

MODELADO DE BATERÍAS POR CIRCUITO EQUIVALENTE: EXPERIMENTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

*ON THE BATTERY MODELING BY
EQUIVALENT CIRCUIT: EXPERIMENTATION
AND IMPLEMENTATION*

Daniel Fernando Ortiz González

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
M1903077@itcelaya.edu.mx

Claudia Hernández

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
cvhg@ieee.org

Joaquín Vaquero

Universidad Rey Juan Carlos
joaquin.vaquero@urjc.es

Nimrod Vázquez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
n.vazquez@ieee.org

Héctor López

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 2/noviembre/2021

Aceptación: 24/febrero/2022

Resumen

El uso de baterías se ha incrementado en los últimos tiempos, debido a su aplicación en nuevas tecnologías como vehículos eléctricos e híbridos y fuentes renovables de energía. Para su buen uso y monitoreo se recurre al modelado de las baterías, esto permite incrementar su periodo de vida, haciéndolas más confiables. Uno de los modelos reportados es el de circuito equivalente, en este trabajo se detalla este modelado, contemplando la experimentación e implementación siendo la aportación del trabajo.

Palabras Clave: Batería, circuito equivalente, modelado.

Abstract

The battery use has been incremented last years, this is because new technologies like electric and hybrid vehicles, and renewable sources. To meter and assure a good use of a battery a model is required, incrementing the lifetime and making them more reliable. One of the models reported is the equivalent circuit, in this work a detailed modeling is described, including the experimentation and implementation, which is the contribution of this work.

Keywords: *Battery, equivalent circuit, model.*

1. Introducción

Cada día se va incrementando la dependencia a las baterías para el almacenamiento de energía para diversas aplicaciones, desde artículos de uso personal, pequeños como son las pulseras inteligentes, o grandes como los vehículos híbridos o eléctricos, hasta aplicaciones a gran escala como son las energías renovables, vehículos aéreos o inclusive satélites.

El uso seguro [Abada, 2016] y confiable de baterías requiere de una estimación de su estado, uno de los parámetros que requiere de precisión es el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés). Existe una variedad métodos para su estimación como es el conteo de Coulomb, tablas de búsqueda, base en modelos y el aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés). Tanto el conteo de Coulomb como las tablas de búsqueda son las más simples, sin embargo, son las menos precisas, mientras que, para mayor precisión, se vuelve más complejo, el modelo requiere de mayor poder de cómputo y el ML requiere de mayor cantidad de datos [Zheng, 2018], [Zou, 2015].

Hay diferentes tipos de modelado de baterías, el cual se puede dividir en 4 tipos, electroquímicos, circuito equivalente, matemático y en base en datos [Fotohui, 2016], [How, 2019]. El modelo electroquímico normalmente no permite obtener el SOC, por lo que normalmente no se recomienda para el buen manejo de la batería. Los modelos de circuito equivalente son utilizados como base para los modelos de orden fraccionario [Ma, 2016], [Xiao, 2016] y permiten la estimación del SOC, los matemáticos como es el filtro de Kalman o el filtro de partículas son complejos y

requieren de herramientas digitales de alto nivel para su implementación [Bustos, 2018], [Claude, 2017], [Liu, 2016].

El modelo por circuito eléctrico equivalente es relativamente sencillo [Meng, 2018], pero su obtención requiere de una metodología adecuada, de forma que permita la correcta estimación de parámetros, el cual normalmente no se detalla en la literatura. Normalmente solo se menciona la identificación de los parámetros del modelo de circuito equivalente.

En este artículo se detalla el proceso realizado para la caracterización de una batería por medio de un modelo de circuito eléctrico equivalente utilizando software libre o de bajo costo. Se realizan pruebas experimentales mediante la prueba de pulso de corriente y se realiza los ajustes de curva para cada SOC, para así obtener un modelo completo para el SOC [Hossian, 2019], [Huang, 2016], [Jiang, 2011].

2. Métodos

El modelo de circuito equivalente consiste en una malla con una fuente de voltaje de circuito abierto, una resistencia serie R_0 y dos elementos más compuestos por una resistencia y un capacitor [Hossian, 2019], [Huang, 2016], [Jiang, 2011]. La figura 2.1 muestra el modelo utilizado como base para el modelado de la batería.

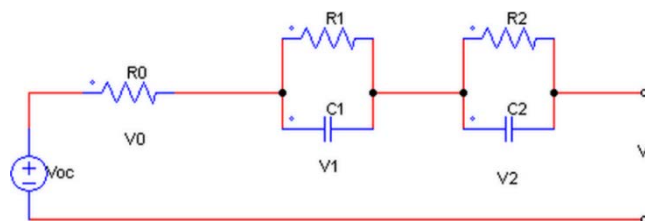


Figura 2.1 Modelo de circuito equivalente de Thévenin.

Al aplicarse la segunda ley de Kirchoff al circuito de la figura 2.1, se obtiene la ecuación 2.1.

$$V_{oc} - V_0 - V_1 - V_2 - V_t = 0 \quad (1)$$

Donde:

V_t : Voltaje de terminal.

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto.

V_0 : Voltaje de la resistencia serie.

V_1 : Voltaje de la primera rama RC.

V_2 : Voltaje de la segunda rama RC.

La variable V_t es la variable de salida, despejándola de ecuación 2.1 se obtiene ecuación 2.2:

$$V_t = V_{oc} - V_0 - V_1 - V_2 \quad (2)$$

El modelo tiene asociadas variables de estado por lo que se debe realizar una prueba dinámica que permita determinar su comportamiento. Por ello, se le demanda un pulso de corriente constante a la batería y se observa el comportamiento del voltaje de salida de la batería, bajo esta prueba se presentan tres estados: circuito abierto, tiempo de pulso y tiempo de relajación, que afectan a V_0 , V_1 y V_2 , los estados se aprecian en la figura 2.2.

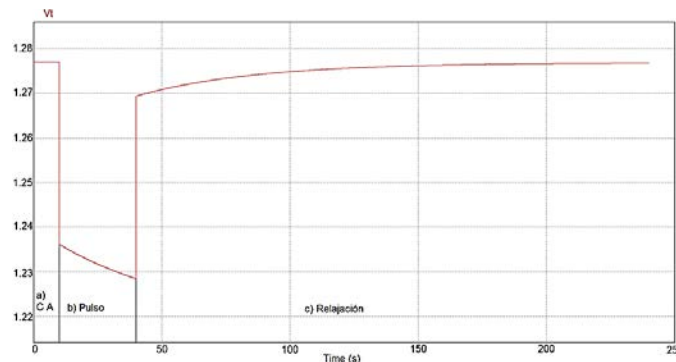


Figura 2.2 Gráfica de V_t durante una prueba.

Los tres estados se detallan a continuación.

- Circuito Abierto. No existe flujo de corriente y los capacitores se encuentran descargados por lo que V_0 , V_1 y V_2 , valen 0, después de sustituir en ecuación 2.2 se obtiene la ecuación 2.3:

$$V_t = V_{oc} \quad (3)$$

- Tiempo del pulso: Existe un flujo de corriente y los capacitores se cargan, V_0 es dado por la ley de Ohm V_1 y V_2 están dados por la ecuación de voltaje del capacitor, sustituyendo en ecuación 2.2 se obtiene ecuación 2.4:

$$V_t = V_{oc} - R_0 I - \frac{1}{C_1} \int I_{C_1} dt - \frac{1}{C_2} \int I_{C_2} dt \quad (4)$$

Donde:

C_1, C_2 : Capacitancia de capacitor 1, 2.

I_{C_1}, I_{C_2} : Corriente de capacitor 1, 2.

- Relajación: No existe un flujo de corriente y los capacitores se descargan, por lo que V_0 vale 0 y se observa que cada capacitor se descarga por la resistencia que tienen en paralelo por lo que V_1 y V_2 tienen la forma de la ecuación 2.5.:

$$V_1 = V_{10} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

Donde:

V_0 : Voltaje inicial del capacitor.

t : Tiempo.

τ : Constante de tiempo del capacitor.

Usando ecuación 2.5 se obtiene que la tensión de salida es ecuación 2.6.:

$$V_t = V_{oc} - V_{10} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - V_{20} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

La constante de tiempo de un capacitor está dada por ecuación 2.7.:

$$\tau = RC \quad (7)$$

Donde:

R : Resistencia paralela.

C : Capacitancia.

Caracterización

De pruebas experimentales se obtienen gráficas como las mostradas en la figura 2.2, al inicio hay una tensión constante en las terminales de la batería, por lo que es el único valor para sustituir en ecuación 2.3, que corresponde al estado de circuito abierto con $t < T_0$, este es el valor de V_{oc} y se utiliza en los otros dos estados.

El valor de R_0 se calcula en la transición de etapas a través del despeje de la ley de Ohm, ecuación 2.8.:

$$R_0 = \frac{V_t(T_0 -) - V_t(T_0 +)}{I} \quad (8)$$

Donde:

R_0 : Resistencia serie.

$V_t(T_0 -)$: Voltaje de la terminal en el instante previo a T_0 .

$V_t(T_0 +)$: Voltaje de la terminal en el instante posterior a T_0 .

I : Corriente del pulso.

En la figura 2.3 se observa mejor la obtención de los voltajes para V_{OC} y R_0 .

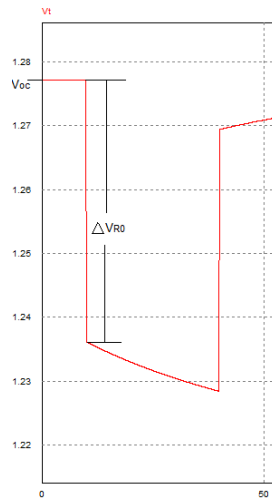


Figura 2.3 Observación de voltajes para V_{OC} y R_0 .

Efectuando ajuste de curva en $T_1 < t < T_2$ con ecuación 2.6 se obtienen los parámetros V_{10} , V_{20} , τ_1 y τ_2 por lo que hará falta obtener los parámetros R_1 , R_2 , C_1 y C_2 . La ecuación de carga por corriente de capacitor es ecuación 2.9.:

$$I = \frac{V_f}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

Donde, V_f es el Voltaje final de carga del capacitor.

Para nuestro caso, el V_f es V_0 de la etapa de relajación, al despejar y sustituir obtenemos la ecuación 2.10.:

$$R = \frac{V_0}{I} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

La cual se utiliza para cada rama RC. La capacitancia se despeja de ecuación 2.7 obteniendo ecuación 2.11:

$$C = \frac{\tau}{R} \quad (11)$$

Regresión

Para realizar el ajuste de curva se utilizó el software “Curve Expert”, a pesar de no ser gratuito, ofrece la posibilidad de probarlo con funcionalidad completa por 30 días, o de probarlo con funcionalidad limitada por tiempo ilimitado, pero con funciones suficientes para este trabajo. En este caso se utilizó la versión profesional con funcionalidad limitada. En la figura 2.4 se observa la pantalla principal del software.

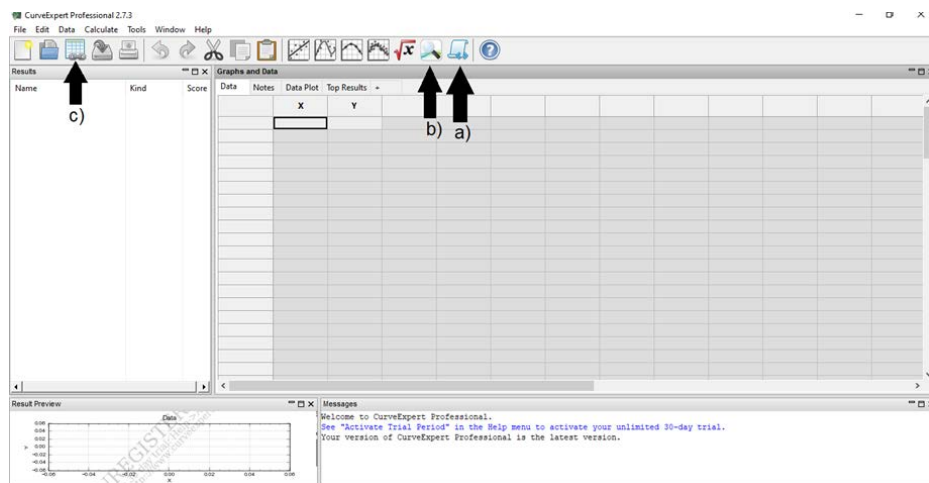


Figura 2.4 Pantalla principal de Curve Expert.

Con el botón marcado con “a)” la figura 2.4 se abre la ventana para editar modelos personalizados, esto se observa en la figura 2.5 como edición simple, mientras que en la figura 2.6 se ve como edición avanzada, en ambas se usó la ecuación 2.6 las variables de interés. Para cada prueba, se sustituye el V_{oc} por el valor correspondiente. Como se aprecia en la figura 2.6, una ventaja de este software es que permite agregar modelos en lenguaje de programación Python 3, con lo cual, se pueden inicializar las variables a un valor cercano para una convergencia más rápida, limitar el modelo entre otras cosas. Con el botón marcado con “b)” en la

figura 2.4 se abre la ventana de la figura 2.7, en la cual se seleccionan los tipos de regresiones a efectuar, en este caso, se deja activado solo los modelos personalizados, como se muestra.

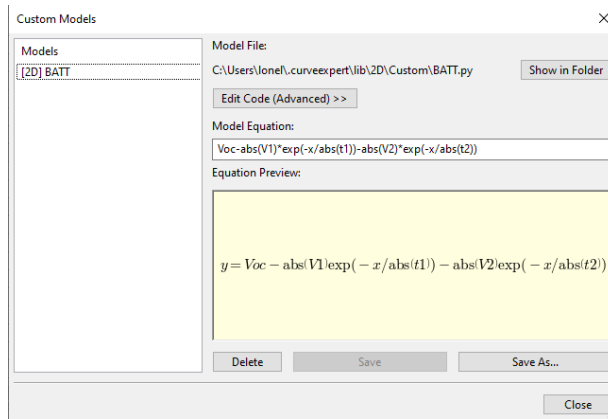


Figura 2.5 Ventana de modelos personalizados en edición simple.

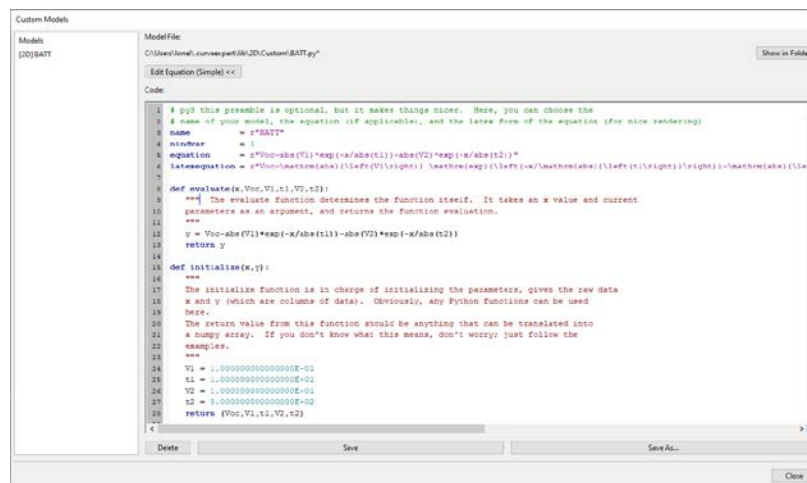


Figura 2.6 Ventana de modelos personalizados en edición avanzado.

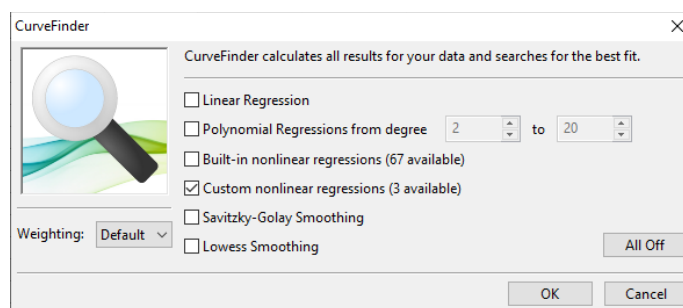


Figura 2.7 Selección de modelos para realizar ajuste de curva.

Con el botón “c)” de la figura 2.4 se pueden cargar los datos a los que se van a hacer ajuste de curva desde un archivo, aunque también se puede hacer copiando y pegando en las columnas X y Y que se observan en figura 4. Antes de introducir los datos, se recorren los datos para que inicien en 0, o de lo contrario marcará regresión errónea. Los datos utilizados corresponden a los del estado de relajación obtenidas de las pruebas experimentales, como se observa en la figura 2.8. En la figura 2.9 se observa la pantalla de resultados, graficando los datos de entrada y la gráfica de la regresión.

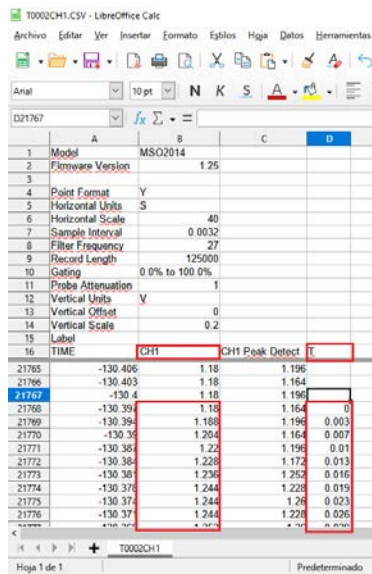


Figura 2.8 Archivo del osciloscopio con la traslación agregada.

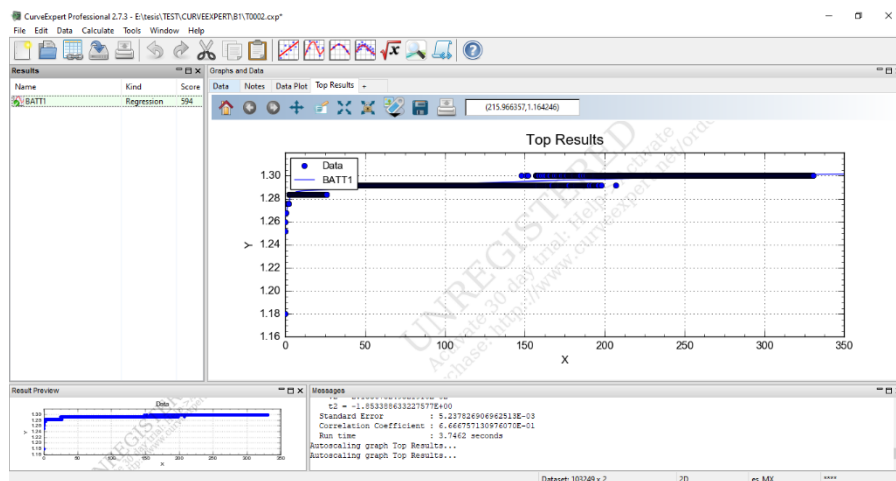


Figura 2.9 Resultados de la regresión

La figura 2.10 muestra la ventana del resultado, en esta misma se observan la ecuación, los parámetros y nuevamente las gráficas, la figura 2.11 muestra la misma ventana mostrando la información de la pestaña de detalles en la que se pueden observar los coeficientes de correlación de determinación y el error estándar, tanto para la regresión como para cada parámetro.

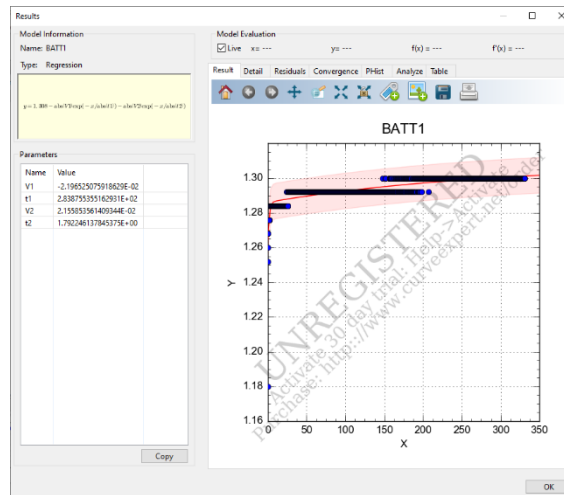


Figura 2.10 Ventana de resultados.

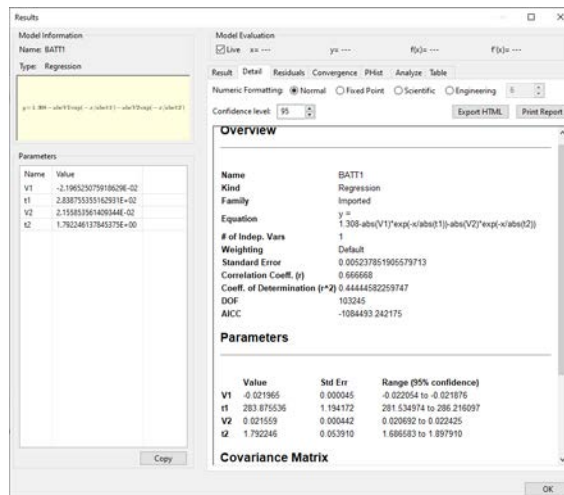


Figura 2.11 Pestaña de detalles de la ventana de resultados.

Los valores de los parámetros se copiaron a una hoja de cálculo, en este caso, uno gratuito, con las fórmulas para el cálculo de los parámetros, R_0 , R_1 , R_2 , C_1 y C_2 , como se observa en la figura 12.

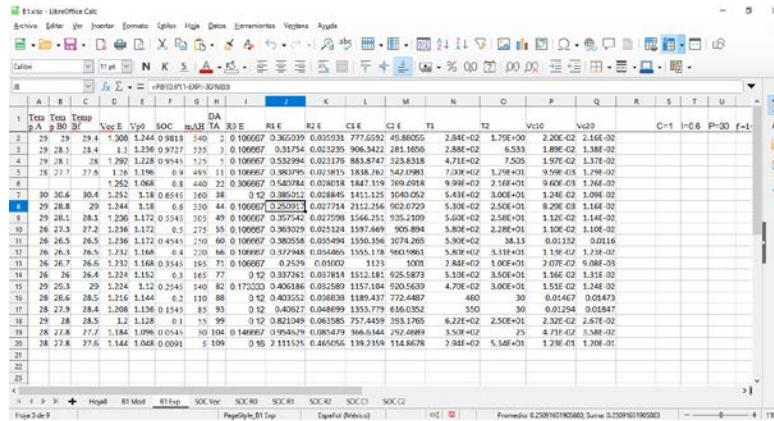


Figura 2.12 Hoja de cálculo para la obtención de los parámetros R_0, R_1, R_2, C_1 y C_2 .

Una vez obtenido la relación de cada parámetro a diferentes estados de carga (SOC, por sus siglas en inglés), se ingresa nuevamente al software Curve Expert para obtener las ecuaciones que describen cada parámetro en todo el rango de SOC. Otra ventaja de este software es que prueba todos los modelos con los mismos datos y posteriormente proporciona los resultados con su factor de ajuste, figura 2.13.

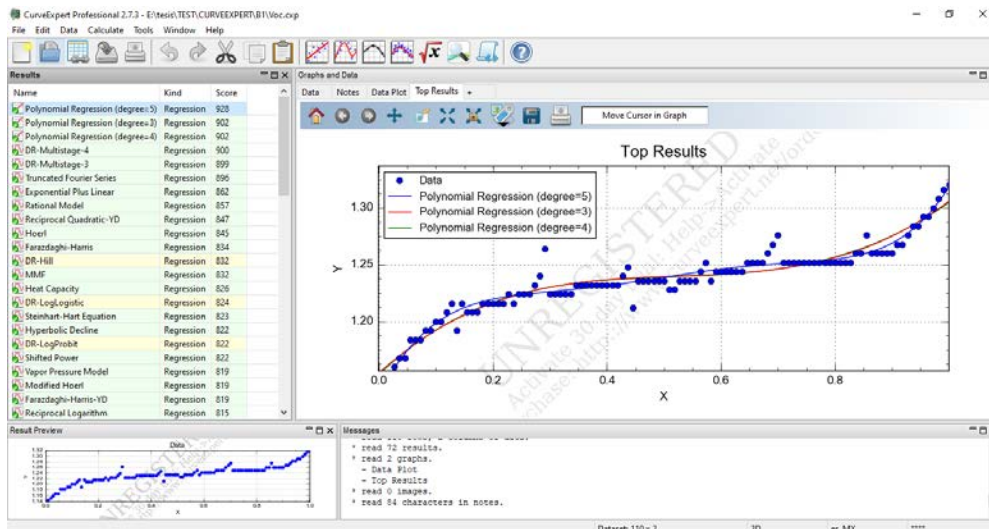


Figura 2.13 Regresión para V_{OC} . Gráfica de datos de entrada y las 3 mejores regresiones.

De las regresiones se obtienen ecuaciones 2.12 a 2.17.

$$V_{oc} = 1.136 + 1.043SOC - 5.094SOC^2 + (1.206 * 10^1)SOC^3 - (1.303 * 10^1)SOC^4$$

$$+5.212SOC^5 \quad (12)$$

$$R_0 = 1.574 * 10^{-1} - (5.184 * 10^{-1})SOC + 2.424SOC^2 - 5.528SOC^3 + 5.939SOC^4 - 2.379SOC^5 \quad (13)$$

$$R_1 = 2.168 - (2.223 * 10^1)SOC + (9.850 * 10^1)SOC^2 - (2.020 * 10^2)SOC^3 + (1.947 * 10^2)SOC^4 - (7.099 * 10^1)SOC^5 \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{2.630 * 10^6 + (1.006 * 10^7)SOC}{1 + (6.455 * 10^8)SOC - (1.491 * 10^8)SOC^2} \quad (15)$$

$$C_1 = 5.504 * 10^1 + (8.095 * 10^3)SOC - (7.700 * 10^1)SOC^2 - (3.165 * 10^4)SOC^3 + (7.318 * 10^4)SOC^4 - (4.150 * 10^4)SOC^5 \quad (16)$$

$$C_2 = 7.248 * 10^1 + (3.620 * 10^3)SOC + (4.052 * 10^3)SOC^2 - (3.499 * 10^4)SOC^3 + (5.173 * 10^4)SOC^4 - (2.451 * 10^4)SOC^5 \quad (17)$$

3. Resultados y Discusión

Banco de pruebas

El banco de pruebas consiste en una base para pilas AAA conectada a una carga electrónica programable "BK Precision 8502", la cual se programó para pulsos de 30 segundos a corriente constante de 0.6 A, se utilizó un osciloscopio Tektronix MSO2014 configurado para un muestreo en pantalla de 400 segundos y un filtro pasa bajas digital a 14 Hz. Los datos de las pruebas se guardaron en una memoria USB en formato CSV con una longitud de 125 000 muestras.

La batería que se probó es de níquel - metal hidruro (Ni-MH, por sus siglas en inglés) en tamaño AAA de marca Steren con voltaje nominal de 1.2 V y capacidad nominal de 1100 mAh, en su primer ciclo. Se dejó descansar la batería aproximadamente 10 minutos entre cada prueba. Sin embargo, es posible utilizar cualquier tipo de batería. Al finalizar las pruebas, se obtuvieron 110 pulsos hasta llegar a la capacidad de la batería en aproximadamente 550 mAh utilizando la ecuación [18](#).

$$Cap = \frac{ItN}{3600} \quad (18)$$

Donde:

Cap : Capacidad de la batería en mAh.

I : Corriente del pulso en mA. (600).

t : Tiempo de pulso en s. (30).

N : Cantidad de pulsos. (110).

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros obtenidos. En las figuras [3-414](#) a [3-619](#) se observa la tendencia de cada parámetro respecto al SOC.

Tabla 4.1 Relación de Parámetros.

SOC	Voc	R ₀	R ₁	R ₂	C ₁	C ₂
0.98182	1.308	0.10667	0.36504	0.03593	777.65924	49.88055
0.97273	1.3	0.10667	0.31754	0.02324	906.34219	281.1655
0.95455	1.292	0.10667	0.53299	0.02318	883.87470	323.8318
0.9	1.26	0.10667	0.38079	0.02381	1838.26159	542.0981
0.8	1.252	0.30667	0.54078	0.02802	1847.31899	769.4917
0.69091	1.268	0.12	0.6226	0.00771	1145	902.5
0.65455	1.252	0.12	0.38501	0.02884	1411.12483	1040.05211
0.6	1.244	0.10667	0.25092	0.02771	2112.25630	902.07288
0.55455	1.236	0.10667	0.35754	0.02760	1566.25136	935.21094
0.5	1.236	0.10667	0.36303	0.02512	1597.66905	905.89398
0.45455	1.236	0.10667	0.38056	0.03549	1550.35615	1074.26491
0.4	1.232	0.10667	0.37295	0.03446	1555.17785	960.98612
0.35455	1.232	0.10667	0.2529	0.01002	1123	1001
0.3	1.224	0.12	0.33726	0.03781	1512.18149	925.58731
0.25455	1.224	0.17333	0.40619	0.03259	1157.10432	920.56392
0.2	1.216	0.12	0.40355	0.03884	1189.43680	772.44875
0.15455	1.208	0.12	0.40627	0.04870	1353.77868	616.03520
0.1	1.2	0.12	0.82105	0.06358	757.44587	393.17655
0.05455	1.184	0.14667	0.95463	0.08548	366.63439	292.46894
0.00909	1.144	0.16	2.11152	0.46506	139.23587	114.86778

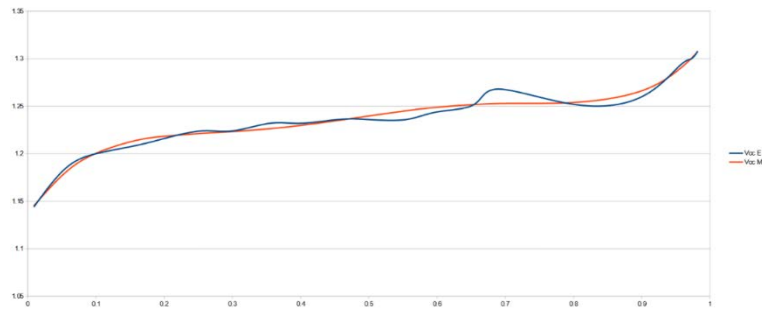


Figura ~~143.4~~ Comparación V_{OC} experimental vs modelo.

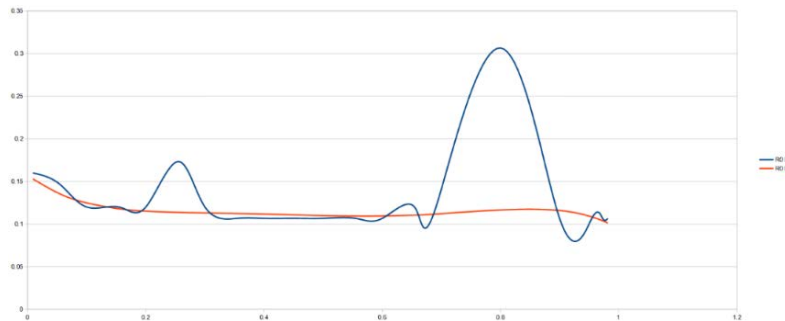


Figura ~~3-215~~ Comparación R_0 experimental vs modelo.

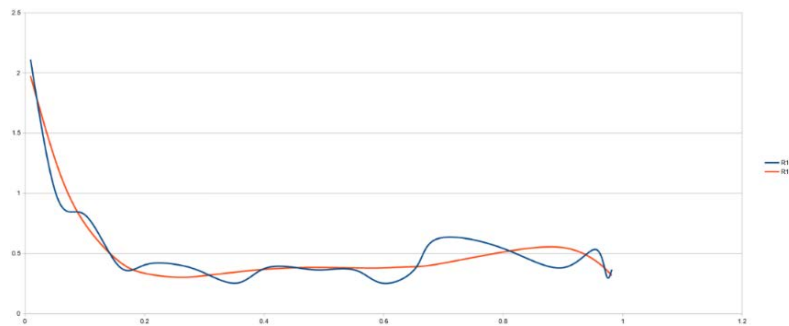


Figura ~~3-316~~ Comparación R_1 experimental vs modelo.

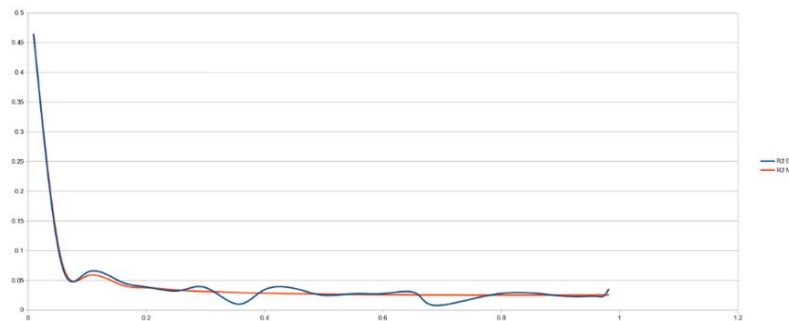


Figura ~~3-417~~ Comparación R_2 experimental vs modelo.

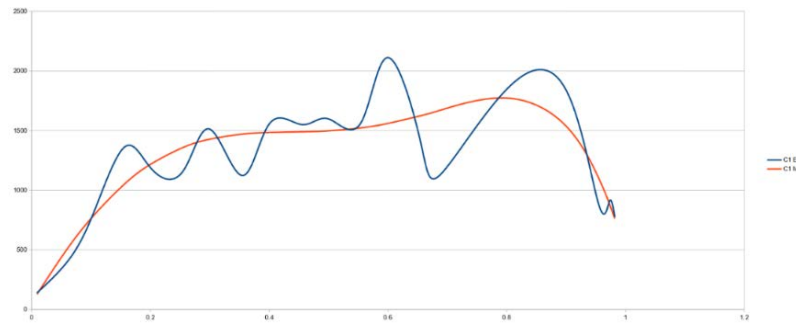


Figura 3.518 Comparación C_1 experimental vs modelo.

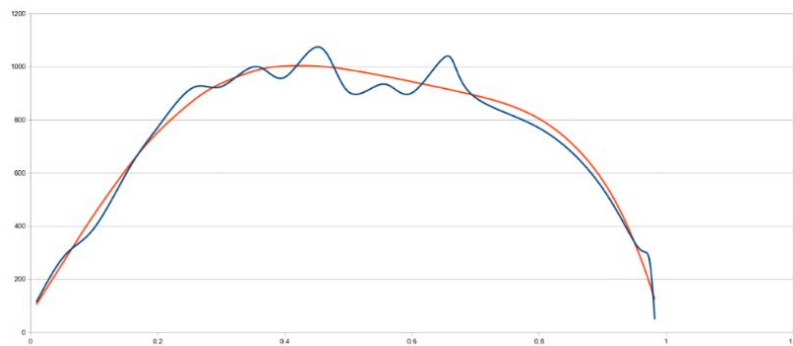


Figura 3.619 Comparación C_2 experimental vs modelo.

Al tener un comportamiento más real de la batería, se aprecia en la figura 3.720 que los datos atípicos corresponden a la primera prueba del día mientras que la segunda y tercera prueba del día mantienen la tendencia, demostrando un comportamiento del V_{OC} más real para corrientes de descarga de 0.6 A.



Figura 3.720 Comparación V_{OC} experimental vs modelo, datos completos.

Para el resto de los parámetros no se apreciaron datos atípicos correspondiente a la primera prueba del día, por lo que parece que esperar 10 minutos entre prueba y prueba es suficiente para parametrizar R_0, R_1, R_2, C_1 y C_2 .

En las figuras 3.821, 3.922 y 3.1023 se muestra la comparación entre los datos experimentales con los SOC a 90, 50 y 10. En el estado de relajación se observa un error mínimo, sin embargo, en el estado del pulso, se observa que el error al 10% de SOC es menor que en 90% de SOC. Es importante resaltar que, durante las pruebas, no se pudo tener un control adecuado de la temperatura, midiendo ésta en un rango de 26 °C a 31.7 °C. Esto podría ser la explicación de la variación en algunos parámetros y que al parecer afecta en mayor medida en las capacitancias, mientras que para las resistencias muestra un error despreciable.

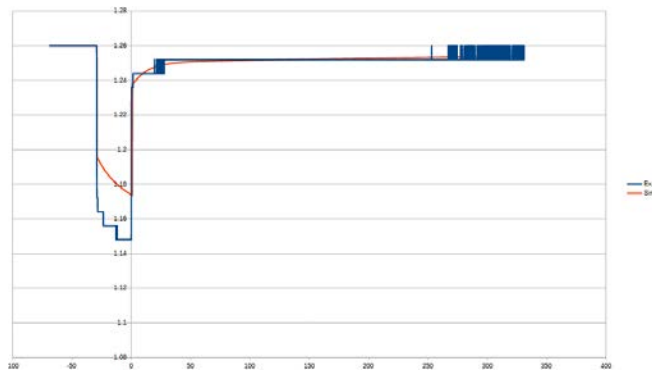


Figura 3.821 Comparación entre datos experimentales y simulación a 90% de SOC.

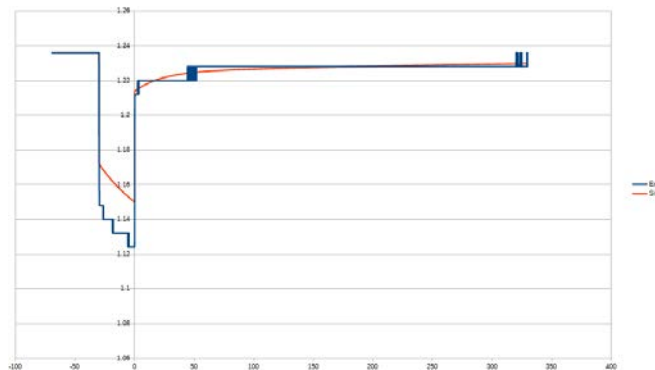


Figura 3.922 Comparación entre datos experimentales y simulación a 50% de SOC.

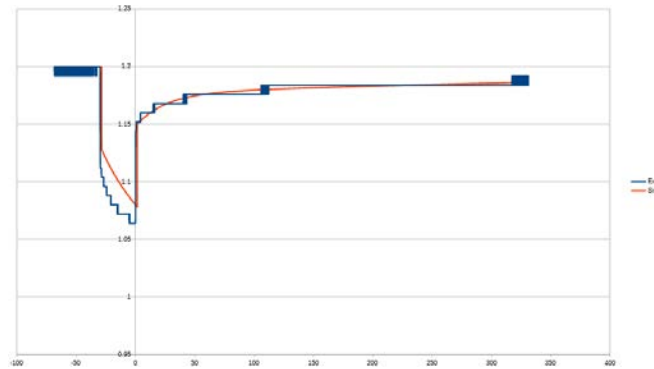


Figura 3-1023 Comparación entre datos experimentales y simulación a 10% de SOC.

En un inicio se había estimado que se obtendrían 220 pruebas, sin embargo, se realizaron la mitad por la descarga prematura de la batería. Es probable que la capacidad real de la batería sea la mitad de la marcada y que debido al almacenamiento se haya deteriorado. El tiempo entre pruebas y/o la temperatura afecten los datos obtenidos.

4. Conclusiones

Con el incremento del uso de las baterías en una gran diversidad de aplicaciones, con lo que se requiere que sean seguras y confiables. Al requerir un modelo para la estimación de parámetros de una batería en operación y prevenir accidentes, se presentó un modelado detallado de una batería Ni-MH.

En este modelado detallado se observó que el tiempo entre pruebas puede ser de al menos 10 minutos sin afectar los parámetros de resistencias ni capacitancias. Así mismo, se observó que no es requerido un control preciso de la temperatura ambiental, aunque es deseable que varíe lo menos posible, en un rango no mayor de 5 °C.

Este artículo fue apoyado por el TecNM bajo el proyecto No. 10166.21-P.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., & Huet, F., (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.

- [2] Bustos, R., Siddique, A. R. M., Cheema, T., Gadsden, S. A., & Mahmud, S., (2018). State of charge and parameter estimation of electric vehicle batteries.
- [3] Claude, F., Becherif, M., & Ramadan, H. S., (2017). Experimental validation for Li-ion battery modeling using Extended Kalman Filters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25509-25517.
- [4] Fotouhi, A., Auger, D. J., Propp, K., Longo, S., & Wild, M., (2016). A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium-Sulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1008-1021.
- [5] How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. H., & Ker, P. J., (2019). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *Ieee Access*, 7, 136116-136136.
- [6] Hossain, M., Saha, S., Haque, M. E., Arif, M. T., & Oo, A. M. T., (2019). A parameter extraction method for the Thevenin equivalent circuit model of Li-ion batteries. In *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-7.
- [7] Huang, C. S., & Chow, M. Y., (2016). Accurate Thevenin's circuit-based battery model parameter identification. In *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 274-279. IEEE.
- [8] Jiang, S., (2011). A parameter identification method for a battery equivalent circuit model, No. 2011-01-1367. SAE Technical Paper.
- [9] Liu, C., Liu, W., Wang, L., Hu, G., Ma, L., & Ren, B., (2016). A new method of modeling and state of charge estimation of the battery. *Journal of Power sources*, 320, 1-12.
- [10] Ma, Y., Zhou, X., Li, B., & Chen, H., (2016). Fractional modeling and SOC estimation of lithium-ion battery. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 3(3), 281-287.
- [11] Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M., Stroe, D. I., & Teodorescu, R., (2018). Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Applied sciences*, 8(5), 659.

- [12] Xiao, R., Shen, J., Li, X., Yan, W., Pan, E., & Chen, Z., (2016). Comparisons of modeling and state of charge estimation for lithium-ion battery based on fractional order and integral order methods. *Energies*, 9(3), 184.
- [13] Zheng, L., (2018). Development of lithium-ion battery state estimation techniques for battery management systems. Doctoral dissertation.
- [14] Zou, Y., Hu, X., Ma, H., & Li, S. E., (2015). Combined state of charge and state of health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 273, 793-803.