudio y aplicar el modelo para una batería Ni-HM, hay que tener en cuenta ciertas condiciones: La temperatura es constante para todas las pruebas que se realicen de manera experimental (Temperatura ambiente). La corriente de descarga se ha dispuesto que empiece en 4 A (considerando la capacidad de amperaje en el momento de obtener los datos de una celda en el laboratorio). Para el análisis de la estimación el rendimiento de la batería en carga y descarga será de 100% o 1 para efectos de cálculo.

En función del circuito eléctrico antes mencionado se puede obtener las ecuaciones de funcionamiento [9] que se presentan en (1), (2) y (3).

$$\dot{x} = -\frac{1}{C_{cap}}U \quad (1)$$

$$\dot{x} = -\frac{1}{R_{ts}C_{ts}} * x_2 - \frac{1}{C_{ts}}U \quad (2)$$

$$\dot{y} = x_1 + x_2 + R_s U \quad (3)$$

Donde  $x_1$  y  $x_2$ , representan el voltaje a través de los condensadores  $C_{cap}$  y  $C_{ts}$  del circuito,  $U$  es la corriente que atraviesa el circuito eléctrico y la salida “ $y$ ” es el voltaje en los bornes.

La forma matricial puede ser expresado en (4)

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{oc} \\ \dot{U}_{ts} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{(R_{ts} * C_{ts})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{oc} \\ U_{ts} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{cap}} \\ -\frac{1}{C_{ts}} \end{bmatrix} [i_{cell} U_{cell}] \quad (4)$$

Para la simulación se debe obtener los valores de  $R_s$ ,  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , los cuales se encuentra mediante la aplicación del método *Fitting Curve*. Para el cálculo de estos valores, se realiza la curva de descarga que viene relacionado el Voltaje ( $V_{oc}$ ) vs el SOC. El SOC son datos empíricos que sirve de ayuda para graficar dicha curva, vamos a tomar en cuenta que los valores del SOC se tomarán desde 0% a máximo Voltaje y 100% a voltaje mínimo solo para efectos de graficar.

Para obtener el voltaje de la curva, se realiza de forma experimental, aplicándole una carga de 4 A, los experimentos realizados se hicieron hasta que la celda tenga un voltaje de 5.71 V. El montaje de los equipos se realiza con el equipo *Imax B6AC*, que sirve para cargar y descargar a la celda, dentro del equipo tenemos un display donde se visualiza el voltaje de la celda, el multímetro se coloca en serie para observar los valores de amperaje que varían cuando el voltaje disminuye. El montaje de los equipos se muestra en la figura. 3.

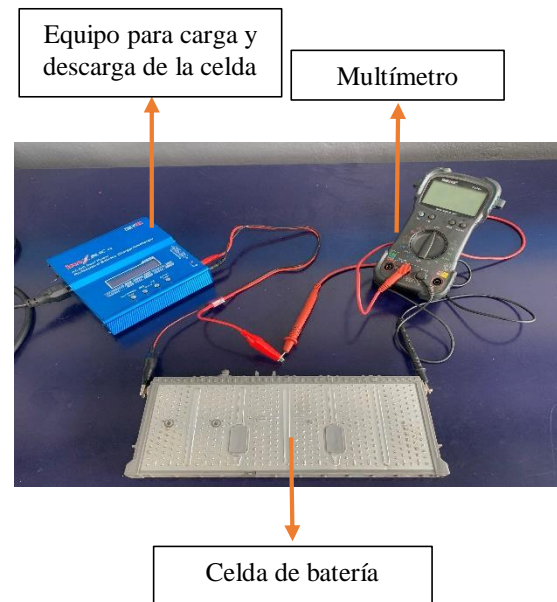


Fig. 3. Montaje de los equipos.

Los valores obtenidos de los experimentos se muestran en el apartado de resultados en la tabla 5, se exponen algunos de los datos debido a que la tabla es muy extensa. Se obtiene un promedio entre todos los experimentos realizados con diferentes celdas de Ni-MH creando una plantilla base para ingresar a Matlab.

Luego de obtener los datos de descarga, se procede al cálculo de los valores de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , para hallar dichos valores se utiliza el método de *fitting curve* Fig. 4, a la curva de descarga en Matlab debemos implementar una ecuación general de voltaje en los bornes de la batería viene dada por la ecuación 5. Que tiene la función exponencial decreciente simulando la curva de descarga.

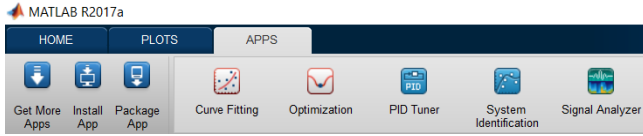


Fig. 4. Aplicación Fitting Curve.

$$V_{Bat} = V_{OC}(SOC) - V_{ts} * e^{-t/R_{ts}C_{ts}} \quad (5)$$

Ajustando la función a los parámetros transitorios y de reposo se puede decir que la ecuación (6) puede mostrarse de la siguiente forma:

$$V_{Bat} = -a * e^{bt} \quad (6)$$

Donde los coeficientes a y b se obtiene del *fitting curve* de la gráfica de descarga entre voltaje vs SOC, logrando encontrar los valores de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , se crea en Matlab una matriz de 2x2 donde los datos son la curva de descarga y se ingresa al *fitting curve* Fig. 5.

```

% "x" Son datos de voltaje [V]
% "y" Son datos del SOC [%]
x=xlsread('datos.xlsx');
y=xlsread('datos.xlsx',2);

```

Fig. 5. Ingreso de la matriz al Matlab.

Los coeficientes a y b se obtienen de Matlab y se reemplazan en las ecuaciones (5) y (6); hallando los valores de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ ; para cada valor de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$  se obtienen datos para cada voltaje vs SOC.

Para encontrar el valor de  $R_s$ , que indica la resistencia interna de la batería o la caída de la tensión instantánea en tiempos de reposo, se aplica la ecuación (7); De igual manera que los valores de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , la  $R_s$  se obtienen datos para cada valor de voltaje vs SOC.

$$R_s = \frac{V_{bat}(t^+) - V_{bat}(t^-)}{i_{des}} \quad (7)$$

Una vez que se encuentren los datos de  $R_s$ ,  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , se procede a la implementación del modelo en simulink para hallar el SOC.

Para el estudio se opta por la técnica de estimación que se conoce como el contador de Coulomb o el contador de Ah debido a que este método es el que más se utiliza al simular el comportamiento de la batería, ofrece una estimación inicial para dar inicio a la simulación, y que, consiste en integrar la intensidad que suministra y absorbe la batería, en lazo cerrado

donde se estima el voltaje en los bornes de la batería, con el objetivo de corregir errores propios del contador, como se indica en la ecuación (8) [5].

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta}{C} * \int I(t)dt \quad (8)$$

Donde  $\eta$  es el rendimiento de la batería, en este estudio se asume que el rendimiento para encontrar el SOC será de 1, como se explicó en las condiciones de estudio, el  $SOC_0$  es el estado de carga inicial de la batería, C es la capacidad de la batería en Ah que viene dado por el *datasheet* Tabla. 1. del tipo de celda que se realiza el estudio y por ultimo  $I_{bat}$  que es la corriente de descarga que se encuentra en el circuito.

Tabla. 1. Especificaciones Técnicas de la celda de Ni-MH. Compañía Manufacturera de baterías Híbridas "Energy"

Especificaciones Técnicas	
Voltaje Nominal	7.2V
Capacidad Nominal	6.5 Ah
Carga de Salida	1350 W
Peso	1040 g
Dimensiones	19.6(W)x106(H)x285(L)

Una vez que se obtienen las ecuaciones de la estimación de carga, se procede a indicar las ecuaciones que se implementarán para la estimación de Salud.

El SOH se obtiene de la ecuación (9), donde indica que la capacidad estimada es dividida entre la capacidad nominal de la batería para logra una estimación.[10]

$$SOH = \frac{Cap\ Estimada}{Cap\ Nominal} \quad (9)$$

El primer paso es la obtención de la capacidad estimada, se debe que encontrar la variación del SOC ( $\Delta SOC$ ), entre el SOC final y el SOC inicial, se toman en cuenta la corriente de descarga ( $I_{bat}$ ), tiempo de descarga ( $t_{des}$ ), como se indica en la ecuación (10).

$$CapE = \frac{(100 * I_{bat} * t_{des})}{60 * \Delta SOC} \quad (10)$$

#### IV. DESARROLLO DE LA SIMULACION EMPLEANDO EL SOFTWARE MATLAB

Después de haber determinado los valores iniciales que se necesitan para el cálculo y estimación del SOC, se indica los cuadros y bloques de simulación en el software. [8]

Se introdujeron 4 bloques de simulación para el cálculo del SOC y SOH, cada uno de los bloques se explican a continuación:

El primer bloque es el contador de Coulomb donde se refleja una estimación inicial del SOC que sirve para corregir errores y aproximar el resultado al más real. Fig. 6. Se puede observar en la ecuación (8).

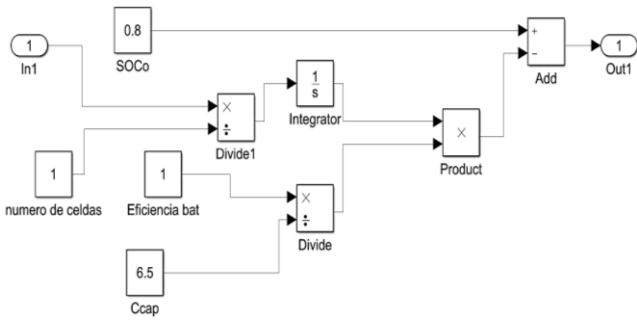


Fig. 6. Bloque del Contador de Coulomb.

El segundo bloque es el modelo eléctrico-matemático, que analiza el comportamiento de la batería. Fig. 7. Se observa en la ecuación (4).

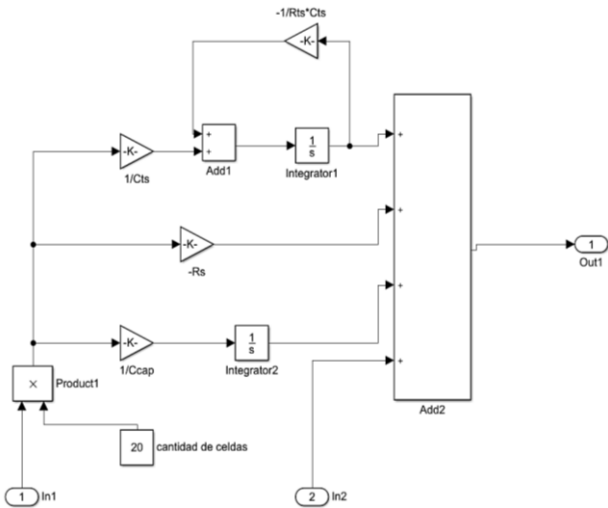


Fig. 7. Bloque del Modelo de Batería.

El tercer bloque es el de corrección del SOC, sirve para tener un valor del SOC mejorado durante la simulación del modelo, no es más que, el voltaje real menos el voltaje estimado y a la salida un controlador. Fig. 8.

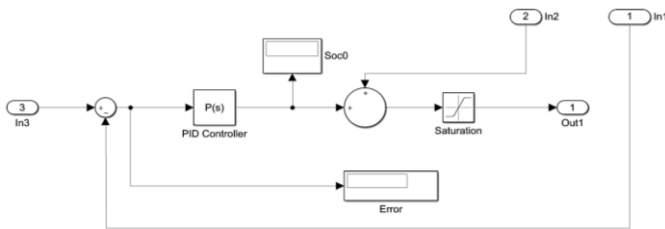


Fig.8. Bloque de corrección del SOC.

El último bloque de simulación que se ingresa es la del cálculo del SOH, donde se ingresa las ecuaciones antes mencionadas. Fig. 9. Se muestra en la ecuación (9) [10].

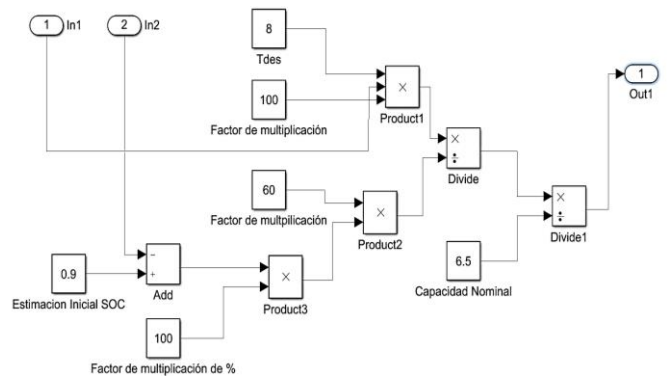


Fig. 9. Bloque de simulación del SOH.

El modelo completo que contiene los bloques anteriormente detallados es mostrado en la Fig. 10.

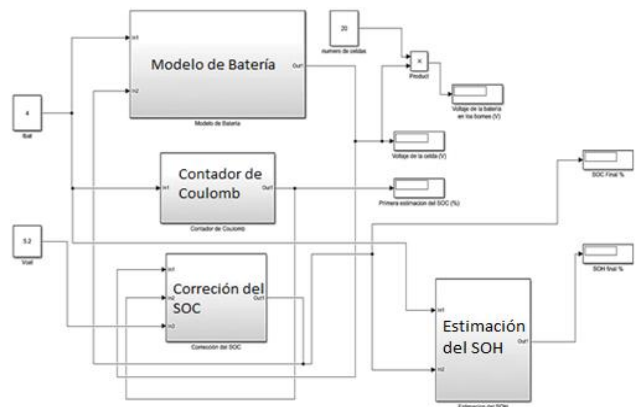


Fig. 10. Diagrama de bloque completo.

Las variables a ingresar para la estimación del SOC, es la corriente del circuito de la celda y el voltaje de la celda, se analiza la estimación sobre una celda de batería para efectos del estudio. Para un análisis sobre un banco entero de baterías se introduce el voltaje nominal completo y la corriente total del banco.

## V. RESULTADOS Y ANALISIS DE LA SIMULACIÓN.

Al finalizar el proceso de simulación, de ingresar los bloques respectivos, se procede a la verificación de resultados de los experimentos, análisis de los resultados de la simulación.

La curva de descarga Fig. 11. como se indicó anteriormente se realiza entre el voltaje de la celda vs SOC en la tabla 2, se exhiben los datos obtenidos; Esta curva demuestra el comportamiento del voltaje al aplicar una carga. La curva de descarga es igual para cada tipo de corriente que se le aplique, lo único que varía es el tiempo que dura la curva.

Tabla. 2. Plantilla de valores de voltaje vs SOC inicial.

Voltaje (V)	Porcentaje%
8.25	0.100
8.13	1.549
7.95	2.999
7.83	4.448
7.76	5.897
7.7	7.346
7.62	8.796
7.56	10.245
7.5	11.694
7.44	13.143
7.38	14.593
7.32	16.042
7.29	17.491
7.27	18.941
7.25	20.390
7.22	21.839
7.19	23.288
7.1	24.738
7.1	26.187
7.08	27.636
7.04	29.086
7.02	30.535
7.01	31.984

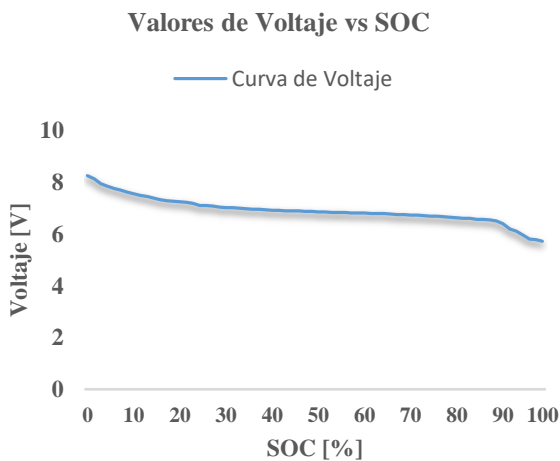


Fig. 11. Curva de Descarga de una celda.

A continuación, para los siguientes coeficientes como son  $R_s$ ,  $C_{ts}$  y  $R_{ts}$  se obtiene un promedio de los valores encontrados de cada curva respectiva, se obtiene para los cálculos y la ejecución del modelo; A continuación, en la tabla. 5. Se exhibe los valores tanto de los promedios como de la capacidad de la batería.

La curva de la resistencia interna  $R_s$  Fig. 12, indica la resistencia instantánea de la celda en tiempos de reposo, la caída de tensión. Los resultados logrados se publican en la tabla. 3. Donde los datos se expresan en ohmios.

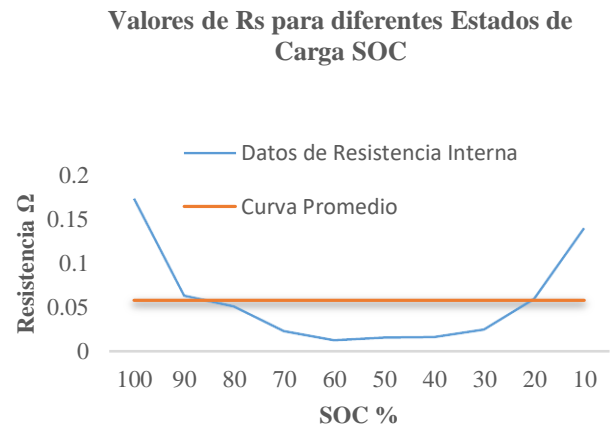


Fig. 12. Curva de la resistencia interna  $R_s$ .

Tabla. 3. Datos de  $R_s$  para cada SOC.

SOC %	$R_s$
100	0.17324713
90	0.06320428
80	0.0508001
70	0.02299354
60	0.01289324
50	0.01578117
40	0.01622373
30	0.02493963
20	0.0593005
10	0.13966082
PROMEDIO	0.05790441

A su vez las curvas de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , se introducen al modelo como el comportamiento dinámico de la celda o batería, que representa las cargas y descargas durante el funcionamiento del banco de baterías. A continuación, en la Fig. 13 y Fig. 14 se representan las curvas obtenidas durante el estudio experimental.

### Valores de Rts para diferentes Estados de Carga SOC

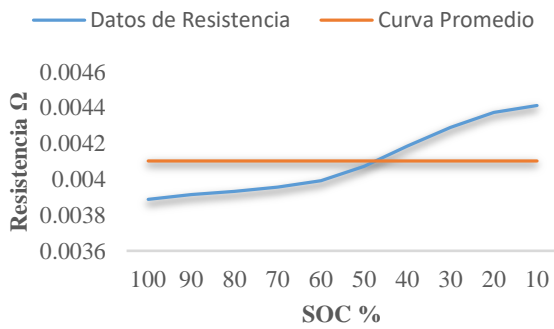


Fig. 13. Curva de Rts.

La siguiente tabla. 4. Introduce los datos y valores de Rts para cada SOC%

Tabla. 4. Datos de Rts para cada SOC.

SOC %	Rts
100	0.00388927
90	0.00391614
80	0.00393447
70	0.00395744
60	0.00399433
50	0.00407417
40	0.00418843
30	0.00429239
20	0.00437412
10	0.00441499
PROMEDIO	0.00410357

### Valores de Cts para diferentes Estados de Carga SOC

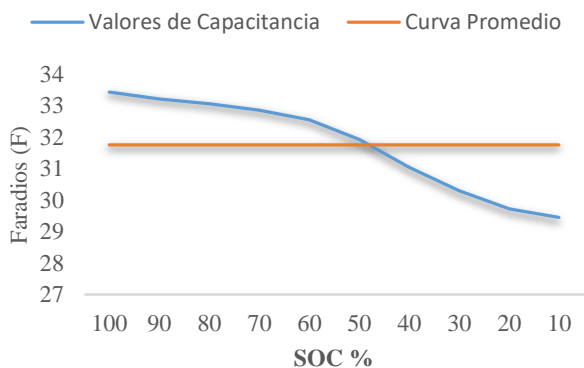


Fig. 14. Curva de Cts.

En la Tabla. 5. Se expone los valores de Cts para cada valor de SOC, encontrando diferentes valores de Cts a distintas corrientes.

Tabla. 5. Datos de Cts para cada SOC

SOC %	Cts
100	33.4266114
90	33.1973069
80	33.0426387
70	32.8508022
60	32.5474607
50	31.9096043
40	31.0391462
30	30.2873869
20	29.7214692
10	29.4463037
PROMEDIO	31.746873

Habiendo obtenido las tablas con los valores de Rs, Rts y Cts, se logra encontrar un promedio de dichos valores para poder realizar los cálculos para la simulación. En la tabla 6 se exhiben los promedios.

Tabla. 6. Datos para los cálculos.

Rs (Ω)	Rts (Ω)	Cts (F)	Ccap (Ah)
0.05790441	0.00410357	31.746873	6.5

Se presenta los datos en la tabla. 7. del SOC y SOH con diferentes voltajes de celda, se ingresa manualmente el voltaje para poder visualizar los estados.

Tabla. 7. Datos del SOC y SOH a diferentes voltajes de ingreso

Voltaje	Celda	SOC %	SOH %
7.8		0.8697	0.9427
7.6		0.8515	0.7798
7.4		0.8333	0.6649
7.2		0.8152	0.5795
7		0.797	0.5136
6.8		0.7788	0.4611
6.6		0.7606	0.4184
6.4		0.7424	0.3829
6.2		0.7243	0.3529
6		0.7061	0.3273
5.8		0.6879	0.3052
5.6		0.6697	0.2859
5.4		0.6515	0.2688
5.2		0.6333	0.2537

Se puede observar que los valores de cada voltaje tienen su estado de carga y de salud. Fig. 15 y Fig. 16.



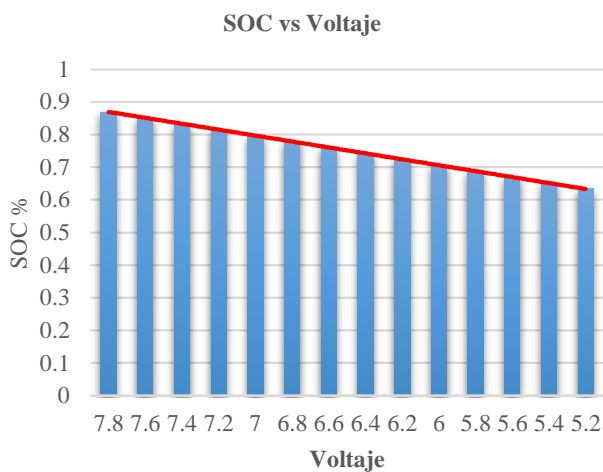


Fig. 15. Valores del SOC.

Se obtiene que mientras el voltaje de la celda que es una variable de ingreso al modelo de batería sea alto, el SOC es alto también, lo que se puede decir que mientras la celda tenga más voltaje que aporta a la batería mayor es la capacidad de carga de la celda, es directamente proporcional. La curva cae de manera rectilínea.

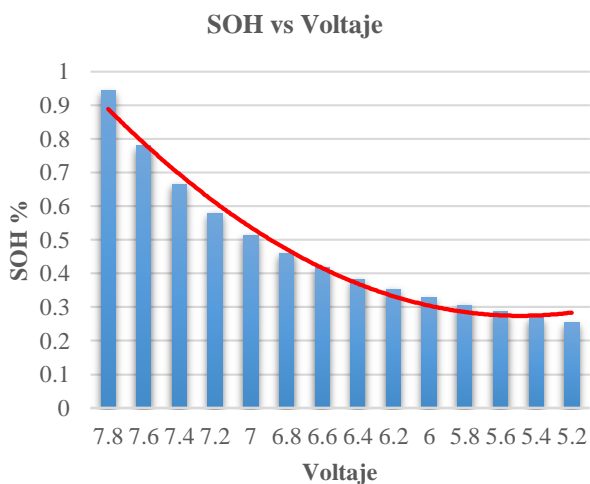


Fig. 16. Valores del SOH.

De igual manera se puede observar que el SOH de la celda es alto al igual que el SOC, se analiza el comportamiento del SOH cuando el voltaje de entrada o la variable que se ingresa del voltaje es baja, se observa que la curva SOH cae mucho más exponencialmente que la curva del SOC, que es lo que se puede visualizar en la figura 16 que la curva de tendencia del SOH es exponencial a manera de va disminuyendo el voltaje de la celda.

El objetivo de la simulación se centró en la visualización del SOC y SOH que son las variables de salida a partir del voltaje y corrientes de las celdas de un banco de baterías, con dicho modelo se obtiene una confiabilidad buena de los resultados obtenidos, mientras se aumenta la dificultad en el modelo de batería la confiabilidad de la simulación aumentará, cabe recalcar que para el estudio y por recursos se empleó el modelo de primero orden.

El instante en el cual se ingresa los valores de corriente y voltaje, generan en el primer recorrido de los valores un resultado erróneo, es por eso que se realizó un circuito de lazo cerrando donde el primer resultado entra y se corrige y es ahí donde la simulación tiene resultado más aproximados al real.

El bloque del contador de Coulomb introduce el valor de la primera estimación de la celda, donde el bloque de corrección con el voltaje del modelo se obtiene la estimación más real.

El bloque del modelo se representa mediante integrales y operaciones matemáticas obtenidas de las matrices que se consiguieron a partir del circuito equivalente de primer orden, a la salida de este modelo da como resultado el voltaje de la celda luego de haber simulado el funcionamiento de carga y descarga de la celda.

Luego de tener los 3 bloques de simulación juntos Fig. 8, tenemos la estimación de la celda, obteniendo los datos antes descritos, a partir de este estudio se puede realizar proyectos adicionales, con la simulación efectuar un ensayo, desde la obtención de los resultados de la simulación de la batería, se pueda simular el comportamiento de la BMS, en lo que respecta a tomar decisiones con las variables de salida obtenidas durante la simulación.

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con la información obtenida durante los procesos del proyecto se concluyó que:

Los modelos que se investigaron, son los que más se utilizan al momento de simular una batería, algunos de ellos son más complejos al momento de resolver y de entender. El modelo del circuito RC por el cual se optó, es sencillo de aplicar y menos complejo de resolver computacionalmente; El circuito RC es una de las técnicas más utilizadas al momento de simular una celda de batería o banco de baterías.

Las condiciones iniciales que se señalan para el estudio, dependen del que realice el estudio, en este caso la temperatura ambiente es en la ciudad de Cuenca y la corriente de descarga para la simulación se aplicó de 4 A, para la obtención de los datos y curvas de voltaje.

Los resultados estimados del SOC y SOH, son resultados positivos, de acuerdo al modelo matemático utilizado se obtiene una confiabilidad cercana al 90%, mientras se aumenten la dificultad del grado matemático en el modelo la confiabilidad de los resultados será aún mayor, ya que se incluyen otros fenómenos que influyen en la descarga de la celda.

Las fallas comunes que se pueden presentar al aplicar el modelo es la aplicación del *fitting Curve*, para poder resolver los coeficientes de  $R_{ts}$  y  $C_{ts}$ , donde hay que tener mucha atención al resolver las ecuaciones, el momento de la simulación en Simulink, se tomó en cuenta las configuraciones del programa para no obtener resultados fuera de rango realistas.

Esta simulación del SOC y del SOH, pueden ser aplicados para diferentes vehículos, tomando en cuenta las corrientes de descarga para obtener las curvas, los valores que se obtenga experimentalmente, necesitan condiciones previas para empezar los experimentos, como temperaturas, corriente de descarga y medición de tiempos.

En este estudio se realizó una parte de lo que efectúa la BMS, que es la de estimar los estados de carga y de salud de la batería; para recomendaciones futuras y futuros ensayos, se puede optar por agregarle al estudio el efecto de la temperatura sobre las celdas y proponer una programación simulando el funcionamiento del BMS al obtener las estimaciones del banco de baterías.

El resultado del modelo nos brinda un porcentaje de la capacidad de carga de la celda, esta capacidad representa la carga máxima extraíble bajo ciertas condiciones y depende de ciertos factores, como son: los rangos de carga y descarga, la temperatura, el valor de corte del voltaje de descarga y el estado de salud la celda, toda esa programación de aprovechar la máxima carga de la celda es gracias al BMS.

## VII. REFERENCIAS

- [1] T. Sandalio, D. E. N. D. E. Pinar, and D. E. L. Río, “Complejo Expositivo de Energía,” 2011
- [2] U. IntPebriyanti, G. (2013). A Lithium-ion Battery Modeling For A HIL-Battery Simulator. 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), 185–190. <https://doi.org/10.1109/IC3INA.2013.6819171>ernacional, ,
- [3] M. Luisa, S. Solís, and C. Flores, “Simulación de modelos en ecuaciones diferenciales ordinarias.”
- [4] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, “Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles,” pp. 1840–1857, 2011.
- [5] “Battery Management System for Electric Drive Vehicles – Modeling, State Estimation and Balancing \_ IntechOpen.” .
- [6] R. Iglesias et al., “Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda,” no. May 2014, 2012.
- [7] R. Ahmed, “MODELING AND STATE OF CHARGE ESTIMATION OF ELECTRIC VEHICLE.”
- [8] T. F. De Grado, “Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental,” 2016.
- [9] M. Knauff, J. McLaughlin, and C. Dafis, “Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed,” no. June 2014.
- [10] S. Rebelo, “INVESTIGACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ECUALIZACIÓN DE PACKS PARA PROLONGAR LA VIDA ÚTIL DE LAS BATERIAS DE ALTA TENSION HV DEL VEHICULO HIBRIDO TOYOTA PRIUS TERCERA GENERACION,” “Universidad de las fuerzas armadas espe-l,” 2018.