

CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO BMS BASADO EN BATERÍAS DE LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

CHARACTERIZATION OF A PILOT BMS SYSTEM BASED ON LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS

Guevara-Ramírez Álvaro César¹, Jarquín-Flores Héctor Javier², Cruz-Valdiviezo Alfredo³, Silva-Cruz Eric Mario⁴, Lastre Domínguez Carlos Mauricio⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v9i1.445>

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. alvaro.guevara@itoaxaca.edu.mx, 0009-0008-1279-6911

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. hector.jarquin@itoaxaca.edu.mx, 0009-0004-7342-838X

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. alfredo.cruz@itoaxaca.edu.mx, 0009-0002-3489-5116

⁴Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. eric.cruz@itoaxaca.edu.mx, 0000-0002-0496-9682

⁵Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. carlos.lastre@itoaxaca.edu.mx, 0000-0003-2737-7644

Resumen -- Se presenta una metodología para un sistema de gestión de baterías (BMS) abierto usando baterías LiFePO₄ en vehículos eléctricos. En la fase experimental, se instrumenta un módulo de 12 V–15 Ah con Raspberry Pi Pico e INA219, calibrado con un multímetro y registrado en CSV/SQLite, calculando energía por Δt real. El Estado de Carga (SOC) se estima con un enfoque híbrido que combina curva OCV–SOC para LFP y conteo Coulomb con un filtro, útil en la región plana. Se desarrolla un entorno de simulación para un paquete de 48 V–20 Ah (16S) con modelo Thévenin, para evaluar rendimiento en diferentes ciclos y comparar KPIs: energía, pérdidas I²R, voltaje mínimo y error en SOC, respecto a un banco de pruebas. En pruebas de banco, con carga de 10 Ω (~15 W), se observó coherencia óhmica y estabilidad menor al 2%. La simulación mostró errores en SOC de 1.6–2.4% (MAE) y 2.4–3.1% (RMSE), con márgenes de tensión adecuados. La arquitectura propuesta es reproducible, portátil para SBC y escalable a un pack 16S con sensado y aislamiento adecuados.

Palabras Clave: Battery Management System, INA219, LiFePO₄, modelo de Thévenin, Raspberry Pi Pico, SOC.

Abstract -- An open BMS for LiFePO₄ batteries in EVs is presented. An experimental setup uses a 12 V–15 Ah module with Raspberry Pi Pico and INA219, calibrated against a multimeter, recording data in CSV/SQLite and calculating energy via real Δt . A hybrid SOC estimation combines OCV–SOC curve and Coulomb counting with a filter, effective in flat regions. A simulation for a 48 V–20 Ah pack with a Thévenin model assesses performance

across different cycles, comparing energy, I²R losses, voltage, and SOC error against a test bench. Bench tests with a 10 Ω load showed less than 2% stability. Simulations yielded SOC errors of 1.6–2.4% (MAE) and 2.4–3.1% (RMSE). The architecture is reproducible, portable to SBC, and scalable to 16S packs with appropriate sensing and isolation.

Key words – Battery Management System, INA219, LiFePO₄, Raspberry Pi Pico, SOC, Thevenin model.

INTRODUCCIÓN

Un sistema administrador de baterías del inglés Battery Management System (BMS) es responsable de preservar la seguridad operativa del sistema electroquímico, monitorizar variables críticas (tensión, corriente, temperatura), estimar estados latentes como el estado de carga del inglés State of Charge (SOC) y el estado de salud del inglés State of Health (SOH), y aplicar estrategias de protección y balanceo que extiendan autonomía y vida útil del paquete de baterías [1][2][3][4]. En aplicaciones vehiculares, estas funciones deben ejecutarse con baja latencia y alta trazabilidad de datos [5][6][7]. Dentro de las químicas de Li-ion, LiFePO₄(LFP) destaca por su estabilidad térmica y ventana de operación segura [8][9][10][11]. En [12] se proporciona una revisión de las tecnologías clave y tendencias futuras, esenciales para abordar la sostenibilidad en vehículos eléctricos.

No obstante, su relación OCV–SOC presenta un tramo central relativamente plano que limita la observabilidad

del estado a partir de la tensión medida, especialmente bajo carga. En consecuencia, los métodos exclusivamente voltimétricos resultan insuficientes y deben complementarse con integración de corriente (conteo de coulomb) y mecanismos de reanclaje durante reposo o tras cargas completas [13][14][15][16]. Adicionalmente, efectos de histéresis, la dependencia con la tasa de carga/descarga y la interacción térmica introducen sesgos si no se modelan explícitamente [17][18][19]. Este artículo presenta una metodología integrada para diseño, instrumentación y validación de un BMS orientado a vehículos eléctricos con LFP, que abarca: (i) una instrumentación experimental económica y reproducible a 12~V con adquisición por I2C y registro trazable; (ii) una cadena de estimación basada en un SOC híbrido que fusiona conteo de coulomb con anclajes OCV--SOC mediante un filtro complementario; y (iii) un banco digital con modelo de Thévenin de un polo para un pack 48~V--20~Ah (16S), con evaluación en ciclos para escenarios urbanos, extraurbanos y mixtos con su respectiva regeneración. El hilo conductor es la coherencia físico-eléctrica de las mediciones, la reproducibilidad del flujo de datos y la compatibilidad con ejecución en hardware embebido. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes:

- Estimador Híbrido de SOC de Precisión: Desarrollo de un algoritmo híbrido Coulomb + OCV para baterías LFP con bajo error MAE aprox. 1.6–2.4.
- Simulación de un paquete de 48 V mediante un modelo de Thévenin en un polo para simular un paquete de 48 V-20 Ah en ciclos de conducción reales.
- Implementación de un sistema BMS a pequeña escala.

DESARROLLO

Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó batería LFP de 12 V, 15 Ah, dispositivo INA219 [20] con resistencia shunt de 0.1 Ω , resistencia de carga de 10 Ω de 15 W, pantalla LCD 20x4 vía PCF8574 [21], bus I2C.

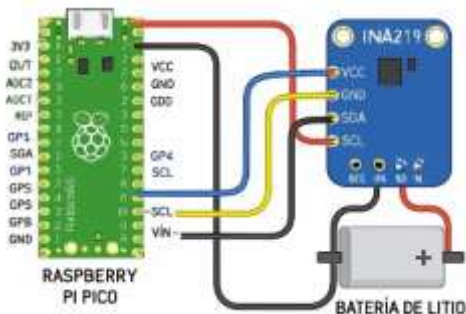


Figura 1. Esquemático del BMS.
Fuente. Elaboración propia.

El microcontrolador principal es el Raspberry PI PICO [22] basado en el chip RP2040 [23]. En la figura 1. Se describe un esquema general del uso del hardware para el desarrollo de este trabajo de investigación. En cuanto al software, se trabajó con la plataforma MicroPython.

Modelo Matemático para estimación del SOC

Para la estimación híbrida de SOC, nos basamos en el modelo general de coulombimetría definido en los trabajos [24] y [25]. Este modelo se define por medio de la ecuación (1),

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{100}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde C_{nom} es la capacidad efectiva medida en amperios-hora (Ah), $SOC(t_0)$ es el estado de carga inicial y la corriente $I(\tau)$ es la corriente instantánea positiva durante descarga. Para la implementación discreta bajo el paso de tiempo Δt se considera la ecuación (2),

$$\hat{S}_k^{coul} = \hat{S}_{k-1} - \frac{100 I_k \Delta t}{C_{nom} (3600)} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde $\hat{S}_k^{coul}$ es el SOC estimado por coulombimetría en el instante discreto k e I_k es la corriente medida (positiva en descarga), $\hat{S}_k$ corresponde al SOC estimado híbrido, obtenido de la fusión entre el estimador coulombimétrico y el anclaje voltimétrico. El índice k denota el instante de tiempo discreto y Δt el paso de integración en segundos. Para el anclaje voltimétrico se emplea una tabla OCV-SOC descrita en el trabajo [26], donde se analiza por celda LFP interpolando linealmente para obtener $\hat{S}_k^{ocv}$ a partir de la tensión de pack V_k con N celdas en serie $v_{celda} = V_k/N$. Este valor de tensión promedio por celda se asocia al correspondiente punto de la curva OCV-SOC, permitiendo así relacionar la ecuación (2) con el comportamiento voltimétrico. Por lo tanto, el estado de carga discreto se define por medio de la ecuación (3)

$$\hat{S}_k = \alpha_k \hat{S}_k^{coul} + (1 - \alpha_k) \hat{S}_k^{ocv} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde $\hat{S}_k \in [0,100]$ y $\alpha_k \in [0,1]$ el cual pondera mayor peso en Coulomb bajo carga-regeneración y mayor peso a OCV en reposo. Se reacla durante el reposo prolongado si se cumple la siguiente expresión descrita por la ecuación (4),

$$|I_k| < I_{rest}, \left| \frac{\Delta V}{\Delta t} \right| < \varepsilon_v \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde I_{rest} representa el umbral máximo de corriente para considerar reposo (típicamente menor a 0.1A), ε_v es el límite de variación temporal de tensión permitido (por ejemplo, 1mV/s), $\left| \frac{\Delta V}{\Delta t} \right|$ corresponde al gradiente de tensión medido en la ventana de observación, esta evaluación de desarrolla durante el T_{rest} definido como el tiempo

mínimo consecutivo en el que la batería permanece sin carga ni descarga activa. Durante este periodo, la corriente del sistema es prácticamente nula y la tensión terminal tiende a estabilizarse, lo que permite considerar que la batería ha alcanzado su estado de reposo eléctrico. Para suprimir los impulsos proporcionados en las ecuaciones (2) y (3) se emplea filtro promedio móvil con ventanas de cinco y 10 muestras para las variables voltaje V y corriente I .

Modelo matemático para batería

En este trabajo se adoptó un modelo equivalente de Thévenin de un polo con R_0 en serie y filtro constituido por R_1 y C_1 a nivel pakk 16S, [26]. La tensión terminal es determinada por las ecuaciones (5) y (6),

$$V_k = (N) \cdot (OCV) \cdot (S_k) - I_k R_0 - V_{RC,k} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde,

$$V_{RC,k} = V_{RC,k-1} + \Delta t \left(\frac{V_{RC,k-1}}{R_1 C_1} + \frac{I_k}{C_1} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

Los parámetros base se resumen en la tabla 1, donde se maneja un tiempo $\tau = R_1 C_1$ que comprende la relación transitoria. Este modelo genera las trazas de las variables de voltaje V , corriente I y potencia P .

Tabla 1. Mediciones de referencia y reales del sistema.

Magnitud	Valor	Unidad
Capacidad Q_{nom}	20	Ah
Celdas en serie N	16	--
Resistencia serie R_0	0.050	Ω
Rama RC: R_1 y C_1	0.020 1000	Ω F
Constante de tiempo $\tau = R_1 C_1$	20	s
Paso de integración Δt	1	s
Peso complementario α	0.85	--

Fuente. Elaboración propia.

Escenarios de conducción y métricas de desempeño

En este contexto, se consideran tres escenarios o ciclos de conducción: urbano, extraurbano y mixto, que es la combinación de ambos. Bajo ciertas condiciones de la corriente I_k y el paso del tiempo Δt la energía neta E_{net} del sistema se calcula en KPIs por medio de la ecuación (7),

$$E_{net} = \sum_{k=1}^K \frac{V_k I_k \Delta t}{3600} \quad \text{Ec. (7)}$$

Las pérdidas se calculan a partir de la ecuación (8),

$$Pérdida = \sum_{k=1}^K \frac{I_k^2 R_0 \Delta t}{3600} \quad \text{Ec. (8)}$$

Finalmente los errores MAE y RMSE para la estimación del SOC $\hat{S}_k$, tanto para la $\hat{S}_k$ real, consideran las ecuaciones (9) y (10)

$$MAE_{SOC} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\hat{S}_k - S_k|, \quad \text{Ec. (9)}$$

$$RMSE_{SOC} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{S}_k - S_k)^2} \quad \text{Ec. (10)}$$

Seudocódigos para la simulación del SOC

Los tres pseudocódigos describen un algoritmo de simulación de un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) centrado en un paquete LFP. El Algoritmo 1 gestiona la inicialización de los datos, definiendo la estructura del paquete (parámetros del modelo de Thévenin:

R_0, R_1, C_1 y estableciendo la función OCV_de_SOC, que utiliza interpolación lineal sobre una tabla de referencia para obtener el voltaje de celda a circuito abierto.

Algoritmo 1: Estructuras de Datos y OCV-SOC

```

1. Require: Curva OCV_TABLE
2. Ensure: Estructura PaqueteLiFePO4 definida y función OCV_de_SOC disponible
3. Estructura PaqueteLiFePO4
4. { Q_Ah, N_series
5. R0, R1, C1;
6. Q_Ah_actual, SOC_pc, V_rc; }
7. Function OCV_de_SOC(SOC_pc, OCV_table):
8. if SOC_pc está en OCV_TABLE then
9. Return V_OCV
10. else
11. Return interpolación_lineal(OCV_TABLE, SOC_pc)
    end if
5. End Function

```

El Algoritmo 2 contiene el núcleo de la simulación SIMULAR_PASO, que, para cada Δt , actualiza el voltaje de polarización V_{rc} mediante una integración del modelo de Thévenin, calcula el voltaje terminal y estima el Estado de Carga (SOC) utilizando el conteo de Coulomb a partir de la corriente. Finalmente, el Algoritmo 3 se encarga de la ejecución del ciclo, iterando la función SIMULAR_PASO a lo largo de un perfil de corriente predefinido, y acumulando métricas clave de rendimiento (KPIs), como la energía neta, las pérdidas $I^2 R$, y los límites de voltaje, para generar el log completo de la simulación

Algorithm 2 Integración en el tiempo discreto

```

1. Require: dt, I, Pack
2. Ensure: Pack, V_term
3. Function SIMULAR_PASO(dt, I, Pack):
4.  $V_{ocv\_pack} \leftarrow \frac{Pack.N\_series}{Pack.SOC\_pc} \times$ 
    $OCV\_de\_SOC(Pack.SOC\_pc)$ 
5.  $dV_{rc} \leftarrow ((I / Pack.C1) - (Pack.V_{rc} / (Pack.R1 \times$ 
    $Pack.C1))) \times dt$ 
6.  $Pack.V_{rc} \leftarrow Pack.V_{rc} + dV_{rc}$ 
7.  $V_{terminal} \leftarrow V_{ocv\_pack} - Pack.V_{rc} -$ 
    $(Corriente\_I \times Pack.R0)$ 
8.  $Pack.Q\_Ah\_actual \leftarrow Pack.Q\_Ah\_actual -$ 
    $(Corriente\_I \times dt / 3600)$ 
9.  $Pack.SOC\_pc \leftarrow (Pack.Q\_Ah\_actual / Pack.Q\_Ah)$ 
    $\times 100$ 
10. Return V_terminal
11. End Function

```

Algorithm 3 ejecución y registro de ciclos

```

1. Require: Pack, PCT, dt.
2. Ensure: Log_Dat, KPI
3. Function ejecutar_ciclo(Pack, PCT, dt):
4. Log_Dat  $\leftarrow$  lista_vacia
5. Inicializar(Ener, Perdi, V_min, V_max)
6. for each (I_com, Dur) in PCT:
7.   Tiem  $\leftarrow$  0
8.   while Tiempo_actual < Duracion do
9.      $V_{actual} \leftarrow \text{simular\_paso}(dt, I\_com, Pack)$ 
10.     $Potencia\_W \leftarrow V_{actual} \times I\_comando$ 
11.     $Ener \leftarrow Ener + (Pot \times dt / 3600)$ 
12.     $Per \leftarrow Per + ((I\_com^2 \times Pack.R0) \times dt / 3600)$ 
13.     $V_{min} \leftarrow \min(V_{min}, V_{act})$ 
14.     $V_{max} \leftarrow \max(V_{max}, V_{act})$ 
15.    Añadir a Log_Datos: (Tiem, V_act, I_com,
      Ener, Pack)
16.    Tiem  $\leftarrow$  Tiem + dt
17.   end while
18. end for
19.  $KPIs \leftarrow \{Ener, Per, V_{min}, V_{max},$ 
    $Pack.SOC\_pc\}$ 
20. Return Log_Datos, KPI
21. End Function

```

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Calibración y adquisición del BMS

Como se muestra en la figura 2, se muestra el banco de pruebas empleado para la caracterización a 12 V, con el lazo de alta corriente enrutado a través del shunt del INA219 y de la interfaz I²C, junto con la pantalla LCD. Los rangos típicos de tensión, corriente, potencia y SOC obtenidos bajo la carga resistiva de 10 Ω están descritos en la tabla 2. En cuanto a la trazabilidad, se presenta un cuadro comparativo de los valores reales, los simulados y el error relativo, promediando las lecturas reales (Ver tabla 3). En la tabla 4, se resume el presupuesto de incertidumbre. Las cuales están asociadas con tolerancias de carga del 5%, caída de tensión en cables y/o

conectores, offset de corriente en el INA219, ruido de cuantización del ADC y efecto Jitter en el muestreo. Con una carga nominal de 10 Ω y una tensión de 12.8 aproximadamente, en la tabla 5 se resumen los promedios desviaciones estándar y fluctuación (p95) de las variables eléctricas describiendo la estabilidad temporal del paso de tiempo Δt , tensión V , corriente I y finalmente la potencia P .

Tabla 2. Mediciones típicas promediadas. Involucradas

Magnitud	Rango	Fuente
Tensión (V)	12.7-12.9	INA219
Corriente (A)	1.18-1.32	INA219
Potencia (W)	14.7-17.0	$V \times I$
SOC (%)	88-92	Híbrida (OCV + Coulomb)

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3. Mediciones de referencia y reales del sistema.

Magnitud	Referencia	INA219 (Real)	Error Rel. (%)
Tensión (V)	12.82	12.64	1.4
Corriente (A)	1.28	1.25	2.3
Potencia (W)	16.4	15.8	3.7

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 4. Presupuesto de incertidumbre.

Métrica	Contribución típica
Tolerancia de carga (5%)	0.5–0.8W
Caidas de tensión en cables/conectores	10–40 mV
Offset de corriente INA219	2–8 mA
Ruido de cuantización del ADC	± 1 LSB (tensión/corriente)
Jitter de muestreo	<10ms (P95)

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 5. Estadísticas de la estabilidad temporal de las variables.

Magnitud	Promedio μ	Desviación estándar σ	p95
Paso de tiempo Δt (s)	0.99	0.03	1.05
Tensión V (V)	12.80	0.06	12.91
Corriente I (A)	1.26	0.03	1.31
Potencia P (W)	15.95	0.32	16.54

Fuente. Elaboración propia.

Registro de variables y coherencia óhmica

Como se puede observar en la figura 3, la implementación del circuito arroja datos que están muestreados a una frecuencia de 1 Hz presenta la estabilidad de las variables de voltaje y corriente con una variación menor al 2% en un intervalo de 60 segundos. Además, se puede verificar la coherencia óhmica con la carga nominal de $10\ \Omega$ y las diferentes variables involucradas como voltaje, corriente, potencia y porcentaje del SOC. Esto se verificó mediante la ley de Ohm. Adicionalmente, de manera indirecta se puede calcular la energía acumulada con base al tiempo real asociado al paso de tiempo Δt .

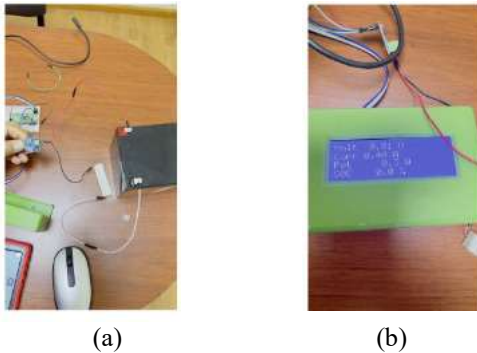


Figura 2. Desarrollo experimental. (a) Banco de pruebas con el módulo LFP 12 V y INA219. (b) Mediciones de variables eléctricas muestreadas a 1 kHz.
Fuente. Elaboración propia.

Desarrollo de simulaciones para escenarios urbanos, extraurbanos y mixtos.

A partir de las ecuaciones (1) a (6), se desarrollan simulaciones en tres escenarios: urbano, extraurbano y mixto. El resumen de duración, corriente máxima I_{max} , corriente promedio $\bar{I}$ y fracción de energía generada se presenta en la tabla (6).

Tabla 6. Descripción del tiempo de duración en segundos, corriente máxima, corriente promedio y generación energética

Escenario	Dur. (s)	I_{max} (A)	$\bar{I}$ (A)	Regen (%)
Urbano	200	30	12.5	12
Extraurbano	370	35	18.0	10
Mixto	300	32	14.0	15

Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla (7), se describen los diferentes KPIS en ciclos para los escenarios mencionados.

Tabla 7. KPIS en ciclos. Urbano, extraurbano y mixto

Escenario	E_{net} (Wh)	V_{min} (V)	P_e (Wh)	SOC_f (%)
Urbano	80	45	8	93
Extraurbano	140	44	12	89

Mixto	110	44.6	9.6	91
-------	-----	------	-----	----

Fuente. Elaboración propia.

En las figuras (3), (4) y (5) se pueden visualizar los diferentes comportamientos del SOC a partir de la comparación entre el SOC verdadero y el SOC estimado correspondientes a los diferentes escenarios Urbano, Extraurbano y mixto.

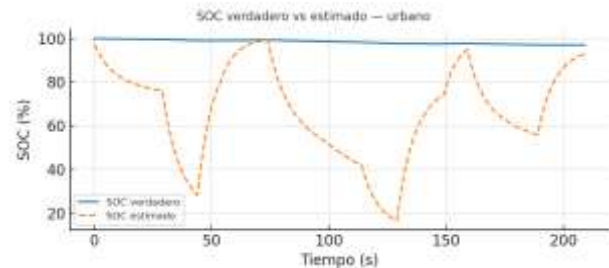


Figura 3. SOC verdadero vs. estimado en escenario urbano.
Fuente. Elaboración propia.

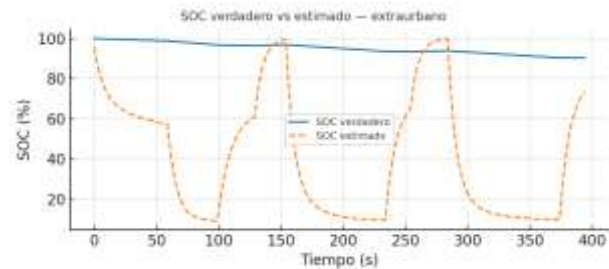


Figura 4. SOC verdadero vs. estimado en escenario extraurbano.
Fuente. Elaboración propia.

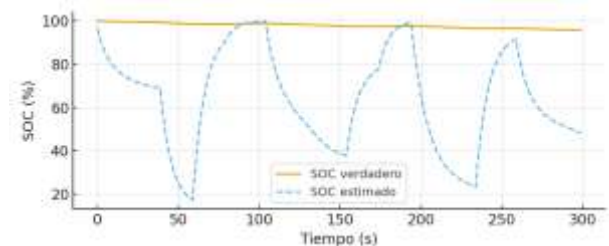


Figura 5. SOC verdadero vs. estimado en escenario mixto.
Fuente. Elaboración propia.

Las trayectorias de tensión y corriente están representadas en las figuras (6), (7) y (8), mientras que la potencia instantánea y la energía aparecen en las figuras (9), (10) y (11). En la tabla 7, se visualizan los KPIS agregados que están asociados con la energía neta, voltaje mínimo, pérdidas, SOC final y energía almacenada.

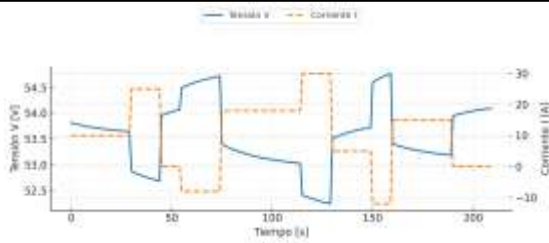


Figura 6. Escenario urbano: tensión (línea continua) y corriente (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

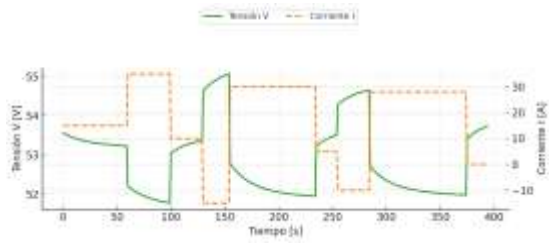


Figura 7. Escenario extraurbano: tensión (línea continua) y corriente (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

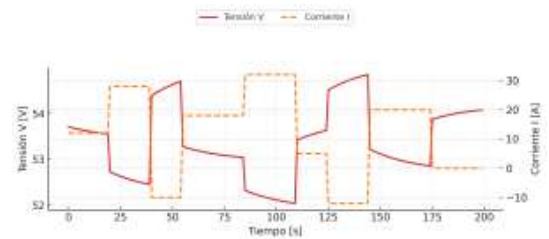


Figura 8. Escenario mixto: tensión (línea continua) y corriente (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

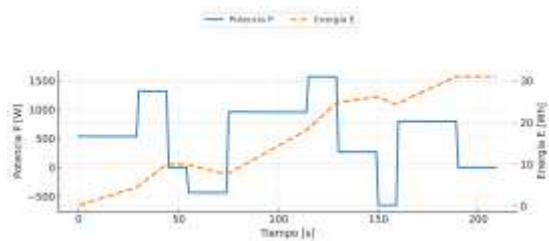


Figura 9. Escenario urbano: Potencia (línea continua) y energía (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

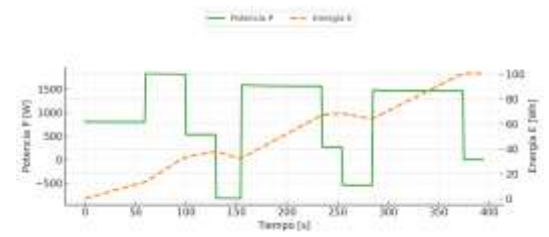


Figura 10. Escenario extraurbano: Potencia (línea continua) y energía (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

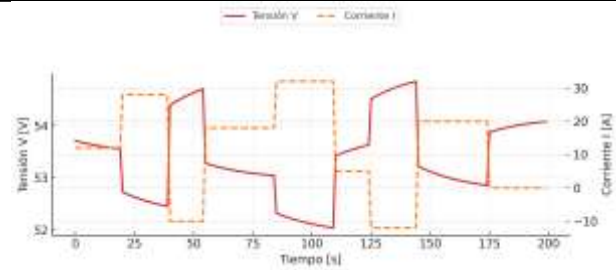


Figura 11. Escenario mixto: potencia (línea continua) y energía (línea punteada).

Fuente. Elaboración propia.

Análisis de desempeño del modelo y márgenes de tensión y pérdidas

Desarrollada la simulación en los escenarios urbano, extraurbano y mixto, se procedió al análisis de desempeño del modelo por medio del error cuadrático medio (RMSE), error medio absoluto (MAE), error relativo (E_{re}) y anclaje (OCV) tensión en circuito abierto (OCV_a) para re anclajes o puntos de corrección del SOC. En la tabla (8), podemos observar los índices de desempeño de los diferentes escenarios.

Tabla 8. Desempeño del error del modelo asociado al SOC y la energía.

Escenario	MAE (%)	RMSE	OCV_a	E_{re} (%)
Urbano	1.6	2.4	3	1.3
Extraurbano	2.4	3.1	2	1.9
Mixto	1.9	2.7	3	1.5

Fuente. Elaboración propia.

Dado el cálculo de los errores, se analizaron los diferentes márgenes y pérdidas asociadas al SOC. Para el umbral *under-voltage* (UV) de 42 V a nivel pack de 2.625 V/celda, los márgenes resultantes y las pérdidas se describen en la tabla 9. Aquí observamos que el V_{min} en el escenario extraurbano es el más bajo presentando un menor margen a UV. El ciclo urbano presenta pérdidas menores debido a las corrientes medias más bajas.

Tabla 9. Tensión mínima margen a UV y pérdidas con umbral UV 42 [V].

Escenario	MAE (%)	RMSE	OCV_a	E_{re} (%)
Urbano	1.6	2.4	3	1.3
Extraurbano	2.4	3.1	2	1.9
Mixto	1.9	2.7	3	1.5

Fuente. Elaboración propia.

El polo único asociado con Thévenin, representa adecuadamente la dinámica a corto y mediano plazo con un costo computacional bajo, el cual es suficiente para estimación línea. La precisión depende del OCV por

celda y de la identificación de R_0 , R_1 y C_1 . En cuanto a la robustez del modelo, la combinación Coulomb+OCV reduce la región plana (LFP) y la deriva-integradora. Esto permite reanclar el SOC en fases de reposo o tras cargas completas. Los errores observados son compatibles con requisitos de monitoreo en prototipos vehiculares. En cuanto al desarrollo experimental y la escalabilidad, se requiere sensado con mayor margen en modo común aislado debido al efecto Hall. Además es necesario un divisor protegido para la tensión de bus, fusibles coordinados junto con el contactor y precarga. Se podrían considerar otras opciones como la Raspberry Pi 5 [33], el cual podría habilitar registros persistentes adecuados y aprovechar sistemas *dashboarding* como *Grafana-flash* o *Node-Red*. Finalmente, las limitaciones del desarrollo de esta investigación está asociadas a la simulación. Este desarrollo no incluye parámetros esenciales como los gradientes térmicos y la degradación.

CONCLUSIONES

El modelado y simulación se aplicaron a un sistema de gestión de baterías abierto con química LiFePO₄, garantizando trazabilidad desde un banco de 12 V hasta un pack de 48 V–20 Ah (16S). Se estableció una cadena de adquisición fiable con control de tiempo, coherencia óhmica y estabilidad menor al 2%, además de calibraciones con multímetro. El software calculó potencia y energía para estimar el Estado de Carga (SOC). La simulación con el modelo de Thévenin y técnicas de Coulombimetría y OCV–SOC mostró errores en SOC de 1.6–2.4% (MAE) y 2.4–3.1% (RMSE). Reanclajes en reposo estabilizaron la deriva. Los KPIs, como E_{net} y V_{min} , confirmaron márgenes adecuados para la tensión. La arquitectura es compatible con plataformas de bajo consumo, como Raspberry Pi 5, y es escalable a vehículos híbridos. En conjunto, los resultados respaldan el uso de un estimador híbrido, por su bajo costo computacional y respaldo en la literatura técnica.

Como trabajo futuro, se considerarán más iteraciones y modelos térmicos con mayor robustez, tales como el *lumped* y la validación con *drive-cycles*.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las instalaciones del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Oaxaca, que avaló el proyecto con la clave 2355.25-P.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Battery Management Systems (BMS) Overview," 2024. Disponible en: <https://www.nrel.gov/transportation/battery-management-systems.html>
- [2] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain y A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834–854, 2017.
- [3] Krishna, T. N. V., et al. "Powering the future: Advanced battery management systems (BMS) for electric vehicles." *Energies* 17.14 (2024): 3360.
- [4] Pattnaik, Manasi, Manoj Badoni, and H. P. Singh. "Analysis of electric vehicle battery system." *2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*. IEEE, 2021.
- [5] Thangavel, Saravanakumar, et al. "A comprehensive review on electric vehicle: battery management system, charging station, traction motors." *IEEE access* 11 (2023): 20994-21019.
- [6] Ramkumar, M. Siva, et al. "Review on Li-Ion Battery with Battery Management System in Electrical Vehicle." *Advances in Materials Science and Engineering* 2022.1 (2022): 3379574.
- [7] Challoor, Ali Fali, et al. "Energy and battery management systems for electrical vehicles: A comprehensive review & recommendations." *Energy Exploration & Exploitation* 42.1 (2024): 341-372.
- [8] Habib, AKM Ahasan, et al. "Lithium-ion battery management system for electric vehicles: constraints, challenges, and recommendations." *Batteries* 9.3 (2023): 152.
- [9] Guo, Jian, and Fangming Jiang. "A novel electric vehicle thermal management system based on cooling and heating of batteries by refrigerant." *Energy Conversion and Management* 237 (2021): 114145.
- [10] Komsijska, Lidiya, et al. "Critical review of intelligent battery systems: Challenges, implementation, and potential for electric vehicles." *Energies* 14.18 (2021): 5989.
- [11] Lipu, Molla Shahadat Hossain, et al. "Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals." *Batteries* 8.9 (2022): 119.
- [12] Ali, Muhammad Umair, et al. "Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation." *Energies* 12.3 (2019): 446.
- [13] Ali, Muhammad Umair, et al. "Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation." *Energies* 12.3 (2019): 446.
- [14] Lin, Qian, et al. "Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries." *Energy* 183 (2019): 220-234.

- [15] Hossain Lipu, Molla Shahadat, et al. "Smart battery management technology in electric vehicle applications: Analytical and technical assessment toward emerging future directions." *Batteries* 8.11 (2022): 219.
- [16] Xiong, Rui, Linlin Li, and Jinpeng Tian. "Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods." *Journal of Power Sources* 405 (2018): 18-29.
- [17] X. Hu, S. Li y H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
- [18] H. He, R. Xiong y H. Guo, "Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries," *Applied Energy*, vol. 89, pp. 413–420, 2012.
- [19] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1: Background," *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 252–261, 2004.
- [20] O. Tremblay y L.-A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications," en *Proc. IEEE VPPC*, 2009, pp. 1–5.
- [21] Texas Instruments, "INA219: Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I²C Interface," Datasheet. Disponible en: <https://www.ti.com/product/INA219>
- [22] Raspberry Pi Ltd., "RP2040 Datasheet," 2024. Disponible en: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>
- [23] Raspberry Pi Ltd., "Raspberry Pi Pico Datasheet," 2024. Disponible en: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>
- [24] NXP Semiconductors, "PCF8574/PCF8574A Remote 8-bit I/O expander for I²C-bus," Datasheet. Disponible en: https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/PCF8574_PCF8574A.pdf
- [25] Raspberry Pi Ltd., "Raspberry Pi 5 Product Brief," 2023. Disponible en: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>
- [26] Texas Instruments, "INA219: Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I²C Interface," Datasheet. Disponible en: <https://www.ti.com/product/INA219>

Supervisión, Software, Metodología, Redacción y Validación	Hector Javier Jarquín Florés
Conceptualización y Redacción	Alfredo Cruz Valdiviezo
Conceptualización y Visualización	Eric Mario Silva Cruz
Administración del proyecto, Validación, Supervisión, Software y Redacción	Carlos Mauricio Lastre Domínguez

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



Tabla de Roles de Contribución

Rol	Autor (es)
Administración del proyecto, Validación y Recursos	Álvaro César Guevara Ramírez